

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>1</b>
<b>1 Ingénierie des systèmes</b>	<b>3</b>
1.1 Besoin, produit, système	3
1.1.1 Le besoin	3
1.1.2 Le produit, système	3
1.2 Ingénierie système	5
1.3 Analyse fonctionnelle et le cahier des charges	5
1.4 Un langage de description des systèmes : SysML	5
1.5 Exemple guidé : cafetière à capsules	6
1.5.1 Description commerciale	6
1.5.2 Décrire l'environnement : diagramme de contexte	7
1.5.3 Identifier les cas d'utilisation : diagramme des cas d'utilisation	9
1.5.4 Décrire les exigences du système : diagramme d'exigence	10
1.5.5 Préciser la constitution du système : diagramme de définition de blocs	12
1.5.6 Préciser les liens et les flux : diagramme de blocs interne	14
1.5.7 Décrire la succession des états : diagramme d'états-transitions	15
1.5.8 Décrire le comportement : diagramme de séquence	17
1.5.9 Simuler et valider le comportement : diagramme paramétrique	18
1.5.10 Décrire l'organisation matérielle et logicielle : diagramme de package	18
1.6 Classification des systèmes	18
1.6.1 Selon la nature de la commande et de l'énergie	18
1.6.2 Selon la nature des informations	18
1.7 Description générique d'un système automatisé	19
1.7.1 Chaîne d'information	20
1.7.2 Chaîne d'énergie	20
1.7.3 Description SysML	21
1.7.4 Les constituants de la chaîne d'énergie	22
1.7.5 Constituants des chaînes d'information	23
1.8 Feuille de travaux dirigés n°1	24
1.9 Corrigés n°1	33
<b>2 Caractérisation des systèmes asservis</b>	<b>35</b>
2.1 Systèmes asservis	35
2.2 Schéma fonctionnel	35
2.3 Exemples de cahiers des charges de SA	37
2.4 Régulation et asservissement	37
2.5 Caractéristiques d'un système asservi	37
2.6 Précision	38
2.6.1 Erreur indicielle	38
2.6.2 Erreur de traînage	38
2.7 Rapidité	39
2.7.1 Temps de réponse	39
2.7.2 Temps de montée	39
2.8 Dépassements	40
2.9 Stabilité	40

2.10	Modélisation . . . . .	41
2.10.1	Modèle de comportement . . . . .	41
2.10.2	Modèle de connaissance . . . . .	42
2.11	Feuille de travaux dirigés n°2 . . . . .	43
2.12	Corrigés n°2 . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Modélisation des systèmes linéaires et asservis</b>	<b>47</b>
3.1	Systèmes linéaires continus invariants . . . . .	47
3.1.1	Exemples . . . . .	47
3.2	Propriétés des SLCI . . . . .	49
3.2.1	Principe de proportionnalité . . . . .	49
3.2.2	Additivité - Principe de superposition . . . . .	50
3.2.3	Systèmes continus . . . . .	50
3.2.4	Systèmes invariants . . . . .	50
3.3	Principales non-linéarités . . . . .	50
3.4	Étude des systèmes linéaires . . . . .	51
3.5	Description par les équations différentielles . . . . .	51
3.5.1	Principe de résolution . . . . .	52
3.6	Description par la transformation de Laplace . . . . .	56
3.6.1	Transformation de Laplace . . . . .	56
3.6.2	Utilisation pour la résolution d'équations différentielles . . . . .	63
3.7	Fonction de transfert – Transmittance . . . . .	66
3.7.1	Pôles et zéros . . . . .	67
3.8	Forme canonique . . . . .	67
3.9	Schéma-bloc . . . . .	67
3.10	Feuille de travaux dirigés n°3 . . . . .	68
3.11	Corrigés n°3 . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Représentation d'un système par les schémas-blocs</b>	<b>75</b>
4.1	Schéma fonctionnel ou schéma-bloc . . . . .	75
4.1.1	Représentation d'un système par les schémas-blocs . . . . .	75
4.1.2	Formalisme . . . . .	76
4.1.3	Représentation d'un système asservi . . . . .	77
4.2	Manipulation des schémas-blocs . . . . .	79
4.3	Détermination d'une fonction de transfert . . . . .	80
4.3.1	Détermination par la modification du schéma-bloc . . . . .	80
4.3.2	Détermination analytique . . . . .	81
4.3.3	Principe de superposition . . . . .	82
4.4	Application : moteur à courant continu à champ permanent . . . . .	84
4.4.1	Principe de fonctionnement . . . . .	84
4.4.2	Modèle de connaissance . . . . .	84
4.4.3	Schéma-bloc du moteur . . . . .	85
4.4.4	Détermination analytique de $\Omega_m(p)$ . . . . .	87
4.5	Feuille de travaux dirigés n°4 . . . . .	88
4.6	Corrigés n°4 . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Étude temporelle des systèmes linéaires</b>	<b>99</b>
5.1	Systèmes du 1 <sup>er</sup> ordre . . . . .	99
5.1.1	Définition . . . . .	99
5.1.2	Fonction de transfert . . . . .	99
5.1.3	Étude temporelle - Réponse à un échelon . . . . .	99
5.1.4	Réponse à une impulsion de Dirac . . . . .	102
5.1.5	Réponse à une rampe . . . . .	102

5.2	Systèmes du 2 <sup>d</sup> ordre . . . . .	103
5.2.1	Définition . . . . .	103
5.2.2	Fonction de transfert . . . . .	103
5.2.3	Réponse temporelle à une entrée en échelon . . . . .	104
5.3	Intégrateur . . . . .	109
5.4	Dérivateur . . . . .	109
5.5	Retard . . . . .	110
5.6	Influence de la boucle fermée . . . . .	110
5.6.1	1 <sup>er</sup> ordre . . . . .	110
5.6.2	2 <sup>d</sup> ordre . . . . .	111
5.7	Systèmes complexes . . . . .	111
5.7.1	Systèmes d'ordre supérieur à 2 . . . . .	111
5.7.2	Influence d'un zéro . . . . .	113
5.7.3	Pôles positifs . . . . .	114
5.7.4	Réponse temporelle et position des pôles . . . . .	115
5.8	Feuille de travaux dirigés n°5 . . . . .	116
5.9	Corrigés n°5 . . . . .	122
<b>6</b>	<b>Analyse fréquentielle des systèmes linéaires</b> . . . . .	<b>127</b>
6.1	De la réponse temporelle à la réponse fréquentielle . . . . .	127
6.1.1	Réponse fréquentielle . . . . .	127
6.1.2	De la transformée de Laplace à la réponse fréquentielle . . . . .	128
6.2	Réponse fréquentielle . . . . .	129
6.2.1	Fonction de transfert complexe . . . . .	130
6.2.2	Lieux de transfert . . . . .	130
6.3	Étude des SLCI à partir des diagrammes de Bode . . . . .	130
6.3.1	Diagrammes de Bode . . . . .	130
6.3.2	Propriétés graphiques des diagrammes de Bode . . . . .	131
6.4	Système du premier ordre . . . . .	132
6.4.1	Représentation fréquentielle . . . . .	132
6.4.2	Premier ordre au numérateur . . . . .	134
6.5	Système du second ordre . . . . .	135
6.5.1	Rappels . . . . .	135
6.5.2	Représentation fréquentielle . . . . .	135
6.6	Intégrateur . . . . .	141
6.7	Dérivateur . . . . .	142
6.8	Retard pur . . . . .	142
6.8.1	Influence d'un retard sur le tracé d'un lieu de Bode . . . . .	142
6.9	Généralisation du tracé des diagrammes de Bode . . . . .	143
6.10	Feuille de travaux dirigés n°6 . . . . .	146
6.11	Corrigés n°6 . . . . .	152
<b>7</b>	<b>Cinématique du solide</b> . . . . .	<b>157</b>
7.1	Coordonnées d'un point dans l'espace . . . . .	157
7.1.1	Repère et référentiel . . . . .	157
7.1.2	Sens trigonométrique . . . . .	157
7.1.3	Coordonnées cartésiennes . . . . .	158
7.1.4	Coordonnées cylindriques . . . . .	158
7.1.5	Coordonnées sphériques . . . . .	159
7.1.6	Relations entre les systèmes de coordonnées . . . . .	159
7.2	Position et orientation d'un solide . . . . .	160
7.3	Solides et repères associés . . . . .	161
7.3.1	Solides . . . . .	161
7.3.2	Repères associés . . . . .	161

7.4	Trajectoire et vitesse d'un point matériel . . . . .	163
7.4.1	Point mobile par rapport à un référentiel . . . . .	163
7.4.2	Trajectoire . . . . .	163
7.4.3	Vitesse et accélération d'un point . . . . .	164
7.4.4	Vecteur vitesse de rotation . . . . .	164
7.5	Compléments mathématiques . . . . .	165
7.6	Cinématique du solide . . . . .	169
7.6.1	Solide indéformable . . . . .	169
7.6.2	Champ des vecteurs vitesse d'un solide . . . . .	170
7.6.3	Composition des vecteurs vitesse . . . . .	173
7.6.4	Composition des vecteurs accélération . . . . .	174
7.6.5	Composition des vecteurs vitesse de rotation . . . . .	175
7.6.6	Cinématique du contact ponctuel entre deux solides . . . . .	176
7.6.7	De la détermination de la vitesse d'un point . . . . .	177
7.7	Le torseur cinématique . . . . .	178
7.7.1	Compléments mathématiques : le torseur . . . . .	178
7.7.2	Torseur cinématique . . . . .	180
7.8	Feuille de travaux dirigés n°7 . . . . .	182
7.9	Corrigés n°7 . . . . .	185
<b>8</b>	<b>Étude des mécanismes</b> . . . . .	<b>189</b>
8.1	Mécanismes . . . . .	189
8.1.1	Mécanisme en chaîne ouverte . . . . .	189
8.1.2	Mécanisme en chaîne fermée . . . . .	189
8.1.3	Mécanisme en chaîne complexe . . . . .	190
8.2	Liaison élémentaire . . . . .	190
8.2.1	Mouvements élémentaires . . . . .	190
8.3	Liaisons normalisées . . . . .	191
8.4	Schéma cinématique . . . . .	195
8.5	Graphe de structure . . . . .	196
8.6	Schéma cinématique . . . . .	197
8.7	Schéma cinématique minimal . . . . .	197
8.8	Schéma technologique . . . . .	198
8.9	Étude cinématique des chaînes de solides . . . . .	198
8.10	Liaisons cinématiquement équivalentes . . . . .	200
8.11	Mécanisme plan . . . . .	201
8.12	Feuille de travaux dirigés n°8 . . . . .	202
8.13	Corrigés n°8 . . . . .	205
<b>9</b>	<b>Transmission de puissance</b> . . . . .	<b>209</b>
9.1	Réduire/augmenter la vitesse de rotation . . . . .	209
9.2	Transformer un mouvement de rotation en translation . . . . .	219
9.3	Moduler la vitesse de sortie pour une vitesse d'entrée constante . . . . .	221
9.4	Feuille de travaux dirigés n°9 . . . . .	222
9.5	Corrigés n°9 . . . . .	232
<b>10</b>	<b>Modélisation des actions mécaniques</b> . . . . .	<b>235</b>
10.1	Actions mécaniques . . . . .	235
10.1.1	Définition . . . . .	235
10.1.2	Nature et classification des actions mécaniques . . . . .	235
10.1.3	Actions mécaniques de contact . . . . .	235
10.2	Modèle local / modèle global . . . . .	236
10.2.1	Action mécanique à contact surfacique . . . . .	236
10.2.2	Action mécanique à contact linéique . . . . .	238

10.2.3	Action mécanique à contact ponctuel parfait . . . . .	238
10.3	Action mécanique à distance . . . . .	240
10.3.1	Modèle local . . . . .	240
10.3.2	Modélisation de l'action de pesanteur . . . . .	241
10.3.3	Centre d'inertie . . . . .	241
10.4	Moment d'une action mécanique . . . . .	244
10.4.1	Moment d'une action ponctuelle . . . . .	244
10.4.2	Moment d'une action de pression . . . . .	244
10.4.3	Moment du poids au centre d'inertie . . . . .	244
10.5	Torseur d'action mécanique . . . . .	245
10.5.1	Cas d'une action mécanique ponctuelle . . . . .	245
10.5.2	Cas d'une action de pression . . . . .	246
10.5.3	Cas de la gravité . . . . .	247
10.5.4	Torseur couple . . . . .	247
10.6	Prise en compte des frottements . . . . .	247
10.6.1	Contact ponctuel réel . . . . .	247
10.6.2	Lois de Coulomb - Détermination de la résultante . . . . .	248
10.6.3	Détermination du moment . . . . .	250
10.6.4	Frottements fluides ou visqueux . . . . .	251
10.7	Actions mécaniques particulières . . . . .	251
10.7.1	Action mécanique développée par un ressort de traction-compression . . . . .	251
10.7.2	Action mécanique développée par un ressort spiral . . . . .	251
10.7.3	Action mécanique d'un moteur . . . . .	252
10.7.4	Action transmissible par un engrenage . . . . .	252
10.8	Torseur des actions transmissibles par les liaisons normalisées . . . . .	253
10.8.1	Liaison sphère plan (ponctuelle) parfaite . . . . .	253
10.8.2	Liaison appui plan . . . . .	254
10.8.3	Relation entre torseur cinématique et torseur des efforts transmissibles par une liaison parfaite . . . . .	255
10.8.4	Tableau des liaisons normalisées . . . . .	256
10.9	Feuille de travaux dirigés n°10 . . . . .	259
10.10	Corrigés n°10 . . . . .	264
<b>11</b>	<b>Principe fondamental de la statique</b> . . . . .	<b>267</b>
11.1	Définitions préalables . . . . .	267
11.1.1	Système matériel - Système matériel isolé . . . . .	267
11.1.2	Équilibre d'un système matériel . . . . .	267
11.1.3	Équilibre d'un ensemble de solide . . . . .	267
11.1.4	Actions mécaniques extérieures . . . . .	268
11.1.5	Actions mécaniques intérieures . . . . .	268
11.2	Principe fondamental de la statique - P.F.S. . . . .	268
11.2.1	Énoncé . . . . .	268
11.2.2	Théorèmes généraux . . . . .	269
11.2.3	Théorème des actions réciproques . . . . .	270
11.2.4	Principe fondamental de la statique pour un ensemble de solides . . . . .	271
11.3	Résolution d'un problème de statique . . . . .	271
11.3.1	Mécanismes spatiaux - Cas général . . . . .	271
11.3.2	Solide soumis à 2 glisseurs . . . . .	272
11.3.3	Solide soumis à 3 glisseurs . . . . .	273
11.3.4	Mécanismes plans . . . . .	274
11.4	Notion d'hyperstaticité . . . . .	274
11.5	Feuille de travaux dirigés n°11 . . . . .	276
11.6	Corrigés n°11 . . . . .	288

<b>12</b>	<b>Systèmes à événements discrets</b>	<b>297</b>
12.1	Typologie des systèmes	297
12.1.1	Les systèmes continus	297
12.1.2	Les systèmes numériques échantillonnés	297
12.1.3	Les systèmes discrets	298
12.1.4	Variable logique	298
12.1.5	Les systèmes à événements discrets - S.E.D.	299
12.2	Typologie des S.E.D.	299
12.2.1	S.E.D. combinatoires	299
12.2.2	S.E.D. séquentiels	300
12.3	Systèmes combinatoires	300
12.3.1	Algèbre de Boole	300
12.3.2	Table de vérité	302
12.4	Fonctions logiques de base à 2 variables	303
12.4.1	Fonctions de base	303
12.4.2	Fonctions complexes	303
12.4.3	Logigramme	304
12.4.4	Réalisation des fonctions logiques en technologie électrique câblée	305
12.4.5	Réalisation des fonctions logiques en technologie électronique	306
12.5	Détermination et simplification des fonctions logiques	307
12.5.1	Simplification à partir des relations de l'algèbre	307
12.5.2	Tableau de Karnaugh	308
12.6	Feuille de travaux dirigés n°12-a	309
12.7	Corrigés n°12-a	314
12.8	Systèmes séquentiels	317
12.8.1	Fonction mémoire	317
12.9	Machine à états - <i>State machine diagram</i>	319
12.9.1	États	319
12.9.2	Les transitions	320
12.9.3	Les blocs	321
12.9.4	Exemples	323
12.10	Feuille de travaux dirigés n°12-b	327
12.11	Corrigés n°12-b	334
<b>13</b>	<b>Codage et représentation des données</b>	<b>337</b>
13.1	Le binaire	337
13.2	Représentation des nombres entiers - La base 2	337
13.2.1	Principe de la numérotation positionnelle	337
13.2.2	Transcodage base n vers base 10	338
13.2.3	Transcodage base 10 vers base n	338
13.2.4	Base 2 - Code binaire naturel	339
13.2.5	La base 16-hexadécimal	339
13.2.6	Code Gray	340
13.3	Représentation des nombres entiers relatifs	343
13.3.1	Les limites du codage des nombres relatifs	344
13.4	Représentation des réels	344
13.4.1	Les nombres à virgule	344
13.5	Représentation des caractères	346
13.5.1	Code ASCII	346
13.5.2	Norme ISO-8859-1	347
13.5.3	Unicode - UTF-8	347
13.6	Feuille de travaux dirigés n°13	349
13.7	Corrigés	352