

Modélisation et Simulation des Systèmes Multi-Physiques avec

MATLAB – Simulink (R2018a)

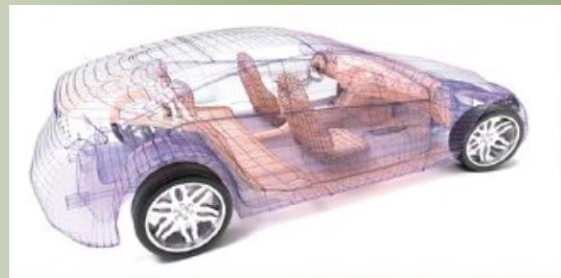
pour l'étudiant et l'ingénieur

Troisième édition

Introduction au Model Based Design



- **MATLAB**
- **Simulink**
- **Simscape**
- **Simscape Multibody**
- **Simscape Fluids**
- **Simscape Electronics**
- **Stateflow**



Ivan LIEBGOTT


Modélisation et Simulation des Systèmes Multi-Physiques avec MATLAB/Simulink R2018a pour l'étudiant et l'ingénieur Introduction au Model-Based-Design

Auteur : Ivan LIEBGOTT

*Professeur de Chaire Supérieure en Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles
Lycée des Eucalyptus, Nice*

*Ingénieur diplômé de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
MASTER en conception de structures Aéronautiques et Spatiales (ISAE-SUPAERO)
Agrégé de Sciences de l'Ingénieur
Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*

ivan.liebgott@gmail.com

Rejoignez-moi sur 

Ce livre a été créé pour être librement partagé avec la communauté des utilisateurs de MATLAB. Vos remarques et vos suggestions seront les bienvenues et me permettront de faire évoluer et d'améliorer cet ouvrage. Cette version est la troisième écriture du livre et fait suite aux éditions de 2013 et 2015.

Toute utilisation, même partielle, du contenu de ce document devra obligatoirement faire référence à l'ouvrage et à son auteur.



Ivan LIEBGOTT 2018

Vous pouvez télécharger l'ensemble des modèles numériques utilisés dans ce livre en version MATLAB 2018b à partir du lien suivant :

<https://www.dropbox.com/s/jwla2t2fg0zj5i6/Modeles%20livre%20Modelisation%20multi-physique%20MATLAB%202018a%20%28Ivan%20LIEBGOTT%29.zip?dl=0>

Préface :

Les ingénieurs sont au cœur du processus de conception des systèmes complexes et doivent chaque jour relever les défis de la compétitivité, de l'innovation et de la performance. Cela ne peut se faire sans l'intégration de processus industriels structurés, ni sans la maîtrise des outils modernes de modélisation et de simulation. A chaque étape du cycle de conception, les méthodes mises en œuvre doivent permettre de baisser les coûts, de réduire le risque d'erreur et d'en minimiser les impacts.

Au cœur de ce processus, la modélisation et la simulation numérique jouent un rôle majeur et permettent aux ingénieurs d'anticiper, de comprendre et de vérifier les analyses qu'ils mènent tout au long du projet.

Les démarches industrielles standards, comme le cycle en V intègrent pleinement la simulation numérique au travers de méthodes associées comme le « Model Based Design » (conception basée sur le modèle). Les outils modernes de simulation permettent de créer des modèles globaux complexes intégrant tous les comportements du système et prenant en compte l'ensemble des interactions, cette démarche est appelée modélisation multi-physique. Le système réel peut avantageusement être remplacé par son modèle numérique pour réaliser des tests qui auparavant mobilisaient des moyens matériels et humains importants. Cette démarche impose de disposer de modèles validés qui reproduisent fidèlement le comportement des systèmes réels.

Cet ouvrage vous présente une approche de la modélisation multi-physique qui exploite les fonctionnalités et les innovations des logiciels de simulation afin de rendre le processus de modélisation plus rapide et plus efficace. La plate-forme de simulation utilisée est le logiciel MATLAB/Simulink version 2018a.

L'ouvrage propose de donner les clés permettant d'aborder la modélisation globale d'un système en créant le lien entre les méthodes industrielles et les méthodes utilisées dans le cycle de formation des ingénieurs. Il est illustrée par de très nombreux exemples dans différents domaines de la technologie (électrique, hydraulique, mécanique...) et met en évidence l'interconnexion des domaines physiques.

Les fondamentaux de tous les outils nécessaires pour mener cette démarche sont présentés :

- MATLAB
- Simulink
- Simscape
- Fluids
- Multibody
- Electronics
- Stateflow

La démarche propose une introduction à leur utilisation et ne vous rendra expert dans aucun d'eux. Vous pourrez par contre en percevoir tout le potentiel et l'exploiter plus en profondeur en fonction des besoins spécifiques que vous rencontrerez dans votre démarche de modélisation.

Bonne lecture,

Ivan LIEBGOTT

Chapitre 1 : Concepts et stratégies en modélisation

I. Introduction.....	13
II. Industrialisation et cycle de conception d'un système	14
A. Les compétences de l'ingénieur.....	15
B. Le triptyque des performances(*).....	16
III. Mise en œuvre de la démarche- Introduction au « Model Based Design ».....	17
A. Architecture matérielle du projet.....	17
B. La phase d'Expression et de Spécification du Besoin.....	18
C. La phase de Conception-Modélisation-Simulation.....	19
1. La modélisation « white box ».....	20
2. La modélisation « Multi-Physique ».....	22
3. La simulation des modèles.....	23
4. La comparaison des performances simulées et mesurées	24
5. La modélisation « gray box ».....	24
6. Le Model-in-the-loop (MIL).....	28
D. La phase de Codage Implémentation	28
1. Le Software-in-the-loop (SIL).....	29
2. Le Processor-in-the-loop (PIL)	30
E. La phase d'Intégration Vérification.....	31
1. Le Hardware-In-the-Loop (HIL).....	31
F. La phase de Validation Recette.....	34
I. Le logiciel MATLAB-Simulink.....	35
A. Description et hiérarchie des outils utilisés.....	35
1. MATLAB.....	35
2. Simulink.....	36
3. Simscape.....	37
4. Stateflow	40
5. Utilisation des outils de modélisation.....	40
II. Présentation de l'environnement MATLAB – Simulink.....	42
A. Lancement du logiciel	42
B. La fenêtre de l'environnement MATLAB	42
1. La barre de commande MATLAB	43
C. La fenêtre de l'environnement Simulink.....	43
D. Configuration de MATLAB – Simulink.....	45
1. Nommer un fichier dans MATLAB/Simulink.....	45
2. Le « path » de MATLAB.....	45
3. Ajout de dossiers dans le « path » pour toutes les sessions	45
4. Ajout de dossiers dans le « path » pour la session courante.....	46
III. Stratégie de conception d'un modèle multi-physique.....	47

A. Lien avec le diagramme Chaîne d'énergie/Chaîne d'information	47
IV. Application à un pilote hydraulique de bateau	49
A. Diagramme présentant la chaîne d'énergie et d'information du pilote hydraulique de bateau	50
B. Modèle multi-physique du pilote hydraulique de bateau réalisé avec MATLAB - Simulink	51
C. Chargement et simulation du modèle	52
D. Visualisation des résultats issus du modèle multi-physique.....	52
E. Exploration du modèle.....	58
1. Exploration du modèle de la chaîne d'information : Simulink et Stateflow.....	58
2. Exploration du modèle de la chaîne d'énergie : Simscape Electric Library	59
3. Exploration de la chaîne d'énergie : Fluids.....	60
4. Exploration de la chaîne d'énergie : Multibody	61
5. Exploration de la chaîne d'énergie : Simulink	62
F. Pilotage interactif du modèle	62
V. Exemples de modèles multi-physique et exploitations possibles.....	65
A. Le robot Maxpid.....	65
B. L'axe linéaire Control'X.....	69
C. Comment faire un modèle multi-physique avec MATLAB-Simulink ?.....	74

Prise en main de Simscape

I. Introduction à la modélisation acausale avec Simscape.....	75
A. Choix des composants.....	76
B. Placement et assemblage des composants	77
C. Les différents types de ports et de connexions	78
D. Paramétrage des composants.....	80
E. Lancement de la simulation et analyse des résultats	83
II. Comparaison avec l'approche causale	85
A. Equation de comportement du système	85
B. Choix des composants	85
C. Placement et assemblage des composants.....	85
D. Paramétrage des composants.....	86
E. Lancement de la simulation et analyse des résultats	87
F. Avantage et inconvénients des approches causale et acausale.....	89
III. Les fondamentaux de la modélisation avec Simscape.....	90
A. Notions de domaines physiques	90
B. Les blocs importants de Simscape.....	91
C. Variables de type « Across » et « Throught » et positionnement des capteurs.....	92
D. L'orientation des composants	92
1. Utilisation de composants actifs.....	93
2. Implantation et orientation des capteurs.....	96
3. Utilisation de composants dont la dynamique est orientée	98
4. Utilisation de composants passifs.....	98
5. Choix du solveur	99
6. Les problèmes que peut rencontrer le solveur	100
IV. Exemples de modélisation multi-domaine	101

A. Domaine électromécanique – Axe linéaire	101
1. Choix des composants.....	102
2. Placement et assemblage des composants	104
3. Paramétrage des composants.....	105
4. Simulation du modèle en boucle ouverte.....	112
5. Utilisation du Data-logger de Simscape	114
6. Création de sous-systèmes.....	119
7. Modélisation de l’asservissement en position de l’axe.....	126
B. Domaines hydraulique-mécanique – vérin hydraulique simple effet.....	131
1. Choix des composants.....	131
1. Placement et assemblage des composants	134
2. Paramétrage des composants.....	135
3. Simulation.....	140
4. Utilisation des fonctionnalités de routage des signaux.....	141
5. Remplacement de la source de pression par une source de débit.....	144
C. Domaine électrique –Commande PWM d’un moteur à courant continu	147
1. Utilisation du composant « Controlled PWM Voltage »	148
2. Commande PWM d’un moteur à courant continu	151
3. Utilisation du composant « H-Bridge » (pont en H).....	153
D. Rendre un modèle interactif, utilisation de la bibliothèque « dashboard ».....	159
1. Exemple de modèle interactif.....	161
2. Utilisation des blocs de la bibliothèque.....	162
V. Application pédagogique.....	167
A. Présentation du hacheur série	167
B. Objectifs pédagogiques.....	169
C. La construction du modèle.....	171
D. La didactisation du modèle.....	179
1. Création d’un sous-système et ajout d’une image	179
2. L’instrumentation du modèle	179
3. Conclusion sur la didactisation du modèle	183
4. Optimiser la didactisation du modèle en fonction de l’objectif d’apprentissage visé	185
E. Exploitation des résultats issus de la simulation du modèle	189
1. Objectif 1 : Comprendre la circulation du courant dans le circuit en phase active et en phase de roue libre	189
2. Objectif 2 : Visualiser et évaluer l’influence du rapport cyclique sur le courant moteur.....	191
3. Objectif 3 : Visualiser et évaluer l’influence de la fréquence de hachage sur l’ondulation du courant.....	193
4. Objectif 4 : Visualiser et évaluer l’influence de l’inductance de la charge sur l’ondulation du courant	195
F. Conclusion.....	197

Prise en main de MATLAB

I. Introduction.....	198
A. Création de variable.....	198
B. Création de vecteur	199
C. Indexation des composantes d’un vecteur	199

D. Tracés de courbes	200
E. Mise en forme élémentaires des courbes	202
F. Annotation des graphiques	204
G. Créer un script élémentaire.....	206
H. Les opérateurs de comparaison de MATLAB	209
I. Les structure de boucles usuelles.....	209
1. Syntaxe de la boucle if – elseif – else	209
2. Syntaxe de la boucle for.....	209
3. Syntaxe de la boucle while	210
II. Exemple d’exploitations	210
A. Interpolation d’une série de données	210
B. Le calcul symbolique avec MATLAB	212
1. Résolution d’une équation algébrique.....	212
2. Développer ou factoriser une expression	213
3. Dériver une fonction.....	214
4. Intégrer une fonction.....	215
5. Utiliser la transformée de Laplace.....	215
6. Utiliser la transformée inverse de Laplace	216
7. Décomposition en éléments simples	217
1. Résolution d’une équation différentielle d’ordre 1	218
1. Résolution d’une équation différentielle d’ordre 2	219
C. Manipulation des fonctions de transfert.....	222
1. Création d’une fonction de transfert	222
2. Opérations sur les fonctions de transfert.....	223
3. Tracer les réponses temporelles d’un système.....	226
4. Tracer les réponses fréquentielles d’un système.....	227
5. Evaluer les marges de gain et de phase.....	229
6. Tableau récapitulatif des commandes utiles sur les fonctions de transfert	230

Prise en main de Simulink

I. Introduction.....	232
II. Régulation en température d’un four	232
A. Ouverture du modèle.....	233
B. Ouverture du script contenant la définition des variables	234
C. Lancement de la simulation.....	235
D. Tracer un diagramme de Bode avec Simulink	236
1. Tracer un digramme de Bode en boucle ouverte.....	237
2. Tracer un diagramme de Bode en boucle fermée.....	240
E. Tracer d’un diagramme de Black-Nichols	244
F. Ajout et paramétrage d’une saturation.....	244
G. Exportation des variables de la simulation vers le Workspace	247
1. Ecriture d’un script pour tracer une série de courbes	250

Prise en main de Stateflow

I. Introduction à Stateflow	252
A. Modélisation d'une machine à état avec Stateflow	252
B. Construction du diagramme d'état.....	252
1. Ouverture du modèle.....	252
2. Insertion d'un « chart ».....	253
C. Création d'un diagramme d'état élémentaire	254
1. Création des états.....	254
2. Création d'une transition par défaut	255
3. Création des transitions	255
4. Création des actions dans les états.....	255
5. Création des étiquettes de transitions	256
6. Définitions des variables d'entrée et de sortie du diagramme d'état	257
7. Simulation du diagramme d'états	261
D. Architecture des machines à états.....	261
1. La hiérarchie des états	261
2. Les priorités de test des transitions.....	262
3. Etats parallèles	262
E. Ajout de niveaux hiérarchique et d'états parallèles dans un diagramme d'état	263
F. Récapitulatif et complément des commandes utiles de Stateflow	269

Prise en main de Multibody

I. Introduction à Multibody	271
A. Analyse d'un modèle Multibody	271
B. Paramétrage de la gravité.....	273
II. Intégration d'un modèle Multibody dans un modèle multi-physique	274
A. Connexions du modèle.....	276
B. Interfaçage entre Simscape et Multibody	277
1. Interfaçage entre Simscape et Multibody pour la translation.....	277
2. Interfaçage entre Simscape et Multibody pour la rotation.....	278
3. Ajout de ports sur une liaison.....	279
4. Modélisation d'un effort extérieur variable	283
C. Résultat de la simulation.....	286
III. Importation d'un modèle SolidWorks dans Multibody.....	286
A. Les principes	286
B. Installation de « Multibody Link »	286
C. Conversion d'un fichier assemblage de Solidworks en fichier xml	288

L'identification d'un modèle

I. La modélisation black-box, l'identification.....	293
A. Présentation de la méthode.....	293
B. Mise en œuvre de la méthode en utilisant la toolbox Identification	294
1. Analyse des données utilisées pour l'identification	294
2. Ouverture et présentation de la toolbox « SystemIdentification »	295
3. Importation des données.....	296
C. Utilisation de la méthode en utilisant les lignes de commande.....	301

Le contrôle commande avec MATLAB/Simulink

I. Introduction.....	304
II. Réglage automatique d'un PID	304
A. Modélisation.....	304
B. Ouverture du modèle.....	305
1. Analyse de la réponse temporelle.....	308
2. Importation dans Simulink.....	312
III. Réglage manuel d'un PID avec l'outil « Control System Designer »	313
A. Ouverture du modèle.....	313
B. Réglage du PID.....	314
1. Lancement de Control System Designer	314
2. Diagrammes de Bode et de Black de la FTBO	316
3. Visualisation des réponses temporelles.....	318
4. Réglage du PID.....	323
5. Définition et visualisation des critères de performance.....	324
6. Réglage du PID à l'aide des curseurs	326
7. Exportation du réglage dans le modèle Simulink	329
IV. Conception et réglage d'un correcteur de forme quelconque	330
A. Ouverture du modèle.....	330
B. Conception du correcteur	331
1. Diagrammes fréquentielles de la FTBO	333
2. Visualisation des réponses temporelle et fréquentielle de la FTBF	336
3. Synthèse du correcteur.....	340
4. Visualisation de l'influence du gain de la FTBO	341
5. Ajout d'un intégrateur.....	343
6. Ajout d'un correcteur à avance de phase (Lead).....	345
7. Ajout d'un filtre rejeteur (Notch).....	347
8. Réglage d'un filtre rejeteur	347
9. Exportation de la fonction de transfert du correcteur vers le modèle Simulink	352