

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Saad Dahlab de Blida

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'électronique

Option : Contrôle

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par : M^{lle} REDAD TOUNES

THEME

COMMANDE INTELLIGENTE D'UN ROBOT MOBILE-MANIPULATEUR

Soutenu devant le jury composé de:

Mr A.GUESSOUM
Mr B.BOUZOUIA
Mr H.SALHI
Mr M.TADJINE

Professeur
Maître de Recherche
Maître de conférence
Maître de conférence

Université de Blida, Président
CDTA, Alger, Rapporteur
Université de Blida, Examineur
ENP, Alger, Examineur

Année universitaire : 2001/2002

A tous ceux que j'aime,

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé à l'institut d'électronique de l'université de Blida sous la direction de Mr BOUZOUIA.B directeur de recherche au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA). Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordées ; ses qualités scientifiques et humaines ont été un soutien important pour mener à bien ce travail.

Je remercie très chaleureusement monsieur M.Temmar et je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordées ; ses qualités scientifiques et humaines ont été un soutien important pour mener à bien ce travail.

Je remercie très sincèrement Mr BENSEBTI.M directeur de la PGRS de l'institut d'Electronique d'avoir mis à notre disponibilité les moyens nécessaires pour la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à Mr GUESSOUM.A doyen de la faculté des sciences de l'ingénieur qui me fait l'honneur de présider de jury de la soutenance de ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres de comité de lecture pour leur participation au jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leurs remarques qui m'ont permis d'améliorer la rédaction de ce mémoire :

Mr GUESSOUM.A Professeur. Université de Blida..

Mr SALHI.H Maître de conférence Université de Blida.

Je remercie Mr TADJINE.M Maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach (ENP) d'avoir accepter de participer au jury de soutenance de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toutes mes reconnaissances à Mr KADRI.M attaché de recherche au CDTA.

J'adresse aussi ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à créer une ambiance amicale et chaleureuse parfois bien utile : Haddad.A, Ahmed, Fatma, Wahiba, Fatima, Nacer, Anissa, Fatiha,

Je dédie enfin ce travail à toute ma famille qui m'a soutenu et encouragé ainsi qu'à tous mes amis et tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Résumé

Dans ce mémoire, la modélisation et le contrôle d'un robot manipulateur mobile ont été investis. Le manipulateur mobile considéré est composé d'un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile non-holonome à roues.

Le développement d'un modèle mathématique décrivant la totalité des phénomènes dynamiques agissant sur le manipulateur mobile était notre premier objectif. Ce modèle a l'avantage de permettre l'évaluation des effets d'interaction entre le bras manipulateur et la plate-forme mobile.

L'étude analytique menée a permis de conclure que les effets de couplage dynamique représentent un pourcentage très important du couple nominal du système ; de ce fait, leur intégration dans la boucle de contrôle est indispensable. Trois classes de commandes sont présentées dans le chapitre III.

La troisième classes de commande représente une solution dans la mesure où elle prévoit la compensation de tous les phénomènes dynamiques auxquels le manipulateur mobile est sujet. La robustesse de ces lois de commandes est vérifiée en simulation pour les tâches de suivi de trajectoire en présence de différents types de perturbations.

Mots-clés :

Manipulateur mobile, Modèle dynamique, Interaction dynamique, Suivi de trajectoire, Commande dynamique, commande floue, commande neuronale.

Abstract

Modelling and control of robotic mobile manipulators were investigated in this work. The mobile manipulator considered is composed of a robotic arm mounted on a non-holonomic wheeled mobile platform.

The aim of the project was the development of a mathematical model which describes the whole dynamic phenomenon which affects the mechanical structure. This model allowed the analysis and the evaluation of the dynamic interaction effects between the robotic arm and the mobile platform. Through the conducted analytical study, we had noticed that this effects represents a significant percentage of nominal torque ; therefore, it will be integrated in the feedback control. Three classes of command are presented in chapter III.

The third class of commande control law represents an original solution as it provides for the compensation of all dynamic phenomenon which affects the mobile manipulator. The law control robustness is verified by simulation experiments for the tracking tasks in presence of various disturbances.

Key-words :

Mobile manipulator, Dynamic model, Dynamic interaction, Tracking, Dynamic control law, fuzzy control, neural control.

ملخص

تناولنا في هذه المذكرة نموذج و مراقبة جهاز آلي متحرك، الذي يتكون من ذراع آلي مركب فوق أرضية متحركة.

إن كتابة النموذج الرياضي يوصف أغلبية الظواهر الديناميكية التي تؤثر في الجهاز الآلي المتحرك، و الذي هو يتمثل في هدفنا الأول. هذا النموذج له أهمية كبيرة في إظهار التغيرات في التداخل المتواجد بين الذراع الآلي و الأرضية المتحركة.

الدراسة التحليلية لهذه الظواهر سمحت لنا بالوصول إلى نتيجة هي أن أحدث التداخل الديناميكي قدمت بنسب مهمة من قانون التحكم المطبق على الجهاز الآلي المتحرك. و عليه يجب أخذ بعين الاعتبار هذا التداخل في القانون التحكم المطبق.

ثلاث طرق التحكم تمت دراستها و تطبيقها على الجهاز الآلي المتحرك، هذا في الفصل الثالث، الطريقة الثالثة من قانون التحكم هو الحل الذي نراه مناسب للتعويض ظواهر الديناميكية الذي يتعرض له الجهاز الآلي المتحرك، و الذي يعتبر الموضوع الأساسي في هذه المذكرة.

النأقات، قوانين، طرق التحكم بينها نتائج المحاكاة العددية من اجل تحقيق متابعة مسار معين بوجود مختلف التأثيرات الخارجية.

كلمات مفتاح :

الجهاز الآلي المتحرك، النموذج الديناميكي، التداخل الديناميكي، متابعة مسار التحكم الديناميكي، التحكم المبهم، التحكم العصبوني.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE -----	2
CHAPITRE I : HISTORIQUE ET PROBLEMATIQUE -----	5
I-1. Synthèse de la commande des manipulateurs mobiles-----	11
I-2. Conclusion -----	15
CHAPITRE II : DYNAMIQUE D'UN ROBOT MOBILE-MANIPULATEUR ET L'ANALYSE DE L'INTERECTION DYNAMIQUE -----	16
II-1. Structure d'un manipulateur mobile-----	17
II-2. Modélisation dynamique de robot mobile-manipulateur -----	17
II-2- 1. Equation de mouvement du manipulateur -----	18
II-2- 2. Equation de mouvement de la plate-forme mobile -----	19
II-2- 3. Equation de mouvement du manipulateur mobile -----	21
II-3. Présentation du système -----	22
II-4. Analyse des termes d'interaction-----	25
II-5. Conclusion-----	26
CHAPITRE III : COMMANDE DE ROBOT MOBILE-MANIPULATEUR -----	27
III-1. Commande dynamique-----	28
III-2. Commande par logique floue -----	32
III-2-1. Structure et principe d'un contrôleur floue -----	32
III-2-2. Application de la commande floue à un manipulateur mobile-----	34
III-2-2-1. Définition des variables d'entrées et des sorties du système-----	35
III-2-2-2. Fonction d'appartenances des entrées et sorties du système-----	36
III-2-2-3. Etablir les règles de fonctionnement du manipulateur mobile -----	36
III-2-2-4. Calcule de degrés de vérité des règles floues -----	37
III-2-2-5. Défuzzification-----	38
III-3. Commande par réseau de neurones-----	40
III-3-1. Définition de réseau de neurones -----	40
III-3-2. Structure est principe d'un contrôleur neuronale -----	41
III-3-3. Application de la commande neuronale à un manipulateur mobile -----	44

III-4. Commande dynamique-floue -----	48
III-4-1. Application de la commande dynamique-floue à un manipulateur mobile -----	49
III-5. Commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques -----	53
III-5-1. Le codage-----	53
III-5-2. La fonction d'adaptation-----	54
III-5-3. La sélection-----	54
III-5-4. La reproduction-----	55
III-6. Commande dynamique-neuronale -----	57
III-6-1. Structure et principe d'un estimateur neuronale -----	58
III-6-2. Application de la commande dynamique-neuronale à un manipulateur mobile -----	58
III-7. Conclusion-----	62
CHAPITRE IV : VALIDATION EN SIMULATION -----	63
IV-1. Cadre de simulation-----	64
IV-2. Conditions de simulation-----	65
IV-3. Commande dynamique -----	67
IV-4. Commande floue -----	75
IV-5. Commande neuronale -----	84
IV-6. Commande dynamique-floue -----	92
IV-7. Commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques-----	100
IV-8. Commande dynamique-neuronale -----	108
IV-9. Comparaison -----	116
IV-10. Conclusion-----	117
CONCLUSION GENERALE-----	120

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Regroupant l'électronique, l'électrotechnique, la mécanique, l'automatique et l'informatique, la robotique est devenue depuis les années soixante-dix une discipline à part entière [1].

Avec les grands progrès qu'a connue la robotique, celle-ci s'impose de plus en plus au point où il est difficile d'imaginer une industrie moderne élaborée et rentable sans robots.

Actuellement, les chercheurs parviennent à réaliser des robots légers, rapides, flexibles et même pouvant prendre des formes complexes (robot à pattes, volants, aquatiques, etc...) et des dimensions réduites (micro robots, bijoux animés, etc...). Ceci dit que la robotique commence à devenir un art.

De nos jours, les bras manipulateurs à base fixe sont partout installés dans les chaînes de production industrielle où ils mènent à bien les tâches qui leur sont confiées. Mais, pour certaines tâches de manipulation qui se font sur un champ de travail de plusieurs mètres ces manipulateurs ne conviennent plus.

Afin d'élargir l'espace de travail du bras manipulateur, la base de celui-ci est fixée sur un robot mobile pour donner une nouvelle structure appelée « robot mobile-manipulateur ».

Un robot mobile-manipulateur est donc constitué d'une plate-forme mobile à roues (robot mobile) sur laquelle est installé un bras manipulateur ; cette structure combine la capacité de manipulation offerte par le robot manipulateur et la mobilité introduite par le robot mobile.

Les manipulateurs mobiles présentent, de toute évidence, des avantages indéniables par rapport au manipulateur à base fixe. Ils permettent, par exemple, d'étendre l'espace de travail de l'organe terminal du manipulateur qui, de borné, devient infini [2].

Ces systèmes trouvent leur application dans l'industrie, l'exploration de l'espace, l'exploration sous-marine et toutes les tâches qui se font dans un environnement hostile. La figure suivante présente un exemple conceptuel d'une application utilisant un manipulateur mobile.

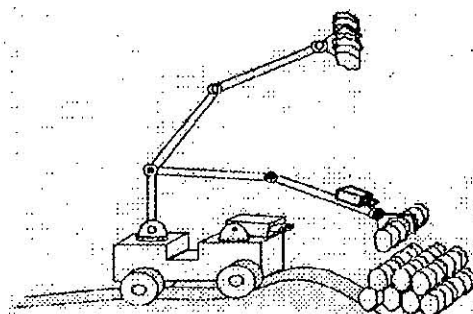


Figure 1.1 Exemple de système manipulateur mobile

Cependant, un sérieux problème de commande d'un manipulateur mobile se pose étant donné qu'il s'avère difficile aux lois de commande classiques de prendre en charge des dynamiques caractérisées par d'importants paramètres d'inertie, de couplage et de non linéarités du manipulateur mobile.

Ces dernières années, le monde de l'industrie a connu un développement technologique sans précédent dans le domaine de la robotique et du contrôle, ce développement est dû au progrès technologique réalisé dans le domaine de l'intelligence artificielle, ce qui a permis aux chercheurs de concevoir de nouvelles méthodes de contrôle pour des processus industriels très complexes, telle que le manipulateur mobile. Ces méthodes sont basées sur les concepts de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.

Commander un manipulateur mobile, c'est permettre d'atteindre un état désiré ou de réaliser une tâche bien spécifiée dans un environnement réel. Cette opération est très délicate, à cause des perturbations dues à l'environnement, et surtout de la structure complexe du manipulateur mobile qui mène à des équations dynamiques non-linéaires et fortement couplées, qui sont très gênants notamment lorsque le système évolue à des vitesses non négligeables ou quand l'organe terminal manipule des objets de masses importantes dans des conditions de mouvements rapides et précis.

Pour toutes ces raisons, il est important d'envisager l'application de technique de commande robustes.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la coordination mobilité-manipulation d'un manipulateur mobile constitué d'un bras manipulateur de deux à n degrés de liberté et d'une plate-forme mobile à roues non-holonomes pour la réalisation des tâches de suivi de trajectoires.

Par conséquent, nous sommes amenés à étudier et simuler des lois de commande robustes. Parmi ces commandes, nous nous intéressons dans cette thèse à deux classes.

La première classe de commandes appelée la commande dynamique. Toutefois, le principal inconvénient de ce type de commande est la difficulté de l'obtention du modèle dynamique car ce dernier est basé sur des artifices de calcul puissants et un temps de calcul important pour une application temps réel. C'est la raison pour laquelle une deuxième solution (classe 2) de la commande d'un manipulateur mobile a consisté à utiliser les notions relatives à la commande floue et à la commande neuronale. En effet, cette classe de commande ne nécessite pas la connaissance exacte de modèle dynamique du manipulateur mobile.

Elle émerge comme un modèle intelligent, capable d'être utilisée sur des systèmes complexes tels que le manipulateur mobile.

Dans ce cas, le problème de formulation analytique de cette deuxième solution de commande est posé.

Une dernière solution consiste à adopter une stratégie mi-chemin entre une commande de la première classe et celui de la deuxième classe. Ceci dit que nous pouvons envisager une loi de commande hybride (mixte) combinant par exemple les lois de commande dynamique et à réseau de neurone, dynamique et à logique floue, dynamique-floue optimisée par les algorithmes génétiques.

Nous focaliserons notre intérêt surtout à l'étude et l'analyse de l'interaction entre le bras manipulateur et la plate-forme mobile afin de tirer des lois de commandes robustes pour le commander et compenser l'interaction entre les deux sous-systèmes mécaniques (robot manipulateur, robot mobile).

Structurée en quatre chapitre, cette thèse a pour objet d'étudier, simuler et comparer les performances, et la robustesse des trois types de commandes présentées précédemment.

Le premier chapitre présente l'état de l'art de la commande des manipulateurs mobiles. Après la formulation du problème de commande, nous exposons une synthèse des différents travaux entrepris dans ce cadre.

Le second chapitre comportera une présentation dynamique du bras manipulateur, de la plate-forme mobile et du système global formé de leur association. Dans le même chapitre, on introduira l'étude de l'interaction entre le bras manipulateur et la plate-forme mobile.

Dans le troisième chapitre, on présentera les lois de commandes adoptées et les schémas bloc correspondant pour le système étudié (manipulateur mobile).

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude en simulation. Les résultats obtenus pour le système (manipulateur mobile) et pour les lois de commandes définies au chapitre trois seront présentés, interprétés et comparés.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives d'investigation sont données à la fin de ce document.

CHAPITRE I

HISTORIQUE ET PROBLEMATIQUE

Le but de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art de la commande des manipulateurs mobiles. Après la formulation du problème de commande nous exposons une synthèse des divers types de commande les plus fréquemment rencontrés dans la littérature internationale. Elle est essentiellement axée sur l'énoncé du principe de chacun des types avec mise en évidence des avantages et inconvénients correspondants.

Le problème de la commande des manipulateurs mobiles consiste en général à déterminer une séquence d'actions appropriées pour faire déplacer le manipulateur mobile d'une position à une autre. Cette commande est à concevoir sous l'effet de plusieurs contraintes liées à l'environnement du manipulateur mobile, à la nature non linéaire du système, aux variations paramétriques et aux dynamiques non modélisées.

Les exigences, surtout en terme de précision en position et de rapidité d'exécution des tâches, rendent les commandes conventionnelles insuffisantes dans ce cadre, et font ressentir d'avantage le besoin de l'élaboration d'une nouvelle technique appropriée à cet effet.

Les travaux concernant la commande d'un manipulateur mobile sont nombreux. On peut citer : les travaux de **Y.Yamamoto** et **X.Yun** ; **K.A.Tahboub** ; **D.Wenjie** ; **X.Yangsheng** [3, 13, 47, 53, 41, 42, 43, 45, 36, 39] qui se sont intéressés au problème de couplage dynamique entre le bras manipulateur et la plate-forme. Ces travaux sont focalisés principalement au problème de coordination mobilité-manipulation. Ils utilisent une commande par retour d'état non linéaire pour améliorer les performances de contrôle du système pour les tâches de suivi de trajectoires. Ultérieurement, ces auteurs se sont intéressés à la coordination multi-bras pour un manipulateur mobile constitué d'une plate-forme mobile à roues sur laquelle sont fixés deux bras manipulateurs à trois liaisons chacun ; ces trois sous-systèmes coopèrent pour réaliser les tâches de transport d'objet.

L'équipe de **U.M.Nassal** et al [4, 5] s'intéressent aussi à l'intégration de la mobilité et la manipulation mais discute un nouveau concept pour la réalisation de cette intégration. Leur manipulateur mobile appelé KAMRO (Karlsruhe Autonomous Mobile RObot) est constitué d'une plate-forme à trois degrés de liberté sur laquelle deux bras manipulateurs à six degrés de liberté du type PUMA200 sont montés.

Nassal et al ont utilisé une commande dite *transparente* qui combine les avantages des commandes globales et découplées du système. L'idée est de rendre le mouvement de l'organe terminal indépendant du mouvement du véhicule, c'est-à-dire. que si la plate-forme se déplace, l'organe terminal n'est pas affecté par le mouvement de celle-ci. Donc la plate-forme ne participe pas au déplacement externe de l'organe terminal mais uniquement à son déplacement interne.

Pour achever ceci, la commande découplée intégrée dans la boucle de contrôle des manipulateurs va compenser le déplacement de la plate-forme. Aussi, cette dernière est contrôlée de façon que les manipulateurs arrivent à réaliser leurs tâches dans des configurations optimales en respectant une fonction coût spécifique.

L'équipe de **O.Khatib** et **T.Sugar** ; **V.Kumar** [6, 48] adoptent des méthodologies déjà appliquées à des bras manipulateurs redondants (à base fixe) qu'ils ont transposées à un manipulateur mobile dont la plate-forme est holonome. En plus de l'extension de ces méthodologies au manipulateur mobile, les auteurs présentent une nouvelle structure de contrôle décentralisée concernant des tâches de coopération entre plusieurs manipulateurs mobiles. Leurs travaux sont basés sur quatre méthodologies développées précédemment pour des manipulateurs à base fixe :

- La formulation dans l'espace opérationnel de la tâche imposée.
- La coordination dynamique de la plate-forme mobile et du bras manipulateur.
- Le modèle d'objet augmenté (*The Augmented Object Model*) pour la manipulation d'objets pour un robot à plusieurs bras (problème de coopération).
- Le modèle de liaison virtuelle (*The Virtual Linkage Model*) pour le contrôle de forces internes dans un système multi-bras (problème de coopération).

L'extension de ces méthodologies aux manipulateurs mobiles ainsi qu'une nouvelle structure de contrôle décentralisé pour les tâches de coopération entre plusieurs manipulateurs mobiles sont présentées.

On peut également citer **P.Thomson** et **G.Rachatel** [7] qui ont adopté plusieurs stratégies de contrôle d'un manipulateur mobile destiné aux travaux d'agriculture afin de réduire l'utilisation des produits chimiques. Leur manipulateur mobile est composé d'un système de vision qui détecte les mauvaises herbes et d'un bras manipulateur fixé à une plate-forme mobile pour pointer et éliminer individuellement les mauvaises herbes par électrocution pendant le déplacement de la plate-forme.

Les travaux menés par **G.Foulon** ; **M.Renaud** et **P.Dauchez** [8, 2] se restreignent à des méthodes de commande qui n'utilisent que la cinématique des manipulateurs mobiles ; les auteurs s'intéressent à la gestion de la redondance tout en tenant compte des contraintes dues à la non-holonomie de la plate-forme. Ils comparent les méthodes qui utilisent des tâches additionnelles et celles basées sur la minimisation de critère.

K.Inoue et **al** [9] proposent une méthode de contrôle d'impédance pour un manipulateur mobile en vue de le stabiliser par rapport aux efforts extérieurs exercés sur l'organe terminal. Le but de la méthode proposée est de déplacer l'organe terminal comme s'il était commandé par l'effort d'entrée, et en même temps, garder le système aussi stable que possible par rapport aux changements de la configuration du manipulateur mobile et aussi par rapport à l'effort extérieur.

Généralement, la réponse du manipulateur est plus rapide que celle de la plate-forme. Pour cette raison, le manipulateur répond au changement rapide de la force d'entrée, et la plate-

forme répond au changement lent. Les essais de simulation et d'expérimentation sont appliqués sur un système mécanique composé d'une plate-forme non holonome et d'un bras manipulateur à trois liaisons. Ces essais montrent que la méthode de contrôle d'impédance d'un manipulateur mobile par rapport à l'effort externe exercé sur l'organe terminal est efficace. Mais il faut noter que l'approche est coûteuse du point de vue temps de calcul.

W.Miksch et **D.Schroeder** [10] utilisent une structure de contrôle constituée d'une chaîne directe combinée à un retour d'état pour résoudre le problème de coordination des mouvements du bras et de la plate-forme d'un manipulateur mobile. Pour ce type de système (manipulateur mobile) à neuf degrés de liberté, le vecteur de tâches est augmenté par les degrés de liberté redondants de la plate-forme mobile non-holonome. Les déplacements externes et internes du manipulateur peuvent être déterminés au moyen de la théorie du contrôle optimal.

Dans la partie chaîne directe de la structure de contrôle, les références du véhicule sont dérivées des références désirées de l'organe terminal. Ceci est fait en optimisant les valeurs de certains critères de performance comme la mesure de manipulabilité du bras manipulateur, les couples exercés et l'énergie cinétique du système.

L'optimisation d'une fonctionnelle qui contient tous ces objectifs doit forcer le système mobile à minimiser les erreurs de poursuite sous les conditions des contraintes, dynamique et cinématique. Dans la structure de contrôle, le rôle principal du retour d'état est de minimiser les erreurs de poursuite causées par les perturbations externes et internes. Les auteurs montrent que seule la conception d'un contrôleur dans l'espace des tâches peut améliorer les caractéristiques dynamiques du bras du robot et réduire l'effet des perturbations. Mais, là aussi, il faut noter que l'approche est coûteuse du point de vue temps de calcul.

H.Seraji [11] adopte une approche simple pour le contrôle et la coordination d'un système mobile composé d'un bras manipulateur monté sur une base mobile. Cette approche est basée sur la formulation de tâches additionnelles. Elle consiste à obtenir des relations mathématiques représentant des variables géométriques, physiques ou des fonctions mathématiques abstraites requises à l'exécution de la tâche pour l'organe terminal, et spécifiées par l'utilisateur parmi l'infinité de solutions (redondance) introduite par la mobilité de la base.

La simulation est faite sur un système constitué d'un bras manipulateur spatial à trois liaisons rotoides, monté sur une base mobile ayant la possibilité de se mouvoir suivant une seule direction (à un degré de liberté). L'effet de la mobilité de la base sur l'indice de manipulabilité est discuté.

L'approche a l'avantage d'être simple, flexible vis à vis des choix des tâches appropriées et nécessite moins d'opérations ; elle est donc souhaitable pour le contrôle on-line dans les applications en temps réel.

N.A.M.Hootsmans et k.Tchon ; R.Muszynski [12,54] présentent une étude expérimentale d'un algorithme de contrôle des mouvements d'un manipulateur mobile. L'approche appelée *Mobile Manipulator Jacobian Transpose Control (MMJT)*, est basée sur la transposée d'une matrice jacobienne qui relie les vitesses généralisées du manipulateur et les vitesses linéaires et angulaires du véhicule à celles de l'organe terminal du manipulateur. Dans l'étude de simulation, quand un contrôleur PD est choisi pour le manipulateur, l'erreur de poursuite est relativement large. Ceci est dû principalement à l'interaction entre le manipulateur et le véhicule. Par contre, quand l'algorithme MMJT est appliqué pour la même trajectoire, le résultat est significativement amélioré.

L'étude expérimentale est menée sur un support constitué d'un robot manipulateur PUMA260 monté sur le *MUT Vehicle Emulator System (VES I)* développé au niveau du MIT (*Mobile Manipulator Laboratory*).

Le *VES* est une plate-forme à six degrés de liberté, à actionneurs hydrauliques, développée spécialement pour étudier expérimentalement le comportement des manipulateurs montés sur des bases mobiles.

Le *VES* est un émulateur expérimental d'une vaste variété de véhicules. Il opère sous contrôle d'admittance. Des capteurs de force et de couples sont montés à bord pour mesurer les interactions dynamiques entre le manipulateur et la plate-forme. En se basant sur ces forces et couples mesurés, le contrôleur d'admittance résoud un modèle dynamique du véhicule pour déterminer le mouvement correspondant. En utilisant un modèle cinématique inverse de la plate-forme, les mouvements du véhicule requis sont transformés en commandes. L'algorithme de contrôle doit tolérer les caractéristiques non-idéales des capteurs utilisés (retard, nonlinéarité, temps de réponse,) en plus de l'incapacité de capter dans certaines directions.

Les résultats expérimentaux montrent que le contrôleur PD donne des erreurs relativement larges quand la plate-forme entre en mouvement. Par contre, pour le contrôleur MMJT, le manipulateur compense les perturbations dues au mouvement de la plate-forme et au bruit généré par les capteurs.

M.Hatano et al ; M.W.Chen et al ; S.C.Nelson et al ; Kai-tai et al [14, 50, 38, 40, 44] se sont intéressés à une méthode de contrôle du manipulateur mobile utilisant les réseaux de neurones pour les opérations de déplacement sur une route à surface ondulée.

Pendant son déplacement sur une route ondulée, le manipulateur mobile est sujet aux effets de couples perturbants dûs aux irrégularités du terrain. Puisque la forme du terrain est inconnue et difficile à mesurer avec exactitude, elle ne peut donc pas être prise en compte dans le calcul du contrôleur. Les auteurs proposent alors un contrôleur neuro-adaptatif pour améliorer les performances de contrôle du système en utilisant les réseaux de neurones où les couples de compensation sont calculés par apprentissage sans connaître la forme du terrain. Ils ont appliqué un contrôleur adaptatif au manipulateur et un contrôleur de position PD au robot mobile, solution pas suffisamment performante car les informations concernant le robot mobile et la forme de la trajectoire n'ont pas été considérées.

Les auteurs ont alors opté pour construire un système de contrôle par apprentissage pour les voyages répétés du manipulateur mobile sur les trajectoires spécifiées. Ainsi un réseau de neurones avec des fonctions d'apprentissage est appliqué au contrôleur adaptatif pour améliorer les performances de contrôle. Les entrées du réseau de neurones sont les coordonnées généralisées et les vitesses généralisées du manipulateur. La sortie du réseau de neurones est le couple de compensation du manipulateur.

M.Kurisu et **T.Yoshikawa** [15] se sont intéressés à élaborer une commande qui permet à un manipulateur de faire pousser un objet sur un terrain plat avec point de contact en contrôlant sa position et son orientation le long d'une trajectoire planifiée. Par conséquent, une loi de commande par retour d'état différentiel pour robots mobiles est appliquée.

La loi de commande adoptée détermine les vitesses linéaires et rotationnelles du robot mobile selon les erreurs de position et d'orientation et en respectant la trajectoire désirée exprimée dans un repère de coordonnées lié au robot. La convergence uniforme asymptotique de la trajectoire actuelle du robot à la trajectoire désirée est garantie par cette loi de commande.

Pour la simulation, les auteurs ont utilisé un manipulateur mobile constitué d'un robot mobile à deux roues sur lequel est monté un manipulateur à n degrés de liberté. L'objet est assumé avoir une forme rectangulaire. Le système expérimental est constitué d'un robot mobile à deux roues sur lequel est monté un manipulateur à deux degrés de liberté. L'objet utilisé est une boîte en papier plissé de 0.15[kg] et de dimensions 0.265x0.38x0.12[m]. Aucun glissement n'est observé entre l'objet et le bout du manipulateur, l'objet a pu poursuivre la trajectoire désirée avec de bonnes performances quoique la poursuite en orientation était légèrement dégradée.

Dans leur approche au problème de contrôle des manipulateurs mobiles, **K.Nagatani** et **S.Yuta** [16] définissent une succession d'actions primitives pour une tâche spécifique qui

est l'ouverture d'une porte. Les actions primitives sont définies comme des éléments unitaires d'un comportement aussi complexe qu'est l'ouverture d'une porte.

Ils divisent donc le comportement total en plusieurs mouvements élémentaires. Pour réaliser chaque mouvement, ils appliquent une action primitive comme une unité de contrôle fondamentale pour le contrôle du manipulateur mobile.

Une seule action primitive est activée à la fois, et chaque action primitive est basée sur un algorithme de contrôle commandant la plate-forme et le bras manipulateur.

Le problème majeur est l'accumulation de l'erreur de position de la base mobile dû à l'échec du manipulateur à manipuler les objets avec succès. Le manipulateur mobile développé par cette équipe s'appelle YAMABICO *type-ten*, sa base mobile est une structure non holonome à deux roues motrices et quatre roues libres. Le bras manipulateur est à six liaisons du type GT6A.

On peut également citer le travail de S.BELEKHAL, dans le cadre d'une thèse de magister [71], qui est adopté à une approche dynamique, pour le contrôle et la compensation de l'effet de couplage d'un système mobile composé d'un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile. La simulation est faite sur un système constitué d'un bras manipulateur mobiles à deux degré de liberté monté sur une plate-forme à deux roues motrices. L'effet de couplage dans le système manipulateur mobile est discuté.

S.BELEKHAL montre que la commande dynamique est d'autant mieux adaptée à un manipulateur mobile à grande vitesse et demandant une grande précision. Mais il faut noter que l'approche est coûteuse du point de vue temps de calcul. Cette raison nous poussa à développer d'autre techniques de commandes plus efficaces.

Après cette mise au point sur les différentes travaux récents relatifs au domaine du robot mobile-manipulateur, nous allons dans ce qui suit donner une classification des divers types de commande. La classification en question s'effectuera sous les trois grandes classes : commande dynamique, commande neuronale et commande floue.

I-1. Synthèse de la commande des manipulateurs mobiles :

Plusieurs schémas de commande ont été envisagés ces dernières années pour résoudre certains problèmes de la commande des manipulateurs mobiles. Initialement la commande des manipulateurs mobiles reposait essentiellement sur les techniques linéaires, les articulations et les déplacements sont asservies en général d'une manière indépendante au moyen de correcteurs linéaires. La simplicité de mise en œuvre de ces techniques linéaires avec des coûts raisonnables a permis une large utilisation de ces dernières procédures au niveau des robots industriels.

Toutefois ces techniques ou méthodes linéaires de commande se sont avérées insuffisantes lorsque le manipulateur mobile devait effectuer des déplacements rapides et précis [17].

La recherche de méthodes plus appropriées adéquates pouvant résoudre les problèmes cités ci-dessus a donné naissance à plusieurs approches de commandes, parmi lesquelles on cite :

- La commande dynamique.
- La commande neuronale.
- La commande floue.

La commande dite dynamique (**figure I.1**) est celle qui correspond à l'approche qui semble la plus directe dans le cas de la commande des manipulateurs mobiles, du fait qu'elle soit basé sur le modèle dynamique du manipulateur mobile [2]. Cette commande est d'autant plus performante, en termes de précision et de vitesse d'exécution, que le modèle dynamique du manipulateur mobile considéré est le plus exact et précis. Malheureusement, en pratique, il est difficile de modéliser le manipulateur mobile avec une grande précision puisque certains de ses paramètres dépendent même de la configuration du manipulateur mobile au moment de manipulation d'objets. Par conséquent, une modélisation imparfaite ainsi que des incertitudes sur les paramètres dynamiques peuvent aboutir inévitablement à de mauvaises performances surtout en termes de poursuite des trajectoires [13].

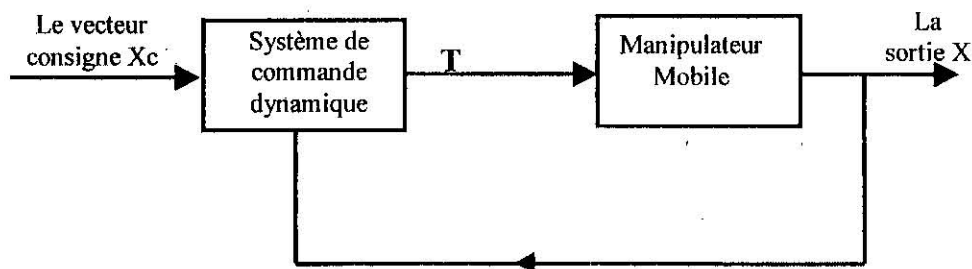


Figure I.1 : Commande Dynamique

Le problème majeur des techniques de la commande dynamique reste leur complexité numérique qui rend leur implantation difficile et coûteuse.

Afin d'éviter le besoin d'une modélisation complète et précise du manipulateur mobile, l'approche de la commande neuronale (**figure I.2**) semblait être la solution la plus appropriée. L'efficacité des réseaux de neurones est dûe essentiellement aux caractéristiques suivantes [19, 63, 64].

- Leur capacité à approximer les fonctions non linéaires,
- Leur facilité d'être entraînés pour reproduire des exemples appris,
- Ils peuvent se généraliser à d'autres exemples non appris,
- Ils peuvent opérer sur des données à valeurs réelles,
- L'information est transformée en une représentation interne (poids) qui tient compte des données quantitatives et qualitatives du signal d'apprentissage.
- Leur structure est convenable à un traitement parallèle.

La possibilité d'utilisation des réseaux de neurones dans la commande des systèmes dynamiques non linéaires a été largement prouvée dans la littérature [19, 20, 21, 22, 23].

La conception d'une commande à l'aide de réseau de neurones s'effectue par l'entraînement de ces derniers sur des données entrées-sortis permettant l'apprentissage.

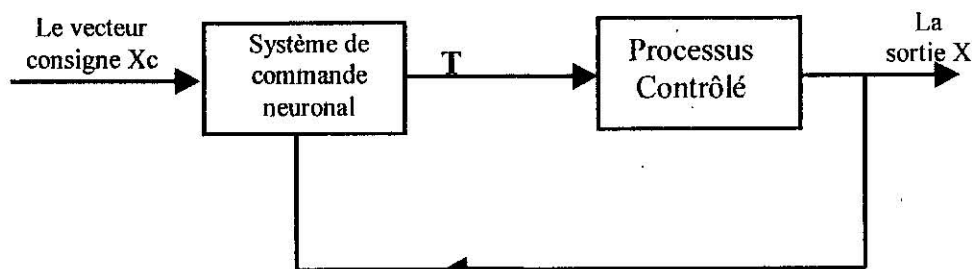


Figure I.2 : Commande Neuronale

Cependant, ces techniques prennent un temps de calcul relativement important dans leurs tâches d'adaptation.

Durant la dernière décennie, l'approche floue (figure I.3) est proposée comme une solution aux tâches qui exigent le traitement en temps réel.

Elle émerge comme une commande intelligente, capable d'être utilisée sur des systèmes complexes et mal définis [24, 25, 26, 27, 28, 46].

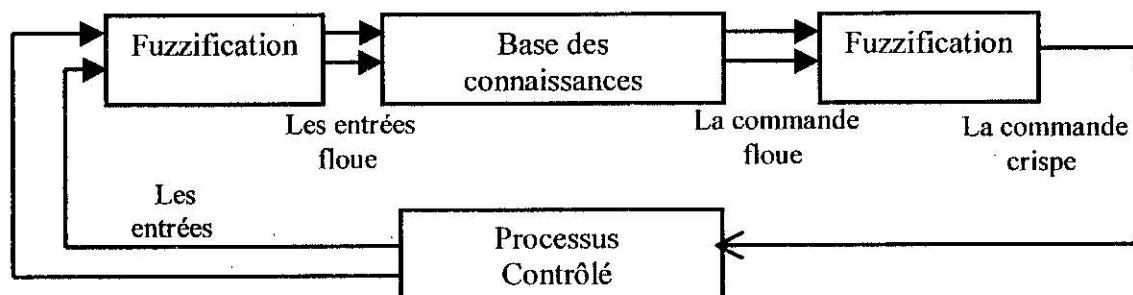


Figure I.3 : Commande floue

Afin de tirer profit des capacités des réseaux de neurones et de la logique floue à contourner les imperfections de l'approche de commande dynamique, la recherche s'est orientée vers la combinaison de l'approche neuronale et floue à cette dernière technique.

Cette manière de combiner ces approches de commande a abouti à un type de technique appelé hybride : commande dynamique-neuronale, commande dynamique-floue.

En résumé, l'approche de la commande dite dynamique d'un manipulateur mobile semble être la méthode la plus directe du fait que l'expression du modèle dynamique représente une solution évidente au problème de commande de manipulateur mobile.

L'approche neuronale répond mieux au problème de la dynamique non modélisée mais elle ne peut pas fournir seule de bonnes performances quand le manipulateur mobile opère à grande vitesse.

Dans la représentation des systèmes non linéaires, et en particulier ceux de la commande des manipulateurs mobiles, l'approche utilisant la logique floue semble prendre de l'avance devant les deux techniques citées précédemment.

De nos jours, la recherche de solutions adéquates au problème de la commande des manipulateurs mobiles s'oriente de plus en plus vers la combinaison de deux méthodes différentes pour bénéficier du maximum d'avantages offerts par chacune d'elle. Ainsi et pour tirer le maximum de profit des avantages offerts par les trois approches de commande discutées ci-dessus, c'est-à-dire dynamique, neuronale et floue, une solution combinée de deux de ces trois techniques est proposée.

En effet, l'objectif du présent travail consiste à élaborer séparément les trois techniques de commandes précitées. Nous élaborons en suite des commandes de type hybride : dynamique-neuronale et dynamique-floue, qui seront en particulier capables de prendre en compte la compensation d'un ensemble de phénomènes dont :

- Les non-linéarités et les différents couplages dans le manipulateur mobile,
- La variation des paramètres dynamiques,
- Les incertitudes liées aux dynamiques non modélisées,
- Les incertitudes liées aux erreurs d'estimation des paramètres du modèle,
- Les perturbations.

A cet effet, la commande dynamique du manipulateur mobile est décomposée en deux parties, une partie basée sur la connaissance partielle de la dynamique du manipulateur mobile, une autre basée sur l'effet de couplage entre les deux sous-systèmes mécaniques du manipulateur mobile.

I-2. Conclusion

On a tenté, tout au long de ce chapitre, de présenter des résumés sur plusieurs travaux abordant le problème de contrôle des manipulateurs mobiles en précisant à chaque fois la nature des systèmes considérés, les tâches à exécuter, le type de lois de commandes adoptées et les résultats obtenus.

Cette étude bibliographique ne peut pas être exhaustive, les travaux sur ce domaine évoluant chaque jour. Le but est d'aider à la compréhension du travail développé dans ce mémoire et de le situer.

CHAPITRE II

DYNAMIQUE DE ROBOT MOBILE-MANIPULATEUR ET L'ANALYSE DE L'INTERACTION DYNAMIQUE

Le but de ce chapitre est de présenter le modèle dynamique d'une plate-forme mobile non-holonyme et d'un bras manipulateur à n degrés de liberté en passant par leurs équations de mouvement pour arriver à élaborer le modèle dynamique complet du manipulateur mobile formé par leur association. On abordera, également dans ce chapitre le problème de l'interaction entre les deux sous-systèmes mécaniques, lors de l'exécution d'une tâche.

En vue d'évaluer son importance, nous réalisons une étude abordant l'analyse de cette interaction qui permet d'évaluer leurs effets sur le comportement du système global (manipulateur mobile).

II.1 Structure d'un Manipulateur Mobile [3, 4, 49]

Un manipulateur est un système mécanique qui formé de deux partie, le bras manipulateur qui peut être formé de plusieurs corps C_i liés les uns aux autres par des liaisons (L_i) autorisant des degrés de liberté. La liaison peut être de translation (prismatique) ou de rotation (rotoïde). L'ensemble repose sur une plate-forme mobile à roues, et le tout forme une chaîne qui est terminée par un organe dit organe terminal. La figure (II.1) présente un exemple conceptuel d'une application utilisant des manipulateurs mobiles.

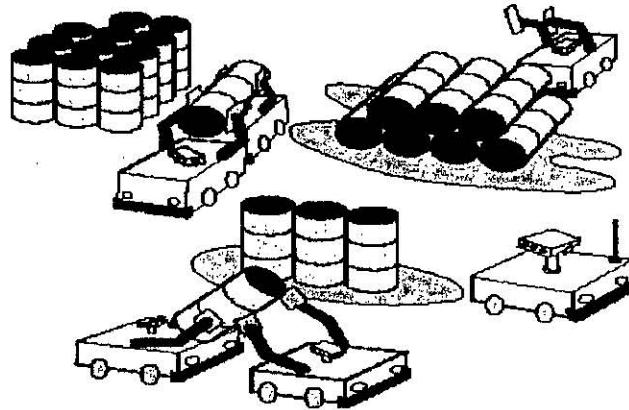


Figure II.1 : Exemple d'une application utilisant des manipulateurs mobiles.

II.2 Modélisation dynamique de robot mobile-manipulateur [51, 52, 56, 62]

Le manipulateur mobile considéré dans cette étude est constitué d'une plate-forme mobile non-holonome à deux roues motrices sur laquelle est installé un bras manipulateur à structure de chaîne cinématique simple ouverte à n liaisons et qui agit sur l'environnement grâce à son organe terminal (figure II.2).

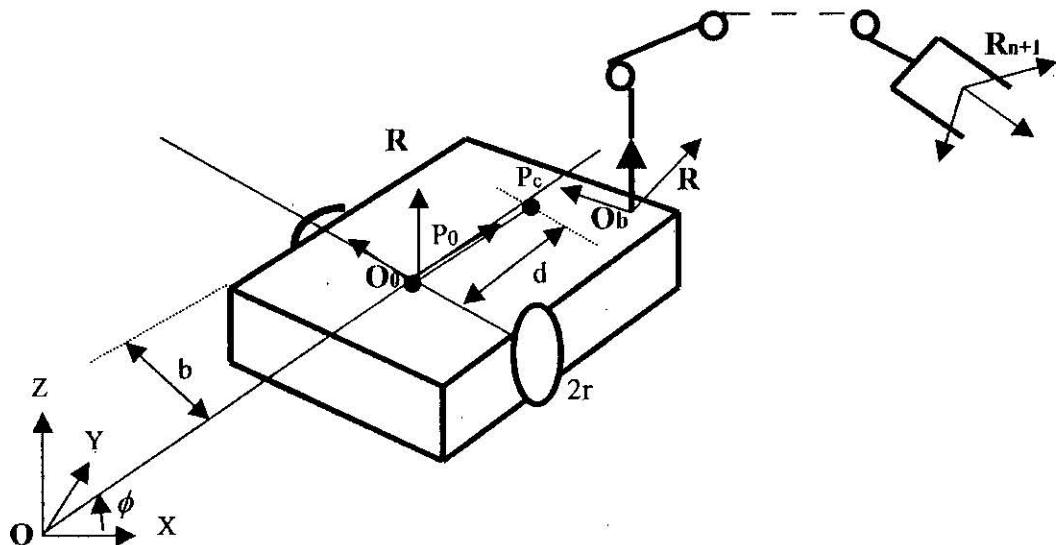


Figure II.2 : Schéma général d'un manipulateur mobile.

La configuration de ce système mécanique est définie par les coordonnées généralisées : $q = (q_1 q_2 \dots q_n)' = (x_0 y_0 \phi q_{b1} q_{b2} \dots q_{bn})'$ où $(x_0 y_0 \phi)'$ sont les coordonnées généralisées de la plate-forme définies par les coordonnées cartésiennes (x_0, y_0) de son centre de masse dans le repère (O, X, Y) et l'orientation ϕ que fait son axe de symétrie avec l'axe OX ; $(q_{b1} q_{b2} \dots q_{bn})'$ sont les coordonnées généralisées du bras manipulateur définies par les déplacements angulaires de ses n liaisons.

II.2.1 Equations de mouvements du manipulateur mobile

Une approche alternative pour modéliser les dynamiques du bras manipulateur est de considérer chaque liaison indépendamment et d'obtenir les équations de mouvement de chaque liaison en appliquant la méthode du Lagrangien.

Le formalisme de LAGRANGE-EULER :

Les équations différentielles de mouvement de lagrange d'un manipulateur à n degré de liberté sont :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i(t) \quad \text{pour } i=1,2,\dots,n \quad \dots\dots\dots(II.1)$$

avec ;

L : représentant le Lagrangien d'un mécanisme à n degrés de liberté est égale à la différence entre énergies cinétique et potentielle [57][58][59].

$$L(q_i(t), \dot{q}_i(t)) = K(q_i(t), \dot{q}_i(t)) - V(q_i(t))$$

où q_i représente les coordonnées généralisées.

Le modèle dynamique d'un robot manipulateur obtenu en appliquant ce formalisme est sous la forme :

$$\sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_{rj} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk} \dot{q}_{rj} \dot{q}_{rk} + g_i = Q_i \quad i=1,\dots,n \quad \dots\dots\dots(II.2)$$

avec :

1. les coefficients d'inertie : $M_{ij} = \sum_{k=\max(i,j)}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_k}{\partial q_{ri}} J_k \frac{\partial T'_k}{\partial q_{rj}} \right] \quad \dots\dots\dots(II.3)$

2. les coefficients de couplage (centrifuge et Coriolis) :

$$C_{ijk} = \sum_{h=\max(i,j,k)}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_{ri}} J_h \frac{\partial^2 T'_h}{\partial q_{rj} \partial q_{rk}} \right] \quad \dots\dots\dots(II.4)$$

3. les coefficients gravitationnels: $g_i = \sum_{k=i}^n m_k g' \frac{\partial T'_k}{\partial q_{ri}} F^{(i)} \quad \dots\dots\dots(II.5)$

où q_r est le vecteur des coordonnées de Lagrange défini par $q_r = (q_{b1} q_{b2} \dots q_{bn})'$ avec n le nombre de liaison ; T_k est la matrice de transformation homogène reliant le référentiel lié à la liaison k à celui

lié à la base du manipulateur ; J_k est la matrice de pseudo-inertie relative à la liaison k ; m_k est la masse de la liaison k ; $g' = [g_{0x} \ g_{0y} \ g_{0z} \ 0]$ décrit l'accélération gravitationnelle ;

$\vec{r}^{(i)}$ est le vecteur pointant de l'origine du repère lié à la liaison i au centre de cette liaison ;

Q_i est le vecteur des efforts généralisés.

L'équation (II.2) peut être réécrite sous la forme matricielle suivante :

$$M_r(q_r)\ddot{q}_r + C_r(q_r, \dot{q}_r) + G(q_r) = \tau_r \dots\dots\dots(II.6)$$

avec :

1. M_r est la matrice d'inertie du manipulateur dont les coefficients sont définis par l'équation (II.3).
2. C_r représente les termes centrifuges et de Coriolis dont les coefficients sont définis par l'équation (II.4).
3. G représente les termes de gravité dont les coefficients sont définis par l'équation (II.5).
4. τ_r est le couple/force appliqué(e) au manipulateur.

II.2.2 Equations de mouvements de la plate-forme mobile:

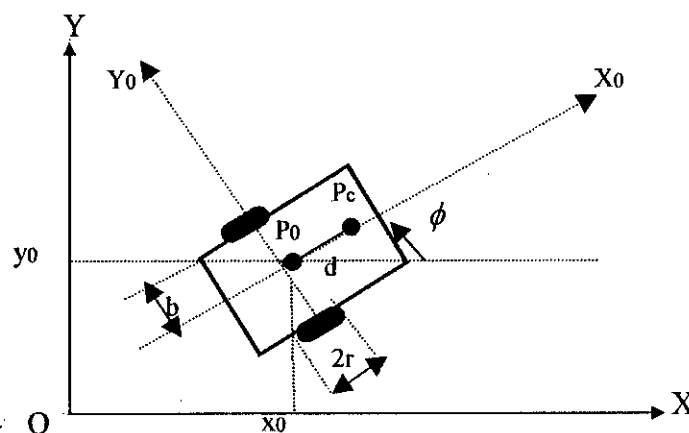


Figure II.3 : Schéma de la plate-forme mobile à roues.

On considère la plate-forme mobile schématisée ci-dessus. La notation suivante est utilisée :

P_0 : l'intersection de l'axe de symétrie de la plate-forme avec l'axe des roues.

P_c : le centre de masse de la plate-forme.

d : la distance de P_0 à P_c .

b : la demi-longueur de l'axe des roues.

r : le rayon de chaque roue.

m_c : la masse de la plate-forme mobile (sans les roues motrices et les rotors des moteurs DC).

m_w : la masse de chaque roue motrice plus le rotor de son moteur.

I_c : le moment d'inertie de la plate-forme (sans les roues motrices et les rotors des moteurs DC) par rapport à l'axe vertical traversant le point P_0 .

I_w : le moment d'inertie de chaque roue avec le rotor de son moteur par rapport à l'axe des

roues.

I_m : le moment d'inertie de chaque roue avec le rotor de son moteur par rapport au diamètre de la roue.

Les conditions de roulement sans glissement des deux roues motrices (droite et gauche) et la contrainte de non-holonomie de la plate-forme, qui sont décrites par les équations :

$$\dot{x}_0 \cos \phi + \dot{y}_0 \sin \phi + b\dot{\phi} = r\dot{\theta}_r \quad \text{.....(II.7)}$$

$$\dot{x}_0 \cos \phi + \dot{y}_0 \sin \phi - b\dot{\phi} = r\dot{\theta}_l \quad \text{.....(II.8)}$$

$$\dot{y}_0 \cos \phi - \dot{x}_0 \sin \phi = 0 \quad \text{.....(II.9)}$$

$$\dot{x}_0 \cos(\phi) + \dot{y}_0 \sin(\phi) = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \quad \text{.....(II.10)}$$

où (x_0, y_0) sont les coordonnées du point P_0 dans le repère fixe $R(O, X, Y, Z)$;

ϕ est l'angle que fait l'axe de symétrie du robot mobile avec l'axe OX.

θ_r et θ_l sont les positions angulaires des roues droite et gauche respectivement, par rapport à l'horizontale.

Les équations (II.9) et (II.10) peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$A(q_v)\dot{q}_v = 0 \quad \text{.....(II.11)}$$

Où q_v est le vecteur des coordonnées de Lagrange défini par :

$$q_v = (x_0 \quad y_0 \quad \theta_r \quad \theta_l)^T \quad \text{.....(II.12)}$$

Et $A(q_v)$ est donnée par :

$$A(q_v) = \begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ -\cos \phi & -\sin \phi & \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \quad \text{.....(II.13)}$$

Les équations de mouvement de la plate-forme non-holonyme obtenues en appliquant le formalisme de Lagrange sont comme suit :

$$m\ddot{x}_0 - m_c d(\ddot{\phi} \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cos \phi) = \lambda_1 \sin \phi + \lambda_2 \cos \phi \quad \text{.....(II.14)}$$

$$m\ddot{y}_0 + m_c d(\ddot{\phi} \cos \phi - \dot{\phi}^2 \sin \phi) = -\lambda_1 \cos \phi + \lambda_2 \sin \phi \quad \text{.....(II.15)}$$

$$m_c c d(\dot{y}_0 \cos \phi - \dot{x}_0 \sin \phi) + (I_c^2 + I_w)\ddot{\theta}_r - I_c^2 \ddot{\theta}_l = \tau_{v1} - c b \lambda_2 \quad \text{.....(II.16)}$$

$$-m_c c d(\dot{y}_0 \cos \phi - \dot{x}_0 \sin \phi) - I_c^2 \ddot{\theta}_r + (I_c^2 + I_w)\ddot{\theta}_l = \tau_{v2} - c b \lambda_2 \quad \text{.....(II.17)}$$

où τ_{v1} , τ_{v2} sont les couples appliqués aux deux roues motrices droite et gauche respectivement ;

λ_1, λ_2 sont les multiplicateurs de Lagrange. Ces équations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

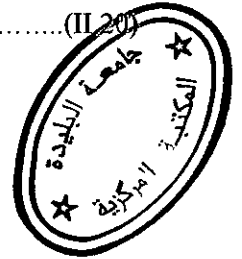
$$M_v(q_v)\ddot{q}_v + C_v(q_v, \dot{q}_v) = E(q_v)\tau_v - A'(q_v)\lambda \quad \text{.....(II.18)}$$

où $A(q_v)$ est définie par l'équation (II.13) ;

$$M_v(q_v) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_c.c.d.\sin\phi & m_c.c.d.\sin\phi \\ 0 & m & m_c.c.d.\cos\phi & -m_c.c.d.\cos\phi \\ -m_c.c.d.\sin\phi & m_c.c.d.\cos\phi & I_c^2 + I_w & -I_c^2 \\ m_c.c.d.\sin\phi & -m_c.c.d.\cos\phi & I_c^2 & I_c^2 + I_w \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

$$C_v(q_v, \dot{q}_v) = \begin{bmatrix} -m_c.d.\dot{\phi}^2.\cos\phi \\ -m_c.d.\dot{\phi}^2.\sin\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

$$E(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \tau_v = \begin{bmatrix} \tau_{v1} \\ \tau_{v2} \end{bmatrix}; \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}$$



II.2.3 Equations de mouvements du manipulateur mobile :

L'équation de mouvement du manipulateur monté sur la plate-forme mobile est donnée par [60] :

$$M_r(q_r)\ddot{q}_r + C_{r1}(q_r, \dot{q}_r) + C_{r2}(q_r, \dot{q}_r, \dot{q}_v) = \tau_r - R_r(q_r, q_v)\ddot{q}_v \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

ainsi que l'équation de mouvement de la plate forme mobile.

$$M_v(q_v)\ddot{q}_v + C_{v1}(q_v, \dot{q}_v) + C_{v2}(q_r, q_v, \dot{q}_r, \dot{q}_v) = E(q_v)\tau_v - A'(q_v)\lambda - M_{v2}(q_r, q_v)\ddot{q}_v - R_v(q_r, q_v)\ddot{q}_r \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

On remarque qu'en plus des termes de couplage existant entre les différentes variables des liaisons du bras manipulateur et entre les différentes variables d'état de la plate-forme mobile, l'association du bras avec la plate-forme donne naissance à de nouveaux termes de couplage dynamique qui n'existaient pas dans le modèle dynamique de chacun des deux sous-systèmes pris séparément.

Les termes additionnels se calculent à partir des formules suivantes : [60]

$$C_{r2}^{(i)} = 2 \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{h=\max(i,k)}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_i} J_h \frac{\partial T_h'}{\partial q_{v,j} \partial q_k} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_k + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_i} J_h \frac{\partial T_h'}{\partial q_{v,j} \partial q_{v,k}} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_{v,k} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

$$R_r^{(ij)} = \sum_{k=1}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_k}{\partial q_i} J_k \frac{\partial T_k'}{\partial q_{v,j}} \right] \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

$$M_{v2}^{(ij)} = \sum_{k=1}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_k}{\partial q_{v,i}} J_k \frac{\partial T_k}{\partial q_{v,j}} \right] \quad 1 \leq i, j \leq m \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

$$C_{v2}^{(i)} = 2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{h=j}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_{v,i}} J_h \frac{\partial T_h'}{\partial q_j \partial q_{v,k}} \right] \dot{q}_j \dot{q}_{v,k} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{h=\max(j,k)}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_{v,i}} J_h \frac{\partial T_h'}{\partial q_j \partial q_k} \right] \dot{q}_j \dot{q}_k \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

$$R_v^{(ij)} = \sum_{k=j}^n \text{trace} \left[\frac{\partial T_k}{\partial q_{v,i}} J_k \frac{\partial T_k^t}{\partial q_j} \right]; 1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n \quad \dots\dots\dots(II.27)$$

Le premier terme de l'équation (II.21) caractérise l'effet Coriolis sur le segment i du manipulateur dû au couplage des vitesses du segment k du manipulateur et de la variable $q_{v,j}$ de la plate-forme où $1 \leq j \leq m$ et $1 \leq k \leq n$; le second terme représente la totalité des forces centrifuges exercées sur le segment i par la variable $\dot{q}_{v,j}$ de la plate-forme si $j = k$; et les forces de Coriolis exercées sur le segment i dues aux vitesses de couplage des deux coordonnées de la plate-forme $q_{v,j}$ et $q_{v,k}$ quand $j \neq k$. Le premier terme de l'équation (II.24) caractérise l'effet Coriolis sur la coordonnée de la plate-forme $q_{v,j}$ dû au couplage des vitesses du segment j du manipulateur et la coordonnée de la plate-forme $q_{v,k}$ avec $1 \leq j \leq n$ et $1 \leq k \leq m$; le second terme représente la somme des forces centrifuges exercées sur la coordonnée de la plate-forme $q_{v,j}$ par le segment j du manipulateur si $j = k$; et les forces de Coriolis exercées sur $q_{v,k}$ dûs aux couplages des vitesses de deux différents segments du manipulateur q_j et q_k pour $j \neq k$ [60].

L'étude de l'évolution de ces termes additionnels est nécessaire pour pouvoir évaluer leurs effets sur le comportement du système global (manipulateur mobile) [55].

En résumé, cette partie a présenté la modélisation dynamique de notre système complexe dans le domaine des variable d'état. Le modèle dynamique complet du système donne naissance à de nouveaux termes de couplage entre les deux sous-systèmes mécaniques du manipulateur mobile. L'étude de l'évolution de ces termes est nécessaire pour pouvoir évaluer leur effets sur le comportement du système global. Ce problème est traité au paragraphe suivant.

II.3 Présentation du système

Dans l'expression du modèle dynamique du manipulateur mobile présenté dans la partie II.1, les termes de couplage dynamique entre le bras manipulateur et la plate-forme mobile (qui ne figuraient pas dans les équations de mouvement de chaque sous-système pris séparément) ont été données pour le cas général et sous une forme condensée. Pour le manipulateur mobile considéré dans cette étude, le bras manipulateur est un robot à deux liaisons ($n = 2$) figure II.4. Dans ce cas, on peut expliciter l'écriture des expressions des termes de couplage comme suit :

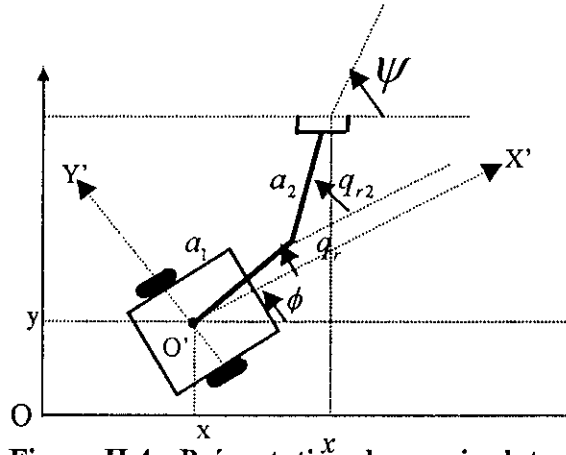


Figure II.4 : Présentation du manipulateur mobile.

$$C_{r2}^{(1)} = 2 \sum_{j=1}^4 \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial q_1} J_1 \frac{\partial T_1'}{\partial q_{v,j} \partial q_1} \right] + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_1} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j} \partial q_1} \right] \right) \dot{q}_{v,j} \dot{q}_1 + 2 \sum_{j=1}^4 \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_1} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j} \partial q_2} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_2 + \dots \quad (\text{II.26})$$

$$C_{r2}^{(2)} = 2 \sum_{j=1}^4 \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_2} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j} \partial q_1} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_1 + 2 \sum_{j=1}^4 \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_2} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j} \partial q_2} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_2 + \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_2} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j} \partial q_{v,k}} \right] \dot{q}_{v,j} \dot{q}_{v,k} \dots \quad (\text{II.27})$$

$$R_v^{(1)} = \sum_{j=1}^4 \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial q_1} J_1 \frac{\partial T_1'}{\partial q_{v,j}} \right] + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_1} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j}} \right] \right) \ddot{q}_{v,j} \dots \quad (\text{II.28})$$

$$R_v^{(2)} = \sum_{j=1}^4 \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_2} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j}} \right] \right) \ddot{q}_{v,j} \dots \quad (\text{II.29})$$

$$C_{v2}^{(i)} = 2 \sum_{k=1}^4 \left\{ \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial q_{v,i}} J_1 \frac{\partial T_1'}{\partial q_1 \partial q_{v,k}} \right] + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_{v,i}} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_1 \partial q_{v,k}} \right] \right) \dot{q}_1 \dot{q}_{v,k} + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_{v,i}} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_2 \partial q_{v,k}} \right] \dot{q}_2 \dot{q}_{v,k} \right\} + \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{h=\max(j,k)}^2 \text{tr} \left[\frac{\partial T_h}{\partial q_{v,i}} J_h \frac{\partial T_h'}{\partial q_j \partial q_k} \right] \dot{q}_j \dot{q}_k \quad i = 1, \dots, 4 ; \dots \quad (\text{II.30})$$

$$R_v^{(i)} = \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial q_{v,i}} J_1 \frac{\partial T_1'}{\partial q_1} \right] + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_{v,i}} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_1} \right] \right) \ddot{q}_1 + \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_{v,i}} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_2} \right] \right) \ddot{q}_2 \quad i = 1, \dots, 4 ; \dots \quad (\text{II.31})$$

$$M_{v2}^{(i)} = \sum_{j=1}^4 \left(\text{tr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial q_{v,i}} J_1 \frac{\partial T_1'}{\partial q_{v,j}} \right] + \text{tr} \left[\frac{\partial T_2}{\partial q_{v,i}} J_2 \frac{\partial T_2'}{\partial q_{v,j}} \right] \right) \ddot{q}_{v,j} \quad i = 1, \dots, 4 ; \dots \quad (\text{II.32})$$

(le symbole $\text{tr}[\]$ signifie trace de la matrice).

où les matrices J_1 et J_2 sont les matrices de pseudo inertie des liaisons une et deux respectivement, les matrices T_1 et T_2 sont définies par :

$$T_1 = Tv(q_v) A_1^0 ;$$

$$T_2 = Tv(q_v) A_1^0 A_2^1 ;$$

où A_1^0 et A_2^1 sont les matrices des transformations homogènes relatives aux liaisons une et deux respectivement, $Tv(q_v)$ est la matrice de transformation homogène du repère lié à la base du bras par rapport au repère lié au sol. Le vecteur q_r est défini par $q_r = (\theta_1 \ \theta_2)'$, q_v est défini comme dans la partie un de chapitre deux par $q_v = (x_0 \ y_0 \ \theta_r \ \theta_l)'$.

Les expressions analytiques détaillées (après l'évaluations des produits, dérivées matricielles et le calcul des traces des matrices) en fonction des paramètres physiques du système (masses, longueurs, moments, positions, .. etc..) sont listées en annexe I.

Les équations différentielles décrivant l'état du système à partir des équations matricielles présentées dans la première partie II.1 sont :

$$M_r^{i,j} \ddot{q}_r^j + C_{r1}^i + C_{r2}^i = \tau_r^i - R_r^{i,k} \ddot{q}_v^k \dots\dots\dots(II.33)$$

$$M_{v1}^{m,k} \ddot{q}_v^k + C_{v1}^m + C_{v2}^m = E_v \tau_v - A^i \lambda - M_{v2}^{m,k} \ddot{q}_v^k - R_v^{m,j} \ddot{q}_r^j \quad i,j = 1,2 ; m,k = 1,4. \dots\dots\dots(II.34)$$

où $q_r^j = (\theta_1 \ \theta_2)'$ est le vecteur des coordonnées généralisées du bras manipulateur, q_v^k est défini par l'équation II.12, les matrices d'inertie M_r, M_{v1}, R_r, M_{v2} et R_v sont données par les équations II.3, II.19, II.24, II.25 et II.27 respectivement, les coefficients des efforts de Coriolis et Centrifuges C_{r1}, C_{v1}, C_{r2} et C_{v2} sont ceux définis par II.4, II.20, II.23 et II.26 respectivement, $\tau_r = (T_{r1} \ T_{r2})'$ est le vecteur des couples appliqués aux liaisons du manipulateur et $\tau_v = (T_{v1} \ T_{v2})'$ est le vecteur des couples appliqués aux roues droite et gauche de la plate-forme mobile respectivement.

Une forme plus explicite de ces équations est la suivante :

$$M_r^{1,1} \ddot{\theta}_1 + M_r^{1,2} \ddot{\theta}_2 + C_{r1}^1 + C_{r2}^1 = T_{r1} - R_r^{1,1} \ddot{x}_0 - R_r^{1,2} \ddot{y}_0 - R_r^{1,3} \ddot{\theta}_r - R_r^{1,4} \ddot{\theta}_l \dots\dots\dots(II.33)$$

$$M_r^{2,1} \ddot{\theta}_1 + M_r^{2,2} \ddot{\theta}_2 + C_{r1}^2 + C_{r2}^2 = T_{r2} - R_r^{2,1} \ddot{x}_0 - R_r^{2,2} \ddot{y}_0 - R_r^{2,3} \ddot{\theta}_r - R_r^{2,4} \ddot{\theta}_l \dots\dots\dots(II.34)$$

$$M_{v1}^{1,1} \ddot{x}_0 + M_{v1}^{1,2} \ddot{y}_0 + M_{v1}^{1,3} \ddot{\theta}_r + M_{v1}^{1,4} \ddot{\theta}_l + C_{v1}^1 + C_{v2}^1 = \sin \phi \lambda_1 + \cos \phi \lambda_2 - M_{v2}^{1,1} \ddot{x}_0 - M_{v2}^{1,2} \ddot{y}_0 - M_{v2}^{1,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{1,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{1,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{1,2} \ddot{\theta}_2 \dots\dots\dots(II.35)$$

$$M_{v1}^{2,1} \ddot{x}_0 + M_{v1}^{2,2} \ddot{y}_0 + M_{v1}^{2,3} \ddot{\theta}_r + M_{v1}^{2,4} \ddot{\theta}_l + C_{v1}^2 + C_{v2}^2 = -\cos \phi \lambda_1 + \sin \phi \lambda_2 - M_{v2}^{2,1} \ddot{x}_0 - M_{v2}^{2,2} \ddot{y}_0 - M_{v2}^{2,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{2,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{2,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{2,2} \ddot{\theta}_2 \dots\dots\dots(II.36)$$

$$M_{v1}^{3,1} \ddot{x}_0 + M_{v1}^{3,2} \ddot{y}_0 + M_{v1}^{3,3} \ddot{\theta}_r + M_{v1}^{3,4} \ddot{\theta}_l + C_{v1}^3 + C_{v2}^3 = T_{v1} - cb \lambda_2 - M_{v2}^{3,1} \ddot{x}_0 - M_{v2}^{3,2} \ddot{y}_0 - M_{v2}^{3,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{3,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{3,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{3,2} \ddot{\theta}_2 \dots\dots\dots(II.37)$$

$$M_{v1}^{4,1} \ddot{x}_0 + M_{v1}^{4,2} \ddot{y}_0 + M_{v1}^{4,3} \ddot{\theta}_r + M_{v1}^{4,4} \ddot{\theta}_l + C_{v1}^4 + C_{v2}^4 = T_{v2} - cb \lambda_2 - M_{v2}^{4,1} \ddot{x}_0 - M_{v2}^{4,2} \ddot{y}_0 - M_{v2}^{4,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{4,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{4,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{4,2} \ddot{\theta}_2 \dots\dots\dots(II.38)$$

Les expressions analytiques détaillées des éléments des différentes matrices d'inertie et des différents termes des efforts centrifuge et de Coriolis sont données en annexe (I).

II.4 Analyse des termes d'interaction

Une étude détaillée a été faite, dans le cadre d'une thèse de magister [1], concernant l'évolution de l'importance de l'effet des termes de couplage, cités ci-dessus sur le comportement du système mécanique manipulateur mobile. L'expression de chaque couple nominal (qui sont au nombre de quatre T_{r1} , T_{r2} , T_{v1} et T_{v2}) sera exprimée de deux manières différentes : dans la première expression, les termes de couplage seront pris en compte dans le calcul des couples nominaux, alors que dans la deuxième, ces termes seront retranchés de ces expressions des couples. Dans ce même travail les écarts entre les deux expressions pour chaque couple, ont été examinés, ainsi que, l'évolution de chacun des termes de couplage comparé au couple nominal lui correspondant, lorsque le système est soumis aux cinq types de perturbations suivantes :

1) perturbation cinématique

Dans ce type de perturbation, les paramètres géométriques et inertiels du système gardes constants imposant à ce dernier des déplacements très rapides.

2) perturbation géométrique

L'étude de l'influence de la variation d'un paramètre géométrique du système sur les couples appliqués est obtenue, en considérant que la longueur de la première liaison du bras manipulateur augmente linéairement lorsque le système effectue deux types de mouvements :

- Mouvement lent.
- Mouvement rapide.

3) perturbation inertielle

L'influence de l'aspect inertiel du système est étudiée, en augmentant progressivement la masse de la deuxième liaison du bras manipulateur et le système est soumis aux mêmes types de mouvements.

4) perturbation cinématique et géométrique

Le système entier (plate-forme et bras) est soumis à des mouvements très rapides pendant que la longueur de la première liaison est variée.

5) perturbation cinématique et inertielle

Dans ce cas, le système est soumis à des mouvements très rapides et la masse de la deuxième liaison du bras manipulateur est prise variable.

Les résultats obtenus par cette précédente étude montrent l'importance du pourcentage d'existence des termes d'interaction qui est de 60% (pouvant atteindre les 80%), dans la commande, conduisant ainsi à l'inutilité de cette dernière.

Enfin, cette étude confirme que la compensation des termes de couplage du système est indispensable, même en l'absence des perturbations inertielles. Afin de tenir compte de l'effet des termes de couplage d'une structure assez complexe comme le manipulateur mobile, il est nécessaire d'adopter des lois de commande efficaces.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a commencé par illustrer l'aspect dynamique des robots mobiles et des robots manipulateurs. On a ensuite présenté les modèles dynamiques de ces deux systèmes en se basant sur les lois de la mécanique analytique. Le modèle dynamique du manipulateur mobile a été également établi.

Ce modèle a l'avantage d'explicitier tous les efforts de couplage entre les deux sous-systèmes permettant d'analyser leur évolution.

Cette étude nous permet de conclure que les termes de couplage représentent un pourcentage très important du couple nominal du système. Pour arriver à des performances acceptables en poursuite de trajectoire, il y a lieu de prévoir la compensation des ces termes, en particulier, lorsqu'on exige du robot manipulateur-mobile de la précision et de la rapidité dans l'exécution des tâches.

Pour toutes ces raisons, nous envisageons au chapitre suivant l'application des trois types de commande pour le manipulateur mobile.

CHAPITRE III

COMMANDE DE ROBOT MOBILE – MANIPULATEUR

Le but de ce troisième chapitre est de présenter un ensemble de stratégies de commande de type dynamique, floue, neuronale et hybride. Nous démontrons l'applicabilité de ces méthodes dans le cas de robot mobile manipulateur et nous élaborons ensuite, les schémas de commande correspondants, qui seront validés au chapitre IV.

III.1 Commande dynamique

La commande dynamique est basée sur l'utilisation du modèle dynamique. Elle permet de prendre en compte les forces d'interaction dynamique dans la loi de commande. Le problème lié à ce type de commande est la difficulté de l'obtention du modèle dynamique. En effet, ce dernier est fondé sur des artifices de calcul puissants se qui s'explique par incompatibilité du temps de calcul avec une application en temps réel.

Le schéma bloc d'un contrôleur dynamique appliqué au manipulateur mobile est présenté par la figure III.1.

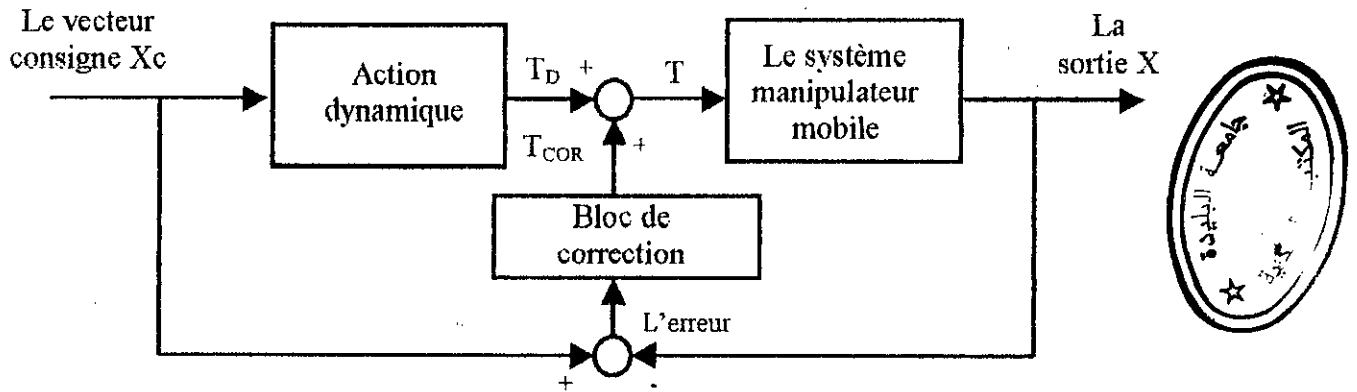


Figure-III.1 : Le schéma bloc du manipulateur mobile avec le contrôleur dynamique.

Dans ce schéma, L'action dynamique a pour objectif de compenser :

- Les variations des efforts d'inertie d'action ,
- Les variations des efforts d'inertie d'interaction,
- Les variations des efforts d'inertie de Coriolis,
- Les variations des efforts d'inertie de centrifuges.

Le rôle de la partie de correction est de réduire le taux d'erreurs dues aux perturbations et aux incertitudes d'estimation des paramètres dynamiques du manipulateur mobile.

Le couple de loi de commande totale est donné par :

$$T = T_D + T_{COR} \dots\dots\dots(III.1)$$

où: T_D représente le couple d'anticipation dynamique.

T_{COR} représente le couple de correction ; dans notre application il correspond à un correcteur proportionnel et dérivé.

La loi de commande dynamique se déduit directement du modèle dynamique décrivant le système (chapitre II). Ce modèle est décrit par les équations (II.33) et (II.34). Les lois de commande sont alors données par :

$$T_{r1} = M_r^{11} \ddot{\theta}_{1c} + M_r^{12} \ddot{\theta}_{2c} + C_{r1}^1 + C_{r2}^1 + R_r^{11} \ddot{x}_{0c} + R_r^{12} \ddot{y}_{0c} + R_r^{13} \ddot{\theta}_{rc} + R_r^{14} \ddot{\theta}_{lc} + K_{p1} (\theta_{1c}(t) - \theta_1(t)) + K_{v1} (\dot{\theta}_{1c}(t) - \dot{\theta}_1(t)) \dots\dots\dots(III.2)$$

$$T_{r2} = M_r^{2,1} \ddot{\theta}_{lc} + M_r^{2,2} \ddot{\theta}_{2c} + C_{r1}^2 + C_{r2}^2 + R_r^{2,1} \ddot{x}_{0c} + R_r^{2,2} \ddot{y}_{0c} + R_r^{2,3} \ddot{\theta}_{rc} + R_r^{2,4} \ddot{\theta}_{lc} + K_{p2}(\theta_{2c}(t) - \theta_2(t)) + K_{v2}(\dot{\theta}_{2c}(t) - \dot{\theta}_2(t)) \dots (III.3)$$

$$T_{v1} = (M_{v1}^{3,1} + M_{v2}^{3,1}) \ddot{x}_{0c} + (M_{v1}^{3,2} + M_{v2}^{3,2}) \ddot{y}_{0c} + (M_{v1}^{3,3} + M_{v2}^{3,3}) \ddot{\theta}_{rc} + (M_{v1}^{3,4} + M_{v2}^{3,4}) \ddot{\theta}_{lc} + C_{v1}^3 + C_{v2}^3 + cb\lambda_2 + R_v^{3,1} \ddot{\theta}_{lc} + R_v^{3,2} \ddot{\theta}_{2c} + K_{p3}(\theta_{rc}(t) - \theta_r(t)) + K_{v3}(\dot{\theta}_{rc}(t) - \dot{\theta}_r(t)) \dots (III.4)$$

$$T_{v2} = (M_{v1}^{4,1} + M_{v2}^{4,1}) \ddot{x}_{0c} + (M_{v1}^{4,2} + M_{v2}^{4,2}) \ddot{y}_{0c} + (M_{v1}^{4,3} + M_{v2}^{4,3}) \ddot{\theta}_{rc} + (M_{v1}^{4,4} + M_{v2}^{4,4}) \ddot{\theta}_{lc} + C_{v1}^4 + C_{v2}^4 + cb\lambda_2 + R_v^{4,1} \ddot{\theta}_{lc} + R_v^{4,2} \ddot{\theta}_{2c} + K_{p4}(\theta_{lc}(t) - \theta_l(t)) + K_{v4}(\dot{\theta}_{lc}(t) - \dot{\theta}_l(t)) \dots (III.5)$$

L'organigramme correspondant à cette loi de commande est donné ci-après.

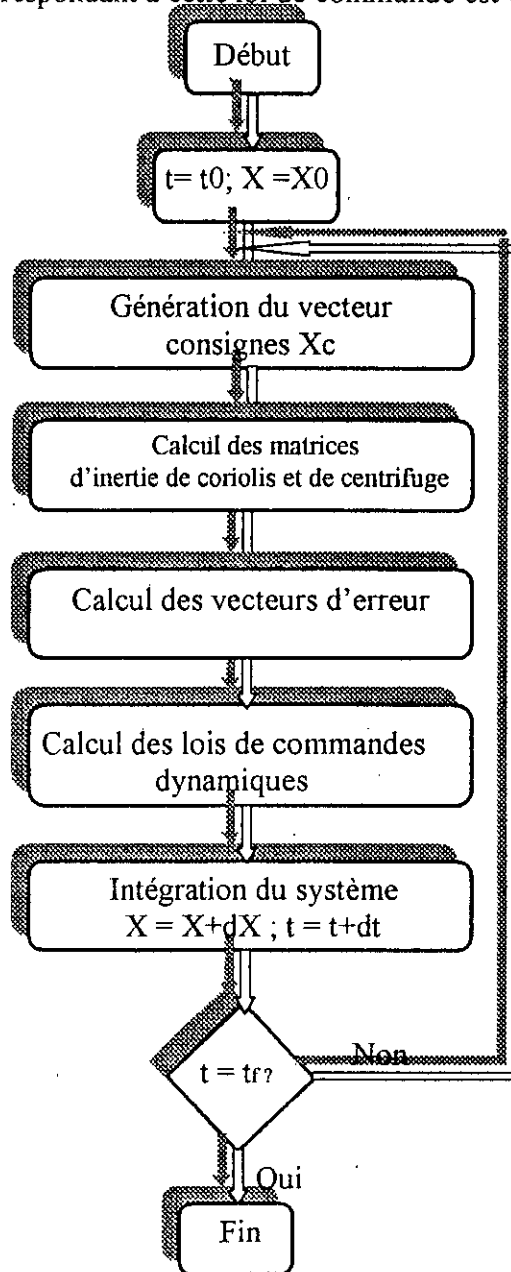


Figure-III.2 : Organigramme de la commande dynamique appliquée au manipulateur mobile.

A la lumière de l'étude présentée dans le paragraphe précédent, concernant la commande dynamique appliquée au manipulateur mobile, il est possible de faire une analyse et de discuter les points forts (avantages) et faibles (inconvénients) de cette loi de commande.

Avantages :

Elle est d'autant mieux adaptée à des manipulateurs mobiles à grandes vitesses et demandant une grande précision, que le modèle dynamique est le plus complet possible et que ses paramètres ont été bien identifiés.

Inconvénient :

Elle exige donc pour être efficace une élaboration fastidieuse du modèle dynamique et surtout une identification très précise de ses paramètres. Cette identification se fait :

1. Hors-ligne pour les paramètres constants intervenant dans le modèle dynamique : ce sont essentiellement des masses, des moments , ...
2. En-ligne pour les paramètres variant en cours de mouvement. Ce sont essentiellement ceux concernant le dernier corps du manipulateur mobile.

Il va donc falloir :

- Soit se limite à la manipulation d'objets dont les paramètres physiques sont parfaitement connus, ce qui est somme toute très restrictif.
- Soit identifier à chaque période d'échantillonnage les nouveaux paramètres (en les supposant constants sur une période), ceci n'était pas envisageable dans la mesure ou cette opération ne pouvait pas être réalisée en temps réel, ce qui s'explique par une incompatibilité du temps de calcul du modèle avec une application en temps réel.

C'est la raison pour la quelle nous investiguons d'autres solutions, ne nécessitant pas tout cet effort ; telle que la commande floue ou neuronale. Ces types de commandes choisies particulièrement pour son caractère intelligent et sa facilité de mise en oeuvre. Néanmoins pour le système manipulateur mobile, qui est complexe, non linéaire et fortement couplé les connaissances de l'opérateur humain s'avère insuffisant pour élaborer les commandes nécessaires. Cependant nous développons une troisième solution consistant à adopter une stratégie mi-chemin entre la commande de première classe et celui de la deuxième classe, ceci dit que nous pouvons envisager une loi de commande hybride combinant les lois de commandes dynamique et à logique floue ; dynamique et à réseau de neurones.

- La partie dynamique de la première et la deuxième approche chargé de la compensation des variations des efforts d'inertie d'accélération en cours de mouvement,

- La partie floue de la première et la partie neuronale de la deuxième approche chargé de la compensation de l'effet de couplage entre les deux sous systèmes mécaniques du manipulateur mobile en cour de mouvement.

Les intérêts de ces commandes mixte sont les suivants :

- Ces commandes utilisent la coopération existant entre deux types de loi de commande.
- Elle n'utilise pas des méthodes d'identification trop lourdes.
- Enfin, ces approches présentent une implantation aisée et une réduction du coût en temps de calcul.

III.2 Commande par logique floue :

La commande floue a pour objet la gestion automatique d'un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables d'entrées.

Un système flou peut être vu comme un système expert simple, fonctionnant à partir d'une représentation de connaissances basée sur les différents concepts de la théorie des ensembles flous.

Les connaissances concernant le procédé sont présentées sous formes des règles indicatives et d'heuristiques « if then » fondées sur l'expérience et l'imitation des opérateurs humains en charge du procédé.

III.2.1 Structure et principe d'un contrôleur flou [26, 28, 31,32, 33,35,36]

La mise en œuvre d'un correcteur flou (figure III.3 et III.4) passe par plusieurs étapes. Afin de traiter les règles, les variables d'entrées sont dans un premier temps converties en variables floues en définissant pour chacune d'elles une fonction d'appartenance. Cette phase constitue la **Fuzzification**. Après, on passe au traitement des règles. Toutes les règles activables sont activées, donnant lieu à plusieurs valeurs floues de sortie. En suit, une agrégation des règles est effectuée à l'issue de la quelle on obtient la valeur de sortie globale, qui est floue, par conséquent elle ne peut être appliquée directement au système, une phase de Defuzzification permet de calculer la valeur réelle de la commande à appliquer.

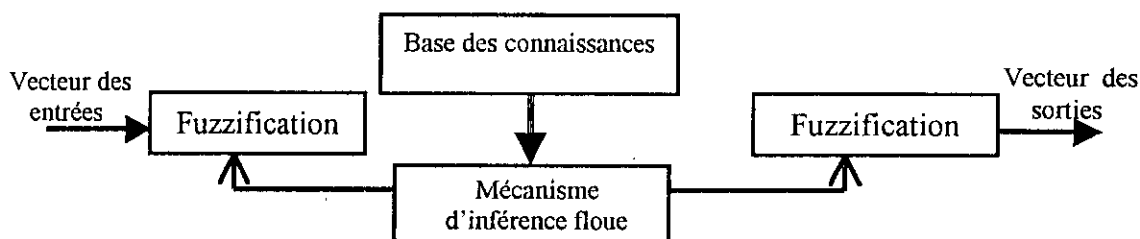


Figure III.3 : Configuration de base du système à logique floue .

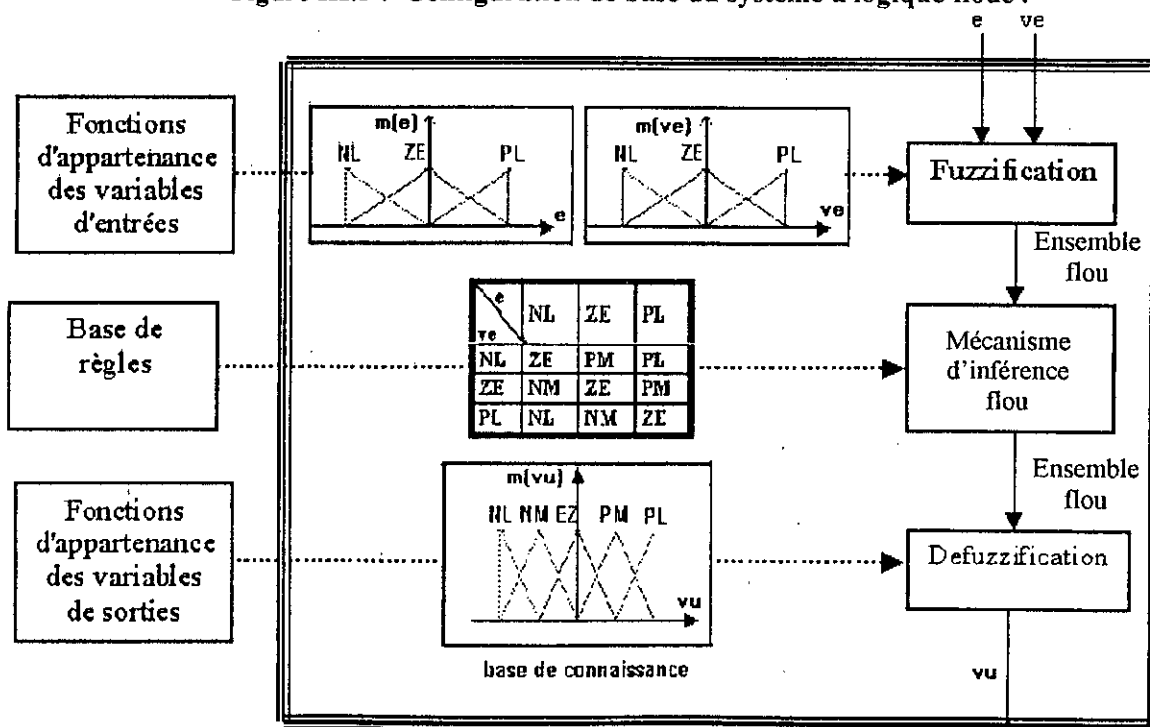
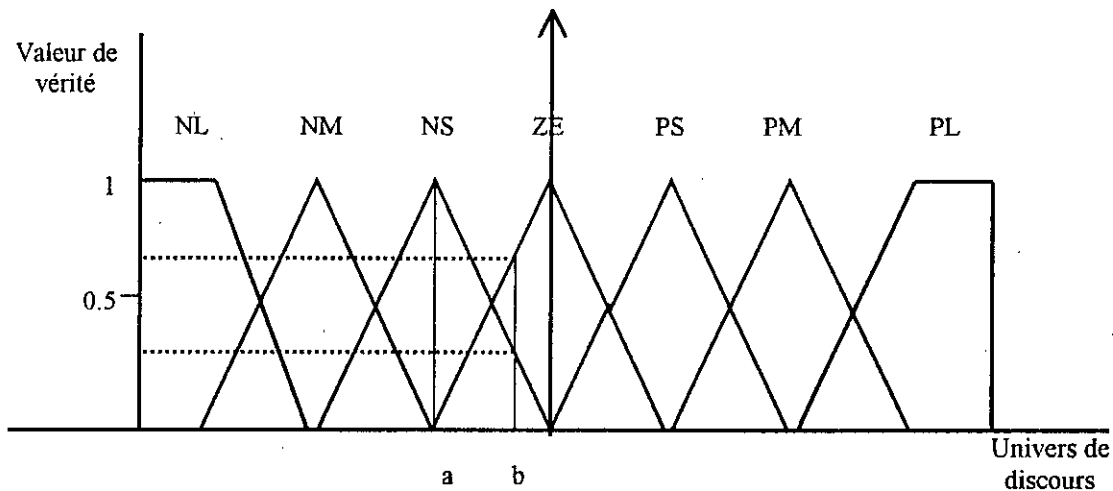


Figure III.4 : Structure d'un contrôleur flou. ▼ Sortie

Fuzzification

La fuzzification consiste en la définition des variables linguistiques et des fonctions d'appartenances pour les variables d'entrées et de sorties du système. Ce bloc représente une interface entre le monde physique et l'univers flou (interface numérique-linguistique), et contient en générale un traitement préliminaire. Il fournit une sortie de valeurs floues correspondant au couple (label, degré d'appartenance).

Exemple :



Dans cette exemple ;

- l'axe des abscisses est appelé l'univers de discours qui représente toutes les valeurs possibles pour l'entrée considérée.
- L'axe des ordonnées représente les degrés d'appartenance, il varie de zéro à un.
- NL (Négative Large) ; NM (Négative Médium) ; NS (Négative Small) ; ZE (Environ Zéro) ; PS (Positive Large) ; PM (Positive Médium) ; PL (Positive Large) : représentent les variables linguistiques (prédicats) associés aux sous-ensemble flous.

Si on prend la variable d'entrée est au point 'a', la variable linguistique 'NS' est complètement vraie, toutes les autres sont fausses ; lorsqu'elle passe au point 'b', les deux variables 'NS' et 'ZE' deviennent vraies avec un certain degré d'appartenance

Alors les couples (label, degré d'appartenance) aux variables 'a' et 'b' sont les suivants :

a : (NL, 0) ; (NM, 0) ; (NS, 1) ; (ZE, 0) ; (PS, 0) ; (PM, 0) ; (PL, 0).

b : (NL, 0) ; (NM, 0) ; (NS, 0.33) ; (ZE, 0.65) ; (PS, 0) ; (PM, 0) ; (PL, 0).

Inférence:

C'est un mécanisme de décision qui manipule le bloc des règles, et utilise des inférences. La formulation des inférences dépend évidemment du système à commander et de l'organe de commande, ainsi que des buts de contrôle envisagés. L'expérience et le savoir-faire d'un opérateur humain jouent un rôle important.

Les règles s'énoncent de la façon suivante :

' SI antécédent 1 et antécédent 2 Alors conséquence 1 et conséquence 2.....'

exemple :

SI (X est NL et Y est NM) **ALORS** (Z est NS)

Chaque antécédent se réfère au degré de vérité (η) associé à la variable linguistique de l'entrée considérée.

Chaque conséquence fait référence à la sortie floue associée à cette entrée.

Quand toutes les règles ont été évaluées, toutes les sorties floues possèdent une valeur de vérité par rapport aux fonctions d'appartenance des sorties.

Pour affecter à chaque conséquence un degré d'appartenance exprimant le poids de la règle, trois différentes méthodes peuvent être utilisées [34]:

- Méthode d'inférence Max – Min (appelé méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence Max – Produit (appelé méthode de Larsen).
- Méthode d'inférence Somme – Produit (appelé méthode de Sugeno).

Elles permettent un traitement numérique des inférences.



Defuzzification

Elle consiste à obtenir les valeurs numériques de la commande à partir de l'ensemble des règles floues obtenues par le moteur d'inférence (figure III.5) et représente une interface linguistique - numérique. Il existe plusieurs stratégies de defuzzification parmi les quelles [34]:

- Méthode de Maximum.
- Méthode de la moyenne des Maxima.
- Méthode du centre de Gravité.

III.2.2 Application de la commande flou a un Manipulateur Mobile:

Le principe d'un robot mobile manipulateur asservi par un contrôleur flou est donné dans la figure (III.5). Dans notre application le manipulateur mobile est constitué d'un bras à deux liaisons et d'un plate forme à deux roues motrices. Le manipulateur mobile possède quatre commandes en entrée (Figure III.6).

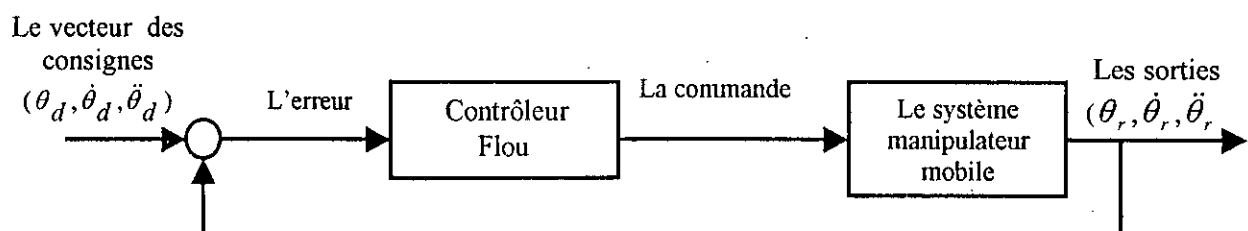


Figure III.5 : schéma structurel d'un système asservi par un contrôleur flou

L'élaboration d'une commande flou nécessite différentes étapes qui peuvent être énoncées comme suit :

III-2-2-1. Définition des variable d'entrées et des sorties du système:

Cette étape consiste à comptabiliser toutes les entrées et sorties susceptibles d'influencer le comportement du manipulateur mobile. Dans notre application les entrées utilisées pour la commande floue sont : l'erreur de position (e_p) et son accroissement (erreur de vitesse, e_v), et cela pour les deux degrés de liberté du bras, et les deux roues motrice, en considérant chaque axe comme un sous-système de deux entrées (e_{pi} , e_{vi}), et une sortie Tr_i , avec $i=1, 2, 3, 4$ (figure II.6). Les commandes calculées dans chaque itération seront appliquées au modèle complet pour avoir la position, la vitesse, et l'accélération réelles du système.

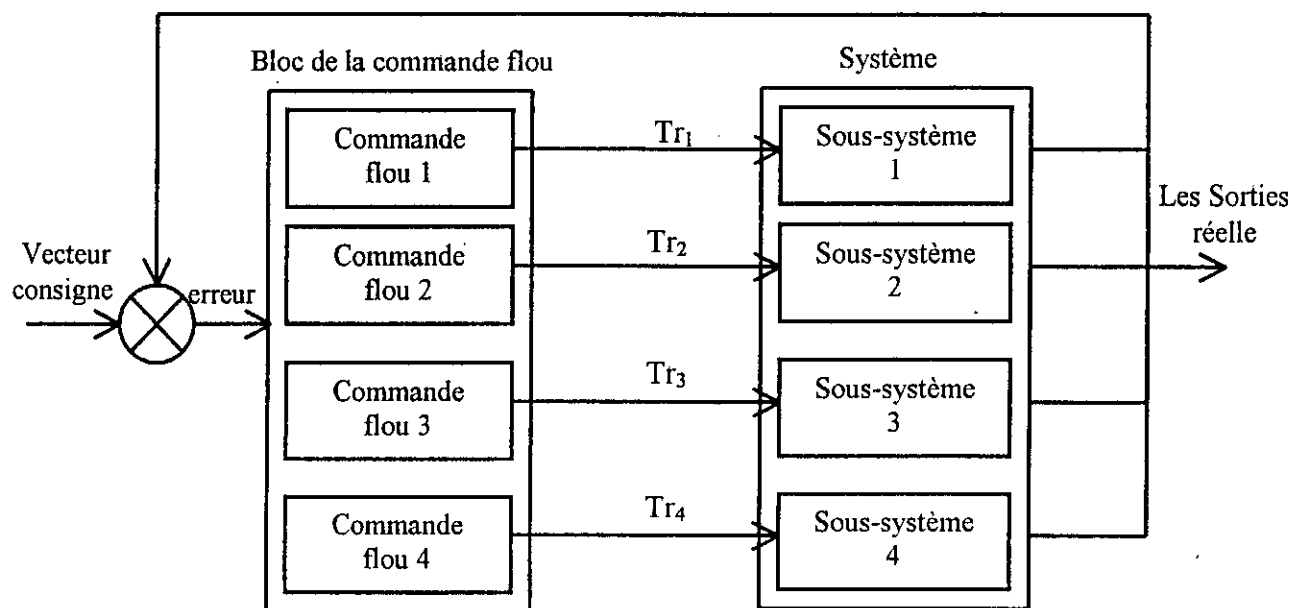


Figure III.6: Diagramme du système commandé

III-2-2-2. Fonctions d'appartenances des entrées et sorties:

Pour l'application du modèle floue, nous avons défini trois prédicats pour chaque entrée distribuées de manière équidistante dans le domaine $[-1 +1]$, ils sont désignés par:

NG: Négatif.

EZ: Environ zéro.

PG: Positif.

On a utilisé pour le calcul d'appariement de chaque variable d'entrée le graphe (fonction) de la forme triangulaire, pour tous les prédicats (figure III.7).

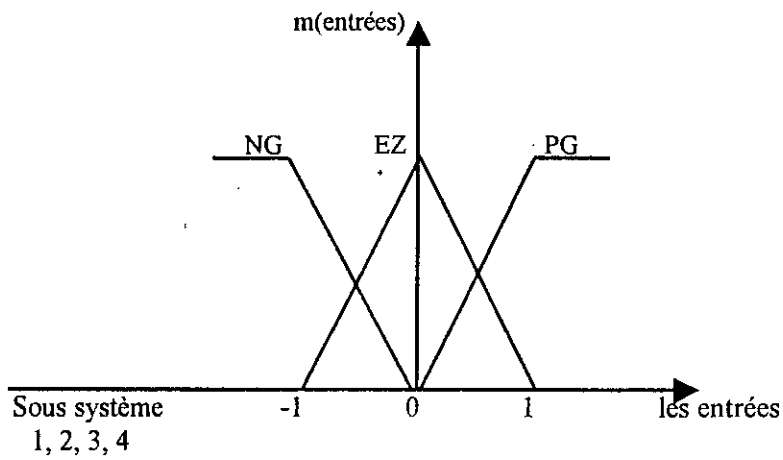


Figure III.7 : Fonction d'appartenance des entrées

Pour les sorties, nous définissons les prédicats ci-dessous:

NG: Négatif grand

EZ: environ zéro

PG: Positif grand

Ces prédicats sont distribués d'une manière équidistante dans le domaine $[-2 \ +2]$, avec des fonction d'appartenance de la forme triangulaire (Figure.8).

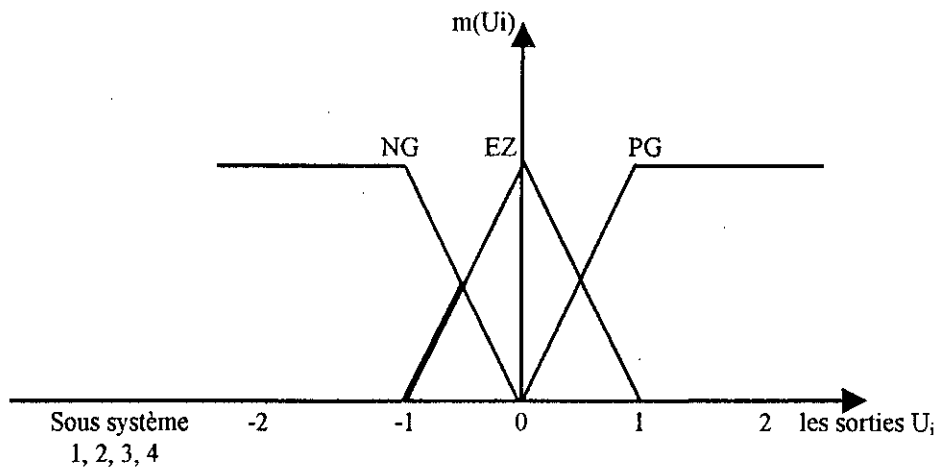


Figure.8: Fonction d'appartenance des sorties U_i

III-2-2-3. Etablir les règles de fonctionnement du manipulateur mobile:

En se basant sur l'étude de comportement du manipulateur mobile, nous décrivons pour chaque sous-système neuf règles qui décrivent l'état du système. Les règles se présentent comme suit :

Pour la 1^{ère} liaison :

Règle 1: Si e_{p1} est NG et e_{v1} est NG Alors U_1 est PG.

Règle 2: Si e_{p1} est NG et e_{v1} est EZ. Alors U_1 est PG.

Règle 3: Si e_{p1} est NG et e_{v1} est PG Alors U_1 est EZ.

Règle 4: Si e_{p1} est PG et e_{v1} est NG Alors U_1 est EZ.

Règle 5: Si e_{p1} est PG et e_{v1} est PG Alors U_1 est NG.

Règle 6: Si e_{p1} est PG et e_{v1} est EZ Alors U_1 est NG.

Règle 7: Si e_{p1} est EZ et e_{v1} est EZ Alors U_1 est EZ.

Règle 8: Si e_{p1} est EZ et e_{v1} est NG Alors U_1 est PG.

Règle 9: Si e_{p1} est EZ et e_{v1} est PG Alors U_1 est NG.

De la même manière que précédemment nous pouvons décrire le comportement du manipulateur mobile (liaison N° 2, roue gauche et droite).

Explication de la règle N°1 de la première liaison:

Si l'erreur de position (e_{p1}) et son accroissement (erreur de vitesse, e_{v1}), de la première liaison, ont un pourcentage négative, alors le couple nominale appliqué doit être de valeur positif.

Explication de la règle N°7 de la première liaison:

Si l'erreur de position (e_{p1}) et son accroissement (erreur de vitesse, e_{v1}), de la première liaison, ont une valeur nulle, alors le couple nominale appliqué doit être de valeur zéro. De la même manière que précédemment nous pouvons interpréter toutes les règles associées à la base.

Afin de voir l'influence du nombre de règles sur le contrôleur flou nous avons utilisé une base de règles complète et une autre qui est incomplète [37][38] (figure III.9).

		e_{pi}		
		NG	EZ	PG
\mathcal{F}	NG	PG	PG	EZ
	EZ	PG	EZ	NG
	PG	EZ	NG	NG

		e_{pi}		
		NG	EZ	PG
\mathcal{F}	NG	×	PG	×
	EZ	PG	EZ	NG
	PG	×	NG	×

figure III.9 : Table des règles d'inférences ; complète et incomplète

III-2-2-4. Calcul des degrés de vérité (poids) des règles flous:

Le degré de validité de chaque règle peut être calculé par plusieurs méthodes, pour notre application on a utilisé la méthode de produit des degrés d'appariement des propositions de chaque règle flou.

$Dv(R_j) = m(\text{antécédent 1}) * m(\text{antécédent 2})$. Avec j , représente le nombre des règles floue pour chaque sous système.

III-2-2-5. Défuzzification:

Aggregation des règles flou pour la production de sortie numérique réelle, non floue U , par la combinaison du degré de validation de chaque règle et de la sortie individuelle de chaque règle. Cet opérateur est appelé centre de gravité, son équation est donnés :

$$Tr_j = \frac{\sum_{j=1}^M (Dv(R_j) \times R_j)}{\sum_{j=1}^M (Dv(R_j))}$$

avec M : nombre des règles floue et R_j représentes les règles floues

Les schémas blocs des quatre contrôleurs Flous appliqués au manipulateur mobile sont présentés aux figures III.10 à III.12 et L'organigramme de cette loi de commande est donné à la figure suivante (figure-III.13)

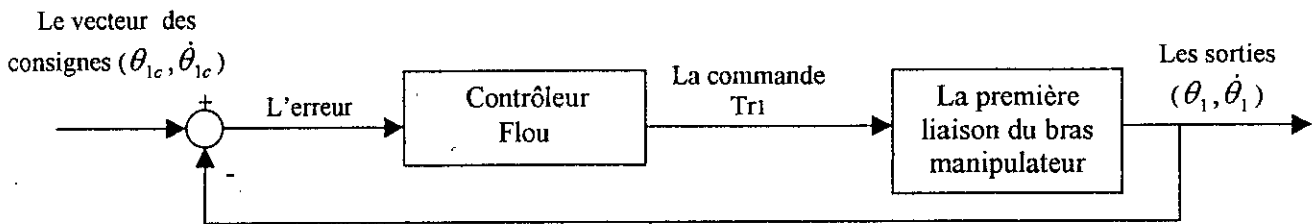


figure-III.10 : Contrôleur flou appliqué à la première liaison du bras manipulateur.

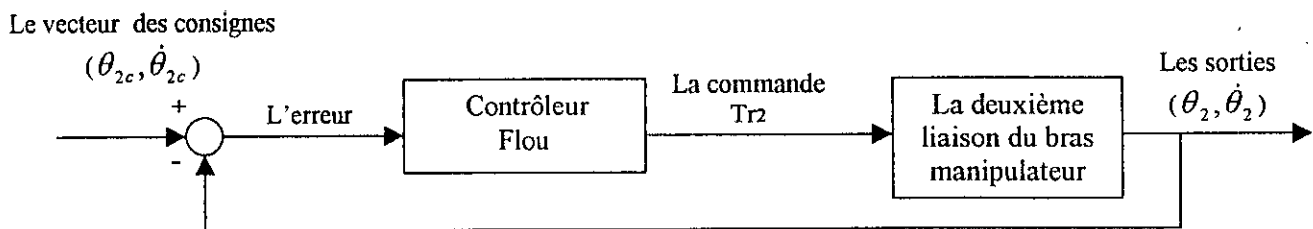


figure-III.11 : Contrôleur flou appliqué à la deuxième liaison du bras manipulateur.

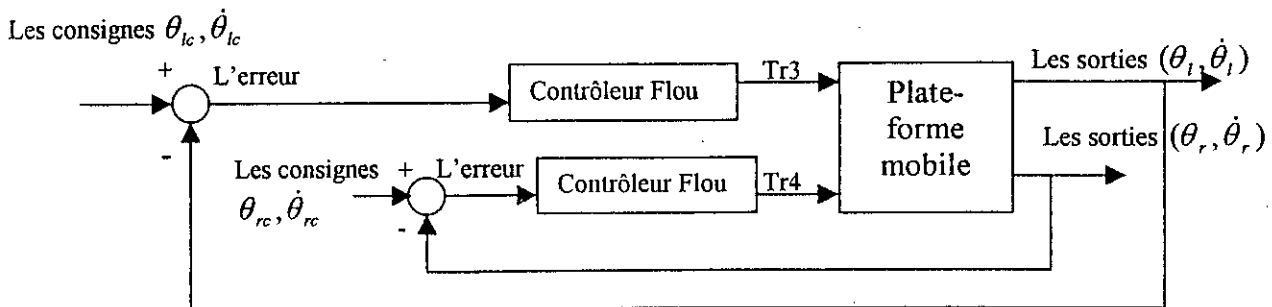


figure-III.12 : Les deux contrôleurs flous appliqués aux roues motrices, droite et gauche, de la plate-forme mobile

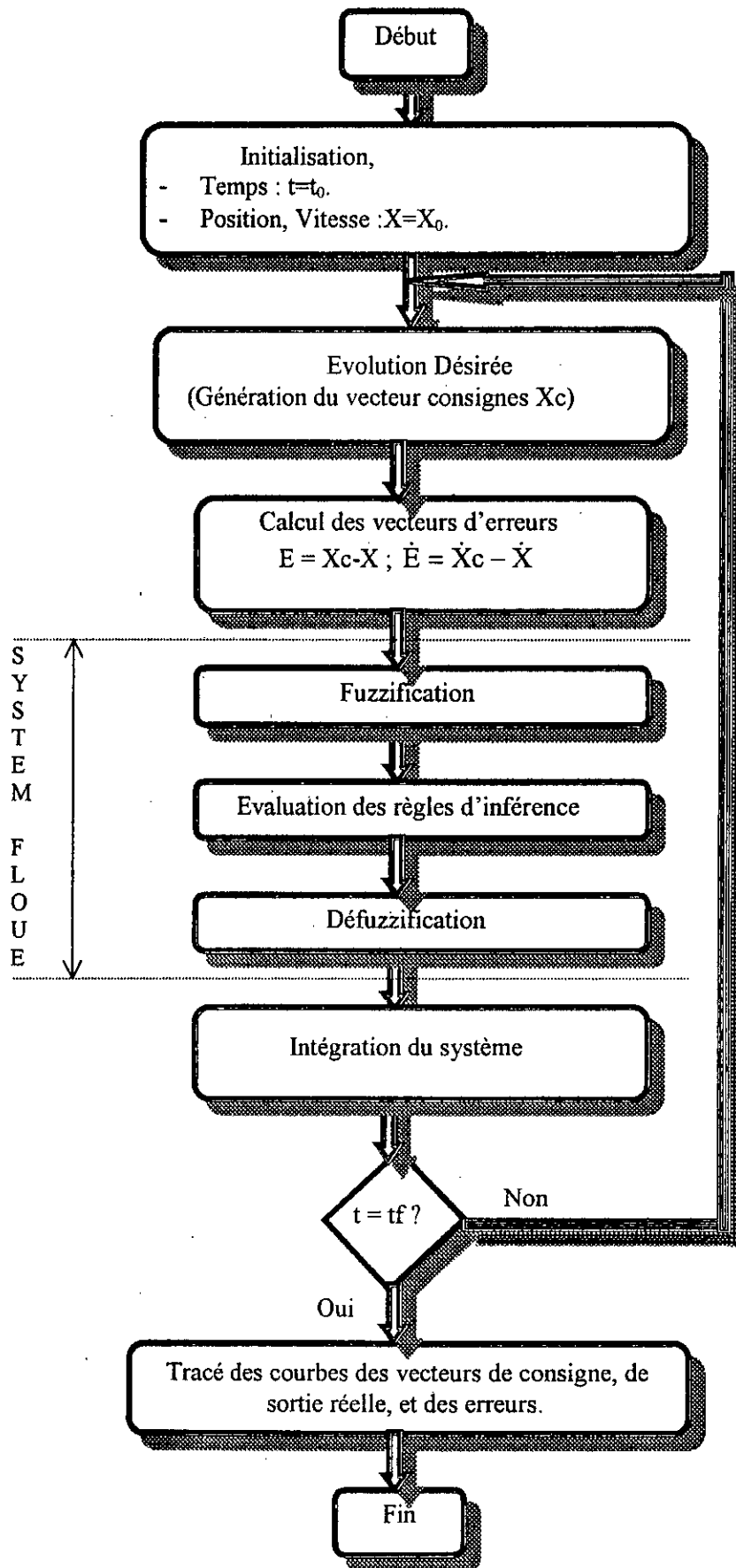


Figure-III.13 : Organigramme de la commande flou appliquée au manipulateur mobile.

Dans cette organigramme, nous avons tout d'abord défini l'état initiale du manipulateur mobile. Une fois les consignes que le système devra suivre soient parfaitement définies, il est possible de calculer une loi de commande floue pour le système, capable de contrôler son évolution. L'élaboration d'une commande floue nécessite trois étapes qui peuvent être énoncées comme suit :

- Une interface de fuzzification.
- Une base de connaissance et la logique de prise de décision.
- Une interface de défuzzification.

La commande calculée dans chaque itération sera appliquée au modèle complet du manipulateur mobile, pour avoir la position, vitesse et accélération réelles du système. A la fin nous avons tracé les courbes des vecteurs, de consigne, de sortie réelle et des erreurs.

III.3 Commande par réseau de neurone

Les réseaux de neurones avec leurs propriétés intéressantes telles que l'adaptativité, le stockage associatif, le parallélisme et l'optimisation, sont capables de traiter beaucoup de problèmes dont la résolution par les méthodes classiques était difficile [64].

III.3.1 Définition de réseau de neurones [35,61,64, 65, 69, 70]

Un réseau de neurones est une structure de traitement parallèle et distribué d'information, constituée de plusieurs éléments de traitement (neurones) massivement interconnectés. Un neurone est un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées, suivie en général d'une non linéarité. Sa sortie est donnée par :

$$X_i = f(S_i) \quad \text{avec} \quad S_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} \times X_j^{\text{précédent}} \dots\dots\dots (III.6)$$

Avec X_i la sortie du neurone i , W_{ij} la valeur de pondération de la $j^{\text{ième}}$ entrée du neurone i , n le nombre d'entrées. La fonction f est une fonction non linéaire. L'une des plus utilisées est la fonction sigmoïde :

$$f(S) = \frac{1 - e^{-S}}{1 + e^{-S}} \dots\dots\dots (III.7)$$

Les réseaux de neurones peuvent être divisés en deux catégories ; les réseaux non récurrents et les réseaux récurrents . L'une des propriétés importantes des réseaux de neurones est qu'ils sont capables de réaliser les fonctions d'apprentissage. Pendant la phase d'apprentissage, les paramètres du réseau sont adaptés pour qu'ils réalisent une tâche désirée. Il y'a deux méthodes d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé. L'une des méthodes les plus utilisées dans l'apprentissage supervisé est la méthode de rétropropagation.

III.3.2 Structure et principe d'un contrôleur neuronale [66, 67, 68]

Les structures des systèmes de contrôle contenant des réseaux de neurones sont deux types. Dans le première type, le réseau de neurones est utilisé pour ajustement des paramètres d'un contrôleur conventionnel, voir la figure (III.14).

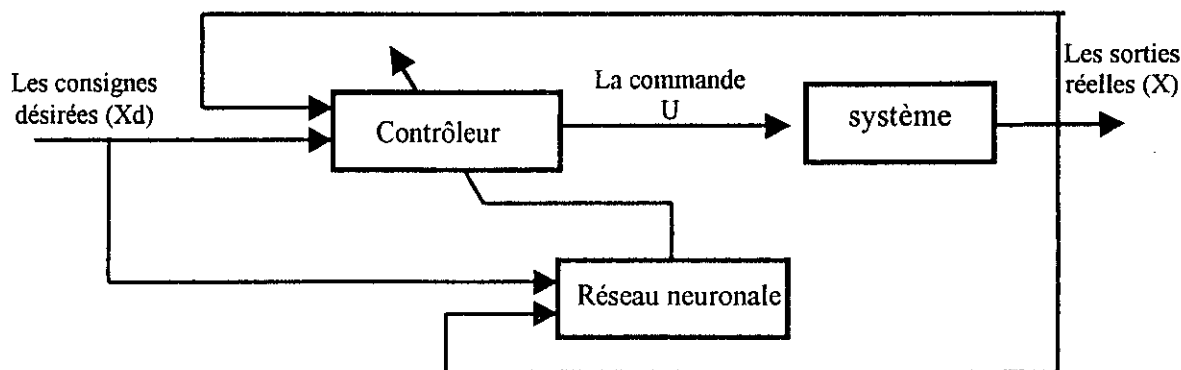


Figure III.14 : premier structure d'un contrôleur neuronale

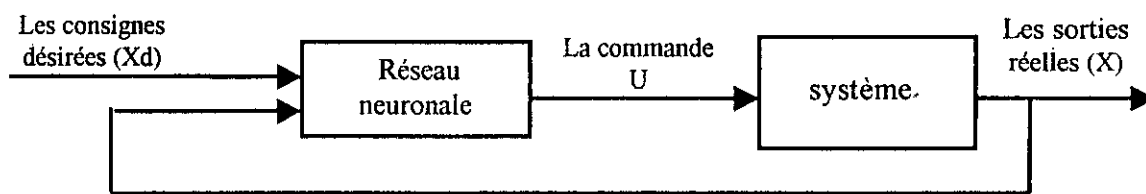


Figure III.15 deuxième structure d'un contrôleur neuronale

Dans le deuxième type, les signaux de commande sont générés par le réseau lui-même (Figure III.15). Les performances de la première méthode sont limitées par les performances du contrôleur conventionnel. C'est dans la deuxième méthode que les propriétés des réseaux neuronaux sont mieux exploitées. Mais, malgré la simplicité de cette structure, il faut résoudre un problème important : **comment entraîner le contrôleur neuronal ?**

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'entraînement du réseau contrôleur, la méthode de rétropropagation est l'une des méthodes les plus efficaces pour réaliser cette tâche, dont le principe est la rétropropagation de l'erreur à travers le temps.

Soit le système :

$$y(t+1) = \psi(y(t), u(t)) \dots \dots \dots (III.8)$$

ou : ψ est une fonction non linéaire inconnue.

Le problème à résoudre est le suivant : comment générer les signaux de commande $u(t)$ qui permettent de déplacer le système de n'importe quel état initial X_0 à un état désiré X_d .

Pour résoudre ce problème, on entraîne un contrôleur neuronaux à générer ces commandes, c'est-à-dire on ajuste ces paramètres de manière à ce que la moyenne de la fonction erreur J pour les états initiales X_0 , soit minimale.

$$J(t) = E(\|X_d - X_k\|^2)$$

Pour cela on applique l'algorithme de rétropropagation basé sur la méthode de la descente du gradient de l'erreur quadratique moyenne entre la sortie actuelle du réseau et la sortie désirée.

On définit une fonction objective comme suit :

$$J(t) = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{a_i}(t) - Y_{d_i}(t))^2 \quad \dots\dots\dots(III.9)$$

Où : $Y_a(t)$ représente la $i^{\text{ème}}$ sortie désirée.

$Y_d(t)$ représente la $i^{\text{ème}}$ sortie actuelle.

Soit $W = [w_1 \dots\dots\dots w_{n_0}]^T$ un vecteur représentant tous les poids du réseau à déterminer, n_0 est la dimension du vecteur W .

Pour appliquer l'algorithme de rétropropagation basé sur la méthode de la descente du gradient, on minimise la fonction énergie par rapport à tous les paramètres inconnus. Le vecteur W est ajusté en utilisant le vecteur d'incrément $[\Delta w_1, \dots\dots\dots \Delta w_{n_0}]^T$ défini le long de la direction négative du gradient de J de façon suivant :

Où, η : représente le coefficient d'apprentissage.
$$\Delta W_i = -\eta \times \frac{\partial J(t)}{\partial W_i} \quad \dots\dots\dots(III.10)$$

En commençant par la dernière couche du réseau, l'application de la règle de la descente du gradient donne :

$$\frac{\partial J(t)}{\partial W_{ij}^L} = \frac{\partial J(t)}{\partial Y_{a_i}} \times \frac{\partial Y_{a_i}}{\partial W_{ij}^L} \quad \dots\dots\dots(III.11)$$

De l'équation (III.9) on obtient le premier terme de (III.11) :

$$\frac{\partial J(t)}{\partial Y_{a_i}} = -(Y_{d_i} - Y_{a_i}) = -\delta_i^L \quad \dots\dots\dots(III.12)$$

Où δ_i^L est appelé signal d'erreur du $i^{\text{ème}}$ neurone de la $L^{\text{ème}}$ couche.

De l'équation (III.6) on obtient l'expression du deuxième terme de (III.11) :

$$\frac{\partial Y_{a_i}}{\partial W_{ij}^L} = X_j^{L-1} \quad \dots\dots\dots(III.13)$$

D'où
$$\frac{\partial J(t)}{\partial W_{ij}^L} = -\delta_i^L \times X_j^{L-1} \quad \dots\dots\dots(III.14)$$

Si on considère maintenant la $(L-1)^{\text{ème}}$ couche, en utilisant la règle de la descente du gradient :

$$\frac{\partial J(t)}{\partial W_{ij}^{L-1}} = \sum_k \frac{\partial J(t)}{\partial Y_{a_k}} \times \frac{\partial Y_{a_k}}{\partial W_{ij}^{L-1}} \times \frac{\partial X_i^{L-1}}{\partial Z_i^{L-1}} \times \frac{\partial Z_i^{L-1}}{\partial W_{ij}^{L-1}} \quad \dots\dots\dots(III.15)$$

On peut facilement remarquer que :
$$\frac{\partial Y_{a_k}}{\partial X_i^{L-1}} = W_{ik}^L \quad \dots\dots\dots(III.16)$$

$$\frac{\partial X_i^{L-1}}{\partial Z_i^{L-1}} = f'(z_i^{L-1}) \quad \dots\dots\dots(III.17)$$

$$\frac{\partial Z_i^{L-1}}{\partial W_{ij}^{L-1}} = X_j^{L-2} \dots\dots\dots (III.18)$$

$$\text{ou } f(z) = \frac{\partial f'(z)}{\partial z} \dots\dots\dots (III.19)$$

En définissant le signal d'erreur pour le i^{ème} neurone de la (L-1)^{ème} couche comme l'expression suivant :

$$\delta_i^{L-1} = \sum_i \left(-\frac{\partial J(t)}{\partial Y_{a_k}} \right) \times \frac{\partial Y_{a_k}}{\partial X_i^{L-1}} \times \frac{\partial X_i^{L-1}}{\partial Z_i^{L-1}} = f'(Z_i^{L-1}) \times \sum_k \delta_k^L \times W_{ki}^L \dots\dots\dots (III.20)$$

L'équation (III.15) peut être réécrite alors comme suit :

$$\delta_i^{L-1} = \frac{\partial J(t)}{\partial W_{ij}^{L-1}} = \delta_i^{L-1} \times W_j^{L-2} \dots\dots\dots (III.21)$$

D'une manière similaire il peut être montré que :

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_{ij}^{L-1}} = -\delta_i^{L-1} \dots\dots\dots (III.22)$$



En poursuivant cette procédure les résultats généraux suivants sont obtenus

pour m=L, L-1,2.

$$\delta_i^{m-1} = f'(Z_i^{m-1}) \times \sum_k \delta_k^m \times W_{ki}^m \dots\dots\dots (III.23)$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial W_{ij}^{m-1}} = -\delta_i^{m-1} \times X_j^{m-2} \dots\dots\dots (III.24)$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial b_{ij}^{m-1}} = -\delta_i^{m-1} \dots\dots\dots (III.25)$$

l'équation (III.23) montre comment le signal d'erreur se propage en arrière, d'ou le terme de rétropropagation.

La minimisation de la fonction d'énergie définie dans l'équation (III.9) produit les incréments de mise à jour de V comme suit :

$$\Delta W_{ij}^k(t) = \eta_w \times \delta^k(t) \times X_j^{k-1}(t) \dots\dots\dots (III.26)$$

$$\Delta b_{ij}^k(t) = \eta_b \times \delta^k(t) \dots\dots\dots (III.27)$$

$$\text{ou } \delta^k(t) = Y_{d_i}(t) - Y_{a_i}(t) \dots\dots\dots (III.28)$$

$$\delta_i^{k+1} = f'(Z_i^k(t)) \times \sum_m \delta_m^{k+1} \times W_{mi}^{k+1}(t-1), \quad k = (L-1), \dots, 2, 1 \dots\dots\dots (III.29)$$

Les constantes ηw et ηb représentent les taux d'apprentissage pour les poids et les seuils respectivement. En pratique, une grande valeur du taux d'apprentissage est préférable car il entraîne un apprentissage rapide. Malheureusement, une grand valeur du taux d'apprentissage peut aussi aboutir à une oscillation ou même à une divergence. Pour surmonter ce problème, un terme momentum est, en général, inclus tel que l'équation (III.26) et (III.27) devient :

$$\Delta W_{ij}^k(t) = \eta_w \times \delta^k(t) \times X_j^{k-1}(t) + \alpha_w \times \Delta W_{ij}^k(t-1) \dots\dots\dots (III.30)$$

$$\Delta b_{ij}^k(t) = \eta_b \times \delta^k(t) \times X_j^{k-1}(t) + \alpha_b \times \Delta b_{ij}^k(t-1) \dots\dots\dots (III.31)$$

Où α_w et α_b sont des constantes momentum qui déterminent l'effet des changements précédents de $\Delta w_{ijk}(t-1)$ et $\Delta b_{ijk}(t-1)$ sur la direction de la mise à jour courante dans les poids et les seuils respectivement.

En résumé, l'algorithme de rétropropagation met à jour les poids et les seuils du réseau selon :

$$W_{ij}^k(t+1) = W_{ij}^k(t) + \Delta W_{ij}^k(t).$$

$$B_{ij}^{(k)}(t+1) = b_{ij}^k(t) + \Delta b_{ij}^k(t).$$

Avec $W_{ij}^k(t)$ et $b_{ij}^k(t)$ sont données par les équations (III.30) et (III.31).

L'implantation de l'algorithme de rétropropagation nécessite deux phases.

La phase AVANT (FORWARD) :

- Initialisation des poids synaptique et les seuils avec de petites valeurs aléatoires.
- Donner les couple d'apprentissage.
- Propagation des entrées à travers le réseau jusqu'à la couche de sortie.
- Calculer les erreurs de prédiction (résiduelles).

La phase ARRIERE (BACK) :

- Ajuster les poids et les seuils, en minimisant l'erreur selon la méthode du gradient.
- Répété le procédé jusqu'à la convergence des poids et des seuils.

III.3.3 Application de la commande neuronale a un Manipulateur Mobile

Le principe de la commande neuronale est donné dans la figure.III.16. Le couple neuronal est fourni par un réseau de neurones multicouches ayant une seule couche cachée. Pendant l'étape d'apprentissage du réseau, nous avons choisi au début un seul réseau pour toutes les couples de commande.

Le réseau a pour entrées les trajectoires désirées de position, vitesse et accélération des deux liaisons du bras manipulateur, et des deux roues de la plate forme mobile, et l'estimée les lois de commande neuronale.

A l'étape de généralisation nous avons constaté que l'erreur d'entraînement était assez importante. Afin du surmonter ce problème nous avons considéré des réseaux de neurones indépendants pour chaque liaison, et pour chaque roue, d'où on a quatre estimateurs neuronaux, ceci entraîne quatre contrôleurs neuronaux décentralisés (figure III.17).

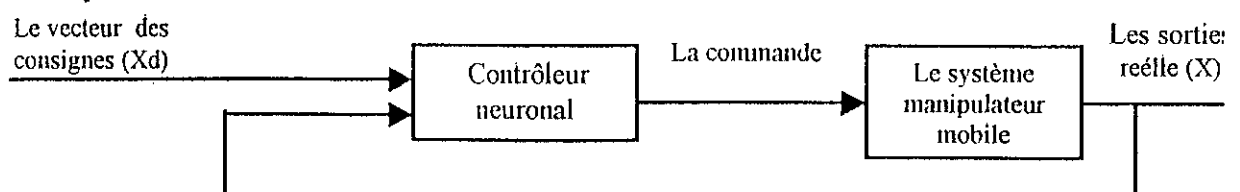


Figure III.16 : Schéma de base de la commande neuronale appliqué à un manipulateur mobile .

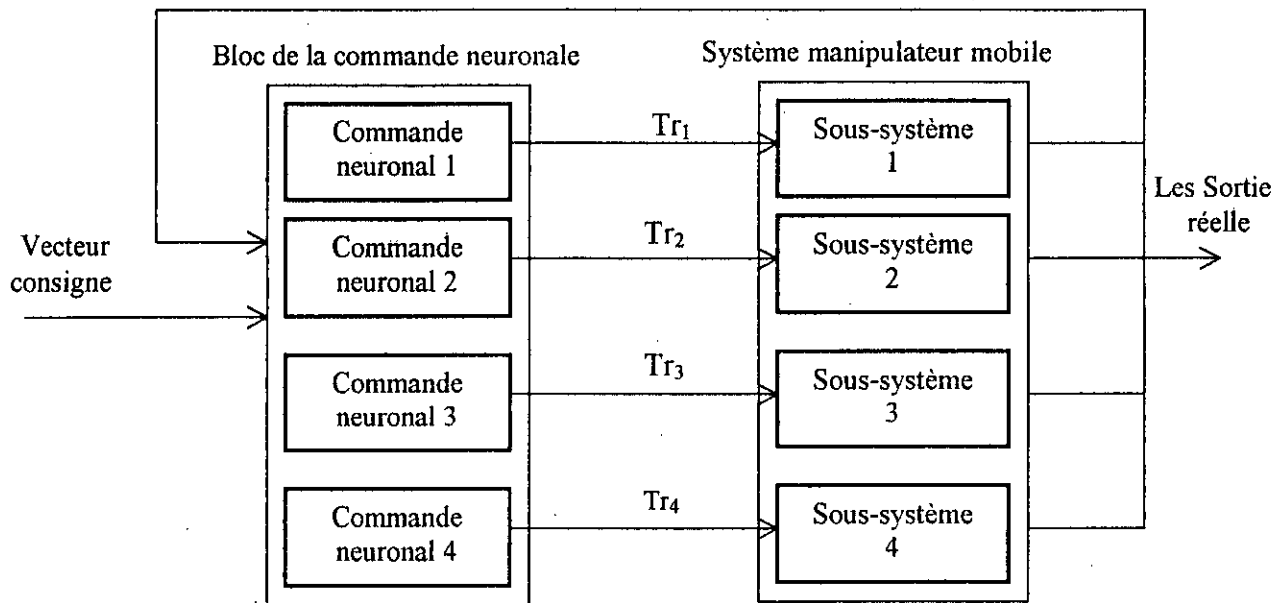


Figure III.17: Diagramme du système commandé par quatre commandes neuronales décentralisées

L'élaboration d'un estimateur neuronale a nécessite différentes étapes qui peuvent être énoncées comme suit:

Etape1 :

- Initialisation de tous les poids synaptiques, les seuils sont fixés de petites valeurs aléatoires.
- Initialiser le taux d'apprentissage η , avec : $0.8 < \eta < 1$.

Etape2 :

Présenter les entrées et les sorties au réseaux.

Etape3 :

Calculer la sortie de réseau.

Etape4 :

Calculer l'erreur quadratique moyenne qui représente la fonction d'énergie.

Etape5 :

Corriger les poids du réseau de manière à minimiser la fonction d'énergie.

Etape6 :

Refaire les étapes 2 à 5 pour chaque couple d'apprentissage tant que l'erreur n'est pas inférieure à un seuil fixe au préalable.

Le schéma bloc d'un contrôleur neuronale appliqués au manipulateur mobile, est présenté au figure III.18.

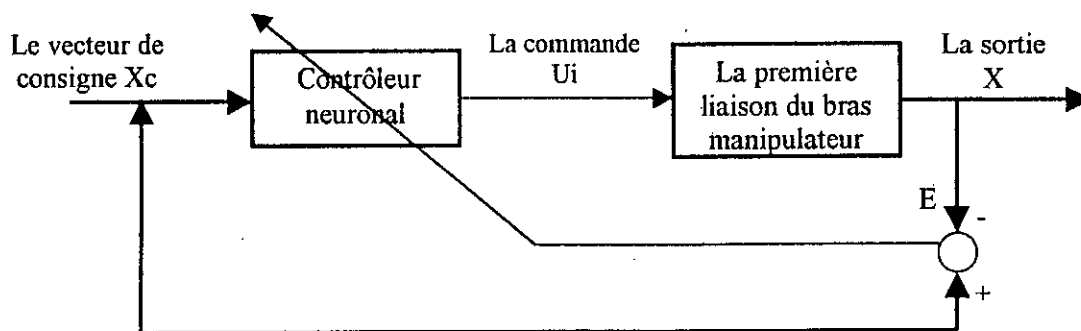


Fig-III.18 : Schéma de principe de la commande neuronale appliquée au manipulateur mobile.

l'organigramme d'un contrôleur neuronale appliqués au manipulateur mobile, est présenté au figure III.19. Nous avons tout d'abord défini l'état initiale du manipulateur mobile. Une fois les consignes que le système devra suivre soient parfaitement définies, il est possible de calcule une loi de commande neuronale pour le système, capable de contrôler sont évolution. L'élaboration d'une commande neuronale nécessite deux phases. Une fois que l'architecture du réseau (nombre de couche, nombre de neurones par couche) a été décidée, la phase d'apprentissage doit permettre de choisir les poids des connexions menant à chaque neurone formel. L'algorithme de retropropagation permet de faire évoluer ces poids vers un optimum, en les obligeant à traiter correctement les données d'apprentissage, après les avoir initialisé aléatoirement.

La commande calculée dans chaque itération sera appliquée au modèle complet du manipulateur mobile, pour avoir la position, vitesse et accélération réelles du système. A la fin nous avons tracé les courbes des vecteurs, de consigne, de sortie réelle et des erreurs.

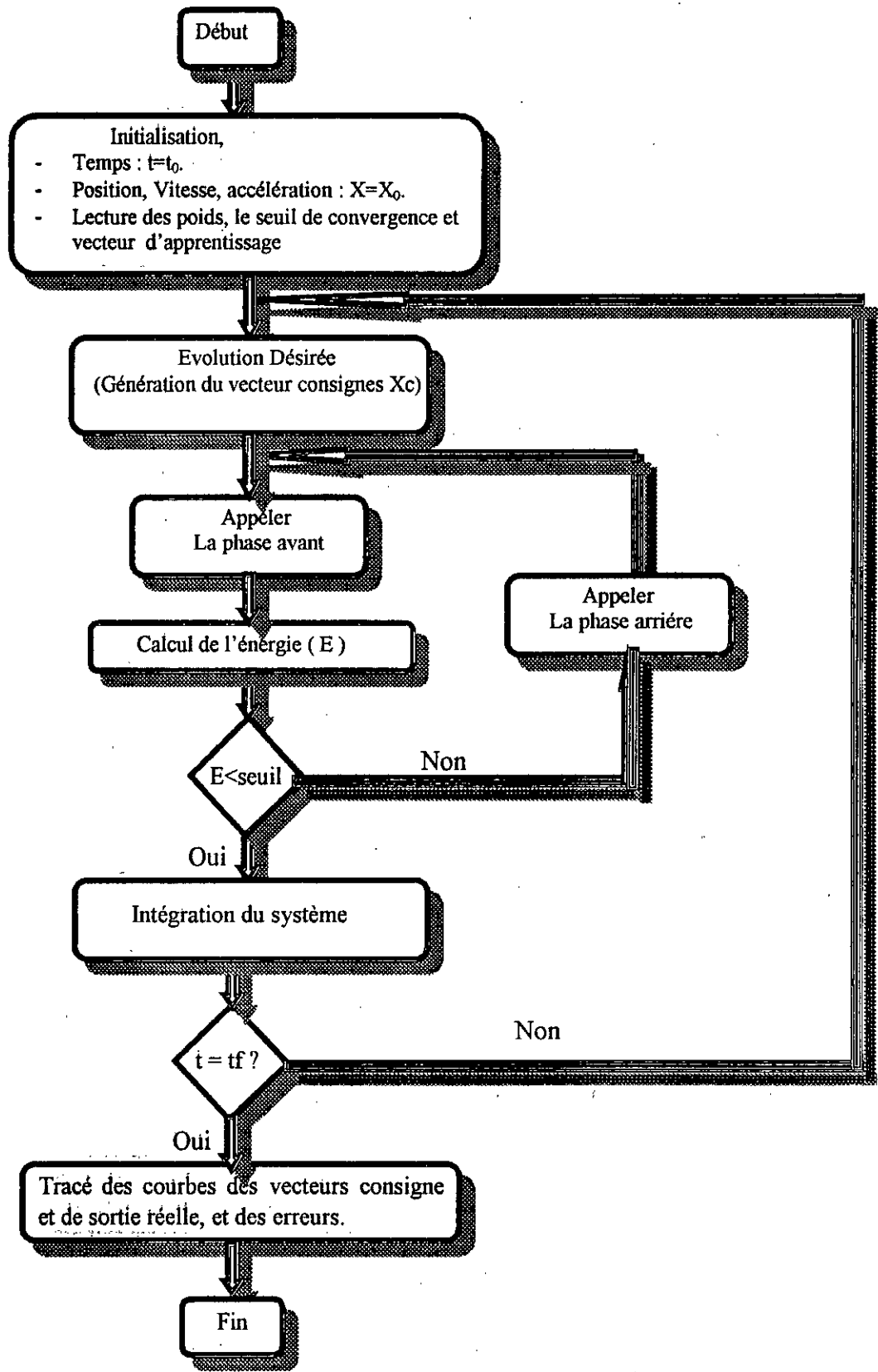


Figure-III.19 : Organigramme de la commande neuronale appliquée au manipulateur mobile.

III.4 Commande Dynamique-floue

L'approche de commande Dynamique-floue que nous proposons combine les deux techniques de commande Dynamique et floue.

Le concept de notre approche, dont le schéma de principe est montré en **Figure III.20** est fondé sur l'utilisation conjointe d'un modèle Dynamique du Manipulateur Mobile et d'un correcteur floue, permettant le calcul d'une nouvelle loi de commande appelé Dynamique-floue. Le bloc de retour permet la correction des non linéarités non prises en compte par le modélisation Dynamique.

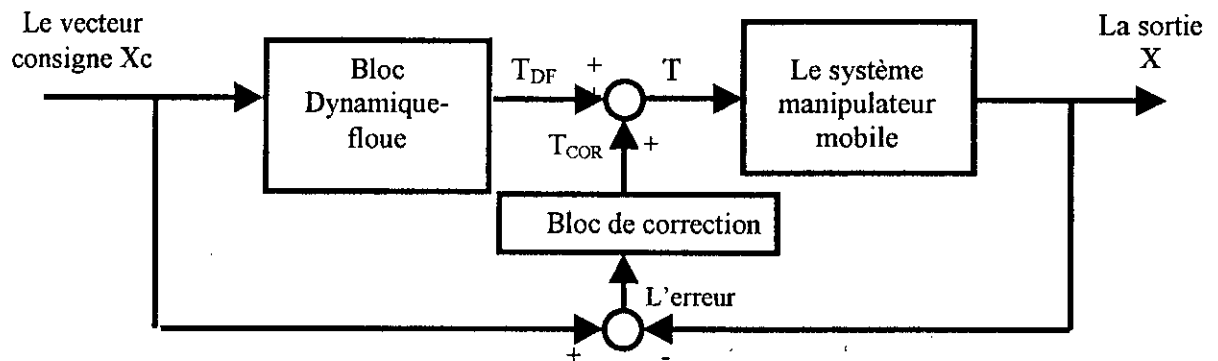


Figure III.20 : Le schéma bloc de la commande Dynamique-Floue.

L'action Dynamique a pour objectif de compenser :

- Les variation des efforts d'inertie d'action ,
- Les variation des efforts d'inertie de coriolis,
- Les variation des efforts d'inertie de centrifuge.

L'action floue de la stratégie proposée a pour objectif de compenser :

- Les variation des efforts d'inertie d'interaction,
- Les variation des efforts d'inertie de coriolis d'interaction,
- Les variation des efforts d'inertie de centrifuge d'interaction.

Le rôle de la partie de correction est de compenser :

- Les erreurs dues aux incertitudes d'estimation des paramètres dynamiques du manipulateur mobile,
- Les erreurs dues à l'inexactitude de la modélisation dynamique du manipulateur mobile,
- Les variations dynamiques non prise en compte par le modèle dynamique.

Le couple de loi de commande totale est donné par :

$$T = T_{DF} + T_{COR}$$

ou : T_{DF} représente le couple d'anticipation.

T_{COR} représente le couple de correction.

Le couple nominale T_{DF} (Figure III.21) est fourni par la partie dynamique-floue en se basant sur le modèle dynamique du manipulateur mobile, et un estimateur de type flou. Cette partie utilise la décomposition de ce dernier en couple dynamique sans prise en compte des termes de couplage et le couple flou avec prise en compte des termes d'interaction. Par conséquent le couple nominale sera décrit comme suit :

$$T_{DF} = T_D + T_F$$

T_D est le vecteur des couples dynamiques sans prise en compte des termes de couplage.

T_F est le vecteur des couples dynamique avec prise en compte les termes de couplage.

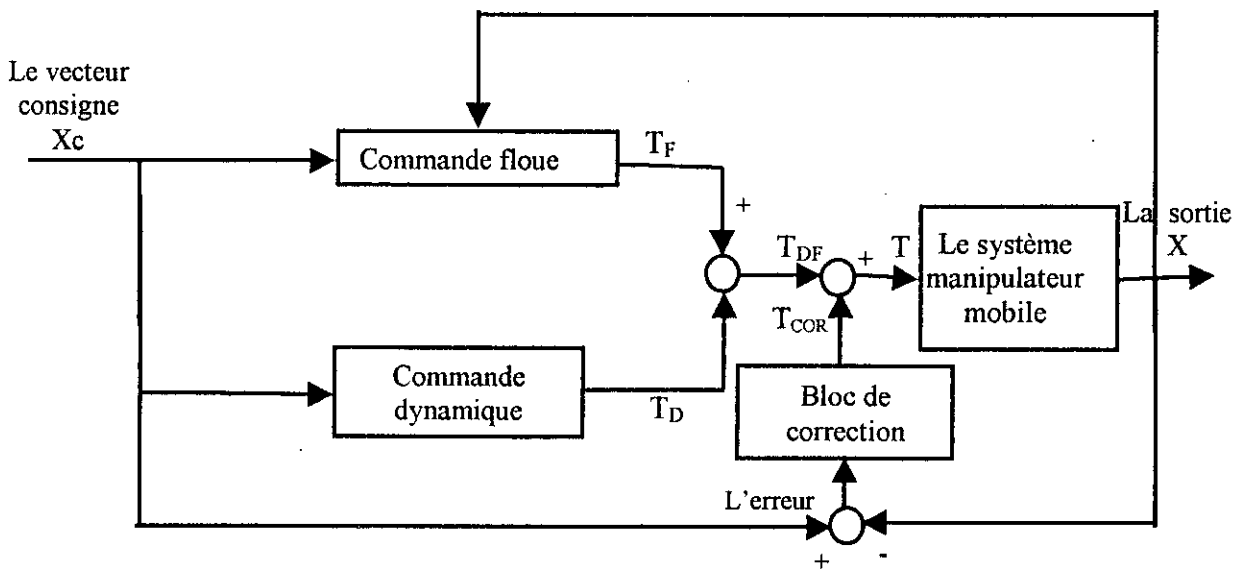


Figure III.21 Schéma de base d'une commande dynamique-floue .

III-4-1 Application de la commande dynamique-floue à un Manipulateur

Mobile:

Le principe de la commande dynamique-floue est donné dans la figure III.21. Dans notre application, le système manipulateur mobile ayant quatre axes. Ceci nécessite quatre commande dynamique-floue décentralisés (figure III.22) explicites comme suit:

$$T_{r1} = (T_{D1} + T_{F1}) + T_{COR1}$$

$$T_{r2} = (T_{D2} + T_{F2}) + T_{COR2}$$

$$T_{r3} = (T_{D3} + T_{F3}) + T_{COR3}$$

$$T_{r4} = (T_{D4} + T_{F4}) + T_{COR4}$$

L'élaboration d'un estimateur flou à nécessité différentes étapes qui peuvent être énoncées comme suit:

□ Définition des variable d'entrées et des sorties d'un estimateur flou

Dans notre application les entrées utilisées pour l'estimateur flou sont les trajectoires de position, vitesse et accélération désirées, en considérant chaque axe comme un sous-système avec deux entrées et une sortie U_i ($i=1, 2, 3, 4$) qui représentent les quatre commandes floues (figure III.22).

Les couples nominaux flous calculés seront ajoutés aux lois de commande dynamique, ensuite on aura les lois de commande totales qui seront appliquées au modèle complet du manipulateur mobile, pour avoir les positions, les vitesses, les accélération réelles du système.

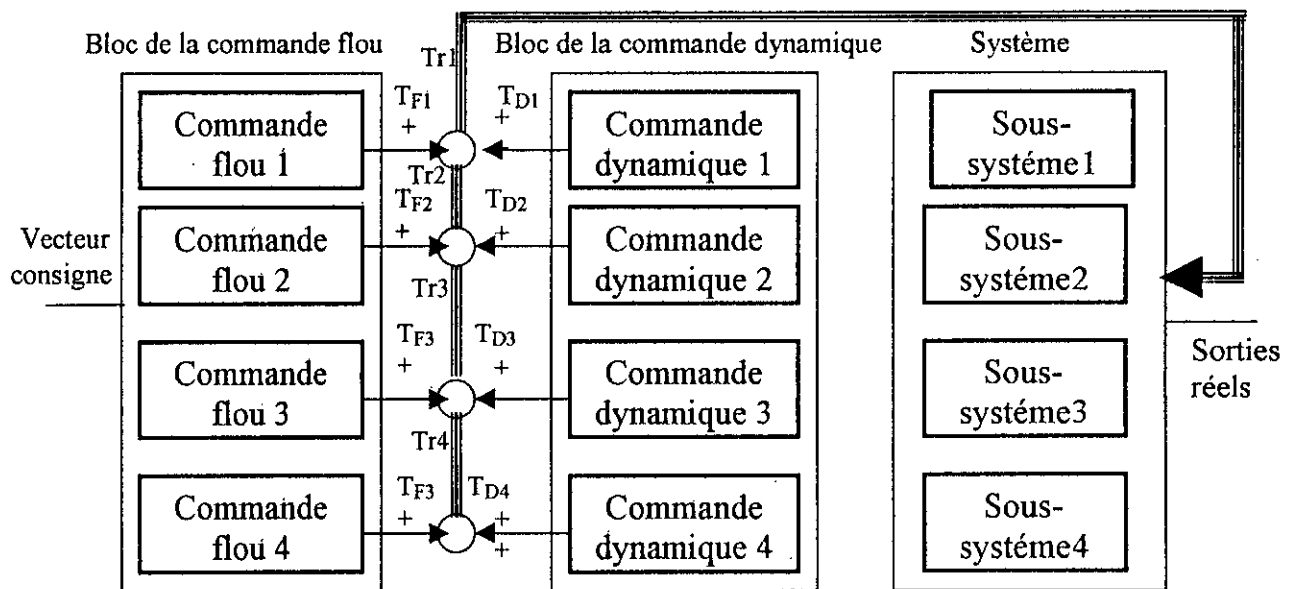


Figure III.22: Diagramme du système commandé

□ Fonctions d'appartenances des entrées et sorties

Pour l'application de modèle floue, nous avons défini les même prédicats et la fonction de calcul d'appariement appliquer dans la commande floue

□ Etablir les règles de fonctionnement du manipulateur mobile:

En se basant sur l'étude de comportement du manipulateur mobile, nous décrivons pour chaque sous-système neuf règles qui décrivent l'état du système. Les règles se présentent comme suit :

Pour la 1^{ère} liaison :

Règle 1: Si xc_1 est NG et xc_2 est NG Alors U_1 est NG.

Règle 2: Si xc_1 est NG et xc_2 est EZ Alors U_1 est EZ.

Règle 3: Si xc_1 est NG et xc_2 est PG Alors U_1 est EZ.

Règle 4: Si xc_1 est PG et xc_2 est NG Alors U_1 est EZ.

Règle 5: Si x_{c1} est PG et x_{c2} est PG Alors U_1 est NG.

Règle 6: Si x_{c1} est PG et x_{c2} est EZ Alors U_1 est NG.

Règle 7: Si x_{c1} est EZ et x_{c2} est EZ Alors U_1 est PG.

Règle 8: Si x_{c1} est EZ et x_{c2} est NG Alors U_1 est EZ.

Règle 9: Si x_{c1} est EZ et x_{c2} est PG Alors U_1 est NG.

Explication de la règle N°5 de la première liaison:

Si la position (x_{c1}) et son accroissement (vitesse, x_{c2}), de la première liaison, ont un pourcentage positif, alors le couple nominale appliqué doit être de valeur négative.

Explication de la règle N°7 de la première liaison:

Si la position (x_{c1}) et son accroissement (vitesse, x_{c2}), de la première liaison, ont une valeur nulle, alors le couple nominale appliqué doit être de valeur positif.

De la même manière que précédemment nous pouvons interpréter toutes les règles associées à la base.

Afin de voir l'influence du nombre de règles sur le contrôleur flou nous avons utilisé une base de règles complète et une autre qui est incomplète [37][38] (figure III.23).

		e_{pi}		
		NG	EZ	PG
e_{pi}	NG	NG	EZ	EZ
	EZ	EZ	PG	NG
	PG	EZ	NG	NG

		e_{pi}		
		NG	EZ	PG
e_{pi}	NG	X	EZ	X
	EZ	EZ	PG	NG
	PG	X	NG	X

figure III.23 : Table des règles d'inférences ; complète et incomplète

Pour le calcul de degrés de vérité nous avons utilisé la même fonction que on a utilisé dans la commande floue.

□ **Défuzzification:**

Pour le calcul de la valeur numérique qui compense l'effet de couplage nous avons utilisé la même fonction de défuzzification utilisé dans la commande floue.

L'organigramme de cette loi de commande est présenté ci-dessous

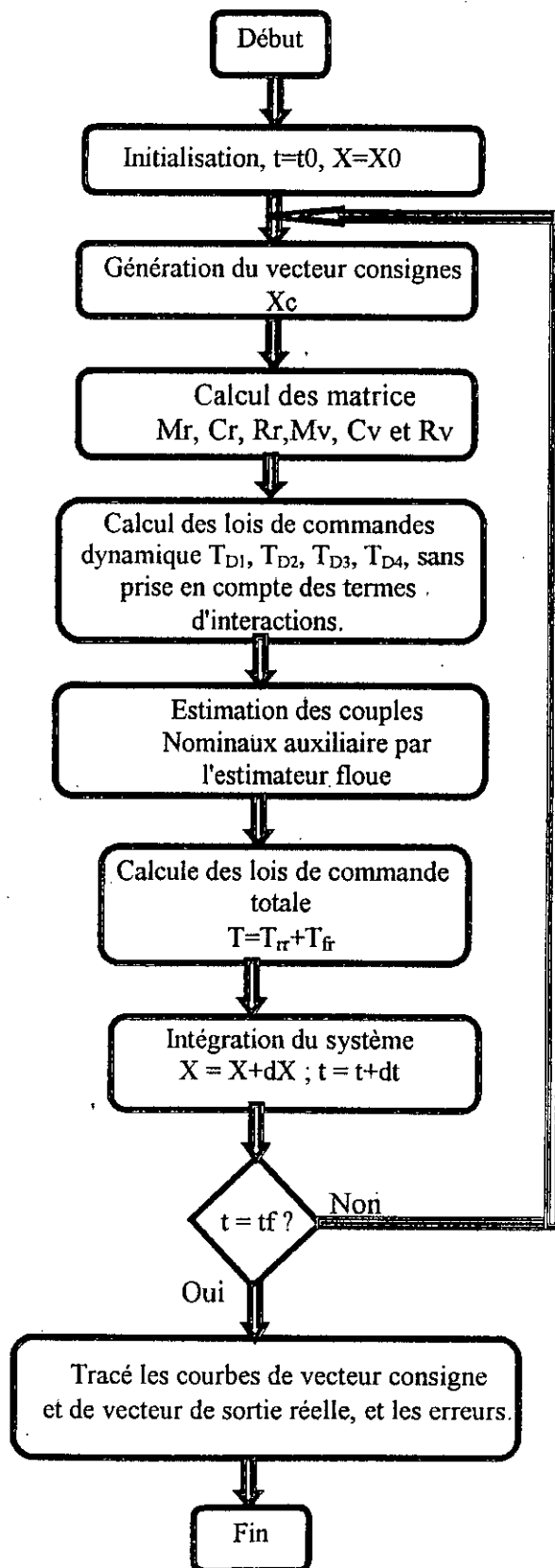


Figure III.24 : Organigramme de la commande dynamique-floue

Dans cette organigramme, nous avons tout d'abord défini l'état initiale du manipulateur mobile. Une fois les consignes que le système devra suivre sont parfaitement définies, il est possible de calculer une loi de commande hybride (dynamique-neuronale) pour le système, capable de contrôler son évolution. A ce niveau, la loi de commande appliquée au manipulateur mobile est composée de deux actions :

- Action dynamique, chargé de compenser partiellement la dynamique du système manipulateur mobile.
- Action floue, chargé de compenser l'effet d'interaction du manipulateur mobile.

La commande calculée dans chaque itération sera appliquée au modèle complet du manipulateur mobile, pour avoir la position, vitesse et accélération réelles du système. A la fin nous avons tracé les courbes des vecteurs de consigne, de sortie réelle et des erreurs.

III-5. Commande dynamique floue optimisé par les algorithmes génétiques [72,73, 74]

L'action floue de la commande proposé dynamique-floue constitue un système, formé par les règles floues.

Les définitions des règles sont affectées par des décisions subjectives, qui ont une grande influence sur la totalité des performances du contrôleur flou.

Afin d'améliorer les performances de la commande dynamique-floue appliquée au système, nous avons choisi d'appliquer les algorithmes génétiques pour le choix de bonnes règles dans les tables d'inférences du contrôleur flou. Dans ce cas ce dernier est optimisé par un algorithme génétique, plus précisément on utilise l'algorithme AGs.

L'élaboration de cette amélioration a nécessité différentes étapes qui peuvent être énoncées comme suit :

III-5-1. Le codage

La représentation binaire des chromosomes est la plus utilisée dans les problèmes d'optimisation par algorithme génétique. Néanmoins dans notre application cette représentation nécessite deux bits pour chaque prédicat ce qui rend la longueur des chromosomes importants, et plus les chromosomes sont longs, plus le temps de traitement sera long. Pour cette raison nous avons opté la représentation par chaîne de caractères.

Le moyen utilisé pour le codage des paramètres de commande au sens des AGs est le suivant :

PL → A EZ → B NL → C

Pour une table d'inférence à neuf règles:

Chromosome i : (PL, PL, EZ, PL, EZ, NL, EZ, NL, NL) $i = 1, 2, 3, 4$.

↔ (AABABCBC)

pour une table d'inférence à cinq règles:

Chromosome i : (PL, PL, EZ, NL, NL) $i = 1, 2, 3, 4$.

↔ (AABCC)

III-5-2. La fonction d'adaptation

L'un des problèmes majeurs dans l'application des AGs est la définition d'une fonction de qualité qui est capable de mesurer les performances de la commande réalisée. Cette fonction doit être la plus indépendante possible de l'application de façon à ne nécessiter qu'un minimum d'informations sur le système à commander.

Notre objectif est d'obtenir une commande en ligne, pour cette raison nous avons choisit dans chaque itération un chromosome qui représente la meilleure solution. La qualité de cette solution est mesurée par l'erreur en position et en vitesse obtenue par le chromosome représentant la table d'inférence.

La fonction d'adaptation (fonction à maximiser) que nous avons retenue pour notre application afin de mesurer la qualité de la commande obtenue par chaque chromosome est :

$$F_i = k * \frac{1}{e_i^2 + ev_i^2} \quad e_i : \text{représente l'erreur de position}$$

$$ev_i : \text{représente l'erreur de vitesse.} \quad i=1, 2, 3, 4$$

III-5-3. La sélection

la méthode de sélection naturelle la plus couramment employée pour l'algorithme génétique est dite "méthode de la roue de loterie" (voire annexe 2). Ainsi, un chromosome considéré comme bon aura une fonction d'adaptation élevée, ainsi qu'un large secteur de la roulette, et par conséquent aura plus de chances d'être sélectionné.

L'algorithme génétique sélectionne chaque individu avec une probabilité de $\frac{f_i}{\sum_n f_i}$

(n étant le nombre de chromosomes de la population).

Pour réaliser la sélection des chromosomes nous avons utilisé le principe de la roue de loterie qui est le suivant :

- Additionner les fonctions d'adaptation de tous les membres de la population (chromosomes) appeler le résultat « qualité total F_T »
- Générer un nombre N aléatoire entre 0 et qualité totale.

- Sommer les fonctions d'adaptation f_i jusqu'à atteindre un nombre supérieur ou égale à N , sélectionner le chromosome i .

III-5-4. La reproduction

Pour passer de l'ancienne à la nouvelle génération, les chromosomes sélectionnés sont combinés par des opérateurs génétiques.

Les opérateurs génétiques utilisés dans notre application pour avoir des descendants à partir de la population courante sont :

- Le croisement uniforme qui a été réalisé avec une probabilité $P_c = 55/60$ [72].
- La mutation avec une probabilité $P_M = 3/60$ [72].

Il n'existe pas de taux universels pour les opérateurs génétiques.

L'algorithme génétique travaille ensuite par générations successives, la commande appliquée sur le manipulateur mobile est obtenue par le contrôleur flou dont la table d'inférence représente le meilleur chromosome de chaque génération.

L'organigramme correspondant à une loi de commande floue optimisée par un algorithme génétique est donné ci-après.

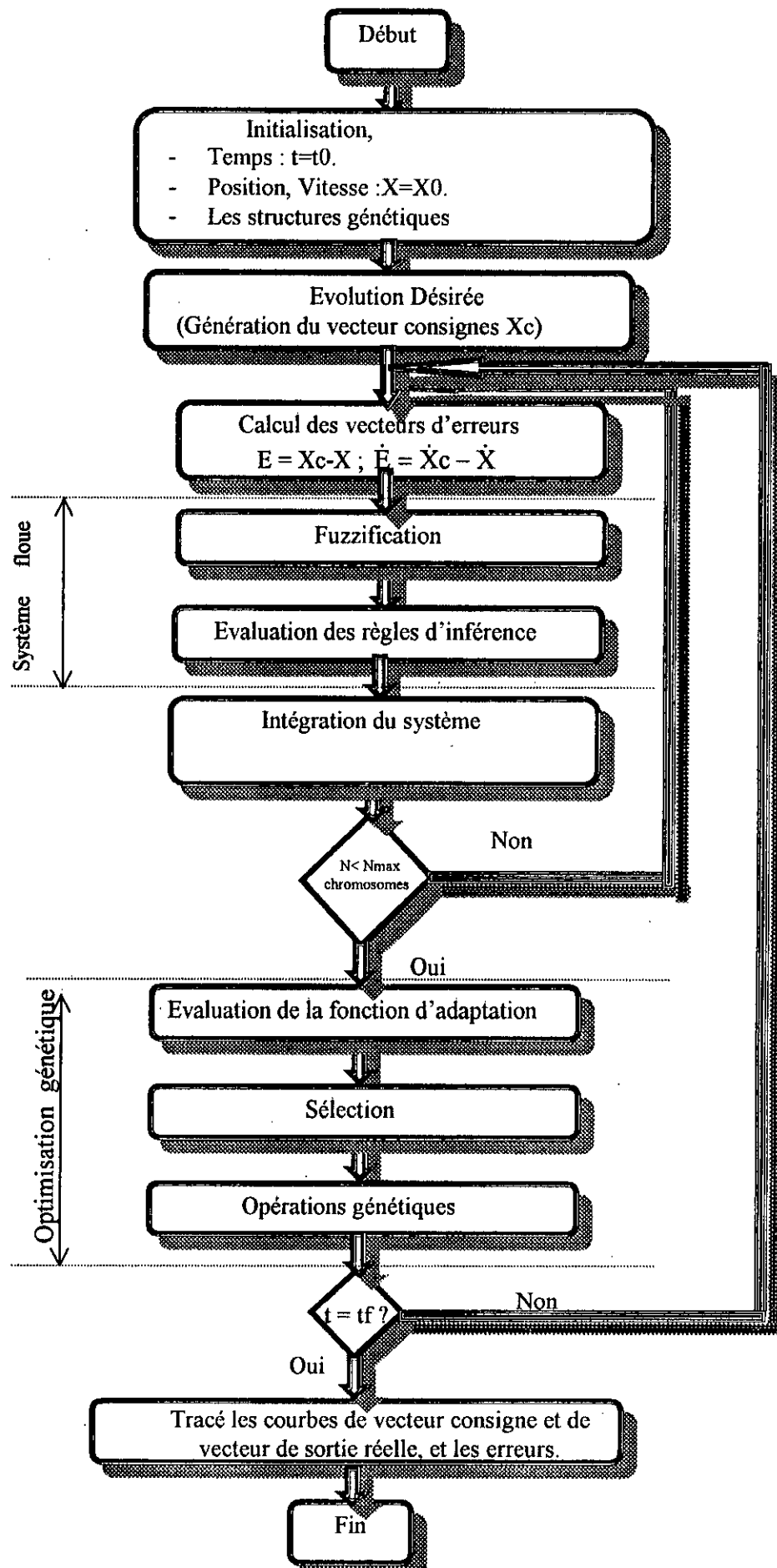


Figure III.25 : Organigramme de la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques

III.5 Commande dynamique-neuronale :

L'approche de commande dynamique neuronale que nous proposons combine les deux techniques de commandes dynamique et neuronale. Cette nouvelle stratégie de commande, utilise un estimateur neuronale non pas pour déterminer les signaux de commande pour le contrôle du système, mais pour générer des couples auxiliaires afin de compenser l'interaction entre les deux sous systèmes mécaniques (le bras manipulateur et la plate forme mobile).

Le concept de notre approche, dont le schéma de principe est montré en figure III.26, est fondé sur l'utilisation conjointe d'un modèle dynamique du manipulateur mobile permettant de calcul d'une commande anticipée par un système de réseaux de neurones. Le bloc de retour permet la compensation des non linéarités non prises en compte par la modélisation dynamique.

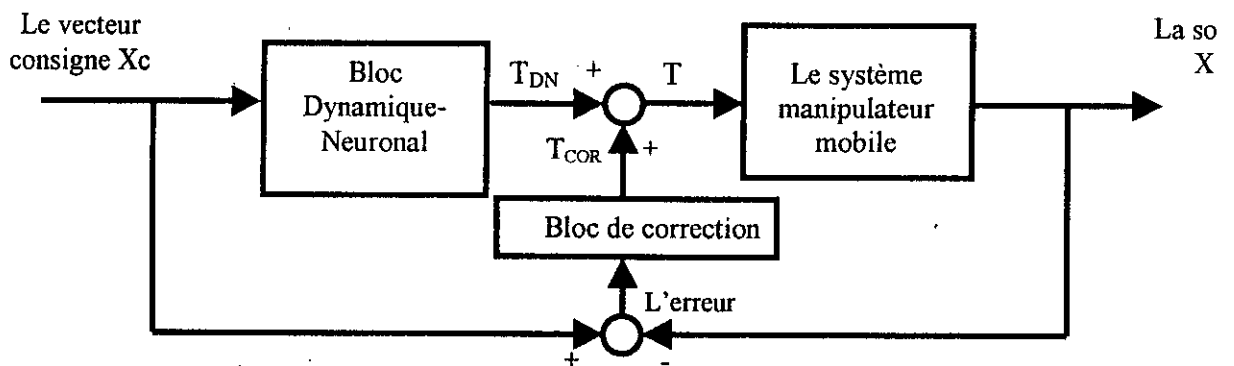


Figure III.26 : Le schéma bloc de la commande Dynamique-Neuronale.

L'action Dynamique a pour objectif de compenser :

- Les variation des efforts d'inertie d'action ,
- Les variation des efforts d'inertie de coriolis,
- Les variation des efforts d'inertie de centrifuge.

L'action Neuronale de la stratégie proposée a pour objectif de compenser :

- Les variation des efforts d'inertie d'interaction,
- Les variation des efforts d'inertie de coriolis d'interaction,
- Les variation des efforts d'inertie de centrifuge d'interaction.

Le rôle de la partie correction est de réduire le taux d'erreur dues aux incertitudes d'estimation des paramètres dynamique du manipulateur mobile.

Le couple de la loi de commande totale est donné par :

$$T = T_{DN} + T_{COR}$$

ou : T_{DN} représente le couple d'anticipation.

T_{COR} représente le couple de correction.

Le couple nominale T_{DN} (Figure III.27) est fourni par la partie dynamique-neuronal en se basant sur le modèle dynamique du manipulateur mobile. Cette partie utilise une décomposition de ce dernier, en couple dynamique partielle et en couple neuronale. Par conséquent le couple nominale sera décrit comme suit :

$$T_{DN} = T_D + T_N \dots\dots\dots IV.1$$

ou : T_D est le vecteur des couples dynamique sans prise en compte des termes d'interaction.

T_N est le vecteur des couples neuronales, correspondant aux termes de couplage.

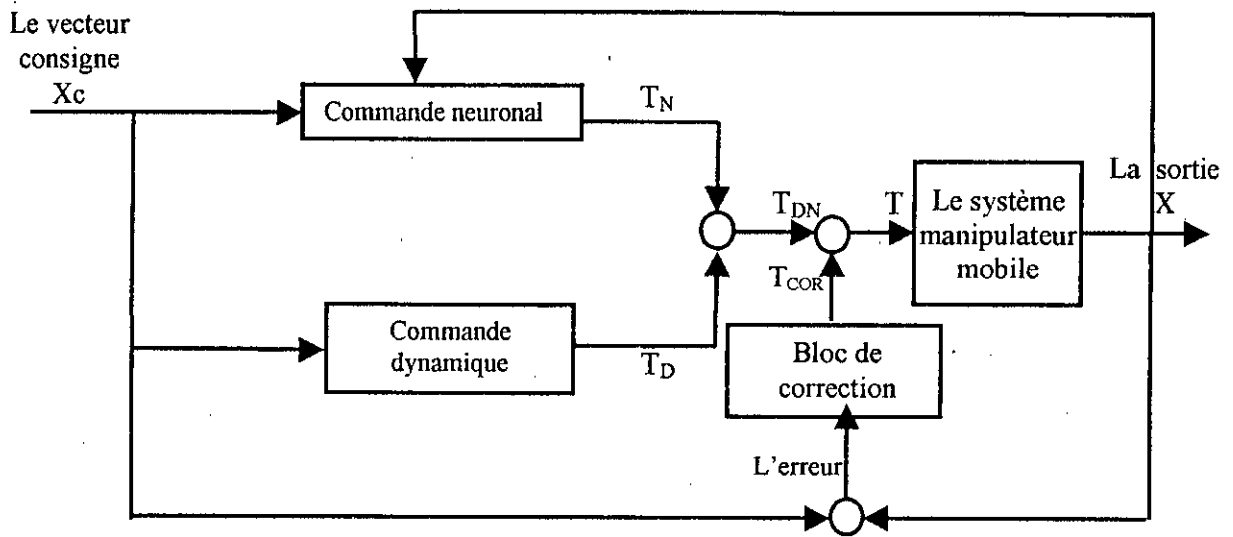


Figure III.27 : Schéma de base d'une commande dynamique-neuronal .

III.5.1 Structure et principe d'un estimateur neuronal:

On rappelle que notre deuxième approche est de générer un signal T_N en utilisant un réseau de neurones non récurrent multicouches d'anticipation "feedforward". Ce type de réseaux est en général constitué d'une ou plusieurs couches cachées entre les couches d'entrée et de sortie. Chaque couche est constituée d'unités de calcul appelées nœuds (neurones connectées les uns aux autres dans la structure de réseau multicouche. La fonctionnalité du réseau est déterminée en spécifiant les degrés de connexion des chemins appelés poids, et le paramètre seuil de chaque neurone.

III.5.2 Application de la commande dynamique-neuronale à un Robot Manipulateur Mobile:

Le principe de la commande dynamique-neuronale est donné dans la figure III.27. le couple neuronale est fourni par un réseau de neurone multicouche ayant un seule couche cachée. Pendant l'étape d'apprentissage du réseau, nous avons choisi au début un seul réseau pour toutes les couples de commande neuronale. Le réseau avait pour entrées les trajectoires de position, vitesse et accélération désirées ainsi que les trajectoire réelle, des deux liaison du

bras manipulateur, et des deux roues de la plate forme mobile, et l'estimée des couples nominales neuronales de compensation.

A l'étape de généralisation nous avons constaté que l'erreur d'entraînement était assez importante. Afin de surmonter ce problème nous avons considéré des réseaux de neurones indépendants pour chaque liaison, et pour chaque roue, d'où on a quatre estimateurs neuronales (Figure III.28). Ceci nécessite quatre contrôleurs Dynamique-Neuronale décentralisés explicités comme suite :

$$T_{r1} = (T_{D1} + T_{N1}) + T_{COR1}$$

$$T_{r2} = (T_{D2} + T_{N2}) + T_{COR2}$$

$$T_{r3} = (T_{D3} + T_{N3}) + T_{COR3}$$

$$T_{r4} = (T_{D4} + T_{N4}) + T_{COR4}$$

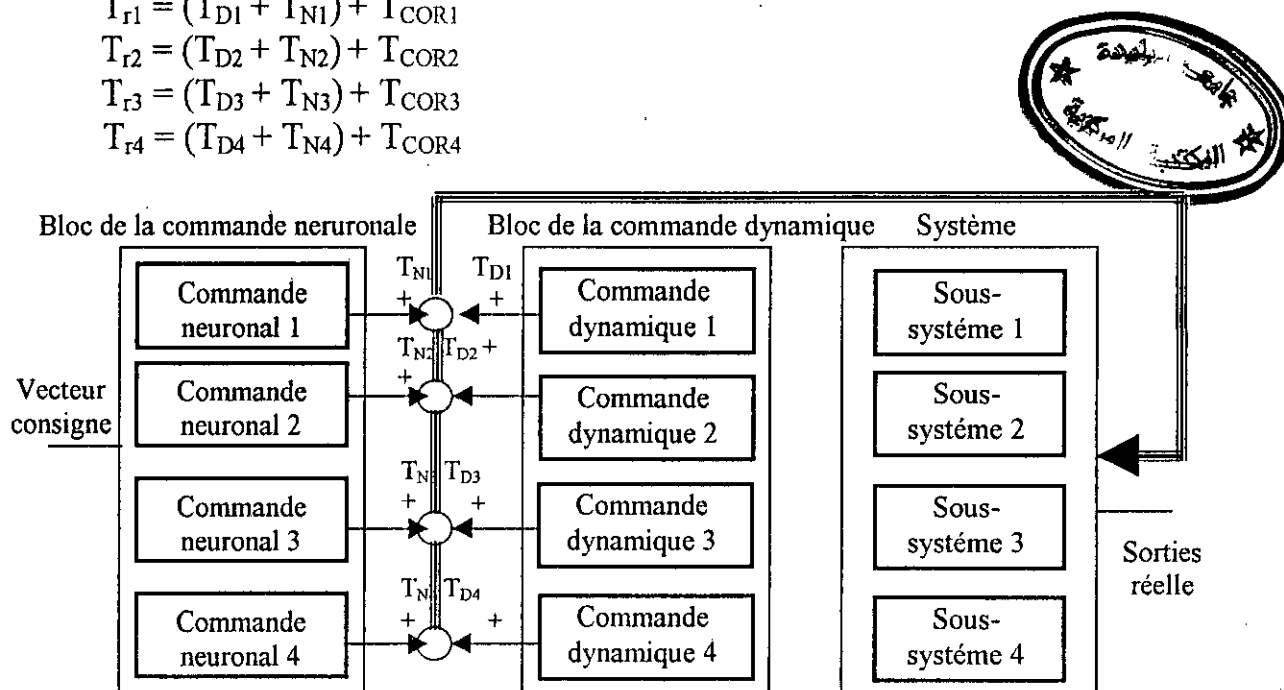


Figure III.28: Diagramme du système commandé

Le réseau de neurone montré dans la figure (III.29) suivant est utilisé comme un réseau de neurones compensateur, il est composé de trois couches :

- La première couche d'entrée a pour entrées les entrées les trajectoires de position, vitesse et accélération désirées ainsi que les trajectoires réelles du manipulateur mobile.
- La seconde couche non linéaire est cachée ayant une fonction d'activation, donnée par la fonction sigmoïde de la forme : $f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$, dont le nombre de cellules sera déterminé pratiquement.
- La troisième couche de sortie est linéaire ayant une fonction d'activation linéaire, dont le nombre de cellules sera fixé au nombre des sorties.

Le schéma de figure (III.24) représente le réseau de neurone compensateur :

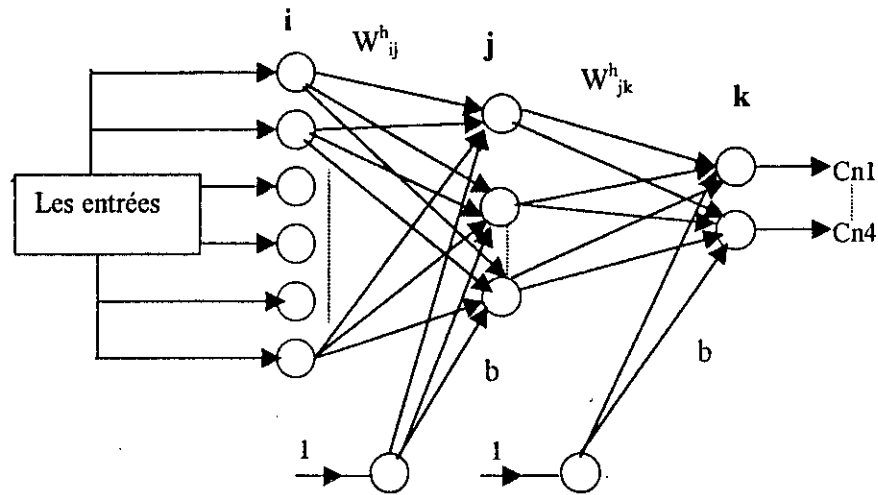


Figure III.29 : Réseau de neurones compensateur

ou :

h_n : nombre de neurones cachés.

W_{ij}^h : poids de la couche cachée.

W_{jk}^s : poids de la couche de sortie.

b : poids partiel les neurones caché.

Dans ce cas, l'algorithme de la rétropropagation est utilisé tel que :

$$\text{à l'entrée de chaque couche : } Net_j = \sum_{i=1}^n q_i \times W_{ij}^h + b_{ij}$$

$$\text{à la sortie de chaque couche cachée : } S_j = F(Net_j) = \frac{1}{1 + \exp(-Net_j)}$$

$$\text{à la sortie du réseau de neurone : } C_n = \sum_{j=1}^{nh} S_j \times W_{jk}^s + b_{2k}$$

$$J(t) = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^{n_t} (y_{d_i}(t) - y_{e_i}(t))^2$$

En différenciant l'erreur quadratique J , de la sortie vers l'entrée on obtient une adaptation des poids et des seuls partiel :

Pour la couche de sortie :

$$W_{jk}^h(t+1) = W_{jk}^h(t) + \eta_w * \delta_{jk}^h$$

$$b_{2k}(t+1) = b_{2k}(t) + \eta_b * \delta_{jk}^h$$

ou : δ_{jk}^h , l'erreur de couche de sortie.

Pour la couche cachée :

$$W_{ij}^h(t+1) = W_{ij}^h(t) + \eta_w * \delta_{ij}^h$$

$$b_{1j}(t+1) = b_{1j}(t) + \eta_b * \delta_{ij}^h$$

ou : δ_{ij}^h , l'erreur de la couche cachée.

L'organigramme de cette loi de commande est présenté ci-dessous

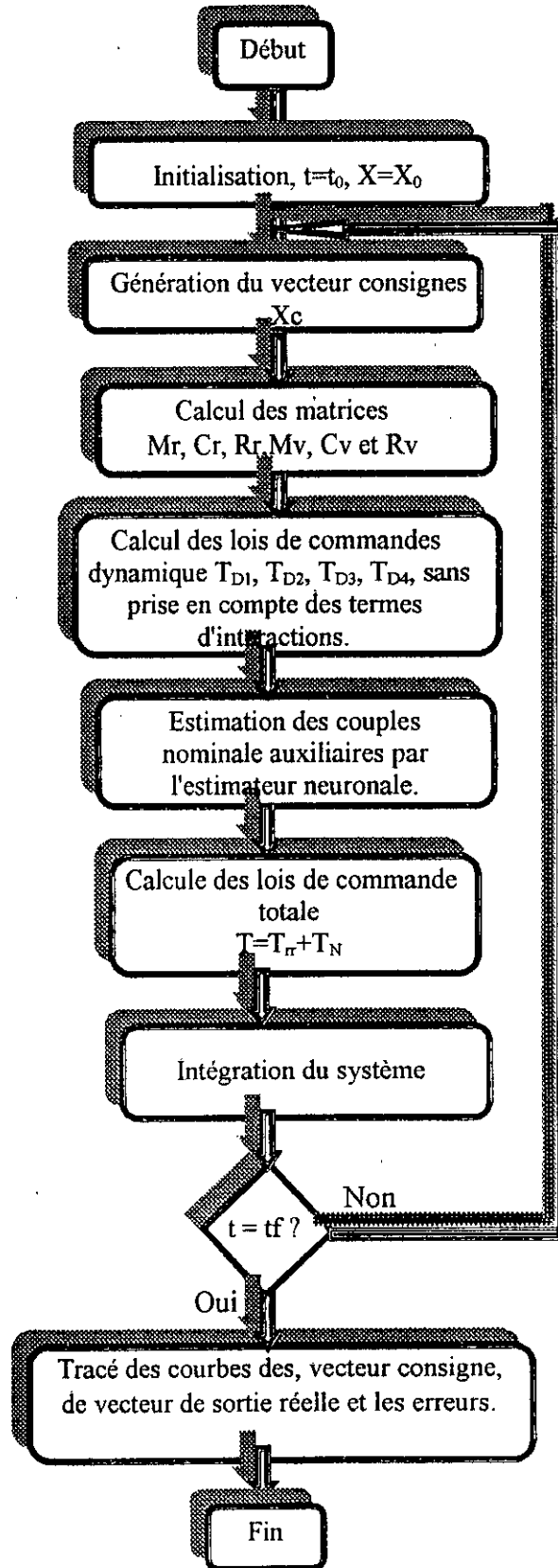
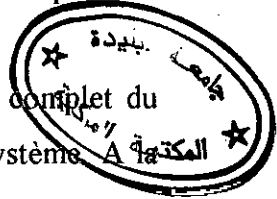


Figure III.30 : Organigramme de la commande dynamique-neuronale proposé, appliquée au manipulateur mobile

Dans cette organigramme, nous avons tout d'abord défini l'état initiale du manipulateur mobile. Une fois les consignes que le système devra suivre sont parfaitement définies, il est possible de calculer une loi de commande hybride (dynamique-neuronale) pour le système, capable de contrôler son évolution. A ce niveau, la loi de commande appliquée au manipulateur mobile est composée de deux actions :

- Action dynamique, chargée de compenser partiellement la dynamique du système manipulateur mobile.
- Action neuronale, chargée de compenser l'effet d'interaction du manipulateur mobile.

La commande calculée dans chaque itération sera appliquée au modèle complet du manipulateur mobile, pour avoir la position, vitesse et accélération réelles du système. En fin nous avons tracé les courbes des vecteurs, de consigne, de sortie réelle et des erreurs.



III.6 Conclusion

Afin de dégager une loi de commande capable de maintenir les performances du système manipulateur mobile même dans les conditions les plus défavorables, nous avons été amenés à expliciter les trois familles de commande et leurs applications sur un manipulateur mobile constitué d'un bras manipulateur de deux degrés de liberté et d'une plate-forme mobile à roues. Cette étude a permis de mettre en évidence trois classes de commande :

- Classe une (commande dynamique) : basée sur le modèle dynamique du système manipulateur mobile.
- Classe deux (commande floue, commande neuronal) : Elle émerge comme un modèle intelligent, capable d'être utilisé sur des systèmes complexes (manipulateur mobile) et ses paramètres sont mal définis.
- Classe trois (hybride : commande dynamique-neuronale, commande dynamique-floue, commande dynamique-floue optimisée par les algorithmes génétiques) : basées sur une approche coopérative, qui mérite plus d'attention car elle permet de combler les lacunes d'un contrôleur de première classe et de deuxième classe et permet de représenter la compensation de l'effet d'interaction du système manipulateur mobile.

La simulation de manipulateurs mobiles considérés en appliquant les lois de commande étudiées, susmentionnées pour les tâches de suivi de trajectoires fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

VALIDATION EN SIMULATION

Nous décrivons dans le présent chapitre les résultats de l'application en simulation des lois de commande proposées au chapitre précédent, dans le cas d'un robot mobile-manipulateur composé d'un manipulateur de deux degrés de liberté et d'une plate forme mobile mue par deux roues motrices.

IV.1 Cadre de la simulation

La réalisation d'une tâche de suivi de trajectoire pour un manipulateur mobile, appliquant les lois de commandes proposées au chapitre précédent s'effectuent en plusieurs étapes qui peuvent être enchaînées selon l'organigramme de la figure (IV.1).

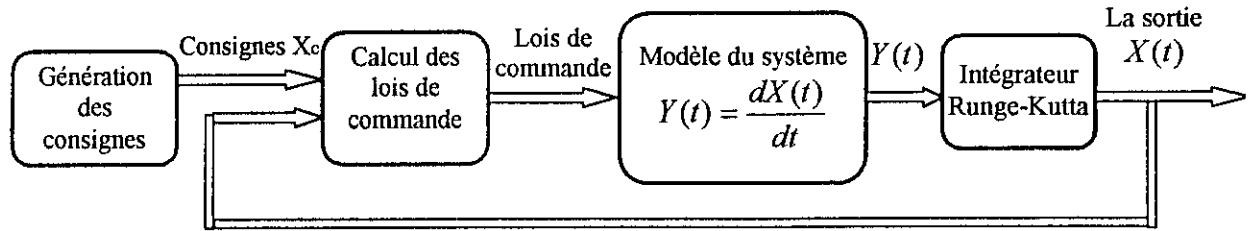


Figure IV.1 : Schéma général de la simulation.

Les modèles dynamiques des structures mécaniques considérées sont des systèmes d'équations différentielles de seconde ordre non linéaires et couplées. Pour la simulation, on doit passer de l'utilisation des variables lagrangiennes à l'utilisation des variables d'états pour avoir des équations différentielles de premier ordre de la forme :

$$Y(t) = \frac{dX(t)}{dt} = f(t, X) \text{ avec les conditions initiales : } X(t_0) = X_0 ;$$

Le modèle dynamique du manipulateur mobile est un système à douze équations, son vecteur d'état $X(t)$ est défini comme suit :

$$X(t) = [q_{r1} \quad \dot{q}_{r1} \quad q_{r2} \quad \dot{q}_{r2} \quad x_0 \quad \dot{x}_0 \quad y_0 \quad \dot{y}_0 \quad \theta_r \quad \dot{\theta}_r \quad \theta_l \quad \dot{\theta}_l] ;$$

d'ou le vecteur $Y(t)$, $Y(t) = [\dot{q}_{r1} \quad \ddot{q}_{r1} \quad \dot{q}_{r2} \quad \ddot{q}_{r2} \quad \dot{x}_0 \quad \ddot{x}_0 \quad \dot{y}_0 \quad \ddot{y}_0 \quad \dot{\theta}_r \quad \ddot{\theta}_r \quad \dot{\theta}_l \quad \ddot{\theta}_l] ;$

Les équations à intégrer reliant ces deux vecteurs sont les suivantes :

$$Y(1) = \dot{\theta}_1 = X(2) ;$$

$$Y(2) = \ddot{\theta}_1 = (T_{r1} - M_r^{1,2} \ddot{\theta}_2 - C_{r1}^1 - C_{r2}^1 - R_r^{1,1} \ddot{x}_0 - R_r^{1,2} \ddot{y}_0 - R_r^{1,3} \ddot{\theta}_r - R_r^{1,4} \ddot{\theta}_l) / M_r^{1,1} ;$$

$$Y(3) = \dot{\theta}_2 = X(4) ;$$

$$Y(4) = \ddot{\theta}_2 = (T_{r2} - M_r^{2,1} \ddot{\theta}_1 - C_{r1}^2 - C_{r2}^2 - R_r^{2,1} \ddot{x}_0 - R_r^{2,2} \ddot{y}_0 - R_r^{2,3} \ddot{\theta}_r - R_r^{2,4} \ddot{\theta}_l) / M_r^{2,2} ;$$

$$Y(5) = \dot{x}_0 = X(6) ;$$

$$Y(6) = \ddot{x}_0 = (-M_{v1}^{1,2} \ddot{y}_0 - M_{v1}^{1,3} \ddot{\theta}_r - M_{v1}^{1,4} \ddot{\theta}_l - C_{v1}^1 - C_{v2}^1 + \sin \phi \lambda_1 + \cos \phi \lambda_2 - M_{v2}^{1,2} \ddot{y}_0 - M_{v2}^{1,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{1,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{1,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{1,2} \ddot{\theta}_2) / (M_{v1}^{1,1} + M_{v2}^{1,1}) ;$$

$$Y(7) = \dot{y}_0 = X(8) ;$$

$$Y(8) = \ddot{y}_0 = (-M_{v1}^{2,1} \ddot{x}_0 - M_{v1}^{2,3} \ddot{\theta}_r - M_{v1}^{2,4} \ddot{\theta}_l - C_{v1}^2 - C_{v2}^2 - \cos \phi \lambda_1 + \sin \phi \lambda_2 - M_{v2}^{2,1} \ddot{x}_0 - M_{v2}^{2,3} \ddot{\theta}_r - M_{v2}^{2,4} \ddot{\theta}_l - R_v^{2,1} \ddot{\theta}_1 - R_v^{2,2} \ddot{\theta}_2) / (M_{v1}^{2,2} + M_{v2}^{2,2}) ;$$

$$Y(9) = \dot{\theta}_r = X(10) ;$$

$$Y(10) = \ddot{\theta}_r = (T_{v1} - M_{v1}^{3,1}\ddot{x}_0 - M_{v1}^{3,2}\ddot{y}_0 - M_{v1}^{3,4}\ddot{\theta}_l - C_{v1}^3 - C_{v2}^3 - cb\lambda_2 - M_{v2}^{3,1}\ddot{x}_0 - M_{v2}^{3,2}\ddot{y}_0 - M_{v2}^{3,4}\ddot{\theta}_l - R_v^{3,1}\ddot{\theta}_1 - R_v^{3,2}\ddot{\theta}_2) / (M_{v1}^{3,3} + M_{v2}^{3,3}) ;$$

$$Y(11) = \dot{\theta}_l = X(12) ;$$

$$Y(12) = \ddot{\theta}_l = (T_{v2} - M_{v1}^{4,1}\ddot{x}_0 - M_{v1}^{4,2}\ddot{y}_0 - M_{v1}^{4,3}\ddot{\theta}_r - C_{v1}^4 - C_{v2}^4 - cb\lambda_2 - M_{v2}^{4,1}\ddot{x}_0 - M_{v2}^{4,2}\ddot{y}_0 - M_{v2}^{4,3}\ddot{\theta}_r - R_v^{4,1}\ddot{\theta}_1 - R_v^{4,2}\ddot{\theta}_2) / (M_{v1}^{4,4} + M_{v2}^{4,4}) ;$$

les équation différentielle sont intégrées à l'aide de l'algorithme de Runge-Kutta d'ordre quatre. Cet algorithme est basé sur le développement de la série de Taylor qui est de la forme :

$$x(n+1) = x(n) + hx'(n) + h^2 x''(n) + \dots + h^n x^{(n)}(n) \quad (x^{(n)}(n) \text{ est la dérivée } n^{i\grave{e}me} \text{ de } x(n))$$

où : $x(n) = x(t_n)$ et $t_{n+1} = t_n + h$; h est le pas d'intégration.

Dans l'algorithme de Runge-Kutta, l'expression de $x(n+1)$ est remplacée par l'approximation :

$$x(n+1) = x(n) + (1/6)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

avec : $k_1 = h.f(t_n, x(n)) ;$

$$k_2 = h.f(t_n + \frac{1}{2}h, x(n) + \frac{1}{2}k_1) ;$$

$$k_3 = h.f(t_n + \frac{1}{2}h, x(n) + \frac{1}{2}k_2) ;$$

$$k_4 = h.f(t_n + h, x(n) + k_3) ;$$

$x(1), x(2), \dots, x(n), x(n+1)$ sont calculés pas à pas (le pas est h).

IV.2 Condition de simulation

Pour toute les simulations présentées dans cette section nous nous somme mis sous les conditions suivantes :

1. Les caractéristiques physiques du système manipulateur mobile sont fixées selon valeurs portées dans ce tableau ci-dessous.

Paramètres	Valeurs	Unités
b	0.171	mètres
r	0.075	mètres
m_c	94.0	Kg
m_w	5.0	Kg
I_c	6.609	Kg.m ²
I_w	0.010	Kg.m ²
I_m	0.135	Kg.m ²

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la plate-forme.

Paramètres	Longueur de la liaison [m]	Masse de la liaison [Kg]	Centre de masse de la liaison [m]	Moment d'inertie [Kg.m ²]
N° de la liaison				
1	0.4	4.0	0.2	0.0533
2	0.4	4.0	0.2	0.0533

Tableau IV.2 : Caractéristiques du bras manipulateur.

2. Le comportement du manipulateur mobile vis à vis des variations des vitesses d'évolution et des variations de ses caractéristiques inertielles est étudié. Pour ce faire, on imposera au manipulateur mobile deux types de mouvement, le premier est relativement lent exprimé par les consignes suivantes :

- Pour les deux liaisons du manipulateur mobile $x_{c1}(t) = x_{c3}(t) = \sin(5t + 0.1)$;
- Pour les deux roues (gauche et droite) du manipulateur mobile

$$x_{c5}(t) = x_{c7}(t) = 2 + 6t^2 - 2t^3 ;$$

$$x_{c9}(t) = x_{c11}(t) = \sin(8t) ;$$

Le deuxième mouvement est plus rapide exprimé par les consignes suivante :

- Pour les deux liaisons du manipulateur mobile $x_{c1}(t) = x_{c3}(t) = \sin(10t + 0.1)$;
- Pour les deux roues (gauche et droite) du manipulateur mobile

$$x_{c5}(t) = x_{c7}(t) = 5 + 15t^2 - 5t^3 ;$$

$$x_{c9}(t) = x_{c11}(t) = \sin(11t) ;$$

(c: désigne la consigne)

La troisième situation consiste à provoquer une perturbation inertielle pendant que le manipulateur mobile est soumis aux mouvements rapides. Cette perturbation inertielle consiste à faire augmenter linéairement la masse du dernier corps du bras manipulateur de sa valeur initiale (égale à 4kg) à une valeur de 10kg pendant la durée du mouvement ; ce cas la représente les conditions les plus défavorables.

Cette étude est effectuée pour les trois classes de commandes :

IV.3 Commande dynamique

la commande dynamique est appliquée au manipulateur mobile pour les trois situations décrites ci-dessus. Les lois de cette commande sont celles décrites au chapitre III.

Les courbes représentant l'évolution des sorties du manipulateur mobile ainsi que les erreurs absolues sur ces sorties sont présentées aux figures IV.2 à IV.19



Interprétations :

On distingue deux cas, dans le premier cas, toute la dynamique du système mécanique est incluse dans le contrôleur dynamique ; dans le deuxième cas, les termes de couplage dynamique entre le bras manipulateur et la plate-forme mobile ne sont pas pris en compte dans le calcul des lois de commande. Les figures (IV.2 à IV.19) présentent les résultats obtenus pour ces deux cas.

Les figures (IV.8 et IV.12) montrent que le système arrive à poursuivre les consignes imposées avec de bonnes précisions lorsque toute la dynamique du système est compensée. Lorsque les termes de couplage dynamique entre le bras et la plate-forme ne sont pas compensés, les résultats obtenus sont médiocres (voir figure IV.2, IV.7) ; les sorties du manipulateur échouent complètement à poursuivre les consignes ; les résultats concernant les sorties de la plate-forme sont beaucoup moins précis que ceux du premier cas comme c'est montré au tableau IV.3 qui comporte des résultats comparatifs entre les erreurs absolues commises sur chacune des variables d'état du système pour ces deux cas, lorsque le système soumis a deux types de mouvements (mouvement lent puis mouvement rapide) .

Lorsqu'une perturbation inertielle est imposée au système pendant qu'il évolue à grande vitesses (le cas le plus défavorable), on remarque que ce dernier garde presque les mêmes performances (figure IV.12) si tous les termes de couplage dynamique sont compensés. Par contre dans le cas contraire, les résultats obtenus sont médiocres (figure IV.6) ; les performances du système sont complètement dégradées. Le tableau IV.4 comporte des résultats comparatifs entre les erreurs absolues commises sur chacune des variables d'état du système pour ces deux cas.

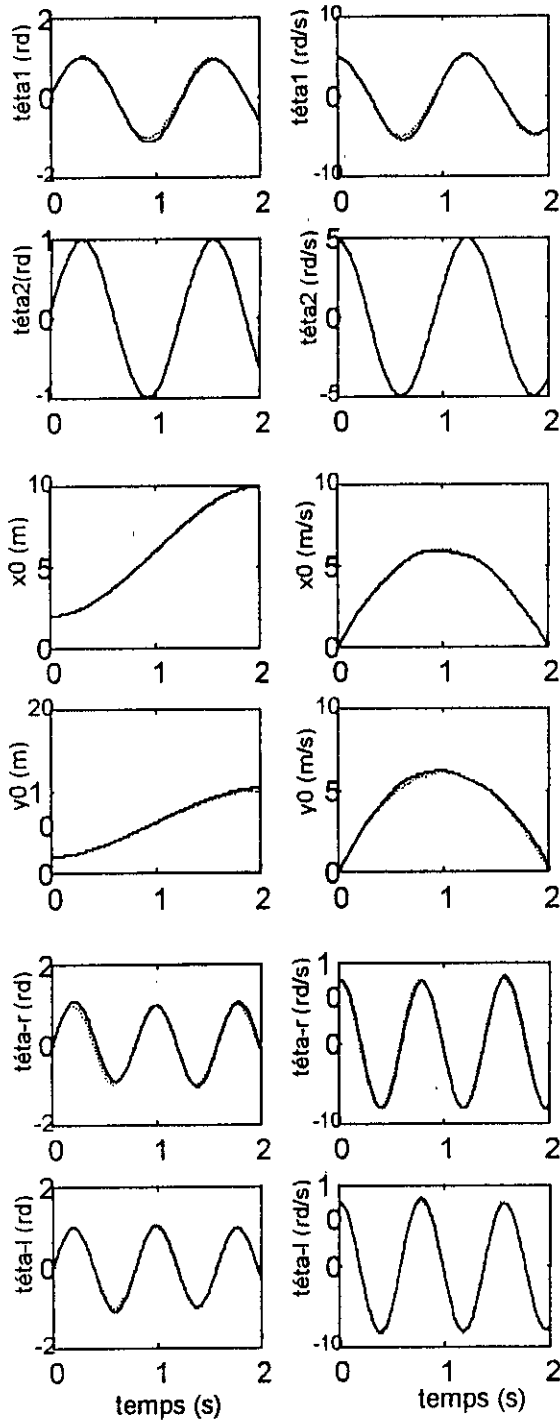


Figure IV2: Evolution des sorties du système lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse faible.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

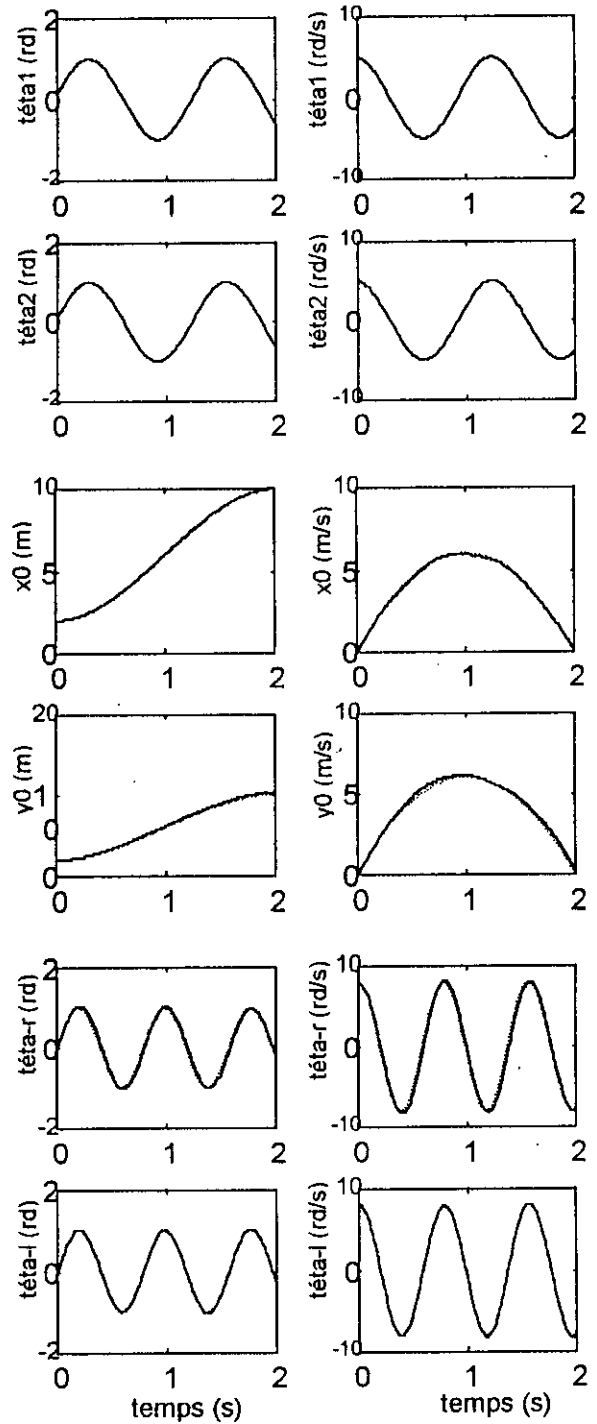


Figure IV.8 : Evolution des sorties du système lorsque les termes de couplage sont compensés. Dans le cas d'une vitesse faible.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

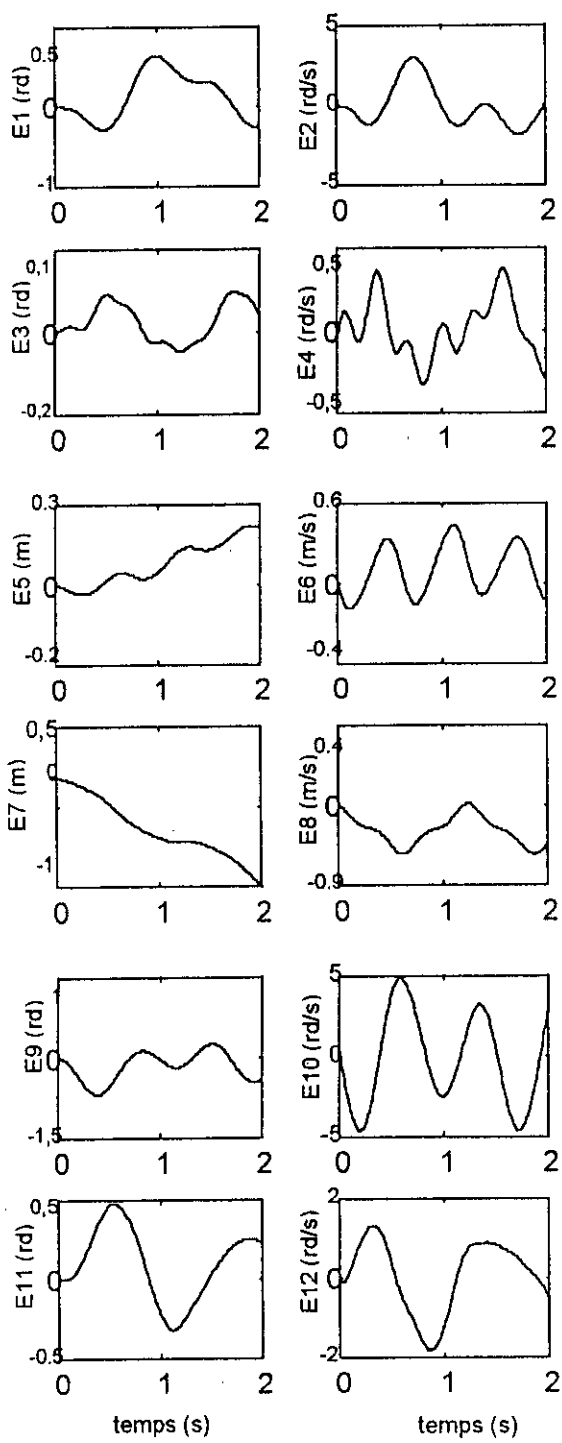


Figure IV.3: les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse faible.

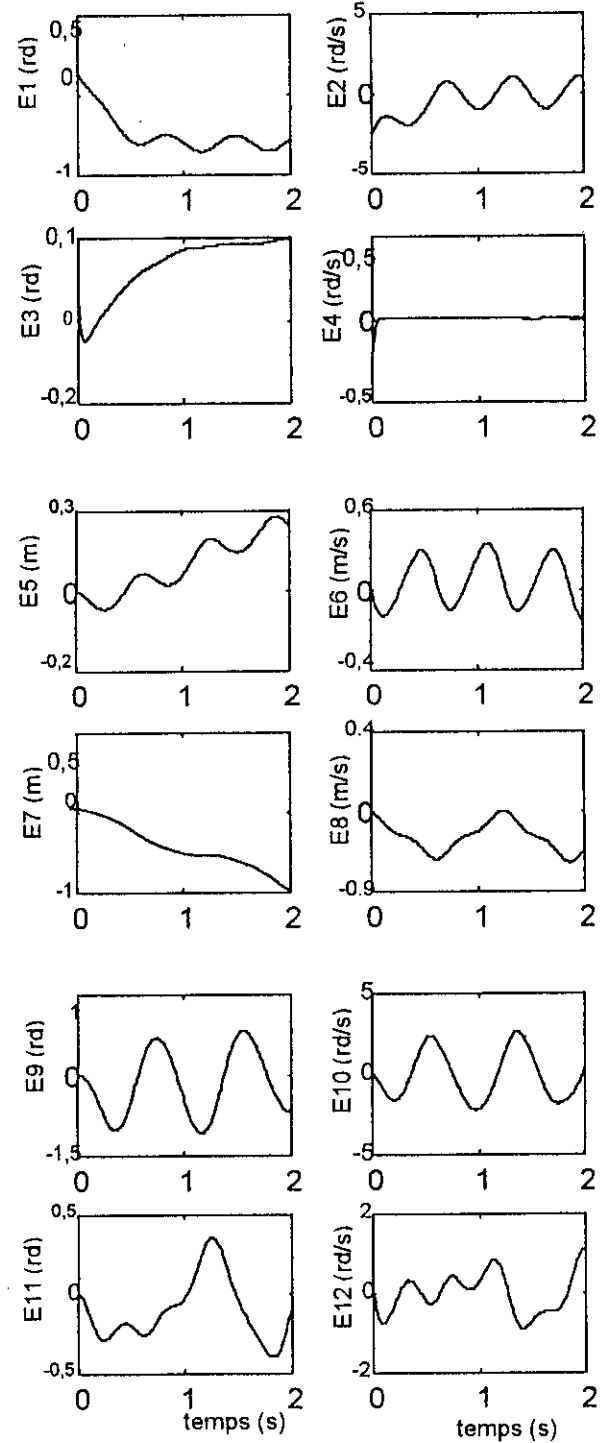


Figure IV.9 : les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque Les termes de couplage sont compensés Dans le cas d'une vitesse faible.

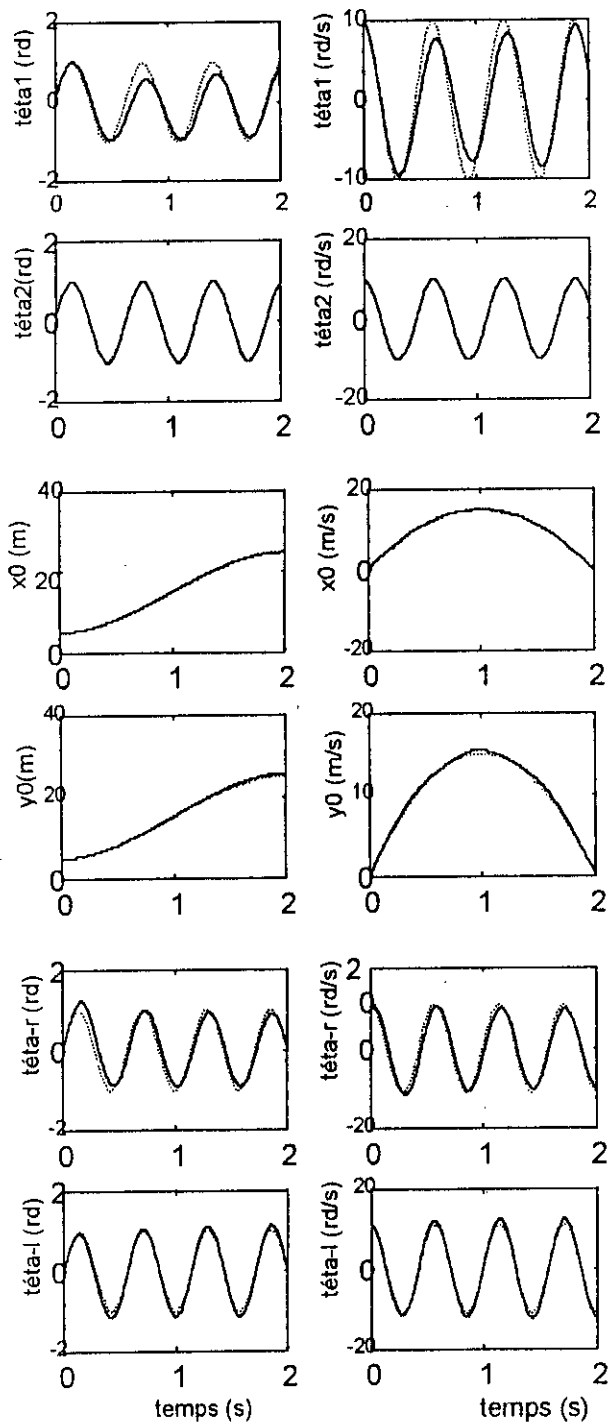


Figure IV.4: Evolution des sorties du système lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

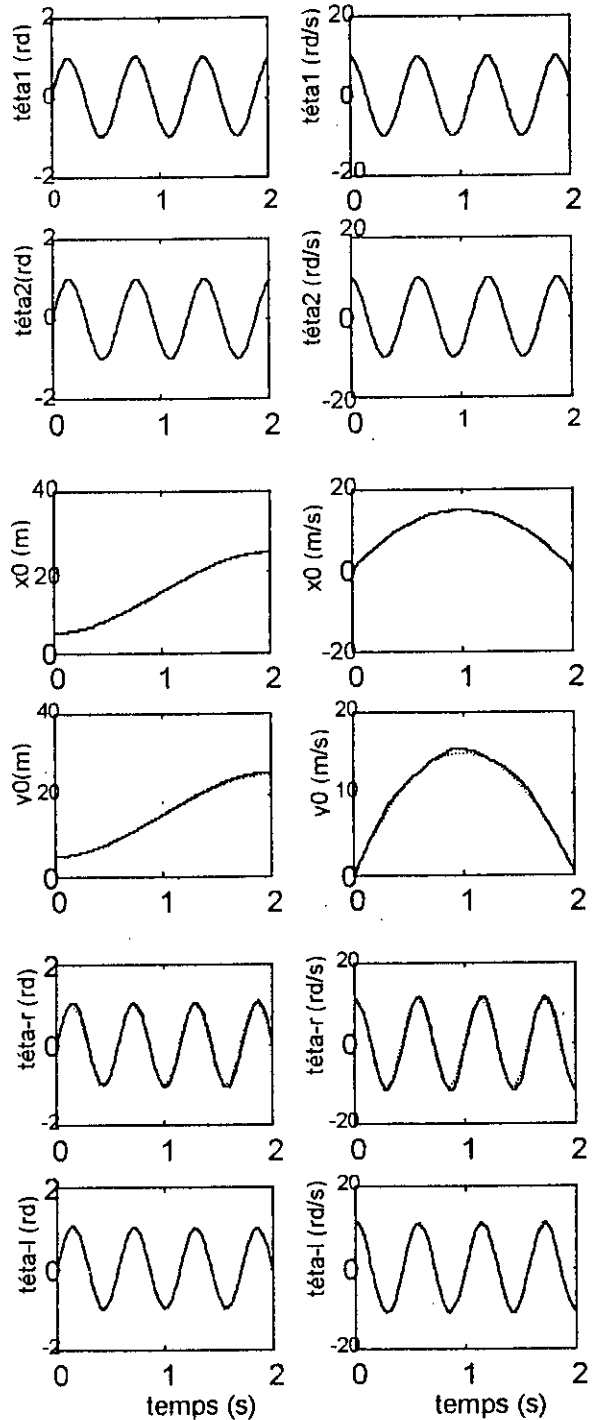


Figure IV.10: Evolution des sorties du système lorsque Les termes de couplage sont compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

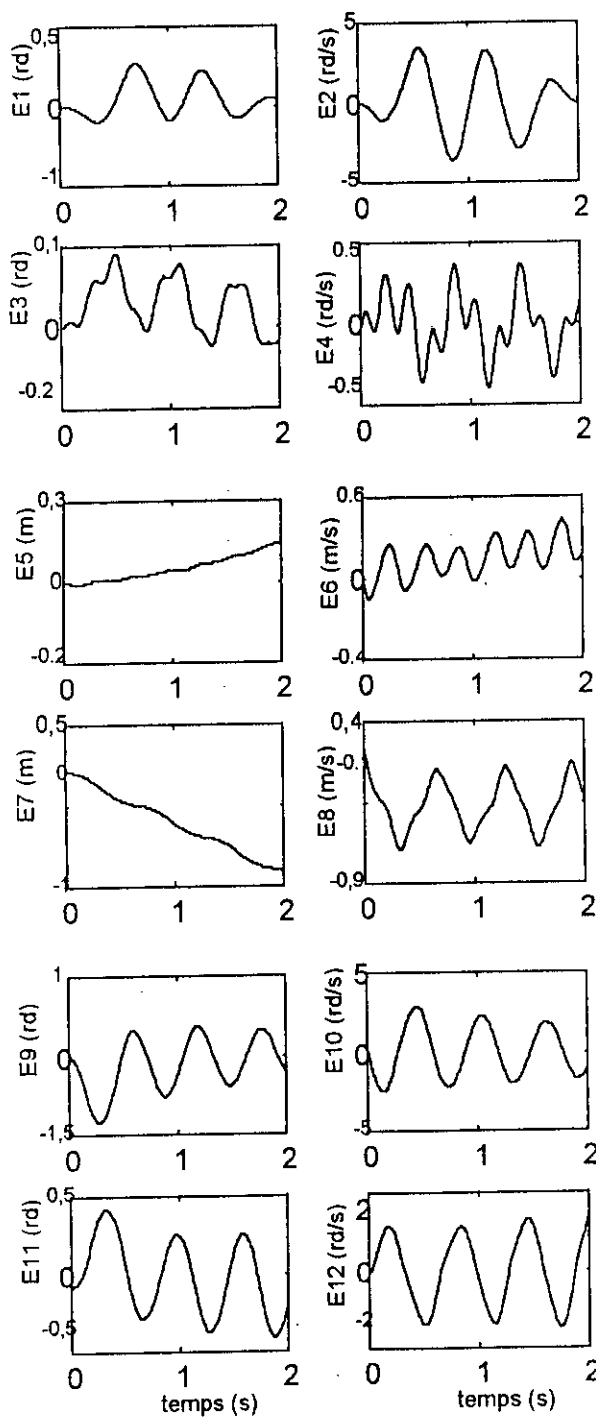


Figure IV.11: les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée.

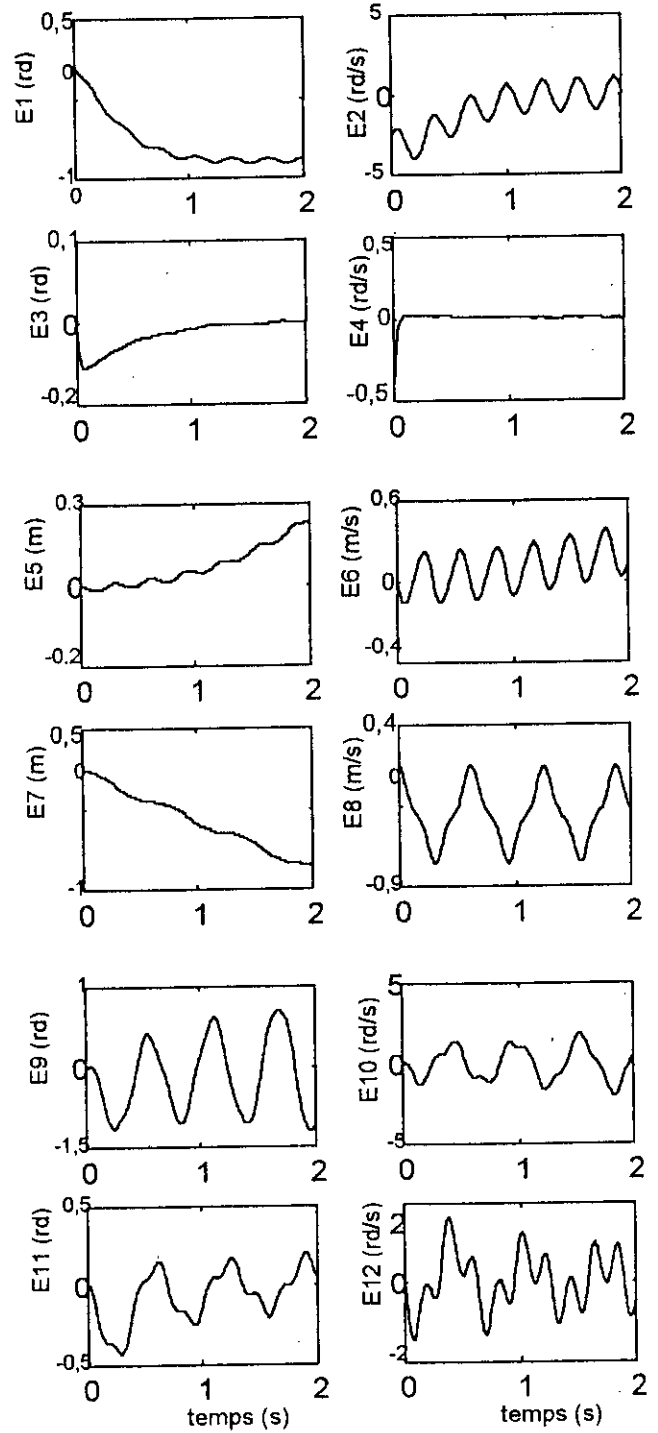


Figure IV.5 : les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque Les termes de couplage sont compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée.

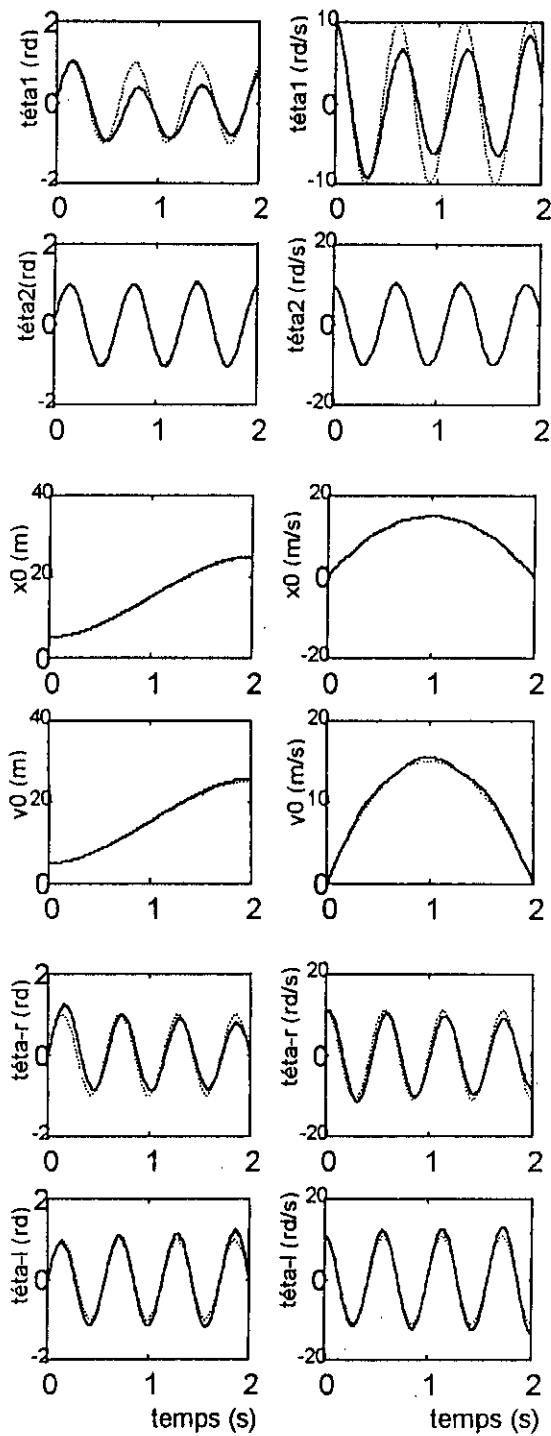


Figure IV.6: Evolution des sorties du système lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée avec perturbation inertielle.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

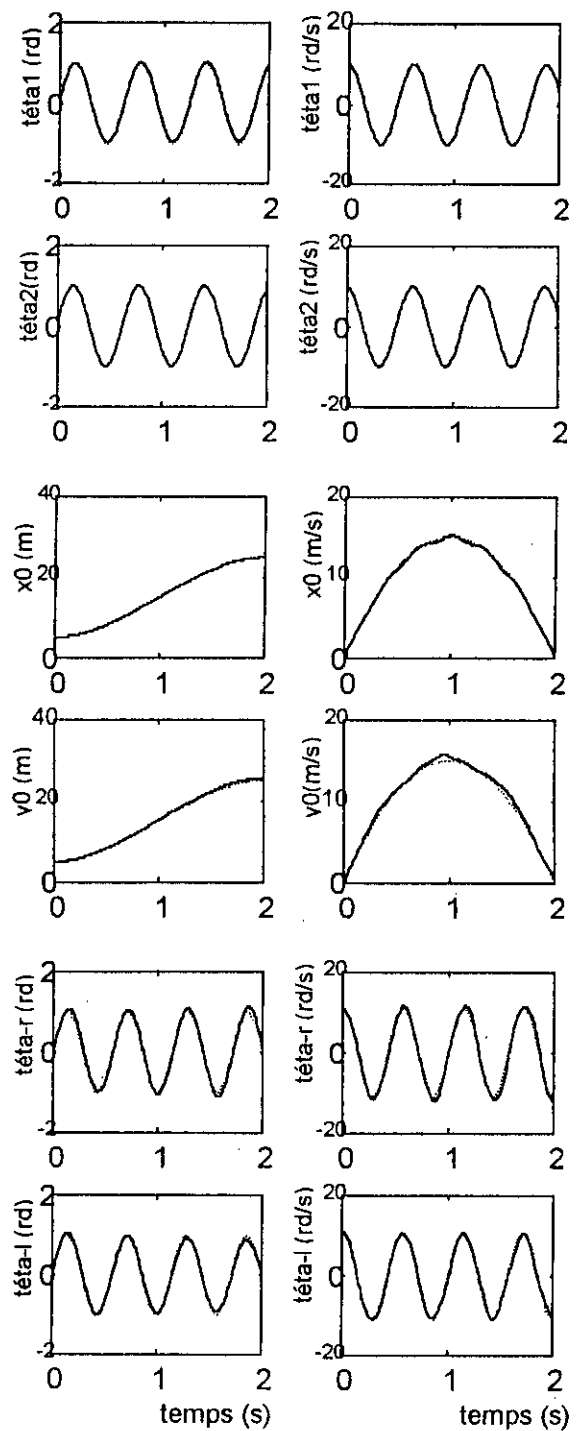


Figure IV.12 : Evolution des sorties du système. Les termes de couplage sont compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée avec perturbation inertielle.

(Trait en pointillé : les consignes ; Trait fort : les sorties réelles).

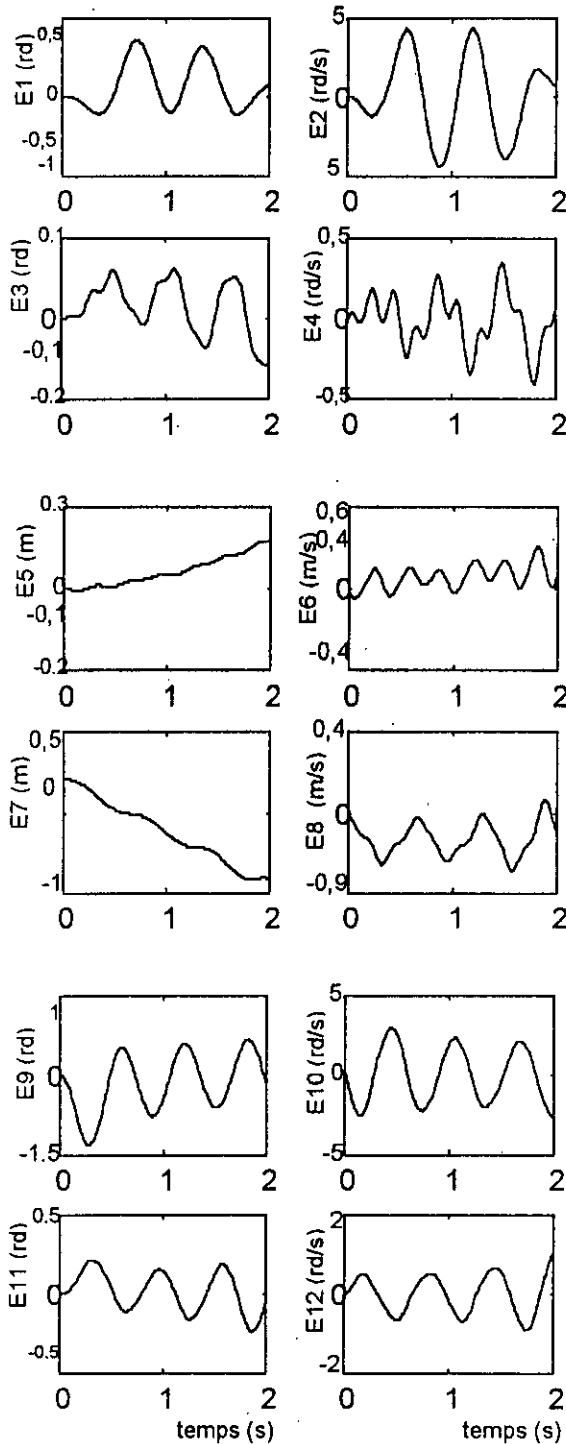


Figure IV.7: les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque les termes de couplage ne sont pas compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée avec perturbation inertielle

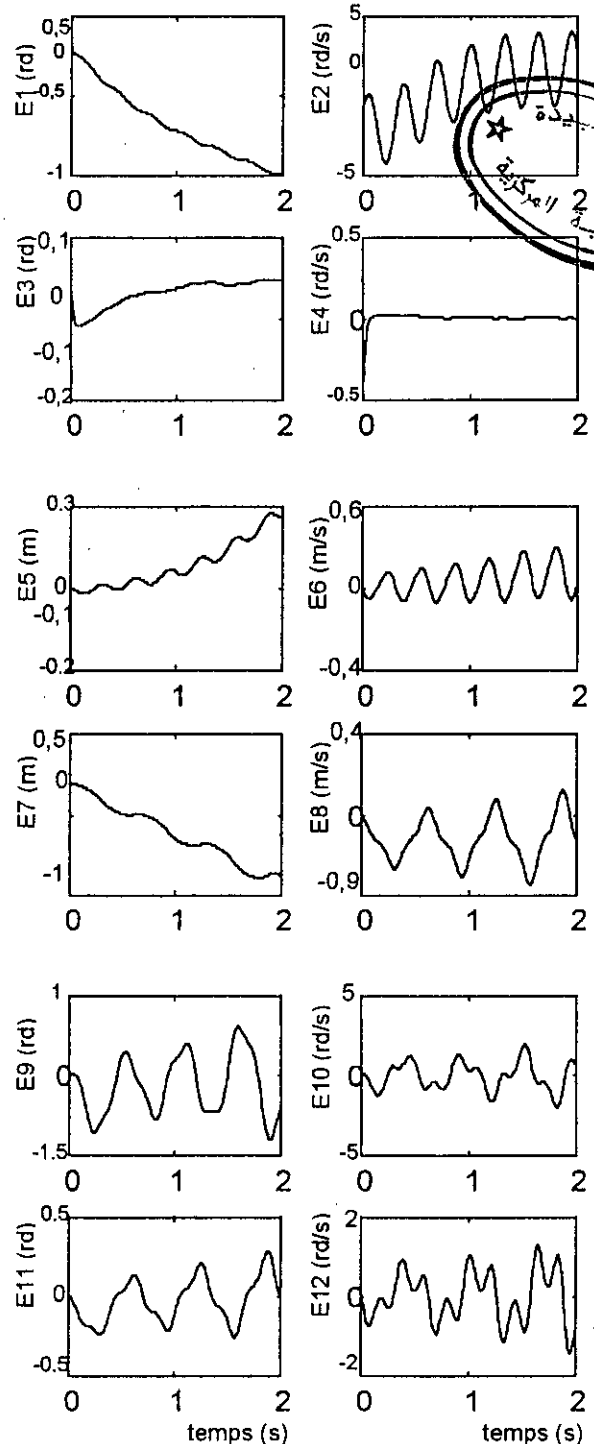


Figure IV.13 : les erreurs absolues sur les sortie du M.M lorsque Les termes de couplage sont compensés. Dans le cas d'une vitesse élevée avec perturbation inertielle

Les Erreur	Evolution à faibles vitesses						Evolution à vitesses élevées					
	Avec intégration de termes de couplag			sans intégration de termes de couplag			Avec intégration des termes de couplage			sans intégration des termes de couplage		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
E1	-0,01	-0,01	0,00	-0,06	0,02	0,13	-0,04	-0,03	0,00	-0,19	0,08	0,55
E2	-0,03	-0,01	0,01	-0,38	-0,03	0,06	-0,08	-0,01	0,02	-3,59	0,05	3,50
E3	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,05
E4	-0,03	0,00	0,00	-0,13	0,00	0,15	-0,05	0,00	0,00	-0,40	-0,01	0,37
E5	-0,01	0,02	0,05	-0,01	0,03	0,07	-0,01	0,05	0,16	-0,01	0,08	0,24
E6	-0,07	0,02	0,12	-0,06	0,03	0,15	-0,13	0,08	0,32	-0,13	0,11	0,36
E7	-0,32	-0,14	0,00	-0,32	-0,14	0,00	-0,60	-0,30	0,00	-0,62	-0,30	0,00
E8	-0,32	-0,15	0,01	-0,31	-0,15	0,01	-0,61	-0,29	0,00	-0,59	-0,30	0,00
E9	-0,14	-0,02	0,11	-0,23	-0,05	0,09	-0,16	0,02	0,14	-0,42	-0,06	0,18
E10	-0,88	-0,03	1,06	-0,93	-0,06	0,98	-2,06	-0,08	1,92	-2,49	-0,05	2,90
E11	-0,04	-0,01	0,04	-0,07	0,02	0,10	-0,09	-0,01	0,04	-0,14	0,02	0,20
E12	-0,22	-0,01	0,28	-0,46	0,02	0,33	-0,73	0,01	0,83	-1,50	-0,02	1,35

Tableau IV.3 : Les valeurs limites des erreurs absolues sur les courbes des figures IV.3 ; IV.9 ; IV.5 et IV.11

Les Erreurs	Evolution à vitesses élevées avec perturbation inertielle					
	Avec intégration des termes de couplage			sans intégration des termes de couplage		
	min	moy	max	min	moy	max
E1	-0,08	-0,05	0,00	-0,22	0,13	0,72
E2	-0,09	-0,04	0,00	-4,38	0,07	4,35
E3	0,00	0,00	0,00	-0,06	0,01	0,06
E4	-0,05	0,00	0,00	-0,82	-0,03	0,70
E5	-0,01	0,06	0,18	-0,01	0,11	0,29
E6	-0,17	0,09	0,51	-0,13	0,14	0,52
E7	-0,59	-0,32	0,00	-0,63	-0,33	0,00
E8	-0,87	-0,27	0,32	-0,72	-0,30	0,18
E9	-0,16	-0,03	0,12	-0,44	-0,05	0,23
E10	-2,06	-0,05	1,94	-2,57	-0,04	3,00
E11	-0,10	-0,01	0,12	-0,24	0,01	0,22
E12	-1,45	0,00	1,28	-2,28	-0,02	2,67

Tableau IV.4 : Les valeurs limites des erreurs absolues sur les courbes des figures IV.7 et IV.13.

Donc, on a prouvé que la compensation des termes d'interaction dynamique du système est indispensable même en l'absence des perturbations inertielles ; la manière la plus appropriée pour la prise en compte des termes de couplage d'une structure assez complexe comme les manipulateurs mobiles est l'adoption d'une loi de commande dynamique complet qu'on peut considéré comme une lois idéale.

L'avantage incontestable de la commande dynamique est surtout sa précision et l'insensibilité aux perturbations externe, mais malheureusement elle est basée sur un artifice de calcul important d'ou on ne peut pas l'appliquer d'une part dans une application en temps réel, et d'autre part dans la réalité.

IV.4 Commande floue

On applique au système une commande de type flou pour voir qu'est ce qu'une commande floue peut donner pour un système assez complexe comme le manipulateur mobile. cette commande est décrite au chapitre III.

Les courbes d'évolution des sorties du système ainsi que les erreurs absolues sur ces sorties pour les trois situations cités précédemment, sont présentées dans les figures IV.13 à IV.18 aux pages suivantes.

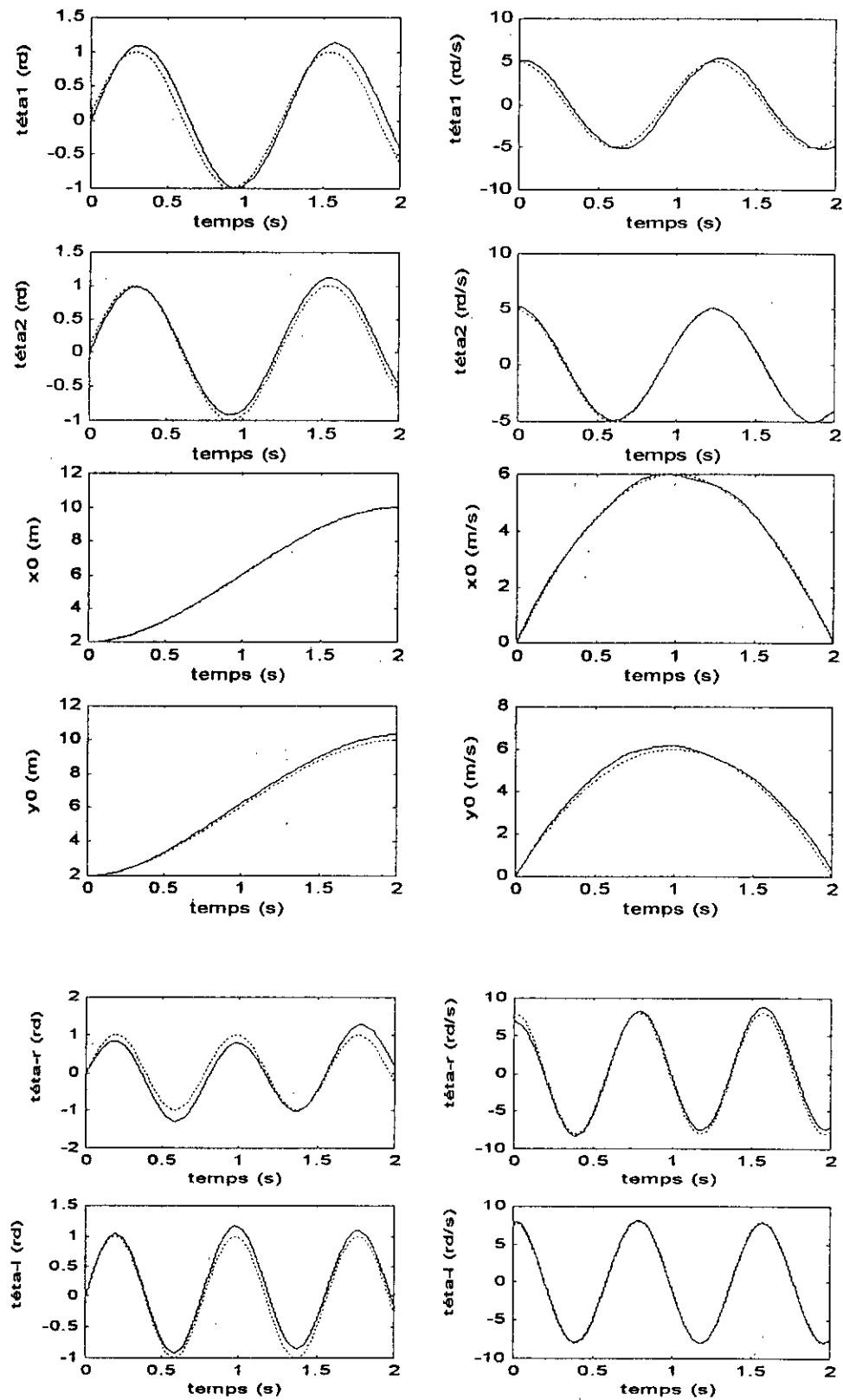


Figure IV.13 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande floue.

Légende : Les consignes
 ——— Les sorties réelles

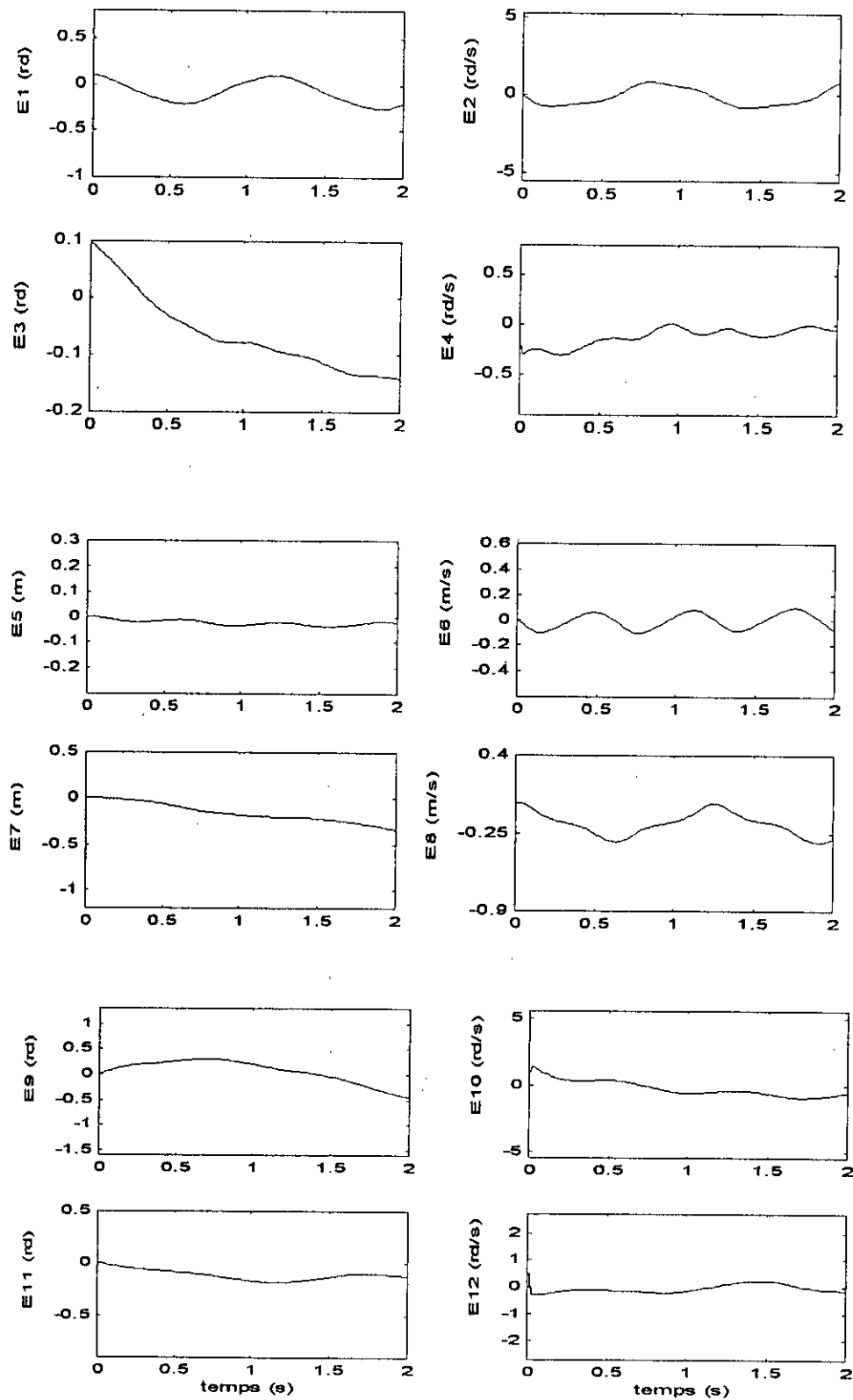


Figure IV.14 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande floue

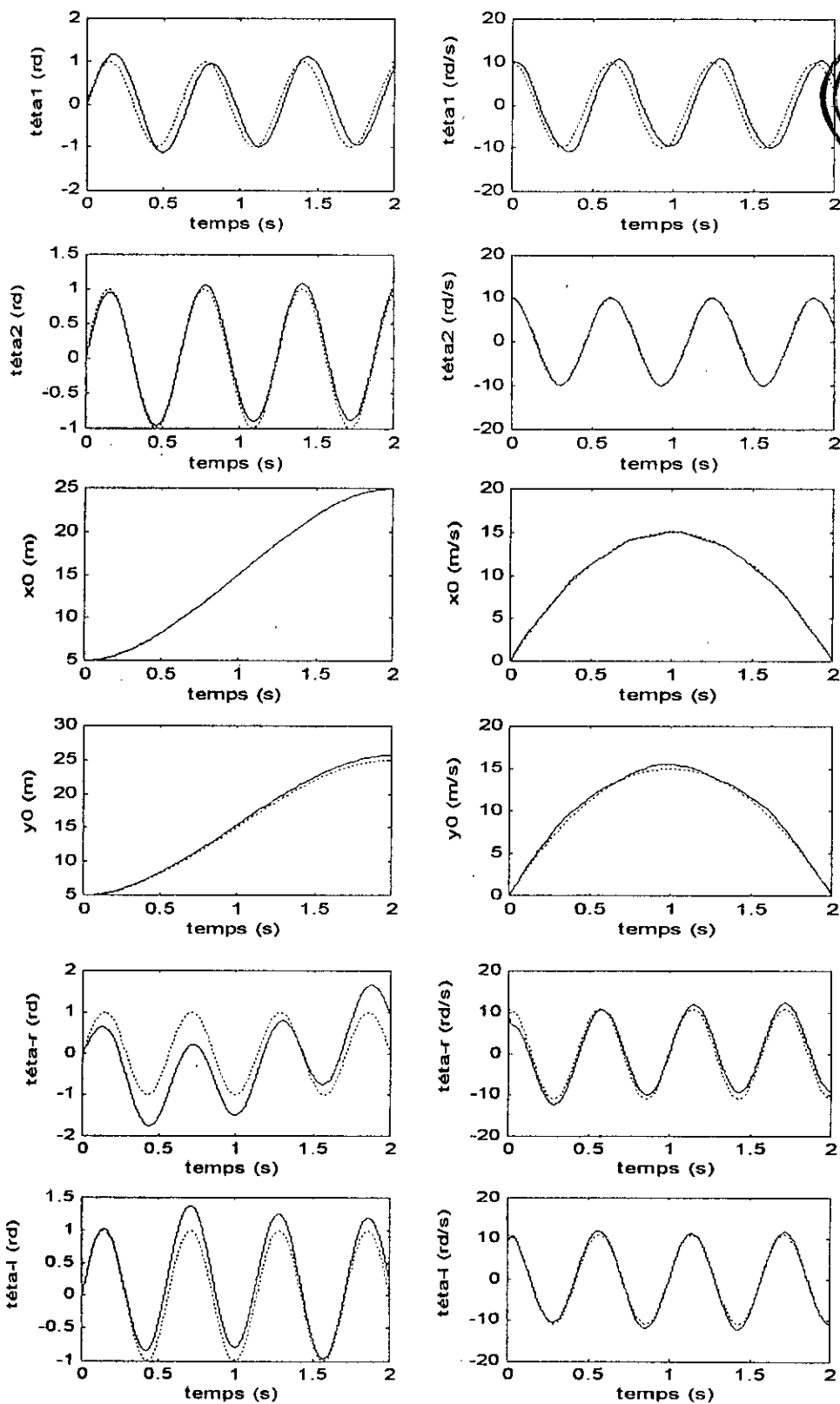


Figure IV.15 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande floue.

Légende : Les consignes
 ——— Les sorties réelles

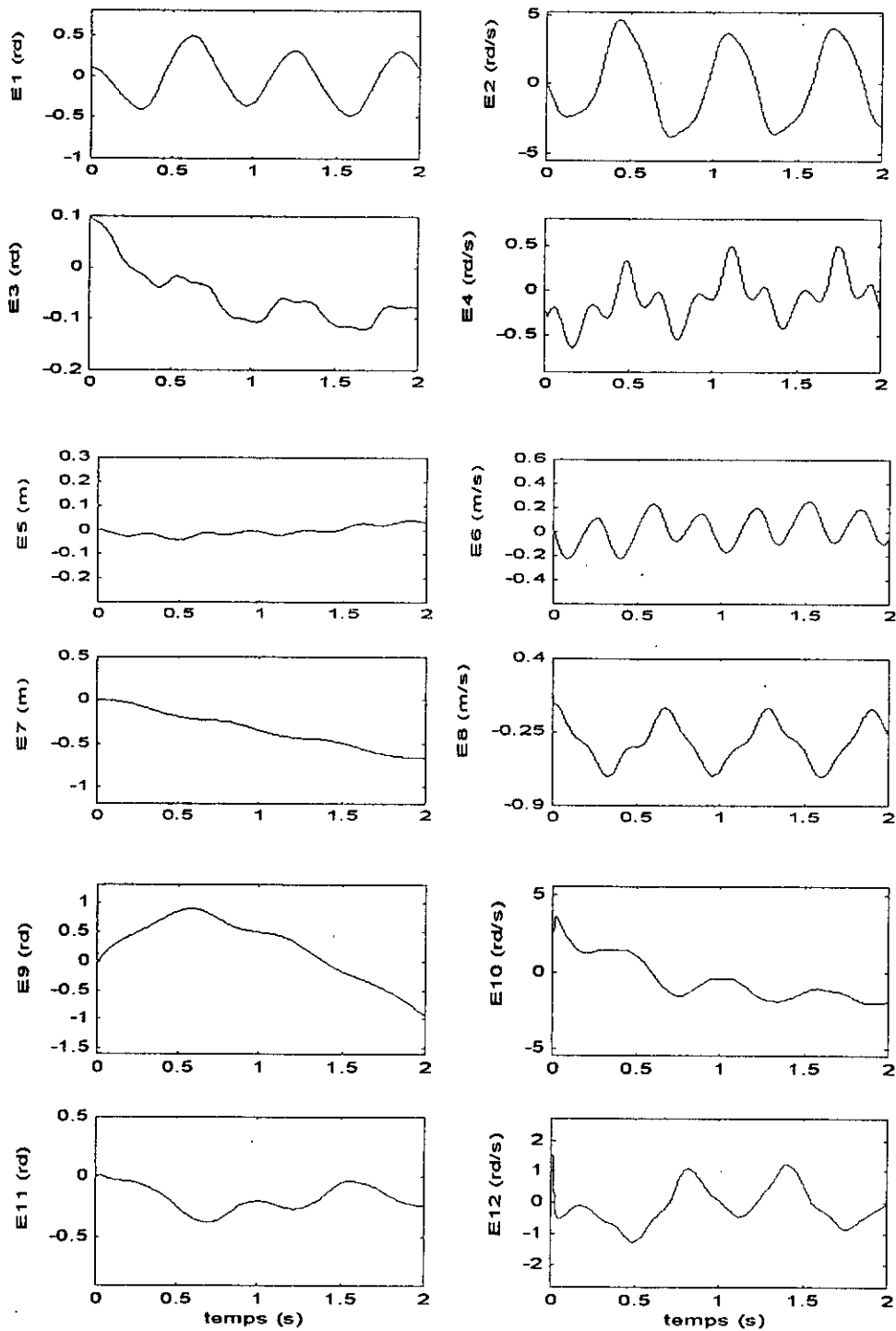


Figure IV.16 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande floue

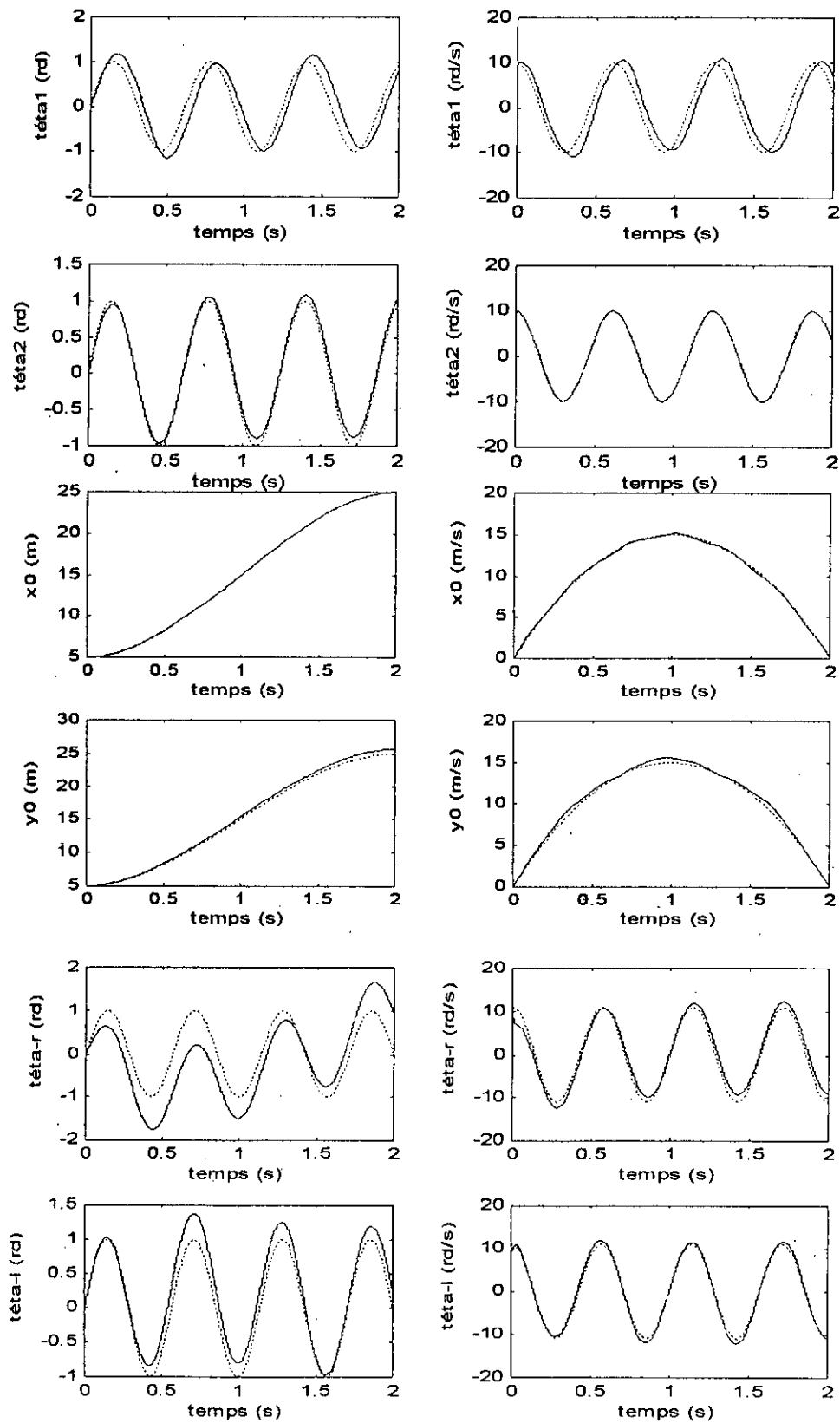


Figure IV.17 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande floue.

Légende : Les consignes
 — Les sorties réelles

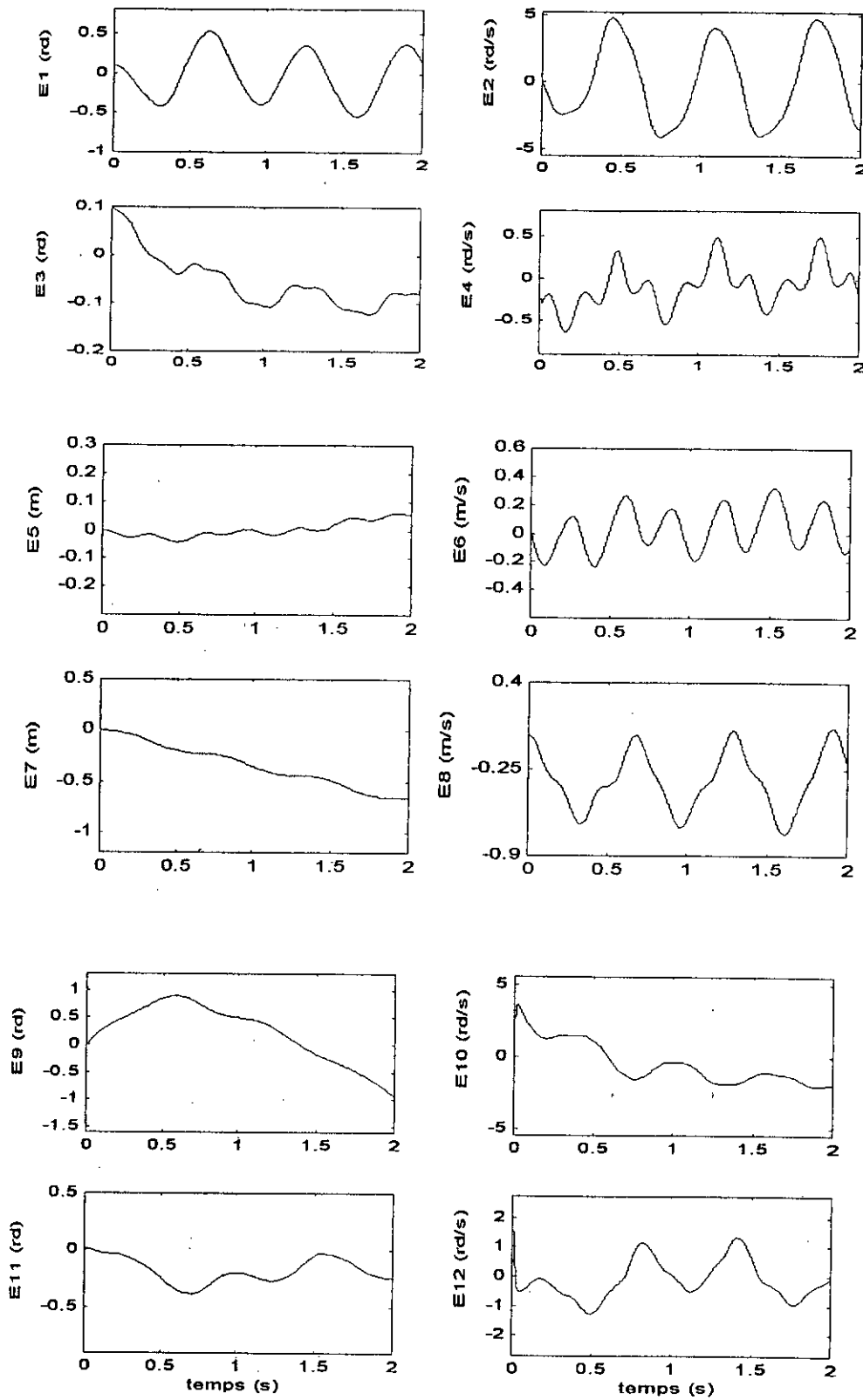


Figure IV.18: Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande floue

Interprétations :

la figure IV.13 montre qu'une commande floue globale assure au manipulateur mobile une poursuite de trajectoire avec un certain taux d'erreur, lorsque les consignes imposées sont à faibles vitesses.

Lorsque le système évolue à vitesses élevées (figure IV.15), la commande floue globale assure au bras manipulateur une poursuite de trajectoire ; tandis que le résultat obtenu pour le robot mobile est dégradé, surtout au niveau de la roue gauche du robot mobile.

En présence de perturbation, les erreurs absolues commises sur les sorties sont plus remarquables comparées aux deux situations précédents (voire le tableau ci-dessous), mais on a toujours une bonne poursuite comme il est clair sur la figure IV.17.

Les erreurs	Evolution à faibles vitesses			Evolution à vitesses élevées			Avec perturbation inertielle		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
E1	-0,25	-0,07	0,09	-0,48	-0,01	0,49	-0,54	-0,01	0,52
E2	-0,80	-0,13	0,85	-3,80	0,06	4,64	-4,08	0,08	4,79
E3	-0,14	-0,06	0,09	-0,12	-0,05	0,09	-0,12	-0,05	0,09
E4	-0,30	-0,11	0,00	-0,63	-0,08	0,51	-0,63	-0,08	0,50
E5	-0,03	-0,02	0,00	-0,04	0,00	0,03	-0,04	0,00	0,06
E6	-0,10	-0,01	0,09	-0,12	0,08	0,25	-0,23	0,02	0,32
E7	-0,33	-0,15	0,00	-0,66	-0,34	0,00	-0,65	-0,34	0,00
E8	-0,32	-0,16	0,00	-0,65	-0,32	0,00	-0,73	-0,31	0,06
E9	-0,44	0,06	0,30	-0,94	0,19	0,89	-0,93	0,18	0,89
E10	-0,93	-0,12	1,34	-2,06	-0,45	3,55	-2,04	-0,46	3,55
E11	-0,18	-0,10	0,00	-0,37	-0,16	0,01	-0,38	-0,16	0,01
E12	-0,31	-0,05	0,47	-1,26	-0,13	1,53	-1,28	-0,13	1,53

Tableau IV.5 : Résultats comparatifs du manipulateur mobile en appliquant la commande floue.

En résumé, les résultats de simulation sont positifs, étant donné que les essais effectués coïncident avec ceux du contrôleur dynamique et ceux obtenus par le contrôleur floue. L'avantage incontestable de la commande à logique floue est surtout sa rapidité. En effet, les temps de réponses réalisés par le correcteur floue sur les quatre axes du manipulateur mobile sont nettement meilleurs, que ceux réalisés par le contrôleur dynamique comme le montre le tableau IV.6.

Le temps de réponse (second)		
Axe	Commande dynamique	Commande floue
1	1,5	1
2	1,25	1
3	1	1
4	1,25	1,25

Tableau IV.6 : valeurs de temps de réponses réalisés par les deux contrôleurs ;dynamique ;floue.

IV.5 Commande neuronale

Dans ce paragraphe nous procédons à la validation, par simulation, de la troisième approche de commande montrée dans le chapitre III. Pour une telle approche de commande, les couples appliqués au système manipulateur mobile sont estimés par la modélisation neuronale.

Les courbes d'évolution des sorties du système ainsi que les erreurs absolues sur ces sorties pour les trois cas de figure cités précédemment sont présentées aux figures IV.19 à IV.24.

Interprétations :

Les couples nominaux sont fournis par un réseau de neurones multicouche ayant deux couches cachées.

Pendant l'étape d'apprentissage du réseau, nous avons choisi au début un seul réseau pour toute les lois de commande. Le réseau avait pour entrées les trajectoires désirées de position, vitesse et accélération des deux liaisons et des deux roues motrice du manipulateur mobile et l'estimée des lois de commande. Le système ainsi considéré était assez complexe ce qui nous a conduit à une taille du réseau considérable dans les deux couches cachées (entre 20 à 30 neurones par couche). D'un autre côté, l'erreur convergait très lentement jusqu'à 10^{-2} .

A l'étape de généralisation, nous avons constaté que l'erreur entre le couple désiré et celui fourni par le réseau de neurones était assez importante. Afin de surmonter ce problème, nous avons considéré des réseaux de neurones indépendants pour chaque liaison et pour chaque roue du manipulateur mobile.

Cette solution nous a permis d'avoir une taille des réseaux raisonnable (entre 8 et 10 neurone par couche). Par conséquent l'erreur convergait très rapidement jusqu'à 10^{-2} .

En terme de poursuite de la trajectoire, pour une évolution à faible vitesse, le manipulateur mobile arrive à poursuivre les consignes imposées avec cette commande quoique le taux d'erreur ne soit pas très réduit (tableau IV.7). Lorsque les vitesse d'évolution du système sont rapides, les erreurs de poursuite augmentent remarquablement pour le bras manipulateur, ainsi que pour le robot mobile. En présence d'une perturbation linéaire sur la masse de dernier corps du manipulateur mobile ; le taux d'erreur augmente, mais ceci reste dans des propositions acceptables. Sur la figure (IV.23), nous remarquons l'existence des pics qui correspondent aux transition dû à l'interaction des liaisons et des roues entre elles.

Les résultats montrent qu'un contrôleur neuronal assure au manipulateur mobile d'une poursuit de trajectoire avec un certain taux d'erreur.

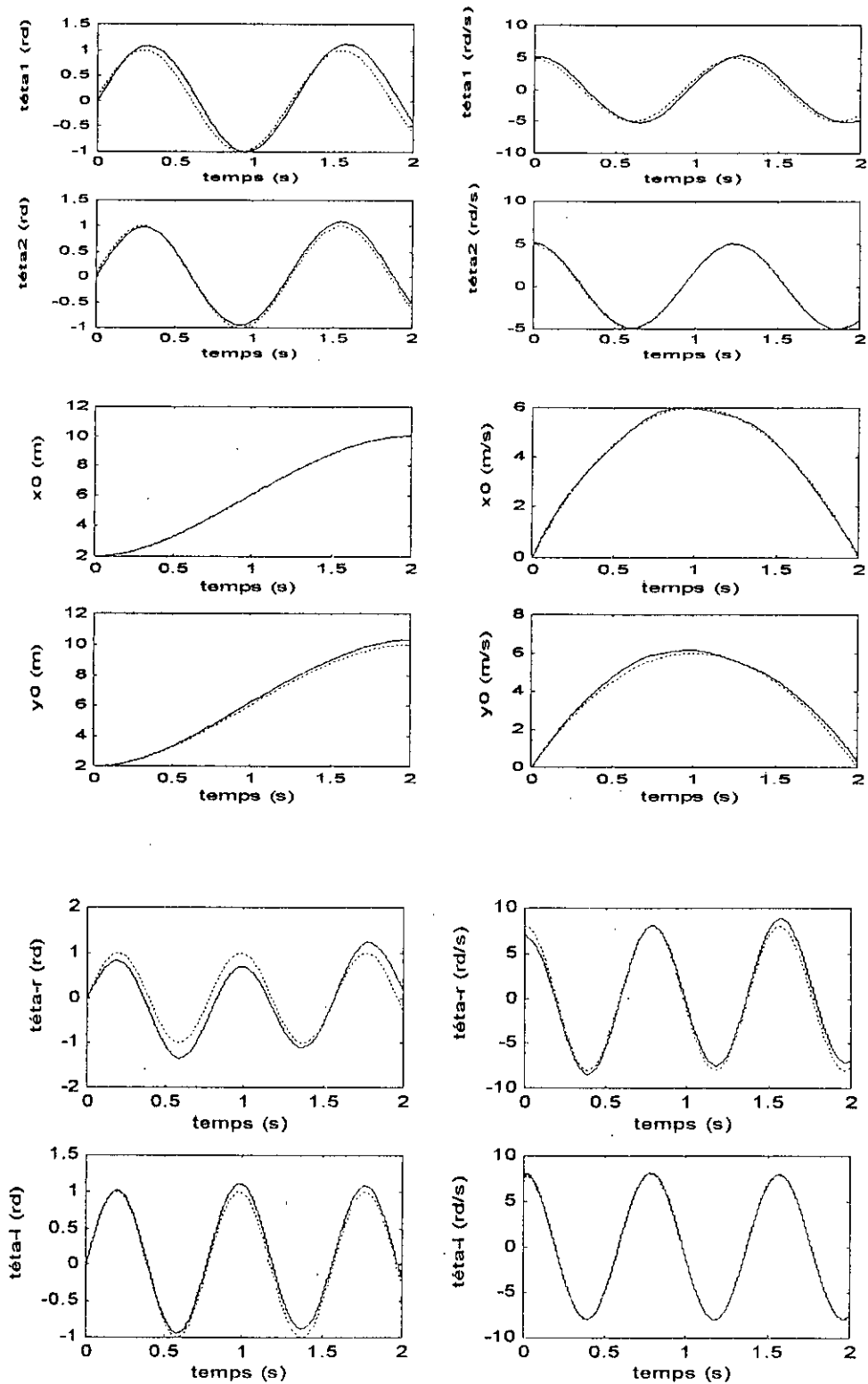


Figure IV.19 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande neuronale.

Légende : Les consignes
 — Les sorties réelles

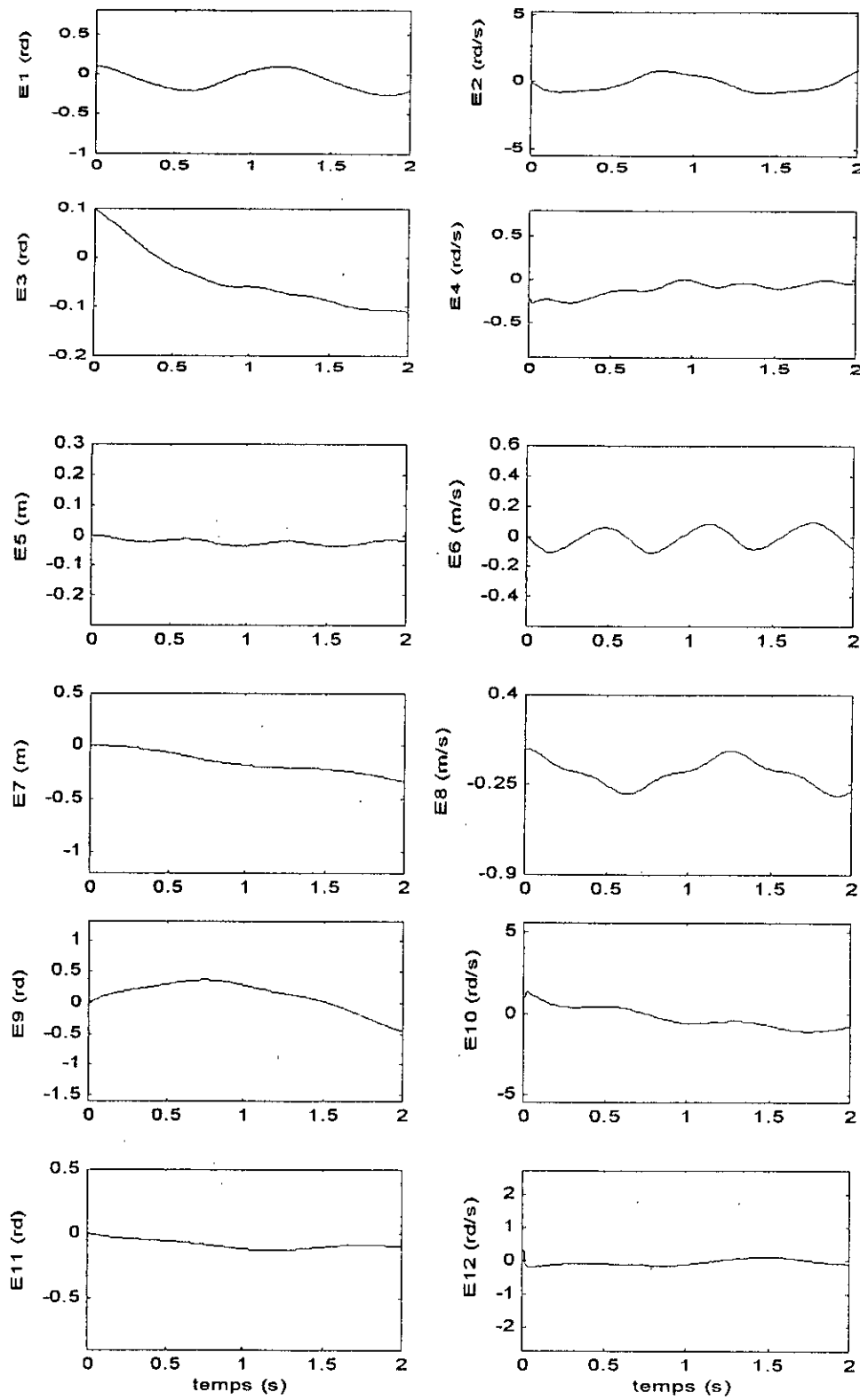


Figure IV.20 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faibles vitesses en appliquant la commande neuronale

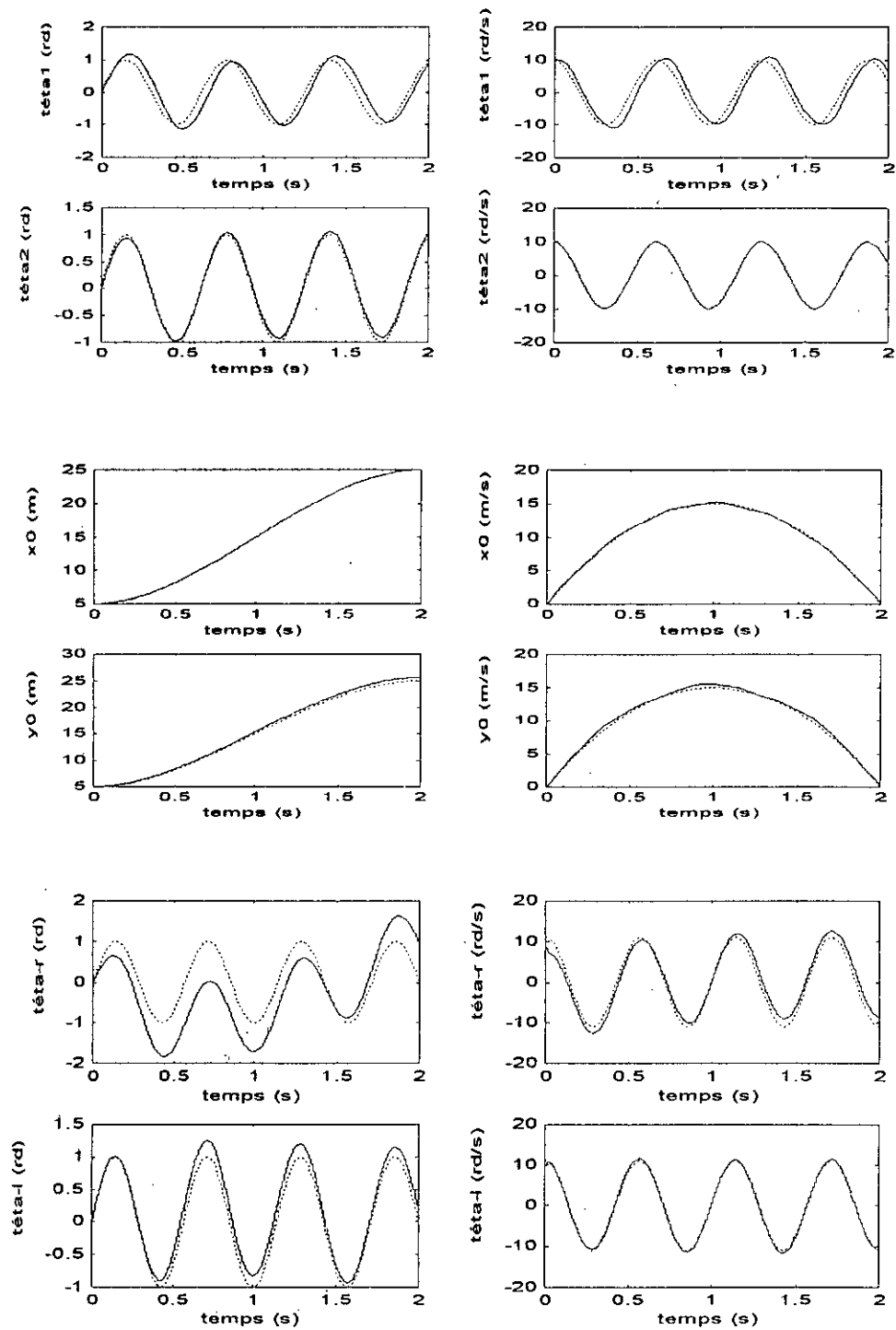


Figure IV.21 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande neuronale.

Légende : Les consignes
 — Les sorties réelles

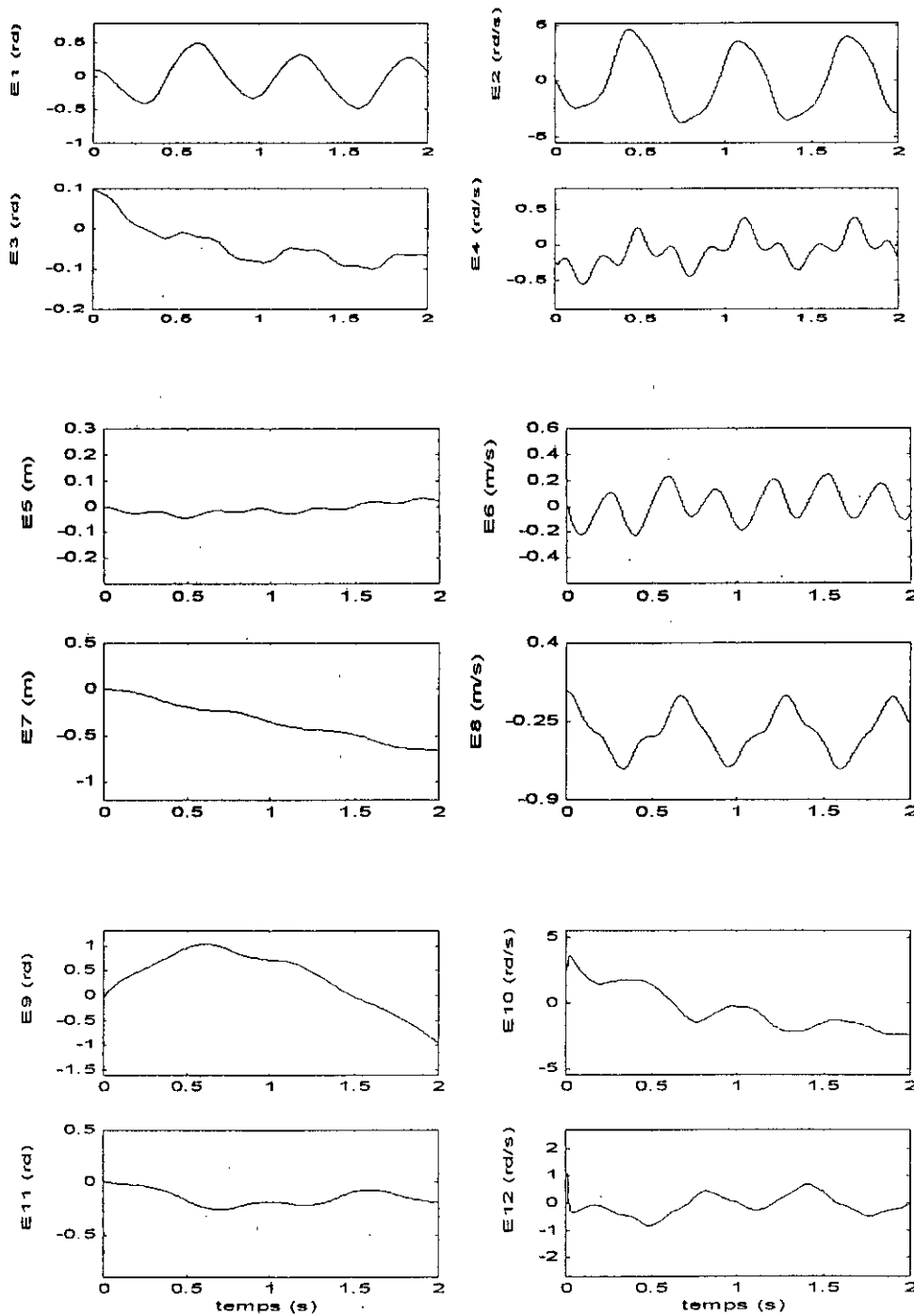


Figure IV.22 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande neuronale.

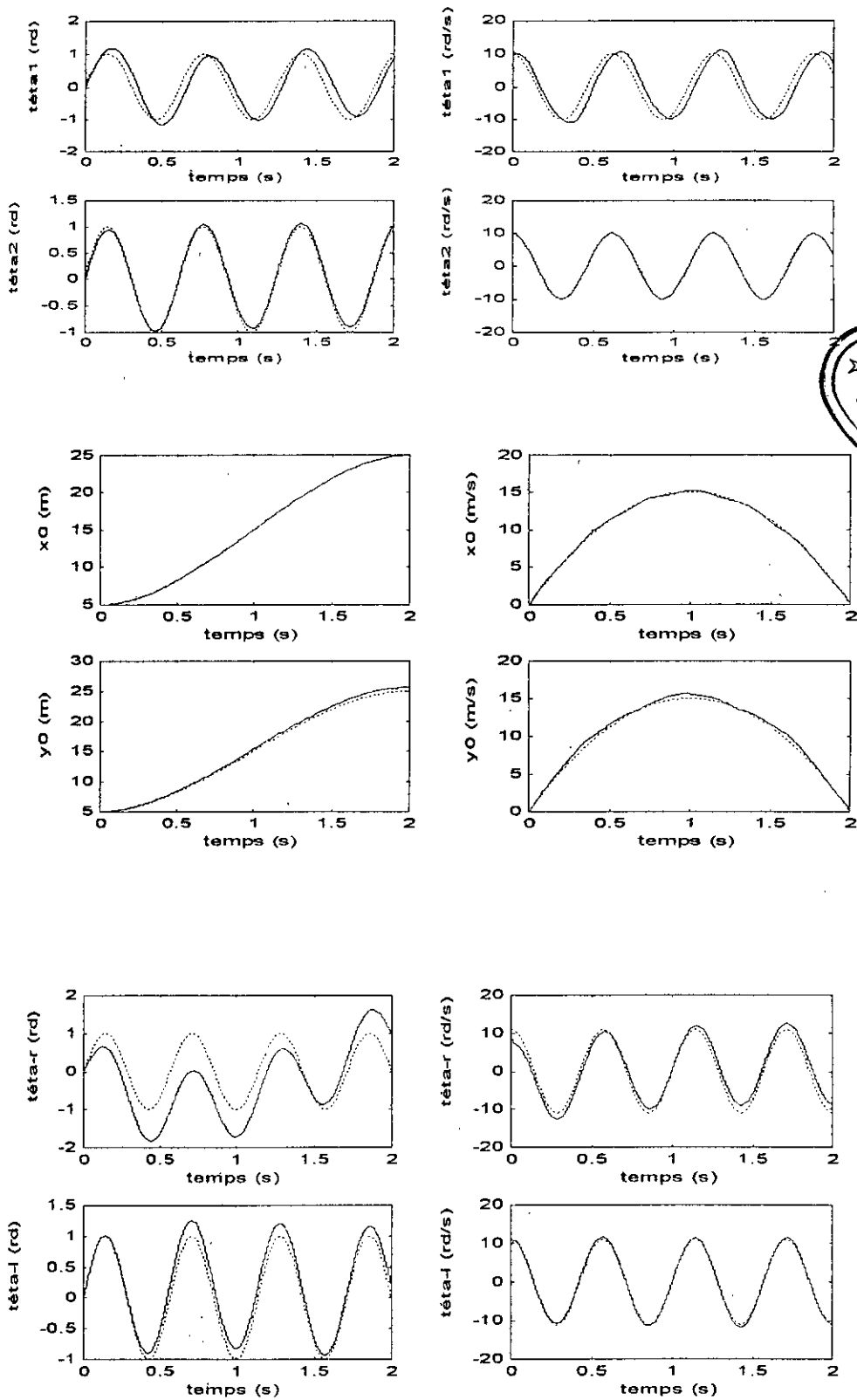


Figure IV.23 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande neuronale.

Légende :
 Les consignes
 — Les sorties réelles

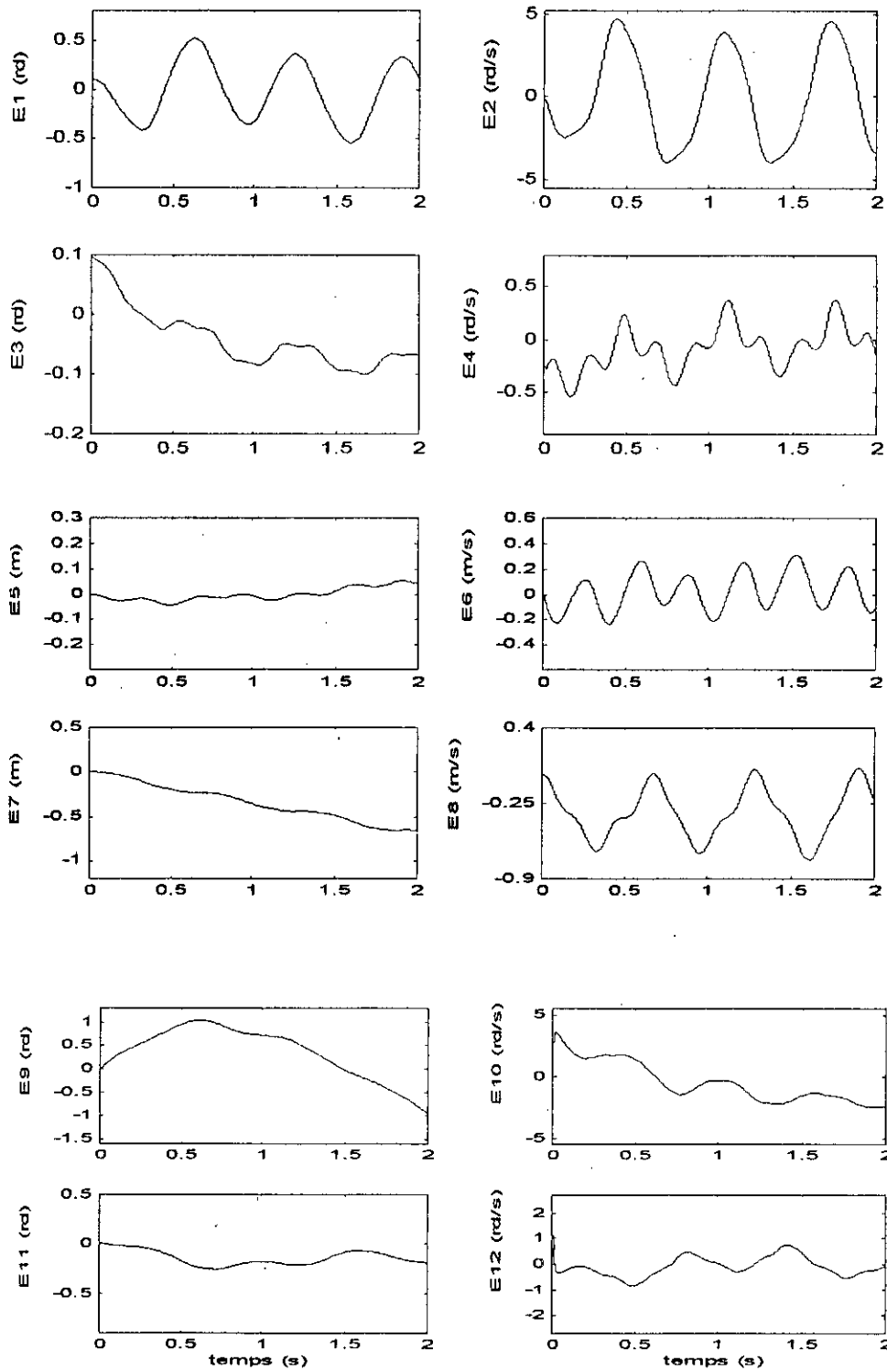


Figure IV.24: Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande neuronale

En résumé ; les résultats de simulation sont positifs, étant donné que les essais effectués coïncident avec ceux du contrôleur dynamique.

L'avantage incontestable de la commande à réseau de neurone est surtout sa capacité d'apprentissage et d'apprendre le comportement dynamique du manipulateur mobile, malgré sa complexité et son fort couplage. Les limites de l'application de cette approche est le temps de réponse qui est important à cause de l'apprentissage.

Donc pour asservir les sorties de système manipulateur mobile aux consignes imposées, on ne peut pas s'appuyer sur la commande neuronale globale.

Les Erreurs	Evolution à faibles vitesses			Evolution à vitesses élevées			Avec perturbation inertielle		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
E1	-0,26	-0,05	0,14	-0,85	-0,19	0,47	-0,97	-0,21	0,50
E2	-1,04	-0,19	1,06	-4,69	-0,09	4,91	-5,21	-0,10	5,15
E3	0,00	0,02	0,09	-0,02	0,01	0,09	-0,02	0,01	0,09
E4	-0,19	-0,05	0,08	-0,48	-0,04	0,38	-0,48	-0,04	0,37
E5	-0,05	-0,03	0,00	-0,05	0,00	0,05	-0,05	0,00	0,08
E6	-0,12	-0,02	0,09	-0,25	0,01	0,33	-0,25	0,03	0,43
E7	-0,34	-0,13	0,00	-0,67	-0,34	0,00	-0,66	-0,34	0,00
E8	-0,33	-0,16	0,00	-0,67	-0,32	0,00	-0,72	-0,31	0,03
E9	-0,64	-0,13	0,45	-1,48	0,22	1,27	-1,46	0,23	1,27
E10	-1,40	-0,29	2,17	-3,10	-0,69	5,41	-3,09	-0,80	5,40
E11	-0,04	-0,01	0,00	-0,27	-0,11	0,01	-0,27	-0,11	0,01
E12	-0,17	0,00	0,63	-0,94	-0,11	1,60	-0,95	-0,08	1,61

Tableau IV.7 : Résultats comparatifs du manipulateur mobile en appliquant la commande neuronal.

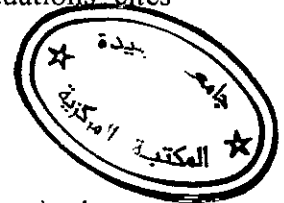
IV.6 Commande dynamique-floue

On appliquera au manipulateur mobile, la commande dynamique-floue dont son architecture principale donnée au chapitre III La partie dynamique permet de compenser partiellement la dynamique du système ; la partie floue va compenser le couplage entre les deux sous systèmes mécaniques du manipulateur mobile les courbes d'évolution des sorties du système ainsi que les erreurs absolues sur ces sorties pour les trois situations cités précédemment sont présentées aux figures IV.25 à IV.30

Interprétations :

Concernant le bras, les résultats obtenus avec cette commande ont très bonnes précisions, les erreurs de poursuite en position et en vitesse des articulations sont presque négligeables, surtout dans le cas d'une évolution à faible vitesse, comme c'est montré au tableau IV.8. Par exemple, l'erreur E4 sur la vitesse de la deuxième liaison du bras manipulateur diminue de 60% de la grandeur de la consigne lorsque le système évolue à faibles vitesses à 30% lorsque le mouvement imposé est rapide.

Concernant la plate-forme, on a également une bonne poursuite en position et en vitesse pour les trois cas considérés quoiqu'un taux d'erreur négligeable. Par exemple, l'erreur E8 sur la vitesse de la plate-forme diminue considérablement de 15% de grandeur de la consigne lorsque le système évolue à faible vitesse à 1% lorsque le mouvement imposé est rapide.



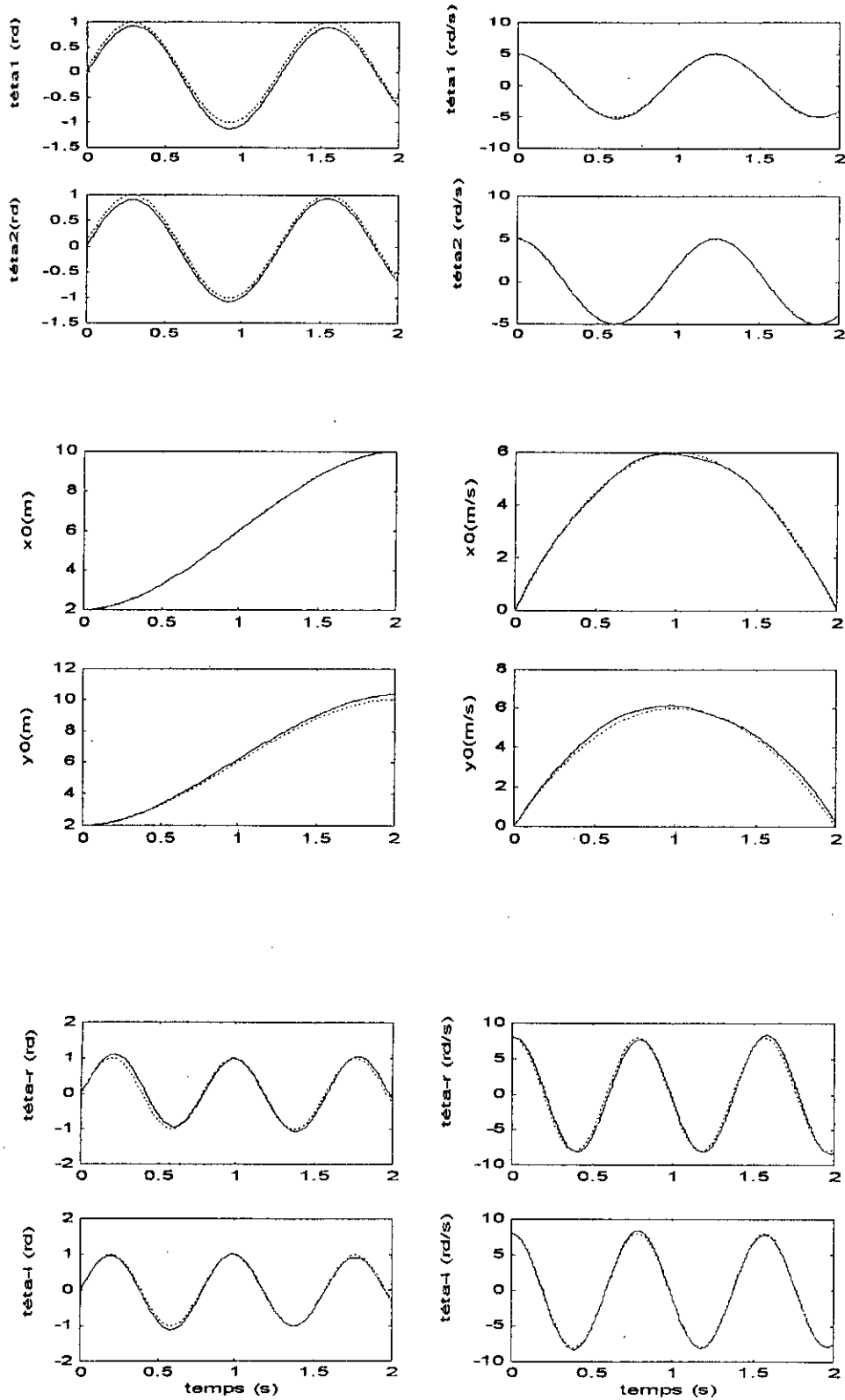


Figure IV.27 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-floue.

Légende :
 Les consignes
 — Les sorties réelles

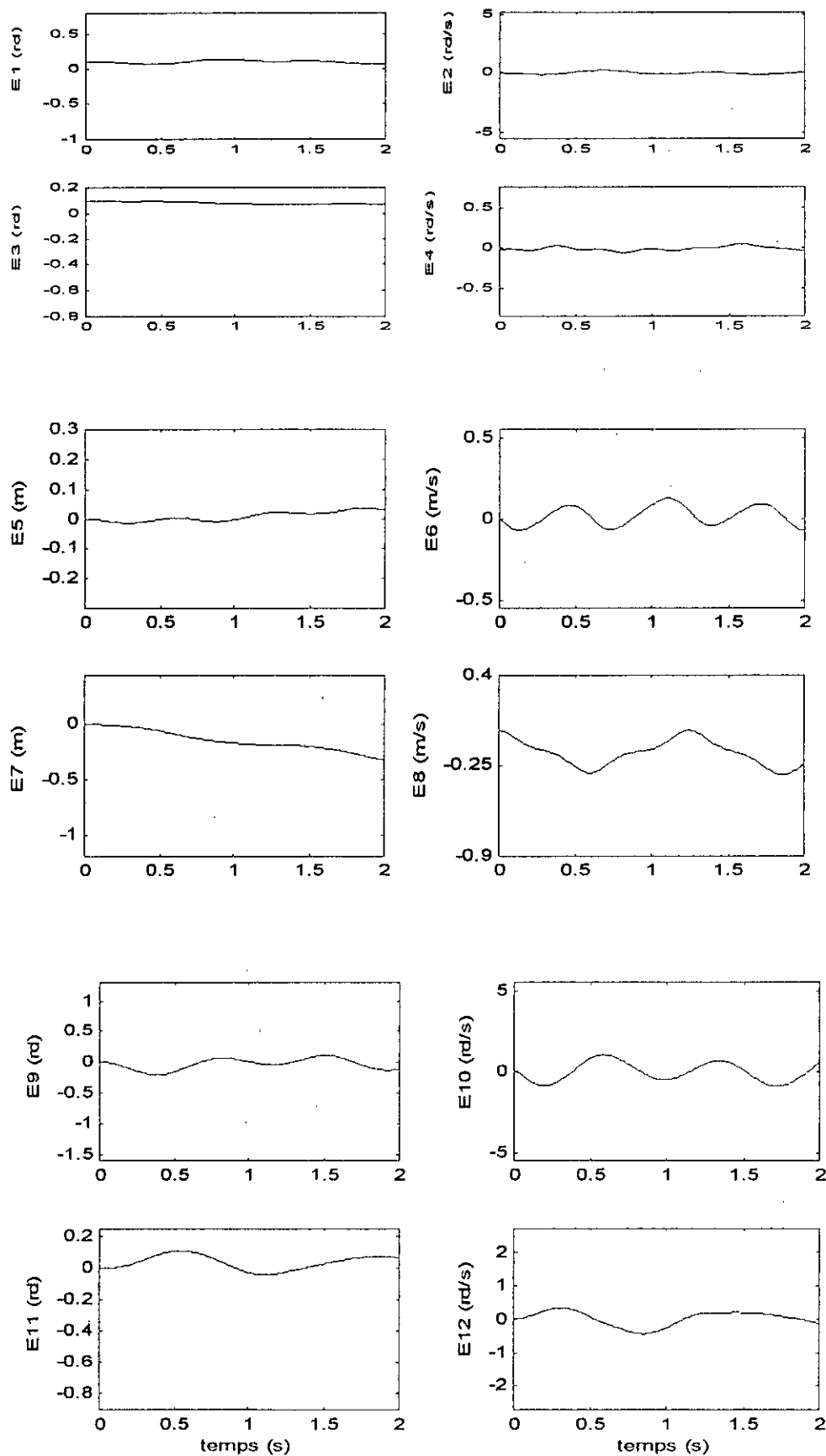


Figure IV.28 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-floue

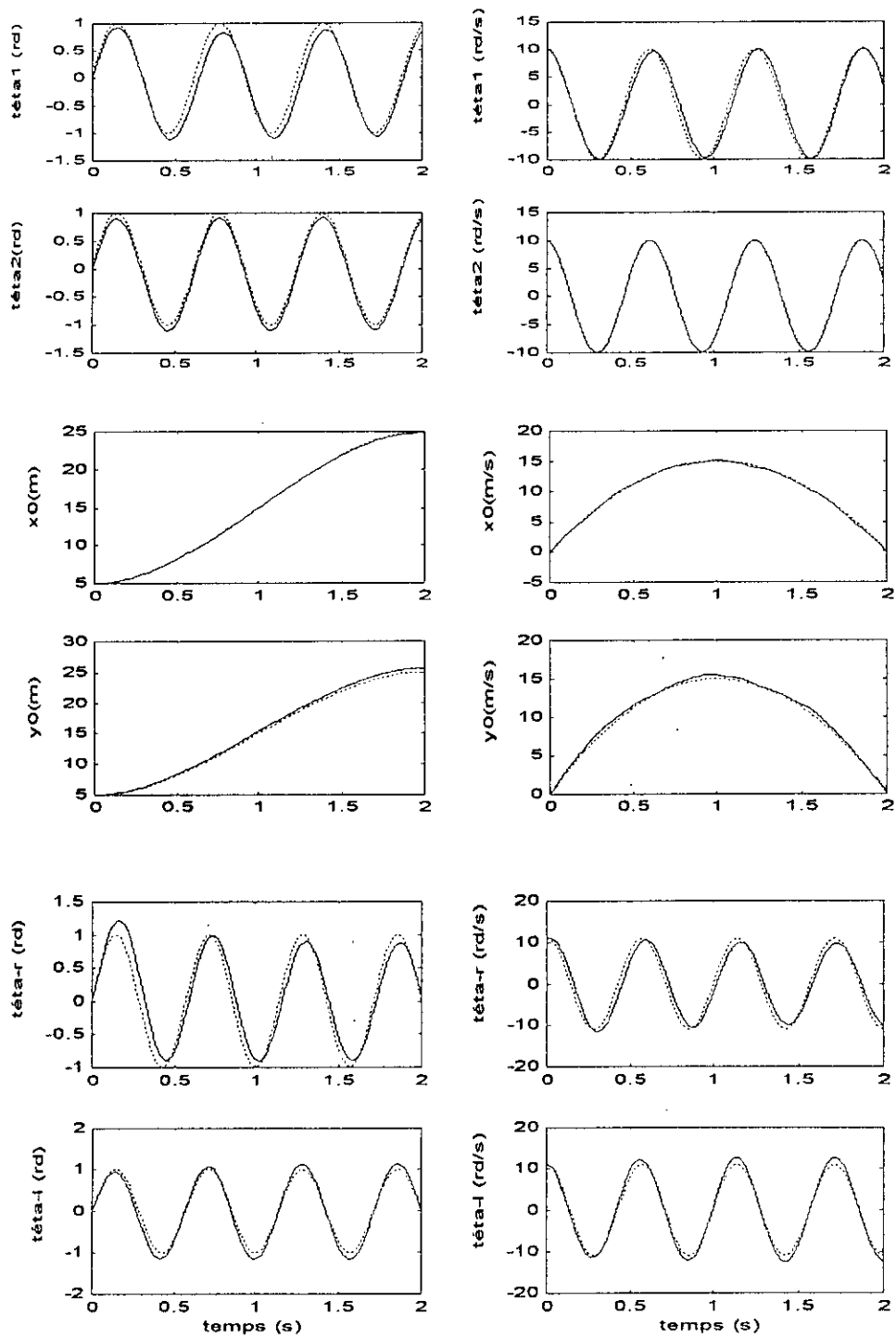


Figure IV.29 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-floue.

Légende : Les consignes
 ————— Les sorties réelles

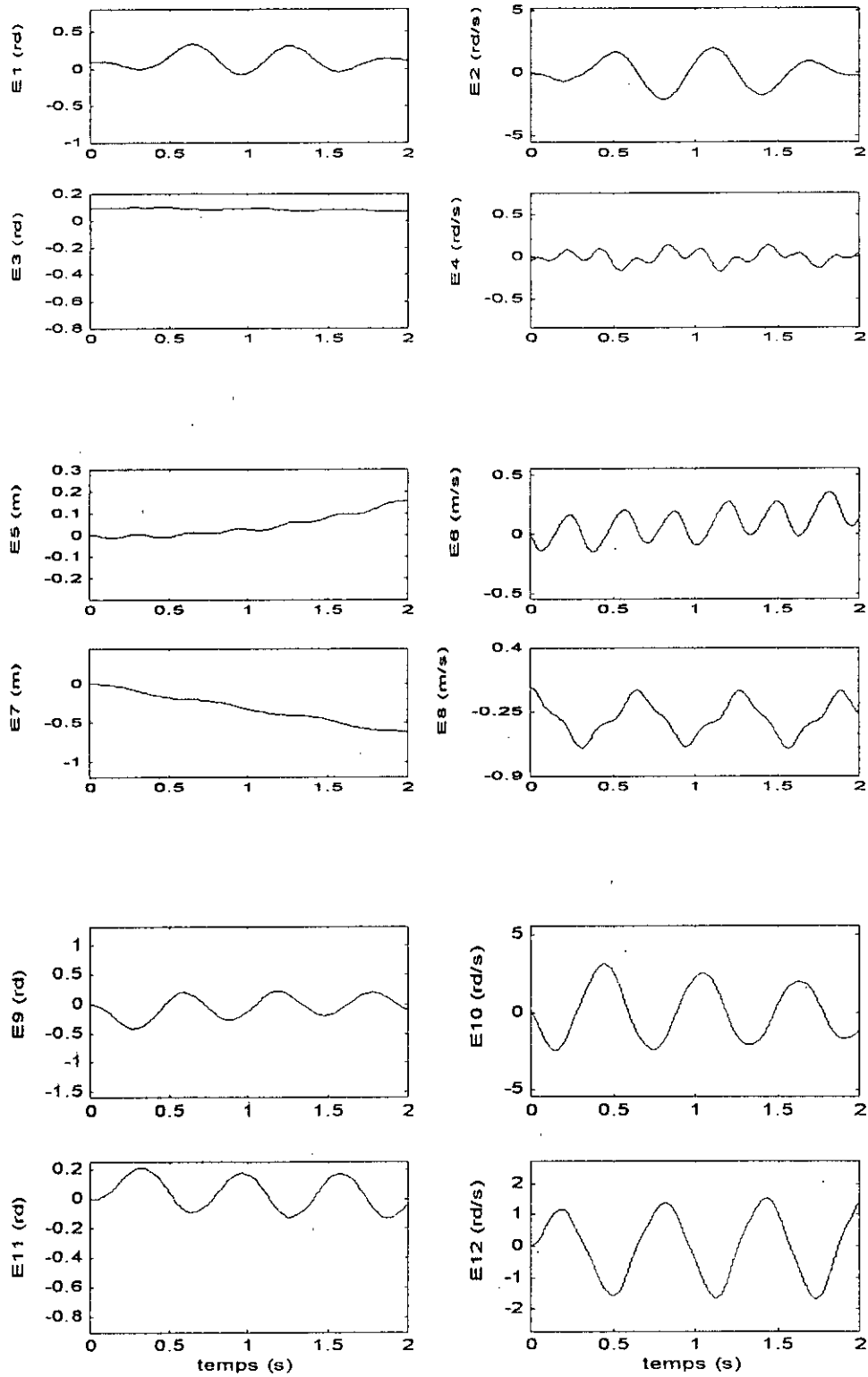


Figure IV.30 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-floue.

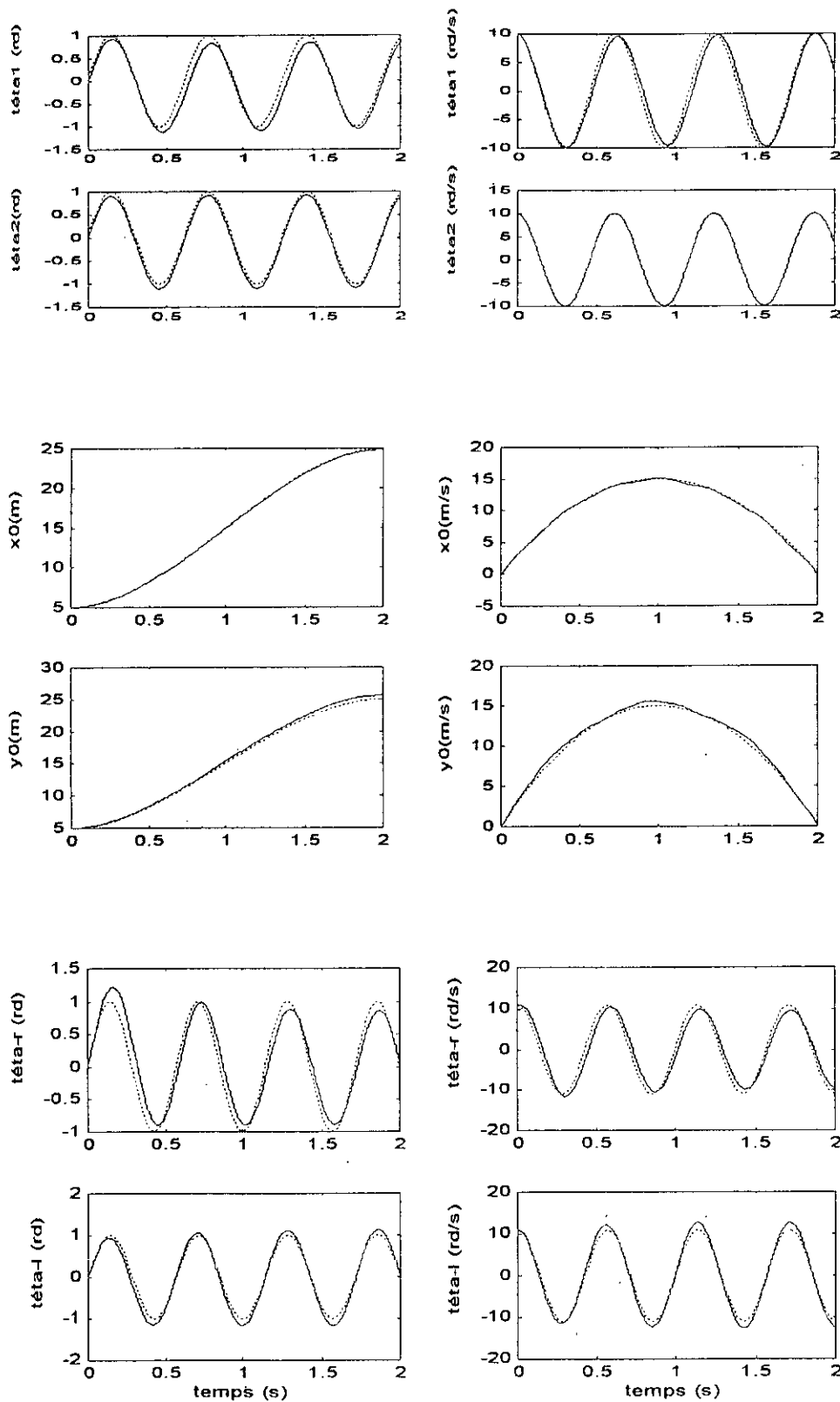


Figure IV.31 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande dynamique-floue.

‡ Légende : ······ Les consignes
 ——— Les sorties réelles

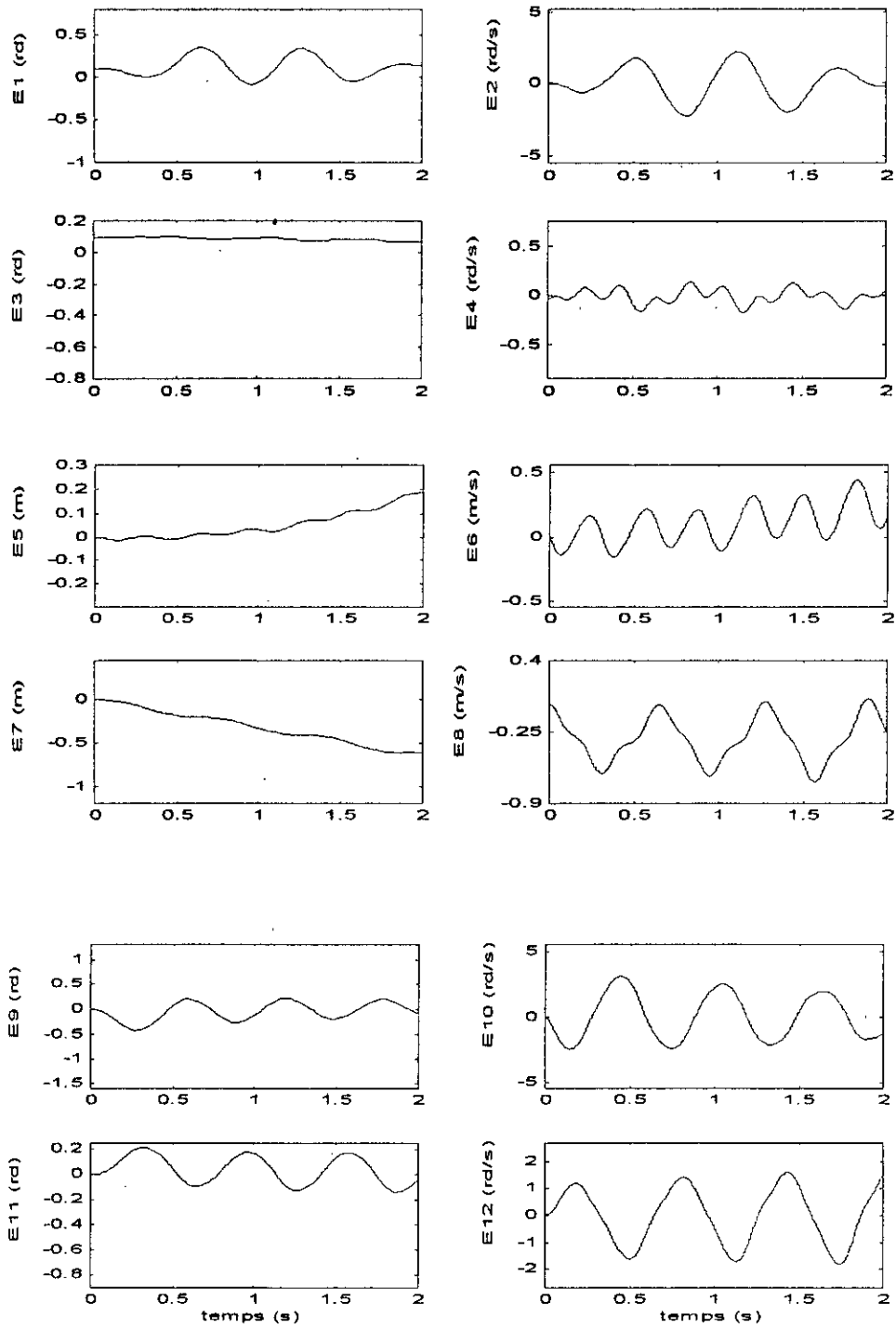


Figure IV.32: Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande dynamique-floue

Le tableau (IV.8) ci-dessous résume les valeurs limites des erreurs absolues sur chaque variable.

Les Erreurs	Evolution à faibles vitesses			Evolution à vitesses élevées			Avec perturbation inertielle		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
E1	0,05	0,09	0,12	-0,07	0,10	0,32	-0,08	0,11	0,34
E2	-0,17	-0,02	0,23	-2,08	0,00	1,98	-2,23	0,00	2,22
E3	0,06	0,08	0,09	0,06	0,08	0,10	0,06	0,08	0,10
E4	-0,06	-0,01	0,04	-0,18	-0,01	0,13	-0,18	-0,01	0,13
E5	-0,01	0,00	0,03	-0,01	0,04	0,15	-0,01	0,04	0,18
E6	-0,07	0,01	0,12	-0,15	0,07	0,35	-0,16	0,08	0,43
E7	-0,32	-0,14	0,00	-0,02	-0,30	0,00	-0,61	-0,31	0,00
E8	-0,31	-0,15	0,00	-0,62	-0,29	0,00	-0,70	-0,29	0,06
E9	-0,21	-0,03	0,10	-0,41	-0,04	0,22	-0,41	-0,04	0,22
E10	-0,91	-0,05	1,00	-2,46	-0,05	3,11	-2,47	-0,04	3,12
E11	-0,03	0,03	0,10	-0,12	0,03	0,21	-0,13	0,03	0,21
E12	-0,43	0,03	0,35	-1,67	0,00	-1,54	-1,81	0,00	1,61

Tableau IV.8 : Résultats comparatifs du manipulateur mobile en appliquant la commande dynamique-floue.

En résumé ; les résultats de simulation sont positif, étant donné que les essais effectués coïncident avec ceux du contrôleur dynamique complet et ceux obtenus par le contrôleur dynamique-floue, point de vue résultats.

IV.7 Commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques

Pour améliorer les performances de contre du système manipulateur mobile. La commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétique, dont sont principes est données au chapitres III est appliquée au système. L'effet d'interaction du système est compensé par un estimateur floue, optimisé par un algorithme génétique. Les résultats obtenus sont ceux représentés aux figures IV.31 à IV.36.



Interprétations :

En comparant les résultats obtenue par la commande dynamique-floue et dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques, on remarque que la précision pour ce dernier est meilleure que ce soit pour le bras manipulateur ou pour le robot mobile, pour les trois situations considérés ; le tableau ci dessous porte les valeurs limites des erreurs absolues commises sur les états du système, pour ce cas la et qui sont nettement meilleurs aux résultats relatifs à la commande dynamique-floue. On a également une bonnes poursuite de trajectoire en position et on vitesse. L'optimisation génétique améliore donc les performances de contrôleur dynamique-flou, point de vue précision.

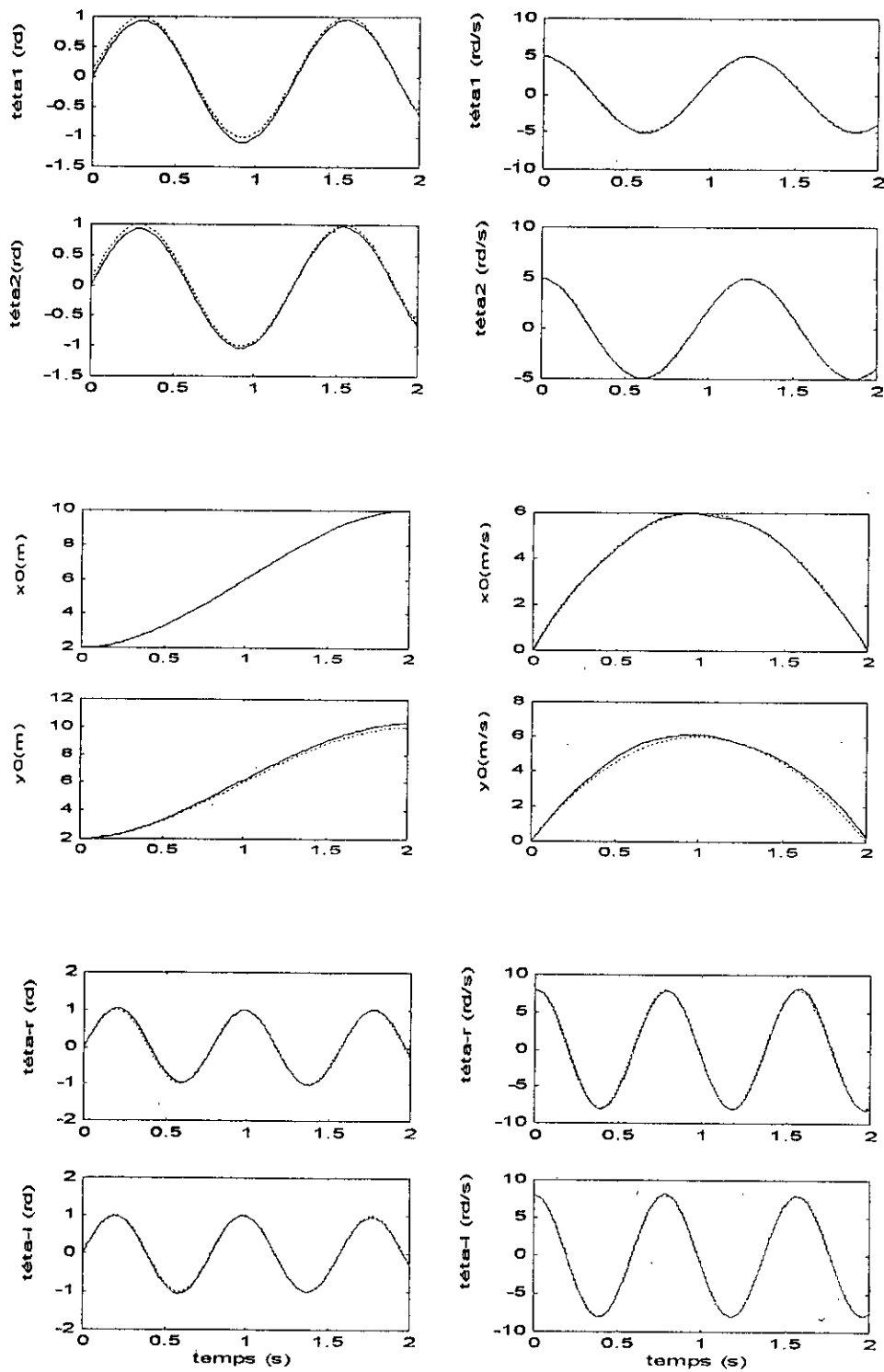


Figure IV.31 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques.

Légende :
 Les consignes
 — Les sorties réelles

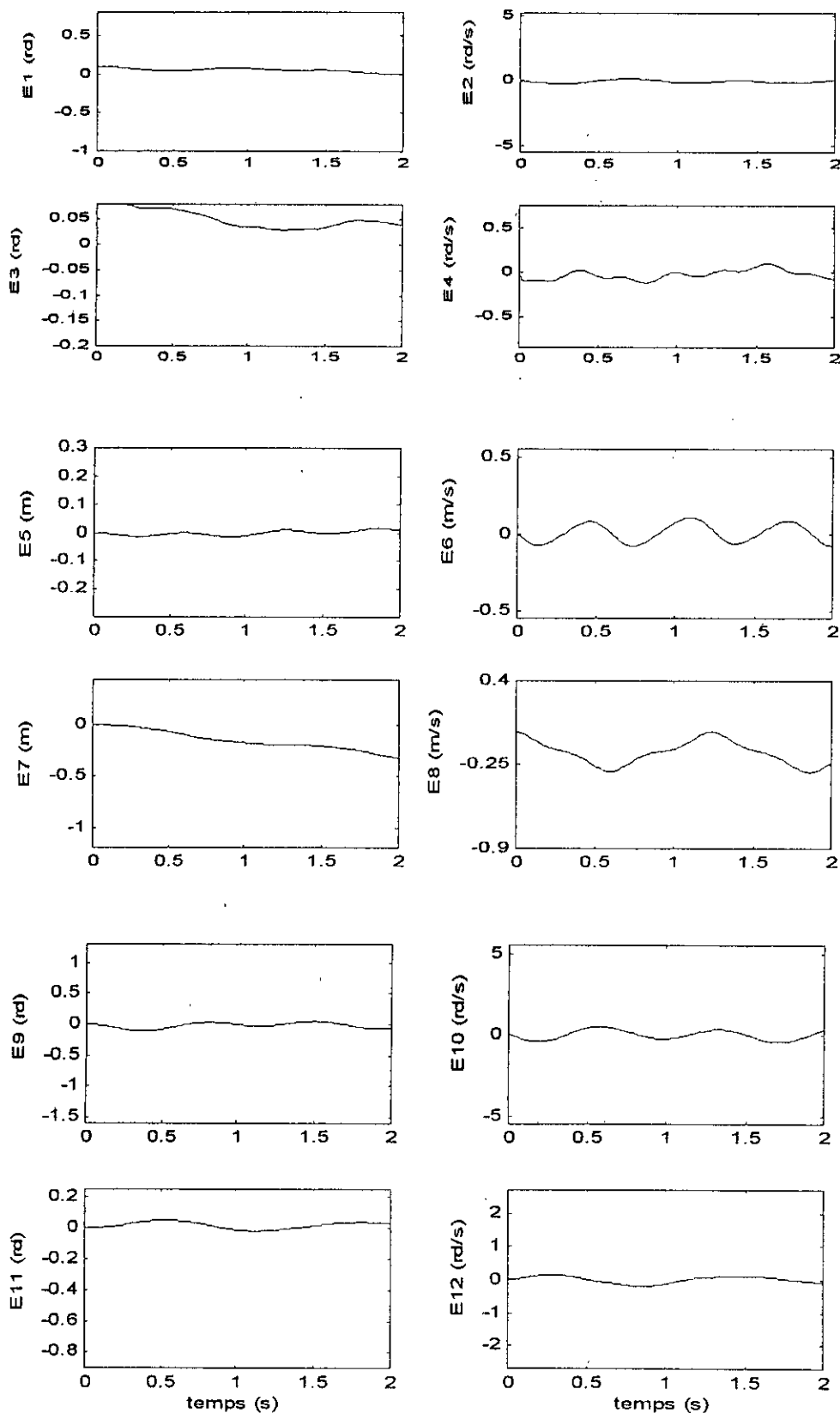


Figure IV.32 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques.

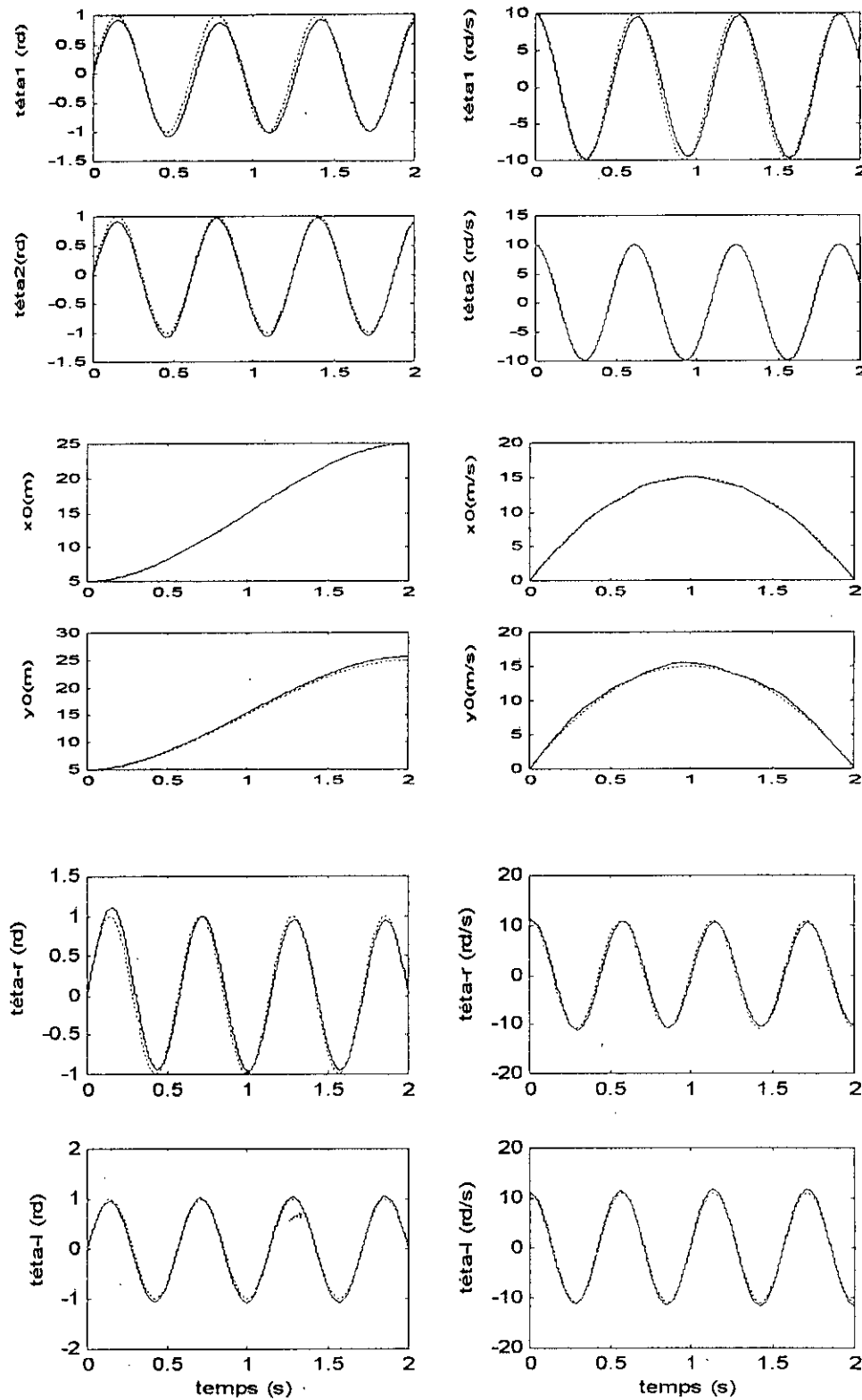


Figure IV.33 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-floue optimisée par les algorithmes génétiques.

Légende : Les consignes
 ————— Les sorties réelles

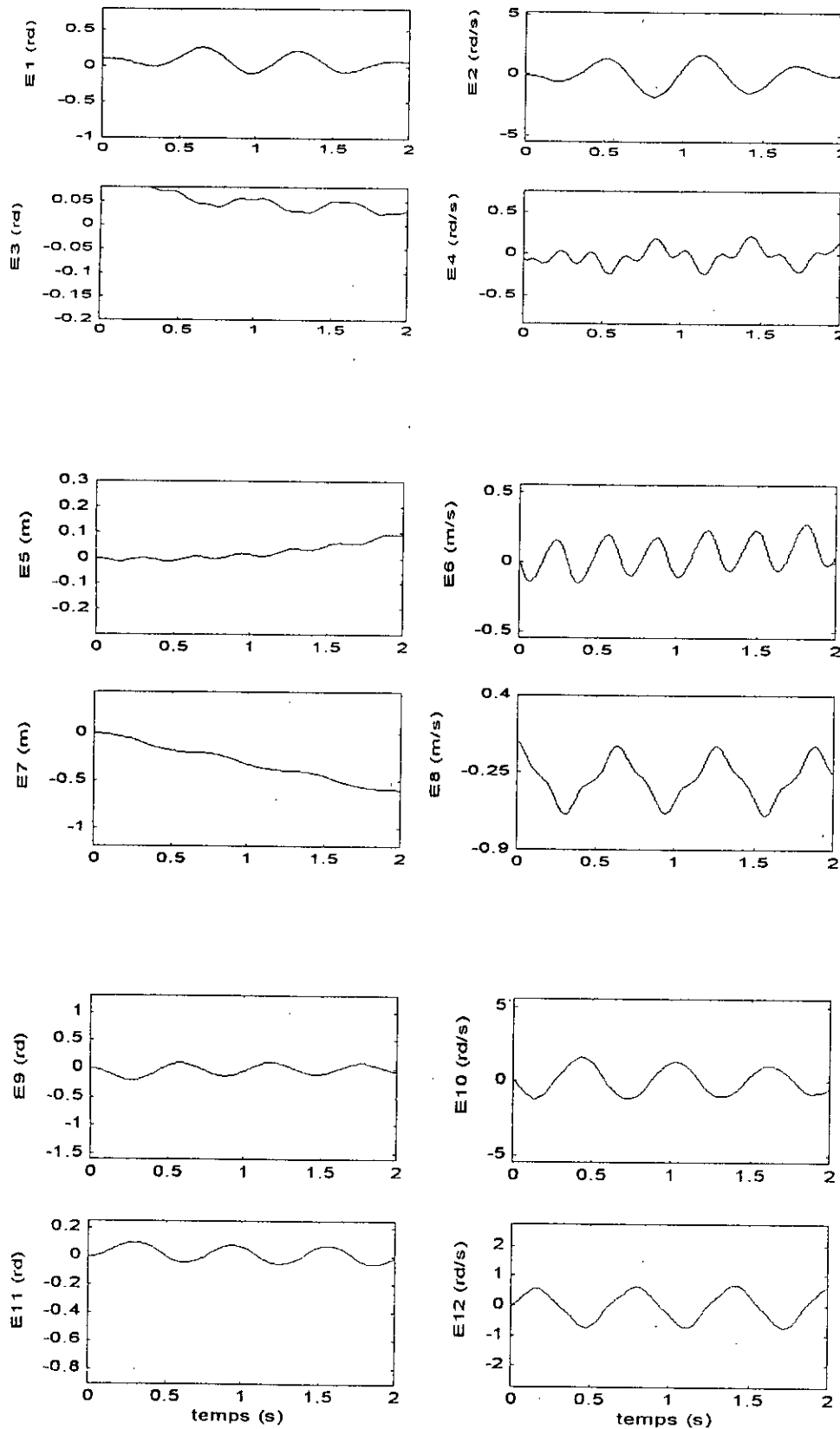


Figure IV.43 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques.

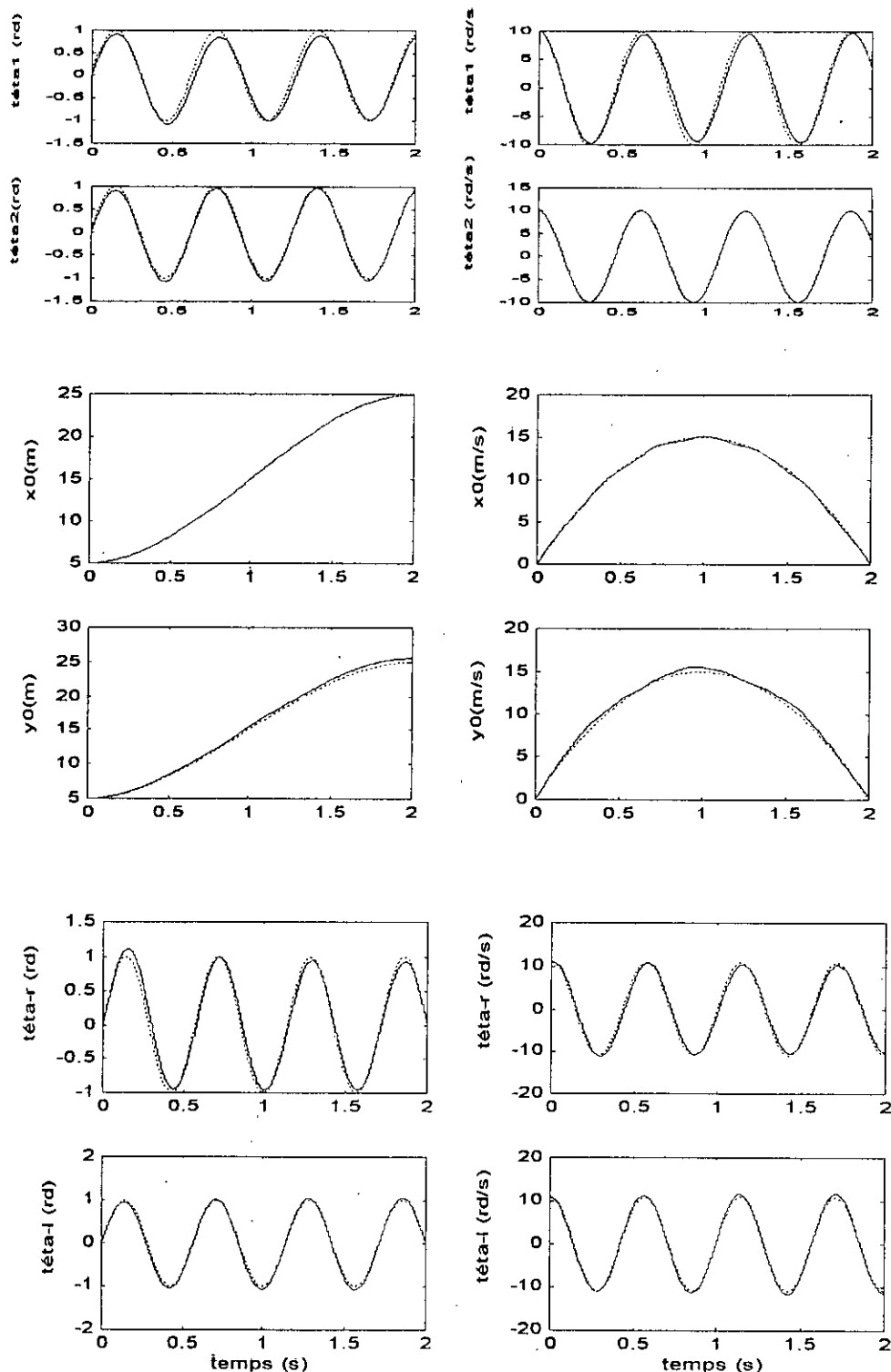


Figure IV.35 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande floue optimisée par les algorithmes génétiques.

Légende :
 Les consignes
 — Les sorties réelles

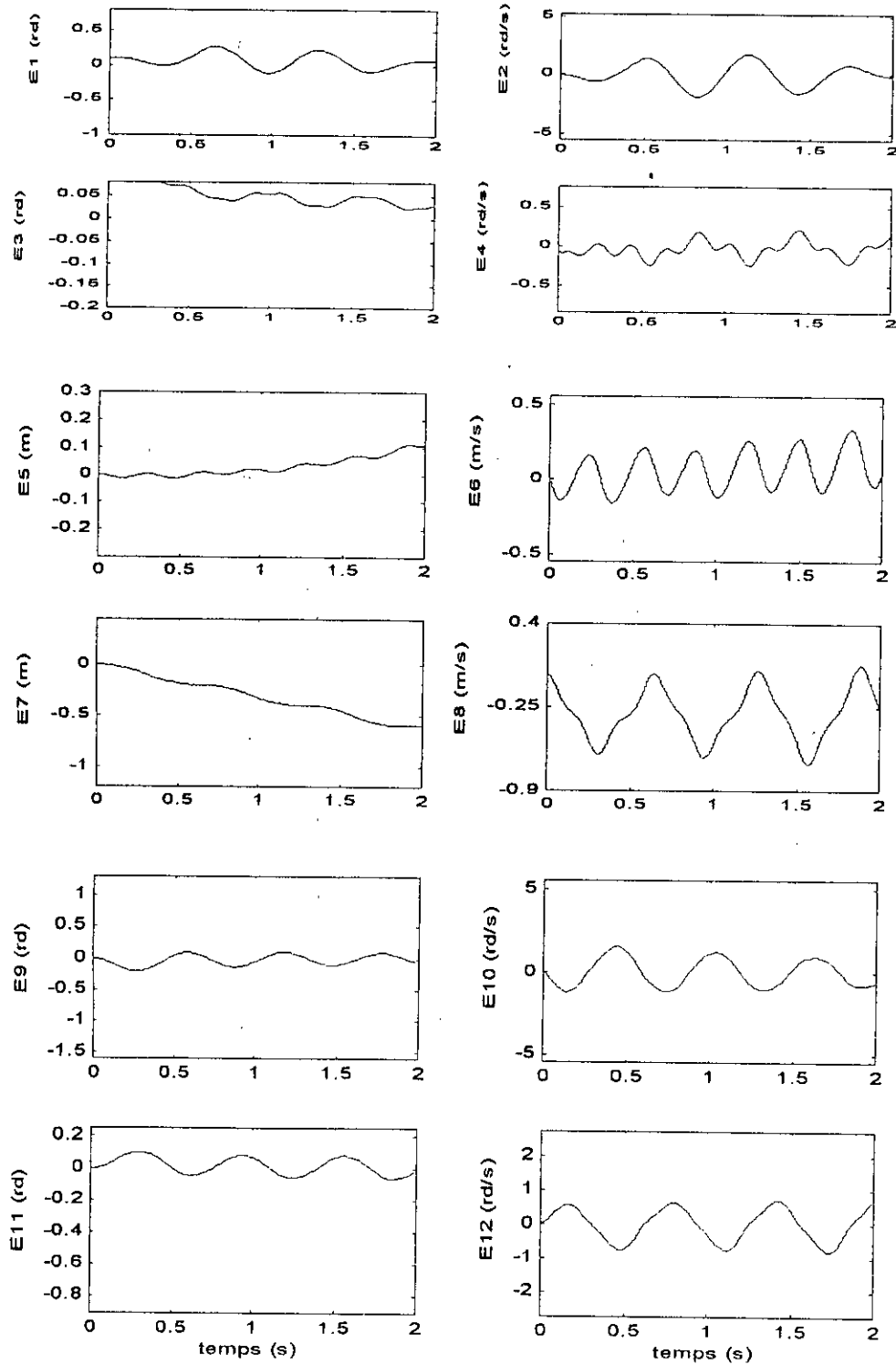


Figure IV.36: Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques

Le tableau (IV.9) ci-dessous résume les valeurs limites des erreurs absolues sur chaque variable.

Les Erreurs	Evolution à faibles vitesses			Evolution à vitesses élevées			Avec perturbation inertielle		
	min	moy	max	min	moy	max	min	Moy	max
E1	0,00	0,05	0,09	-0,10	0,05	0,25	-0,11	0,06	0,16
E2	-0,19	-0,04	0,18	-0,81	-0,02	1,64	-1,91	-0,01	1,77
E3	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09
E4	-0,12	-0,03	0,09	-0,24	-0,03	0,21	-0,24	-0,03	0,21
E5	-0,01	0,00	0,01	-0,01	0,02	0,09	-0,01	0,02	0,11
E6	-0,08	0,00	0,10	-0,15	0,04	0,27	-0,16	0,05	0,37
E7	-0,32	-0,14	0,00	-0,60	-0,30	0,00	-0,59	-0,30	0,00
E8	-0,30	-0,15	0,00	-0,60	-0,29	0,00	-0,68	-0,29	0,07
E9	-0,10	-0,81	0,05	0,20	-0,02	0,11	-0,20	-0,02	0,11
E10	-0,45	-0,02	0,49	-1,23	-0,02	1,55	-1,23	-0,02	1,56
E11	-0,01	0,01	0,04	-0,05	0,01	0,10	-0,06	0,01	0,10
E12	-0,19	0,01	0,15	-0,74	0,00	-0,68	-0,49	0,00	0,73

Tableau IV.9 : Résultats comparatifs du manipulateur mobile en appliquant la commande dynamique-floue optimisé par les algorithmes génétiques.

En résumé ; les résultats de simulation sont positif, étant donné que les essais effectués donnent de bons résultats comparant aux approches précédentes, point de vue précision des résultats.

IV.8 Commande dynamique-neuronale

Pour améliorer les performances de contrôle du système, la commande dynamique-neuronale, dont son principe est donnée au chapitre III, est appliquée au système manipulateur mobile. L'effet des termes d'interaction sont intégrés dans les lois de commande. Les résultats obtenus par cette commande pour les trois situations considérées (mouvement lent, mouvement rapide et mouvement rapide avec perturbation inertielle) sont illustrés aux figures IV.37 à IV.42.

Interprétations :

Concernant le bras, les résultats obtenus avec cette commande ont très bonnes précisions, les erreurs de poursuite en position et en vitesse des articulations sont presque négligeables, surtout dans le cas d'une évolution à faible vitesse, comme c'est montré au tableau IV.9. Par exemple, l'erreur E4 sur la vitesse de la deuxième liaison du bras manipulateur diminue de 60% de la grandeur de la consigne lorsque le système évolue à faibles vitesses à 30% lorsque le mouvement imposé est rapide.

Concernant la plate-forme, on a également une bonne poursuite en position et en vitesse pour les trois cas considérés quoiqu'un taux d'erreur négligeable. Par exemple, l'erreur E8 sur la vitesse de la plate-forme diminue considérablement de 15% de grandeur de la consigne lorsque le système évolue à faible vitesse à 1% lorsque le mouvement imposé est rapide.

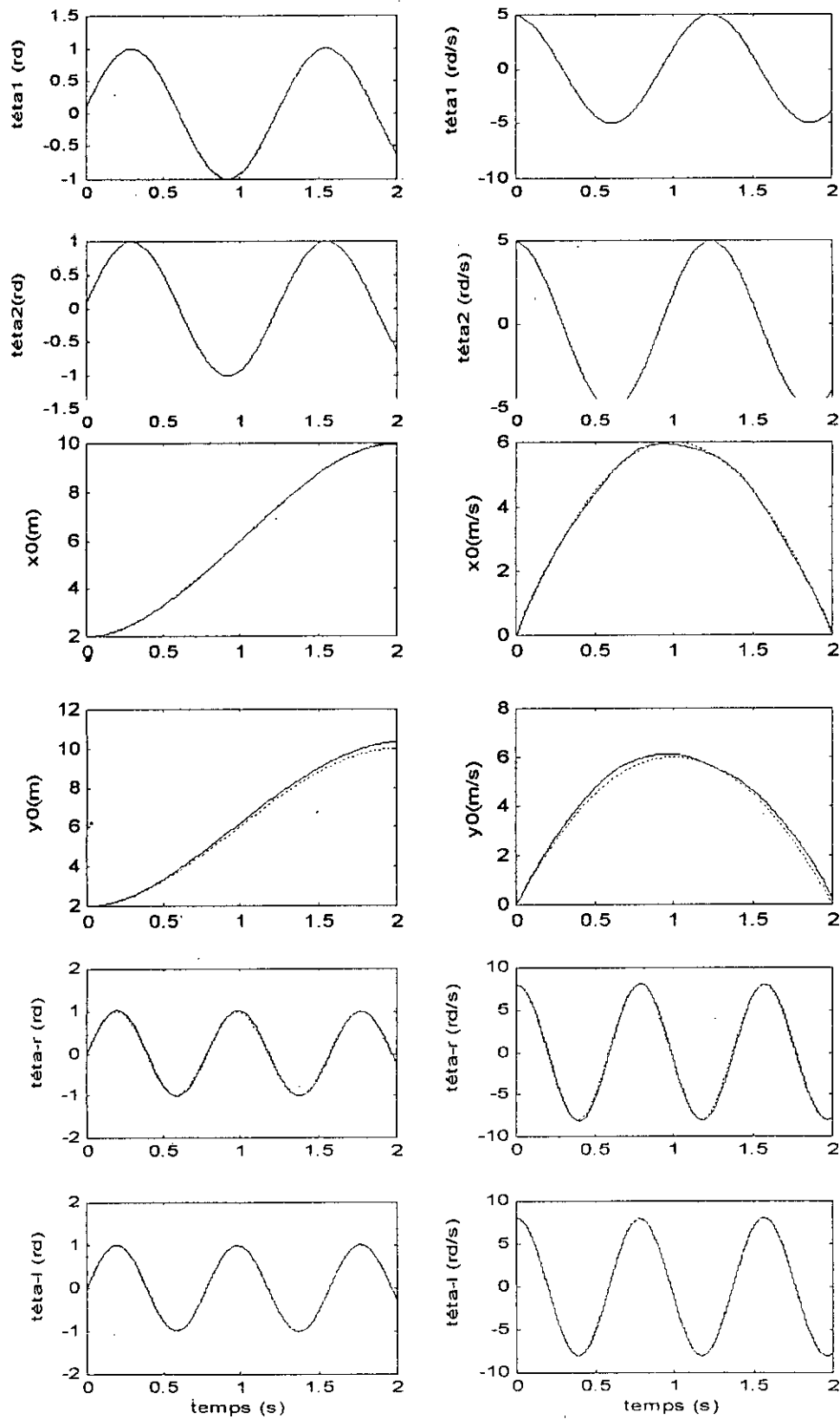


Figure IV.37: Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-neuronale.

Légende :
 Les consignes
 — Les sorties réelles

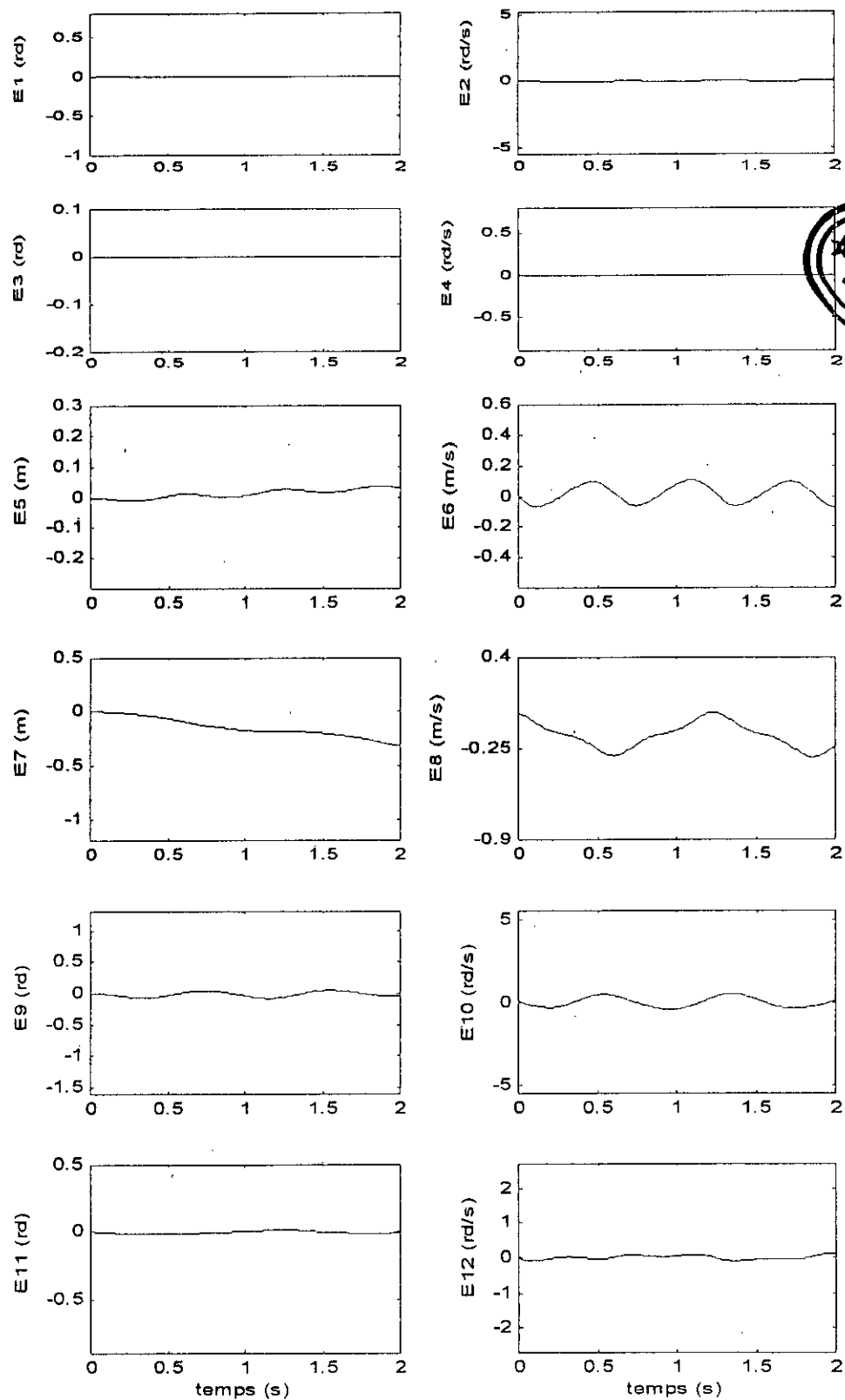


Figure IV.38 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à faible vitesses en appliquant la commande dynamique-neuronale

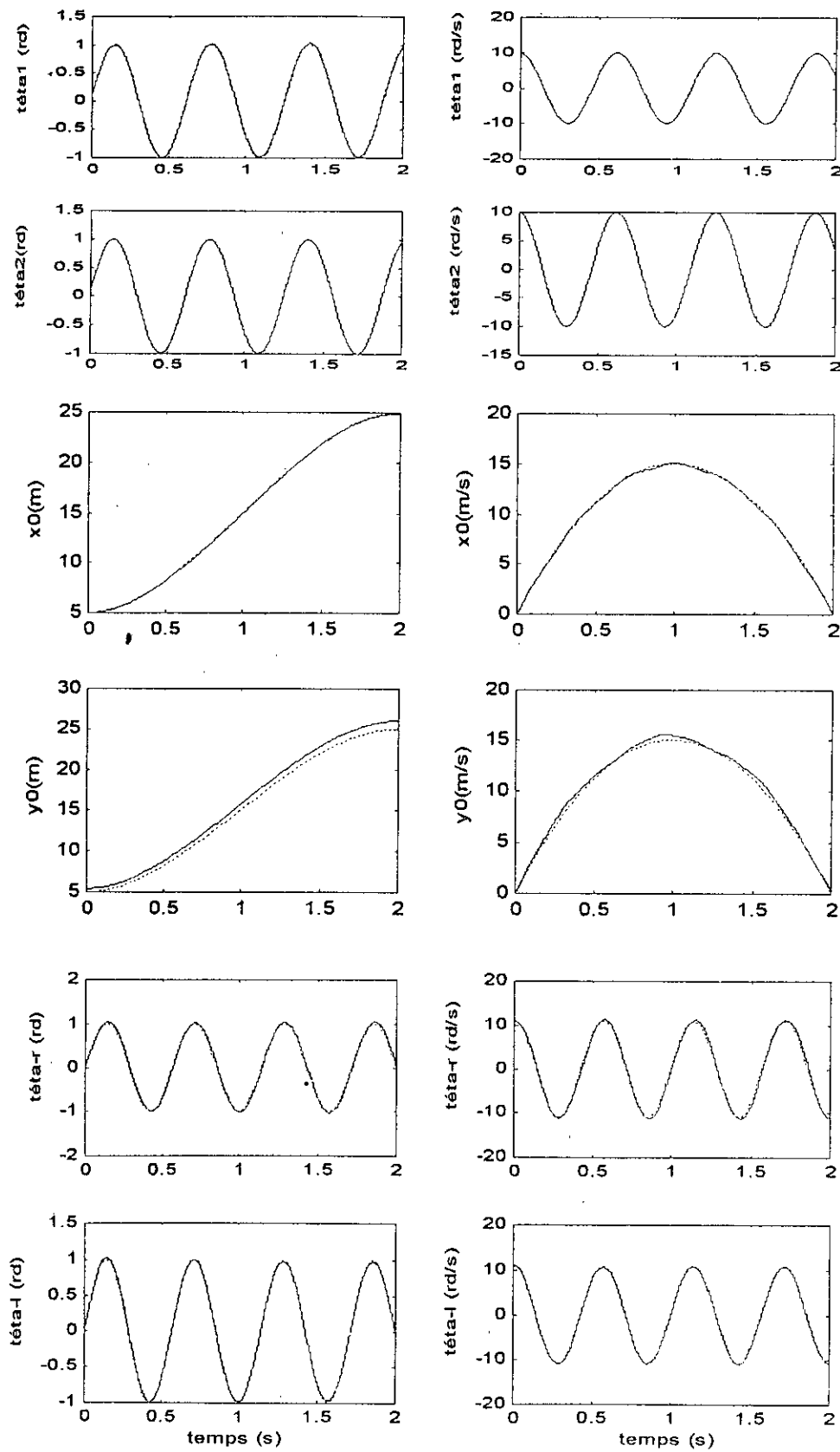


Figure IV.39 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-neuronale.

Légende :
 Les consignes
 ——— Les sorties réelles

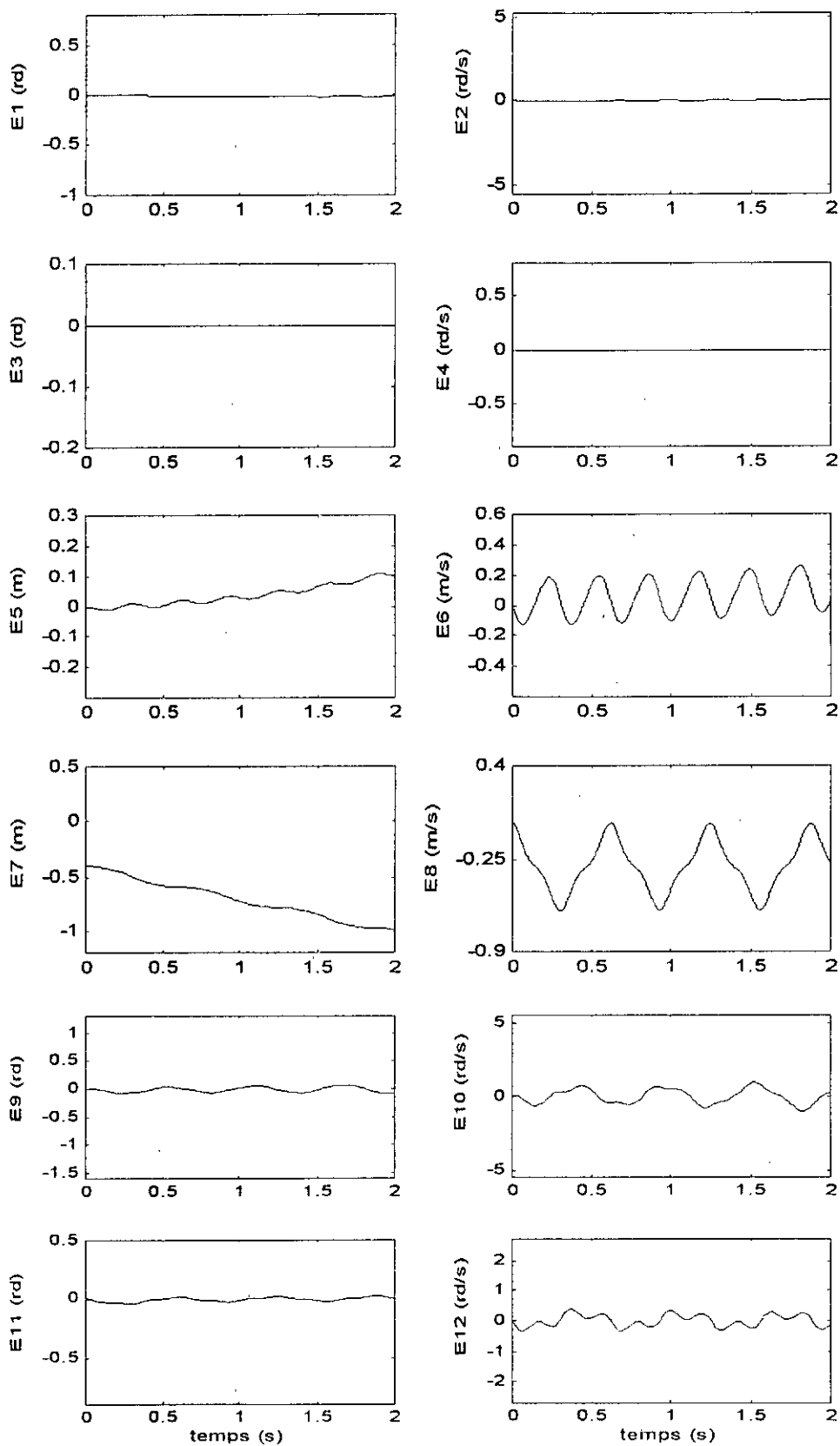


Figure IV.40 : Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées en appliquant la commande dynamique-neuronale

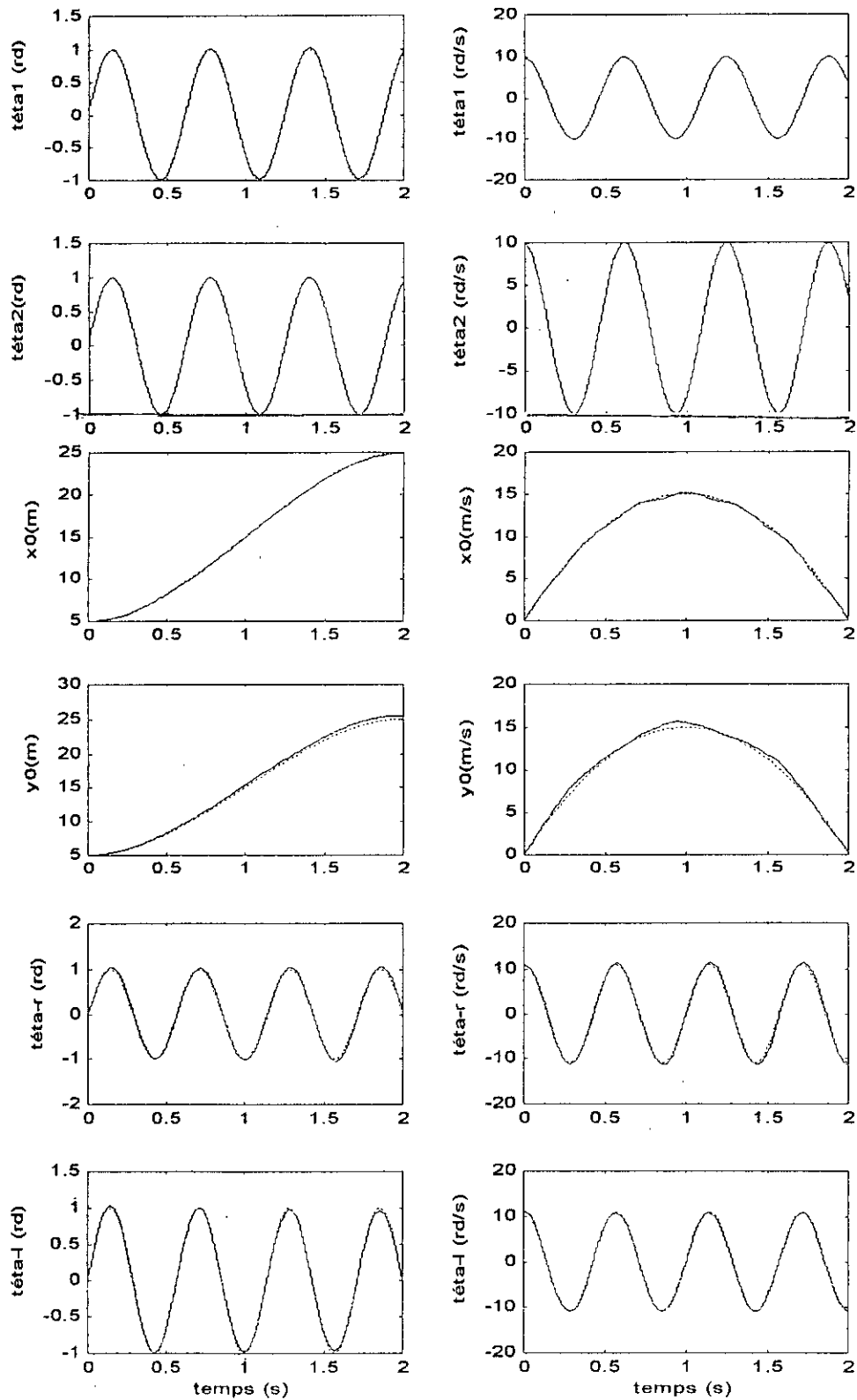


Figure IV.41 : Evolution des sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande dynamique-neuronale.

Légende : Les consignes
 Les sorties réelles

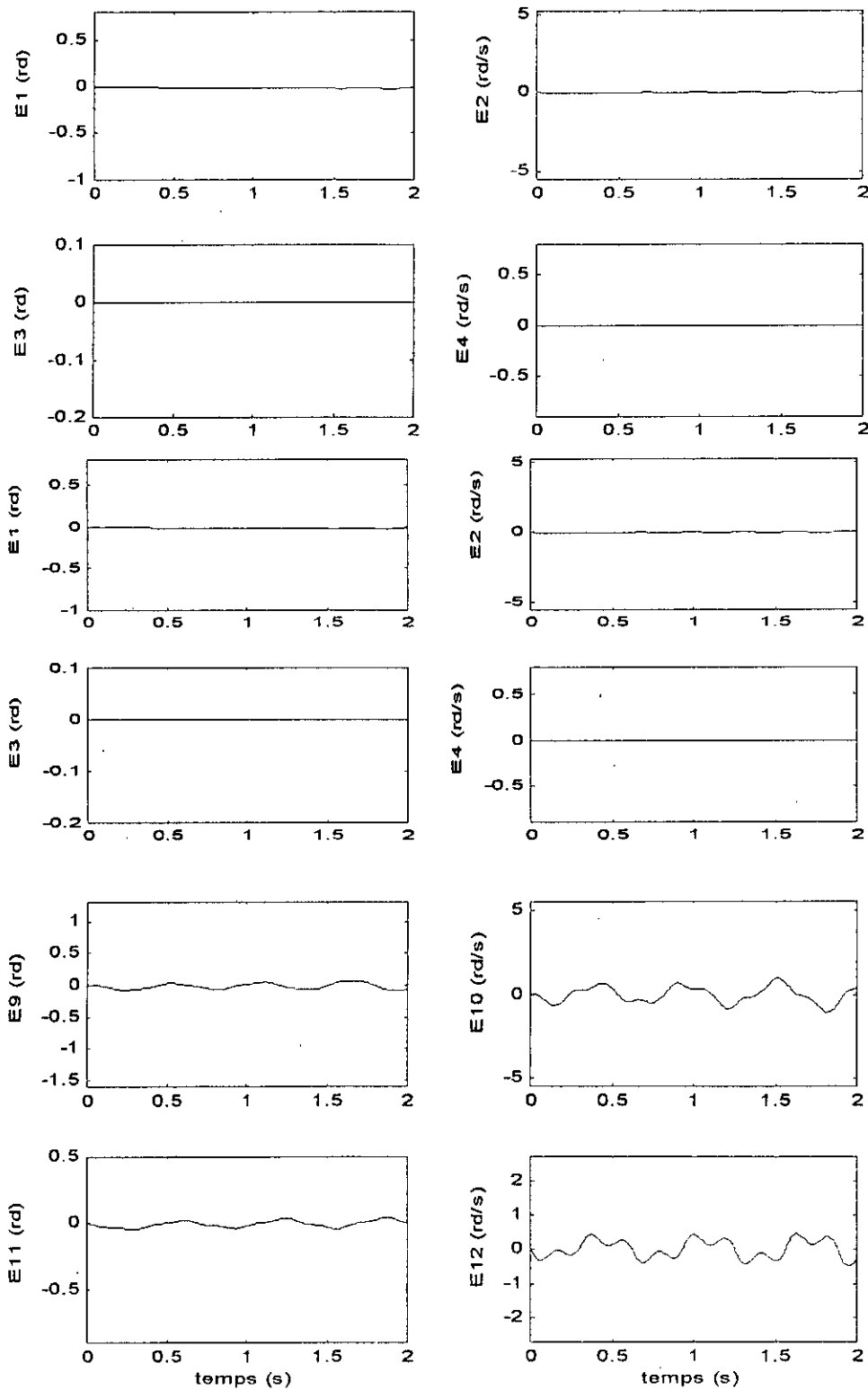


Figure IV.42: Les erreurs absolues sur les sorties du manipulateur mobile dans le cas d'une consigne à vitesses élevées avec perturbation inertielle en appliquant la commande dynamique-neuronale.

Le tableau (IV.10) ci-dessous résume les valeurs limites des erreurs absolues sur chaque variable.

Les erreurs	Evolution à faibles vitesses			Evolution à vitesses élevées			Avec perturbation inertielle		
	min	Moy	max	min	moy	max	min	Moy	max
E1	0,00	0,00	0,00	-0.02	-0.01	0,00	-0.02	-0,01	0,00
E2	-0,01	0,00	0,02	-0.05	-0.01	0,02	-0.05	-0,01	0,01
E3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E4	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E5	-0,01	0,01	0,03	-0.01	0,03	0,10	-0,01	0,04	0,12
E6	-0,07	0,01	0,10	-0.13	0,05	0,26	-0,14	0,05	0,35
E7	-0,31	-0,14	0,00	-0.99	-0,70	-0,40	-0,57	-0,30	0,00
E8	-0,31	-0,15	0,00	-0.61	-0,28	0,00	-0,75	-0,27	0,17
E9	-0,07	-0,01	0,05	-0.07	-0,01	0,06	-0,08	-0,01	0,06
E10	-0,43	-0,01	0,52	-1.04	-0,03	0,96	-1,08	-0,03	1,00
E11	0,01	0,00	0,01	-0.04	0,00	0,02	-0,04	0,00	0,04
E12	-0,09	0,00	0,11	-0.34	0,00	0,40	-0,49	0,00	0,46

Tableau IV.10 : Résultats comparatifs du manipulateur mobile en appliquant la commande dynamique-neuronale.

En résumé ; les résultats de simulation sont positif, étant donné que les essais effectués ont donné de bons résultats comparés aux deux commandes précédentes, point de vue précision des résultats, mais malheureusement cette approche demande un temps de calcul important qui représente la limite principale de cette approche.

IV.9 Comparaison

Vu l'importance du pourcentage des termes d'interaction qui est de 60% (pouvant atteindre les 80%), dans la commande de manipulateur mobile pour les tâches de suivi de trajectoire dans des conditions de fonctionnement les plus défavorables, (une perturbation inertielle est imposée au système pendant qu'il évolue à grande vitesse), conduisant ainsi à l'inutilité de cette commande puisque cette dernière ne peut pas suivre les consignes imposées au système. Nous avons donc remplacé la partie d'interaction par un simple module : neuronal ou floue.

Les simulations menées, ont montré l'efficacité et la robustesse des commandes proposées, vis à vis des variations des vitesses d'évolution du système et des variations de la charge transportée par l'organe terminal du manipulateur, puisque les essais effectués coïncident avec ceux du contrôleur dynamique complet et parfois mieux que ce dernier. Notons tout d'abord, nous noterons la grande facilité d'implémentation des types de contrôleurs floue et neuronal.

Du point de vue rapidité, le contrôleur floue et dynamique-floue présentent des temps de réponses nettement meilleur pour les quatre axes du manipulateur mobile, que ceux réalisés par les commandes : dynamique, neuronal et dynamique-neuronal, ainsi qu'il est indiqué sur le tableau ci-dessous.

Le temps de réponse (second)					
Axes	Commande dynamique	Commande floue	Commande neuronal	Commande dynamique-floue	Commande Dynamique-neuronal
Axe 1	1,5	1	3,5	1,75	7,5
Axe 2	1,25	1	2,5	1,25	6
Axe 3	1	1	4,5	1	5,25
Axe 4	1,25	1,25	4,5	1,25	5

Tableau IV.11 : temps de réponses de cinq contrôleurs appliqués au manipulateur mobile.

En mode de poursuite, le manipulateur mobile était chargé de la masse de 4 kg celle-ci augmente progressivement ; le système arrive à poursuivre les consignes imposées avec les cinq contrôleurs étudiés.

La précision de poursuite du contrôleur à réseaux de neurone par la dynamique du système est meilleure que celles des quatre contrôleurs telle qu'il a été indiqué sur le tableau (IV.11) représentant les valeurs limites des erreurs absolues de la poursuite de trajectoire dans les trois situation considérées.

IV.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulations du comportement du manipulateur mobile vis à vis des variations de leurs vitesses d'évolution et des variations de leurs caractéristiques inertielles.

Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des lois de commande de deuxième classe, ceci est dû au fait que les essais effectués coïncident avec ceux du contrôleur dynamique. Ce dernier possède de nombreux travaux théoriques et pratiques montrant ses vertus du point de vu robustesse [24].

Vu les avantages et les inconvénients des lois de commande des deux classes, les résultats de l'approche hybride (commande dynamique-neuronal, commande dynamique-floue) montrent leur efficacité et robustesses surtout dans les conditions les plus défavorables (évaluation à grande vitesse en présence de perturbation inertiel).

Nous concluons que les trois classes de commande sont robustes, alors que les vertus de la commande hybride sont mieux perceptibles sur un système à dynamique rapide et non linéaire, car ces commandes décrivent l'intégralité des phénomènes dynamiques agissant sur le système, ainsi que le couplage entre les deux sous-systèmes au cours de l'exécution des tâches de suivi de trajectoire.

Enfin, on trouvera dans le tableau IV.12, un résumé des principaux avantages, inconvénients pour chaque type de commande.

		AVANTAGES	INCONVENIENTS
Commande de Classe 1	Commande dynamique	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mieux adaptée à des manipulateurs mobiles à grandes vitesses et demandant une grande précision. <input type="checkbox"/> Commande idéale. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Commande non réalisée en temps réel. <input type="checkbox"/> Pour être efficace elle exige un élaboration fastidieuse du modèle dynamique et une identification très précise de ses paramètres.
Commande de Classe 2	Commande Neuronale	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Autorise la commande en temps réel. <input type="checkbox"/> Facilité d'implantation, 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Non adaptée à des applications qui demandant une grande précision. <input type="checkbox"/> Non compensation des effets d'interaction du manipulateur mobile.
	Commande floue	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Facilité d'implantation, <input type="checkbox"/> Son fable coût (implémentation, temps de calcul). 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Non adaptée à des applications qui demandant une grande précision. <input type="checkbox"/> Non compensation des effets d'interactions du manipulateur mobile. <input type="checkbox"/> les définitions des règles sont affectées par des décisions subjective.
Commande de Classe 3 (hybride)	Commande dynamique-floue	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Implantation aisées. <input type="checkbox"/> Autorise une commande en temps réel. <input type="checkbox"/> Elle prévoit la compensation de tous les phénomènes dynamique auxquels le manipulateur mobile est sujet. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> les définitions des règles sont affectées par des décisions subjective.
	Commande dynamique-floue optimisée par les algorithmes génétiques	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Implantation aisées. <input type="checkbox"/> Autorise une commande en temps réel. <input type="checkbox"/> Elle prévoit la compensation de tous les phénomènes dynamique auxquels le manipulateur mobile est sujet. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Problème de choix des paramètres de la commande
	Commande dynamique-neuronale	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Implantation aisées. <input type="checkbox"/> Mieux adaptée à des applications qui demandant une grande précision. <input type="checkbox"/> Elle prévoit la compensation de tous les phénomènes dynamique auxquels le manipulateur mobile est sujet. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Problème de choix des paramètres de la commande

Tableau IV.12 : Tableau récapitulatif des principaux avantages et inconvénients des trois classe de commande utilisées.

CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

Au terme de ce manuscrit, et en récapitulatif de notre travail, nous proposons d'analyser globalement les résultats obtenus dans les différentes phases de cette thèse, de les comparer et enfin d'établir quelques lignes de perspectives qui nous paraissent les plus intéressantes pour la finalisation et l'atteinte des objectifs escomptés au début de l'étude.

Nous avons présenté dans ce mémoire la modélisation et le contrôle des manipulateurs mobiles. Le manipulateur mobile considéré ici consiste en un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile ; il combine la capacité de manipulation des manipulateurs et la mobilité des robots mobiles.

Après avoir donné un bref aperçu sur l'aspect dynamique de ce genre de système, ceci nous a amené à utiliser le formalisme de la mécanique analytique de Lagrange. La forme générale du modèle dynamique obtenu est valable pour tout manipulateur mobile composé d'une plate-forme mobile non-holonome à deux roues motrices et un bras manipulateur à n liaisons rotoides et/ou prismatiques.

On a ensuite spécifié ce modèle (dynamique) dans le cas d'un manipulateur mobile composé d'une plate-forme mobile et d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté.

L'objectif principal vise est de comparer les performances de robustesse de deux classes de commandes complètement différentes sur le plan logique puis finalement de les combiner afin d'élaborer une commande hybride (mixte) sommant et reliant les avantages tout en s'affranchissant des inconvénients des lois de commande mères.

Les résultats de simulation montrent les performances des deux classes de commandes étudiées. D'une part, la commande dynamique qui représente un aspect classique nécessitant un modèle mathématique, a prouvé sa robustesse vis à vis des interactions entre les axes. D'autre part, les commandes floue et neuronale dans lesquelles évitant le recours à un modèle mathématique exact du système à commander.

Cette étude en simulation, elle a également permis de dégager les problèmes inhérents à chacun des types précédents.

Nous avons donc préconisé, à l'issue de cette étude, l'emploi des commandes mixtes à la fois dynamique et neuronale ; dynamique et floue ; en exploitant les capacités de chaque commande et en compensant ses faiblesses.

A la fin de ce travail, un certain nombre de remarques peuvent être faites pour des travaux futurs.

Les méthodes développées et les algorithmes implantés peuvent être améliorés ; il existe d'autres voies envisageables pour réaliser cette tâche. Pendant la réalisation de ce travail, beaucoup d'idées ont germées, suite à des réflexions sur des problèmes rencontrés. Certaines ont été exploitées, d'autres demandent encore réflexion, pour bien mûrir et donner naissance à de nouvelles conceptions, ou à une nouvelle manière de voir les choses. Nous en citons quelques unes :

- La possibilité d'une implantation sur une architecture parallèle peut être envisagée ; ainsi ; l'exécution de ces méthodes de contrôle en temps réel pour des applications spécifiques dans le domaine industriel, serait très intéressante.
- Actuellement les algorithmes de contrôle fonctionnent de manière séquentielle ; on peut améliorer le traitement en le rendant parallèle.
- L'implémentation de ces lois de commandes sur un support matériel adéquat et la résolution des problèmes liés à l'étape de réalisation pratique.
- Aussi il est intéressant d'aborder le problème de la commande pour un multi-manipulateur mobile. Ce problème est d'actualité d'autant plus qu'en pratique une cellule flexible de production comprend plusieurs manipulateurs mobiles en général.

BIBLIOGRAPHIES


BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.Fliess : *“Automatique et corps différentiels”*.
Forum Math, Vol. 1, 227-238, 1989.
- [2] M.Renaud et P.Dauchez : *“Modélisation et commande des Manipulateurs Mobiles”*.
Rapport LAAS du CNRS (Toulouse), Octobre 1999.
- [3] Y.Yamamoto et X.Yun : *“Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator”*. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta(USA), pages 157-181, Mai 1993.
- [4] U..M.Nassal, M.Damm & T.C.Lueth *“A Mobile Platform Supporting a Manipulator System for an Autonomous Robot”*. In fifth World Conference on Robotics Research, Cambridge (Massachusetts), pages 121-127, September 1994.
- [5] T.C.Lueth, U.M.Nassal & U.Rembold *“Reliability and Integrated Capabilities of Locomotion and Manipulation for Autonomous Robot Assembly”*. Journal on Robotics and Autonomous Systems, Special Issue : Research on Autonomous Mobile Systems, Germany, pages 185-198, 1995.
- [6] O.Khatib, K.Yokoi, K.Chang, D.Ruspini, R.Holmberg, A.Casal & A.Baader *“Force Strategie for Cooperative Tasks in Multiple Mobile Manipulation Systems”*. In Proc. International Symposium of Robotics Research, Munich (Germany), October 1995.
- [7] P.Tompson, G.Rabatel, F.Pierrot, A.Liégeois et F.Sévila *“Performance Comparison of Various Control Strategies for a Mobile Manipulator”*. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages : 473-479, 1995.
- [8] G.Foulon *“Génération de Mouvements Coordonnés pour un Ensemble Constitué d'une Plate-forme Mobile et d'un Bras Manipulateur”* (Thèse de doctorat). Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS, Toulouse, soutenue le 05 Octobre 1998.
- [9] K.Inoue, T.Miyamoto & Y.Okawa *“Impedence Control of Mobile Manipulator with the Stability to External force”*. In Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka (Japan), pages 721-728, November 1996.
- [10] W.Mikch & D.Schroeder *“Performance-functional Based Controller Design for a Mobile Manipulator”*. In proc. Of 1992 International Conference on Robotics and Automation, pages 227-232, Nice, France, May 1992.
- [11] H.Seraji *“An on-line Approach to Coordinated Mobility and Manipulation”*. In Proc. Of 1993 International Conference on Robotics and Automation, pages 28-35, Vol n°1, Atlanta, GA, May 1993.
- [12] N.A.M.Hootsmans *“The experimental Performance of a Mobile Manipulator Control Algorithm”*. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages : 1948-1954, Nice, France, May 1992.
- [13] Y.Yamamoto & X.Yun *“Effet of the Dynamic Interaction on Coordinated Control of Mobile Manipulator”*. In Proc. Of IEEE Vol 12 (oct 1996).

- [14] M.Hatanö, M.Minami, T.Asakura, Y.Takahashi & M.Ichimura "Motion Control of Mobile Manipulators Moving on Waved Road Surfaces Using Neural Networks". In Proceeding of IEEE/IRIS, pages : 277-282, 1996.
- [15] M.Kurisu & T.Yoshikawa "Tracking Control for an Object in Pushing Operation". In Proc. IROS 96, pages : 729-736, IEEE96.
- [16] S.Yuta & K.Nagatani "Desining Strategies and Implementation of Mobile Manipulator Control System for Opening Door". In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, pages 2828-2834, April 1996.
- [17] Lu, Z. Shimoga, K. B. and Goldenberg, A. A "Experimental Detrmination of Dynamic Parameters of Robotic Arms", Journal of Robotic Systems. (By John Wiley and Sons inc,ed). Vol.10, No.8, pp. 1009-1029. (1993)
- [18] Cichocki, A. and Unbehauen, R. "Neural Networks for Optimization and Signal Processing". John Wiley & Sons Ltd. &B.G.Tenbner. (1993).
- [19] Billing S., Jamaluddin, H. B., and Chen S, "A comparison of the backpropagation and recursive prediction error algorithms for training neural networks", Mechanical System and Signal Processing, Vol.5, No.3, pp 233-255. (1991)
- [20] Billing S. and Chen S. "Neural networks and system identification" In Neural Networks for control and systems Edited by K. Warwick, G.W Irwin, K.J.Hunt. Peter Peregrinus.(1993).
- [21] Burrows T.L.ans Niranjan M, "The use of feed-forward and recurrent neural networks for system identification", TR 158, Engineering Departement, Cambridge University, Trumpington Street Cambridge CB 1PZ England, (1993).
- [22] Hunt K.J. and Sbarbaro D, "Studies in neural network based control", in Neural Networks for control and systems, K.Warwick, G.W.Irwin, and K.J.Hunt(Editors) (1992).
- [23] Johnson M.A, and Leahy.Jr. M.B, "Adaptive Model-Based Neural Network Control", proceeding of the IEEE International Confirence on Robotics an Automation, pp 1704-1709, (1990).
- [24] C.Abdallah, D.Dawson, P.Dorato & M.Jamshidi, "Survey on robust control for rigid robot, Robot Control, Dynamics, Motion planning & analysis", edited by Mark W.Spong F.L.Lewis,C.T.Abdallah, IEEE Press (1991).
- [25] H.Asada & J. J. E. SLOTINE "Rorot analysis and control", A. WILET-inyerscience publication, John WILEY and sons, (1986).
- [26] Pierro P. Bonissone & Kenneth H.Chiang "Fuzzy logic Hierarchical Controller for a Recuperativee Turboshafft Engine" General Electric research & Development Center Schenectady (1998).
- [27] P.de Larminat, "A survey on robust control", Porceedings of IMACS-IFAC symposium, Lille, pp243-253, France 1991.

- [28] Kevin M. Passino & Stephen Yurkovich '*Fuzzy Control*', Addison Wesley (1998).
- [29] H. Sira Ramirez, S. Ahmed & M. Zeribi '*Dynamical feedback control of robotic manipulators with joint flexibility*', IEEE transactions on systems man and cybernetics, Vol. 22, N°4, 736-747, (1992).
- [30] L.A. Zadeh '*Fuzzy Algorithms. Information Control*' (1969).
- [31] H.J.Zimmerman '*Fuzzy Set Theory & its Applications*', Second Revised Kluwer Academic Publishers (1991).
- [32] M. J. H. Sterling, '*Fuzzy Control and Fuzzy Systems*', 1989.
- [33] S. S. Neo, M. J. ER, '*Adaptative fuzzy controllers of a robot manipulator*', INT J SYSTSCI, Vol 27, N° 6,PP 519-532, (1996).
- [34] R.Jager, H. B. Verbruggen, P. M Bruijn, '*The role of defuzzification methods in the application of fuzzy control*', Proceedings IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for control Applications, Malaga, Spain, May (1992).
- [35] P.Bourret, J.Reggia et M.Samulides '*Réseaux neuronaux*'. Une approche connexioniste de l'intelligence artificielle – Teknéa (1991).
- [36] Tahboub.K.A '*Robust control of an autonomous mobile manipulator*'. Proceeding of intelligent control ; IEEE (july 1997).
- [37] Sugar.T ; Kùmar.V '*Multiple cooperating mobile manipulators*' ; Proceedings of Robotic and Automation. IEEE , Vol 2 (May 1999)
- [38] Chen.M.W ; Zalzala.A.M.S ; Sharkey.N.E '*Towards comparative study of neural networks in inverse model learning and compensation applied to dynamic robot control*' ; conférence, Pub N°, 440 (july 1997)
- [39] Wenjie.D ; Yangsheng.X ; Qi.Wang '*On tracking control of mobile manipulators*', Proceedings of Robotics and Automation ICRA, IEEE Vol 4 (April 2000).
- [40] Nelson.S.C ; Haire.M.J ; Schryver.J.C '*Network-simulation modeling of interactions between maintenance and process systems*'. Proceedings of Reability an maintainability symposium (jan 1992).
- [41] Yamamoto.Y ; Xiaoping.Y '*Task space analysis of multiple mobile manipulator system*'. Proceeding of computational intelligence in Robotics and automation, IEEE (1999).
- [42] Yamamoto.Y ; Xiaoping.Y '*Unified analysis on mobility and manipulability of mobile manipulators*'. Proceedings of Robotics and automation IEEE. Vol 02 (1999).
- [43] Yamamoto.Y ; Xiaoping.Y '*Modeling and cnpensation of dynamic interaction of a mobile manipulator*'. Proceeding of Robotics and automation. Vol 3 (May 1994)
- [44] Kai-Tai.S ; Tian-Zeng.W '*Visual servo control of a mobile manipulator using one-dimensional windows*'. Proceedings of industrial Electronics Society IEEE. Vol 2 (1999).

- [45] Furtwangler.R ; Hanebeck.U.D ; Schmidt.G "Dynamic control of a mobile manipulator". AMC (1998).
- [46] M.Xiaouei ; Yili.F ; Yufei.Y ; Wang.W ; M.Yulin ; Cai.H "The planing of mobile manipulator with genetic-fuzzy controller in flexible manufacturing cell". Proceedings of Robotics and Automation . IEEE. Vol 01 (1999).
- [47] W.Mikch & D.Schroeder "Performance-functional Based Controller Design for a Mobile Manipulator". In proc. Of 1992 International Conference on Robotics and Automation, pages 227-232, Nice, France, May 1992.
- [48] Sugar.T ; Kuar.V "Decentralized control of cooperating mobile manipulators". Proceeding of Robotics and Automation. IEEE Vol 04 (May 1998).
- [49] Dennier.C ; Dauchez.P ; Pierrot.F "Towards the use of dual quaternions for motion generation of nonholonomic mobile manipulators". Proceedings of intelligent Robots and Systems, IROS (Sep 1997).
- [50] Hatano.M ; Minani.M ; Asakura.T ; Takahashi.Y ; Ichimura.M "Motion control of mobile manipulators moving on waved road surfaces using neural networks". Proceedings of Advanced Motion control. (March 1996).
- [51] Yamamoto.Y ; Xiaoping.Y "Control of mobile manipulators following a moving surface". Proceedings of Robotics and Automation. Vol 03 (May 1993).
- [52] Nakamura.D ; Murakami.T ; Ohnishi.K "Configuration control of a mobile manipulator in pushing operation". AMC'98 (July 1998).
- [53] Hyoung.K ; Takubo.T ; Arai.H ; Tanie.K "Control of mobile manipulators for power assist systems". Proceedings of systems, man, and cybernetics. IEEE. Vol 04 (Oct 1999).
- [54] Tchou.K ; Muszynski.R "Instantaneous kinematics and dexterity of mobile manipulators". Proceedings of Robotics and Automation. IEEE Vol 3 (April 2000).
- [55] Hootsmans.N.A.M ; Dubowsky.S ; Mo.P.Z "The experimental performance of a mobile manipulator control algorithm". Proceedings of Robotics and Automation. Vol 03(May 1992)
- [56] Chung.J.H ; Velinsky.S.A "Robust control of a mobile manipulator-dynamic modeling approach". Proceedings of the 1999. American control conference. Vol .4 (June 1999).
- [57] Y.Yamamoto "Control and Coordination of Locomotion and Manipulation of Wheeled Mobile Manipulator" (Phd Thesis), Grasp Laboratory , University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, August 1994.
- [58] T.Arai; S.Matsumura;Y.Yoshimura "Aproposal for a wire suspended manipulator". Proceedings of Robotics and Automation Robotic. Volume 17, PP.3.9 (1999).
- [59] Hootsmans.N A.M; Dubowsky.S ; Mo. Patrick z "Large motion control of an experimental mobile manipulator with limited sensig", P'roduction Engineering Researc Laboratory, Japan e; MA 02139 USA .

- [60] **G.Campion, G.Bastin & B.d'Andréa Novel** " *Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots* ". IEEE Transactions of Robotics and Automation, vol 12, n° 1, pages 47-62, Mars 1996.
- [61] **Eric Dvalo-PATRICK NAIM** " *les réseaux de neurones* ". Edition Eyrolles (1989).
- [62] **Costas.S ; Tzafestas Spyros.G** " *Full-state modeling, motions planning and control of mobile manipulators* ". Journal
- [63] **B.Boukhtala ; F.Boudjema ; M.Djebiri ; M.S.Boucerit & N.K.M'sirdi** " *Decentralized supervised control using neural networks with application to robotic manipulators* ". A.J.O.T, International publication, Série B, Vol 14 N°1 (1999).
- [64] **Kumpati.S.N et Kannan.P** " *Gradient methods for the optimisation of dynamical systems containing neural networks* ". IEEE transaction on neural networks, N°2, (Mach 1991). 
- [65] **Billing.S and Chen.S** " *Neural networks and system identification* ", In Neural networks for control and systems Edition by K. Warwick, G.W Irwin, K.J.Hunt. Peter Peregrinus. (1992)
- [66] **M.Saad ; L.A.Dessaint ; P.Bigras et K.AL.Haddad** " *Adaptive versus neural adaptive control : Application to Robotics* ". International journal of adaptive control and signal processing vol 8, 223-236 (1994).
- [67] **M.Saad ; P.Bigras ; L.A.Dessaint et K.AL.Hadad** " *Adaptive Robot control using neural network* ". IEEE transactions on industrial electronics, vol 41, N°2, (April 1994).
- [68] **Asriel.U.L et Kumpati.S.N** " *Control of nonlinear Dynamical systems using neural network* " Part II : observability, identification, and control. IEEE, transaction on neural networks, vol 7, N°1, (January 1996).
- [69] **Kumpati.S.N et Kannan.P,** " *Identification and control of dynamical systems using neural networks* ". IEEE transaction on neural networks, vol 1, N°1, (March 1990).
- [70] **K.J.Hunt ; D.Sbarbaro ; R.Zbikowski et P.J.Grawthrop,** " *Neural networks for control systems- A Survey* " Vol 28, N°6, (1992).
- [71] **S.Bellakhal,** " *Génération de mouvements et commande coordonnée d'une robot manipulatrice mobile* ". Thèse de Magistère, Institut d'électronique, Université de Blida (2001).
- [72] **M.A.Aitouazzou** " *Optimisation du rendement d'un contrôleur flou par les algorithmes génétiques* ". Mémoire d'ingénieur, Université de Blida, octobre 1999.
- [73] **A.Homaifar ; M.Bikdash ; V.Gopalan,** " *Design genetic algorithms of hierarchical hybrid fuzzy-PID controllers of tow-link robotic arms* " journal of systems (1997).
- [74] **A.Soukkou ; K.Benmahammed** " *Conception d'un contrôleur PID robuste par les algorithmes génétiques* ". proceeding de conférences internationale SSA (1999).

ANNEXES

ANNEXE I

L'étude analytique développée au chapitre II, et les simulations présentées au chapitre IV sont basées sur le modèle dynamique du manipulateur mobile. Pour le calcul de son modèle dynamique, on a utilisé les expressions générales présentées au chapitre II. Rappelons le, s'écrivent comme suit :

$$M_r(q_r)\ddot{q}_r + C_{r1}(q_r, \dot{q}_r) + C_{r2}(q_r, \dot{q}_r, \dot{q}_v) = \tau_r - R_r(q_r, q_v)\ddot{q}_v ;$$

$$M_{v1}(q_v)\ddot{q}_v + C_{v1}(q_v, \dot{q}_v) + C_{v2}(q_r, q_v, \dot{q}_r, \dot{q}_v) = E_v\tau_v - A'\lambda - M_{v2}(q_r, q_v)\ddot{q}_r - R_v(q_r, q_v)\ddot{q}_r ;$$

les expressions des matrices d'inertie $M_r, R_r, M_{v1}, M_{v2}, R_v$ et des efforts de Coriolis et forces Centrifuges C_{r1}, C_{r2}, C_{v1} et C_{v2} qui ont été données dans le chapitre II.

L'élaboration du modèle dynamique de ce manipulateur mobile passe par le calcul de toutes les dérivées matricielles partielles, le développement de chaque produit matriciel et la sommation des traces des matrices résultantes.

Après avoir effectué tous ces calculs, on a pu exprimer chaque élément des matrices $M_r, R_r, M_{v1}, M_{v2}, R_v, C_{r1}, C_{r2}, C_{v1}$ et C_{v2} en fonction des paramètres physiques et de la configuration du système. Les expressions analytiques obtenues de ces éléments sont listés aux pages suivantes.

Dans ces expressions, le vecteur $X(i)$, ($i=1$ à 12) est le vecteur des variables d'état du système défini par :

$X = [q_{r1} \ \dot{q}_{r1} \ q_{r2} \ \dot{q}_{r2} \ x_0 \ \dot{x}_0 \ y_0 \ \dot{y}_0 \ \theta_r \ \dot{\theta}_r \ \theta_l \ \dot{\theta}_l]$ où $q_{r1}, \dot{q}_{r1}, q_{r2}$ et \dot{q}_{r2} désignent les positions et les vitesses angulaires des deux liaisons du bras manipulateur, x_0, \dot{x}_0, y_0 et \dot{y}_0 désignent les positions et vitesses linéaires du centre de masse de la plate-forme mobile dans le repère fixe, $\theta_r, \dot{\theta}_r, \theta_l$ et $\dot{\theta}_l$ sont les positions et vitesses angulaires des roues droite et gauche respectivement de la plate-forme. Le vecteur $Y(i)$, ($i=1$ à 12) est la dérivée par rapport au temps du vecteur $X(i)$, ce vecteur est défini comme suit :

$$Y = [\dot{q}_{r1} \ \ddot{q}_{r1} \ \dot{q}_{r2} \ \ddot{q}_{r2} \ \dot{x}_0 \ \ddot{x}_0 \ \dot{y}_0 \ \ddot{y}_0 \ \dot{\theta}_r \ \ddot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l \ \ddot{\theta}_l]$$

Les notations (phi1p) et (phi2p) désignent les dérivées première et seconde par rapport au temps de l'angle (phi) qui représente l'orientation de la plate-forme ϕ .

Le bras manipulateur :**La matrice d'inertie Mr (2 par 2) :**

$$Mr11 = m1 * l1^2 / 3 + m2 * l2^2 / 3 + m2 * l1^2 * \cos(2 * X(1)) + m2 * r2^2 * (\sin(a11))^2 - m2 * l2 * r2 * \sin(a11) * \cos(a11) * \sin(X(3)) + m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) ;$$

$$Mr12 = (m2 * l2^2 / 3) * \cos(a11) - 0.5 * m2 * l2 * r2 * \sin(a11) * \sin(X(3)) + 0.5 * m2 * l1 * l2 * \cos(a11) * \cos(X(3)) ;$$

$$Mr21 = (m2 * l2^2 / 3) * \cos(a11) - 0.5 * m2 * l2 * r2 * \sin(a11) * \sin(X(3)) + 0.5 * m2 * l1 * l2 * \cos(a11) * \cos(X(3)) ;$$

$$Mr22=m2*l2^2/3;$$

Les coefficients d'inertie d'interaction Rr (2 par 4) :

$$Rr11=0;$$

$$Rr12=0;$$

$$Rr13=(-m1*l1^2/3-m2*l2^2/3-m2*l1^2*cos(2*X(1))-m2*r2^2*(sin(a11))^2*cos(2*X(1))+m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*sin(X(3))*cos(2*X(1))-m2*l1*l2*cos(X(3))*cos(2*X(1))-0.5*m2*r2*l2*sin(a11)*cos(X(3))*sin(2*X(1)))*c;$$

$$Rr14=(m1*l1^2/3+m2*l2^2/3+m2*l1^2*cos(2*X(1))+m2*r2^2*(sin(a11))^2*cos(2*X(1))-m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*sin(X(3))*cos(2*X(1))+m2*l1*l2*cos(X(3))*cos(2*X(1))+0.5*m2*r2*l2*sin(a11)*cos(X(3))*sin(2*X(1)))*c;$$

$$Rr21=0;$$

$$Rr22=0;$$

$$Rr23=(m2*l2^2/3)-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*sin(X(3))*sin(2*X(1))-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*sin(X(3))*cos(2*X(1))+0.5*m2*l1*l2*cos(a11)*cos(X(3))*cos(2*X(1))-0.5*m2*l1*l2*sin(X(3))*sin(2*X(1));$$

$$Rr24=(m2*l2^2/3)+0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*sin(X(3))*sin(2*X(1))+0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*sin(X(3))*cos(2*X(1))-0.5*m2*l1*l2*cos(a11)*cos(X(3))*cos(2*X(1))+0.5*m2*l1*l2*sin(X(3))*sin(2*X(1));$$

Les efforts Centrifuges et de Coriolis Cr1 (2 par 1) et Cr2 (2 par 2) :

$$Cr11=2*(-0.5*m2*l1*l2*sin(X(3))-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(X(3)))*X(2)*X(4)+(-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(X(3))-0.5*m2*l1*l2*cos(a11)*sin(X(3)))*X(4)^2;$$

$$Cr12=(0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*cos(X(3))-0.5*m2*l1*l2*sin(X(3)))*(X(2))^2;$$

$$Cr21=2*c*P1*X(10)*X(2)-2*c*P1*X(12)*X(2)+2*c*P2*X(10)*X(4)-2*c*P2*X(12)*X(4)+2*c*P3*X(10)*X(6)-2*c*P3*X(12)*X(6)+2*c*P3*X(10)*X(8)-2*c*P3*X(12)*X(8)+c*P3*(X(10))^2-c*P3*(X(12))^2;$$

$$Cr22=P4*X(10)*X(2)-P4*X(12)*X(2)+P5*X(10)*X(4)-P5*X(12)*X(4)+2*c*P6*X(10)*X(6)-2*c*P6*X(12)*X(6)+2*c*P6*X(10)*X(8)-2*c*P6*X(12)*X(8)+c*P6*(X(10))^2-c*P6*(X(12))^2;$$

avec :

$$P1=-$$

$$m2*(l1^2+r2^2*(sin(a11))^2)*sin(2*X(1))+m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*sin(X(3))*sin(2*X(1))-m2*l1*l2*cos(X(3))*sin(2*X(1))+0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(X(3))*(cos(2*X(1))-1);$$

$$P2=-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*sin(X(3))*sin(2*X(1))-0.5*m2*l1*l2*sin(X(3))*cos(2*X(1))-0.5*m2*l2*r2*sin(a11)*cos(a11)*cos(X(3))*cos(2*X(1))-0.5*m2*l1*l2*cos(a11)*cos(X(3))*sin(2*X(1));$$

$$P3 = -(m1 \cdot l1^2) / 3 - (m2 \cdot l2^2) / 3 - m2 \cdot l1^2 \cdot \cos(2 \cdot X(1)) - m2 \cdot r2^2 \cdot (\sin(\alpha 1))^2 \cdot \cos(2 \cdot X(1)) + m2 \cdot l2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1)) - m2 \cdot l1 \cdot l2 \cdot \cos(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1)) - 0.5 \cdot m2 \cdot l2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \cos(X(3)) \cdot \sin(2 \cdot X(1));$$

$$P4 = (c \cdot m1 \cdot l1 \cdot l2 \cdot (\cos(\alpha 1) \cdot \cos(X(3)) \cdot \sin(2 \cdot X(1)) + \sin(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1))) + c \cdot m2 \cdot l2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot (\cos(\alpha 1) \cdot \cos(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1)) - \sin(X(3)) \cdot \sin(2 \cdot X(1))));$$

$$P5 = (c \cdot m2 \cdot l2^2) / 3 \cdot (1 + (\cos(\alpha 1))^2) \cdot \sin(2 \cdot X(1));$$

$$P6 = (m2 \cdot l2^2 \cdot \cos(\alpha 1)) / 3 - 0.5 \cdot m2 \cdot l2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(X(3)) \cdot \sin(2 \cdot X(1)) - 0.5 \cdot m2 \cdot l2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1)) + 0.5 \cdot m2 \cdot l1 \cdot l2 \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(X(3)) \cdot \cos(2 \cdot X(1)) - 0.5 \cdot m2 \cdot l1 \cdot l2 \cdot \sin(X(3)) \cdot \sin(2 \cdot X(1));$$

Plate-forme mobile :

Les multiplicateurs de Lagrange :

$$\lambda 1 = (\sin(\phi) \cdot \lambda 2 + m \cdot y(8) + m \cdot c \cdot d \cdot \phi^2 \cdot \cos(\phi) - m \cdot c \cdot d \cdot (\phi)^2 \cdot \sin(\phi)) / \cos(\phi);$$

$$\lambda 2 = (m \cdot y(6) - m \cdot c \cdot d \cdot \phi^2 \cdot \sin(\phi) - m \cdot c \cdot d \cdot (\phi)^2 \cdot \cos(\phi) - \lambda 1 \cdot \sin(\phi)) / \cos(\phi);$$

La matrice d'inertie d'accélération Mv1 (4 par 4) :

$$Mv1 = \begin{bmatrix} m & 0 & -m \cdot c \cdot d \cdot \sin(\phi) & m \cdot c \cdot d \cdot \sin(\phi) \\ 0 & m & m \cdot c \cdot d \cdot \cos(\phi) & -m \cdot c \cdot d \cdot \cos(\phi) \\ -m \cdot c \cdot d \cdot \sin(\phi) & m \cdot c \cdot d \cdot \cos(\phi) & (I \cdot c^2 + I_w) & -I \cdot c^2 \\ m \cdot c \cdot d \cdot \sin(\phi) & -m \cdot c \cdot d \cdot \cos(\phi) & (-I \cdot c^2) & (I \cdot c^2 + I_w) \end{bmatrix};$$

La matrice d'inertie de couplage Mv2 (4 par 4) :

$$Mv211 = 0;$$

$$Mv212 = 0;$$

$$Mv213 = -c \cdot m1 \cdot l1 \cdot 0.5 \cdot \sin(X(1) - \phi) - c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(3)) \cdot \sin(X(1) + \phi) - c \cdot l2 \cdot m2 \cdot 0.5 \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \cos(X(1) + \phi) + c \cdot m2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \cos(X(1) + \phi) - c \cdot m2 \cdot l1 \cdot \sin(X(1) + \phi);$$

$$Mv214 = c \cdot m1 \cdot l1 \cdot 0.5 \cdot \sin(X(1) - \phi) + c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(3)) \cdot \sin(X(1) + \phi) - c \cdot l2 \cdot m2 \cdot 0.5 \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \cos(X(1) + \phi) - c \cdot m2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \cos(X(1) + \phi) + c \cdot m2 \cdot l1 \cdot \sin(X(1) + \phi);$$

$$Mv221 = 0;$$

$$Mv222 = 0;$$

$$Mv223 = -c \cdot m1 \cdot l1 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(1) - \phi) - c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(3)) \cdot \cos(X(1) - \phi) - c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \sin(X(1) - \phi) + c \cdot m2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \sin(X(1) - \phi) - c \cdot m2 \cdot l1 \cdot \sin(X(1) + \phi);$$

$$Mv224 = c \cdot m1 \cdot l1 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(1) - \phi) + c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(X(3)) \cdot \cos(X(1) - \phi) + c \cdot m2 \cdot l2 \cdot 0.5 \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(X(3)) \cdot \sin(X(1) - \phi) - c \cdot m2 \cdot r2 \cdot \sin(\alpha 1) \cdot \sin(X(1) - \phi) + c \cdot m2 \cdot l1 \cdot \sin(X(1) + \phi);$$

$$Mv231 = 0;$$

$$Mv232 = 0;$$

Mv233=-

$$c^2 * \cos(2 * \text{phi}) * (m2 * l1^2 + (m1 * l1^2) / 3 + (m2 * l2^2) / 3 + m2 * r2^2 * (\sin(\text{all}))^2 + m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) - m2 * l2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)));$$

$$\text{Mv234} = c^2 * \cos(2 * \text{phi}) * (m2 * l1^2 + (m1 * l1^2) / 3 + (m2 * l2^2) / 3 + m2 * r2^2 * (\sin(\text{all}))^2 + m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) - m2 * l2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)));$$

Mv241=0;

Mv242=0;

$$\text{Mv243} = c^2 * \cos(2 * \text{phi}) * (m2 * l1^2 + (m1 * l1^2) / 3 + (m2 * l2^2) / 3 + m2 * r2^2 * (\sin(\text{all}))^2 + m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) - m2 * l2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)));$$

Mv244=-

$$c^2 * \cos(2 * \text{phi}) * (m2 * l1^2 + (m1 * l1^2) / 3 + (m2 * l2^2) / 3 + m2 * r2^2 * (\sin(\text{all}))^2 + m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) - m2 * l2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)));$$

Les efforts Centrifuges et de Coriolis Cv1 (4 par 1) et Cv2 (4 par1) :

$$\text{Cv1} = \begin{bmatrix} -mc * d * (\text{phip.}^2) * \cos(\text{phi}) \\ -mc * d * (\text{phip.}^2) * \sin(\text{phi}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} \text{Cv21} = & c * m1 * l1 * \cos(X(1) - \text{phi}) * X(2) * X(10) - c * m1 * l1 * \cos(X(1) - \text{phi}) * X(2) * X(12) + (- \\ & c * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \cos(X(1) + \text{phi}) + c * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \sin(X(1) + \text{phi}) - \\ & 2 * c * m2 * r2 * \sin(\text{all}) * \sin(X(1) + \text{phi}) - \\ & 2 * c * m2 * l1 * \cos(X(1) + \text{phi}) * X(2) * X(10) + (c * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \cos(X(1) + \text{phi}) - \\ & c * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \sin(X(1) + \text{phi}) + 2 * c * m2 * r2 * \sin(\text{all}) * \sin(X(1) + \text{phi}) + 2 * c * m2 * \\ & l1 * \cos(X(1) + \text{phi}) * X(2) * X(12) + (c * m2 * l2 * \sin(X(3)) * \sin(X(1) - \\ & \text{phi}) + c * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \cos(X(3)) * \cos(X(1) - \text{phi})) * X(4) * X(10) - \\ & (c * m2 * l2 * \sin(X(3)) * \sin(X(1) - \text{phi}) + c * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \cos(X(3)) * \cos(X(1) - \\ & \text{phi})) * X(4) * X(12) - 0.5 * m1 * l1 * \sin(X(1) + \text{phi}) * (X(2))^2 + (- \\ & 0.5 * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \sin(X(1) + \text{phi}) - \\ & 0.5 * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \cos(X(1) + \text{phi}) + m2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(X(1) + \text{phi}) - \\ & m2 * l1 * \sin(X(1) + \text{phi}) * (X(2))^2 + (-m2 * l2 * (\cos(X(3)))^2 * \sin(X(1) - \\ & X(3)) + m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \cos(X(3)) + m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \cos(X(3)) * \cos(X \\ & (1) - X(3)) - m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \cos(X(3)) - \\ & m2 * l2 * \cos(\text{al2}) * \sin(X(3)) * \cos(X(3)) * \cos(X(1) - X(3)) - \\ & m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \cos(\text{al2}) * (\sin(X(3)))^2 * \sin(X(1) - \\ & X(3)) + 2 * m2 * r2 * \sin(\text{all}) * \cos(X(3)) + 2 * m2 * r2 * \sin(\text{al2}) * \cos(X(3)) * \cos(X(1) - \\ & X(3)) + 2 * m2 * r2 * \cos(\text{all}) * \sin(\text{al2}) * \sin(X(3)) * \sin(X(1) - X(3)) - \\ & 2 * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \sin(X(1) - \\ & X(3)) + 2 * m2 * l1 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) + 2 * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \sin(X(3)) * \cos(X(1) - \\ & X(3))) * X(2) * X(4) - \\ & (0.5 * m2 * l2 * \cos(\text{all}) * \cos(X(3)) * \sin(X(1) + \text{phi}) + 0.5 * m2 * l2 * \sin(X(3)) * \cos(X(1) + \text{phi})) * (X \\ & (4))^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Cv22 = & -c*m1*l1*\sin(X(1)-\phi)*X(2)*X(10)+c*m1*l1*\sin(X(1)-\phi)*X(2)*X(12)+(- \\
& c*m2*l2*\cos(X(3))*\sin(X(1)-\phi)+c*m2*l2*\cos(al1)*\sin(X(3))*\cos(X(1)-\phi)- \\
& 2*c*m2*r2*\sin(al1)*\cos(X(1)-\phi)-2*c*m2*l1*\sin(X(1)- \\
& \phi))*X(2)*X(10)+(c*m2*l2*\cos(X(3))*\sin(X(1)-\phi)- \\
& c*m2*l2*\cos(al1)*\sin(X(3))*\cos(X(1)-\phi)+2*c*m2*r2*\sin(al1)*\cos(X(1)- \\
& \phi)+2*c*m2*l1*\sin(X(1)-\phi))*X(2)*X(12)+(c*m2*l2*\sin(X(3))*\cos(X(1)-\phi)- \\
& c*m2*l2*\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin(X(1)-\phi))*X(4)*X(10)+(- \\
& c*m2*l2*\sin(X(3))*\cos(X(1)-\phi)+c*m2*l2*\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin(X(1)- \\
& \phi))*X(4)*X(12)+(0.5*m1*l1*\cos(X(1)+\phi)+0.5*m2*l2*\cos(X(3))*\cos(X(1)+\phi)- \\
& 0.5*m2*l2*\cos(al1)*\sin(X(3))*\sin(X(1)+\phi)+m2*r2*\sin(al1)*\sin(X(1)+\phi)+m2*l1*\cos \\
& (X(1)+\phi))*X(2))^2+(m2*l2*\cos(al2)*\sin(X(3))*\cos(X(3))*\sin(X(1)- \\
& X(3))+m2*l2*\cos(al1)*\cos(al2)+m2*l2*\cos(al1)*\cos(al2)*(\cos(X(3)))^2*\cos(X(1)- \\
& X(3))-m2*l2*\sin(al1)*\sin(al2)*\cos(X(3)))- \\
& m2*l2*\sin(al1)*\sin(al2)*\cos(X(3))*\cos(X(1)- \\
& X(3))+m2*l2*(\cos(al2))^2*(\sin(X(3)))^2*\cos(X(1)-X(3))- \\
& m2*l2*\cos(al1)*(\cos(al2))^2*\sin(X(3))*\cos(X(3))*\sin(X(1)- \\
& X(3))+m2*l2*\sin(al1)*\sin(al2)*\cos(al2)*\sin(X(3))*\sin(X(1)-X(3))- \\
& 2*m2*r2*\sin(al1)*\cos(al2)*\sin(X(3))-2*m2*r2*\sin(al2)*\cos(al2)*\sin(X(3))*\cos(X(1)- \\
& X(3))+2*m2*r2*\cos(al1)*\sin(al2)*\cos(al2)*\cos(X(3))*\sin(X(1)-X(3))- \\
& 2*m2*r2*\sin(al1)*(\sin(al2))^2*\sin(X(1)-X(3))+2*m2*l2*\cos(al2)*\sin(X(3))*\sin(X(1)- \\
& X(3))+2*m2*l1*\cos(al1)*\cos(al2)*\cos(X(3))+2*m2*l2*\cos(al1)*\cos(al2)*\cos(X(3))*\cos \\
& (X(1)-X(2))-2*m2*l1*\sin(al1)*\sin(al2)-2*m2*l2*\sin(al1)*\sin(al2)*\cos(X(1)- \\
& X(3))*X(2)*X(4)+(0.5*m2*l2*\cos(al1)*\cos(X(3))*\cos(X(1)+\phi)- \\
& 0.5*m2*l2*\sin(X(3))*\sin(X(1)+\phi))*X(4))^2;
\end{aligned}$$

$$Cv23 = -$$

$$\begin{aligned}
& (2/3)*c^2*m1*l1^2*\sin(2*\phi)*X(2)*X(10)+(2/3)*c^2*m1*l1^2*\sin(2*\phi)*X(2)*X(12)- \\
& 4*c^2*\sin(\phi)*\cos(\phi)*(m2*l1*l2*\cos(X(3)))- \\
& m2*l2*r2*\sin(al1)*\cos(al1)*\sin(X(3))+(1/3)*m2*l2^2+m2*l1^2+m2*r2^2*(\sin(al1))^2* \\
& X(2)*X(10)+4*c^2*\sin(\phi)*\cos(\phi)*(m2*l1*l2*\cos(X(3)))- \\
& m2*l2*r2*\sin(al1)*\cos(al1)*\sin(X(3))+(1/3)*m2*l2^2+m2*l1^2+m2*r2^2*(\sin(al1))^2* \\
& X(2)*X(12)+(c^2*m2*l1*l2*\cos(X(1)+2*\phi)*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin(X(1))+\sin(X(3))* \\
& \cos(X(1)))-c^2*m2*l1*l2*\sin(X(1)+2*\phi)*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\cos(X(1))- \\
& \sin(X(3))*\sin(X(1)))+c^2*m2*l2*r2*\sin(al1)*\sin(X(1)+2*\phi)*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin \\
& (X(1))+\sin(X(3))*\cos(X(1)))+c^2*m2*l2*r2*\sin(al1)*\cos(X(1)+2*\phi)*(\cos(al1)*\cos(X \\
& (3))*\cos(X(1))-\sin(X(3))*\sin(X(1))))*X(4)*X(10) \\
& +((1/3)*c*m1*l1^2+c*m2*l1^2+(c*m2*l2^2)/3+c*m2*l1*l2*\cos(X(3))+c*m2*r2^2*(\sin(al1) \\
&))^2-c*m2*l2*r2*\sin(al1)*\cos(al1)*\sin(X(3)))*X(2))^2+(- \\
& 0.5*c*m2*l1*l2*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin(X(1))-\sin(X(3))*\cos(X(1)))*\sin(X(1))- \\
& 0.5*c*m2*l2*r2*\sin(al1)*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\sin(X(1))- \\
& \sin(X(3))*\cos(X(1)))*\cos(X(1))+(1/3)*c*m2*l2^2*\cos(al1)*\cos(2*\phi)+0.5*c*m2*l1*l2 \\
& *(\cos(al1)*\cos(X(3))*\cos(X(1))-\sin(X(3))*\sin(X(1)))*\cos(X(1))- \\
& 0.5*c*m2*l2*r2*\sin(al1)*(\cos(al1)*\cos(X(3))*\cos(X(1))- \\
& \sin(X(3))*\sin(X(1)))*\sin(X(1))*X(4))^2;
\end{aligned}$$

$$Cv24 = -Cv23;$$

La matrice d'inertie d'interaction Rv (4 par 2) :

$$Rv11 = -0.5 * m1 * l1 * \sin(X(1) + \phi) + m2 * r2 * \sin(\alpha1) * \cos(X(1) + \phi) - \\ m2 * l1 * \sin(X(1) + \phi) - 0.5 * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \sin(X(1) + \phi) - \\ 0.5 * m2 * l2 * \cos(\alpha1) * \sin(X(3)) * \cos(X(1) + \phi);$$

$$Rv12 = -0.5 * m2 * l2 * \cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \sin(X(1) + \phi) - \\ 0.5 * m2 * l2 * \sin(X(3)) * \cos(X(1) + \phi);$$

$$Rv21 = 0.5 * m1 * l1 * \cos(X(1) + \phi) + 0.5 * m2 * l2 * \cos(X(3)) * \cos(X(1) + \phi) + 0.5 * m2 * l2 * \cos(\alpha1) * \sin(X(3)) * \sin(X(1) + \phi) + m2 * r2 * \sin(\alpha1) * \sin(X(1) + \phi) + m2 * l1 * \cos(X(1) + \phi);$$

$$Rv22 = 0.5 * m2 * l2 * \cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \cos(X(1) + \phi) - \\ 0.5 * m2 * l2 * \sin(X(3)) * \sin(X(1) + \phi);$$

$$Rv31 = (c/3) * m1 * l1^2 + c * m2 * l1 * l2 * \cos(X(3)) - \\ c * m2 * l2 * r2 * \sin(\alpha1) * \cos(\alpha1) * \sin(X(3)) + (c/3) * m2 * l2^2 + c * m2 * l1^2 + c * m2 * r2^2 * (\sin(\alpha1) \\))^2;$$

$$Rv32 = (- \\ 0.5 * c * m2 * l1 * l2 * (\cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \sin(X(1)) + \sin(X(3)) * \cos(X(1))) * \sin(X(1)) - \\ 0.5 * c * m2 * l2 * r2 * \sin(\alpha1) * (\cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \sin(X(1)) - \\ \sin(X(3)) * \cos(X(1))) * \cos(X(1)) + (1/3) * c * m2 * l2^2 * \cos(\alpha1) * \cos(2 * \phi) + 0.5 * c * m2 * l1 * l2 \\ * (\cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \cos(X(1)) - \sin(X(3)) * \sin(X(1))) * \cos(X(1)) - \\ 0.5 * c * m2 * l2 * r2 * \sin(\alpha1) * (\cos(\alpha1) * \cos(X(3)) * \cos(X(1)) - \\ \sin(X(3)) * \sin(X(1))) * \sin(X(1)));$$

$$Rv41 = -Rv31;$$

$$Rv42 = -Rv32;$$



ANNEXE II

Concept de base de réseau de neurone

Un réseau de neurones est caractérisé par trois entités :

Le Neurone

C'est l'unité de calcul qui reçoit des informations provenant des autres neurones, les traite puis envoie le résultat à d'autres unités identiques. Cette unité constitue le bloc principal du réseau. Comme montré en figure.1, le neurone est un dispositif multi-entrées/mono-sortie avec les paramètres suivantes :

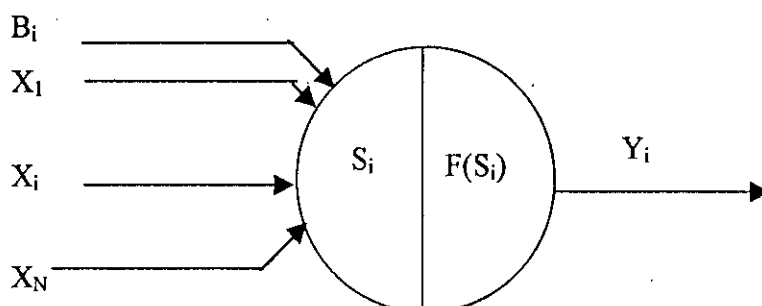


Figure 1 Neurone Formel

- ❖ Les entrées du neurone : notées X_j , $j=1, 2, \dots, N$, lesquelles pourraient être des entrées externes ou des sorties d'autres neurones.
- ❖ Poids de chaque entrée : notés W_{ij} , liant le neurone i avec d'autres neurones $j=1, 2, \dots, N$. ces poids sont adaptés durant l'apprentissage du réseau à fin d'améliorer les performances.
- ❖ Fonction combinante : relie tous les entrées du neurone, et peut être soit linéaire ou non-linéaire. Cette fonction n'est que la sommation des entrées pondérées.

$$S_i = \sum_{j=1}^N W_{ij} \times B_j$$

Fonction d'activation

cette fonction peut être aussi linéaire ou non linéaire et produit la sortie du neurone, laquelle peut être connectée à n'importe quel autre neurone du réseau, ou connectée comme entrée au même neurone (feedback). La fonction d'activation est typiquement choisie comme :

$$f(S_i) = \frac{1}{1 + \exp(-S_i)}$$

ou

$$f(S_i) = \frac{1 - \exp(-2 \times S_i)}{1 + \exp(-2 \times S_i)}$$

le traitement de l'information par le neurone en deux étapes :

- 1^{ère} étape : le neurone effectue une sommation pondérées de tous ces entrées.
- 2^{ème} étape : pour calculer sa sortie, le neurone applique à cette somme la fonction d'activation.

Topologie du réseau

Chaque neurone est connecté à d'autres (tous ou certains), d'où respectivement on obtient un réseau totalement ou partiellement connecté. Les neurones sont organisés en couches et les signaux se propagent en avant. Ainsi, on obtient un graphe orienté.

Evolution du réseau

On entend par évolution du réseau la modification des liaisons inter-neurales par apprentissage cette évolution est définie par :

- ❖ L'architecture du réseau : nombre de couches, nombre de neurones dans chaque couche, et le graphe des connexions (topologie).
- ❖ L'algorithme d'apprentissage : au cours duquel le réseau apprend à accomplir une tâche à partir d'exemples. Cette algorithme sert à la mise à jour des poids synaptiques.

Architecture du réseau

- ❖ L'architecture du réseau est définie par :
- ❖ Le nombre de neurones,
- ❖ La nature des neurones (fonction d'activation),
- ❖ Le graphe d'interconnexion.

ANNEXE III

Concept de base de la logique floue

Formalisme de la logique floue

Approche qualitative : l'imprécision a trait au contenu de l'information, elle apparaît lorsque l'ensemble des valeurs possible d'une variable n'est pas un singleton, en fait elle recouvre un certain intervalle ou un certain ensemble de valeurs. Une information est floue si la désignation de la valeur de la variable floue est un ensemble aux frontières non précisément délimité.

Approche quantitative : Elle met œuvre une graduation numérique, cette approche visé à quantifier l'imprécision, exprimer certaines qualités tel que, jeune, grand, revient à leur associé un nombre de manière à les représenter aussi fidèlement que possible.

Ensembles flous

Un ensemble flou A sur E, est un ensemble dont les frontières sont imprécises, c'est à dire que l'on passe graduellement est non brusquement de l'appartenance à la non-appartenance.

On attribue à l'ensemble A une fonction caractéristique :

$$\begin{array}{l} \varphi : E \longrightarrow [0, 1] \\ X \longrightarrow \varphi_A(X) \end{array}$$

Définition : un ensemble flou A de E est un ensemble de couples ordonnés $A = \{x, \varphi_A(x), \forall x \in E\}$.

Tel que φ_A est la fonction d'appartenance qui rend ces valeurs entre 0 et 1, et indique le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble A.

Opération sur la logique floue

Les variables linguistique sont liées entre elles par des opérateurs ET, OU, NON ces opérateurs ont une signification différente qu'on logique classique.

Raisonnement approximatif

Variable linguistique : C'est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases dans un langage qui peut être naturel ou artificiel. Elle est définie par le quarté $\{X, LX, x, M\}$.

Avec X : est le nom de la variable,

LX : l'ensemble des valeurs linguistiques de X,

x : est l'univers de discours des valeurs quantitatives de X.

M : est une fonction sémantique qui donne l'interprétation d'une valeur linguistique en terme d'élément quantitatif de X.

règle d'inférence :

pour obtenir des condition a partir d'une base de règle on a besoin d'un mécanisme qui peut produire une sortie d'une collection de règle de production (if - then).

If x is A then y is B

La signification de la conditionnelle est une relation floue.

ANNEXE IV

Concept de base sur les algorithmes génétiques.

Qu'est ce que les algorithmes génétique :

Les algorithmes génétique sont des algorithmes d'optimisation, plus généralement de recherches basées sur des approches évolutives et génétiques naturelles.

L'algorithme génétique manipule une population de solutions appelées chromosomes ou individus.

Seuls les meilleurs individus peuvent survivre et se reproduire, ce phénomène est appelé surie du meilleur.

L'algorithme génétique simule donc la survie des meilleurs individus parmi les générations consécutives pour la résolution du problème. Chaque génération est un ensemble d'individus (chromosomes) représentés chacun par une chaîne de caractères.

L'algorithme génétique traite une population de solutions pour trouver la solution optimale, en utilisant certains opérateurs génétiques.

Les déférentes étapes d'un algorithme génétique

- ❖ Générer aléatoirement la population initiale $X(0)$ avec : $X(0) = (X_1, X_2, \dots, X_n)$,
- ❖ Calculer la fonction d'adéquation $F(X_i)$ de chaque chromosome X_i dans la population courante $X(t)$,
- ❖ Créer de nouveaux chromosomes $X_r(t)$ par accouplement des actuels chromosomes, en appliquant la mutation, le croisement (recombinaison) et l'accouplement des chromosomes parent.
- ❖ Effacer un nombre de chromosomes de la population pour laisser de la place aux nouveaux chromosomes dans la population.
- ❖ Calculer la fonction d'adéquation (Fitness) de $X_r(t)$ et introduire certains des nouveaux chromosomes dans la population.
- ❖ Introduire de nouveaux chromosomes dans la population.

- ❖ $T=t+1$, si non (test fin) aller à l'étape 3, ou autrement stop (arrêter) et retour des meilleurs chromosomes.

Définition de quelques termes utilisés

Chromosome

Le chromosome est une chaîne de caractères, jusqu'à la représentation la plus utilisée est la chaîne binaire ou réelle vues ces simplicités.

Chaque chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments appelés gènes, pouvant prendre plusieurs valeurs (allèles) comme illustré sur la IV.1

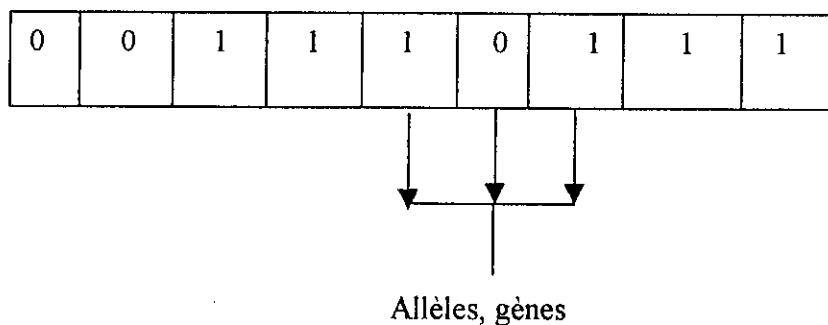


Figure 2 : Représentation d'un chromosome

Croisement

Le croisement est inspiré du procédé biologique et il consiste en la reproduction de deux descendants par combinaison de gènes parents. On peut distinguer deux types de croisements

Croisement multipoints.

Croisement uniforme.

Mutation

La mutation agit aléatoirement sur un ou plusieurs gènes de chromosome.

La mise en œuvre d'un algorithme génétique

Pour la mise en œuvre d'un algorithme génétique il faut définir :

1. Une représentation chromosomale des solutions au problème.
2. Une méthode de création de la population initiale des solution.
3. Une fonction d'évolution qui joue le rôle de l'environnement.
4. Des opérateurs génétiques qui modifient la composition des chromosomes.
5. Un certain nombre de paramètres rentrent en considération.
6. Taille de population.
7. Probabilité d'application des opérateurs génétiques.
8. Critère d'arrêt.