

**THESE DE DOCTORAT  
DE L'UNIVERSITE PARIS XII VAL DE MARNE**

Présentée par

**Mohamed KIRAD**

pour l'obtention du

**GRADE DE DOCTEUR D'UNIVERSITE EN SCIENCES**

Spécialité : Robotique - Automatique - Informatique

***CONTRIBUTION A LA COMMANDE FORCE POSITION  
SELON UNE APPROCHE NEURONALE.***

***APPLICATION A UN ROBOT PARALLELE C5 DESTINE A DES  
TÂCHES D'ASSEMBLAGE***

Soutenue le 15 / Décembre / 2000

Devant le jury composé de :

M. N. K. M'SIRDI	Professeur à l'Université de Versailles	Rapporteur
M. J. FONTAINE	Professeur à l'Université de BOURGES	Rapporteur
M. J. LEMOINE	Professeur à l'Université de PARIS XII	Examineur
M. E. COLLE	Professeur à l'Université d'Evry	Examineur
M. C. MORENO	Professeur à l'Université d'Evry	Examineur
M. Y. AMIRAT	Professeur à l'Université PARIS XII	Examineur
M. C. FRANÇOIS	Maître de Conférence à l'IUT CACHAN	Examineur
M. J. PONTNAU	Professeur à l'Université PARIS XII	Directeur de thèse

# Table des Matières

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Problématique du Contrôle en Effort.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2 La notion de compliance.....</b>	<b>6</b>
I.2.1 La compliance passive.....	7
I.2.2 La compliance active.....	8
I.2.3 La compliance Mixte.....	9
<b>I.3 Tâche d'assemblage .....</b>	<b>10</b>
<b>I.4 Complexité du problème d'assemblage .....</b>	<b>11</b>
I.4.1 Classification des tâches d'assemblage .....	11
I.4.2 Génération du plan d'assemblage.....	13
I.4.3 Choix d'une stratégie de commande.....	14
<b>I.5 Le contrôle en effort et les réseaux de neurones .....</b>	<b>16</b>
<b>I.6 Solution proposée.....</b>	<b>17</b>
<b>I.7 Conclusion .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre II : Présentation des Outils Expérimentaux .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>21</b>
<b>II.2 Description du système à 1 d.d.l.....</b>	<b>21</b>
II.2.1 Introduction.....	21
II.2.2 Description de la partie mécanique et électrique du dispositif .....	22
II.2.3 Structure du système de commande .....	23
<b>II.3 Description de la cellule flexible.....</b>	<b>24</b>
II.3.1 Le Robot Portique XY .....	26
II.3.2 Le robot parallèle .....	26
II.3.3 Caractéristiques de la cellule d'assemblage .....	28
II.3.4 Système de vision .....	28
<b>II.4 Architecture matérielle et logicielle du système de commande.....</b>	<b>29</b>
II.4.1 Structure du système de commande .....	29
II.4.2 Architecture matérielle.....	32
II.4.3 Architecture Logicielle.....	34
<b>Chapitre III : Structures et Approches de Commande Force/Position .....</b>	<b>36</b>
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2 La Commande en impédance .....</b>	<b>37</b>
III.2.1 Principe de la commande en impédance .....	37
III.2.2 Etude de la stabilité.....	40
III.2.3 Cas particuliers de la commande par impédance .....	41
III.2.4 Conclusion .....	43
<b>III.3 La Commande hybride force/position .....</b>	<b>44</b>
III.3.1 Principe de la commande hybride.....	44
III.3.2 Quelques structures de contrôle hybride proposées .....	46

<b>III.4 La Commande en effort externe.....</b>	<b>49</b>
III.4.1 Principe de la commande en effort externe .....	50
III.4.2 Le contrôleur de position et d'effort .....	51
<b>III.5 Autres approches de Commande d'effort .....</b>	<b>52</b>
<b>III.6 Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b>Chapitre IV : Les Réseaux de Neurones Artificiels .....</b>	<b>57</b>
<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.2 Généralités sur les réseaux de neurones .....</b>	<b>58</b>
IV.2.1 Historique.....	58
IV.2.2 Le modèle neurophysiologique.....	59
IV.2.3 Le neurone formel .....	60
IV.2.4 Définition d'un réseau de neurones artificiels .....	61
IV.2.5 La structure des connexions et l'architecture d'un réseau.....	61
IV.2.6 Construction d'un réseau et calcul de sa sortie .....	62
IV.2.7 Apprentissage.....	63
<b>IV.3 Application des réseaux de neurones .....</b>	<b>64</b>
<b>IV.4 Les approches neuronales en robotique.....</b>	<b>65</b>
IV.4.1 Introduction .....	65
IV.4.2 Identification et réseaux de neurones.....	66
IV.4.3 Commande de processus et réseaux de neurones.....	68
IV.4.4 Quelques méthodes de commandes neuronales .....	73
<b>IV.5 Conclusion .....</b>	<b>80</b>
<b>Chapitre V : Analyse du Problème du Contrôle en Effort - Cas Mono-Dimensionnel 81</b>	
<b>V.1 Introduction .....</b>	<b>82</b>
<b>V.2 Schémas de commande mis en œuvre.....</b>	<b>82</b>
V.2.1 Commande discontinue.....	83
V.2.2 Commande en impédance .....	84
V.2.3 Commande externe .....	85
<b>V.3 Génération de la trajectoire et mode d'asservissement .....</b>	<b>86</b>
<b>V.4 Quelques problèmes liés à la commande en effort .....</b>	<b>87</b>
V.4.1 Raideur de l'environnement.....	87
V.4.2 Effet de numérisation.....	87
V.4.3 Transitions et chocs .....	88
V.4.4 Impulsion d'impact.....	89
<b>V.5 Expérimentations et résultats.....</b>	<b>92</b>
V.5.1 Introduction .....	92
V.5.2 1 <sup>ère</sup> partie d'expérimentation – Environnement Compliant .....	93
<i>Introduction.....</i>	93
<i>Commande discontinue.....</i>	93
<i>Commande en impédance .....</i>	96
<i>Commande en effort externe .....</i>	100
<i>Conclusion.....</i>	104
V.5.3 2 <sup>ème</sup> partie d'expérimentation – Environnement Rigide .....	105
<i>Introduction.....</i>	105
<i>Commande discontinue.....</i>	105
<i>Commande en impédance .....</i>	108
<i>Commande en effort externe .....</i>	110

<i>Conclusion</i> .....	112
<b>V.6 Conclusion générale</b> .....	<b>113</b>
<b>Chapitre VI : Commande en en Effort d'un Système Poly-Articulé</b> .....	<b>116</b>
<b>VI.1 Introduction</b> .....	<b>117</b>
<b>VI.2 Définition de la tâche à réaliser</b> .....	<b>117</b>
<b>VI.3 Structure de commande</b> .....	<b>118</b>
<b>VI.4 Méthodologie de mise en œuvre</b> .....	<b>120</b>
<b>VI.5 Mesure des efforts de contact</b> .....	<b>120</b>
<b>VI.6 Choix du modèle de comportement et réglage de contrôleur</b> .....	<b>123</b>
<b>VI.7 Expérimentation et analyse des résultats</b> .....	<b>125</b>
VI.7.1 Introduction .....	125
VI.7.2 Estimation des efforts de contact .....	126
VI.7.3 Mise en œuvre de la commande externe sur la cellule d'assemblage .....	128
<i>Commande externe – Comportement ressort</i> .....	<i>128</i>
<i>Commande externe – Comportement ressort plus amortissement</i> .....	<i>132</i>
<b>VI.8 Limites des commandes conventionnelles</b> .....	<b>138</b>
<b>VI.9 Conclusion</b> .....	<b>140</b>
<b>Chapitre VII : Commande Neuronale Adaptative d'un Système Poly-Articulé</b> .	<b>142</b>
<b>1<sup>ère</sup> partie : Méthodologie et mise en œuvre d'un contrôleur neuronal adaptatif</b> ....	<b>143</b>
<b>VII.1 Introduction</b> .....	<b>143</b>
<b>VII.2 La commande neuronale et ses avantages</b> .....	<b>144</b>
<b>VII.3 Approche proposée et implémentation</b> .....	<b>146</b>
VII.3.1 Introduction.....	146
VII.3.2 Structure de commande adaptative proposée.....	148
VII.3.3 Méthodologie de mise en œuvre de la structure de commande adaptative .....	150
<b>VII.4 Contrôleur neuronal adaptatif</b> .....	<b>155</b>
VII.4.1 Introduction.....	155
VII.4.2 Formulation mathématique.....	156
VII.4.3 Utilisation d'une fonction de renforcement pour l'adaptation en ligne.....	
<b>2<sup>ème</sup> Partie : Expérimentation et Analyse des Résultats</b> .....	<b>161</b>
<b>VII.5 Introduction</b> .....	<b>161</b>
<b>VII.6 Construction et validation du contrôleur neuronal statique</b> .....	<b>161</b>
<b>VII.7 Construction et validation du contrôleur neuronal adaptatif</b> .....	<b>164</b>
<b>VII.8 Conclusion</b> .....	<b>170</b>
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>171</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>174</b>
<b>Annexe I : Modèles du Robot Parallèle à Liaison C5</b> .....	<b>185</b>
<b>Annexe II : Méthodes d'Apprentissage des Réseaux de Neurones</b> .....	<b>196</b>