

**Titre:** Étude de sensibilité du comportement dynamique d'un manipulateur robotique  
Title: manipulator robotique

**Auteurs:** Anh-Tu Nguyen, & Romano M. De Santis  
Authors:

**Date:** 1987

**Type:** Rapport / Report

**Référence:** Nguyen, A.-T., & De Santis, R. M. (1987). Étude de sensibilité du comportement dynamique d'un manipulateur robotique. (Rapport technique n° EPM-RT-87-02).  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/9828/>

### Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/9828/>  
PolyPublie URL:

**Version:** Version officielle de l'éditeur / Published version

**Conditions d'utilisation:** Tous droits réservés / All rights reserved  
Terms of Use:

### Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

**Institution:** École Polytechnique de Montréal

**Numéro de rapport:** EPM-RT-87-02  
Report number:

**URL officiel:**  
Official URL:

**Mention légale:**  
Legal notice:

25 FEV. 1987

EPM/RT-87-2

ETUDE DE SENSIBILITE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE  
D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE

Par

Anh-Tu (Nguyen), Ing. M. Sc. A.

Projet dirigé par

Romano M. (DeSantis) professeur

Département de Génie Electrique

Ecole Polytechnique de Montréal  
Janvier (1987)

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'auteur.

Dépôt légal, 2e trimestre 1984  
Bibliothèque nationale du Québec  
Bibliothèque nationale du Canada

Pour ce procurer une copie de ce document, s'adresser au:

Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal  
Ecole Polytechnique de Montréal  
Case postale 6079, Succursale A  
Montréal (Québec) H3C 3A7  
(514) 340-4000

Compter 0,10\$ par page (arrondir au dollar le plus près) et ajouter 3,00\$ (Canada) pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Régler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'Ecole Polytechnique de Montréal. Nous n'honoreronos que les commandes accompagnées d'un paiement, sauf s'il y a eu entente préalable dans le cas d'établissements d'enseignement, de sociétés ou d'organismes canadiens.

## SOMMAIRE

Ce projet poursuit un double objectif: le développement d'une étude de la sensibilité du comportement dynamique d'un système robotique aux variations des paramètres et à la complexité du modèle utilisé; la conception, l'implantation et la validation d'un progiciel permettant une simulation de ce même comportement. Le système robotique à l'étude est constitué d'un manipulateur de type rotatif avec deux degrés de liberté, et d'un contrôleur de type PID avec action d'anticipation.

Les questions relatives à la sensibilité concernent essentiellement le choix du réglage des paramètres du contrôleur; l'influence des intercouplements, des forces centripètes et de Coriolis; ainsi que l'utilisation d'un modèle réduit. Le progiciel développé est implanté sur un micro-ordinateur IBM-PC en langage BASIC, et caractérisé par une grande flexibilité d'application.

## ABSTRACT

The purpose of this study is of a dual nature: firstly, the analysis of the sensitivity of a robotic system, in presence of variations in its control parameters, and with respect to the complexity of the model employed. Secondly, the design, implementation and validation of a software which allows to simulate the dynamic behavior of the model. The system considered consists of a two degree of freedom robotic manipulator with a feedforward-PID type loop controller.

Questions related to the sensitivity problem essentially imply the selection of control parameter values; the effects due to the coupling inertia between joints, centripetal force, and Coriolis force; and also the use of a simplified model. The software developed operates on an IBM-PC micro-computer and is written in BASIC. It provides great flexibility for dynamic system simulations.

## REMERCIEMENTS

Ce projet a été développé dans le cadre du projet FCAR-CRP-378-76, "Analyse et Commande des Processus Industriels par Ordinateur: Application au Réseaux Electrique", financé par le Ministère de l'Education du Québec. Il a également bénéficié du support financier de l'octroi A-8244, "Sensibilité, Stabilité et Commande Optimale des Systèmes", du Conseil de Recherches en Sciences et en Génie du Canada.

L'auteur tient à exprimer vivement sa reconnaissance envers son directeur de recherche, Dr. Romano M. De Santis, professeur du département de Génie Electrique, pour sa collaboration et ses précieux conseils dans la réalisation de ce travail.

L'auteur tient à remercier ses collègues pour leurs contributions au niveau de suggestions et d'échanges d'idées pendant l'élaboration de ce mémoire. Un grand merci aussi au Cosigma Inc., filiale informatique de Lavalin Inc., pour tout support tant au niveau matériel que moral.

Il lui est agréable également de mentionner la compréhension et encouragements des membres de la famille tout au long de ce travail. Ils constituent donc une dette de gratitude.

## TABLE DES MATIERES

	Page
<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>xii</b>
<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Présentation .....	1
1.2 Choix de l'outil .....	4
1.3 Plan du mémoire .....	6
<b>CHAPITRE 2 - DYNAMIQUE ET COMMANDE .....</b>	<b>7</b>
2.1 Introduction .....	7
2.2 Description du manipulateur .....	8
2.3 Structure de la commande .....	9
2.4 Développement mathématique .....	13
2.5 Modèle réduit .....	21
2.6 Modélisation d'un contrôleur de boucle .....	24
<b>CHAPITRE 3 - DESCRIPTION DU PROGICIEL SIMAR .....</b>	<b>28</b>
3.1 Introduction .....	28
3.2 Structure fonctionnelle vue par l'utilisateur	30
3.3 Structure interne .....	39
3.4 Sous-routines principales .....	47

	Page
<b>CHAPITRE 4 - ANALYSE D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE .....</b>	<b>50</b>
4.1 Introduction .....	50
4.2 Description du système à l'étude .....	52
4.3 Détermination des gains de régulation .....	57
4.4 Exemple 1 (Effet d'intercouplement) .....	58
4.5 Exemple 2 (Performance vs configuration de de travail) .....	66
4.6 Exemple 3 (Validité des paramètres du modèle réduit) .....	70
4.7 Exemple 4 (Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail) ...	75
<b>CHAPITRE 5 - CONCLUSION .....</b>	<b>82</b>
5.1 Résultats obtenus .....	83
5.2 Extensions possibles .....	85
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>87</b>
<b>APPENDICE A - DIALOGUES OPERATEUR .....</b>	<b>90</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Manipulateur robotique .....	8
2.2 Structure de la commande .....	10
2.3 Modèle simplifié de l'ensemble manipulateur-contrôleur .....	22
2.4 Modèle réduit de l'ensemble manipulateur-contrôleur .....	23
2.5 Diagramme fonctionnel d'un contrôleur de boucle d'articulation .....	25
2.6 Fonctions caractéristiques de l'amplificateur...	26
2.7 Diagramme fonctionnel simplifié d'une boucle d'articulation .....	27
3.1 Schéma bloc vu par l'utilisateur .....	31
3.2 Schéma bloc de la structure interne de SIMAR ...	40
3.3 Module Principal .....	47
3.4 Module de Présentation .....	48
3.5 Module de Simulation .....	49
4.1 Configurations de travail .....	59
4.2 Comportement dynamique du système complet autour du point de travail $\theta_1=0, \theta_2=0$ (variations de .1 rad) .....	60
4.3 Comportement dynamique du système complet autour du point de travail $\theta_1=0, \theta_2=1.57$ (variations de .1 rad) .....	63

Figure	Page
4.4 Comportement dynamique du système complet autour du point de travail $\theta_1=0, \theta_2=0$ (variations de 1 rad) .....	64
4.5 Comportement dynamique du système complet autour du point de travail $\theta_1=0, \theta_2=1.57$ (variations de 1 rad) .....	65
4.6 Performance vs configuration de travail (variations de .1 rad) .....	67
4.7 Performance vs configuration de travail (variations de 1 rad) .....	69
4.8 Performance du système complet en utilisant les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variations de .1 rad) .....	71
4.9 Performance du système complet en utilisant les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variations de 1 rad) .....	73
4.10 Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains calculés basant sur config. A, variations de .1 rad) .....	76
4.11 Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains calculés basant sur config. B, variations de .1 rad) .....	78
4.12 Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains calculés basant sur config. A, variations de 1 rad) .....	80

Figure	Page
4.13 Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains calculés basant sur config. B, variations de 1 rad) .....	91
A.1 Menu principal .....	92
A.2 Assignation des paramètres .....	93
A.3 Paramètres du manipulateur .....	94
A.4 Paramètres du premier contrôleur .....	95
A.5 Paramètres du deuxième contrôleur .....	96
A.6 Paramètres de simulation .....	97
A.7 Simulation .....	98
A.8 Affichage des résultats .....	99
A.9 Exemple de graphiques #1 .....	100
A.10 Exemple de graphiques #2 .....	101
A.11 Exemple de graphiques #3 .....	102
A.12 Visualisation du robot .....	103
A.13 Sauvegarde des paramètres sur disque .....	104
A.14 Récupération des paramètres du disque .....	105

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
4.1 Paramètres géométriques et massiques du manipulateur .....	52
4.2 Paramètres du système de contrôle (contrôleur du premier segment) .....	53
4.3 Paramètres du système de contrôle (contrôleur du deuxième segment) .....	54
4.4 Paramètres propres à la configuration de travail (exemple type) .....	55
4.5 Configuration de travail et paramètres de contrôle du manipulateur (Config. A) .....	58
4.6 Configuration de travail et paramètres de contrôle du manipulateur (Config. B) .....	62
4.7 Comparaison de performance du système dans différentes configurations de travail .....	68
4.8 Performance du système complet avec les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variations de .1 rad) .....	72
4.9 Performance du système complet avec les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variations de 1 rad) .....	74
4.10 Performance du système dans les configurations A et B avec les valeurs de K calculées pour la config. A .....	77

Tableau	Page
4.11 Performance du système dans les configurations A et B avec les valeurs de K calculées pour la config. B .....	79

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Présentation

Ce travail est constitué de deux parties principales. La première consiste en l'analyse de sensibilité du comportement dynamique d'un manipulateur robotique, aux variations des paramètres de contrôle, et à la complexité du modèle utilisé. La deuxième concerne la conception, l'implantation et la validation d'un progiciel de simulation de ce même comportement.

Une étude de la sensibilité du comportement d'un manipulateur robotique vise à comprendre et à évaluer, avec le plus de clarté et de précision possible, les effets des variations de paramètres sur le comportement dynamique et statique du système. Ces variations, souvent difficilement contrôlables, sont dûes normalement à la variabilité des caractéristiques des composantes, à l'usure des éléments, à l'effet de l'environnement externe, à l'interaction avec d'autres systèmes, à l'imprécision des données calculées, et surtout à l'impossibilité de réaliser de façon précise les dispositifs de contrôle [5]. Une bonne compréhension et évaluation de ces effets représentent souvent un outil

indispensable à l'amélioration de la fiabilité et des indices de performance du système.

La littérature scientifique offre une grande variété de méthodes théoriques pour l'étude de la sensibilité. Ces méthodes sont, cependant, surtout adressées à des systèmes linéaires faiblement intercouplés et variants dans le temps [5]. De par ce fait, elles deviennent difficilement applicables à des manipulateurs qui sont d'habitude modélisés moyennant un système d'équations différentielles hautement nonlinéaires, fortement intercouplées et souvent caractérisées par des paramètres variants dans le temps [2] [6].

En vue de surmonter ces difficultés, notre approche sera marquée par une nature très pragmatique. Elle sera caractérisée par la modélisation, la simulation et l'analyse d'expériences simulées du comportement d'un manipulateur rotoïde planaire avec deux degrés de liberté et équipé d'un système de contrôle centré sur l'utilisation de servo-compensateur de type PID. Tout en étant d'une complexité relativement modérée et en permettant ainsi une analyse suffisamment claire et concluante, ce type de manipulateur illustre bien les traits saillants du comportement dynamique des robots industriels caractérisés par un ordre de complexité bien plus élevé [2][3][4][6].

Notre attention sera surtout retenue par l'influence sur ce comportement des forces d'intercouplement; l'importance de la configuration de travail du manipulateur; les effets des accélérations centripètes et de Coriolis; le rôle joué par les paramètres du système de contrôle tels que les gains, les niveaux de quantisation, les bruits de mesure, les niveaux des signaux de commande etc..

## 1.2 Choix de l'outil

Une analyse approfondie des éléments cités précédemment nécessite un grand nombre d'expériences de simulation; elle requiert aussi un contrôle absolu et une connaissance parfaite des modèles mathématiques et des algorithmes utilisés; elle doit pouvoir être axée sur l'application d'une grande variété de stratégies de commande, de mesure et de conditions d'opération.

L'ensemble de toutes ces exigences rend peu attrayante et mal adaptée une utilisation des simulateurs robotiques disponibles commercialement [11][12]. Malgré leur indéniable potentiel industriel, ces simulateurs sont d'habitude très couteux, nécessitent une implantation sur des ordinateurs puissants munis de périphériques sophistiqués, utilisent des éléments (modèles, stratégies de commande, systèmes de mesure, algorithmes..) qui ne sont pas toujours sous le contrôle direct de l'utilisateur.

Avec l'arrivée récente des micro-ordinateurs, plusieurs logiciels de simulation de caractère général sont rendus disponibles tels que ACES [22] sur le micro-ordinateur APPLE, MATLAB [10] sur l'ordinateur personnel IBM-PC. L'utilisateur a droit à un environnement de simulation interactif à un coût peu élevé, tout en jouissant d'un degré d'autonomie intéressant.

Cependant, vu que la présente étude est de nature spécifique et que la performance de calcul représente un critère de choix non négligeable, il s'avérait nécessaire de développer un progiciel qui soit à la fois flexible et spécialisé. De plus, il devra fournir une performance satisfaisante pour faciliter la tâche d'analyse qui nécessite un grand nombre d'expériences répétitives.

Tenant compte de ces critères, un progiciel a été conçu. Ce progiciel de simulation est implanté sur l'ordinateur personnel IBM-PC, en langage BASIC compilé, sous le système d'exploitation DOS [15] à [18]. Les techniques utilisées dans la réalisation de ce progiciel reposent principalement sur la modélisation par modèle de variables d'états, la programmation structurée, la conception modulaire, ainsi que la méthode d'intégration numérique par Runge-Kutta de quatrième ordre.

### 1.3 Plan du mémoire

Dans le contexte énoncé, il nous semble naturel de diviser ce mémoire en quatre parties; au chapitre 2, nous nous inspirons des techniques présentées dans [6] pour procéder au développement du modèle mathématique représentant le système robotique à l'étude ainsi que sa structure de commande; au chapitre 3 une description du progiciel SIMAR, l'outil qui a été développé pour donner support à l'analyse du système, est présentée pour faciliter la compréhension de la démarche technique; au chapitre 4 nous détaillons les différentes phases de l'analyse de sensibilité du système, mettant en relief les effets d'intercouplement, les indices de performance du système dans différentes configurations de travail, la validité des paramètres obtenus du modèle réduit, et la validité des paramètres en changeant les configurations de travail. Finalement, au chapitre 5 nous concluons l'étude présentée. La projection sur quelques extensions possibles au présent travail y est également mentionnée.

L'appendice A donne une description des dialogues opérateur pour une session de travail avec le progiciel SIMAR.

## CHAPITRE 2

### DYNAMIQUE ET COMMANDE

#### 2.1 Introduction

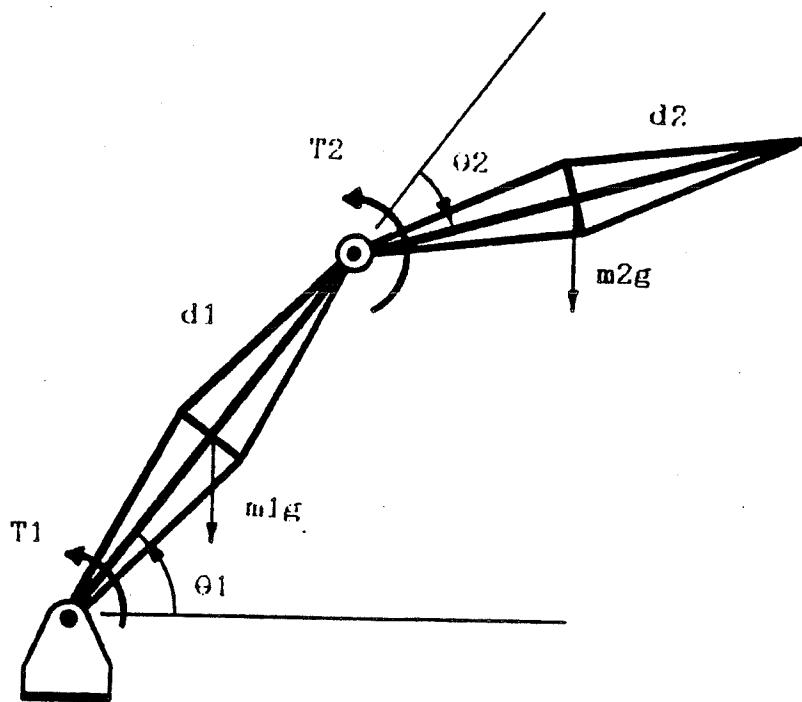
Dans un espace à deux dimensions, il s'avère nécessaire d'avoir deux degrés de liberté pour atteindre un point arbitraire dans un espace de travail donné. Et souvent, la géométrie d'un manipulateur à deux segments représente un sous-problème des manipulateurs dont l'architecture est plus complexe. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au cas d'un manipulateur robotique de type rotoïde avec deux segments articulés. Les paramètres de l'étude concernent:

- la description du manipulateur;
- la structure du système de commande (mesure, contrôle, action);
- les modalités de simulation (conditions initiales, sorties désirées, pas d'intégration et temps de simulation).

Un développement détaillé du modèle mathématique d'un tel système peut être retrouvé à la référence [6]. Etant donné l'importance d'un tel modèle dans le cadre de notre étude, nous en reprendrons les aspects essentiels.

## 2.2 Description du manipulateur

Le manipulateur robotique que nous étudions est un manipulateur du type **rotoïde** avec deux segments articulés tel qu'illusttré à la figure 2.1.



**Figure 2.1:** Manipulateur robotique

Dans le système considéré,  $\theta_1$  et  $\theta_2$  représentent les positions angulaires des segments,  $d_1$  et  $d_2$  représentent les longueurs des segments,  $m_1$  et  $m_2$  représentent les masses des segments,  $T_1$  et  $T_2$  représentent les couples appliqués aux articulations.

## 2.3 Structure de la commande

La structure de la commande consiste en trois parties: les capteurs, les contrôleurs et les actionneurs. La figure 2.2 illustre bien le schéma de principe de la structure de la commande du système de la figure 2.1.

### 2.3.1 Les capteurs

Les positions angulaires  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et les vitesses angulaires  $\dot{\theta}_1$ ,  $\dot{\theta}_2$  des segments du manipulateur sont mesurées par les capteurs avec gains respectifs  $KP_1$ ,  $KP_2$  et  $KS_1$ ,  $KS_2$ . Les mesures de positions et de vitesses peuvent donc être exprimées par:

$$Y_{11} = KP_1 \theta_1 \quad (2.1)$$

$$Y_{12} = KS_1 \dot{\theta}_1 \quad (2.2)$$

$$Y_{21} = KP_2 \theta_2 \quad (2.3)$$

$$Y_{22} = KS_2 \dot{\theta}_2 \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Les contrôleurs

Si nous appelons  $REF_1$  et  $REF_2$  les positions angulaires désirées des segments du manipulateur. Les erreurs de positions par rapport aux consignes sont alors données par:

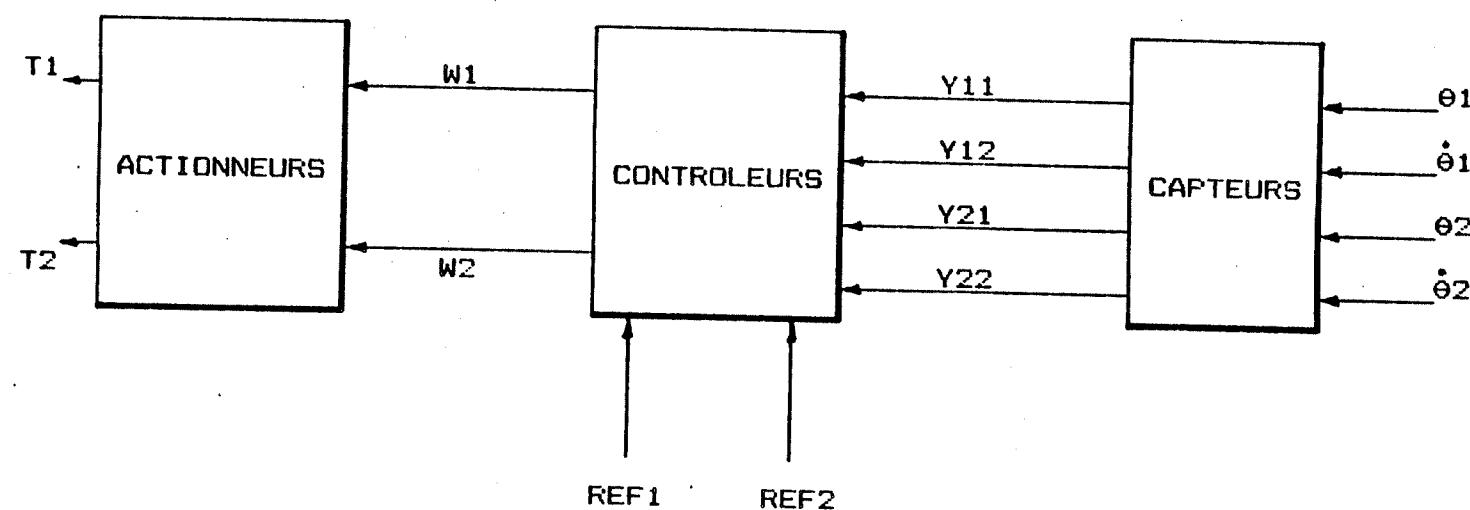


Figure 2.2: Structure de la commande

$$e_1 = Y_{11} / K_{P1} - \text{REF1} \quad (2.5)$$

$$\dot{e}_2 = Y_{21} / K_{P2} - \text{REF2} \quad (2.6)$$

On peut également déduire:

$$\dot{e}_1 = Y_{12} / K_{S1} \quad (2.7)$$

$$\dot{e}_2 = Y_{22} / K_{S2} \quad (2.8)$$

Les sorties des contrôleurs  $W_1$  et  $W_2$  peuvent être calculées facilement en respectant la loi de la commande linéaire:

$$W_1 = -K_{11} e_1 - K_{12} \dot{e}_1 - K_{13} \left. \begin{array}{l} e_1 dt + K_{14} \text{REF1} \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

$$W_2 = -K_{21} e_2 - K_{22} \dot{e}_2 - K_{23} \left. \begin{array}{l} e_2 dt + K_{24} \text{REF2} \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

où  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $K_{14}$  et  $K_{21}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{23}$ ,  $K_{24}$  représentent les gains des deux contrôleurs commandant les segments. Les gains  $K_{11}$  et  $K_{21}$  représentent les composantes proportionnelles (proportional control) qui sont essentielles pour assurer la stabilité du système. Les gains  $K_{12}$  et  $K_{22}$  représentent les composantes dérivées (rate control) qui sont utiles pour améliorer la réponse transitoire du système, et jouent également un rôle important quant à l'amélioration de la précision. Les gains  $K_{13}$  et  $K_{23}$  représentent les composantes intégrales

(reset control) qui sont en général essentielles pour atteindre un haut niveau de précision. Les gains K14 et K24 représentent les actions anticipatrices qui permettent de neutraliser la détérioration de la réponse transitoire due souvent à la présence de la composante intégrale. Le choix des valeurs de ces gains est expliqué plus en détail dans les références [7][8].

### 2.3.3 Les actionneurs

Dans l'hypothèse où les actionneurs sont strictement linéaires, les couples appliqués pourraient être exprimés par:

$$T_1 = W_1 \quad (2.11)$$

$$T_2 = W_2 \quad (2.12)$$

Si nous considérons la force de gravité exercée sur les segments ainsi que la friction au niveau des articulations (représentée par un coefficient de viscosité  $f$ ), les couples appliqués aux articulations, par les actionneurs, seront une fonction de  $(W, g, f)$ . Nous aurons donc:

$$T_1' = f (W_1, g, f_1) \quad (2.13)$$

$$T_2' = f (W_2, g, f_2) \quad (2.14)$$

## 2.4 Développement mathématique

A ce point, nous avons déjà complété les spécifications concernant l'architecture du modèle ainsi que la structure de la commande. Nous procémons maintenant à l'étude de la dynamique du modèle. Le manipulateur représente un système dynamique complexe; ainsi, l'étude sur la dynamique doit prendre une approche systématique pour résoudre le problème. Nous utilisons donc les équations de Lagrange [6] pour pouvoir obtenir les équations dynamiques des systèmes complexes, dans une forme relativement simple.

### 2.4.1 Energie cinétique

Nous appelons  $L_1$  l'énergie cinétique du premier segment articulé, et  $L_2$  du deuxième. L'énergie cinétique du système peut être exprimée en terme de  $L$ . Nous aurons donc:

$$L = L_1 + L_2 \quad (2.15)$$

où:

$$L_1 = (1/8) m_1 d_1^2 \dot{\theta}_1^2 + (1/2) I_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.16)$$

et:

$$\begin{aligned} L_2 = & (1/2) m_2 [d_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + (1/4) d_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ & + (1/2) d_1 d_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos\theta_2] \\ & + (1/2) I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

### 2.4.2 Équations de Lagrange

Afin d'obtenir les équations dynamiques pour les couples appliqués aux articulations, nous calculons les dérivés partielles de  $L$  par rapport à  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\dot{\theta}_1$  et  $\dot{\theta}_2$ . Les couples sont donc déterminés par:

$$T_1' = \frac{d}{dt} \left[ \frac{dL}{d\dot{\theta}_1} \right] - \frac{dL}{d\theta_1} \quad (2.18)$$

$$T_2' = \frac{d}{dt} \left[ \frac{dL}{d\dot{\theta}_2} \right] - \frac{dL}{d\theta_2} \quad (2.19)$$

En considérant la force de gravité exercée aux centres de masse des segments ainsi que la friction des articulations, par superposition nous pouvons calculer les couples requis pour compenser l'effet de ces contraintes de façon indépendante. Nous pouvons alors écrire:

$$T_1' = T_1 + T_{1g} + T_{1v} \quad (2.20)$$

$$T_2' = T_2 + T_{2g} + T_{2v} \quad (2.21)$$

$T_1$  et  $T_2$  sont des consignes de régulation et calculées à partir des équations (2.11) et (2.12).  $T_{1g}$  et  $T_{2g}$  sont des couples appliqués pour compenser l'effet de la gravité.  $T_{1v}$  et  $T_{2v}$  sont des couples appliqués pour compenser l'effet de la friction au niveau des articulations. Selon Horn [1], les couples  $T_{1g}$  et  $T_{2g}$  peuvent être calculés par:

$$T_{1g} = -g[(m_2 + (1/2)m_1)d_1 \cos\theta_1 + (1/2)m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2.22)$$

$$T_{2g} = -g[(1/2)m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2.23)$$

Nous appelons  $f_1$  et  $f_2$  les coefficients de viscosité des deux articulations, les couples  $T_{1v}$  et  $T_{2v}$  compensant l'effet de la friction peuvent être calculés par:

$$T_{1v} = -f_1 \dot{\theta}_1 + f_2 \dot{\theta}_2 \quad (2.24)$$

$$T_{2v} = -f_2 \dot{\theta}_2 \quad (2.25)$$

A partir des équations (2.15), (2.16) et (2.17) nous calculons les dérivées partielles de  $L$  par rapport à  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\dot{\theta}_1$  et  $\dot{\theta}_2$ . Nous aurons:

$$dL/d\theta_1 = 0 \quad (2.26)$$

$$dL/d\theta_2 = -(1/4)m_2 d_1 d_2 \dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin\theta_2 \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} dL/d\dot{\theta}_1 &= [(1/4)m_1 d_1^2 + m_2(d_1^2 + (1/4)d_2^2 \\ &+ (1/2)d_1 d_2 \cos\theta_2) + I_1 + I_2]\dot{\theta}_1 \\ &+ [m_2(d_2^2 + d_1 d_2 \cos\theta_2)/4 + I_2]\dot{\theta}_2 \quad (2.28) \end{aligned}$$

$$= D_{11} \dot{\theta}_1 + D_{12} \dot{\theta}_2 \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} dL/d\dot{\theta}_2 &= [m_2(d_2^2 + d_1 d_2 \cos\theta_2)/4 + I_2]\dot{\theta}_1 \\ &+ [(1/4)m_2 d_2^2 + I_2]\dot{\theta}_2 \quad (2.30) \end{aligned}$$

$$= D_{21} \dot{\theta}_1 + D_{22} \dot{\theta}_2 \quad (2.31)$$

Ensuite, nous calculons les dérivés temporelles des expressions (2.29) et (2.31). Nous obtenons:

$$\begin{aligned} d/dt [dL/d\dot{\theta}_1] &= D_{11} \ddot{\theta}_1 + D_{12} \ddot{\theta}_2 \\ &\quad - (1/2)m_2 d_1 d_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 \\ &\quad - (1/4)m_2 d_1 d_2 \dot{\theta}_2^2 \sin\theta_2 \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} &= D_{11} \ddot{\theta}_1 + D_{12} \ddot{\theta}_2 + D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ &\quad + D_{122} \dot{\theta}_2^2 \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$d/dt [dL/d\dot{\theta}_2] = D_{21} \ddot{\theta}_1 + D_{22} \ddot{\theta}_2 \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} &\quad - (1/4)m_2 d_1 d_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 \\ &= D_{21} \ddot{\theta}_1 + D_{22} \ddot{\theta}_2 + D_{211} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

En combinant les équations (2.26) et (2.33) tel qu'indiqué par l'équation (2.18) nous obtenons le couple appliqué à la première articulation:

$$T_1' = D_{11} \ddot{\theta}_1 + D_{12} \ddot{\theta}_2 + D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + D_{122} \dot{\theta}_2^2 \quad (2.36)$$

En procédant de la même manière avec les équations (2.27) et (2.35), selon l'équation (2.19) nous obtenons l'équation pour le couple appliqué à la deuxième articulation:

$$T_2' = D_{21} \ddot{\theta}_1 + D_{22} \ddot{\theta}_2 + D_{211} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (2.37)$$

Dans ces équations, le coefficient de la forme  $D_{ii}$  est connu comme l'inertie effective à l'articulation  $i$ . Ainsi, une accélération à l'articulation  $i$  causera un couple, à cette articulation, égal à  $[D_{ii} \ddot{\theta}_i]$ . Le coefficient de la forme  $D_{ij}$  est connu comme l'inertie de couplage entre les articulations  $i$  et  $j$ . Alors, une accélération à l'articulation  $i$  ou  $j$  causera un couple à l'articulation  $j$  ou  $i$ , égal à  $[D_{ij} \ddot{\theta}_i]$  ou  $[D_{ij} \ddot{\theta}_j]$  respectivement. Le terme  $[D_{ijj} \dot{\theta}_j^2]$  représente la force centripète exercée sur l'articulation  $i$  à cause de la vitesse de l'articulation  $j$ . Le terme  $[D_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k]$  représente la force de Coriolis exercée sur l'articulation  $i$  à cause des vitesses des articulations  $j$  et  $k$  (référence [2]). En comparant les équations (2.28), (2.30), (2.32), (2.34) avec (2.29), (2.31), (2.33), (2.35) respectivement, nous obtenons les valeurs des coefficients.

#### Les inerties effectives:

$$D_{11} = (1/4)m_1 d_1^2 + m_2(d_1^2 + (1/4)d_2^2 + d_1 d_2 \cos\theta_2) + I_1 + I_2 \quad (2.38)$$

$$D_{22} = m_2 d_2^2 / 4 + I_2 \quad (2.39)$$

#### Les inerties de couplage:

$$D_{12} = D_{21} = m_2(d_2^2/4 + d_1 d_2 \cos\theta_2/2) + I_2 \quad (2.40)$$

Les coefficients d'accélération centripète:

$$D_{122} = - (1/2)m_2 d_1 d_2 \sin\theta_2 \quad (2.41)$$

$$D_{211} = + (1/2)m_2 d_1 d_2 \sin\theta_2 \quad (2.42)$$

Le coefficient d'accélération de Coriolis:

$$D_{112} = - m_2 d_1 d_2 \sin\theta_2 \quad (2.43)$$

Si nous voulons savoir quelles seront les accélérations étant donné les couples appliqués, nous devons trouver  $\ddot{\theta}_1$  et  $\ddot{\theta}_2$  à partir des équations (2.36) et (2.37). Le problème inverse se présente comme:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_1' & -D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - D_{122} \dot{\theta}_2^2 \\ T_2' & -D_{211} \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

L'accélération des articulations est alors déterminée par:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= a D_{22}(T_1' - D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - D_{122} \dot{\theta}_2^2) \\ &\quad - a D_{12}(T_2' - D_{211} \dot{\theta}_1^2) \end{aligned} \quad (2.45)$$

et:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 &= -a D_{21}(T_1' - D_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - D_{122} \dot{\theta}_2^2) \\ &\quad + a D_{11}(T_2' - D_{211} \dot{\theta}_1^2) \end{aligned} \quad (2.46)$$

où:

$$a = 1 / (D_{11} D_{22} - D_{12} D_{21})$$

#### 2.4.3 Modèle des variables d'état

Les résultats du développement à la section 2.4.2 permettent de constituer le modèle d'état complet du système à l'étude. Nous définissons:

$$x_{11} = \theta_1 \quad (2.47)$$

$$x_{12} = \dot{\theta}_1 \quad (2.48)$$

$$x_{13} = \int (\theta_1 - \text{REF1}) \quad (2.49)$$

$$x_{21} = \theta_2 \quad (2.50)$$

$$x_{22} = \dot{\theta}_2 \quad (2.51)$$

$$x_{23} = \int (\theta_2 - \text{REF2}) \quad (2.52)$$

Le modèle d'état peut s'écrire:

$$\dot{x}_{11} = x_{12} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{12} = & a D_{22}(T_1' - D_{112} x_{12} x_{22} - D_{122} x_{22}^2) \\ & - a D_{12}(T_2' - D_{211} x_{12}^2) \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\dot{x}_{13} = x_{11} - \text{REF1} \quad (2.55)$$

$$\dot{x}_{21} = x_{22} \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{22} = & - a D_{21}(T_1' - D_{112} x_{12} x_{22} - D_{122} x_{22}^2) \\ & + a D_{11}(T_2' - D_{211} x_{12}^2) \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\dot{x}_{23} = x_{21} - \text{REF2} \quad (2.58)$$

où:

$$D_{11} = (1/4)m_1 d_1^2 + m_2[d_1^2 + (1/4)d_2^2 + d_1 d_2 \cos x_{21}] + I_1 + I_2$$

$$D_{12} = m_2(d_2^2/4 + d_1 d_2 \cos x_{21}/2) + I_2$$

$$D_{21} = m_2(d_2^2/4 + d_1 d_2 \cos x_{21}/2) + I_2$$

$$D_{22} = (1/4)m_2 d_2^2 + I_2$$

$$D_{112} = -m_2 d_1 d_2 \sin x_{21}$$

$$D_{122} = - (1/2)m_2 d_1 d_2 \sin x_{21}$$

$$D_{211} = + (1/2)m_2 d_1 d_2 \sin x_{21}$$

$$a = 1 / (D_{11} D_{22} - D_{12} D_{21})$$

$$T_1' = T_1 + T_{1g} + T_{1v}$$

$$T_2' = T_2 + T_{2g} + T_{2v}$$

$$T_1 = -K_{11}(x_{11}-REF1) - K_{12} x_{12} - K_{13} x_{13} + K_{13} K_{14} \text{REF1}$$

$$T_{1g} = -g[(m_2 + (1/2)m_1)d_1 \cos x_{11} + (1/2)m_2 d_2 \cos(x_{11} + x_{21})]$$

$$T_{1v} = -f_1 x_{12} + f_2 x_{22}$$

$$T_2 = -K_{21}(x_{21}-REF2) - K_{22} x_{22} - K_{23} x_{23} + K_{23} K_{24} \text{REF2}$$

$$T_{2g} = -g[(1/2)m_2 d_2 \cos(x_{11} + x_{21})]$$

$$T_{2v} = -f_2 x_{22}$$

## 2.5 Modèle réduit

Afin de pouvoir ramener le modèle de l'ensemble manipulateur-contrôleur développé dans la section précédente à une forme réduite, il serait utile de simplifier le modèle en négligeant quelques-uns des termes non-linéaires du modèle complet. Ainsi, en ne tenant pas compte des couples engendrés par les accélérations centripète et de Coriolis nous parvenons au modèle simplifié représenté à la figure 2.3. De plus, en négligeant les effets d'intercouplement d'une articulation sur l'autre, nous obtenons le modèle réduit tel qu'illustré à la figure 2.4.

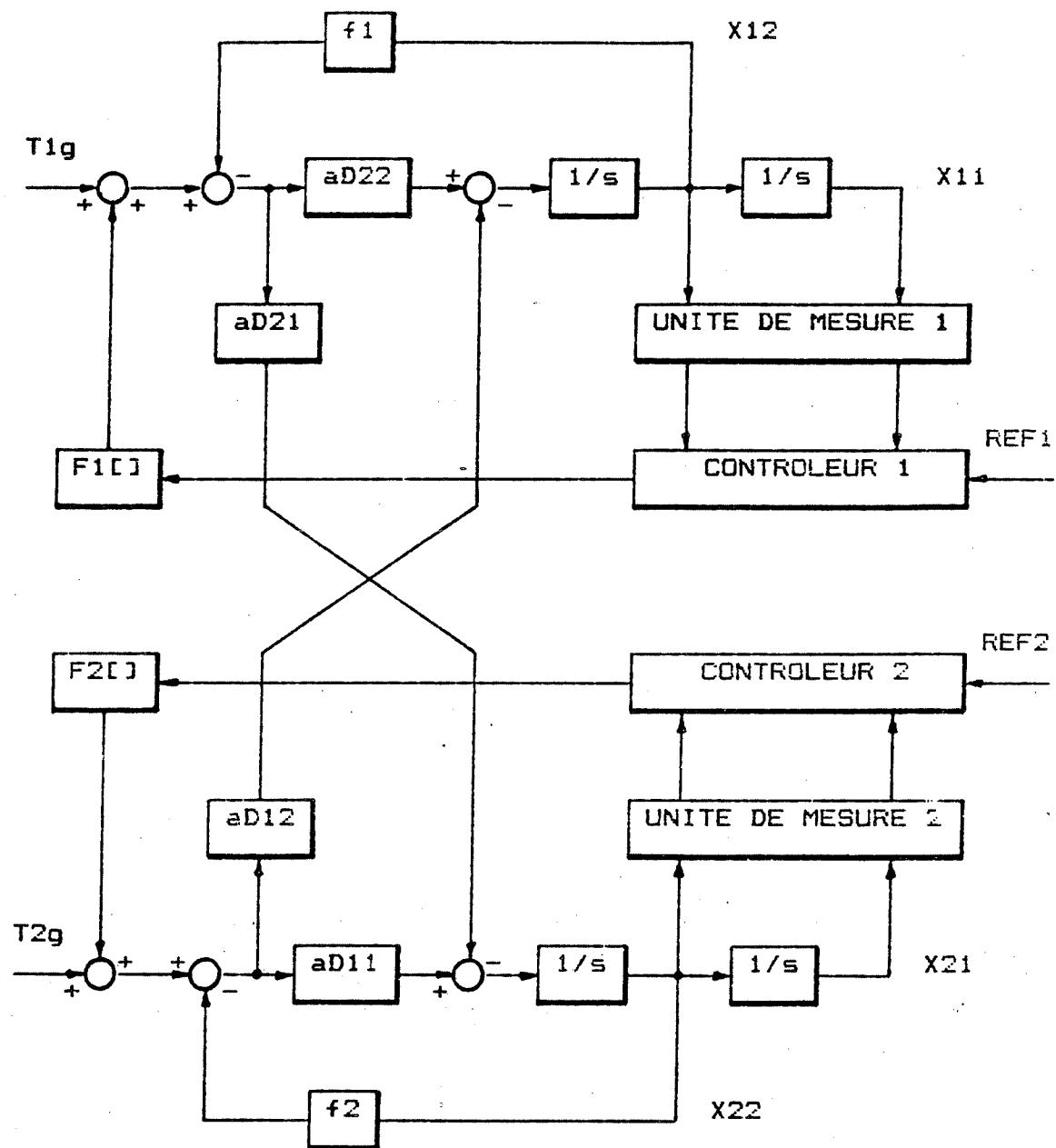
Si nous assumons une simple coupure des liens d'intercouplement entre les deux boucles du modèle simplifié de la figure 2.3, nous obtenons les paramètres  $K_i$  et  $T_i$  du modèle réduit comme suit:

$$K_i = 1 / f_i$$

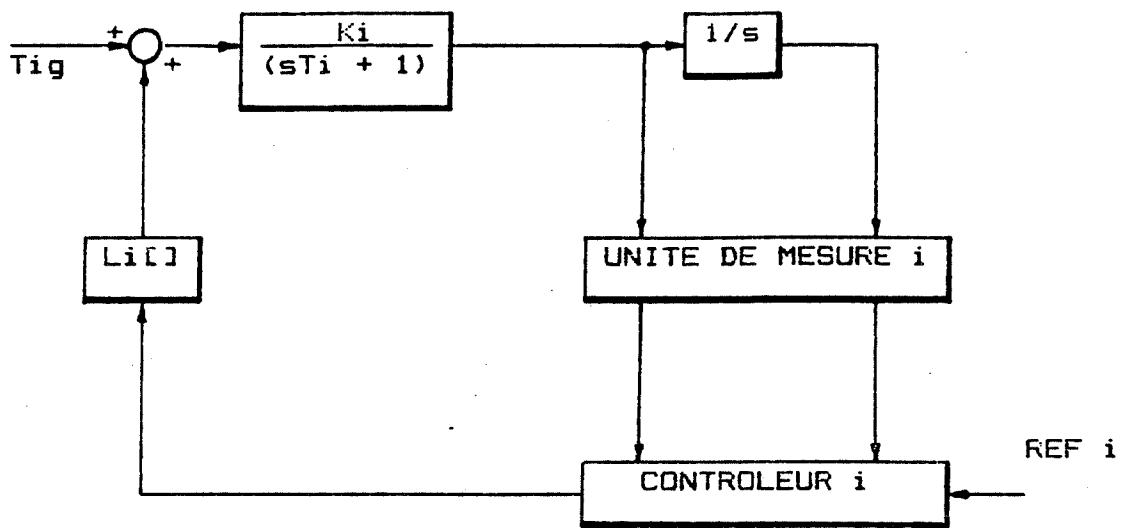
$$T_1 = 1 / a D_{22} f_1$$

$$T_2 = 1 / a D_{11} f_2$$

Dans le cas où un segment du manipulateur est en déplacement à la fois, les paramètres  $K_i$  et  $T_i$  du modèle réduit prendront la forme telle que présentée à la figure 2.4.



**Figure 2.3:** Modèle simplifié de l'ensemble manipulateur-contrôleur



$$K_i = \frac{1}{f_i}$$

$$T_1 = \frac{D_{11}}{f_1}$$

$$T_2 = \frac{D_{22}}{f_2}$$

Figure 2.4: Modèle réduit de l'ensemble manipulateur-contrôleur

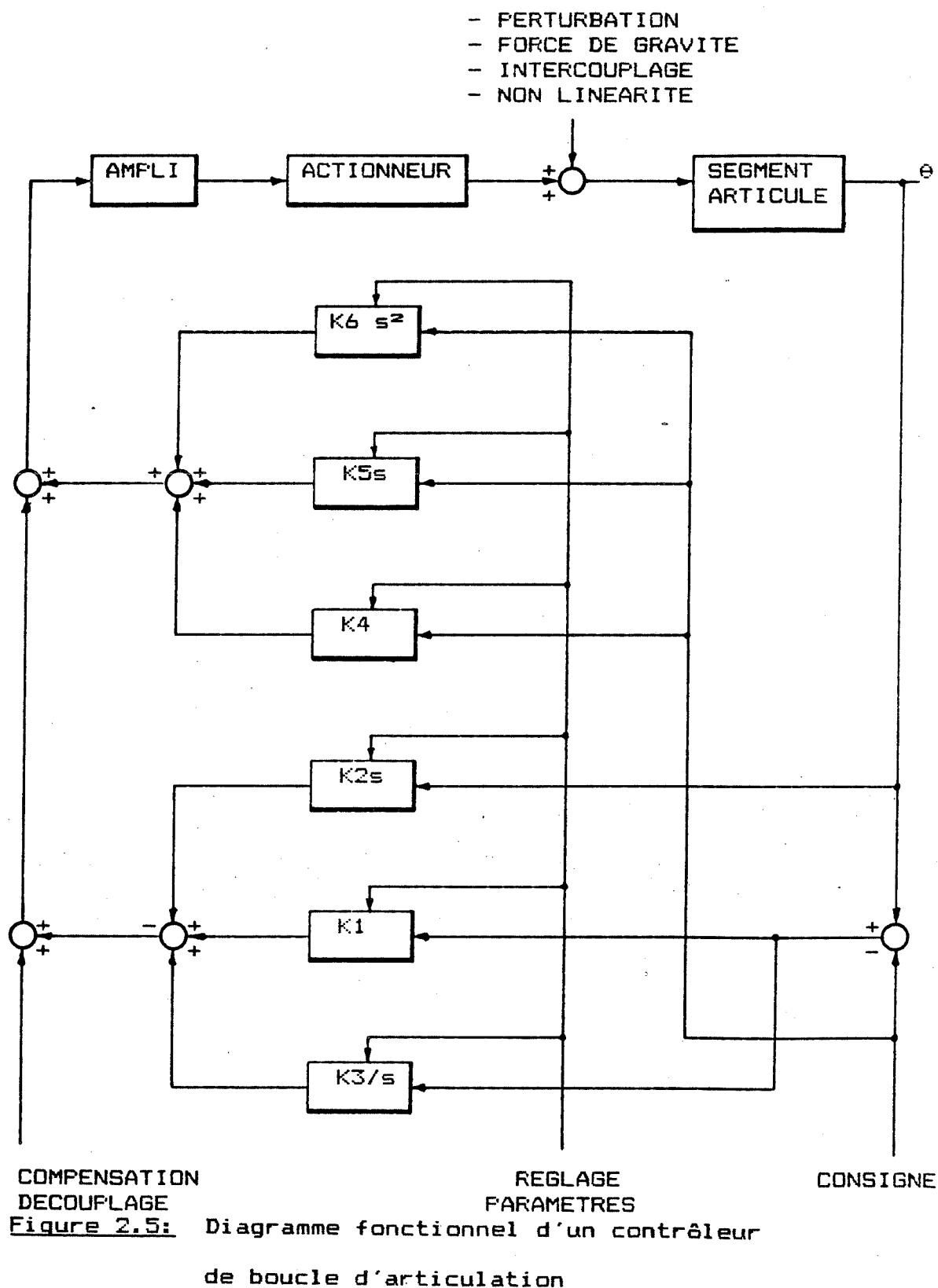
## 2.6 Modélisation d'un contrôleur de boucle

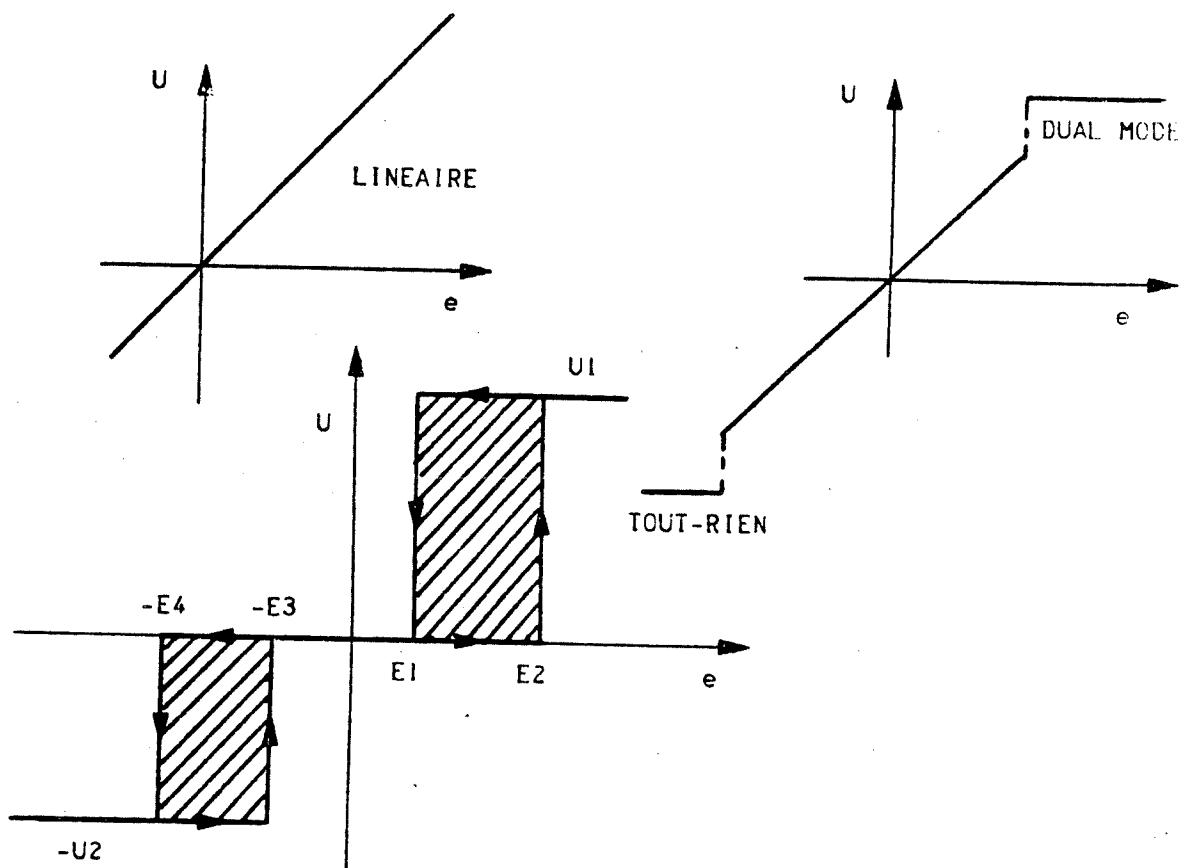
La structure idéale d'un contrôleur de boucle pourrait être représentée par le diagramme fonctionnel illustré à la figure 2.5.

Cette structure est caractérisée par une boucle de retour du type PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) plus une boucle d'anticipation (feed-forward) avec action de compensation de vitesse et d'accélération.

L'opération de l'actionneur pourrait être réalisée suivant les fonctions caractéristiques représentées à la figure 2.6. Les signaux de découplage, compensation et prise en compte des effets non-linéaires sont implantés au besoin, suivant le degré de sophistication du robot.

En faisant abstraction des actions de compensation de vitesse et accélération ( $K_5$  et  $K_6$  nulles), nous parvenons au diagramme simplifié de la figure 2.7.





**Figure 2.6:** Fonctions caractéristiques  
de l'amplificateur

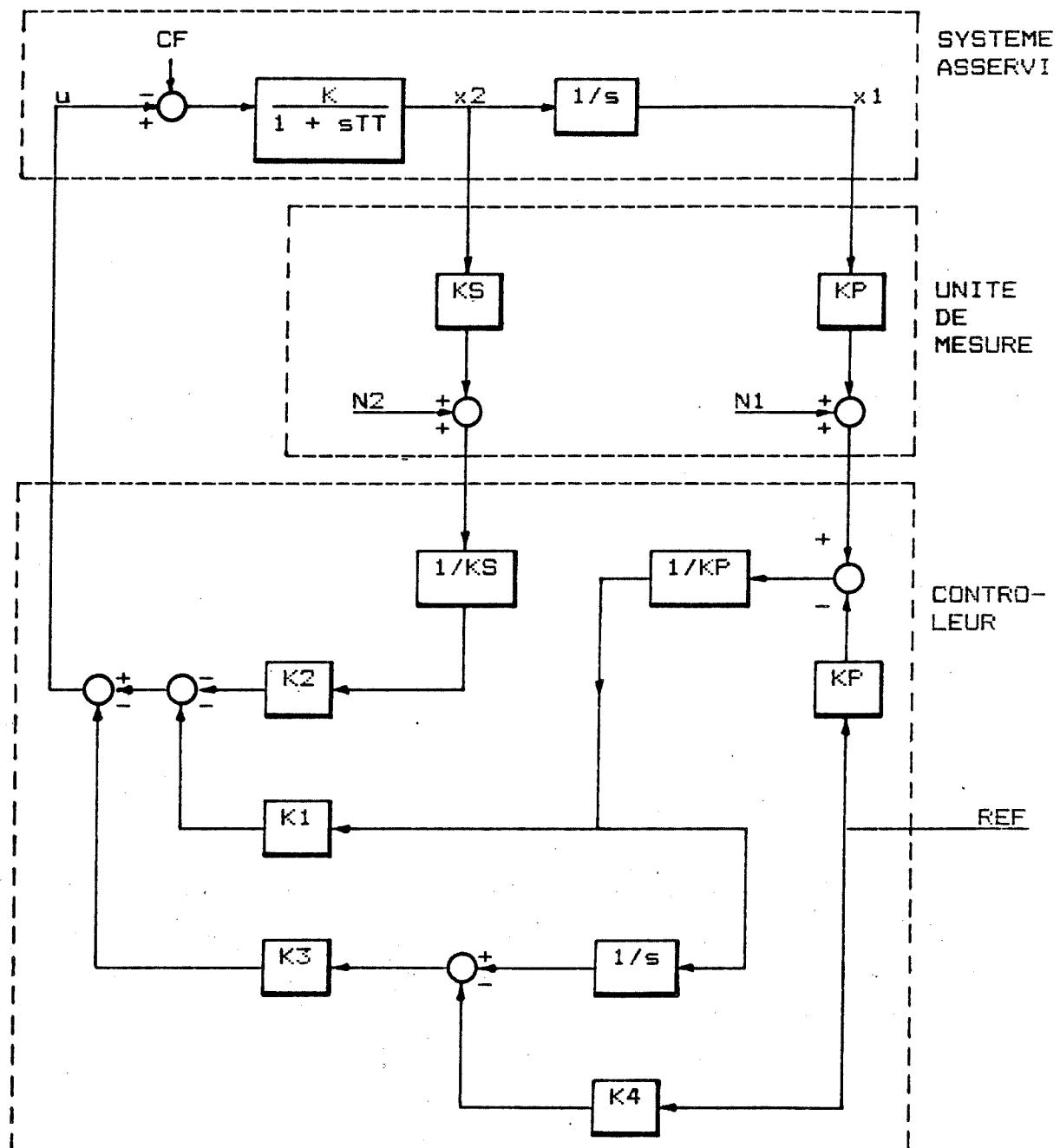


Figure 2.7: Diagramme fonctionnel simplifié d'une boucle d'articulation

## CHAPITRE 3

### DESCRIPTION DU PROGICIEL SIMAR

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre donne une description du progiciel SIMAR (Simulation Interactive des MAnipulateurs Robotiques) qui a été développé sur l'ordinateur personnel IBM-PC pour fournir un support à l'analyse du système robotique élaborée dans le chapitre suivant. Ce progiciel est écrit en langage BASIC compilé, et opérationnel sous le système d'exploitation DOS (références [16][17][18]). Il est caractérisé par:

- la facilité d'usage;
- l'interactivité dans le fonctionnement;
- les possibilités graphiques;
- l'autonomie dans l'exécution.

Afin de pouvoir faciliter la compréhension de la structure fonctionnelle de SIMAR, la section 3.2 présente le schéma bloc du progiciel vu par l'utilisateur tandis que la section 3.3 détaille le schéma bloc représentant la structure interne du progiciel. Et finalement, certaines sous-routines clefs, illustrant l'application de la méthode

de programmation structurée, sont présentées dans la section 3.4. Il est bien de mentionner que SIMAR a bénéficié, entre autres, de la disponibilité du progiciel ASSERV.POS [9].

### 3.2 Structure fonctionnelle vue par l'utilisateur

Du point de vue de l'utilisateur, la structure fonctionnelle du progiciel SIMAR pourrait être représentée par le schéma bloc à la figure 3.1. Les différentes fonctions du progiciel sont accessibles via les pages de dialogues opérateur (autrement dit les pages d'écrans) qui sont illustrées dans l'appendice A. Guidé par les directives interactives du progiciel, l'utilisateur n'a qu'à fournir les réponses ou donner sa confirmation pour faire exécuter les opérations désirées.

#### 3.2.1 Choix des fonctions

Le choix des fonctions est effectué à l'aide de la page d'écran "Menu Principal" (Figure A.1) qui, comme son nom l'indique, présente dans son menu un résumé des fonctions disponibles à l'utilisateur:

- **Assignment des paramètres;**
- **Simulation;**
- **Affichage des résultats;**
- **Visualisation du robot;**
- **Sauvegarde des paramètres;**
- **Récupération des paramètres;**
- **Terminer la session.**

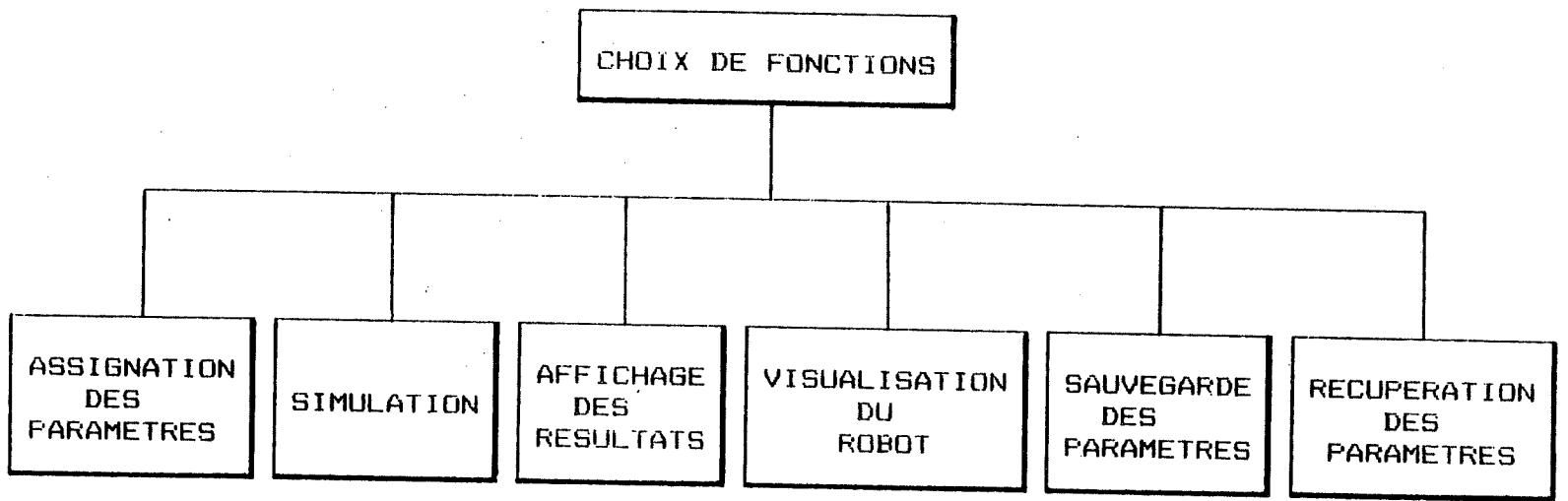


Figure 3.1: Schéma bloc vu par l'utilisateur

Le choix fait par l'utilisateur déclenchera une séquence de pages d'écrans appropriées, qui le guideront à compléter les informations requises pour la fonction demandée.

### 3.2.2 Assignment des paramètres

Cette fonction permet à l'utilisateur d'examiner ou de modifier les paramètres caractérisant le modèle qu'il étudie. A l'aide de la page d'écran "Assignment des paramètres" (Figure A.2) l'utilisateur aura accès aux quatre groupes de paramètres, donc:

- Paramètres du manipulateur;
- Paramètres du contrôleur du premier segment;
- Paramètres du contrôleur du deuxième segment;
- Paramètres de simulation.

Initialement, ces paramètres sont initialisés avec les valeurs de défaut pré-programmées.

#### 3.2.2.1 Paramètres du manipulateur

Les caractéristiques du manipulateur pourront être spécifiées à l'aide de la page d'écran "Paramètres du manipulateur" (Figure A.3). Les paramètres suivants sont disponibles:

- Longueur du premier segment (d1);
- Longueur du deuxième segment (d2);
- Masse du premier segment (m1);
- Masse du deuxième segment (m2);
- Coefficient de viscosité du premier segment (f1);
- Coefficient de viscosité du deuxième segment (f2);
- Moment d'inertie du premier segment (I1);
- Moment d'inertie du deuxième segment (I2).

### 3.2.2.2 Paramètres des contrôleurs

Les paramètres caractérisant les contrôleurs des segments du manipulateur peuvent être ajustés individuellement et ce, pour chaque contrôleur. Les pages d'écrans "Paramètres du 1er/2ème contrôleur" (Figures A.4 et A.5) permettront à l'utilisateur d'apporter des modifications aux paramètres suivants:

- Indicateur du mode de contrôle (Linéaire, à relais ou en "Mode Dual");
- Gain du transducteur de position (KP);
- Gain du transducteur de vitesse (KS);
- Bruit de mesure du transducteur de position (NP);
- Bruit de mesure du transducteur de vitesse (NS);
- Perturbations à l'entrée (charge agissant sur l'axe du moteur (CF) et bruit de mesure (NE));
- Niveau de quantisation des convertisseurs A/D (QS,

QP);

- Niveau de quantisation du convertisseur D/A (QC);
- Valeur de seuil (threshold) du contrôleur de type "DUAL MODE" (ED);
- Valeurs de seuils du contrôleur à relais (E1, E2, E3, E4);
- Niveaux de sortie du contrôleur à relais (U1, U2);
- Gains du régulateur (K1, K2, K3, K4).

### 3.2.2.3 Paramètres de simulation

Les paramètres déterminant les conditions de simulation peuvent être spécifiés à l'aide de la page d'écran "Paramètres de simulation" (Figure A.6), dans laquelle l'on retrouve les informations suivantes:

- Position angulaire initiale du premier segment;
- Vitesse angulaire initiale du premier segment;
- Intégrale de l'erreur initiale du premier segment;
- Position angulaire initiale du deuxième segment;
- Vitesse angulaire initiale du deuxième segment;
- Intégrale de l'erreur initiale du deuxième segment;
- Durée de simulation;
- Pas d'intégration;
- Position angulaire désirée du premier segment;
- Position angulaire désirée du deuxième segment;

### 3.2.3 Simulation

Une fois que les paramètres auront été déterminés tels que décrits dans la section 3.2.2, l'utilisateur pourra déclencher la simulation en choisissant cette fonction. Le système entrera en mode simulation et présentera sur l'écran, de façon dynamique, les informations concernant le comptage des intervalles d'intégration ainsi que le temps de simulation écoulé (Page d'écran "Simulation", Figure A.7). Le système permettra toutefois à l'utilisateur d'interrompre le processus de simulation par une simple touche du clavier.

### 3.2.4 Affichage des résultats

La simulation du modèle étant terminée, l'utilisateur pourra examiner la réponse à l'échelon du modèle, en fonction des paramètres et du contrôleur choisis. Les réponses temporelles sont présentées sous forme de graphiques pour permettre une meilleure visualisation des résultats que les techniques traditionnelles de présentation par information alphanumérique, tout en conservant suffisamment de précision (référence [13]). L'utilisateur pourra en faire afficher jusqu'à deux simultanément, en choisissant sur une liste de graphiques disponibles:

- Position angulaire du premier segment;
- Vitesse angulaire du premier segment;
- Sortie du premier contrôleur;
- Position angulaire du deuxième segment;
- Vitesse angulaire du deuxième segment;
- Sortie du deuxième contrôleur;

Les pages d'écrans illustrées dans les figures A.8 à A.11 donnent un exemple de dialogue et graphiques qu'effectue la fonction "Affichage des résultats".

### 3.2.5 Visualisation du robot

Cette fonction permettra à l'utilisateur de visualiser le mouvement du système de manipulateur robotique à l'aide de la technique d'animation. Il est à noter que l'animation du système robotique n'est pas réalisée en temps réel. Cependant, une possibilité d'ajustement du délai d'affichage est rendue disponible afin de pouvoir examiner l'évolution du modèle en mouvement ralenti ou accéléré dépendamment du besoin. La page d'écran "Visualisation du robot" illustrée à la figure A.12 présente l'affichage réalisée par cette fonction. L'utilisateur y retrouve également un rappel de quelques informations utiles relatives à la constitution du modèle telles que les longueurs et masses des segments du manipulateur.

### 3.2.6 Sauvegarde des paramètres

Les valeurs des paramètres modifiés par l'utilisateur pendant la session de travail avec SIMAR sont volatiles et ne durent que pour la session. Afin d'éviter le temps inutile de rentrer les paramètres d'un modèle en particulier chaque fois que l'utilisateur veut y revenir, cette fonction "sauvegarde" est offerte pour lui permettre de sauvegarder sur disquette, ou sur disque dépendamment de la configuration de son système d'ordinateur, tous les paramètres de travail qui caractérisent le modèle qu'il étudie. A l'aide de la page d'écran "Sauvegarde des paramètres sur disque" (Figure A.13) l'utilisateur pourra spécifier le nom du fichier sur lequel il désire garder les paramètres pour l'utilisation ultérieure. Les paramètres sauvegardés sont tous ceux qui sont décrits dans la section 3.2.2.

### 3.2.7 Récupération des paramètres du disque

Cette fonction va de pair avec la fonction "sauvegarde" précédente. En utilisant cette fonction, l'utilisateur pourra recharger en mémoire de son micro-ordinateur les paramètres concernant un modèle particulier qu'il aura sauvegardé précédemment. L'opération de récupération est déclenchée via la page d'écran "Récupération des paramètres du disque" (Figure A.14).

### 3.2.8 Terminer la session

Cette fonction permettra à l'utilisateur de mettre fin à la session de travail. Tous les paramètres de travail qui auront été modifiés pendant la session et qui n'auront pas été sauvegardés à l'aide de la fonction "sauvegarde" (Section 3.2.6) seront détruits.

### 3.3 Structure interne

En respectant les techniques de la programmation structurée et de la conception modulaire, la structure interne du progiciel SIMAR prend la forme telle qu'illustrée à la figure 3.2. Les blocs identifiés représentent les modules (sous-routines) du système et sont inter-reliés par des relations hiérarchiques. De cette façon, l'implantation des fonctions décrites dans la section 3.2 est quasiment directe. L'architecture interne du progiciel est alors très similaire à la structure fonctionnelle perçue par l'utilisateur.

#### 3.3.1 PRINCP - Module principal

Le module principal réserve les espaces de mémoire nécessaires pour les variables et tableaux utilisés dans le progiciel. Il appelle le module INITLZ pour effectuer l'initialisation. Ensuite il appelle le module AFMENU pour afficher le menu principal. Dépendamment du choix fait par l'utilisateur, il appelle un des modules ASPARM, SIMULE, AFSORT, VISUAL, SVPARM, RCPARM pour effectuer la fonction demandée, ou termine le traitement suite à la demande de terminaison de session.

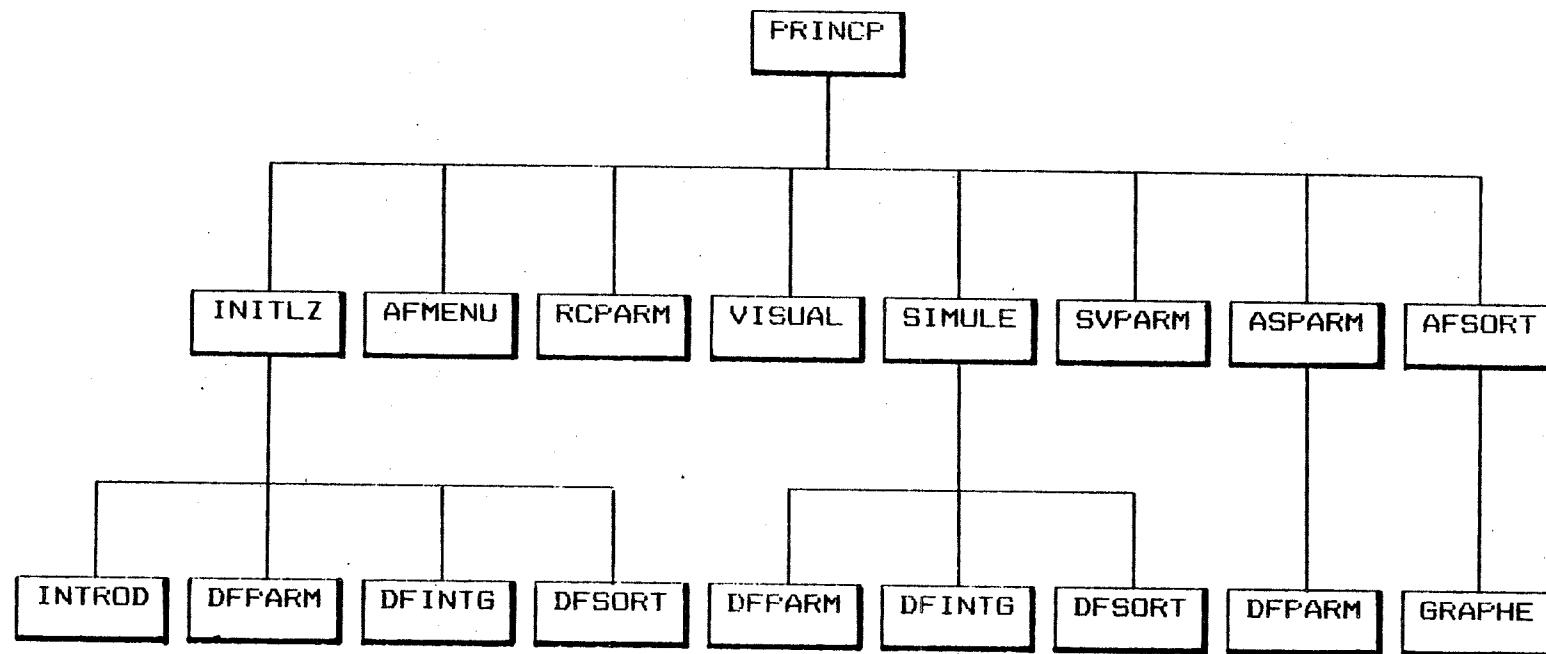


Figure 3.2: Schéma bloc de la structure interne

### 3.3.2 INITLZ - Initialisation

Ce module effectue l'initialisation des variables internes. Il présente la page titre et appelle le module INTROD pour afficher le texte de présentation du progiciel. Il appelle également les modules DFPARM et DFINTG pour l'initialisation des paramètres et conditions initiales.

### 3.3.3 AFMENU - Affichage du menu

Ce module affiche la page d'écran "Menu Principal" (Figure A.1) et attend le choix de fonction que l'utilisateur désire faire exécuter. Une validation sur le code de fonction est effectuée; si le code est valide (entre 1 et 7) le contrôle est retourné au module principal PRINCP pour les étapes subséquentes. Si le code n'est pas valide, un message d'avertissement est affiché et l'utilisateur est invité à rentrer un code de fonction correct suivant le menu présenté.

### 3.3.4 ASPARM - Assignation des paramètres

Ce module affiche la page d'écran "Assignation des paramètres" (Figure A.2) et attend le code d'opération que l'utilisateur spécifie pour lui donner accès aux différents groupes de paramètres (Figures A.3 à A.6). Une validation sur le code d'opération est effectuée; si le code est

valide (entre 1 et 4) l'utilisateur a accès au groupe de paramètres correspondant pour examiner ou modifier. Si l'utilisateur spécifie le code 5, la fonction "Assignment des paramètres" est terminée et le contrôle est retourné au module principal PRINCP. Si le code est invalide, un message d'avertissement est affiché et l'utilisateur est invité à rentrer un code d'opération correct suivant le menu présenté. Ce module appelle le module DFPARM pour rafraîchir les variables internes suite aux modifications des paramètres.

### 3.3.5 SIMULE - Simulation

Ce module effectue la simulation proprement dite du modèle dont les paramètres sont déjà déterminés. La technique d'intégration numérique est basée sur la méthode de Runge-Kutta de quatrième ordre. La durée de simulation et l'intervalle d'intégration sont paramétrables. Si le nombre de points calculés est supérieur à 256, ce module conserve automatiquement 256 points d'intervalles réguliers, recalculés par ce module, pour l'affichage ultérieur. Si le nombre de points calculés est inférieur à 256, ces mêmes points sont conservés pour l'affichage. Pendant la simulation, ce module affiche la page d'écran "Simulation" (Figure A.7) où le compteur d'intervalles d'intégration et le temps de simulation écoulé sont mis à jour dynamiquement. Ce module permet également une

interruption du processus de simulation en pressant sur la touche "Return" du clavier. Ce module appelle les modules DFFPARM, DFINTG et DFSORT pour la réévaluation des paramètres et variables internes dans ses cycles de traitement.

### 3.3.6 AFSORT - Affichage des sorties

Ce module affiche la page d'écran "Affichage des sorties" (Figure A.8) et attend un ou deux numéros de graphiques que l'utilisateur désire faire afficher. Une validation de ces numéros est effectuée; si les numéros sont valides (entre 1 et 6), le module GRAPHE est appelé pour tracer les graphiques correspondants sur l'écran. Si les numéros sont invalides, un message d'avertissement est affiché et l'utilisateur est invité à rentrer les numéros de graphiques correctement. Les exemples de graphiques réalisés par ce module sont illustrés dans les figures A.9 à A.11.

### 3.3.7 VISUAL - Visualisation du robot

Ce module, par technique d'animation, permet à l'utilisateur de visualiser le mouvement du manipulateur robotique. Il affiche la page d'écran "Visualisation du robot" (Figure A.12) et attend le facteur de délai que l'utilisateur doit introduire pour déclencher l'animation.

Grâce à ce délai d'affichage ajustable, l'utilisateur peut, à son gré, examiner l'évolution de son modèle en mouvement ralenti ou accéléré.

### 3.3.8 SVPARM - Sauvegarde des paramètres

Ce module permet de sauvegarder sur disque les paramètres caractérisant le modèle simulé. Il affiche la page d'écran "Sauvegarde des paramètres sur disque" (Figure A.13) et attend le nom du fichier sur lequel l'utilisateur désire garder les informations. Sur confirmation de l'utilisateur, le fichier spécifié est créé et les informations y sont copiées. Il est de responsabilité de l'utilisateur de s'assurer que le fichier destination soit libre pour cet usage. Car, advenant le cas où le fichier spécifié est existant, les anciennes informations s'y retrouvant seront détruites et remplacées par les nouvelles valeurs des paramètres.

### 3.3.9 RCPARM - Récupération des paramètres

Ce module effectue l'opération inverse de celle du module SVPARM, c'est-à-dire que l'utilisateur doit introduire le nom du fichier sur lequel les paramètres ont été sauvegardés pour que ce module puisse les extraire et mettre en mémoire. Ce module affiche la page d'écran "Récupération des paramètres du disque" (Figure A.14) et

attend le nom du fichier. Ayant le nom du fichier introduit et sur confirmation de l'utilisateur, l'opération de récupération est effectuée. Il est de responsabilité de l'utilisateur de s'assurer que le fichier spécifié soit convenable pour cet usage. S'il s'agit d'un fichier dont le format est inconnu au progiciel, le résultat sera totalement imprévisible.

### 3.3.10 INTROD - Présentation du progiciel

Ce module sert à afficher, au début de la session de travail, le fichier de présentation INTROD.TXT que l'utilisateur peut éditer à l'aide des éditeurs de texte conventionnels (ex: EDLIN ou Personnal Editor). Si le fichier n'est pas disponible lors de l'exécution du progiciel, ce module l'ignore et procède normalement.

### 3.3.11 DFPARM - Définition des paramètres

Ce module définit tous les paramètres concernant le manipulateur, les contrôleurs et la simulation sous forme de tableaux pour optimiser l'accès par indexation, et par conséquent améliore la performance du progiciel. Il assigne également ces paramètres aux variables internes qui sont facilement repérables par les utilisateurs intéressés.

### 3.3.12 DFINTG - Définition des intégrateurs

Ce module définit les relations du modèle de variables d'états. Il englobe la représentation du modèle, des différents types de contrôleurs, des dispositifs de conversion ainsi que des divers types de perturbations appliquées au modèle.

### 3.3.13 DFSORT - Définition des sorties

Ce module définit les sorties dont la réponse à l'échelon est intéressant pour l'analyse du comportement dynamique du modèle simulé. Ce sont les sorties représentant les vitesse et position angulaires des segments. Les sorties des contrôleurs (un contrôleur par segment) y sont également définies.

### 3.3.14 GRAPHE - Traçage de graphiques

Ce module effectue le traçage des graphiques représentant les réponses à l'échelon du modèle simulé. Le cadrage de ces graphiques (calcul des maxima et ajustement des échelles d'affichage) se fait de façon automatique par ce module. Les valeurs des divisions des axes sont également affichées. Quelques exemples de ces graphiques sont illustrés dans les figures A.9 à A.11.

### 3.4 Sous-routines principales

Afin de bien illustrer la technique de programmation structurée utilisée, quelques exemples de sous-routines du progiciel SIMAR sont fournis dans les figures 3.3 à 3.5.

```
'+-----+
'I     PRINCP  - Module Principal      I
'I           *** SYSTEME ***      I
'+-----+
'
DIM PARM(50,4), X(10,1), XP(10), Y(10,256), DEL(10,4)
DIM DESC$(50), YDES$(10), YUNT$(10), N(50)
DIM S.HDR$(4), S.BEG%(4), S.END%(4)
GOSUB 1000          'Appeler le module INIT
WHILE I.OPER% <> 7
    GOSUB 3000          'Appeler le module MENU
    ON I.OPER% GOSUB 4000,6000,7000,2000,8000,9000
WEND
END                  'Fin du programme
```

Figure 3.3: Module Principal

```
'-----+
'I     MODULE: INTROD  (Presentation)      I
'I           *** SYSTEME ***      I
'-----+
'
5000  SCREEN 0
ON ERROR GOTO 5050
OPEN "INTROD.TXT" FOR INPUT AS #1
WHILE NOT EOF(1)
    CLS: LOCATE 1,1,0
    FOR S.CTRX = 1 TO 20
        LINE INPUT #1, S.TEXT$
        IF EOF(1) THEN GOTO 5010 ELSE PRINT S.TEXT$
    NEXT S.CTRX
5010  GOSUB 1500
    WEND
5040  ON ERROR GOTO 0
    CLOSE
    RETURN
    'Routine d'erreur
5050  RESUME 5040
```

Figure 3.4: Module de Présentation

```

'-----+
'I MODULE: SIMULE      (Simulation)  I
'I     *** SYSTEME ***      I
'-----+
6000  SCREEN 0: CLS
      GOSUB 20500          ' Rafraichir les parametres et cond. init.
      GOSUB 2100             ' Afficher la configuration
      LOCATE 10,10,0: COLOR 16,7:PRINT "Simulation en progression":COLOR 7,0
      LOCATE 25,10,0: PRINT "Pressez "+$.CR$+" pour arreter la simulation";
      DEF SEG: POKE 106,0
      NC% = ST / DELTA      ' Nombre de points total a calculer
      NI% = NC% / 256        ' Nombre de points intermediaires
      IF NI% = 0 THEN NI% = 1
      NA% = NC% / NI%       ' Nombre de points total a afficher
      IF NA% > 256 THEN NA% = 256
      I = 0: GOSUB 21000      ' Appeler DFINTG
      N = 1: GOSUB 22000      ' Appeler DFSORT
      FOR N = 2 TO NA%
          CI% = NI% * N       ' Compteur d'intervalles
          T = CI% * DELTA      ' Temps simule
          LOCATE 16,55,0: PRINT USING "i1 = ###### rads"; X(1,0);
          LOCATE 17,55,0: PRINT USING "i2 = ###### rads"; X(4,0);
          LOCATE 20,10,0: PRINT USING "Nb. points calcules = ####"; CI%
          LOCATE 20,50,0: PRINT USING "Temps = .#### "+TEMPS$; T;
          FOR LZ = 1 TO NI%
              I = 0: GOSUB 21000      ' Appeler DFINTG
              FOR MX = 1 TO NINTG
                  DEL(MX,1) = DELTA * XP(MX)
                  X(MX,1) = X(MX,0) + .5 * DEL(MX,1)
              NEXT MX
              I = 1: GOSUB 21000      ' Appeler DFINTG
              FOR MX = 1 TO NINTG
                  DEL(MX,2) = DELTA * XP(MX)
                  X(MX,1) = X(MX,0) + .5 * DEL(MX,2)
              NEXT MX
              GOSUB 21000              ' Appeler DFINTG
              FOR MX = 1 TO NINTG
                  DEL(MX,3) = DELTA * XP(MX)
                  X(MX,1) = X(MX,0) + DEL(MX,3)
              NEXT MX
              GOSUB 21000              ' Appeler DFINTG
              FOR MX = 1 TO NINTG
                  DEL(MX,4) = DELTA * XP(MX)
                  X(MX,0) = X(MX,0)+(DEL(MX,1)+2*DEL(MX,2)+2*DEL(MX,3)+DEL(MX,4))/6
              NEXT MX
              NEXT LZ
              GOSUB 22000              ' Appeler DFSORT
              S.K$ = INKEY$: IF S.K$ = CHR$(13) THEN GOTO 6150
          NEXT N
          N = N - 1                ' Ajuster le compteur pour la boucle normale
          S.MAX% = N                ' Enregistrer le nb de points affiches
      RETURN
6150

```

Figure 3.5: Module de Simulation

## CHAPITRE 4

### ANALYSE D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE

#### 4.1 Introduction

Les techniques présentées dans le chapitre 2 nous permettent d'effectuer de façon systématique l'analyse du comportement dynamique d'un manipulateur robotique. Ceci concerne la détermination des effets provoqués lors de l'application d'une certaine configuration de forces sur les trajectoires caractérisant les déplacements des divers segments articulés. Elle concerne également la détermination de la configuration des forces devant être appliquées pour atteindre une trajectoire préassignée. Dans ce chapitre nous nous intéressons au cas où le comportement dynamique du modèle étudié est obtenu par voie de simulation sur micro-ordinateur. A l'aide de quelques exemples, nous montrons comment les techniques présentées peuvent nous aider à répondre aux questions suivantes:

- Jusqu'à quel point le déplacement incrémental d'un segment articulé influence le déplacement de l'autre?

- Jusqu'à quel point le déplacement incrémental est influencé par la configuration de travail?
- Jusqu'à quel point nous pouvons ajuster les paramètres du contrôleur sur la base du modèle simplifié?
- Jusqu'à quel point les valeurs des paramètres du contrôleur calculées (sur la base du modèle simplifié) de façon à obtenir une bonne performance autour d'un point de travail, procurent une performance satisfaisante lorsqu'appliquées autour d'un autre point de travail?

Les graphiques illustrés dans ce chapitre sont réalisés à l'aide du logiciel AutoCad [14], à partir des résultats obtenus du programme de simulation.

#### 4.2 Description du système à l'étude

Le système considéré représente un manipulateur du type rotatif avec deux segments articulés. Les principaux caractéristiques du manipulateur sont exprimés par les paramètres géométriques et massiques; par les paramètres du système de contrôle; et par les paramètres propres à la configuration de travail. Dans ce cas spécifique, nous considérons le modèle ayant deux segments identiques au point de vue géométrique et massique. Les tableaux 4.1 à 4.4 résument les caractéristiques du manipulateur à l'étude.

- 
- (1) Longueur de la 1ere articulation (mtrs)  $d_1 = .5$
  - (2) Longueur de la 2eme articulation (mtrs)  $d_2 = .5$
  - (3) Masse de la 1ere articulation (kgrs)  $m_1 = .25$
  - (4) Masse de la 2eme articulation (kgrs)  $m_2 = .25$
  - (5) Coefficient de viscosité 1ere artic.  $f_1 = .05$
  - (6) Coefficient de viscosité 2eme artic.  $f_2 = .05$
  - (7) Moment d'inertie de la 1ere artic.  $I_1 = 0$
  - (8) Moment d'inertie de la 2eme artic.  $I_2 = 0$
- 

Tableau 4.1 : Paramètres géométriques et massiques  
du manipulateur

- 
- (1) #1 - Contrôle Linéaire/Relais/Dual 0/1/2 = 0
  - (2) #1 - Gain du capteur de position KP1 = .02
  - (3) #1 - Gain du capteur de vitesse KS1 = .06
  - (4) #1 - Bruit au capteur de position NP1 = 0
  - (5) #1 - Bruit au capteur de vitesse NS1 = 0
  - (6) #1 - Perturbation à l'entrée NE1,CF1 = 0 0
  - (7) #1 - Niveau de quantisation A/D QS1,QP1 = 0 0
  - (8) #1 - Niveau de quantisation D/A QC1 = 0
  - (9) #1 - Seuil en mode dual ED1 = 0
  - (10) #1 - Seuils du relais E11,E12,E13,E14 = .5 .5 .5 .5
  - (11) #1 - Niveaux de sortie du relais U11,U12 = 5 5
  - (12) #1 - Gains du régulateur K11 = 5.46  
K12 = 1.75  
K13 = 1.57  
K14 = -.36
- 

Tableau 4.2 : Paramètres du système de contrôle  
(Contrôleur du premier segment)

- 
- (1) #2 - Contrôle Linéaire/Relais/Dual 0/1/2 = 0
  - (2) #2 - Gain du capteur de position KP2 = .02
  - (3) #2 - Gain du capteur de vitesse KS2 = .06
  - (4) #2 - Bruit au capteur de position NP2 = 0
  - (5) #2 - Bruit au capteur de vitesse NS2 = 0
  - (6) #2 - Perturbation à l'entrée NE2,CF2 = 0 0
  - (7) #2 - Niveau de quantisation A/D QS2,QP2 = 0 0
  - (8) #2 - Niveau de quantisation D/A QC2 = 0
  - (9) #2 - Seuil en mode dual ED2 = 0
  - (10) #2 - Seuils du relais E21,E22,E23,E24 = .5 .5 .5 .5
  - (11) #2 - Niveaux de sortie du relais U21,U22 = 5 5
  - (12) #2 - Gains du régulateur K21 = 5.64  
K22 = .5  
K23 = 13  
K24 = -.13
- 

Tableau 4.3 : Paramètres du système de contrôle  
(Contrôleur du deuxième segment)

---

(1) #1 - Position angulaire initiale	$X(1,0) = 0$
(2) #1 - Vitesse angulaire initiale	$X(2,0) = 0$
(3) #1 - Intégral de l'erreur initiale	$X(3,0) = 0$
(4) #2 - Position angulaire initiale	$X(4,0) = 0$
(5) #2 - Vitesse angulaire initiale	$X(5,0) = 0$
(6) #2 - Intégral de l'erreur initiale	$X(6,0) = 0$
(7) Temps de simulation	ST = 3
(8) Pas d'intégration	DELTA = .001
(9) #1 - Position désirée (rads)	REF1 = .1
(10) #2 - Position désirée (rads)	REF2 = .1

---

Tableau 4.4 : Paramètres propres à la configuration  
de travail (Exemple type)

En examinant les tableaux précédents, nous remarquons que les contrôleurs choisis sont de type linéaire. Les moments d'inertie des segments par rapport à leur centres de gravité ne sont pas considérés. Les bruits au niveau des capteurs ainsi que les perturbations agissant sur les articulations ne sont pas considérés également. Quelques essais rapides nous ont montré que les effets dûs à différents niveaux de quantisation (A/D et D/A) ne sont pas intéressants pour entrer dans le cadre de la présente étude. Les modalités de contrôle sont implantées de telle façon que les effets de la gravité exercés sur les segments

soient compensés parfaitement.

#### 4.3 Détermination des gains de régulation

Tel que suggéré par les techniques énoncées dans le chapitre 2, les valeurs de gains de régulation  $K$  sont d'abord synthétisés en utilisant le modèle réduit du système. Dans ce cas, le système est considéré comme linéaire-découplé, les valeurs de  $K$  préliminaires sont alors déterminés en utilisant la méthode de positionnement des pôles [7]. Ainsi, les valeurs de  $K$  sont calculées de telle façon que les pôles du système bouclé aient une valeur préétablie. Ces valeurs de  $K$  préliminaires sont ensuite utilisées comme point de départ dans l'analyse basée sur la simulation du modèle complet.

#### 4.4 Exemple 1 (Effet d'intercouplément)

Dans le but d'examiner l'effet d'intercouplément sur un segment articulé, dû au déplacement incrémental de l'autre; considérons la configuration de travail du manipulateur telle que spécifiée dans le tableau 4.5 et illustrée dans la figure 4.1 (config. A). Les valeurs de K sont calculées en utilisant le modèle réduit. Le paramètre AF représente le facteur d'accélération. Le coefficient d'amortissement étant fixé à 1, aucun dépassement dans la réponse du système serait attendu.

(1) Configuration initiale:

$$\theta_1 = 0 \text{ rad.}$$

$$\theta_2 = 0 \text{ rad.}$$

(2) Paramètres calculés pour le modèle réduit (segment 1):

$$K_1 = 20 \quad TT_1 = 3.12 \quad AF = 35$$

$$K_{11} = 5.46 \quad K_{12} = 1.75 \quad K_{13} = 1.57 \quad K_{14} = -.36$$

(3) Paramètres calculés pour le modèle réduit (segment 2):

$$K_2 = 20 \quad TT_2 = .31 \quad AF = 10$$

$$K_{21} = 5.64 \quad K_{22} = .5 \quad K_{23} = 13 \quad K_{24} = -.13$$

Tableau 4.5 : Configuration de travail et paramètres de contrôle du manipulateur (Config. A)

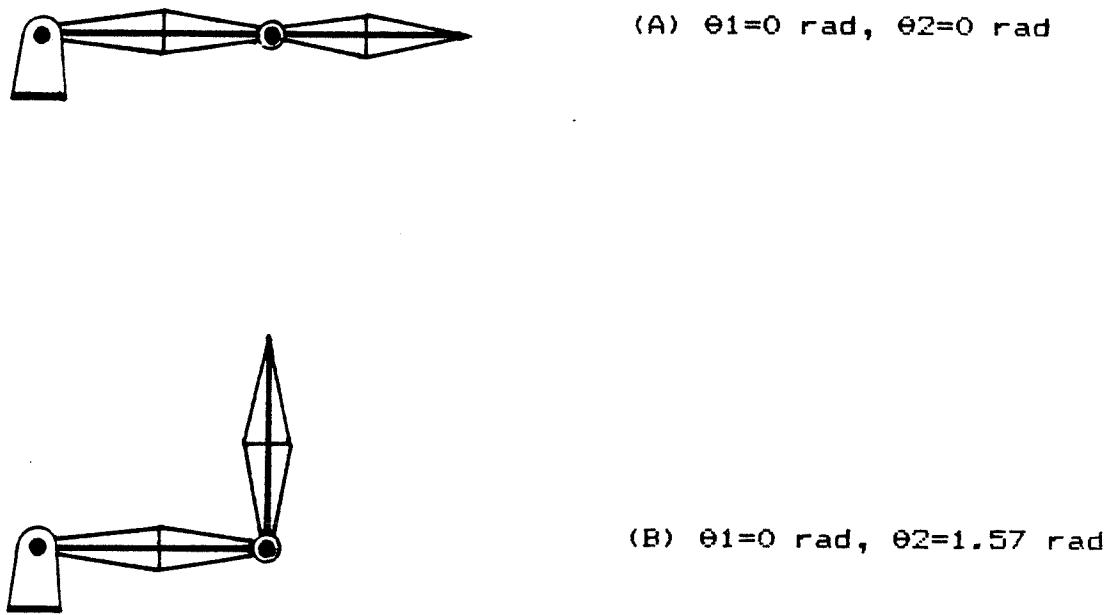
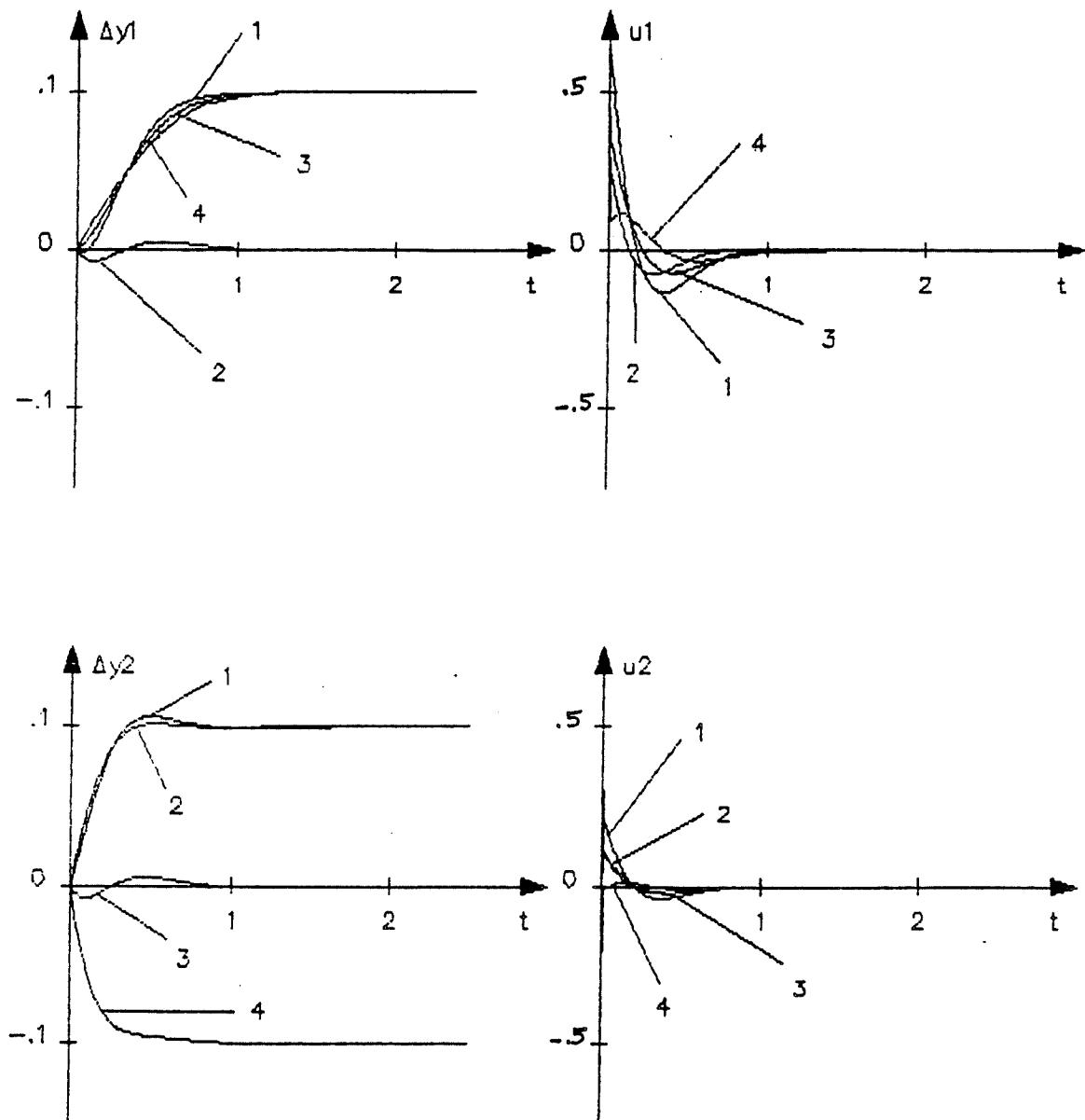


Figure 4.1 : Configurations de travail

Les réponses temporelles du système complet, dans la configuration de travail A ( $\theta_1=0$  rad,  $\theta_2=0$  rad), sont illustrées à la figure 4.2. Nous y retrouvons les graphiques illustrant la variation autour du point de travail (en radians) et la sortie du contrôleur (en N-m), pour le premier et deuxième segment. Les cas 1 à 4 représentent les jeux d'essai concernant différents combinaisons de consignes données au système. De façon générale nous remarquons que le temps de réponse du premier segment est plus lent que celui du deuxième segment. Dans les cas (REF1=.1 rad, REF2=.1 rad) et (REF1=0 rad, REF2=.1 rad) la réponse du deuxième segment dénote un dépassement



**Figure 4.2 :** Comportement dynamique du système complet  
autour du point de travail  $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=0$

(1)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=.1$  (2)  $\text{REF1}=0$ ,  $\text{REF2}=.1$   
 (3)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=0$  (4)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=-.1$

de 6% et 1% respectivement. Dans le cas (REF1=0 rad, REF2=.1 rad) la réponse du premier segment dénote une variation maximale de 7%. Dans le cas inverse (REF1=.1 rad, REF2=0 rad) une variation maximale de 8% est obtenue dans la réponse du deuxième segment. La précision en régime permanent est satisfaisante.

Nous procédons maintenant à effectuer les mêmes essais sur une autre configuration de travail (figure 4.1 B). Les paramètres caractéristiques sont donnés dans le tableau 4.6. Les valeurs de K sont recalculées tenant compte du nouveau point de travail, le coefficient d'amortissement étant toujours fixé à 1.

Les réponses temporelles du système complet, dans la configuration de travail B ( $\theta_1=0$  rad,  $\theta_2=1.57$  rad), sont illustrées à la figure 4.3. De façon similaire à la configuration A, le temps de réponse du premier segment est plus lent que celui du deuxième segment. Dans le cas (REF1=.1 rad, REF2=1.67 rad) la réponse du deuxième segment accuse un léger dépassement de 1%. Dans le cas (REF1=0 rad, REF2=1.67 rad) la réponse du premier segment dénote une variation maximale de 3%. Dans le cas inverse (REF1=.1 rad, REF2=1.57 rad) une variation maximale de 4% est obtenue dans la réponse du deuxième segment. La précision en régime permanent reste toujours satisfaisante.

## (1) Configuration initiale:

 $\theta_1 = 0 \text{ rad.}$  $\theta_2 = 1.57 \text{ rad.}$ 

## (2) Paramètres calculés pour le modèle réduit (segment 1):

 $K_1 = 20 \quad TT_1 = 1.87 \quad AF = 27$  $K_{11} = 5.59 \quad K_{12} = 1.35 \quad K_{13} = 2.6 \quad K_{14} = -.28$ 

## (3) Paramètres calculés pour le modèle réduit (segment 2):

 $K_2 = 20 \quad TT_2 = .31 \quad AF = 10$  $K_{21} = 5.64 \quad K_{22} = .5 \quad K_{23} = 13 \quad K_{24} = -.13$ 

Tableau 4.6 : Configuration de travail et paramètres de contrôle du manipulateur (Config. B)

Il serait intéressant également de vérifier si pour une variation plus grande dans la consigne nous pourrions obtenir une performance équivalente. Nous allons fixer une consigne d'amplitude 10 fois plus grande (1 rad) et répéter les mêmes essais que précédemment. Les figures 4.4 et 4.5 révèlent que les réponses du système restent linéaires dans l'espace de travail considéré.

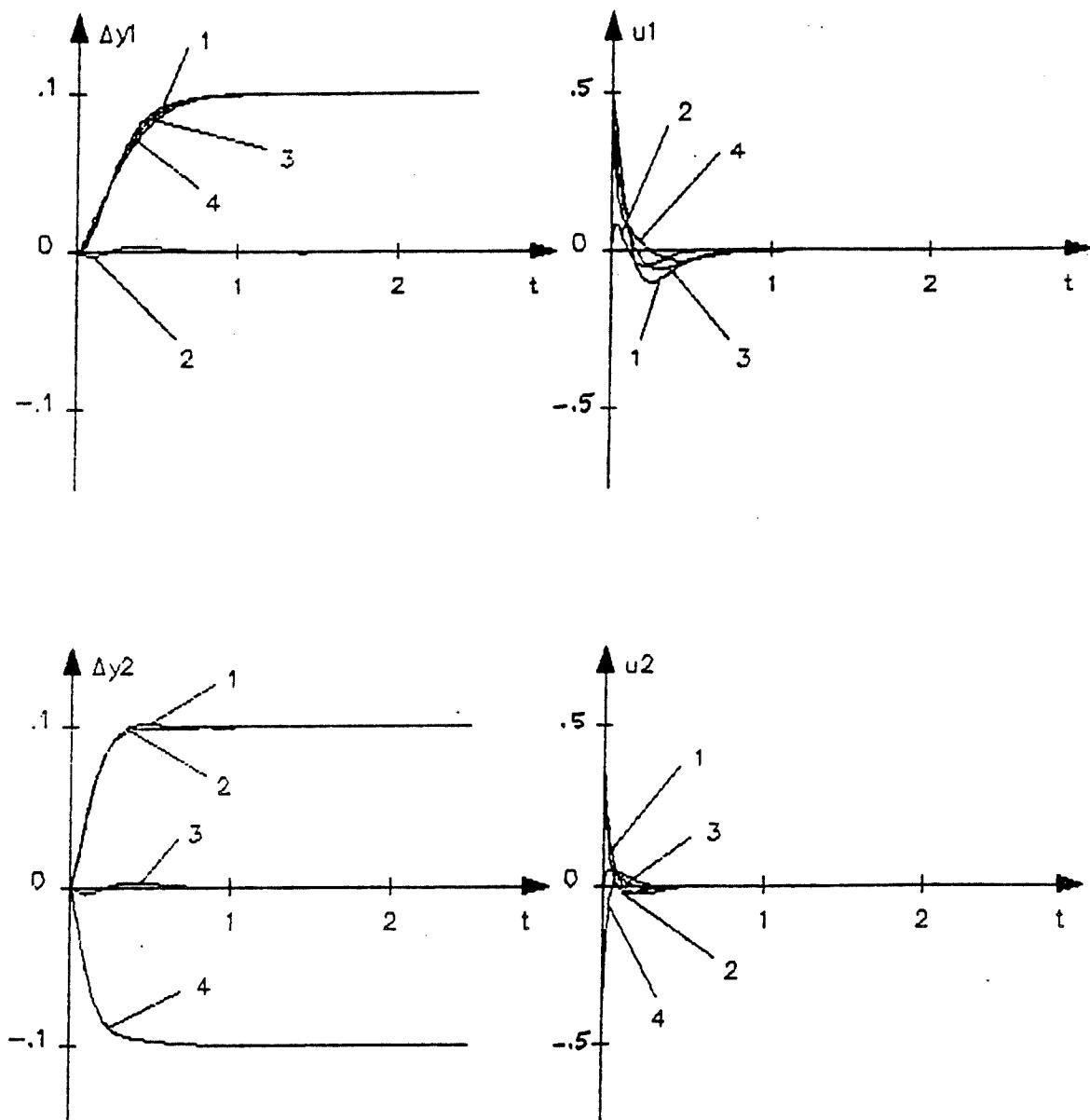


Figure 4.3 : Comportement dynamique du système complet

autour du point de travail  $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$

(1)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=1.67$  (2)  $\text{REF1}=0$ ,  $\text{REF2}=1.67$

(3)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=1.57$  (4)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=1.47$

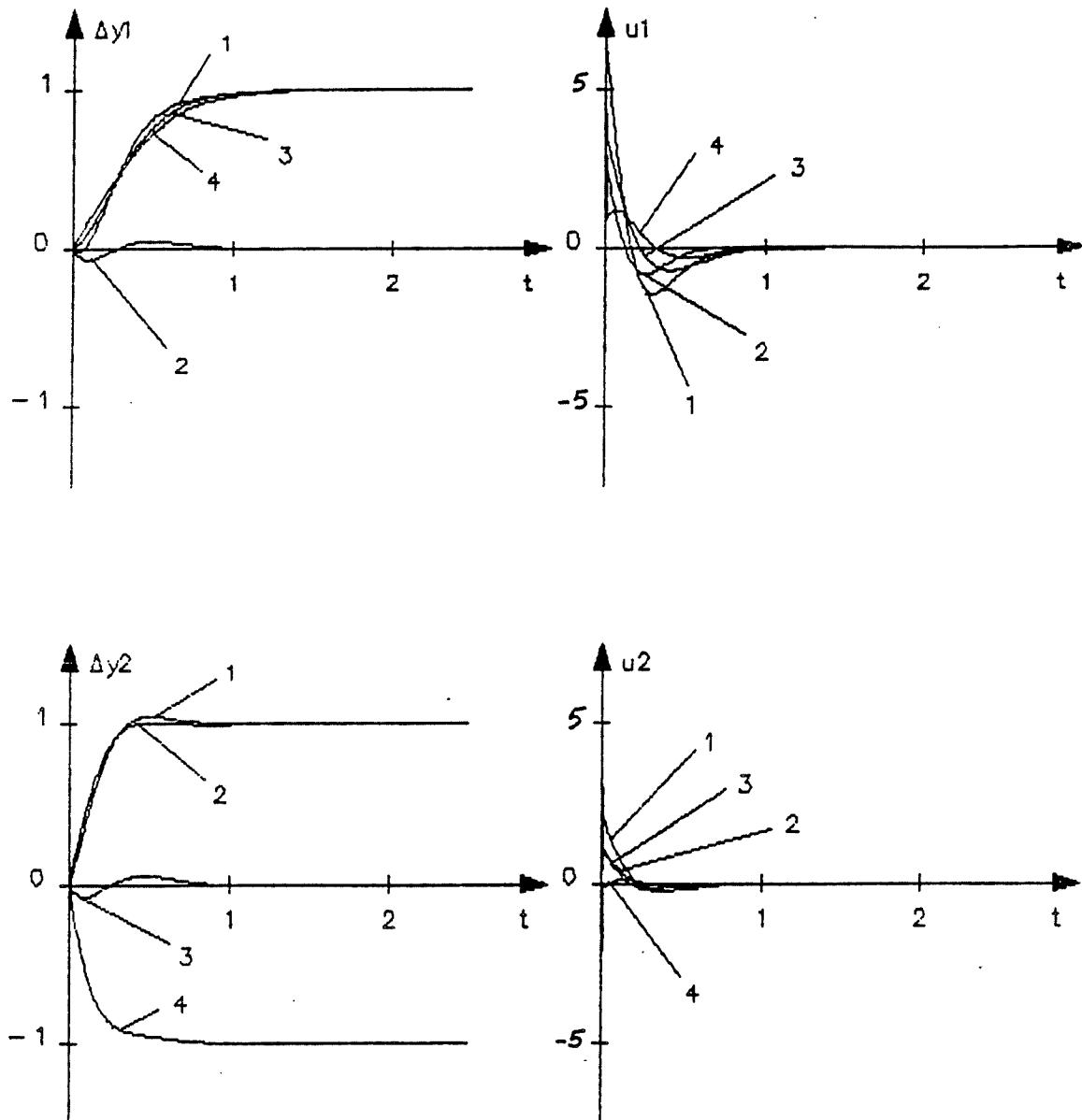


Figure 4.4 : Comportement dynamique du système complet  
autour du point de travail  $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=0$

(1) REF1=1, REF2=1

(2) REF1=0, REF2=1

(3) REF1=1, REF2=0

(4) REF1=1, REF2=-1

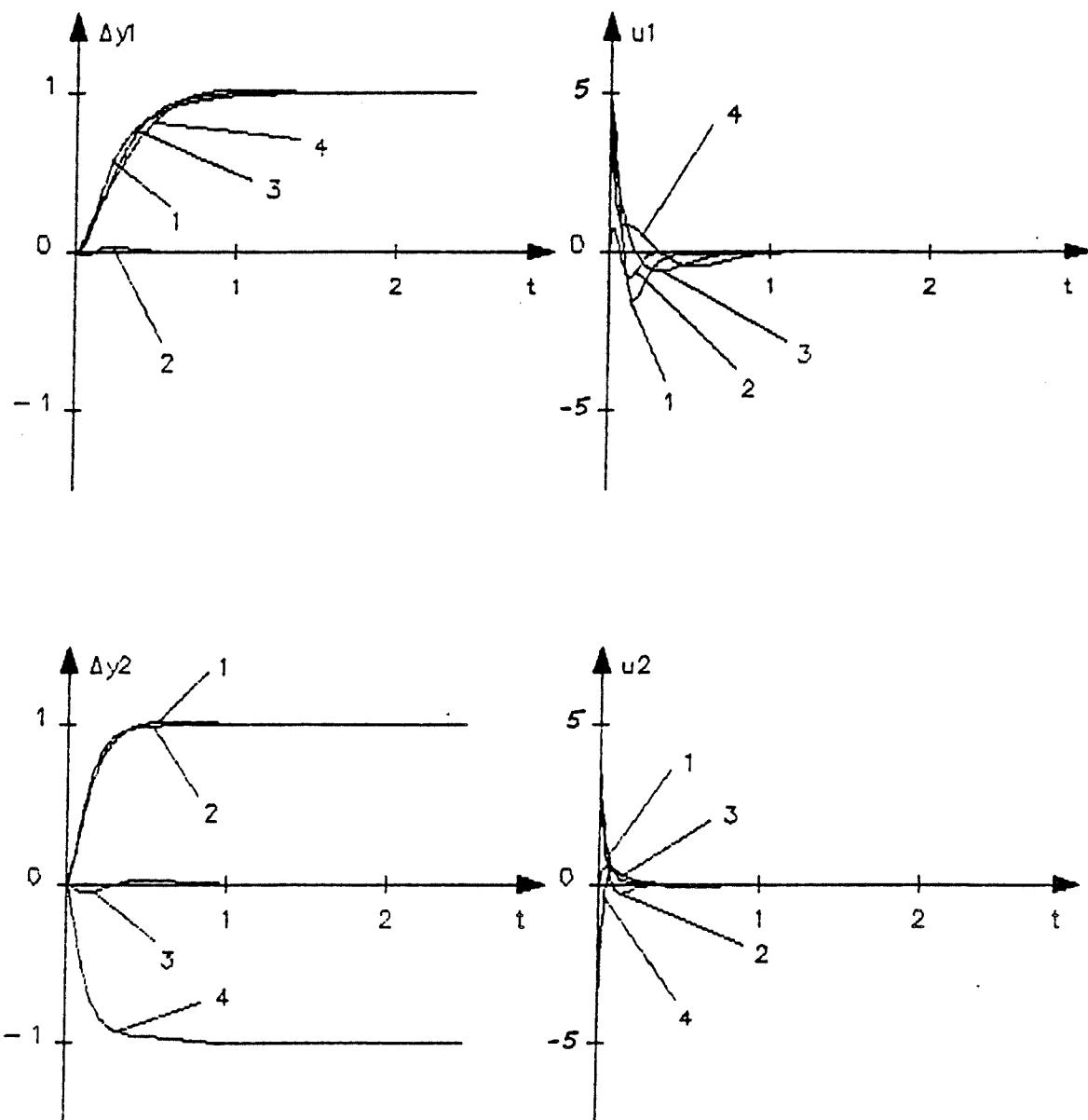


Figure 4.5 : Comportement dynamique du système complet

autour du point de travail  $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$

(1)  $\text{REF1}=1$ ,  $\text{REF2}=2.57$  (2)  $\text{REF1}=0$ ,  $\text{REF2}=2.57$

(3)  $\text{REF1}=1$ ,  $\text{REF2}=1.57$  (4)  $\text{REF1}=1$ ,  $\text{REF2}=.57$

#### 4.5 Exemple 2 (Performance vs configuration de travail)

Pour mieux illustrer l'influence de la configuration de travail sur le déplacement incrémental des segments du manipulateur, nous reprenons quelques résultats obtenus de l'exemple 1 et les réorganisons selon la figure 4.6. Les cas 1 et 2 représentent les réponses du système dans la configuration de travail A ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=0$ ) tandis que les cas 3 et 4 concernent la configuration B ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$ ). Les consignes choisies nous donnent une variation de .1 rad. Dans cet exemple nous illustrons seulement les cas où un segment est déplacé à la fois afin de bien isoler le problème. Nous remarquons que la configuration B permet d'obtenir une meilleure performance en terme de temps de réponse ainsi qu'en terme d'amortissement. Le tableau 4.7 résume l'étude comparative de performance du système dans les configurations de travail considérées. Dans ce tableau, la colonne "T<sub>r</sub> 5%" indique le temps de réponse à 5%, la colonne "Dépass." indique le dépassement dans la réponse à l'échelon, la colonne "Variation" indique la variation obtenue lorsque la consigne est nulle (ceci est dû essentiellement à l'effet d'intercouplement).

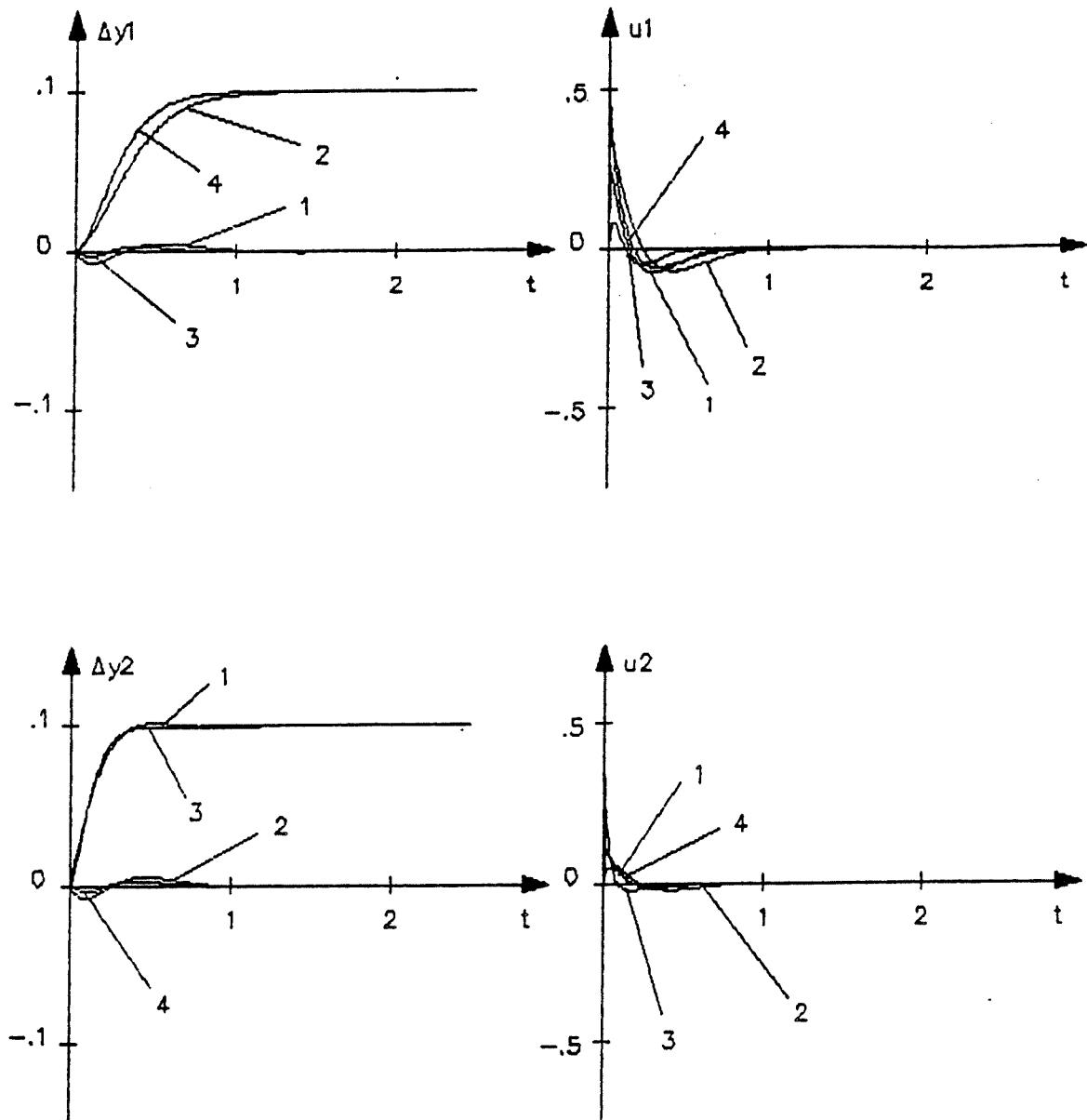


Figure 4.6 : Performance vs configuration de travail

- (1) Config. A - REF1=0, REF2=.1
- (2) Config. A - REF1=.1, REF2=0
- (3) Config. B - REF1=0, REF2=1.67
- (4) Config. B - REF1=.1, REF2=1.57

	<u>Config.</u>	<u><math>T_r</math> 5%</u>	<u>Dépass.</u>	<u>Variation</u>
Segment 1	A	.83 s	-	7 %
Segment 1	B	.65 s	-	3 %
Segment 2	A	.32 s	1 %	7 %
Segment 2	B	.30 s	-	4 %

Tableau 4.7 : Comparaison de performance du système dans différentes configurations de travail

La figure 4.7 reflète les résultats obtenus des mêmes essais que précédemment, mais avec une variation plus importante (1 rad). Nous obtenons une performance équivalente confirmant la linéarité du comportement dynamique du système dans l'espace de travail à l'étude.

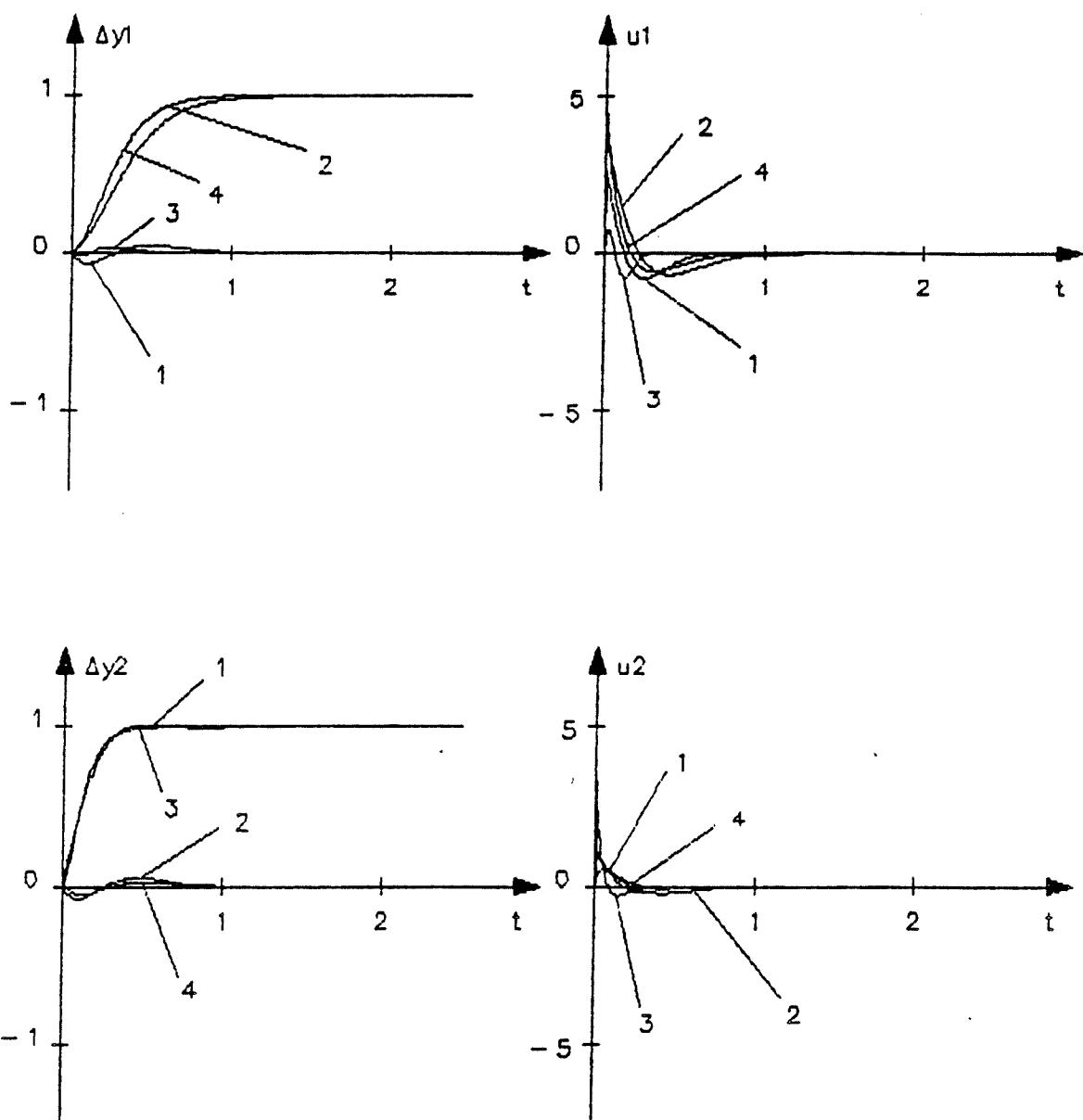
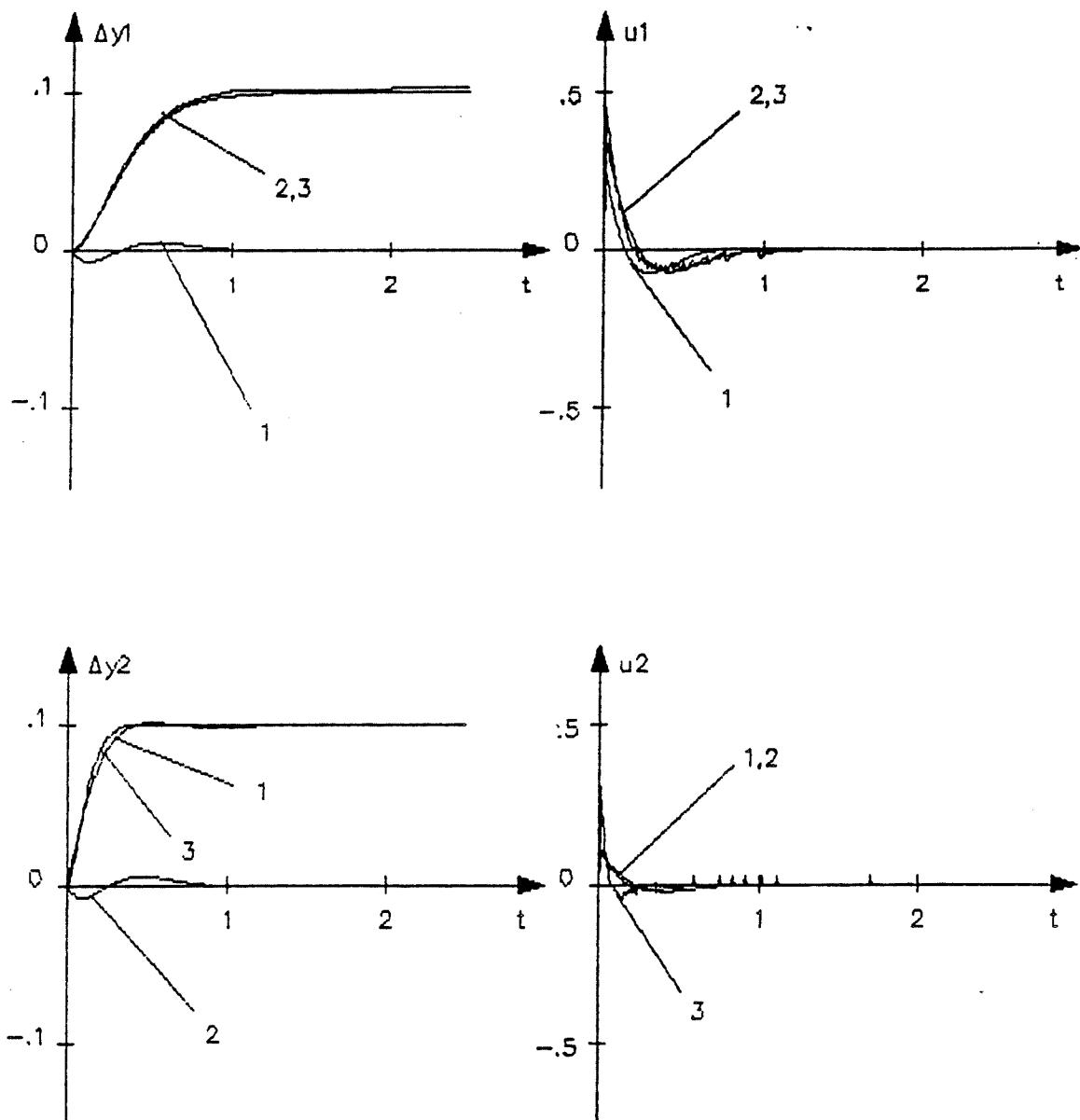


Figure 4.7 : Performance vs configuration de travail

- (1) Config. A - REF1=0, REF2=1
- (2) Config. A - REF1=1, REF2=0
- (3) Config. B - REF1=0, REF2=2.57
- (4) Config. B - REF1=1, REF2=1.57

#### 4.6 Exemple 3 (Validité des paramètres du modèle réduit)

Dans cet exemple nous examinons le comportement dynamique du système complet lors de l'application directe des valeurs de K calculées en considérant le modèle réduit. Une sélection des résultats obtenus de l'exemple 1 est effectuée pour comparer avec les réponses propres au système réduit. Les jeux d'essais choisis constituent les réponses du système complet lorsqu'un seul segment est en déplacement. Ceci nous amène aux résultats illustrés à la figure 4.8. La configuration de travail A ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=0$ ) est considérée. Les cas 1 et 2 représentent les réponses du système complet lors de l'application des consignes ( $REF1=0$ ,  $REF2=.1$ ) et ( $REF1=.1$ ,  $REF2=0$ ) respectivement. Le cas 3 représente les réponses du modèle réduit. Le tableau 4.8 résume les résultats de l'expérience en terme de temps de réponse à 5% et de dépassement. Nous remarquons une détérioration au niveau du temps de réponse dans le cas du système complet.



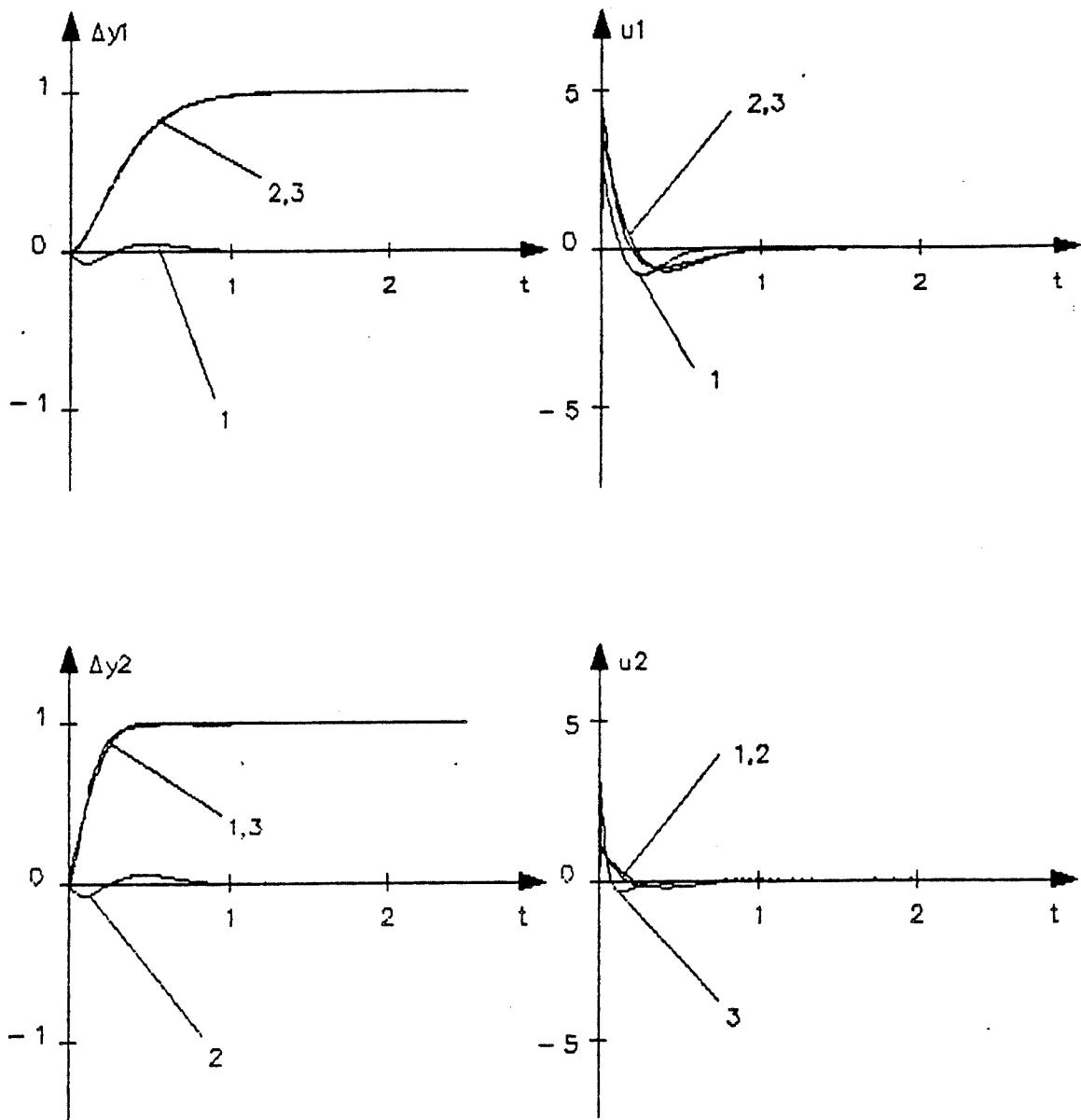
**Figure 4.8 :** Performance du système complet en utilisant les valeurs de  $K$  basées sur le modèle réduit

- (1)  $\text{REF1}=0$ ,  $\text{REF2}=.1$  (Système complet)
- (2)  $\text{REF1}=.1$ ,  $\text{REF2}=0$  (Système complet)
- (3) Réponses du modèle réduit

	Tr 5%		Dépassement	
	<u>Complet</u>	<u>Réduit</u>	<u>Complet</u>	<u>Réduit</u>
Segment 1	.83 s	.75 s	-	-
Segment 2	.32 s	.27 s	1 %	1 %

**Tableau 4.8:** Performance du système complet avec les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variation de .1 rad)

Nous effectuons ensuite les mêmes essais avec une variation plus importante (1 rad). La figure 4.9 reflète les résultats obtenus. Il est intéressant de remarquer que dans ce cas, les réponses du système complet se rapprochent plus à celles du modèle réduit. Le tableau 4.9 nous donne un récapitulatif de ces essais.



**Figure 4.9 :** Performance du système complet en utilisant les valeurs de  $K$  basées sur le modèle réduit

- (1)  $\text{REF1}=0$ ,  $\text{REF2}=1$  (Système complet)
- (2)  $\text{REF1}=1$ ,  $\text{REF2}=0$  (Système complet)
- (3) Réponses du modèle réduit

	<u>Tr 5%</u>		<u>Dépassement</u>	
	<u>Complet</u>	<u>Réduit</u>	<u>Complet</u>	<u>Réduit</u>
Segment 1	.83 s	.83 s	-	-
Segment 2	.31 s	.30 s	-	-

Tableau 4.9: Performance du système complet avec les valeurs de K basées sur le modèle réduit (variation de 1 rad)

#### 4.7 Exemple 4 (Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail)

Etant données les valeurs de K calculées sur la base du modèle réduit de façon à obtenir une bonne performance autour d'un point de travail. Il serait intéressant de savoir si ces paramètres nous procurent une performance satisfaisante lorsqu'appliqués autour d'un autre point de travail. La figure 4.10 nous illustre les résultats obtenus en utilisant les valeurs de K calculées pour la configuration A ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=0$ ). Les cas 1 et 2 représentent les réponses du système, dans la configuration de travail A, lors de l'application des consignes ( $REF1=0$ ,  $REF2=.1$ ) et ( $REF1=.1$ ,  $REF2=0$ ) respectivement. Les cas 3 et 4 représentent les réponses du système, dans la configuration de travail B ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$ ), lors de l'application des consignes ( $REF1=0$ ,  $REF2=1.67$ ) et ( $REF1=.1$ ,  $REF2=1.57$ ) respectivement. Le tableau 4.10 nous résume les résultats de l'expérience en terme de temps de réponse à 5% et de dépassement. Nous remarquons une détérioration dans le temps de réponse du premier segment (.96s vs .83s). Cependant, nous obtenons une amélioration dans le régime transitoire pour le deuxième segment.

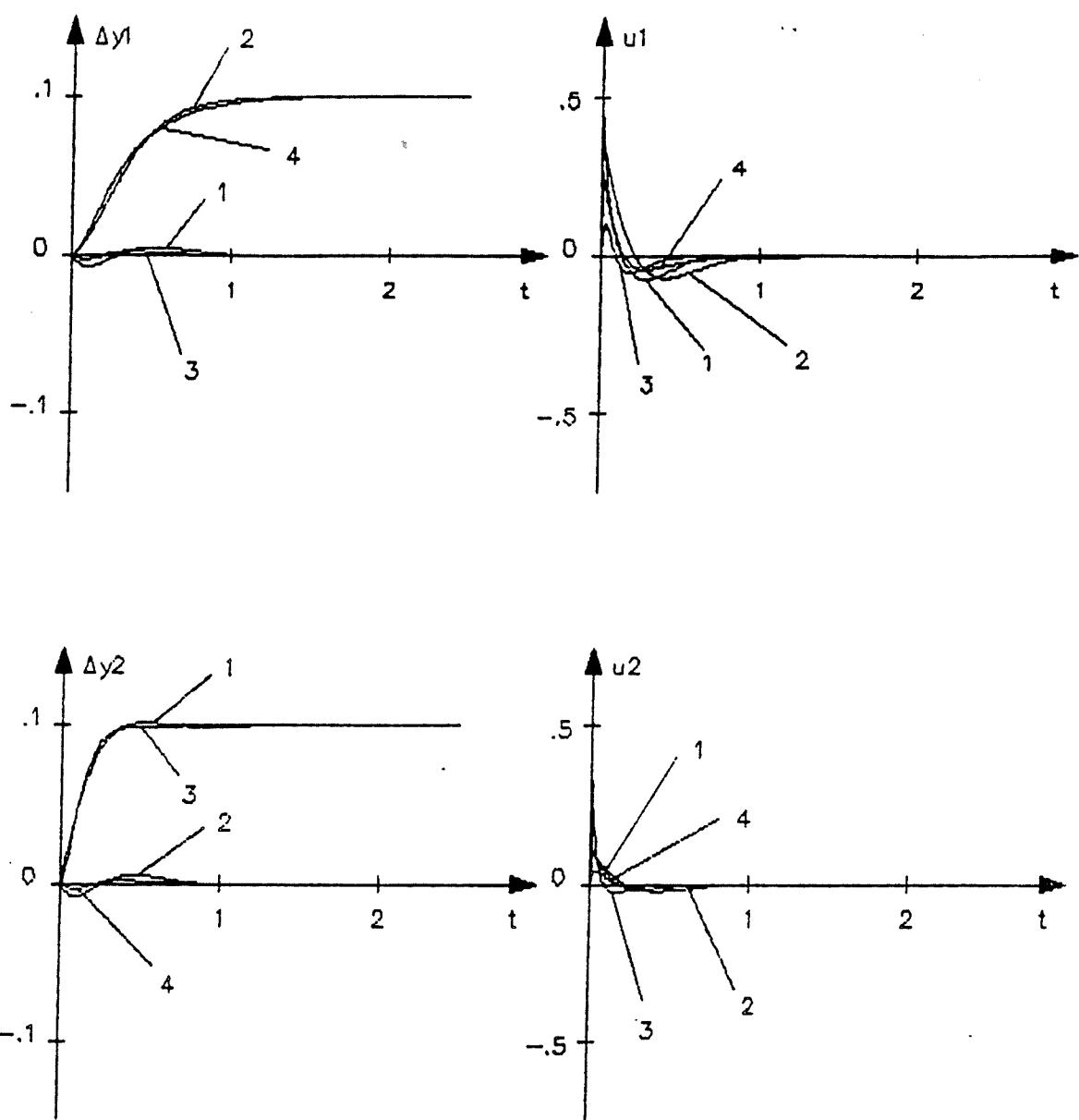


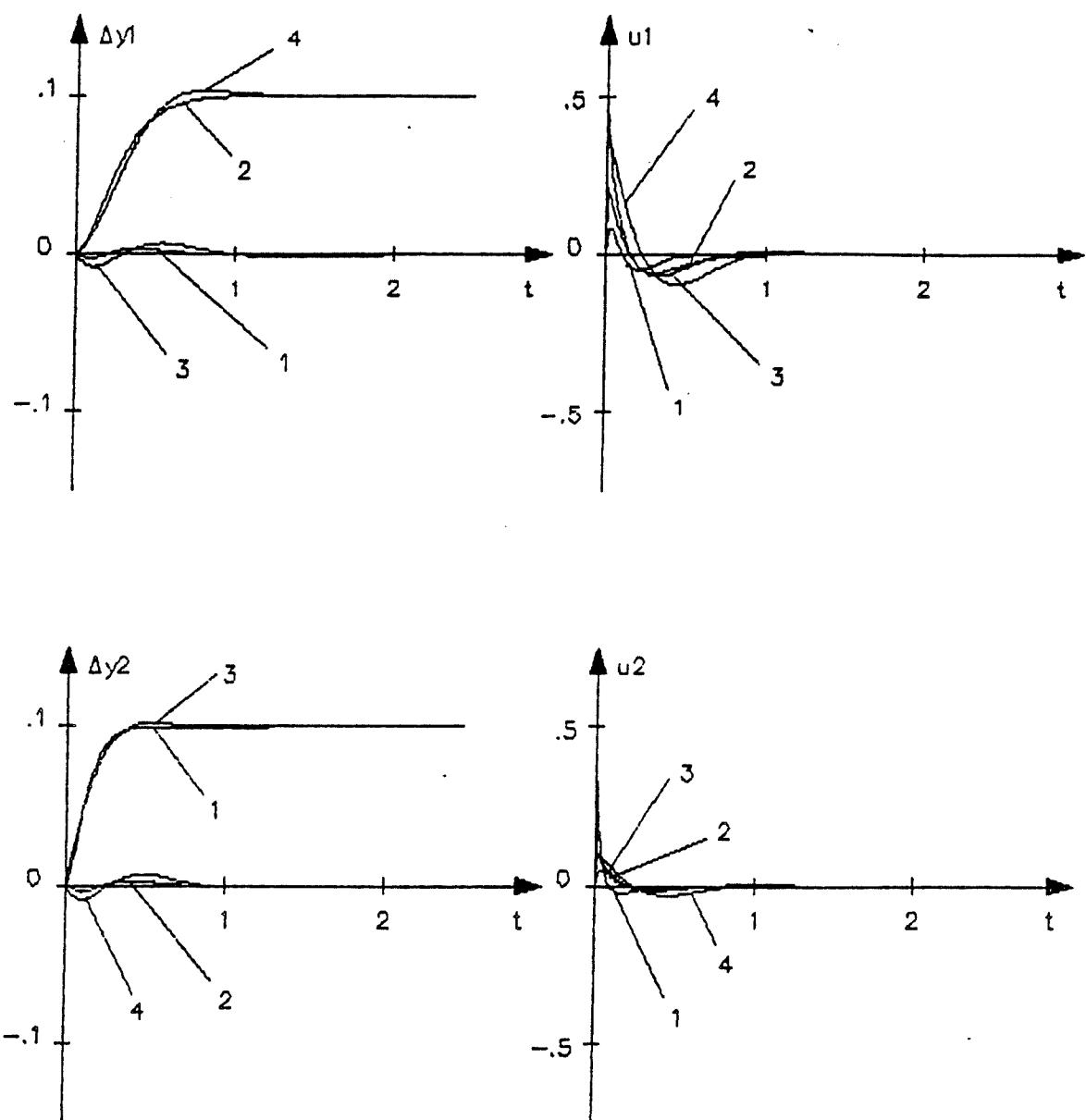
Figure 4.10 : Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains basés sur config.A)

- (1) Config.A - REF1=0, REF2=.1
- (2) Config.A - REF1=.1, REF2=0
- (3) Config.B - REF1=0, REF2=1.67
- (4) Config.B - REF1=.1, REF2=1.57

Configuration	Tr 5%		Dépassement	
	A	B	A	B
Segment 1	.83 s	.96 s	-	-
Segment 2	.32 s	.30 s	1 %	-

**Tableau 4.10:** Performance du système dans les configurations A et B avec valeurs de K calculées pour la configuration A (variation de .1 rad)

Dans la même suite d'idée, la figure 4.11 nous illustre les résultats obtenus en utilisant cette fois les valeurs de K calculées pour la configuration B ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$ ). Les cas 1 et 2 représentent les réponses du système, dans la configuration de travail A, lors de l'application des consignes ( $REF1=0$ ,  $REF2=.1$ ) et ( $REF1=.1$ ,  $REF2=0$ ) respectivement. Les cas 3 et 4 représentent les réponses du système, dans la configuration de travail B ( $\theta_1=0$ ,  $\theta_2=1.57$ ), lors de l'application des consignes ( $REF1=0$ ,  $REF2=1.67$ ) et ( $REF1=.1$ ,  $REF2=1.57$ ) respectivement. Le tableau 4.11 nous donne un récapitulatif de l'expérience.



**Figure 4.11 :** Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains basés sur config.B)

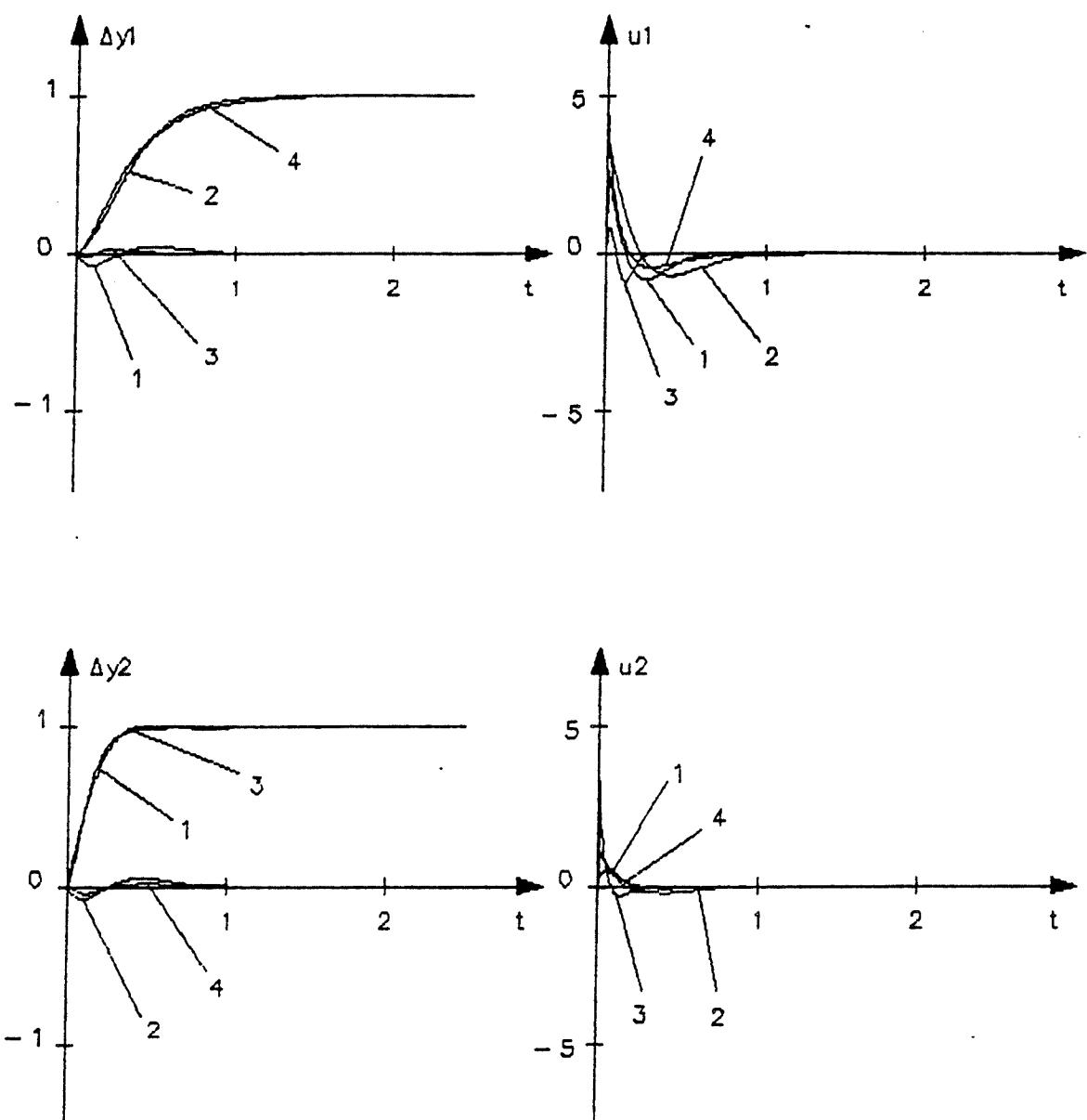
- (1) Config.A - REF1=0, REF2=.1
- (2) Config.A - REF1=.1, REF2=0
- (3) Config.B - REF1=0, REF2=1.67
- (4) Config.B - REF1=.1, REF2=1.57

Configuration	Tr 5%		Dépassement	
	A	B	A	B
Segment 1	.55 s	.65 s	3 %	-
Segment 2	.32 s	.30 s	1 %	-

Tableau 4.11: Performance du système dans les configurations A et B avec valeurs de K calculées pour la configuration B (variation de .1 rad)

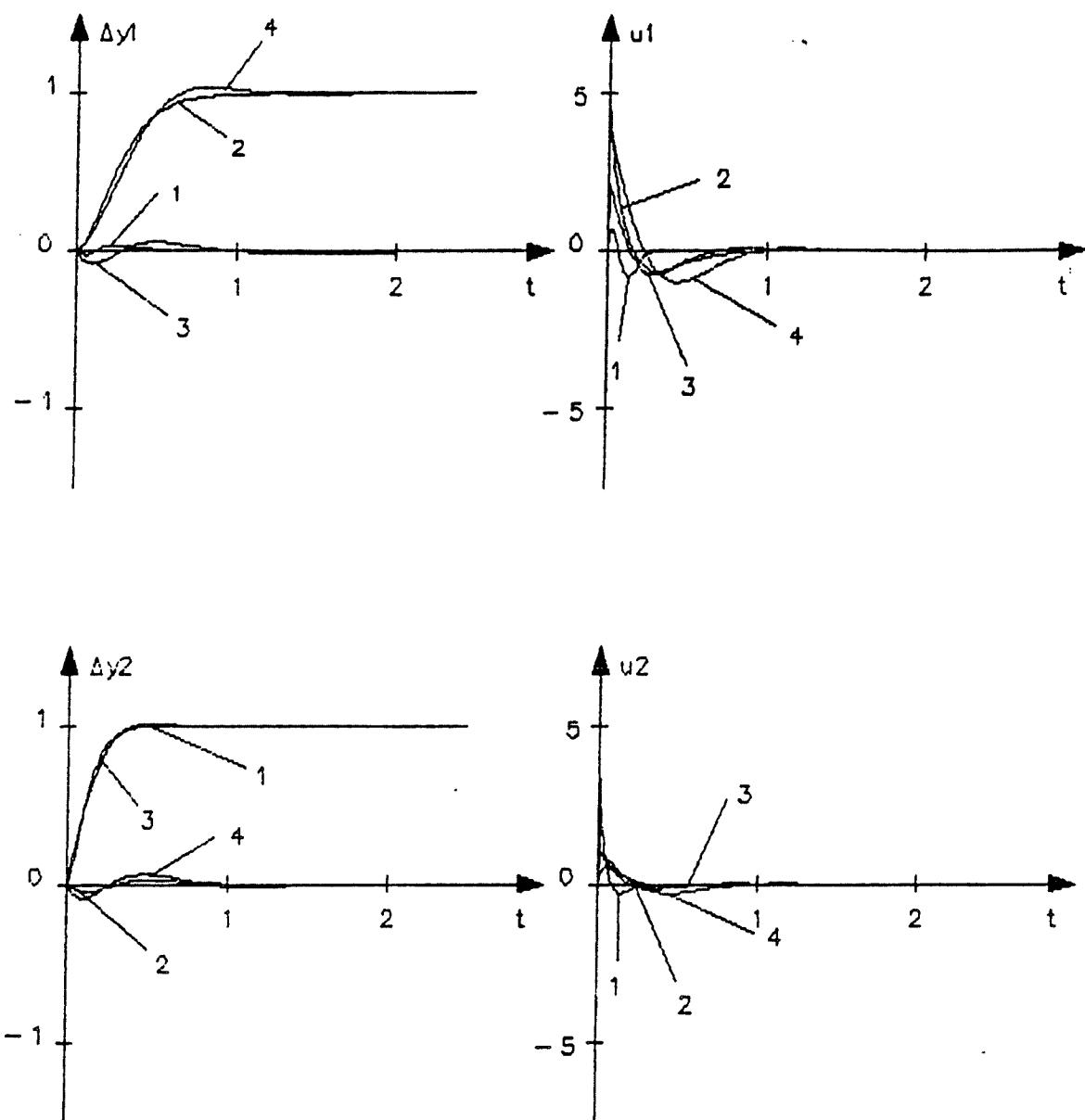
Nous remarquons une amélioration dans le temps de réponse du premier segment (.55s vs .65s), et par contre un dépassement de 3% dans la réponse transitoire. Dans le cas du deuxième segment, nous dénotons une détérioration tant au niveau du temps de réponse (.32s vs .30s) qu'au niveau du comportement transitoire (dépassement de 1%).

Nous effectuons ensuite les mêmes essais avec une variation plus importante (1 rad). Les figures 4.12 et 4.13 reflètent les résultats obtenus. Nous obtenons dans ces cas les performances équivalentes à celles obtenues avec les variations de .1 rad.



**Figure 4.12 :** Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains basés sur config.A)

- (1) Config.A - REF1=0, REF2=1
- (2) Config.A - REF1=1, REF2=0
- (3) Config.B - REF1=0, REF2=2.57
- (4) Config.B - REF1=1, REF2=1.57



**Figure 4.13 :** Validité des paramètres sur plusieurs configurations de travail (gains basés sur config.B)

- (1) Config.A - REF1=0, REF2=1
- (2) Config.A - REF1=1, REF2=0
- (3) Config.B - REF1=0, REF2=2.57
- (4) Config.B - REF1=1, REF2=1.57

## CHAPITRE 5

### CONCLUSION

Ce chapitre comporte un résumé des résultats obtenus de l'analyse de sensibilité du comportement dynamique du système de manipulateur robotique à l'étude. Nous y retrouvons également la projection sur quelques extensions possibles au présent travail.

## 5.1 Résultats obtenus

### 5.1.1 Analyse de sensibilité

Dans ce travail, nous avons illustré l'application d'une approche systématique qui nous permet d'évaluer la sensibilité du comportement dynamique du modèle suite aux variations de paramètres de contrôle ainsi qu'aux changements de configuration de travail. La philosophie de design du système de commande, mettant en relief l'utilisation des modèles réduits qui se dégagent de certains aspects non-linéaires et d'intercouplement, a été respectée et nous a fourni un bon point de départ dans le processus de rationalisation des paramètres de contrôle.

L'exemple 1 nous démontre que l'effet d'intercouplement a entraîné une détérioration tant au niveau de la performance dynamique qu'au niveau de la précision.

L'exemple 2 nous démontre que le changement de la configuration de travail affecte essentiellement la performance dynamique du système.

L'exemple 3 nous démontre que les paramètres  $K$  offerts par les modèles réduits restent valides sur le plan de précision, mais ne garantissent pas une performance dynamique équivalente lorsqu'appliqués au système complet.

L'exemple 4 nous démontre que les paramètres K déterminés pour une configuration donnée ne garantissent pas une performance équivalente lorsqu'appliqués sur une autre configuration de travail.

L'ensemble des cas étudiés nous confirme que le comportement du système à l'étude reste linéaire suite aux changements assez importants des consignes de positions (un rapport de 10:1 a été expérimenté).

#### 5.1.2 Progiciel SIMAR

En ce qui a trait au progiciel SIMAR, les résultats obtenus lors de différents cas d'étude ont été validés en utilisant le programme ASSERV.POS (référence [9]) qui a été conçu pour l'analyse d'un joint robotique.

## 5.2 Extensions possibles

### 5.2.1 Analyse de sensibilité

Dans le contexte d'analyse de sensibilité du comportement dynamique du manipulateur, le présent travail a atteint le but visé. Il serait quand même intéressant d'aborder le même thème dans les différentes directions:

- 1) Nous pourrions nous intéresser aux problèmes de plus grande dimension (ex: un manipulateur ayant plus que deux degrés de liberté) où la complexité du développement du modèle mathématique est fortement accrue.
- 2) Nous pourrions nous intéresser également aux problèmes de même ordre de grandeur que celui de la présente étude en considérant les autres caractéristiques de fonctionnement tels que:
  - Erreur de quantisation des convertisseurs A/D et D/A;
  - Différentes stratégies de compensation de l'effet de gravité;
  - Effet des bruits au niveau des capteurs;
  - Différentes méthodes de contrôle autre que le contrôle linéaire (ex: dual, à relais);

- Moment d'inertie par rapport au centre de masse des segments.

### 5.2.2 Progiciel SIMAR

Au moment du développement du progiciel SIMAR, le langage BASIC était un des langages évolués les plus reconnus dans les applications scientifiques développées sur l'ordinateur personnel IBM-PC. La version BASIC compilé nous a permis de combler la tâche désirée et d'atteindre une performance de calcul satisfaisante. Cependant, avec les autres langages tels que PASCAL (version de Microsoft ou Turbo Pascal) et "C" (références [19] à [21]) nous pourrions encore améliorer la structure et surtout la performance du programme.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BERTHOLD K.P. HORN, "Kinematics, Statics and Dynamics of Two Dimensional Manipulators".
- [2] PAUL R.P., "Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and control", MIT Press, (1984).
- [3] ENGELBERGER J.F., "Robotics in practice", AMA COM, (1982).
- [4] BRADY M., HOLLERBACH J.M., JOHNSON T.L., LOZANO-PEREZ T., MASON M.T., "Robot motion: Planning and control", MIT Press, (1984).
- [5] CRUZ J.B, "Benchmark Papers in System Sensitivity Analysis", Dowden, Hutchison & Ross Inc., (1973).
- [6] DE SANTIS R.M., "Les éléments fondamentaux de la robotique, Cinématique, Dynamique et Commande", Ecole Polytechnique de Montréal, (1986).
- [7] DE SANTIS R.M., "Contrôle des systèmes industriels par micro-ordinateurs, Modélisation, Analyse et Design", Ecole Polytechnique de Montréal, (1985).
- [8] DE SANTIS R.M., "Théorie des asservissements linéaires", Ecole Polytechnique de Montréal, (1986).
- [9] TERROUX A., DE SANTIS R.M, "ASSERV.POS: Un programme pour la simulation de la commande d'un joint robotique", Ecole Polytechnique de Montréal, (1984).

- [10] MOLER C., LITTLE J., BANGERT S., KLEIMAN S.,  
"PC-MATLAB for MS-DOS Personal Computer", The  
Mathworks Inc., (1986).
- [11] LIEGOEIS A., BORREL P., DOMBRE E., "Programming,  
Simulating and Evaluating Robot Actions", Laboratoire  
d'Automatique et de Microélectronique de Montpellier  
France, (1985).
- [12] TERROUX A., "Conception d'un Simulateur de Systèmes  
Robotiques", Mémoire de maîtrise dirigé par DE SANTIS  
R.M., Ecole Polytechnique de Montréal, (1986).
- [13] FOLEY J.D., VAN DAM A., "Fundamentals of Interactive  
Computer Graphics", Addison-Wesley, (1983).
- [14] ANONYMOUS, "The AutoCAD™ Drafting Package, User  
Guide", Autodesk Inc., (1985).
- [15] GRAHAM L.J, FIELD T., "Your IBM PC, A Guide to the  
IBM PC (DOS 2.0) and XT", Osborn/McGraw-Hill, (1984).
- [16] ANONYMOUS, "DOS", IBM Personal Computer Hardware  
Reference Library.
- [17] ANONYMOUS, "Technical Reference Manual", IBM Personal  
Computer Hardware Reference Library.
- [18] ANONYMOUS, "BASIC", IBM Personal Computer Hardware  
Reference Library.
- [19] ANONYMOUS, "TURBO PASCAL Reference Manual", Borland  
International Inc., (1985).
- [20] ANONYMOUS, "Microsoft Pascal Reference Manual",  
Microsoft Corporation.

- [21] ANONYMOUS, "Microsoft C Compiler, User's Guide and Reference Manual", Microsoft Corporation.
- [22] ANONYMOUS, "ACES - All Purpose Continuous Equation Simulator", Modulo 2 Company.

## APPENDICE A

### DIALOGUES OPERATEUR

Le critère primordial dans le design du progiciel SIMAR (Simulation Interactive des Manipulateurs Robotiques) est de fournir à l'utilisateur une facilité d'usage. Ainsi, toutes les procédures de dialogues opérateur sont implantées sous forme de menus, et par conséquent n'exigent de l'utilisateur que des réponses précises ou encore une simple confirmation pour exécuter la fonction désirée. L'utilisateur est guidé à travers une ou plusieurs "pages d'écrans" qui s'enchaînent de façon hiérarchique afin de compléter la masse d'information requise pour la fonction demandée. Cette appendice présente les figures représentant les pages d'écrans que l'utilisateur retrouvera dans la session de travail avec le progiciel SIMAR.

Les figures A.1 à A.7 constituent les dialogues interactifs permettant d'introduire les spécifications techniques nécessaires au problème d'analyse. Les figures A.8 à A.12 constituent les graphiques permettant une visualisation des résultats de la simulation avec suffisamment de précision. Les figures A.13 et A.14 constituent les dialogues relatifs à la sauvegarde et au

rechargement des informations pertinentes à un problème d'analyse.

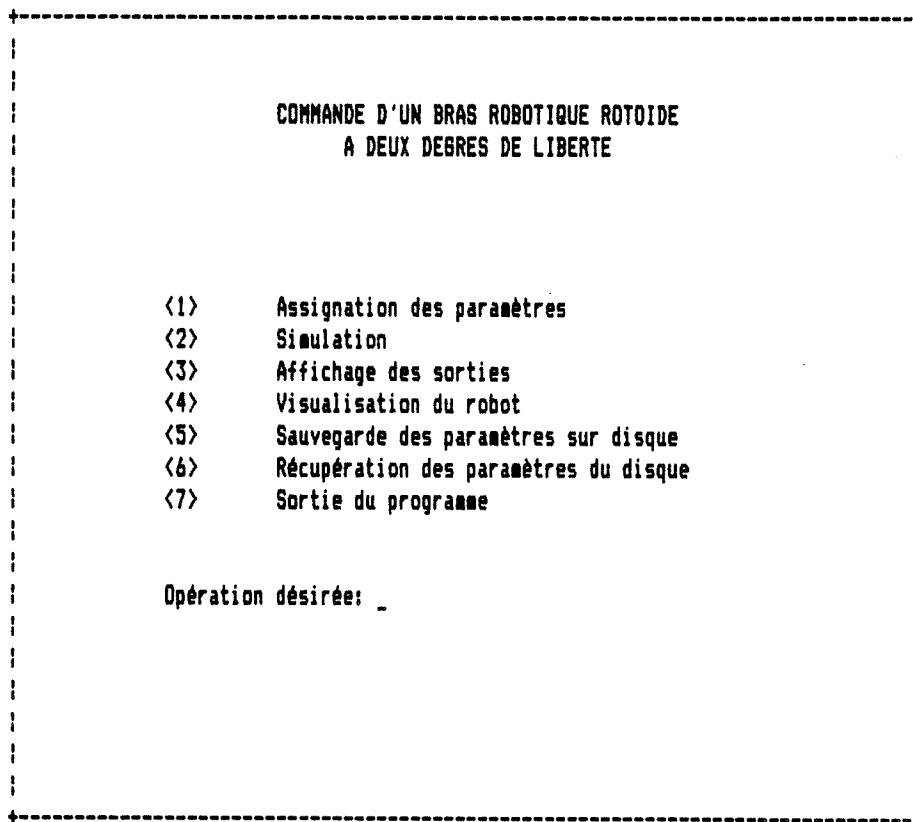
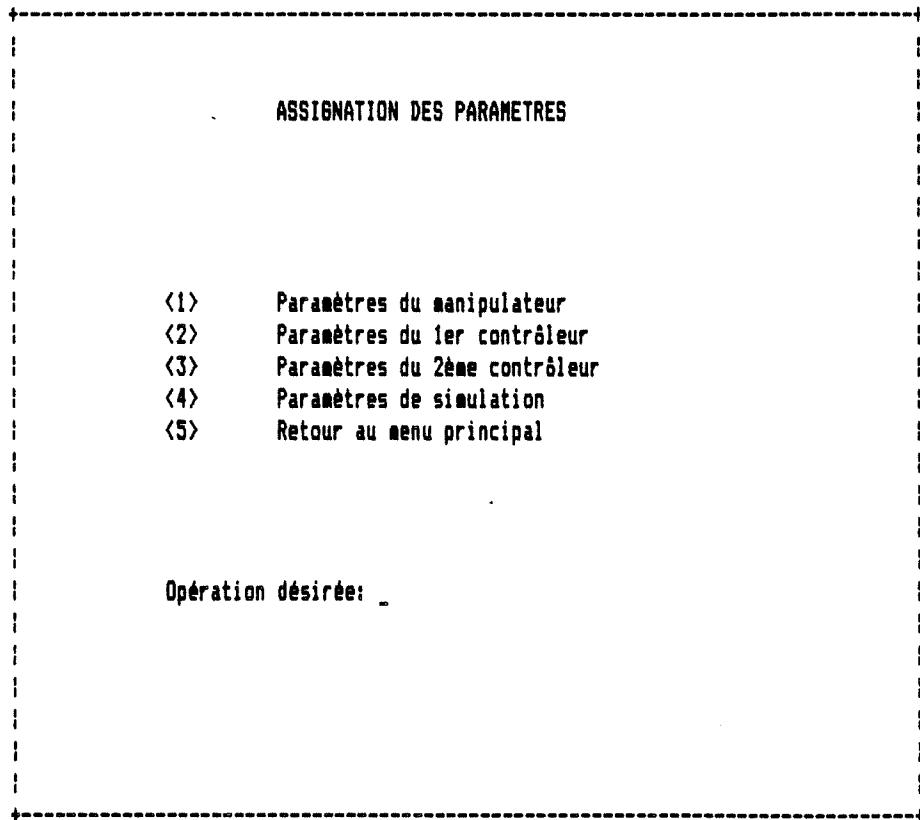


Figure A.1: Menu principal



**Figure A.2:** Assignment des paramètres

ASSIGNATION DES PARAMETRES

〈1〉 Paramètres du manipulateur:

- (1) Longueur de la 1ere articulation (mtrs)  $d_1 = .5$
- (2) Longueur de la 2eme articulation (mtrs)  $d_2 = .5$
- (3) Masse de la 1ere articulation (kgrs)  $m_1 = .25$
- (4) Masse de la 2eme articulation (kgrs)  $m_2 = .25$
- (5) Coefficient de viscosité 1ere artic.  $f_1 = .05$
- (6) Coefficient de viscosité 2eme artic.  $f_2 = .05$
- (7) Moment d'inertie de la 1ere artic.  $I_1 = 0$
- (8) Moment d'inertie de la 2eme artic.  $I_2 = 0$

--- Quel paramètre voulez-vous modifier? \_

Figure A.3: Paramètres du manipulateur

## ASSIGNATION DES PARAMETRES

## &lt;2&gt; Paramètres du 1er contrôleur:

- (1) #1 - Contrôle Linéaire/Relai/Dual 0/1/2 = 0
- (2) #1 - Gain du capteur de position KP1 = .02
- (3) #1 - Gain du capteur de vitesse KS1 = .06
- (4) #1 - Bruit au capteur de position NP1 = 0
- (5) #1 - Bruit au capteur de vitesse NS1 = 0
- (6) #1 - Perturbation à l'entrée NE1,CF1 = 0 0
- (7) #1 - Niveau de quantisation A/D BS1,QP1 = 0 0
- (8) #1 - Niveau de quantisation D/A QC1 = 0
- (9) #1 - Dual mode threshold level ED1 = 0
- (10) #1 - Relay threshold E11,E12,E13,E14 = .5 .5 .5 .5
- (11) #1 - Relay output levels U11,U12 = 5 5
- (12) #1 - Gains du régulateur K11,K12,K13,K14 = 5.46 1.75 1.57 -.36

--- Quel paramètre voulez-vous modifier? \_

Figure A.4: Paramètres du premier contrôleur

## ASSIGNATION DES PARAMETRES

### 〈3〉 Paramètres du 2ème contrôleur:

- (1) #2 - Contrôle Linéaire/Relai/Dual 0/1/2 = 0

(2) #2 - Gain du capteur de position KP2 = .02

(3) #2 - Gain du capteur de vitesse KS2 = .06

(4) #2 - Bruit au capteur de position NP2 = 0

(5) #2 - Bruit au capteur de vitesse NS2 = 0

(6) #2 - Perturbation à l'entrée NE2,CF2 = 0 0

(7) #2 - Niveau de quantisation A/D QS2,QP2 = 0 0

(8) #2 - Niveau de quantisation D/A QC2 = 0

(9) #2 - Dual mode threshold level ED2 = 0

(10) #2 - Relay threshold E21,E22,E23,E24 = .5 .5 .5 .5

(11) #2 - Relay ouput levels U21,U22 = 5 5

(12) #2 - Gains du régulateur K21,K22,K23,K24 = 5.64 .5 13 -.13

--- Quel paramètre voulez-vous modifier? \_

Figure A.5: Paramètres du deuxième contrôleur

## ASSIGNATION DES PARAMETRES

#### 〈4〉 Paramètres de simulation:

- |      |                                    |              |
|------|------------------------------------|--------------|
| (1)  | #1 - Position angulaire initiale   | X(1,0) = 0   |
| (2)  | #1 - Vitesse angulaire initiale    | X(2,0) = 0   |
| (3)  | #1 - Intégral de l'erreur initiale | X(3,0) = 0   |
| (4)  | #2 - Position angulaire initiale   | X(4,0) = 0   |
| (5)  | #2 - Vitesse angulaire initiale    | X(5,0) = 0   |
| (6)  | #2 - Intégral de l'erreur initiale | X(6,0) = 0   |
| (7)  | Temps de simulation                | ST = 3       |
| (8)  | Pas d'intégration                  | DELTA = .001 |
| (9)  | #1 - Position désirée (rads)       | REF1 = .1    |
| (10) | #2 - Position désirée (rads)       | REF2 = .1    |

--- Quel paramètre voulez-vous modifier?

Figure A.6: Paramètres de simulation

```
+-----+  
|  
| Simulation en progression  
|  
|  
| Compteur d'intervalles = 11          Temps = .11E+00 secs  
|  
| Pressez <CR> pour arrêter la simulation  
|  
+-----+
```

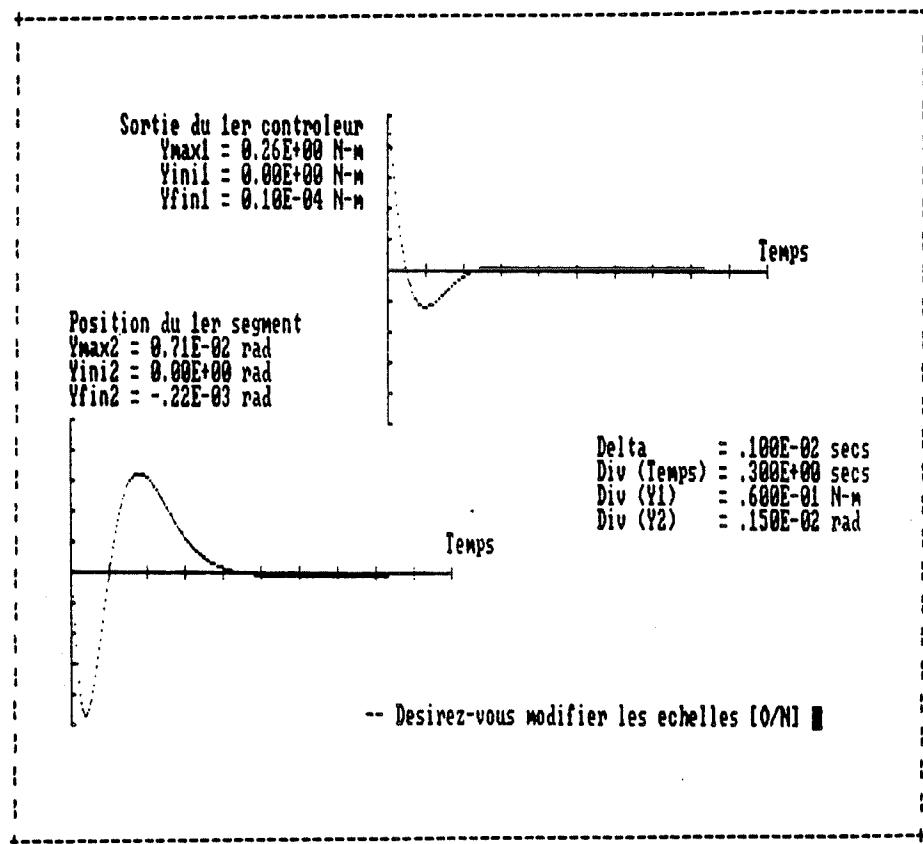
Figure A.7: Simulation

<b>AFFICHAGE DES SORTIES</b>		
1	-	Position du 1er segment
2	-	Vitesse du 1er segment
3	-	Sortie du 1er contrôleur
4	-	Position du 2ème segment
5	-	Vitesse du 2ème segment
6	-	Sortie du 2ème contrôleur

Entrez les numéros des sorties désirées: \_

Pressez <CR> pour retourner au menu

**Figure A.8:** Affichage des résultats



**Figure A.9:** Exemple de graphiques #1

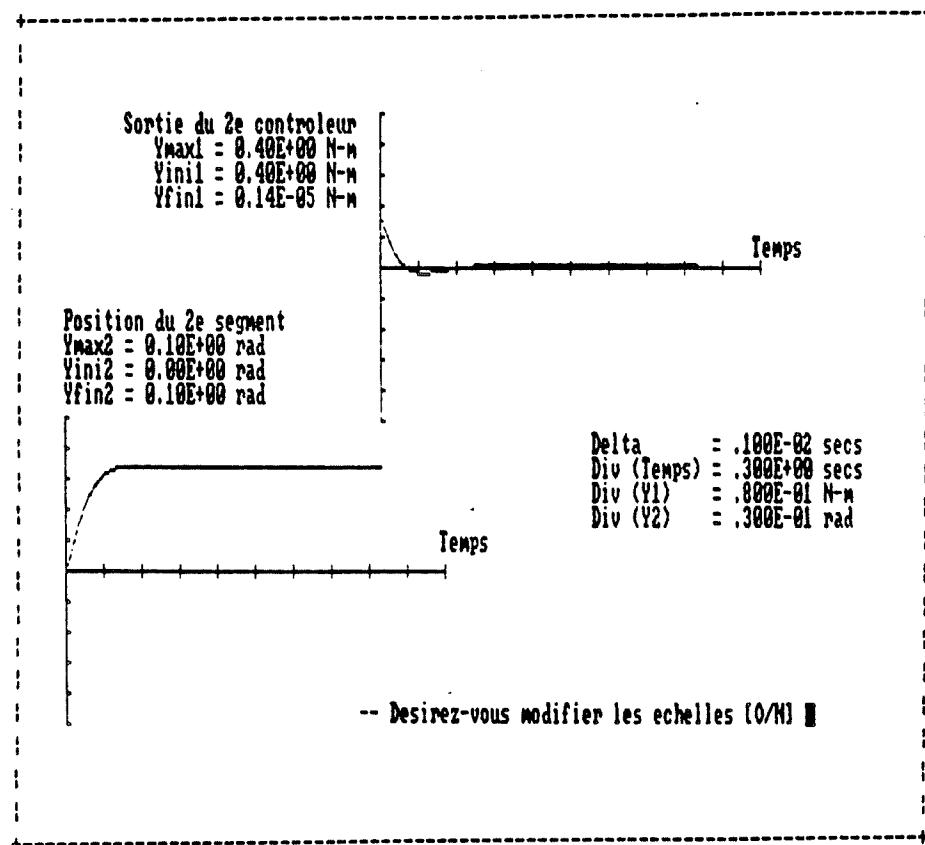


Figure A.10: Exemple de graphiques #2

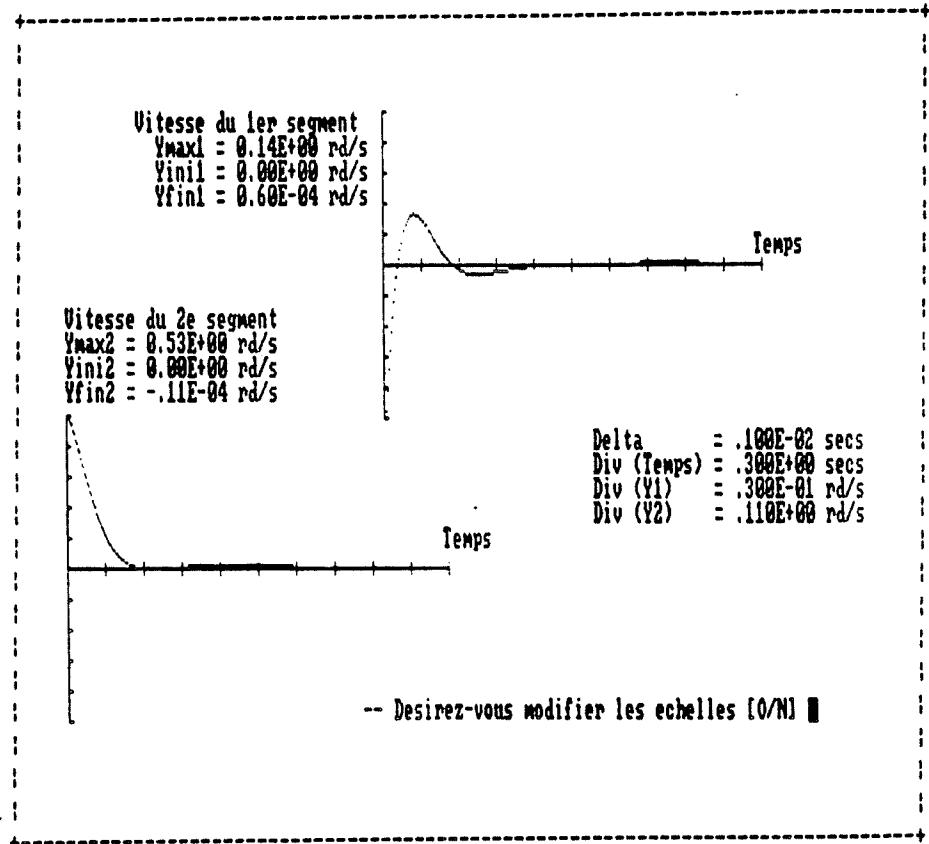


Figure A.11: Exemple de graphiques #3

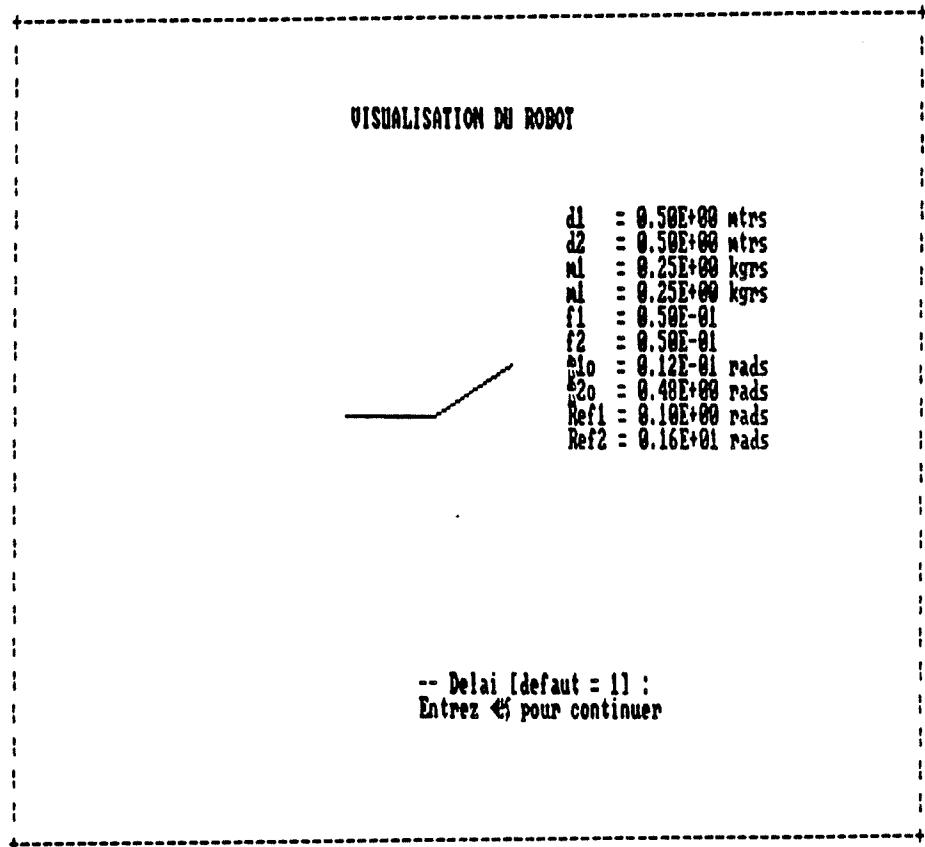
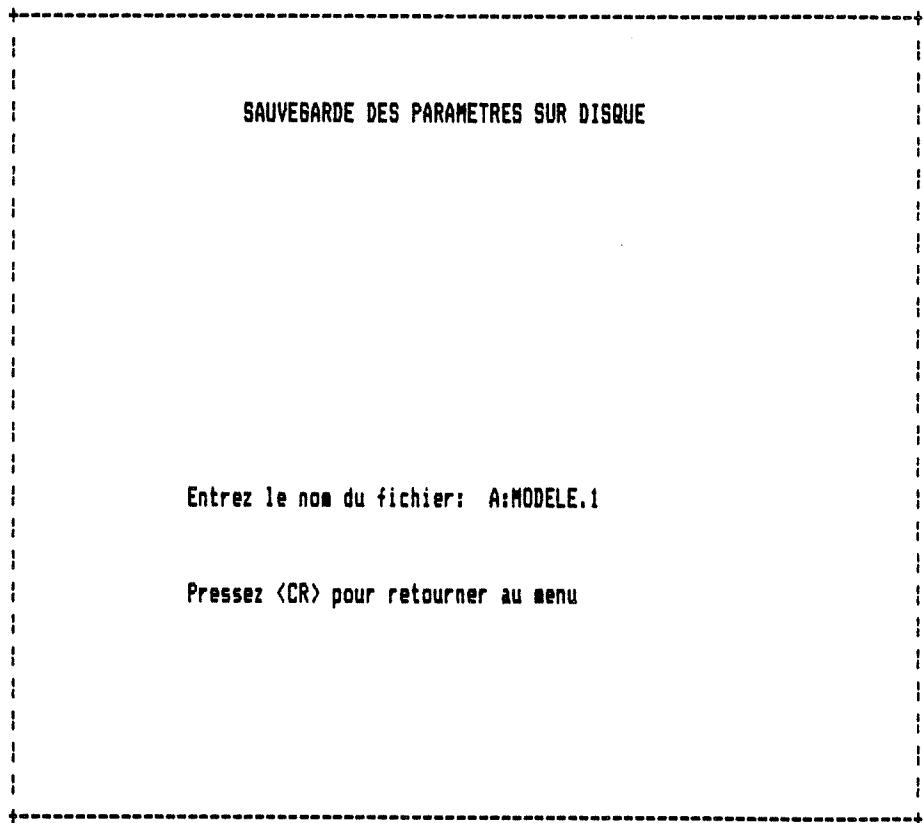
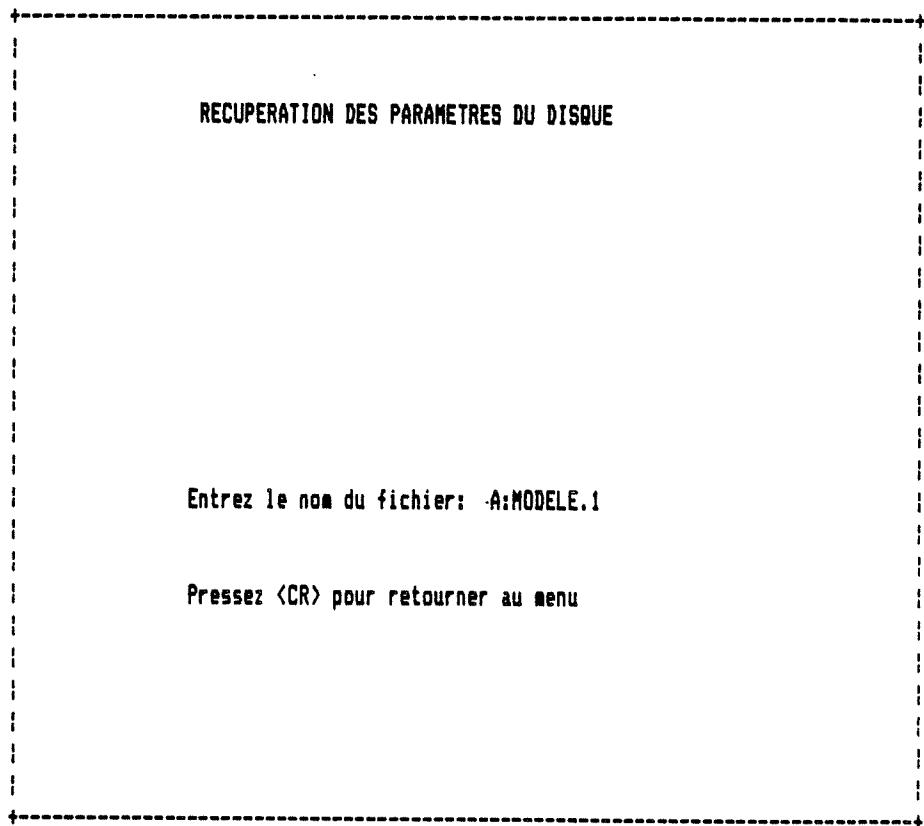


Figure A.12: Visualisation du robot



**Figure A.13:** Sauvegarde des paramètres sur disque



**Figure A.14:** Récupération des paramètres du disque

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289513 2