

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	9
I – LA ROBOTIQUE.....	11
1. LES ROBOTS	11
1.1. La naissance des robots	11
1.2. Les applications	12
1.3. Evolution du robot	12
1.4. Les grands axes de la robotique	12
2. LES ASPECTS GENERAUX	13
2.1. Les intérêts de la robotique	13
2.2. Les fonctions de base de la robotique	13
2.3. L'intégration d'un robot à un système de production	13
2.4. Classification des manipulateurs et robots	14
2.5. Compléments sur les types de classifications	14
3. LA CHAINE DE COMMANDE D'UN ROBOT	17
3.1. Structure de la commande	17
3.2. Définition des vecteurs de la commande	18
3.3. La commande d'un robot	18
4. LES NIVEAUX DE LA COMMANDE	19
5. EXEMPLES DE COMMANDES D'AXE	20
5.1. Motorisation et asservissement d'un axe hydraulique	20
5.2. Motorisation électrique et asservissement en position et en vitesse	21
5.3. Prise en compte des moteurs, des réductions, des transmissions	21
5.4. Les couplages mécaniques des transmissions	22
6. CONCLUSION.....	22
II - LES ARCHITECTURES DES ROBOTS	23
1. LES DEGRES DE LIBERTE	23
2. LES TYPES D'ARCHITECTURES	23
2.1. Les chaînes ouvertes	23
2.2. Les chaînes fermées	24
2.3. Les robots parallèles	24
2.4. Les chaînes polyarticulées	24
2.5. Les architectures spéciales	25
3. LIAISONS MECANIQUES – MODELISATION – PARAMETRAGE	25
3.1. Schématisation et paramétrage des liaisons	26
4. TORSEUR CINEMATIQUE ET TORSEUR DES EFFORTS TRANSMISSIBLES.....	29
4.1. Torseurs associés à une liaison pivot d'axe y	29
4.2. Torseurs associés à une liaison glissière d'axe x	30
4.3. Puissance développée dans une liaison	31
4.4. Les phénomènes passifs qui s'opposent aux mouvements	31
5. LES LIAISONS REELLES.....	33
5.1. La liaison rotule réelle	33

5.2. La liaison glissière réelle	34
5.3. Pertes dans une liaison glissière réelle	35
5.4. La liaison pivot – glissant réelle	37
5.5. La liaison pivot réelle	38
5.6. Influence de la conception sur les efforts dans les paliers	39
6. ACCESSIBILITES EN FONCTION DE LA MORPHOLOGIE DES PORTEURS	40
6.1. Aires et volumes accessibles en fonction de l'architecture du porteur	41
6.2. Les problèmes de la redondance	44
6.3. Surfaces balayées, volumes, approches et accès à un même point	45
7. LA CONCEPTION DES SEGMENTS	46
7.1. Qualités principales des segments	46
7.2. Quelques pistes pour les solutions	46
7.3. Architectures et différentes associations de liaisons pivots – glissières	46
7.4. Associations de deux liaisons pivots	47
7.5. Emplacements difficiles d'accès	51
8. LIMITATION DES ACTIONS MOTRICES SUR LES PALIERS	51
8.1. Les systèmes d'équilibrage	51
8.2. Motorisation à la base et transmission par plateaux et biellettes	52
8.3. Autres transmissions	53
9. ARCHITECTURES SPECIALES	54
9.1. Cardan et glissière	54
9.2. Jambes pour robot marcheur et robot mille pattes	54
9.3. Jambe humaine et jambe de robot hexapode	55
9.4. Structure souple et déformable	55
9.5. Décalages d'axes facilitant l'approche et le contournement d'obstacles	55
9.6. Architecture à chaînes fermées planes	56
9.7. Architecture araignée, crabe, lombric	60
9.8. Exemples d'associations simples – la main humaine	60
10. CONCLUSION.....	61
III - LES MODELES MATHEMATiques	63
1. CHAINE A MAITRISER POUR COMMANDER UN ROBOT	63
1.1. Les étapes pour commander une architecture articulée	63
1.2. Les grandeurs d'une chaîne articulée	64
1.3. Equation à maîtriser pour commander un manipulateur ou un robot	66
1.4. Equation générale	67
1.5. Modélisation de la tâche dans l'espace opérationnel	68
2. PARAMETRAGES DES ARCHITECTURES – MISE EN EQUATIONS.....	73
2.1. Architecture anthropomorphe	74
2.2. Architecture Scara	86
3. CONCLUSION	91
IV - CHAINES OUVERTES - ROBOTS MOBILES	93
1. MOTORISATION DES CHAINES	93
1.1. Motorisation des chaînes ouvertes, entraînement direct	93
1.2. Motorisation des chaînes fermées	94
2. ARCHITECTURE A CHAINES OUVERTES.....	94
2.1. Architecture anthropomorphe complète, représentation spatiale	94

2.2. Architecture type pelle mécanique ou manipulateur commandé par l'homme	95
2.3. Architecture pour manipulations, horizontales, verticales, sur plans inclinés	96
2.4. Architecture redondante pour manipulations planes et contournements	97
3. ROBOTS POLYARTICULES.....	98
4. ROBOTS MOBILES A ROUES.....	99
4.1. Robots mobiles à trois roues	99
4.2. Robots mobiles à quatre roues	104
4.3. Robots à chenilles	105
4.4. Bras montés sur robots mobiles	105
5. ROBOTS MOBILES A PATTES – EXOSQUELETES	106
5.1. Robots à pattes - hexapodes – exosquelettes	106
5.2. Modélisation et mise en équations d'un robot mobile à pattes – la sustentation	107
5.3. Autre architecture hexapode	110
6. ARCHITECTURE DE TYPE TROMPE D'ELEPHANT ET LOMBRIC	110
6.1. Architecture d'un élément – schéma paramétré	111
6.2. Mise en équations	111
7. ASSOCIATION EN SERIE DE ROBOTS PARALLELES	113
8. ARCHITECTURES SPECIALES	114
8.1. Corps souple	114
8.2. Robot à chariots à mouvements croisés	116
8.3. Robot suspendu	117
8.4. Les orthèses et les prothèses	118
V - LES CHAINES FERMEES	119
1. PROBLEMES POSES PAR LES CHARGES ET EFFORTS IMPORTANTS	119
2. EQUILIBRAGES ET COMPENSATEURS	120
2.1. Equilibrage par contrepoids	120
2.2. Compensateurs à ressorts	121
2.3. Motoréducteurs implantés à la base et transmission des mouvements aux axes	121
3. MOTORISATION RAMENEE A LA BASE	122
3.1. Transmission par câbles, courroies synchrones, composite, bandes métalliques	122
3.2. Transmission par tiges et plateaux	122
4. CHAINES FERMEES PLANES ET SPATIALES.....	124
4.1. Les premières réalisations	124
4.2. Analyse de l'isostatisme, de l'hyperstatisme, des mobilités d'un mécanisme	126
4.3. Architectures à chaînes fermées générant un mouvement plan	131
5. LES CHAINES FERMEES PLANES	133
5.1. Paramétrage, analyse mathématique et gestuelle	133
5.2. Chaînes fermées planes, systèmes à parallélogrammes et à pantographes	138
5.3. Mouvements de trois architectures fermées planes	143
6. CHAINES FERMEES SPATIALES - ROBOTS PARALLELES.....	145
6.1. Etude géométrique, détermination des positions et des mouvements	146
6.2. Robot parallèle à six actionneurs linéaires de type simulateur de vol	146
7. CONCEPTION D'UN VERIN ELECTRIQUE LINEAIRE	152
7.1. Perspective éclatée d'un vérin électrique linéaire	152
7.2. Autres conceptions d'actionneurs linéaires électriques	153

7.3. Vérins hydrauliques linéaires et rotatifs	153
8. EXEMPLES DE ROBOTS PARALLELES.....	153
8.1. Robot Delta	153
8.2. Robot Hexa	154
8.3. Architectures similaires	155
8.4. Fauteuil à six jambes pour handicapés WL-16	155
8.5. Robot d'aide à des interventions médicales	156
VI – LES COMMANDES CINEMATIQUES	157
1. LA COMMANDE EN VITESSE – PROBLEME POSE.....	158
2. LE MODELE VARIATIONNEL	158
3. LES MODELES CINEMATIQUES.....	162
3.1. Les éléments à gérer en commande cinématique	162
3.2. Méthode récurrente	163
3.3. Méthode des torseurs cinématiques	166
4. APPLICATION A UNE ARCHITECTURE PPG.....	170
4.1. Schémas paramétrés	170
4.2. Le modèle variationnel	171
4.3. Le modèle cinématique à l'aide des torseurs cinématiques	176
4.4. Torseur cinématique de la tâche à réaliser	178
4.5. Description à l'aide de la formule de récurrence	180
5. COMMANDE EN ACCELERATION.....	181
5.1. Commande en accélération à partir du modèle variationnel	182
5.2. Commande en accélération à partir des torseurs cinématiques	184
VII - LA COMMANDE EN FORCE ET COUPLE.....	189
1. LA COMMANDE EN FORCE	189
2. LES MISES EN EQUATIONS.....	189
2.1. Robot à l'arrêt ou quasiment à l'arrêt	190
2.2. Le Principe Fondamental de la Mécanique PFM - Les Théorèmes Généraux TG	190
2.3. Expression générale du PFM - Lagrange - Travaux Virtuels TV	191
3. APPLICATIONS – CALCUL DES ACTIONNEURS.....	205
3.1. Principe Fondamental de la Mécanique et TG	205
3.2. Application des Travaux Virtuels	206
3.3. Développement des calculs des Travaux Virtuels	210
3.4. Développement des Théorèmes Généraux	211
4. UTILISATION D'UN PARAMETRAGE DIFFERENT	212
5. ETUDE D'UNE ARCHITECTURE A TROIS AXES PPG.....	215
5.1. Schéma cinématique paramétré	215
5.2. Utilisation des Travaux Virtuels et des dérivées partielles	215
5.3. Utilisation du principe fondamental de la mécanique	218
6. LES UTILISATIONS PRATIQUES	222
VIII – UTILISATIONS PRATIQUES DE LA COMMANDE EN FORCE ET COUPLE	223
1. L'EQUILIBRAGE	223

1.1. Equilibrage par contrepoids	223
1.2. Compensation par ressorts	224
2. EVALUATIONS AUTOMATIQUES EN LIGNE.....	226
3. DETERMINATION D'UNE ACTION EXTERIEURE SUR L'ARCHITECTURE.....	226
4. SYSTEMES D'EQUILIBRAGES PLANS ET SPATIAUX	227
4.1. Equilibrage du système plan - schéma paramétré	227
4.2. Application des Théorèmes Généraux	228
4.3. Utilisation des dérivations partielles - Travaux Virtuels	229
4.4. Equilibrage du second degré de liberté autour de l'axe y	231
5. EVALUATION DE LA MASSE ET DU CENTRE DE MASSE.....	231
5.1. Développement des expressions	231
5.2. Application à une architecture 6 axes	233
6. DETECTION D'UNE ACTION EXTERIEURE.....	244
6.1. Détection en ligne d'une force, d'un couple, d'un torseur	244
6.2. Mise en équations d'une architecture 6 axes	245
6.3. Architecture simplifiée, utilisation de T.V. et des T.G	249
7. CAPACITE D'UN ROBOT	257
7.1. Utilisation de la matrice jacobienne	257
7.2. Utilisation des torseurs des efforts transmissibles	257
8. TRAVAUX VIRTUELS - CAS GENERAL -TORSEUR DES PETITES ROTATIONS ET DEPLACEMENTS	257
IX – ETUDES D'ARCHITECTURES - COMMANDE EN FORCE - COUPLE	261
1. LES EFFETS PASSIFS	261
1.1. Effets passifs dans les liaisons	261
1.2. Actions d'un milieu fluide sur la structure	261
1.3. Effets passifs difficiles à quantifier et à maîtriser	261
2. EXEMPLE – ARCHITECTURE OUVERTE A 5 AXES	262
2.1. Forces et couples généralisés, prise en compte des actions passives	262
2.2. Equilibrage de l'architecture	268
2.3. Action de contact de la structure avec l'environnement	270
2.4. Les évaluations en ligne	270
3. ARCHITECTURES POLYARTICULEES	271
3.1. Premier exemple	271
3.2. Deuxième exemple	274
3.3. Conception - Schématisation et mise en équations automatique	275
4. ROBOT PARALLELE	275
4.1. Schématisation – paramétrage du robot parallèle	277
4.2. La commande en position	278
4.3. La commande en vitesse	280
4.4. La commande en force	281
4.5. La commande dynamique	282
5. SYSTEME DE ROTATION A CALES BIAISES	282
6. APPLICATIONS DES TRAVAUX VIRTUELS AUX ARCHITECTURES FERMEES	284

X - LA COMMANDE DYNAMIQUE.....	289
1. LES EXPRESSIONS DE LA COMMANDE DYNAMIQUE.....	289
1.1. Le formalisme de Lagrange	291
1.2. Principe fondamental de la mécanique - Théorèmes Généraux	294
1.3. Exemple de traitement parallèle de différents axes	295
1.4. La chaîne complète du modèle dynamique	295
2. APPLICATIONS - THEOREMES GENERAUX - FORMALISME DE LAGRANGE	297
2.1. Architecture redondante 7 axes - Théorèmes Généraux	297
2.2. Application du formalisme de Lagrange à l'architecture réduite 3 axes	303
2.3. Application des théorèmes généraux à l'architecture réduite 3 axes - Etapes de calculs	314
XI - OPTIMISATIONS DES ARCHITECTURES.....	323
1. COMPARAISON DES PORTEURS SCARA ET ANTHROPOMORPHE	324
1.1. Aires et volumes accessibles	324
1.2. Comparaison des modèles géométriques	325
1.3. Comparaison des commandes en vitesse	326
1.4. Les commandes en accélération et en force/couple	327
1.5. Comparaison des commandes dynamiques	328
1.6. Actions des masses et des couples sur les articulations	338
2. OPTIMISATION DES SEGMENTS.....	339
2.1. Eléments utiles	339
2.2. Analyse des formes d'un segment à l'aide de Lagrange	342
2.3. Etude et quantification des gains possibles sur une architecture 7 axes	345
3. COMMENTAIRES ET CONCLUSION	352
XII – ROBOTS HUMANOÏDES.....	353
1. COMPARAISON HOMME – MACHINE	353
2. LES GRANDS AXES A ANALYSER.....	353
2.1. Problèmes liés à la partie opérative	354
2.2. La gestuelle de l'homme	355
2.3. Modélisation	355
2.4. Schéma d'analyse - mise en équations	362
2.5. Les équations pour l'étude statique et dynamique	363
2.6. Analyse des actions du sol sur les pieds	364
XIII – PRINCIPALES METHODES DE MODELISATIONS.....	367
1. TRANSFORMATIONS - PARAMETRAGES - FORMULATIONS.....	368
1.1. Les diverses transformations	369
1.2. Paramétrage et formule de Denavit - Hartenberg - applications	369
1.3. Paramétrage et formule de Sheth - Uicker	382
1.4. Paramétrage et formule de Kleinfinger - Khalil	384
1.5. Formalisme de Paul	386
1.6. Le formalisme C.B. coordonnées Cylindriques et angles de Bryant de T.C.Yih	386
1.7. Formalisme proposé par Litvin F.L	388
1.8. Paramétrage et formule de Megahed	389
1.9. Le formalisme présenté par G.Gogu – P.Coiffet –A.Barraco	390
1.10. La méthode des Hypercomplexes	391
2. ANALYSE COMPARATIVE DES FORMALISMES - CONCLUSION.....	392