

Introduction

I.1. Pourquoi lire cet ouvrage ?

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de niveau master, aux élèves ingénieurs, mais également aux ingénieurs, doctorants et chercheurs qui désirent débiter en modélisation.

Il se veut avant tout pédagogique. Nous ne voulons absolument pas y exposer les dernières réalisations en date en matière de modèles ; les conférences et les journaux spécialisés sont les meilleurs canaux pour s'informer des avancées scientifiques les plus pointues.

Notre objectif est, au contraire, de présenter des techniques essentielles qui devraient faire partie du bagage de tout modélisateur. « Essentielles » veut dire ici « nécessaires à toutes et à tous », mais pas nécessairement « simples », comme vous pourrez le constater en avançant dans les chapitres.

Pourriez-vous apprendre à modéliser en lisant directement des articles scientifiques ? Probablement, mais si vous avez déjà essayé de le faire, vous êtes-vous sans doute aperçu que la marche était assez haute.

En effet, dans les articles scientifiques, il est devenu d'usage de dire *comment* les choses ont été faites, mais rarement *pourquoi*. Tout est présenté comme si les auteurs s'étaient réveillés un matin avec une inspiration divine, leur disant de faire ceci et cela, de telle ou telle façon, qui, par miracle, s'était révélée la plus pertinente. Pas un mot sur les essais préliminaires non concluants, sur les expériences ratées, sur les modèles faux, sur les doutes, les tâtonnements, les questionnements, les éternels recommencements dont est faite la vie des chercheurs.

Or, si vous essayez de suivre cette voie, vous voudrez avant tout savoir comment on s’y prend, par où on commence, quels choix on fait à quel moment et sur quelle base, comment on vérifie la cohérence des résultats, comment on améliore les choses si besoin, etc. Rien de tout cela ou presque ne transparait dans la littérature scientifique actuelle. Si par malheur on essaie de présenter le processus laborieux par lequel on est arrivé à un résultat, on se fait vite reprendre par les relecteurs de l’article, nous intimant de nous en tenir aux faits, d’arrêter de divaguer et de raconter notre vie.

Vous l’avez sans doute deviné : le but de cet ouvrage est justement de raconter la vie des modèles, de la naissance des idées à leur utilisation pour répondre à des questions de conception et d’optimisation des procédés. De répondre à vos questionnements les plus courants aux différentes étapes, et elles sont nombreuses. De vous montrer par l’exemple quels types de problèmes peuvent se poser et comment les surmonter. En bref, tout ce que vous avez besoin de savoir et que personne ne vous dira.

1.2. Comment définir un modèle ?

Modéliser c’est bien, mais qu’est-ce donc qu’un modèle ? Parmi les nombreux sens de ce mot, celui qui nous intéresse ici est « une représentation mathématique, quantitative de certains aspects d’un système dynamique ». Se voulant générale, cette définition est nécessairement un peu vague et appelle plusieurs commentaires :

– **pourquoi une représentation mathématique et quantitative ?** Après tout, il existe de nombreux autres types de modèles. En apprenant à parler, un enfant apprend un modèle de langage à base de règles implicites, que les grammairiens se font un plaisir d’explicitier et les intelligences artificielles d’exploiter pour le meilleur et pour le pire. En apprenant à faire du vélo, notre cerveau construit un modèle de comportement du vélo encodé sous forme de synapses, qui n’ont rien d’équations mathématiques. Dans cet ouvrage, nous nous restreignons volontairement à des modèles physiques, chimiques et biologiques écrits à partir des lois de la nature, telles que la science les formule aujourd’hui. On appelle cela également des modèles mécanistiques, mécanistes, de connaissance, boîtes blanches ou *first principles* dans la littérature anglophone. Il s’agit d’un choix délibéré de notre part, mais rien n’interdit, en principe, d’utiliser d’autres types de modèles, comme ceux basés sur l’apprentissage de grandes masses de données par des techniques issues de l’IA. Quelle que soit la nature du modèle développé, la plupart des étapes abordées dans cet ouvrage sont applicables ;

– **pourquoi certains aspects seulement ?** Eh bien, parce que la nature est infiniment complexe, et pour obtenir des modèles manipulables, nous sommes obligés de faire des hypothèses simplificatrices parfois drastiques. « Manipulable » veut dire ici possible à écrire sur papier, à encoder dans un ordinateur standard et à simuler en un temps suffisamment court pour être pratiquement utile. Choisir le niveau de détail d’un modèle est la question centrale que le modélisateur doit se poser, et il n’existe malheureusement

pas de technique universelle pour y arriver ; c'est un savant mélange d'intuition et d'expérience. Le fait que le modèle représente une simplification de la réalité en fait sa force : il est plus facile à comprendre et à manipuler que l'objet physique qu'il représente. Mais aussi sa faiblesse, car des phénomènes non inclus dans le modèle peuvent à tout moment devenir significatifs et fausser notre représentation ;

– **pourquoi un système dynamique ?** Par système, nous entendons ici tout objet d'étude naturel ou artificiel, mentalement délimité du monde extérieur, et qui focalise notre intérêt. En réalité, un objet n'étant jamais isolé, nous décrivons ses interactions avec le reste du monde par des grandeurs explicites, appelées sans surprise entrées et sorties du modèle. Cet ouvrage s'intéressant aux procédés agroalimentaires et biotechnologiques, les exemples seront pris dans ce domaine, mais la méthodologie est tout à fait générique. Quant à l'aspect dynamique, c'est également un parti pris, car il est peu traité dans la littérature sur le génie des procédés. Mais qui peut le plus peut le moins, et les méthodes présentées s'appliquent tout à fait à des modèles qui ne prennent pas en compte l'évolution dans le temps.

1.3. Pourquoi faire des modèles en génie des procédés ?

Que vous vous considériez déjà comme modélisateur ou non, vous avez déjà fait de nombreux modèles. Si, si, on vous assure. Que vous ayez fait la moindre régression linéaire ou écrit la moindre relation entre grandeurs physiques, chimiques ou biologiques, vous avez écrit un modèle. En clair, vous avez commencé à écrire des modèles dès le début de vos travaux.

Le modèle est donc comme la prose : toute personne ayant démarré ou fait des études scientifiques en fait sans le savoir. Ce qui est considéré comme « modélisation » et ce qui ne l'est pas est largement culturel et dépendant de la discipline, par exemple :

– en **physique**, tout le monde utilise ou construit des modèles tout le temps, sans se poser la moindre question. Faire de la physique, c'est faire des modèles, et c'est tellement naturel que les physiciens ne s'en aperçoivent même pas ;

– à l'autre extrême, en **biologie**, construire une relation linéaire entre plusieurs grandeurs mesurées peut être perçu comme un véritable défi de modélisation. Soit dit en passant, construire cette relation *dans les règles de l'art*, avec choix des mesures, vérification des hypothèses, analyse des résidus, intervalles de confiance et matrice de corrélation entre les paramètres estimés, n'est finalement pas si trivial ; ne souriez pas de manière condescendante si vous ne voyez pas de quoi on parle ;

– en **génie des procédés**, la situation actuelle est en quelque sorte intermédiaire. Écrire une « simple » relation entre nombres sans dimension n'est en général pas perçu comme de la modélisation, tandis que décrire un objet par un système d'équations différentielles ou aux dérivées partielles a tendance à entrer dans cette catégorie.

La question n'est donc pas tellement de faire ou non des modèles, car finalement tout le monde en fait. Mais pourquoi donc ?

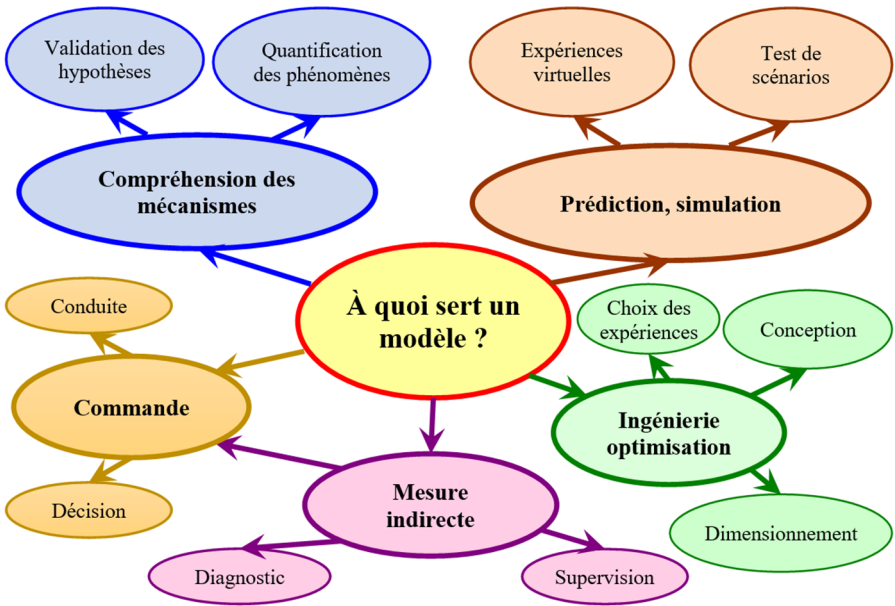


Figure I.1. Quelques exemples d'utilisations possibles de modèles en génie des procédés

La figure I.1 illustre quelques exemples d'utilisations courantes de modèles en génie des procédés :

– pour commencer, un modèle peut aider à **comprendre les mécanismes** les plus significatifs mis en jeu. Il s'agit donc d'écrire un modèle à partir d'hypothèses relatives à ces mécanismes et de confronter ensuite ses prédictions à la dure réalité des mesures. Si les deux concordent à un degré raisonnable, par exemple dans les limites de la répétabilité des expériences, le modèle est déclaré provisoirement valide... jusqu'à preuve du contraire. En effet, si le modèle marche bien, ce n'est pas une preuve absolue de la justesse de ses hypothèses, car rien ne dit que des hypothèses différentes n'auraient pas pu conduire à des prédictions très similaires. Si les prédictions ne concordent pas, en revanche, c'est bien une preuve que l'on s'est trompé quelque part : soit dans les valeurs numériques des paramètres, soit en négligeant certains phénomènes qui sont finalement importants, soit sur la nature même des phénomènes mis en jeu. Par principe, donc, un modèle est soit « falsifié » (mis en défaut), soit accepté provisoirement, tant que l'on n'a pas détecté de faille majeure. Il n'empêche que plus on utilise un modèle

dans des situations variées et avec de bons résultats, plus notre confiance dans les hypothèses sous-jacentes s'accroît et plus on accorde foi à ses prédictions. On peut aller jusqu'à la « réification » d'un modèle lorsque, ayant été éprouvé dans beaucoup de situations, il devient une sorte de norme voire de dogme, souvent loin du cadre et des bases théoriques où il a été initialement proposé ;

– une fois un modèle raisonnablement validé, nous pouvons l'utiliser pour **tester une grande variété de scénarios** à grande vitesse, à faible coût et à faible risque (c'est la simulation). Il va sans dire que pour cela le modèle doit être suffisamment « léger » ; s'il met plus longtemps à produire des prédictions qu'une expérience idoine et/ou coûte plus cher à faire fonctionner, son intérêt est largement réduit. Il n'empêche que l'on peut l'utiliser pour tester des scénarios irréalisables en pratique, comme changer de manière indépendante des paramètres normalement liés ou inaccessibles, ou tester en toute sécurité des configurations dangereuses. Une simulation avortée n'est rien en comparaison avec un réacteur explosé ;

– dans le prolongement de l'idée précédente, un modèle est très utile en **ingénierie**, car on peut rapidement et à faible coût tester en simulation des configurations et des dimensions différentes. Lorsque cela est réalisé de manière systématique avec des objectifs clairs de performance en vue, on parle d'**optimisation** à base de modèle. En plus des différentes configurations de l'installation, le modèle permet de tester différentes expériences à réaliser en pratique, par exemple pour maximiser l'information obtenue sur tel ou tel phénomène ;

– de manière moins intuitive, le modèle peut servir pour accéder en temps réel à des **grandeurs non (ou difficilement) mesurables**, du moins dans des conditions normales d'exploitation, hors du contexte d'un projet de recherche. En effet, un modèle encode par essence les liens entre différentes grandeurs d'intérêt et, dans un contexte favorable, permet de déduire les unes à partir des autres, plus facilement mesurables. La théorie sous-jacente est connue sous le nom d'estimation, ou d'observation, de l'état du système. Cette information peut à son tour être utilisée pour s'assurer que tout va bien (supervision), détecter les problèmes éventuels (diagnostic) et appliquer des corrections si besoin (commande) ;

– enfin, la **commande** du procédé peut faire appel aux mesures directes venant des capteurs physiques ou indirectes fournies par l'estimateur. Une commande avancée à base de modèle interne s'apparente à un test rapide de scénarios, à partir de l'état courant du procédé, pour maximiser certains critères de performance futurs, sur un horizon de temps choisi.

Nous voyons donc que les différentes utilisations du modèle sont liées entre elles et essentiellement basées sur la capacité à faire un grand nombre de simulations en un temps raisonnable. Les contraintes sont plus fortes lorsqu'il s'agit de temps réel, comme dans les deux dernières utilisations mentionnées (estimation de l'état et commande), car là, il s'agit d'aller *beaucoup* plus vite que l'objet physique.

I.4. Comment lire cet ouvrage ?

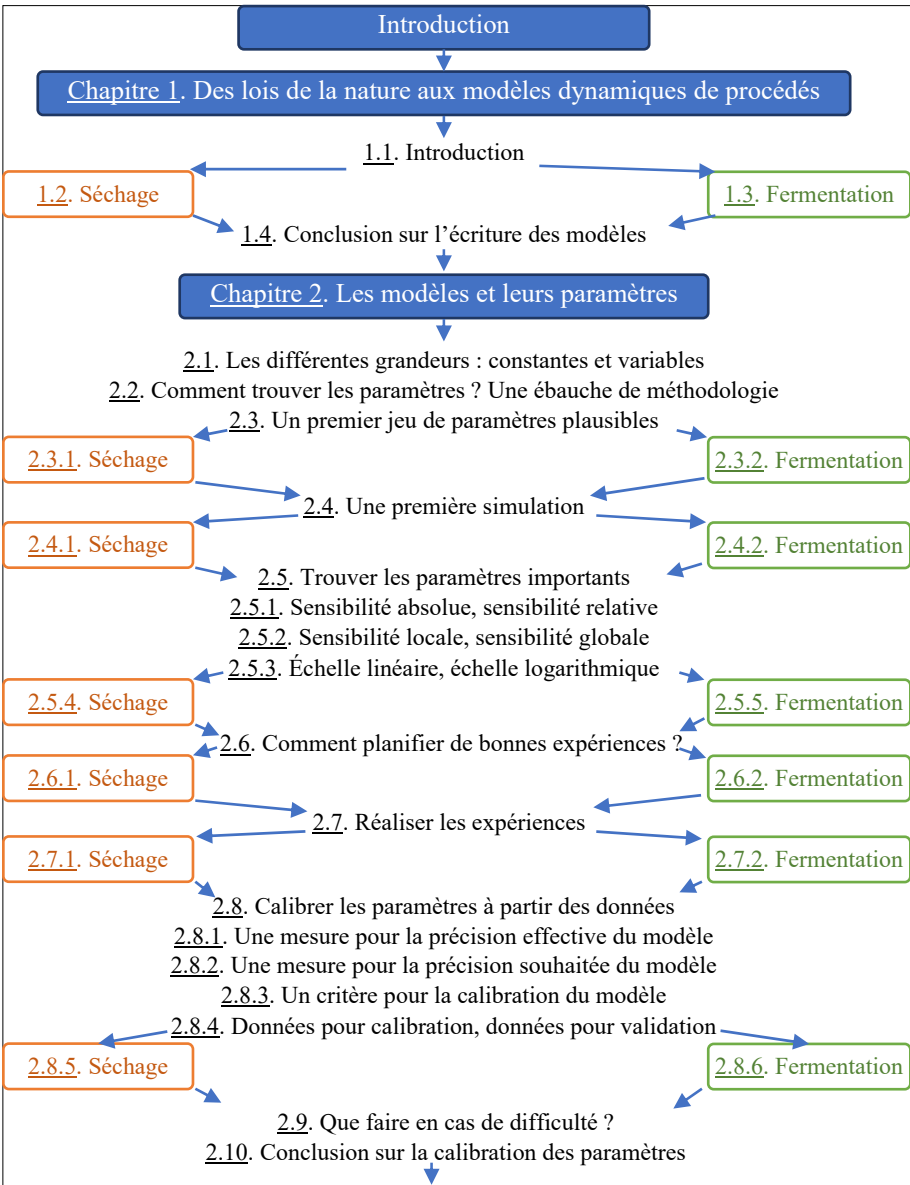


Figure I.2A. Structure du présent ouvrage : introduction, chapitres 1 et 2

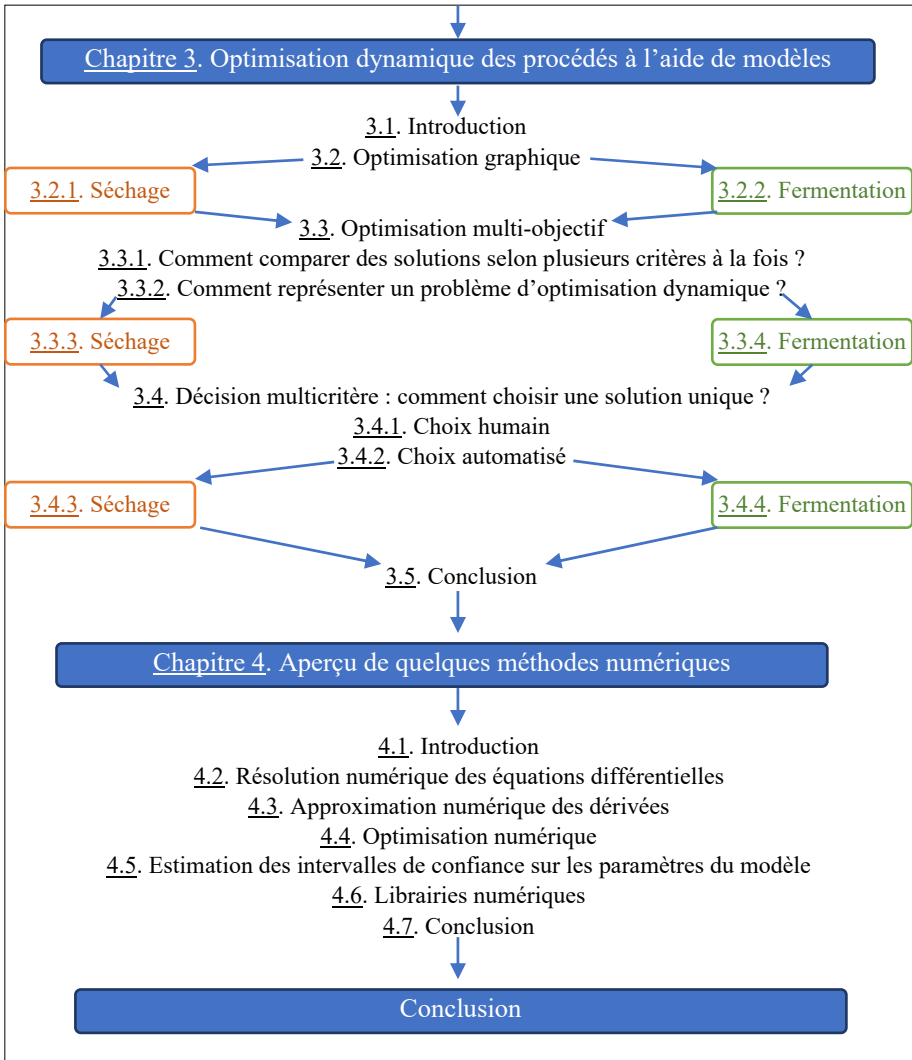


Figure I.2B. Structure du présent ouvrage (suite) : chapitres 3 et 4, conclusion

Que vous soyez convaincu ou non de l'intérêt des modèles, vous vous demandez peut-être comment vous orienter rapidement dans cet ouvrage. Notre idée de base, issue de nombreuses années d'enseignement en cycle d'ingénieur, de master et en doctorat, est, à chaque fois :

- introduire une problématique de manière générique ;
- l’illustrer rapidement par deux exemples de procédés relativement différents : un procédé physique (séchage) et un procédé biologique (fermentation) ;
- continuer à approfondir la problématique à partir des difficultés apparues (ou non) pour chacun des deux procédés.

Ces allers-retours permanents entre les notions génériques et les exemples se retrouvent dans la structure de l’ouvrage, illustrée à la figure I.2. Notre idée est que, d’une part, partir directement des exemples sans dire où l’on veut en venir finira par vous désorienter et que, d’autre part, discourir trop longtemps de manière abstraite nous fera perdre votre attention. Le modèle que vous voudrez construire sera sans doute différent des deux exemples que nous avons choisis ; il n’empêche que la manière de s’y prendre et les difficultés que vous pourrez rencontrer seront probablement similaires. L’intérêt des exemples n’est donc *pas d’illustrer ces types de procédés particuliers*, mais de mettre en évidence les problèmes génériques qui peuvent se poser lors d’un projet de modélisation. Nous vous conseillons donc de les lire même si vous travaillez sur un procédé différent.

Chère lectrice, cher lecteur, maintenant vous savez tout, sauf l’essentiel. Plus d’excuse pour procrastiner, en route pour la découverte des modèles et de la modélisation.