

Table des matières

Préface	1
Jean-Charles MARÉ	
Chapitre 1. Place de la simulation dans le cycle de conception des systèmes technologiques complexes	3
1.1. L'approche de conception des systèmes complexes	4
1.1.1. Activités d'ingénierie dans le cycle de conception	5
1.1.2. Besoins de modélisation et de simulation dans le cycle de conception	6
1.1.3. Validation et vérification	15
1.2. Objectifs et contenus de l'ouvrage	16
1.2.1. Principes de modélisation	16
1.2.2. Approches et outils d'analyse	19
1.2.3. Connaissances multiphysiques ou multidisciplinaires	19
1.2.4. Approche par problèmes	20
Chapitre 2. Concepts fondamentaux de la modélisation multiphysique à paramètres localisés	21
2.1. Définition et niveaux de modélisation des systèmes mécatroniques	22
2.1.1. Des systèmes mécaniques aux systèmes mécatroniques	22
2.1.2. Niveaux de modélisation rencontrés en conception de systèmes mécatroniques	24
2.2. Modélisation à paramètres localisés des systèmes mécatroniques	25
2.2.1. Paramètres localisés	25
2.2.2. Notion de port et de causalité	25

2.2.3. Lois de Kirchhoff et approche réseau	28
2.2.4. Représentation des flux d'énergie	31
2.2.5. Types d'éléments génériques	32
2.3. Modélisation multiphysique d'un mécanisme de lève-vitre électrique	35
2.3.1. Description du système et des domaines modélisés	35
2.3.2. Domaines et éléments utilisés pour la modélisation	36
2.3.3. Modélisation incrémentale	38
2.3.4. Modélisation graphique ou textuelle	40
2.3.5. Commande et simulations transitoires	41
2.4. Exercices de révision et questions à choix multiples	42
2.4.1. Révision des lois de Kirchhoff en modélisation multidomaine	42
2.4.2. Questions sur l'exemple du lève-vitre	44
2.4.3. Questions à choix multiples sur la modélisation de composants technologiques	45
2.5. Problèmes	48
2.5.1. Analyse de l'électronique de conditionnement d'un capteur de pression	48
2.5.2. Modélisation de la transmission de puissance d'un scooter électrique	51
2.5.2.1. Données du problème	51
2.5.2.2. Modélisation du scooter	53
2.5.2.3. Modélisation de la transmission de puissance	53
2.5.2.4. Simulation du véhicule avec le moteur électrique	54
2.5.3. Modélisation d'un système d'actionnement hydraulique de contrôle de vecteur poussée de fusée	54
2.5.3.1. Présentation du système d'actionnement	55
2.5.3.2. Modélisation de la tuyère	55
2.5.3.3. Modélisation de l'accumulateur	57
2.5.3.4. Modélisation du système complet	58
2.5.4. Perturbations électromagnétiques	59
2.5.4.1. Couplage par impédance commune	60
2.5.4.2. Couplage inductif dans un câble plat	61
2.5.4.3. Perturbations par champ magnétique	62
2.5.4.4. Perturbations par champ électrique	63
2.5.4.5. Transmissions de données	64

Chapitre 3. Mise en place d'un modèle à paramètres localisés 67

3.1. Introduction à la notion de modèle adapté	68
3.1.1. Objectifs du chapitre et démarche	68
3.1.2. Problème étudié	69

3.1.3. Importance du type d'excitation	70
3.2. Détermination des effets principaux	71
3.2.1. Mise en place systématique des domaines et effets	71
3.2.2. Du géométrique au réseau	72
3.3. Approches de modélisation et sélection des modèles adaptés	75
3.3.1. Modélisation incrémentale par complexité croissante	75
3.3.2. Réduction des modèles par l'analyse des index d'activité	78
3.3.3. Réduction des modèles par plan d'expérience ou par comparaison des effets	82
3.4. Exercices d'initiation à la mise en place de modèles à paramètres localisés	85
3.4.1. Mise en place de réflexes d'analyse	86
3.4.1.1. Effets de stockage et dissipatifs	86
3.4.1.2. Effets transformateurs	88
3.4.2. Lien géométrie/réseau : analyse d'une direction assistée	90
3.4.3. Analyse systématique des effets : analyse d'un système d'injection directe par rampe commune	93
3.5. Problèmes sur le choix de niveau de modélisation	95
3.5.1. Réponse thermique d'un moteur de TGV : approche déductive	95
3.5.2. Modélisation d'un capteur de couple de direction assistée : analyse d'une géométrie	97
3.5.3. Calcul du couple de courts-circuits du moteur de propulsion de sous-marin : réduction de modèle	102

Chapitre 4. Simulation numérique de systèmes multiphysiques 107

4.1. Du modèle mathématique au modèle numérique	108
4.1.1. Modèles mathématiques : les différents systèmes d'équations	108
4.1.1.1. La modélisation n-D : les PDE	108
4.1.1.2. La modélisation multiphysique 1-D : les ODE et DAE	109
4.1.2. Une préférence pour l'intégration	111
4.1.2.1. Le besoin géométrique	111
4.1.2.2. Le besoin numérique	112
4.1.2.3. Le besoin physique	114
4.1.3. Différentes représentations d'un système d'équations	114
4.1.3.1. L'espace d'état	114
4.1.3.2. Les schémas blocs	115
4.2. Du modèle numérique au modèle simulable par l'ordinateur	116
4.2.1. La notion de causalité	116
4.2.2. L'obtention du modèle simulable	117
4.2.2.1. Sélection des variables d'état	117

4.2.2.2. Matrice d'incidence structurelle	117
4.2.2.3. Triangularisation	119
4.2.3. Modélisation par <i>bond graph</i>	121
4.2.3.1. Le formalisme.	121
4.2.3.2. Les règles d'attribution de causalité pour la simulation . . .	124
4.2.3.3. Extraction des équations ordonnées pour la simulation . . .	125
4.2.3.4. Apartés	127
4.3. La simulation : résolution numérique des ODE.	128
4.3.1. Rappels et définitions	128
4.3.2. Méthodes à pas séparés	129
4.3.3. Méthodes à pas liés	132
4.3.4. Domaine de stabilité d'une méthode de résolution d'ODE.	134
4.4. Principales sources d'erreurs en modélisation et simulation	134
4.4.1. Représentativité du modèle	135
4.4.2. Validité des paramètres	136
4.4.3. Initialisation du système	137
4.4.4. Robustesse numérique	137
4.4.5. Erreurs d'observation.	138
4.5. Exercices de révision	138
4.5.1. Révision des différentes méthodes de modélisation.	138
4.5.1.1. Le domaine électrique	138
4.5.1.2. Le domaine mécanique	139
4.5.2. Études de causalité et modifications associées.	139
4.5.2.1. Deux condensateurs en parallèle	139
4.5.2.2. Les inerties du système de propulsion d'un sous-marin . . .	140
4.5.2.3. Contrainte de causalité : le frottement sec	141
4.6. Problème	142

Chapitre 5. Outils d'analyse des performances dynamiques 145

5.1. Indicateurs de performances dynamiques	146
5.2. La transformée de Laplace et les fonctions de transfert	152
5.3. Stabilité des systèmes dynamiques linéaires	163
5.4. Analyse des systèmes de premier et de deuxième ordre : réduction de modèle	171
5.4.1. Systèmes de premier ordre	172
5.4.1.1. Performances temporelles.	172
5.4.1.2. Performances fréquentielles	177
5.4.2. Systèmes de deuxième ordre	180
5.4.2.1. Performances temporelles.	181
5.4.2.2. Performances fréquentielles	185

5.4.3. Réduction des modèles	191
5.4.3.1. Approche temporelle.	191
5.4.3.2. Approche fréquentielle	197
5.5. Exercices de révision	201
5.5.1. Révision des performances dynamiques	201
5.5.2. Révision des fonctions de transfert.	205
5.5.3. Révision de la stabilité	207
5.5.4. Révision de la réduction de modèle	211
5.5.4.1. Approche temporelle.	211
5.5.4.2. Approche fréquentielle	213
5.5.5. Révision de systèmes de premier ordre	217
5.5.5.1. Approche temporelle.	217
5.5.5.2. Approche fréquentielle	218
5.5.6. Révision de systèmes de deuxième ordre	220
5.5.6.1. Approche temporelle.	220
5.5.6.2. Approche fréquentielle	222

Chapitre 6. Transmissions de puissances mécaniques et électromécaniques

225

6.1. Introduction.	226
6.1.1. Objectif du chapitre.	226
6.1.2. Cas d'étude.	226
6.2. Approches variationnelles	228
6.2.1. Équivalents variationnels des approches réseau en mécanique	228
6.2.2. Cas des systèmes à plusieurs degrés de liberté	231
6.2.3. Cas des systèmes multidomains	234
6.3. Obtention des modèles par intégration directe des lois locales : cas des céramiques massives et multicouches	236
6.3.1. Équations de la piézo-électricité	236
6.3.1.1. Matériaux élastiques	236
6.3.1.2. Matériaux diélectriques	237
6.3.1.3. Matériaux piézo-électriques	238
6.3.2. Modèle équivalent d'une céramique piézo-électrique.	239
6.3.3. Implémentation Modelica	241
6.4. Théorème des travaux virtuels : cas des actionneurs amplifiés.	243
6.4.1. Présentation des actionneurs et des hypothèses de modélisation	243
6.4.2. Obtention du rapport de transformation	244
6.4.3. Implémentation Modelica	245
6.5. Bilans d'énergie et de co-énergie : cas des bilames	247
6.5.1. Présentation des actionneurs et des hypothèses de modélisation	247

6.5.2. Obtention du modèle	248
6.6. Équations de Lagrange : cas des transducteurs Langevin	250
6.6.1. Présentation de l'actionneur	250
6.6.2. Obtention du modèle	251
6.6.2.1. Étude analytique du transducteur Langevin seul	252
6.6.2.2. Validation numérique et étude de la sonotrode	253
6.6.3. Implémentation Modelica	255
6.7. Exercices d'initiation	257
6.7.1. Théorème des travaux virtuels : mécanisme à ciseaux	257
6.7.2. Énergies et co-énergies : frein électromagnétique à manque de courant	259
6.7.3. Équation de Lagrange : modélisation d'un gyropode	261
6.8. Problèmes de modélisation.	263
6.8.1. Modélisation des efforts mécaniques d'une direction de voiture	263
6.8.2. Miroir piloté à large bande passante	265

Chapitre 7. Transmission de puissance par fluides faiblement compressibles 271

7.1. L'hydraulique de puissance	272
7.1.1. Contexte	272
7.1.2. Avantages d'utilisation de l'hydraulique de puissance	272
7.2. Présentation d'un système d'actionnement d'hélicoptère	273
7.3. Modélisation minimale du fluide selon les phénomènes considérés	275
7.3.1. Les besoins du modèle de fluide	275
7.3.2. Modélisation de la densité massique.	277
7.3.3. Modélisation de la viscosité dynamique.	278
7.3.4. Modélisation du module de compressibilité	278
7.3.5. Modélisation des propriétés par tables.	278
7.4. Modélisation des différents phénomènes physiques	279
7.4.1. L'élément R	279
7.4.2. L'élément C	280
7.4.3. L'élément I.	280
7.5. Modélisation de principaux composants hydrauliques	281
7.5.1. Modélisation du stockage de fluide hydraulique.	281
7.5.2. Modélisation de la génération de puissance hydraulique	282
7.5.2.1. Source idéale de débit	282
7.5.2.2. Source idéale de différence de pression.	282
7.5.2.3. Pompe à cylindrée variable, réglée en pression	283
7.5.3. Modélisation de la distribution de puissance hydraulique	284

7.5.4. Modélisation de la modulation de puissance hydraulique	285
7.5.5. Modélisation de la transformation de puissance hydraulique	287
7.6. Simulation du système d'actionnement d'hélicoptère	288
7.6.1. Modèle Modelica d'un système d'actionnement.	288
7.6.2. Variation des performances en fonction de la température.	289
7.6.3. Variation des performances en fonction de la charge antagoniste.	291
7.7. Exercices et problèmes	292
7.7.1. Questions à choix multiples sur la modélisation des composants hydrauliques	292
7.7.1.1. Tuyau rigide	292
7.7.1.2. Chambre de vérin hydraulique	293
7.7.2. Problème 1 : modélisation simple d'une servovalve hydraulique.	294
7.7.3. Problème 2 : modélisation d'un régulateur de pression.	297

Chapitre 8. Transmission de la puissance thermique 303

8.1. Échangeurs de chaleur	303
8.1.1. Classification des échangeurs de chaleur	304
8.1.2. Objectifs de l'étude	306
8.2. Modélisation thermique des échangeurs de chaleur par la notion d'efficacité : cas de l'efficacité constante	308
8.3. Estimation de l'efficacité d'un échangeur thermique	312
8.4. Estimation du coefficient de transfert thermique global d'un échangeur de chaleur.	318
8.5. Estimation des pertes de charge dans les échangeurs de chaleur.	328
8.6. Exercices et problèmes de révision	332
8.6.1. Dimensionnement d'un échangeur de chaleur à tubes concentriques	332
8.6.2. Dimensionnement et modélisation d'un échangeur de chaleur pour la récupération d'énergie thermique dans une VMC double flux.	333

Chapitre 9. Conversion de la puissance thermique. 337

9.1. Quelques exemples de machines thermiques	338
9.2. Comportement des fluides compressibles	342
9.2.1. Modélisation des fluides	342
9.2.2. Modélisation des transformations thermodynamiques	345
9.3. Rappels de thermodynamique	346
9.3.1. Premier principe de la thermodynamique	346
9.3.2. Cycles thermodynamiques.	348

9.3.2.1. Cycle à vapeur	348
9.3.2.2. Cycle frigorifique.	350
9.4. Modélisation des composants de machines thermiques	352
9.4.1. Modélisation d'une turbine	353
9.4.2. Modélisation d'un compresseur	356
9.5. Simulation d'une centrale thermique.	360
9.6. Exercices et problèmes de révision	363
9.6.1. Modélisation des fluides	363
9.6.2. Rendement d'une turbine à gaz.	363
9.6.3. Optimisation d'une turbine à gaz.	365
9.6.4. Simulation d'une pompe à chaleur	366
Bibliographie	369
Index	373