

Jean-Dominique Mosser | Jean-Jacques Marchandea
Jean-Pierre Brodelle | Jacques Tanoh

SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR

MPSI-MP2I-PCSI

TOUT-EN-UN

l'intégrale

DUNOD

© Dunod, 2021
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-083378-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	VIII
Pour bien utiliser cet ouvrage	X
1 Étude des systèmes	1
1.1 Concepts et vocabulaire pour l'étude de systèmes pluritechnologiques	1
1.2 Modèle	7
1.3 Les systèmes automatisés	9
Synthèse des compétences	13
2 Les bases de la mécanique	15
2.1 Orienter l'espace	16
2.2 Définir un angle	18
2.3 Les différents repères d'espace	20
2.4 Vecteurs - Opérations sur les vecteurs	23
2.5 Torseurs - Opérations sur les torseurs	27
2.6 Dérivation vectorielle	31
Synthèse des compétences	34
Exercices d'application	35
Exercices d'approfondissement	37
Solutions des exercices	39
3 Cinématique du solide indéformable	45
3.1 Les mouvements	46
3.2 Trajectoires et lois horaires	48
3.3 Vecteurs position, vitesse et accélération	50
3.4 Le solide indéformable	53
3.5 Le champ des vecteurs vitesse	54
3.6 Composition des mouvements	57
3.7 Le champ des vecteurs accélération	60
3.8 Mouvements particuliers	61
Synthèse des compétences	64
Exercices d'application	64
Exercices d'approfondissement	66
Solutions des exercices	69

4	Contacts et liaisons	75
	4.1 Chaîne de solides	76
	4.2 Les liaisons	77
	4.3 Les contacts	86
	4.4 Transmissions particulières	90
	Synthèse des compétences	96
	Exercices d'application	97
	Exercices d'approfondissement	101
	Solutions des exercices	106
5	Actions mécaniques	119
	5.1 Concept d'action mécanique	120
	5.2 Modèles d'actions mécaniques transmissibles	126
	5.3 Les lois du frottement	134
	Synthèse des compétences	139
	Exercices d'application	139
	Exercices d'approfondissement	143
	Solutions des exercices	145
6	Les lois de l'équilibre	153
	6.1 Théorèmes de l'équilibre	153
	6.2 Méthodologie de résolution	156
	6.3 Équilibres particuliers	161
	Synthèse des compétences	167
	Exercices d'application	168
	Exercices d'approfondissement	171
	Solutions des exercices	175
7	Les systèmes automatiques	187
	7.1 Notion de système en automatique	188
	7.2 Systèmes Continus, Linéaires et Invariants	192
	7.3 Systèmes asservis	193
	7.4 Fonction de transfert	197
	7.5 Schémas-blocs	201
	7.6 Modèle de connaissance - Modèle de description	209
	Synthèse des compétences	210
	Exercices d'application	211
	Exercices d'approfondissement	215
	Solutions des exercices	220

8	Modèles de référence	233
	8.1 Analyse temporelle, analyse harmonique	234
	8.2 Le modèle proportionnel	236
	8.3 Modèle du premier ordre ou d'ordre 1	237
	8.4 Modèle du deuxième ordre ou modèle d'ordre 2	244
	8.5 Système intégrateur	256
	8.6 Identification de modèles de comportement	257
	Synthèse des compétences	260
	Exercices d'application	261
	Exercices d'approfondissement	264
	Solutions des exercices	267
9	Performances des systèmes	277
	9.1 Méthode de lecture	278
	9.2 Stabilité des systèmes	281
	9.3 Stabilité d'un système asservi	286
	9.4 Marges de stabilité des systèmes	288
	9.5 Marges de stabilité des systèmes asservis	289
	9.6 Précision des systèmes asservis	291
	9.7 Rapidité des systèmes	294
	Synthèse des compétences	298
	Exercices d'application	299
	Exercices d'approfondissement	303
	Solutions des exercices	306
10	Automatique des systèmes discrets	315
	10.1 Modélisation des systèmes discrets	316
	10.2 Modélisation UML et SysML	317
	10.3 Éléments graphiques de base d'un diagramme d'état	318
	10.4 Éléments graphiques d'états élaborés	326
	10.5 Structures algorithmiques de base	331
	Synthèse des compétences	334
	Exercices d'application	335
	Exercices d'approfondissement	341
	Solutions des exercices	346
Annexe 1	Le langage SysML	353
Annexe 2	Transformée de Laplace	359
Annexe 3	Modèle d'ordre 2	365
Index		367

Avant-propos

Cet ouvrage est destiné au jeune bachelier scientifique et lui propose de découvrir les sciences industrielles de l'ingénieur en s'appuyant sur le programme officiel des classes préparatoires aux grandes écoles.

Sa finalité est de donner outils et méthodes nécessaires à l'approche de réalisations industrielles pluritechnologiques modernes en privilégiant un point de vue particulier : le calcul, la commande et le contrôle des mouvements.

Sa structure est ainsi logique :

- le premier chapitre présente les outils de description des systèmes et définit la frontière entre réel et modèle ;
- les cinq chapitres suivants initient à la mécanique, science des mouvements, en détaillant la cinématique et les actions mécaniques ;
- les quatre derniers posent les bases de l'automatique, science de la commande et du contrôle.

Cet ouvrage développe des compétences dont l'approfondissement est en adéquation avec la filière suivie par l'étudiant, comme le précise la figure ci-dessous.

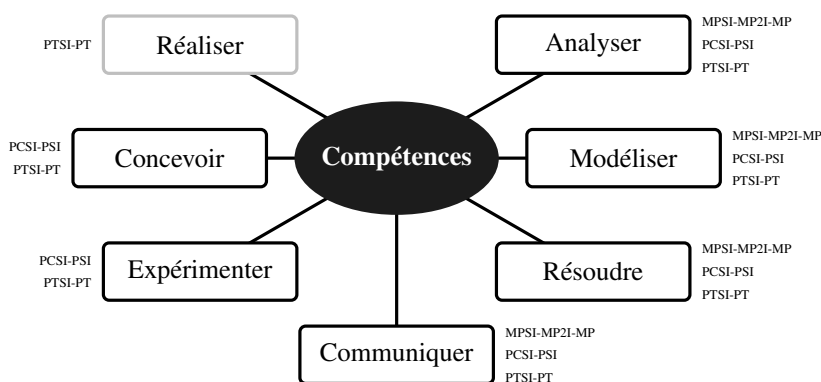


Figure 1 Les compétences développées dans les trois voies de formation.

Leurs finalités sont d'initier le lecteur à la démarche de l'ingénieur au travers d'activités caractéristiques identifiées par le programme officiel et illustrées sur la figure 2 :

- conduire une analyse fonctionnelle, structurelle et comportementale d'un système pluritechnologique ;
- vérifier les performances attendues d'un système, par l'évaluation de l'écart entre un cahier des charges et des réponses expérimentales ;
- proposer et valider des modèles d'un système à partir d'essais, par l'évaluation de l'écart entre les performances mesurées et les performances calculées ou simulées ;
- prévoir les performances d'un système à partir de modélisations, par l'évaluation de l'écart entre les performances calculées ou simulées et les performances attendues au cahier des charges ;
- analyser ces écarts et proposer des solutions en vue d'une amélioration des performances.

Le cours est concis, avec des notations simples et transversales. Il nécessite une lecture attentive. Les exercices sont tous corrigés de façon détaillée pour offrir au lecteur le temps de se forger ses propres convictions. De plus, dès lors que les compétences acquises le permettent, des résultats d'expérimentation sont joints aux exercices, afin de confronter les résultats théoriques calculés à la réalité constatée.

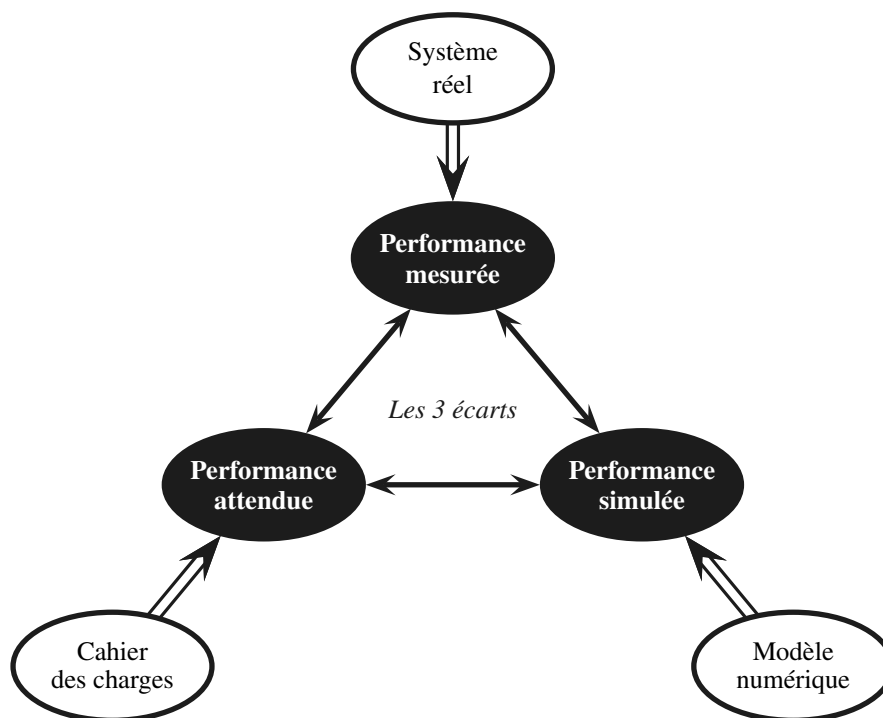


Figure 2 Évaluation des performances d'un système pluritechnologique.

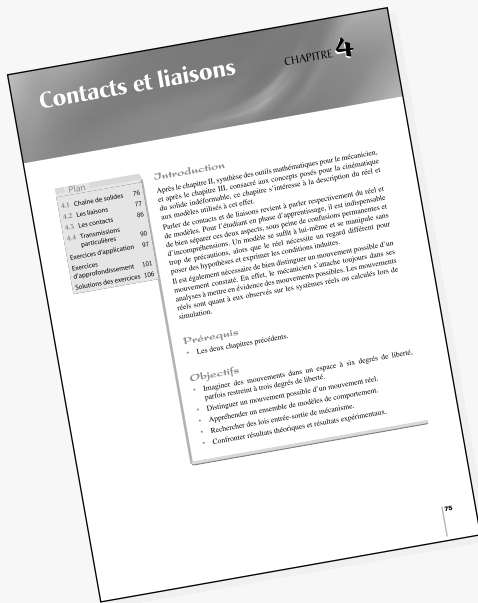
Cet ouvrage sollicite capacités d'abstraction et aptitudes scientifiques. Il les développe en vue de mettre en œuvre :

- des méthodes plus que des recettes ;
- de la réflexion plus que des calculs ;
- des clés plus que des solutions.

Les auteurs confient aux lecteurs la tâche de retourner remarques et suggestions en utilisant le courrier électronique à l'adresse s3i@jdotec.net ou postal aux bons soins des éditions Dunod, et souhaitent à chacun d'eux une passionnante découverte des sciences pour l'ingénieur.

Jean-Dominique Mosser

Pour bien utiliser



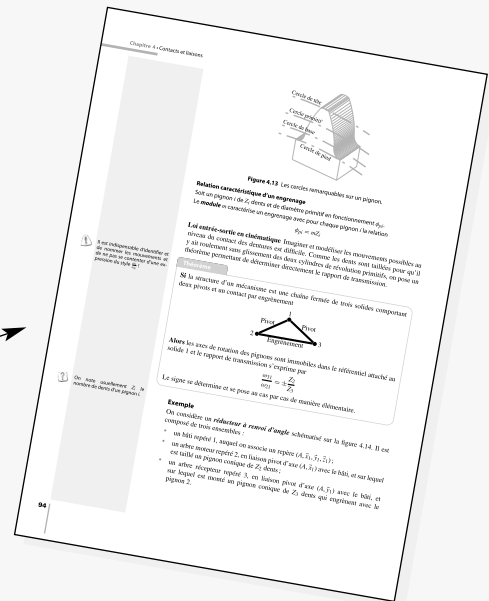
La page d'entrée de chapitre

Elle propose une introduction au cours, un rappel des prérequis et des objectifs, ainsi qu'un plan du chapitre.

Le cours

Le cours aborde toutes les notions du programme de façon structurée afin d'en faciliter la lecture.

La colonne de gauche fournit des remarques pédagogiques qui accompagnent l'étudiant dans l'assimilation du cours. Il existe quatre types de remarques, chacun étant identifié par un pictogramme.



Les pictogrammes dans la marge



Commentaires pour bien comprendre le cours (reformulation d'un énoncé, explication d'une démonstration...).



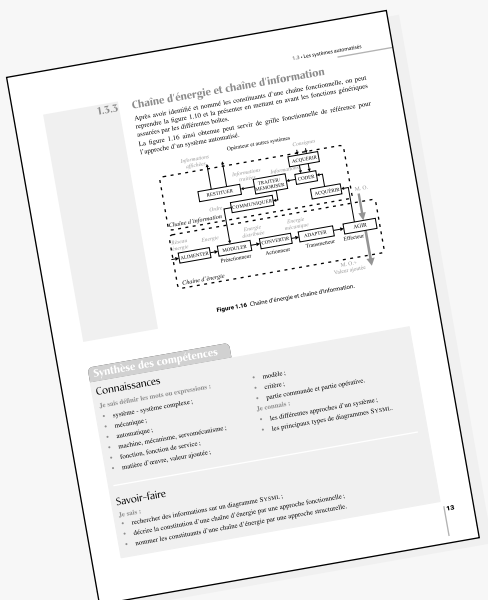
Indication du degré d'importance d'un résultat.



Mise en garde contre des erreurs fréquentes.



Rappel d'hypothèse ou de notation.



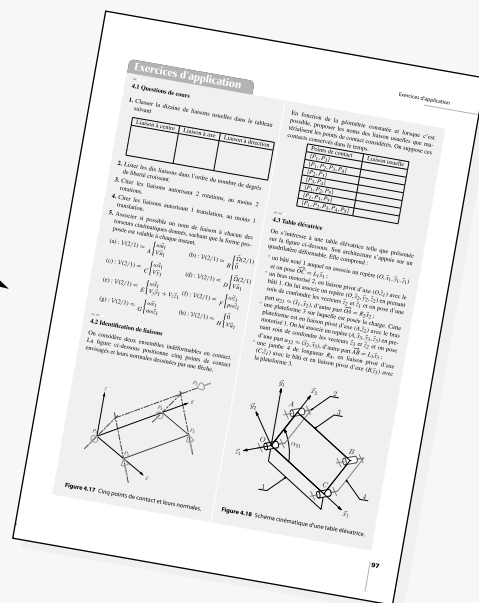
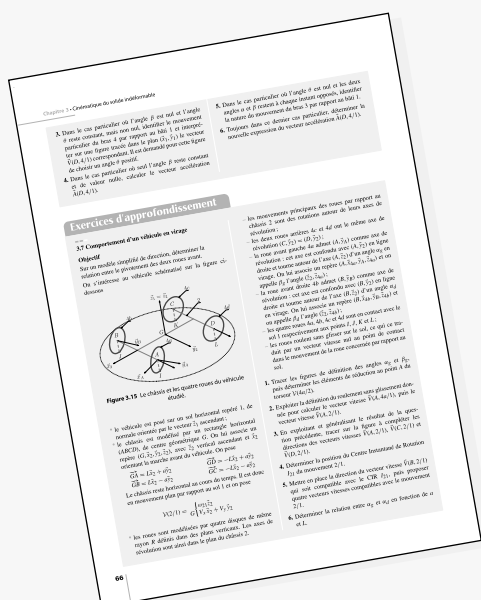
La synthèse des compétences

En fin de chapitre, elle propose un récapitulatif des savoirs et savoir-faire indispensables.

cet ouvrage

Exercices d'application

Ils proposent à l'étudiant d'utiliser sa connaissance du cours pour résoudre des problèmes simples. Leur difficulté est indiquée sur une échelle de 1 à 3.

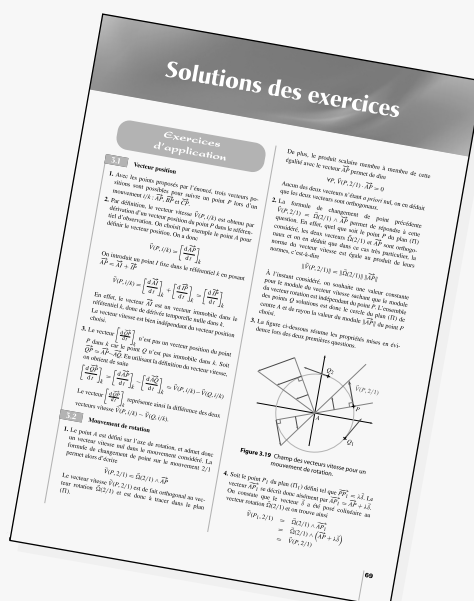


Exercices d'approfondissement

Ici, l'étudiant devra aller plus loin que la simple application pour résoudre des problèmes parfois transversaux et demandant une réflexion poussée. Leur difficulté est indiquée sur une échelle de 1 à 3.

Les solutions des exercices

Tous les exercices d'application et d'approfondissement sont corrigés.
Les solutions sont regroupées en fin de chapitre.



Plan

1.1 Concepts et vocabulaire pour l'étude de systèmes pluritechnologiques	1
1.2 Modèle	7
1.3 Les systèmes automatisés	9

Introduction

« Le métier de base de l'ingénieur consiste à résoudre des problèmes de nature technologique, concrets et souvent complexes, liés à la conception, à la réalisation et à la mise en œuvre de produits, de systèmes ou de services. Cette aptitude résulte d'un ensemble de connaissances techniques d'une part, économiques, sociales et humaines d'autre part, reposant sur une solide culture scientifique. »

Cette définition du métier d'ingénieur est proposée par la Commission des titres d'ingénieur. Elle résume bien ce que l'on entend par « étude des systèmes ». Ce chapitre s'attache à exposer les concepts de base associés, et à définir une partie du vocabulaire spécifique à cette activité.

Prérequis

Ce chapitre d'introduction est construit sans prérequis disciplinaire, mais requiert néanmoins :

- le sens du concret ;
- de la rigueur et de la cohérence.

Objectifs

- Acquérir le vocabulaire concernant les notions fondamentales relatives à l'étude de systèmes complexes.
- S'entraîner aux changements d'approche et de point de vue.
- Comprendre la notion de modèle.
- S'approprier quelques outils de représentation.

1.1 Concepts et vocabulaire pour l'étude de systèmes pluritechnologiques

L'expression « système complexe » n'est pas à entendre au sens de difficile, mais au sens où la multitude des paramètres qui interviennent fait qu'un projet industriel n'a pas *une* solution unique. La solution adoptée est issue d'un ensemble de solutions possibles. Son choix est le résultat d'un compromis nécessaire entre des intérêts rarement convergents.



Un servomécanisme est un mécanisme dont au moins une grandeur mécanique est contrôlée, par exemple une position, une vitesse...

1.1.1

Système

Système et milieu environnant

Le mot « système » est un de ces mots génériques que l'on trouve dans tous les domaines. Que l'on étudie un système solaire, un système sanguin, un système technique ou un système d'équations, on trouve toujours dans le thème abordé la racine grecque du mot signifiant *un assemblage* ou *une composition*.

Définition

Un **système** est un arrangement d'éléments en interaction, organisé en vue d'atteindre un ou plusieurs objectifs définis.

Les idées fondamentales exprimées par cette définition sont nombreuses :

- un système est un ensemble ;
- cet ensemble peut être décrit à partir d'éléments ;
- les éléments de cet ensemble sont en relation ;
- un système a une finalité exprimée.

On peut compléter ces propositions en constatant qu'un élément peut être lui-même un système, et un système peut être lui-même un élément d'un système plus grand.

Exemples

- une **machine** est un système transformateur d'énergie ;
- un **mécanisme** est un élément de la classe des machines qui transforme de l'énergie mécanique en énergie mécanique, autrement dit un système de transformation de mouvement ;
- un **moteur** est un élément de la classe des machines qui fournit de l'énergie mécanique, à partir d'énergie électrique, thermodynamique ou chimique.

Toute analyse commence par la définition du système dont on parle : il s'agit de délimiter ce système, pour identifier son environnement. On imagine pour cela une frontière fictive entourant le système. Tout ce qui n'appartient pas au système ainsi circonscrit et qui entre en contact ou en relation avec le système définit le milieu environnant.

Définition

On appelle **milieu environnant** d'un système l'ensemble des éléments de l'univers en relation avec lui.

Les éléments du milieu environnant sont généralement classés dans quatre grandes familles :

- l'environnement humain ;
- l'environnement matériel ;
- l'environnement énergétique ;
- la matière d'œuvre.



Définition proposée par la norme ISO/IEC 15288:2002

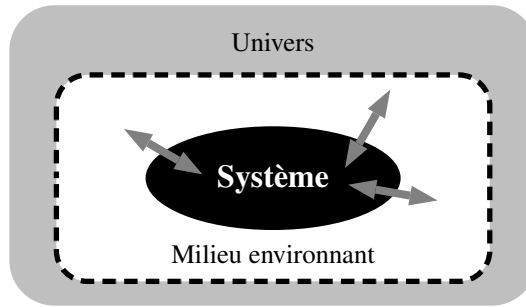


Figure 1.1 Le milieu environnant d'un système.

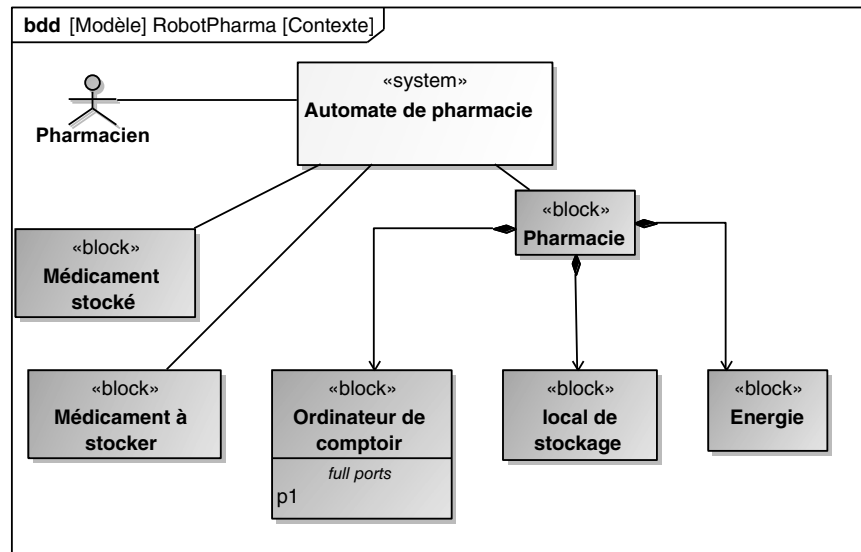


Figure 1.2 Un robot de pharmacie dans son environnement.

Les éléments du milieu environnant peuvent être énoncés par un diagramme de contexte, un diagramme très librement adapté des diagrammes SysML. La figure 1.2 caractérise par exemple l'environnement d'un robot distributeur de médicament installé dans une pharmacie.

Matière d'œuvre et valeur ajoutée

Définition

On appelle *matière d'œuvre* d'un système tout élément modifié par son intervention.

Il existe trois grands types de matière d'œuvre :

- un produit ou une matière ;
- une énergie ;
- une information.

Définition

On appelle *valeur ajoutée* ce qui caractérise la modification des propriétés de la matière d'œuvre après passage dans le système.



Les principales définitions à connaître concernant les diagrammes SysML sont données en annexe.



La matière d'œuvre ne change pas de nature ! Seules évoluent ses caractéristiques.



Même sur des systèmes apparemment simples, une analyse fonctionnelle conduit à des propositions pertinentes.

Cette modification concerne la forme, la position ou l'état de la matière d'œuvre.

Exemple

On s'intéresse à un des objets les plus courants dans une habitation : un aspirateur ménager. La matière d'œuvre est constituée de :

- l'air du lieu ;
- un sac filtre ;
- les éléments rencontrés par l'embout.

Entrent dans le système un sac *propre* et de l'air chargé de poussières et ressortent du système un sac de poussières et de l'air *propre*.

La valeur ajoutée peut être alors exprimée par la proposition : la poussière est transférée de l'air aspiré au filtre sans endommager son support initial.

Cycle de vie

La notion de **cycle de vie** est indissociable d'un système technologique. Elle exprime les différentes étapes qui vont de sa conception initiale jusqu'au recyclage de ses constituants.

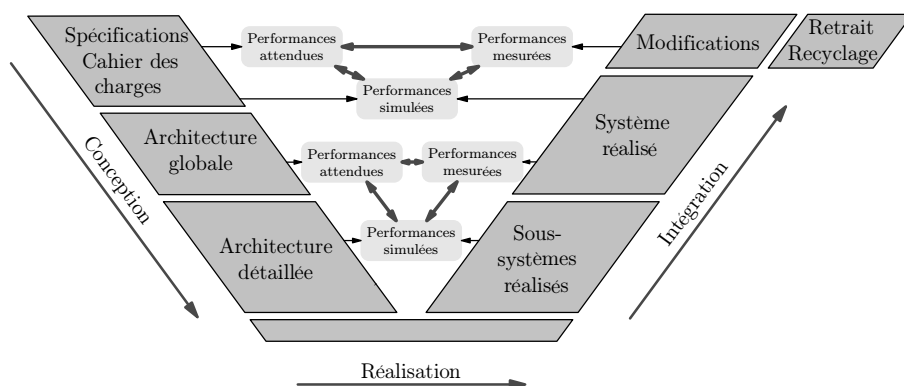


Figure 1.3 Représentation usuelle du cycle de vie sous la forme d'un « V ».

La figure 1.3 les explicite et rappelle que l'évaluation des performances se fait à tous les niveaux.

1.1.2 Fonction d'un système

Définition

On appelle **fonction** d'un système ce pour quoi il a été conçu.

Notation

Une **fonction** s'énonce par une phrase commençant par un verbe à l'infinitif.

Il n'y a pas équivalence entre fonction et système. Un système remplit une fonction qui est directement liée à un besoin exprimé. Réciproquement, une fonction peut être réalisée par de multiples systèmes différents. Passer de l'objet à sa finalité permet de s'en détacher et ouvre ainsi le champ de l'innovation.



La fonction globale d'un système exprime et résume la mission qui lui est assignée.

1.1.3

Analyse et expression du besoin

Expression du besoin

La première question à se poser lorsque l'on étudie ou on conçoit un système est « Pourquoi le produit existe-t-il ? »

Ce désir de comprendre et de justifier prend racine dans la volonté de satisfaire le besoin du « client ».

La question initiale est à diversifier dans cinq directions :

- À qui rend-il service ?
- Sur quoi agit-il ?
- Quel est son but ?
- Qu'est-ce qui pourrait faire évoluer le besoin ?
- Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître le besoin ?

Le client est à associer à cette démarche initiale afin qu'il puisse expliciter son besoin. La codification de son attente se fait en trois étapes :

- identifier les éléments du milieu environnant ;
- pour chacun d'eux, appliquer la grille précédente en vue d'énoncer la fonction correspondant au service rendu ;
- définir les critères que l'on applique pour évaluer la réalisation de la fonction.

Une fonction ainsi énoncée est souvent appelée *fonction de service*.

Cahier des charges fonctionnel (CdCF)

On appelle *Cahier des charges fonctionnel* (CdCF) le document qui expose l'ensemble des caractéristiques attendues des fonctions de service. Le tableau 1.1 en donne une allure générale, présentée sous la forme d'un tableau.

N°	Expression de la fonction	Critère	Niveau	Flexibilité

Tableau 1.1 Cahier des charges fonctionnel.

Ce tableau comporte cinq colonnes :

- un numéro d'index ;
- l'énoncé de la fonction traitée ;
- la liste des performances attendues et des critères d'évaluation retenus ;



Un **critère** est une règle que l'on définit en vue d'émettre une opinion ou de prendre une décision.



L'énoncé de la fonction commence par un verbe à l'infinitif.

- la valeur chiffrée pour les critères retenus ;
 - la flexibilité possible concernant la valeur chiffrée.
- Cette dernière est difficile à aborder sans connaître le coût financier des solutions adoptées. Accepter un niveau de performance dégradé peut être possible si l'économie réalisée augmente la compétitivité du produit.

Ce document sert de contrat entre le client et le fournisseur. Du point de vue du client, chaque ligne permet un contrôle de la prestation fournie, et du point de vue du fournisseur, chaque ligne induit un niveau d'exigence à la conception.

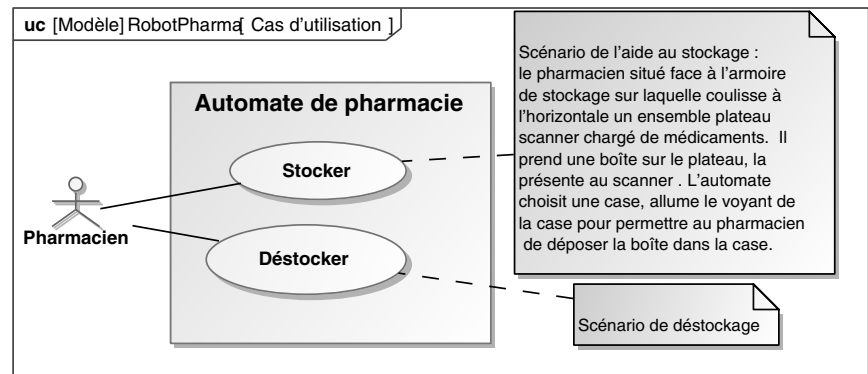


Figure 1.4 Les relations entre le pharmacien et son robot.

Cas d'utilisation

On peut également préciser ce que l'on attend du système en décrivant des scénarios montrant comment le système va interagir avec son environnement dans des situations bien précises.

Ces informations sont alors disponibles dans un diagramme de cas d'utilisation ; ce dernier peut être avantageusement complété par du texte détaillant ces scénarios.

Spécification d'un système

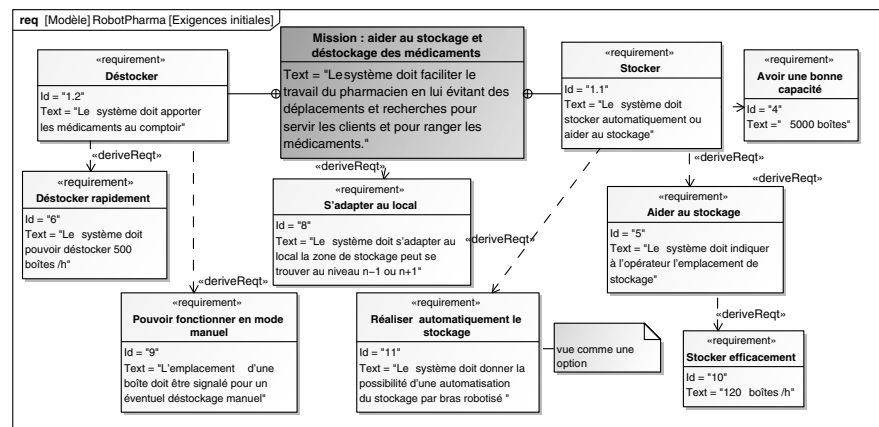


Figure 1.5 Éléments du cahier des charges du robot de pharmacie exprimés par un diagramme des exigences.



Les principales définitions à connaître concernant les diagrammes SysML sont données en annexe.

Pour des systèmes de plus en plus complexes, ce n'est pas un seul tableau ou un seul diagramme qui exprimera tout ce qui est attendu. Il faut s'attendre à un ensemble de documents dont on donne deux exemples supplémentaires :

- la figure 1.5 propose un diagramme des exigences ;
- la figure 1.6 un diagramme de séquence.

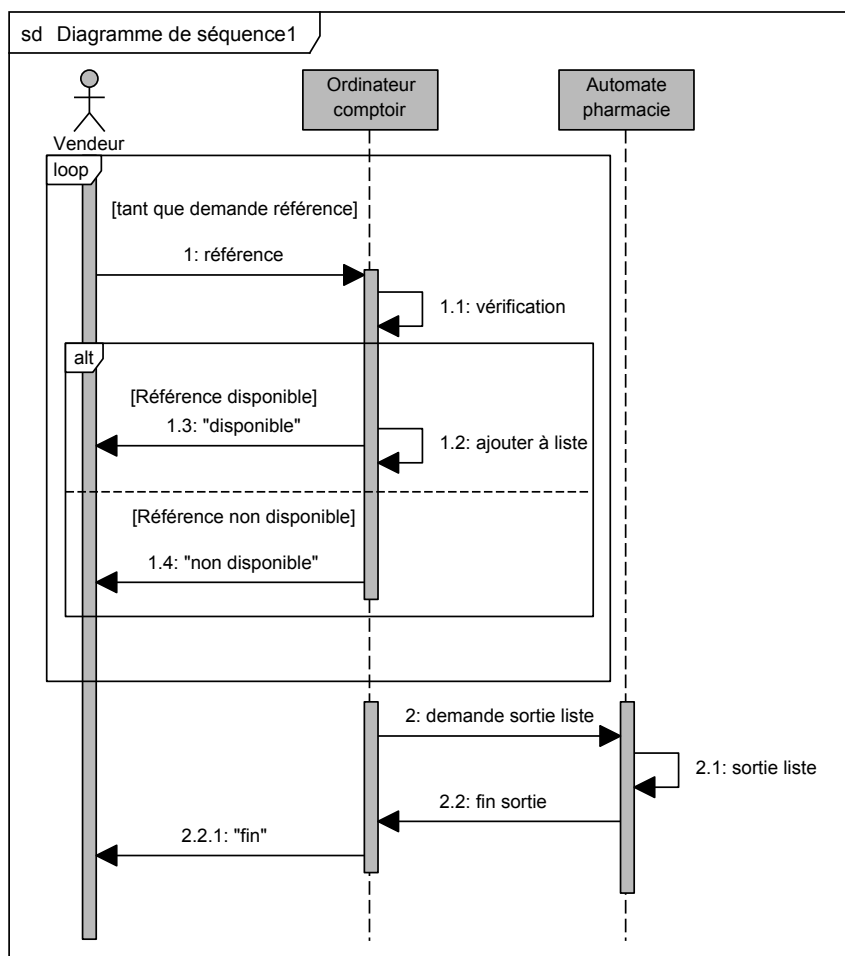


Figure 1.6 Scénario d'utilisation du robot de pharmacie exprimé par un diagramme de séquence.

1.2 Modèle

Définition

Un **modèle** est une description simplifiée du réel destinée à en représenter un des aspects.

Un modèle se doit de posséder quatre qualités essentielles :

- la simplicité, pour être facile à élaborer et à simuler ;
- la validité, pour assurer la cohérence entre les approches théorique et empirique ;
- l'exhaustivité, pour être transposable à d'autres systèmes ;
- la fécondité, pour générer de nouveaux modèles.

1.2.1

Modélisation

Définition

On appelle **modélisation** l'activité qui consiste à associer des modèles à un système.

Cette activité consiste en un va-et-vient permanent entre le réel et ses modèles, comme l'illustre la figure 1.7 :

- au système correspond le champ empirique, domaine de l'expérimentation et de la mesure ;
- aux modèles correspond le champ théorique, qui conduit aux calculs et à la simulation.

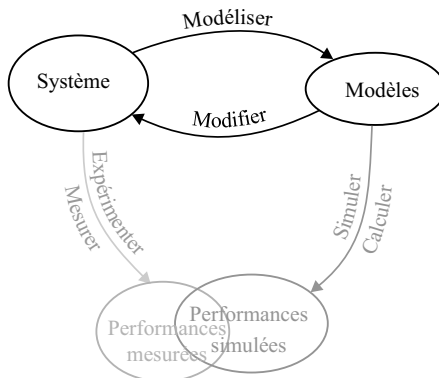


Figure 1.7 Les activités associées à la modélisation.

La comparaison des performances mesurées et des performances simulées a trois conséquences :

- permettre la validation d'un modèle proposé ;
- provoquer la recherche de nouveaux modèles ;
- inciter à l'évolution du système étudié.

1.2.2

Différentes approches d'un système

L'intérêt porté à un système technique se traduit souvent par des questions :

- À quoi ça sert ?
- Comment ça marche ?
- Comment c'est fait ?
- Où trouve-t-on cela ?

Chacune de ces questions concerne une approche différente du système. Chacune de ces approches induit des modèles permettant de mettre en avant un aspect particulier du système, et chaque aspect est une spécialité dans laquelle on peut développer un niveau d'expertise. Les quatre questions précédentes permettent de classer les modèles en fonction de l'approche adoptée, et ce classement est présenté sur la figure 1.8 où

- les noms en caractères droits sont des modèles abordés dans cet ouvrage ;
- les noms des modèles écrits en italique sont donnés en complément à titre d'exemple.

Les outils concernant les approches comportementale et organisationnelle sont développés au cours des chapitres suivants. Ce premier chapitre a présenté jusqu'ici le point de vue fonctionnel et va se poursuivre en abordant le point de vue structurel.