

<b>Préface</b>	<b>iii</b>
<b>1 Mécanismes</b>	<b>1</b>
1.1 Modélisation cinématique . . . . .	1
1.1.1 Problématique . . . . .	1
1.1.2 Modèle cinématique . . . . .	1
1.2 Liaisons normalisées . . . . .	2
1.2.1 Paramétrage des liaisons . . . . .	2
1.2.2 Tableau des liaisons . . . . .	2
1.3 Chaînes de solides . . . . .	3
1.3.1 Structure des mécanismes - graphe de structure . . . . .	3
1.3.2 Analyses géométrique et cinématique des mécanismes . . . . .	4
1.3.3 Liaisons cinématiquement équivalentes . . . . .	5
1.4 Représentation schématique des mécanismes . . . . .	8
1.4.1 Schéma cinématique . . . . .	8
1.4.2 Schéma cinématique minimal . . . . .	9
1.4.3 Schéma technologique . . . . .	9
1.5 Mobilité et hyperstatisme . . . . .	9
1.5.1 Définitions . . . . .	9
1.5.2 Mobilité - Hyperstaticité . . . . .	10
1.5.3 Exemple guide - Vanne robinet . . . . .	13
1.5.4 Relations entre mobilité et hyperstatisme . . . . .	21
1.5.5 Isostaticité . . . . .	22
1.6 Exercices . . . . .	23
1.6.1 Corrigé	21

<b>Cinétique</b>	<b>39</b>
2.1 Masse et inertie . . . . .	39
2.1.1 Notions d'inertie . . . . .	39
2.1.2 Masse . . . . .	40
2.1.3 Centre d'inertie . . . . .	40
2.2 Moments d'inertie . . . . .	43
2.2.1 Moment d'inertie par rapport à un point . . . . .	43
2.2.2 Moment d'inertie par rapport à une droite . . . . .	44
2.2.3 Rayon de giration . . . . .	44
2.2.4 Moments d'inertie dans un repère cartésien . . . . .	44
2.2.5 Relations entre les moments d'inertie . . . . .	45
2.2.6 Théorème de Huygens . . . . .	46
2.2.7 Produits d'inertie . . . . .	48
2.3 Opérateur d'inertie . . . . .	48
2.3.1 Opérateur d'inertie en un point . . . . .	48
2.3.2 Propriétés et directions principales de la matrice d'inertie . . . . .	53
2.4 Exercices . . . . .	58
2.4.1 Corrigés . . . . .	61
2.5 Torseur cinétique . . . . .	66
2.5.1 Définition . . . . .	66
2.5.2 Cas du solide indéformable . . . . .	67
2.6 Torseur dynamique . . . . .	68
2.6.1 Définition . . . . .	68
2.6.2 Changement de point de réduction . . . . .	69
2.6.3 Relation entre la résultante cinétique et la résultante dynamique . . . . .	69
2.6.4 Relation entre le moment cinétique et le moment dynamique . . . . .	69
2.6.5 Cas du solide indéformable . . . . .	70
2.7 Énergie cinétique . . . . .	71
2.7.1 Définition . . . . .	71
2.7.2 Cas du solide indéformable . . . . .	71
2.8 Caractéristiques cinétiques d'un ensemble de solide . . . . .	73
2.8.1 Torseur cinétique d'un ensemble de solides . . . . .	74
2.8.2 Torseur dynamique d'un ensemble de solides . . . . .	74
2.8.3 Énergie cinétique d'un ensemble de solides . . . . .	74
2.9 Exercices . . . . .	75
2.9.1 Corrigés . . . . .	79

<b>Dynamique du solide</b>	<b>83</b>
3.1 Principe Fondamental de la Dynamique . . . . .	83
3.1.1 Énoncé . . . . .	83
3.1.2 Caractère Galiléen des repères . . . . .	84
3.2 Théorèmes généraux . . . . .	85

3.2.1	Théorème de la résultante dynamique . . . . .	85
3.2.2	Théorème des quantités de mouvement . . . . .	85
3.2.3	Théorème du moment dynamique . . . . .	85
3.2.4	Théorème du moment cinétique . . . . .	85
3.3	Utilisation du P.F.D. . . . .	86
3.4	P.F.D dans un repère non galiléen . . . . .	87
3.4.1	Composition des accélérations . . . . .	87
3.4.2	Composition du torseur dynamique . . . . .	88
3.4.3	Principe fondamental dans un repère non galiléen . . . . .	89
3.5	Application – Équilibrage d'un solide . . . . .	90
3.5.1	Problème général de l'équilibrage . . . . .	90
3.5.2	Équilibrage . . . . .	94
3.5.3	Équilibrage à 2 masses . . . . .	94
3.6	Exercices . . . . .	98
3.6.1	Corrigés . . . . .	106

## **4 Puissance et énergie 117**

4.1	Puissance des efforts extérieurs . . . . .	117
4.2	Cas du solide indéformable . . . . .	118
4.2.1	Énoncé . . . . .	118
4.2.2	Démonstration . . . . .	118
4.3	Puissance des efforts intérieurs . . . . .	120
4.3.1	Puissance des efforts de liaison . . . . .	120
4.3.2	Liaison énergétiquement parfaite . . . . .	121
4.3.3	Contact ponctuel réel . . . . .	121
4.3.4	Liaisons normalisées réelles . . . . .	125
4.4	Travail et énergie . . . . .	126
4.4.1	Travail . . . . .	126
4.4.2	Énergie potentielle . . . . .	126
4.5	Théorème de l'énergie cinétique . . . . .	127
4.5.1	Énoncé . . . . .	127
4.5.2	Démonstration dans le cas d'un seul solide . . . . .	127
4.5.3	Démonstration dans le cas de deux solides . . . . .	129
4.5.4	Généralisation à n solides . . . . .	130
4.5.5	Utilisation . . . . .	130
4.5.6	Intégrale première de l'énergie cinétique . . . . .	130
4.6	Exercices . . . . .	131
4.6.1	Corrigés . . . . .	136

<b>5</b>	<b>Analyse fréquentielle des systèmes linéaires</b>	<b>147</b>
5.1	Réponse fréquentielle . . . . .	147
5.1.1	Fonction de transfert complexe . . . . .	149
5.1.2	Lieux de transfert . . . . .	149
5.2	Étude des SLCI à partir des diagrammes de Bode . . . . .	152
5.2.1	Système du premier ordre . . . . .	152
5.2.2	Système du second ordre . . . . .	155
5.2.3	Intégrateur . . . . .	163
5.2.4	Dérivateur . . . . .	164
5.2.5	Retard pur . . . . .	165
5.2.6	Généralisation du tracé des diagrammes de Bode . . . . .	166
5.3	Étude des SLCI à partir du diagramme de Nyquist . . . . .	168
5.3.1	Système du premier ordre . . . . .	168
5.3.2	Système du second ordre . . . . .	169
5.3.3	Intégrateur - Dérivateur . . . . .	171
5.3.4	Retard pur . . . . .	172
5.3.5	Généralisation . . . . .	173
5.3.6	De Bode à Nyquist . . . . .	174
5.4	Étude des SLCI à partir du diagramme de Black . . . . .	174
5.4.1	Système du premier ordre . . . . .	174
5.4.2	Système du second ordre . . . . .	175
5.4.3	Intégrateur . . . . .	176
5.4.4	Retard pur . . . . .	178
5.4.5	Généralisation . . . . .	178
5.4.6	Abaque de Black - Nichols . . . . .	178
5.5	Exercices . . . . .	180
5.5.1	Corrigés . . . . .	183
<b>6</b>	<b>Analyse des systèmes asservis</b>	<b>191</b>
6.1	Caractérisation des systèmes asservis . . . . .	191
6.1.1	Structure des systèmes asservis . . . . .	191
6.1.2	Caractéristiques d'un système asservi . . . . .	192
6.2	Stabilité . . . . .	193
6.2.1	Position du problème et définitions . . . . .	193
6.2.2	Étude de la stabilité . . . . .	194
6.2.3	Condition de stabilité . . . . .	198
6.2.4	Position des pôles . . . . .	198
6.2.5	Critères de stabilité . . . . .	198
6.2.6	Marges de stabilité . . . . .	208
6.3	Précision . . . . .	212
6.3.1	Position du problème . . . . .	212
6.3.2	Données . . . . .	213

6.3.3	Erreur en régime permanent - erreur statique . . . . .	215
6.3.4	Effet d'une perturbation sur la précision . . . . .	219
6.4	Rapidité . . . . .	222
6.4.1	Temps de réponse - temps de montée . . . . .	222
6.4.2	Temps de montée et bande passante . . . . .	222
6.5	Exercices . . . . .	224
6.5.1	Corrigés . . . . .	228
<b>7</b>	<b>Correction des systèmes asservis</b>	<b>237</b>
7.1	Nécessité de la correction . . . . .	237
7.2	Principaux réseaux correcteurs . . . . .	238
7.2.1	Correcteur Proportionnel ( P ) . . . . .	238
7.2.2	Correcteur - Intégral ( I ) . . . . .	239
7.2.3	Correcteur Proportionnel - Intégral ( PI ) . . . . .	240
7.2.4	Correcteur Proportionnel Dérivateur - PD . . . . .	245
7.2.5	Correcteur à avance de phase . . . . .	247
7.2.6	Correcteur à retard de phase . . . . .	249
7.2.7	Correcteur à retard-avance de phase . . . . .	250
7.2.8	Correcteur PID . . . . .	252
7.2.9	Correction en réaction . . . . .	259
7.3	Détermination expérimentale des correcteurs . . . . .	262
7.3.1	Méthode de Ziegler-Nichols . . . . .	262
7.4	Exercices . . . . .	265
7.4.1	Corrigés . . . . .	276
<b>8</b>	<b>Grafcet</b>	<b>291</b>
8.1	Principes généraux . . . . .	291
8.1.1	Structure du GRAFCET . . . . .	291
8.1.2	Règles d'évolution . . . . .	292
8.2	Lecture et interprétation du grafcet . . . . .	293
8.2.1	Évolution du grafcet . . . . .	293
8.2.2	Réceptivités associées aux transitions . . . . .	293
8.2.3	Modes de sorties . . . . .	294
8.2.4	Évolution fugace . . . . .	296
8.2.5	Structures de base . . . . .	297
8.2.6	Formes particulières . . . . .	300
8.3	Structuration et hiérarchisation . . . . .	301
8.3.1	Nécessité de la structuration . . . . .	301
8.3.2	Structuration par synchronisation de grafkets . . . . .	302
8.3.3	Structuration par macro-étapes . . . . .	304
8.3.4	Structuration par forçage . . . . .	305
8.3.5	Structuration par encapsulation . . . . .	306

8.3.6	Exemple de synthèse . . . . .	307
8.4	Étude de cas . . . . .	311
8.4.1	Corrigés . . . . .	317
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>325</b>
A.1	Mécanique . . . . .	325
A.1.1	Liaisons . . . . .	325
A.1.2	Matrices d'inertie de quelques solides élémentaires . . . . .	329
A.2	Automatique . . . . .	331
A.2.1	Transformées de Laplace . . . . .	331
A.2.2	Abaque des dépassements d'un second ordre . . . . .	332
A.2.3	Abaque du temps de réponse d'un second ordre . . . . .	332
A.2.4	Abaque de Black . . . . .	333
	<b>Liens</b>	<b>335</b>
	<b>Liste des exercices</b>	<b>337</b>