HAL open science

Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique

Frédéric Charpentier

To cite this version:

Frédéric Charpentier. Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0081 . tel-01016665

HAL Id: tel-01016665

https://theses.hal.science/tel-01016665

Submitted on 8 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Frédéric CHARPENTIER

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique

Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique

Mémoire soumis au jury :

M. SAMPER, Serge	Professeur des Universités Président du jury	Université de Savoie
M. MATHIEU, Luc	Professeur des Universités Rapporteur	Université Paris Sud
M. ROUCOULES, Lionel	Professeur des Universités Rapporteur	Arts & Métiers ParisTech, Aix-en-Provence
M. BALLU, Alex	Maître de conférences HDR Directeur de thèse	Université de Bordeaux
M. PAILHES, Jérôme	Maître de conférences HDR Co-directeur de thèse	Arts & Métiers ParisTech, Bordeaux

Le 6 juin 2014

REMERCIEMENTS

Avance sur ton chemin,
car il n'existe que par
ta marche.
SAINT-AUGUSTIN

Travail solitaire, véritable ascèse, dont l'auteur sort, paraît-il, transformé, une thèse est aussi un travail d'équipe, dimension essentielle à son aboutissement. Je veux témoigner toute ma reconnaissance à celles et ceux qui m'ont accompagné sur le chemin.

Je remercie Jean-Pierre Nadeau de m'avoir accueilli au sein de son équipe au laboratoire « Institut de Mécanique et d'Ingénierie » (I2M) de l'université de Bordeaux afin de mener mes travaux de recherche.

Je remercie très chaleureusement mes deux directeurs de thèse, M. Alex Ballu, Maître de conférences HDR, Université de Bordeaux, directeur de thèse, et M. Jérôme Pailhès, Maître de conférences HDR, Arts et Métiers ParisTech Bordeaux, co - directeur de thèse. La dimension humaine est souvent oubliée dans la rédaction d'un mémoire ; elle est pourtant essentielle dans l'achèvement de ce travail. Tout au long de nos échanges, nous avons procédé à la « ré introduction du sujet connaissant dans la connaissance » [Morin 1996]. Posée d'emblée, c'était le premier obstacle de la construction complexe de la thèse. Bachelard le souligne

En réalité, il n'y a pas de phénomènes simples ; le phénomène est un tissu de relations. Il n'y a pas de nature simple, de substance simple, la substance est une contexture d'attributs. Il n'y a pas d'idée simple, parce qu'une idée simple [...] doit être insérée, pour être comprise. [Bachelard 1934]

Ma reconnaissance va aux membres du jury qui ont accepté de s'atteler à la tâche d'évaluer ce travail de thèse, M. Luc Mathieu (rapporteur), Professeur des Universités, Université Paris Sud, M. Lionel Roucoules (rapporteur), Professeur des Universités, Arts & Métiers ParisTech Aix-en-Provence et M. Serge Samper (président du jury), Professeur des Universités, Université de Savoie.

Que ma famille, proche et moins proche, accepte ma gratitude pour avoir su comprendre que certaines vacances, soirées et fins de semaine n'en étaient pas toujours pour moi. J'aimerais un jour savoir leur rendre le temps que je leur ai emprunté pour sacrifier à cette obnubilante thèse. Qu'ils veulent bien me pardonner ! Au premier rang de ceux-ci, mon fils Louis, qui a oscillé entre la curiosité et l'incompréhension ; j'espère un jour qu'il trouvera de l'intérêt, du plaisir, et peut-être une once de fierté à lire ce mémoire.

La rédaction de ce mémoire s'est pour une large part déroulée sous l'égide d'une implacable, stimulante et empathique triple injonction : écris, écris, écris.

RESUME

La conception de produits a pour objectif de définir techniquement un produit en satisfaisant les besoins de l'ensemble des clients du cycle de vie du produit. Les enjeux industriels conduisent à développer des modèles et des outils d'aide à la conception afin de répondre aux besoins clients tout en optimisant le triptyque coût-qualité délais.

L'objectif de cette thèse est de proposer une vision globale permettant d'appréhender les différents types de modélisation. Pour atteindre cet objectif, une analyse globale de ces notions est nécessaire afin d'obtenir une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation.

L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Cette approche doit permettre d'appréhender les différents niveaux de détails (systémique) lors de la décomposition fonctionnelle et structurelle du produit. Elle doit également permettre de suivre l'élaboration des modèles physiques pour la simulation.

Nous proposons une traçabilité du processus de conception et du processus de modélisation permettant de remettre en cause, le cas échéant, les choix de conception et les hypothèses de modélisation.

Ce travail est fondé sur des concepts de GeoSpelling comme le « skin modèle », les opérations et les propriétés. Ils sont enrichis d'autres concepts comme les modèles finis et infinis et les modèles primitif et de simulation.

Mots clés : conception mécanique, modèle produit, modélisation, processus de modélisation, processus de conception, analyse de tolérance.

ABSTRACT

Product design aims to technically define a product satisfying the needs of all customers during the product life cycle. Industrial issues lead to develop models and tools supporting design to meet customer needs and contributing to costs-quality-and time optimisation.

The objective of this thesis is to propose an overall vision making it possible to apprehend the various types of modeling. To achieve this goal, a comprehensive analysis of these concepts is necessary in order to obtain a common representation of the system for the various activities of design and simulation.

The advantage of this approach is to highlight the dependencies and relationships among those activities. This approach should allow to apprehend the various levels of detail (systemic) during the functional and structural decomposition activity. It should also enable to monitor the development of the physical models for the simulation.

We propose a traceability of the design process and of the modeling process allowing to review as appropriate the design choices and the modeling assumptions.

This work is based on concepts of GeoSpelling as the "skin model", the operations and the properties. They are complemented by other concepts as the finite and infinite models and the primitive and simulation models.

Keywords : mechanical design, product model, modeling, modeling process, design process, tolerance analysis.

.

SOMMAIRE

Sommaire **1**

Introduction **3**

1 Etat de l'art et contexte **5**

1.1 Introduction *6*

1.2 Méthodologies de conception concrétes : « design méthodology » *8*

1.3 Modele *11*

1.3.1 Modélisation des phénomènes 11

1.3.2 Nature des modèles 17

1.3.3 Construction d'un modèle pour la simulation 18

1.3.4 Simulation 18

2 Modèles du réel **21**

2.1 Introduction aux modèles *22*

2.1.1 Réel et modèle 22

2.1.2 Modèle fini – modèle infini 24

2.1.3 Modèle adapté - modèle inadapté 25

2.1.4 Modèle primitif – modèle de simulation 28

2.2 Système *32*

2.2.1 Composant. 32

2.2.2 Interaction 33

2.2.3 Interface 34

2.3 Comportement physique *38*

2.3.1 Modélisation énergétique d'un système 38

2.3.2 Champ 43

2.3.3 Flux 44

2.4 Synthèse *45*

3 Propriétés **47**

3.1 Définition d'un objet *48*

3.1.1 Type d'un objet 48

3.1.2 Propriété 50

3.1.3 Propriétés de base et propriétés dérivées 55

3.2 Opérations géométriques *58*

3.2.1 Description des opérations 59

3.2.2 Synthèse sur les opérations géométriques 67

3.3 Extension àu comportement mécanique *70*

3.3.1 Besoins 70

3.3.2 Exemples d'opérations 72

3.3.3 En synthèse. 75

3.4 Opérations physiques *76*

3.4.1 Décomposition 77

3.4.2 Restriction 79

3.4.3 Transformation 81

3.4.4 Logique 88

3.4.5 Synthèse 90

3.5 Synthèse *90*

4 Processus de modélisation 91
4.1 Processus de modélisation et de simulation 93
4.1.1 Généralités 93
4.1.2 Dans la pratique 94
4.1.3 Synthèse sur le processus de modélisation et de simulation 100
4.2 Description du processus de simplification par un opérateur 101
4.2.1 Condition de jeu minimal 101
4.2.2 Condition de contrainte maximale admissible 105
4.3 Schéma procédural 109
4.3.1 condition de jeu minimal 110
4.3.2 condition de contrainte maxi. 113
4.3.3 Synthèse 118
4.4 Spécification 118
4.4.1 Spécifications fonctionnelles 119
4.4.2 Spécifications liées aux hypothèses 121
4.5 Synthèse 123

5 Processus de conception 125
5.1 Introduction au processus de conception 126
5.1.1 Définition du processus de conception 128
5.1.2 Périmètre de l'étude 130
5.1.3 Éléments et interactions 130
5.2 Démarche d'analyse et de structuration 132
5.2.1 Analyse du besoin 132
5.2.2 Analyse fonctionnelle externe 133
5.2.3 Analyse fonctionnelle technique 139
5.3 Modèle primitif dans le processus de conception 146
5.4 Synthèse 150

Conclusion et perspectives 151

Bibliographie 155
Bibliographie de l'introduction 155
Bibliographie du chapitre 1 155
Bibliographie du chapitre 2 160
Bibliographie du chapitre 3 161
Bibliographie du chapitre 4 164
Bibliographie du chapitre 5 165

INTRODUCTION

La conception de produits a pour objectif de définir techniquement un produit en satisfaisant les besoins de l'ensemble des clients du cycle de vie du produit. Les enjeux industriels conduisent à développer des modèles et des outils d'aide à la conception afin de répondre aux besoins clients avec pour objectif l'optimisation des coûts, de la qualité et des délais. Dans la littérature, nous trouvons différentes définitions de la conception. Selon Palh & Beitz [Pahl & al 2007] la notion de conception d'un produit contient la notion de transformation de l'abstrait au concret, d'une idée à un produit, d'un problème à une solution, du fonctionnel au structurel.

La modélisation est présente tout au long du processus de conception. Néanmoins, les travaux existants ne couvrent généralement que certaines activités, ou certains points de vue : analyse fonctionnelle, conception préliminaire, conception détaillée, simulation (structure, thermique, tolérancement…).

L'objectif de cette thèse est de proposer une vision globale permettant d'appréhender les différents types de modélisation. Pour atteindre cet objectif, une analyse globale de ces notions est nécessaire afin d'obtenir une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Cette approche doit permettre d'appréhender les différents niveaux de détails (systémique) lors de la décomposition fonctionnelle et structurelle du produit. Elle doit également permettre de suivre l'élaboration des modèles physiques pour la simulation.

Un des points de départ de ce travail de recherche est le langage GeoSpelling [Ballu & al 1995]. Ce langage est adapté à l'expression des spécifications géométriques des produits et a servi de base de travail au comité technique TC213 de l'ISO [Iso 17450-1 2011]. Un des concepts de base est le « skin » modèle qui permet une représentation formelle des informations pour les activités de conception, de fabrication et de contrôle intégrant une vue réaliste (géométrie réaliste) des pièces et des ensembles mécaniques.

L'ensemble des notions développées est illustré par un exemple simple du domaine industriel.

Le présent mémoire s'articule en un chapitre bibliographique suivi de quatre chapitres, intitulés *modèles du réel*, puis *propriétés*, suivi de *processus de modélisation* et enfin *processus de conception.*

La partie bibliographique situe notre travail de recherche dans le contexte tout en permettant d'aborder les points qu'il nous semble nécessaire de compléter ou d'amender.

- **Modèles du réel** est le titre du chapitre où nous considérons qu'une chose, un phénomène et le réel sont consubstantiels. La représentation du réel est une abstraction faite de modèles. Nous mettons en avant les différents types de modèles imaginés ou utilisés.
- **Propriété** est le titre du chapitre où il nous semble nécessaire de définir des éléments structurés appelés objets dotés d'un ensemble de données, et de procédures qui décrivent leur manipulation. Nous classons les objets, nous définissons les différentes propriétés et nous mettons en avant les différents liens entre les propriétés à partir d'un ensemble d'opérations.
- **Processus de modélisation** est le titre du chapitre où le comportement physique doit être simulé en fonction des propriétés de comportement du système afin d'évaluer la faisabilité d'une solution. Nous proposons une description du processus de modélisation en vue de la simulation du système en utilisant les concepts présentés dans les deux chapitres précédents.
- **Processus de conception** est le titre du chapitre où l'activité de conception vise à définir la décomposition fonctionnelle du système. Nous proposons une vision générale permettant d'appréhender les différents types de modèles avec une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de modélisation.

La structure du mémoire pourrait surprendre le lecteur, car le **processus de conception** se situe systématiquement à la genèse de tout projet. L'ordre choisi volontairement a pour objectif de développer d'abord les concepts fondamentaux dans les deux premiers chapitres (**modèles du réel**, **propriétés**), puis de montrer comment ces concepts s'inscrivent dans les processus de modélisation et de conception dans les deux dernières parties.

1 ETAT DE L'ART ET CONTEXTE

Depuis plus de 150 ans, de nombreuses méthodologies et théories de conception sont apparues et constituent une base de réflexion définie sous la désignation "Design theory and methodology" (DTM). Ce chapitre propose un état de l'art des méthodologies de conception et situe le contexte de ce travail de recherche.

L'esprit scientifique se constitue sur un ensemble d'erreurs rectifiées.
Gaston BACHELARD[1]

SOMMAIRE

1.1 Introduction *6*
1.2 Méthodologies de conception concrétes : « design méthodology » *8*
1.3 Modele *11*
1.3.1 Modélisation des phénomènes 11
1.3.2 Nature des modèles 17
1.3.3 Construction d'un modèle pour la simulation 18
1.3.4 Simulation 18
Bibliographie du chapitre 1 ..... *155*

[1] *La Formation de l'esprit scientifique, 1938, rééd Puf, 2007.*

1.1 INTRODUCTION

La prise en compte du processus de conception dans sa globalité est un enjeu économique du développement de produits industriels [Berliner & Brimson 1988]. Elle nécessite l'étude de l'ensemble du cycle de vie, depuis les premières réflexions sur le besoin du client, jusqu'à la fin de vie du produit (destruction, recyclage, réutilisation). De nombreuses recherches ont été menées [Giard 2000] afin de maîtriser les coûts de développement de produits. Dans ce contexte, la communauté de recherche en conception propose de rationaliser et améliorer le processus de développement de produits afin de fournir des éléments objectifs d'aide à la décision pour les acteurs économiques. L'enjeu est global, car il est nécessaire de satisfaire au mieux les exigences simultanées de qualité, de délai et de coût. Ces exigences sont d'autant plus difficiles à maîtriser qu'aujourd'hui le développement de produits est basé de plus en plus sur la collaboration de différents protagonistes. Cet état de fait génère une réflexion globale sur les supports nécessaires à l'activité de conception.

Depuis plus de 150 ans, de nombreuses méthodologies et théories de conception sont apparues et constituent une base de réflexion définie sous la désignation "Design theory and methodology" (DTM). Tomiyama les recense [Tomiyama et al. 2009], la multiplicité et la diversité de ces méthodologies rend leur compréhension et leur utilisation difficile. Plusieurs classifications ont été proposées au cours du temps qui prennent en compte les évolutions liées aux modifications des pratiques.

Tout d'abord, Finger et Dixon ont proposé six catégories de DTM [Finger & Dixon 1989a, 1989b] qui sont définies ci-dessous :

- modèle descriptif des processus de conception : dans cette catégorie, soit les auteurs recueillent des données sur la manière de travailler des concepteurs, soit ils proposent des modèles du processus cognitif liés aux concepteurs. Des modèles descriptifs non fondés sur l'observation formelle du processus de conception ont été également identifiés, ils sont liés au sens intuitif des concepteurs, on retrouve à ce titre entre autres dans cette catégorie, les différentes méthodologies issues de l'école allemande [Koller 1994; Pahl & Beitz 2007; Rodenacker 1991; Roth 2000].

- modèles prescriptifs de la conception : ils prescrivent comment le processus de conception doit procéder et/ou définissent les attributs que l'artefact de conception doit avoir. On retrouve ici également les travaux allemands liés à l'étude morphologique d'un produit [Pahl & Beitz, 2007] ou des modèles prescriptifs portant sur les artefacts issus de l'activité de conception par exemple "General Design Theory" [Yoshikawa 1981] ou "axiomatic Design" [Suh 1990].

- modèles informatiques pour les processus de conception : sont identifiées ici toutes les méthodes liées aux possibilités offertes par les mathématiques et l'informatique pour l'aide aux concepteurs, on peut citer la conception paramétrique et

les méthodes basées sur l'intelligence artificielle, la modélisation de produits.

- langages, représentations et environnements pour la conception : la modélisation géométrique, la modélisation des fonctions et des comportements, la modélisation basée sur les caractéristiques.
- analyse pour la conception : méthodes d'optimisation, travaux sur l'interprétation des résultats éléments finis, support d'aide à la décision, analyse des affordances.
- design for X, avec toutes les activités rencontrées au cours du cycle de vie du produit qui peuvent être déclinée de manière simultanée ou non.

La classification de Finger et Dixon a comme mérite de mettre en avant les objectifs des méthodologies et théories, mais n'apporte pas une aide réelle dans le choix de méthodologies par rapport au contexte particulier d'un problème de conception. Les différentes catégories portent sur des activités très différentes. Elles sont aussi bien de l'ordre de théories très générales qui s'appliquent au processus global de conception, comme la première catégorie qui porte sur l'analyse des processus de conception, que de l'ordre de théories très locales correspondant à une activité particulière comme le design for X par exemple. De plus, certaines théories ont des vocations très abstraites pour définir un cadre de travail [General design Theory, Tomiyama 1987], pour permettre de traduire sous forme mathématique des problèmes de conception, alors que d'autres sont très applicatives.

D'autres classifications ont alors été proposées, en se basant sur le type d'activité [Horváth 2004; Tomiyama 2006]. Ces classifications présentent l'inconvénient de retrouver les mêmes méthodes dans différentes catégories, aucun élément ne permet au concepteur de choisir l'outil le plus utile à son activité.

Tomiyama, en 1997, propose alors de différencier la conception abstraite et concrète. La conception abstraite consiste souvent à définir un problème de conception sous une forme mathématique au sens des algorithmes. Les solutions obtenues sont satisfaisantes du point de vue des mathématiques. Par opposition, la conception concrète consiste à regrouper des études de cas individuels de conception d'une catégorie de produits spécifiques, puis d'en extraire les points communs entre eux. Des méthodes de conception adaptées à un type de produits peuvent être ainsi obtenues [Tomiyama 1997].

A partir de cette distinction, une nouvelle classification est introduite en prenant également en compte le caractère général ou individuel des méthodes retenues. Cette classification sera complétée par la suite en introduisant la fréquence d'utilisation de ces DTM en fonction du contexte industriel et académique [Tomiyama et al. 2009]. Les conclusions de ce travail montrent que les méthodes qui sont générales et concrètes sont très enseignées ainsi que les méthodes qui sont à la fois abstraites et individuelles.

Les méthodologies générales et concrètes, couvrant un large spectre du processus de conception, offrent une possibilité de structuration de la conception et servent de référence à la réflexion des processus industriels, mais restent souvent éloignées des processus appliqués. De plus, le caractère très particulier de chaque entreprise nécessite des adaptations propres à chaque contexte industriel.

Les méthodes abstraites et individuelles se retrouvent également très développées dans le monde industriel, car les possibilités offertes aujourd'hui par les mathématiques et l'informatique permettent de trouver des solutions qui tendent vers des optimum, avec des ressources liées à leur mise en œuvre qui sont cohérentes avec les possibilités des industriels.

En conclusion, la finalité et le niveau d'adaptabilité des méthodologies et théories de conception sont les éléments clés qui leur permettent d'être aussi bien enseignées que déployées dans le monde industriel.

1.2 METHODOLOGIES DE CONCEPTION CONCRETES : « DESIGN METHODOLOGY »

Au sein de ces méthodologies de conception, le processus de conception est décomposé en phases élémentaires. Ainsi, le modèle de Roth [Roth 2000] propose de décomposer les phases de l'évolution de la conception d'un produit, puis redécoupe ces phases dans des activités. La méthode de conception proposée par Pahl et Beitz [Pahl et al. 2007] est établie sur le même principe et sur une analyse approfondie des principes fondamentaux des systèmes techniques. Le processus de conception est décomposé en quatre phases principales : expression du besoin, recherche des concepts, recherche d'architecture, conception détaillée. Cette méthodologie utilise également l'analyse des énergies, des informations et de la matière qui entrent et qui sortent du système étudié. La méthode propose dans sa phase initiale de traduire le problème de conception sous une forme fonctionnelle avec une relation de transformation entre les grandeurs en entrée et en sortie du système étudié. Le concepteur va traduire les actions souhaitées et attendues que doit réaliser le produit sous forme de fonctions. Ces fonctions globales peuvent elles-mêmes être décomposées en sous-fonctions. La méthodologie introduit aussi bien une segmentation de l'activité dans le temps (quatre phases de conception) qu'une segmentation de la structure du problème pour pouvoir le résoudre. Ce choix, somme toute logique d'un point de vue de la mise en pratique de la méthodologie, génère en même temps toute une complexité, car au final, chacune des activités et des solutions locales doit être pertinente et cohérente au niveau global. Elle postule également qu'à un niveau de décomposition fonctionnelle, il est possible d'associer un composant ou un élément capable de satisfaire cette sous-fonction. L'utilisation de connaissances de type catalogue concernant des effets physiques associés à des éléments paraît alors possible. La décomposition fonctionnelle et la définition même de la sous-fonction donnent les limites liées à l'utilisation

de telles méthodes. En effet, la décomposition joue forcément un rôle sur la manière d'exprimer le problème et oriente naturellement les solutions dans des directions particulières. L'expression elle-même des fonctions peut devenir un écueil donc un effort particulier est nécessaire sur la manière de définir les fonctions.

Des méthodes de décomposition fonctionnelle ont ainsi été développées pour répondre à cette problématique en utilisant la notion de base fonctionnelle et de taxonomie [Stone, 2000]. Une liste exhaustive de verbes et de compléments est proposée pour définir les fonctions, afin de les relier à des systèmes ou des composants élémentaires. Dans les exemples présentés, ces outils sont toujours utilisés pour décrire des produits existants, mais aucune démarche structurée n'est introduite pour concevoir un système complexe nouveau avec différents niveaux de décomposition structurale. L'organisation des agencements des composants n'est pas proposée par exemple. Ces méthodologies peuvent être considérées comme descriptives, mais n'aident pas à la génération de nouveaux produits.

Aussi, certains auteurs ont proposé un cadre, comme Suh, pour structurer le processus de conception avec une démarche de type zig-zag pour passer de la fonction à la structure [Suh 1990]. Une procédure de décomposition des fonctions et de la structure vers les niveaux élémentaires est présentée. Cette démarche intéressante pose un cadre général, mais ne permet pas de mettre en place des règles de conception détaillées. John Gero propose également de mettre en relation la fonction et la structure tout en introduisant une liaison avec le comportement du système [Gero, 2004]. Son modèle FBS (Functional, Behavior, Structure) introduit également la différence entre la notion de comportement attendu avec le comportement simulé ou expérimenté. Le comportement attendu correspond aux exigences souhaitées par le concepteur ou le client. Le comportement simulé ou expérimental correspond à l'observation de la réponse du système. Il note que toute la difficulté de l'activité de conception réside dans la dualité entre le côté subjectif du comportement attendu et le côté objectif du comportement simulé ou expérimental.

Ces deux dernières méthodologies posent des cadres généraux, mais n'apportent pas d'outils concrets et précis permettant d'accompagner en détail les concepteurs lors de la phase cruciale du passage de la fonction et des spécifications à l'architecture de solutions. Concevoir un système doit permettre de passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques d'un objet permettant de définir cet objet de manière univoque, de le produire tout en satisfaisant l'ensemble des exigences de l'ensemble du cycle de vie. L'expression du besoin ainsi que les fonctions et leurs décompositions hiérarchiques sont positionnées dans le domaine fonctionnel alors que les caractéristiques sont positionnées dans le domaine physique.

Le passage entre ces deux domaines est très difficile à matérialiser, car, d'un côté, les fonctions doivent être traduites sous forme quantifiable et, de l'autre, des grandeurs physiques doivent être évaluées. Ces grandeurs correspondent à des actions effectuées par le système. Le système agit sur les milieux

environnants par l'intermédiaire d'une transformation d'énergie, d'un flux d'énergie, de matière ou d'information ou par le changement d'état causé par un ou plusieurs flux. Ainsi Rodenacker propose de se concentrer sur les lois physiques et leurs effets [Rodenacker 1991]. Son livre contient une base de données de ces éléments fonctionnels. De même, Roth a compilé des éléments fonctionnels utiles sous forme de catalogue. La satisfaction de plusieurs fonctions simultanées peut se révéler complexe, car les différents phénomènes physiques présents dans un système peuvent générer des effets induits néfastes au fonctionnement [Roth 2000]. Des dysfonctionnements peuvent être liés aux différents couplages pouvant apparaître dans les systèmes complexes.

Afin d'évaluer la faisabilité d'une solution, son comportement physique doit être alors simulé ou expérimenté à partir des caractéristiques pertinentes du comportement du système. Le modèle de Weber (CPM/PDD) essentiellement basé sur la distinction entre les caractéristiques et les propriétés du produit permet de structurer l'activité de simulation [Weber, 2008]. Les caractéristiques décrivent la structure, la forme, les dimensions, les matériaux et les surfaces d'un produit. Elles peuvent être définies par le concepteur ou être directement induites. Les propriétés décrivent le comportement du produit (par exemple, la fonction, le poids, la sécurité et la fiabilité, les propriétés esthétiques, la capabilité, la montabilité, le respect de l'environnement, le coût, etc.). Elles sont très similaires aux « propriétés internes » [Hubka, 1982] définies par Hubka et Eder et aux « paramètres de conception » définis dans la conception axiomatique. La maîtrise des comportements physiques est un enjeu important dès les premiers choix d'architecture de solutions. Le choix entre propriétés et caractéristiques peut se révéler délicat lorsque l'on cherche à définir le problème de conception.

Les interactions entre pièces deviennent des éléments clés du comportement physique global du système. Cette notion d'interaction entre les pièces est abordée dans le modèle DSM (design structure matrix) [Pimmler, 1994]. Elle permet une représentation matricielle du produit où les composants sont représentés en abscisse et en ordonnée et les éléments de la matrice représentent les interactions entre les composants. Il est alors possible de regrouper par bloc certains composants par des algorithmes de transformation de matrices. Cette démarche est assez similaire à celle proposée par Suh en axiomatic design où l'on recherche à agréger des composants pour satisfaire à un groupe de fonctions [Suh, 2001]. Il est à noter que l'accent est mis sur l'analyse des interactions pour améliorer la conception du produit.

En conclusion, les méthodologies et théories fournissent un fondement formel aux raisonnements effectués lors de l'étude des systèmes. Ces apports sont d'autant plus importants lorsque le système est composé d'une multitude de sous-systèmes interagissant les uns avec les autres, produisant un comportant global complexe et empêchant un raisonnement humain intuitif intelligible et sans erreur. Un reproche peut être fait aux

méthodologies présentées, sur l'absence de guides pratiques sur la manière d'utiliser les concepts généraux compatibles avec toutes les notions présentées. En effet, les différentes interactions entre fonction, structure et comportement physique ne sont pas synthétisées autour d'un formalisme global précis permettant d'aider le concepteur lors de la phase de recherche d'agencement et d'architectures de solutions. La recherche d'alternatives de conception reste très intuitive et liée à l'expérience du concepteur.

Aussi dans ce contexte, l'activité la plus prisée par les concepteurs devient l'activité de simulation afin de définir le plus efficacement possible des solutions de conception en minimisant les risques. Cette activité s'appuie majoritairement sur l'emploi de différents modèles. Or il apparaît que la modélisation d'un produit mécanique a une influence non négligeable sur la conception du produit, le processus de fabrication et le processus de contrôle ainsi que sur le déploiement d'une activité de conception intégrée. L'étude et la compréhension de systèmes réels reposent également sur la création de modèles représentant de façon abstraite les différents composants, fonctions et comportements impliqués. Nous proposons par la suite de recenser les différents types de modèles classiquement utilisés en science pour pouvoir borner leur utilisation et définir les limites de nos travaux.

1.3 MODELE

Les modèles peuvent posséder deux modes de représentation de nature différente. Dans un premier cas, le modèle peut être une représentation partielle du monde qui nous entoure et, dans le second cas, le modèle peut être une représentation d'une théorie comme nous l'avons vu précédemment. Dans le cas de la représentation partielle du monde, les modèles sont des modèles représentant des phénomènes ou des données. Dans l'autre cas, le modèle peut représenter une théorie dans le sens où elle interprète les lois et les axiomes de cette théorie. Ces deux modes de représentation ne sont pas antinomiques et peuvent cohabiter à partir de mêmes modèles.

1.3.1 MODELISATION DES PHENOMENES

Deux types de modèles de phénomènes apparaissent ; les modèles empiriques et les modèles réalistes. Les modèles empiriques sont basés sur le retour d'expériences et permettent de ne faire que des observations alors que les modèles réalistes peuvent amener à des analyses et des développements associés. Beaucoup de modèles scientifiques représentent un phénomène où le mot «phénomène» est utilisé comme un terme générique couvrant tous les aspects relativement stables et généraux du monde. Un premier problème apparaît sur la possibilité d'avoir une multitude de modèles pour représenter un phénomène. La question sous-jacente posée par certains auteurs porte sur le postulat que le modèle et sa cible doivent pourtant être isomorphes [Van Fraassen 1980; Suppes 2002] ou partiellement isomorphes [Da Costa et Français 2003]. D'autres points de vue proposent de ne retenir que des exigences formelles moins importantes [Mundy 1986 et Swoyer 1991]. Certains auteurs retiennent la notion de

similitude comme étant le point fondamental du problème de modélisation des phénomènes [Giere 1988 et 2004 ; Teller 2001]. Cette approche a l'avantage par rapport à la vue isomorphe d'être moins restrictive et a également l'avantage de tenir compte de cas introduisant des notions d'inexactitude et de modèles simplificateurs. Cependant, comme le souligne Giere, ceci reste sans intérêt si des éléments de similitude ne sont pas spécifiés. La spécification de ces aspects et leur niveau de pertinence dépendent du problème et du contexte scientifique [Teller 2001].

Afin de représenter correctement les phénomènes, de nombreux modèles de représentation sont utilisés comme : des maquettes, des modèles idéalisés, des modèles analogiques et des modèles phénoménologiques. Ces catégories ne sont pas mutuellement exclusives ; par exemple, certaines maquettes peuvent être considérées comme des modèles idéalisés et il n'est pas évident de définir la limite entre les modèles idéalisés et analogiques.

Modèle physique

Certains modèles sont des copies physiques de taille réelle, réduite ou augmentée des systèmes à modéliser [Black 1962]. Des exemples typiques sont des maquettes de voiture pour des essais en soufflerie ou des modèles de ponts pour des études vibratoires. La maquette est alors une reproduction naturelle ou une image miroir fidèle de la cible, pour cette raison ces maquettes sont parfois aussi appelées «vrais modèles» [Achinstein 1968 Ch 7]. Cependant, il faut garder en tête qu'un modèle à l'échelle ne peut représenter de manière parfaitement fidèle la réalité physique ; la fidélité est toujours limitée à certains points de vue. La maquette en bois d'une voiture, par exemple, donne une image fidèle de la forme de la voiture, mais pas de sa constitution matérielle. Cela pose la question de savoir quels critères un modèle doit satisfaire pour être considéré comme une image fidèle. Bien que les acteurs de l'activité de modélisation agissent avec de fortes intuitions sur la façon de répondre à cette question dans des cas particuliers, aucune théorie sur les modèles n'a encore été formulée.

Modèle géométrique 3D

L'usage de modèles physiques a été remplacé en grande partie par des modèles virtuels avec l'avènement de la modélisation géométrique 3D des pièces et des assemblages à l'aide des systèmes de CAO [Gomes de Sá 1999]. De nombreux outils de la réalité virtuelle participent au développement de ces modèles et l'on parle aujourd'hui de maquette numérique ou virtuelle. Ces modèles permettent de couvrir en grande partie l'usage qu'il était fait des maquettes physiques : étude d'encombrement, d'assemblage, d'accessibilité pour la maintenance, étude aérodynamique...

Les modèles géométriques 3D actuels sont des modèles idéaux, c'est-à-dire ne prenant pas en compte les défauts des surfaces obtenus sur les pièces fabriquées. Certaines études concernant l'influence des défauts de formes ou de rugosité mettent en œuvre des modèles géométriques avec défauts [Grandjean 2013]. Dans le domaine du tolérancement, où les défauts de surfaces ont une

influence importante, le concept de « skin » modèle intégrant ces défauts a été présenté et commence à être intégré [Anwer 2013].

La validation des études réalisées à partir des modèles géométriques 3D nécessite tout de même la réalisation d'essais expérimentaux sur des modèles physiques. On parle souvent de la problématique de recalage des modèles virtuels pour prendre en compte l'écart entre le modèle virtuel et le modèle expérimental. On voit ici l'importance que requiert le coût de la réalisation des modèles qui incitent à choisir des modèles virtuels qui sont moins onéreux, mais ne permettent pas de résoudre tous les problèmes de modélisation. Il faut donc constater que les modèles physiques et virtuels cohabitent dans les activités de conception.

Modèles idéalisés

Une idéalisation permet une simplification délibérée de quelque chose de compliqué avec l'objectif de le rendre plus facile à appréhender. On parlera par exemple dans le domaine de la physique d'un avion fonctionnant sans frottement, de masses ponctuelles, de liaisons infiniment rigides. Les philosophes ont alors dégagé deux types d'idéalisation : dites idéalisations Aristotélicienne et Galiléenne.

L'idéalisation aristotélicienne permet de dépouiller notre imagination de toutes les propriétés d'un objet concret que nous croyons non nécessaires pour traiter le problème. Cela permet de se concentrer sur un ensemble limité de propriétés. Un exemple en mécanique, est de considérer les objets seulement par leurs formes et leurs masses, en négligeant toutes les autres propriétés [Cartwright 1989], [Musgrave 1981], [Mäki 1994].

Les idéalisations galiléennes impliquent des distorsions délibérées. Les physiciens construisent des modèles composés de masses ponctuelles se déplaçant sur des surfaces parfaitement lisses. Il est caractéristique de cette démarche d'utiliser des simplifications de ce genre chaque fois que la situation est trop compliquée à aborder [McMullin 1985].

Les idéalisations galiléennes posent de nombreuses questions. En quoi ce type de modèles peut représenter la réalité ? Comment pouvons-nous tester leurs précisions ? En réponse à ces questions, Laymon [1991] a proposé une théorie avec des limites idéales. Il propose de réaliser des expériences qui se rapprochent de la limite postulée puis exige que plus les propriétés du système correspondent à la limite idéale, plus son comportement doit correspondre au comportement de la limite idéale. Mais cette démarche n'est pas forcément claire et facile de mise en œuvre. Cela soulève la question de savoir si l'on peut toujours faire un modèle idéalisé de cette manière.

Les idéalisations Galiléenne et Aristotélicienne ne s'excluent pas mutuellement. Au contraire, elles sont souvent utilisées ensemble. En mécanique, lorsque l'on modélise le comportement des planètes, un ensemble restreint de propriétés est pris en compte, et les planètes sont considérées comme des sphères idéales avec une distribution homogène de masse et sont modélisées par des masses ponctuelles.

La notion essentielle liée à l'idéalisation est l'approximation. Bien que les termes soient parfois utilisés de façon interchangeable, une différence entre les deux doit être prise en compte. L'approximation est généralement plutôt considérée dans un contexte mathématique. Ainsi, un objet mathématique est une approximation d'un autre s'il en est proche selon un critère défini par un point de vue. En mathématique, la conservation des premiers termes d'une série représentant une fonction est une approximation. En général, un paramètre de contrôle est utilisé. Dans ce cas-là, le problème de l'interprétation physique est absent. Une approximation peut être l'image mathématique d'une idéalisation. Lorsqu'en mécanique, les effets de la pesanteur sont négligés dans une équation, ceci représente que l'idéalisation du système est réalisée avec l'hypothèse que le poids est sans influence sur le comportement étudié du système, dans le sens où il ne perturbe que faiblement l'évaluation des termes utilisés dans l'équation mathématique.

Modèles analogiques

Au niveau le plus élémentaire, deux choses sont analogues s'il y a certaines similitudes pertinentes entre elles. Prenons par exemple, le modèle analogique de type résistance, il fait référence aux notions de résistance électrique, résistance thermique, résistance mécanique. Les phénomènes physiques modélisés correspondent à des effets dissipatifs ayant des comportements linéaires, donc peuvent tous être modélisés par des résistances et tous utilisés les mêmes outils de modélisation ; montage série et parallèle, outils quadripolaires... Hesse [1963] distingue différents types d'analogies selon les types de relations de similarité entre deux objets. Une analogie simple est celle qui est fondée sur les propriétés partagées. Il y a une analogie entre la terre et la lune, basée sur le fait que les deux sont des corps solides, opaques, sphériques, recevant de la chaleur et de la lumière du soleil, tournant autour de leur axe. Mais la similitude des propriétés n'est pas une condition nécessaire. En ce sens, une analogie existe entre le son et la lumière parce que les échos sont des réflexions dans les deux cas, l'intensité du son est analogue à la luminosité, la tonalité à la couleur, la détectabilité par l'oreille à la détectabilité par l'œil, et ainsi de suite.

Les analogies peuvent également être fondées sur la similitude ou la ressemblance des relations entre les parties de deux systèmes plutôt que sur leurs propriétés. Ainsi, Hesse appelle « analogie formelle » deux éléments qui sont liés par un même calcul formel. Par exemple, il y a une analogie formelle entre un pendule et un circuit électrique oscillant parce qu'ils sont tous deux décrits par la même équation mathématique. Ils mettent en œuvre les mêmes notions de systèmes capacitifs et résistifs.

Hesse introduit une autre distinction entre les analogies positives, négatives et neutres. L'analogie positive entre deux éléments correspond au fait que ces deux éléments possèdent des propriétés ou des relations communes (des molécules de gaz et des boules de billard ont une masse). L'analogie négative correspond au fait que les deux éléments ne partagent pas des propriétés ou des relations (les boules de billard sont colorées, les

molécules de gaz ne le sont pas). L'analogie neutre correspond aux éléments dont les propriétés ou les relations ne sont pas encore définies comme des analogies positives ou négatives. Les analogies neutres jouent un rôle important dans la recherche scientifique, car ils donnent lieu à des questions et sont le siège de nouvelles hypothèses. Dans cette optique, plusieurs auteurs ont souligné le rôle heuristique que jouent les analogies dans la construction de la théorie et de la pensée créative [Bailer - Jones et écope -Jones 2002 ; Hesse 1974 ; Holyoak et Thagard 1995 ; Kroes 1989 ; Psillos 1995 ; Hellman 1988].

Modèles phénoménologiques

Les modèles phénoménologiques ont été définis de différentes façons. Une définition traditionnelle propose qu'ils soient des modèles représentant uniquement les propriétés observables de leurs objectifs en s'abstenant de postuler des mécanismes cachés. Une autre approche, proposée par McMullin (1968), définit les modèles phénoménologiques comme étant indépendants des théories. Toutefois, cette définition semble être trop forte. De nombreux modèles phénoménologiques, tout en omettant d'être obtenus à partir d'une théorie, intègrent les principes et les lois associées aux théories.

Par exemple, en mécanique, un modèle phénoménologique du comportement d'un matériau peut être proposé, sans connaître les mécanismes microstructuraux d'endommagement ou de déformation plastique. Par contre ce modèle peut vérifier les principes de la thermodynamique des milieux continus d'un point de vue de l'évolution des échanges énergétiques.

Modèles de données

Un autre type de modèles de représentation est appelé « modèles de données » [Suppes 1962]. Un modèle de données est une version corrigée, rectifiée, et dans de nombreux cas idéalisés des données que nous obtenons de l'observation immédiate appelés données brutes. De façon classique, les erreurs sont d'abord éliminées (par exemple, les points de l'enregistrement dus à une observation défectueuse sont supprimés), puis les données sont présentées de manière « propre ». Par exemple, une courbe passant par un ensemble de points sera utilisée. Ces deux étapes sont communément appelées «réduction des données» et «ajustement de la courbe ». Les modèles de données jouent un rôle crucial dans les théories parce que c'est le modèle de données et non les données brutes qui est comparé à une prédiction théorique.

La construction d'un modèle de données peut être extrêmement compliquée. Il nécessite des techniques statistiques sophistiquées et soulève des questions méthodologiques ainsi que philosophiques sérieuses. Le choix des points devant figurer dans le modèle de données en est une première illustration. Dans un ensemble de données propre, quelle courbe doit être utilisée pour représenter ces données ? La première question a été traitée principalement dans le contexte de la philosophie et de l'expérience [Galison 1997 ; Staley 2004]. Au cœur de la dernière question est le problème de l'ajustement de courbe. Les données a

priori ne fournissent pas la forme que la courbe ajustée devrait prendre. Le choix de la théorie associée aux données suggère que cette question devrait être réglée par la théorie retenue, par des considérations de simplicité, par des probabilités a priori. De nombreuses discussions de modèles de données peuvent être trouvées dans Chin et Brewer [1994], Harris [2003], Laymon [1982], Forster et Sober [1994] et Mayo [1996].

Modèles orientés produits et ingénierie systèmes

Les modèles orientés ingénierie systèmes (MBSE : Model-based systems engineering) ont pour objectif de décrire un aspect structurel d'un système avec des notions de composants, de relations entre composants et de sous-systèmes, mais également des aspects fonctionnels et comportementaux. Il s'agit souvent de modèles intégrés, le plus emblématique actuellement étant SysML [SysML 2012].

Les modèles produits développés plus particulièrement pour la conception de produits mécaniques sont également des modèles couvrant certains aspects de l'ingénierie système.

Parmi l'ensemble de modèles produits existants, nous en citerons deux. CPM (Core Product Model) est un modèle développé en UML au NIST [Sudarsan 2005; Fenves 2008] qui a pour particularité d'être adapté au tolérancement géométrique. Le modèle développé dans le cadre du projet IPPOP (Intégration Produit – Processus – Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie) intègre pour sa part modèle produit, modèle de processus de conception et modèle d'organisation [Roucoules 2006] et a également été mis en œuvre pour le tolérancement [Dufaure 2008].

Au niveau industriel, EADS a développé pour ses besoins internes un outil de modélisation structuro-fonctionnel par des graphes dénommée GAIA (Graph Analysis for Interfaces of Assemblies) [Falgarone 2006]. Cet outil permet de tracer les exigences depuis les fonctions jusqu'aux spécifications géométriques, tout au long du cycle de conception. L'outil permet de modéliser l'ensemble des décompositions.

Modèles de la théorie

Dans la logique moderne, un modèle est une structure où tous les éléments d'une théorie sont considérés comme vrais. Une théorie est considérée comme un ensemble de phrases dans un langage formel [Bell et Machover 1977 ; Hodges 1997]. La structure est un «modèle» dans le sens où elle représente cette théorie. Par exemple, une théorie peut se composer d'axiomes et de théorèmes. Si ces derniers sont dérivés des axiomes qui sont réputés vrais, alors tous les éléments de la structure sont vrais (structure de la théorie des ensembles).

Beaucoup de modèles dans la science portent sur l'interprétation d'un calcul abstrait. Ceci est particulièrement pertinent en physique, où en général les lois telles que l'équation du mouvement de Newton sont au cœur d'une théorie. Ces lois sont appliquées à un système particulier, par exemple un pendule en choisissant une fonction de force spéciale, en choisissant des

hypothèses sur la distribution de la masse du pendule, etc. Le modèle résultant est alors une interprétation (ou réalisation) de la loi générale. Comme nous avons pu le voir précédemment, de nombreuses théories en conception ont proposé des modèles pour décrire et améliorer le processus de conception.

L'ensemble des types de modèles présentés au cours de ce chapitre est régulièrement utilisé par les concepteurs, mais leur nature doit être absolument maîtrisée pour recenser correctement l'ensemble des hypothèses formulées au cours des processus, afin de bien comprendre et de limiter la portée des résultats obtenus.

1.3.2 NATURE DES MODELES

Comme nous venons de le voir, il y a donc une multitude de choses qui sont communément appelées modèles : des objets physiques, des objets fictifs, des structures de théories, des descriptions, des équations ou des associations de tous ces éléments. Toutefois, ces catégories ne s'excluent pas et ne sont pas incompatibles. Par exemple, la limite entre des objets fictifs et la structure de la théorie des ensembles n'est pas clairement définie.

Objets physiques

Certains modèles sont des objets physiques simples. Ils sont communément appelés « modèles de matériaux ». La classe des modèles de matériaux comprend tout ce qui est une entité physique et qui sert de représentation scientifique de quelque chose. Parmi les membres de cette classe, nous trouvons comme exemples des maquettes en bois de ponts, d'avions ou de navires. Les modèles de matériaux ne donnent pas lieu à des difficultés ontologiques.

Objets fictifs

De nombreux modèles ne sont pas des modèles de matériaux. Le modèle de Bohr de l'atome, un pendule sans frottement, par exemple, est présent dans l'esprit du scientifique et n'a pas besoin d'être physiquement fabriqué et expérimenté pour permettre leur fonction de représentation. Il semble donc naturel de les considérer comme des entités fictives. Giere a préconisé que les modèles soient des entités abstraites [Giere 1988]. Il n'est pas entièrement clair sur ce qu'il considère comme « entités abstraites», mais sa discussion sur les modèles mécaniques semble suggérer qu'il utilise ce terme pour désigner des entités fictives.

Ce point de vue est cohérent avec la pratique scientifique, où les scientifiques parlent souvent de modèles comme s'ils étaient des objets. En effet, il est naturel de supposer que l'on ne peut manipuler quelque chose que s'il existe. En outre, les modèles ont souvent plus de propriétés que celles que nous leur attribuons explicitement quand nous les construisons. C'est pourquoi ils sont des supports de recherche intéressants.

1.3.3 CONSTRUCTION D'UN MODELE POUR LA SIMULATION

Les modèles sont des supports pour apprendre sur le monde. Des travaux importants de la recherche scientifique sont menés sur des modèles plutôt que sur la réalité elle-même parce que grâce à un modèle, des caractéristiques peuvent être étudiées, des effets de phénomènes peuvent être caractérisés. Les modèles permettent de raisonner [Swoyer 1991]. Par exemple, le comportement mécanique d'un système peut être appréhendé par l'étude de son modèle. Cette fonction cognitive des modèles a été largement reconnue dans la littérature, et certains auteurs suggèrent même que les modèles sont le siège d'une méthode de raisonnement («raisonnement à base de modèle») [Magnani et Nersessian 2002], [Magnani, Nersessian et Thagard 1999].

La pertinence de l'activité de modélisation repose sur deux points précis : la construction et l'utilisation du modèle. [Morgan 1999]. Il n'y a pas de règles ou de recettes établies pour la construction d'un modèle. Une fois le modèle construit, l'utilisation et la manipulation du modèle permettent de recueillir des informations sur la cible. La définition de ces activités reste donc une question importante pour la communauté scientifique.

Selon le modèle, la construction et la manipulation font appel à différentes activités exigeant des méthodologies différentes. Les modèles physiques, en général, ne posent pas de problème particulier, car ils sont utilisés dans des contextes expérimentaux communs. Donc seules subsistent des questions relatives aux problématiques expérimentales classiques.

La problématique est plus complexe avec les modèles fictifs. La réponse naturelle apportée par les auteurs est que les modélisateurs effectuent une expérience de pensée. [Brown 1991 ; Gendler 2000 ; Norton 1991 ; Reiss 2003 ; Sorensen, 1992]. Cependant, les conclusions proposées par les différents auteurs sont très différentes et souvent contradictoires au sujet de la manière de réaliser les expériences de pensée. Une classe importante de modèles est la classe des modèles de nature mathématique. Dans certains cas, il est possible d'obtenir des résultats ou de résoudre des équations de façon analytique. Mais bien souvent, ce n'est pas possible. Le recours à l'outil informatique permet de résoudre de nombreuses équations qui seraient autrement impossibles à traiter. De nombreuses parties de la recherche actuelle dans les sciences reposent donc sur des simulations informatiques.

1.3.4 SIMULATION

Qu'est-ce qu'une simulation ? On peut dire qu'une simulation imite un processus généralement réel par un autre processus [Hartmann 1996 ; Humphreys , 2004].

Une question importante qui se pose dans ce contexte est la justification des résultats de simulation : pourquoi devrions-nous faire confiance aux résultats d'une simulation ? Un moyen de répondre à cette question est l'exploitation des similitudes entre les expériences traditionnelles et les simulations. Bien sûr, la relation entre les simulations et les expériences soulève de

nouvelles questions épineuses [Barberousse, Franceschelli et Imbert 2009 ; Morgan 2003 ; Morrison 2009 ; Parker 2008, 2009 ; Winsberg 2003]. Cette question de la fiabilité peut être décomposée en sous-questions : (a) est-ce que les équations du modèle représentent le système cible avec une précision suffisante pour l'objectif à atteindre ? et (b) est-ce que l'ordinateur fournit des solutions suffisamment précises ? Les scientifiques ramènent ces questions à des problèmes de validation et de vérification. Dans la pratique, il est très difficile de répondre correctement à ces questions. Cela a conduit les scientifiques à développer diverses méthodes pour tester si le résultat de la simulation est pertinent par rapport à la cible étudiée [Winsberg 2009, 2010].

Des simulations peuvent proposer de nouvelles théories, des modèles et des hypothèses, par exemple sur la base d'une exploration systématique de l'espace des paramètres d'un modèle [Hartmann 1996]. Mais des simulations peuvent fournir des résultats trompeurs, car en raison de la nature discrète des calculs effectués sur un ordinateur, elles ne permettent pas l'exploration complète d'une partie de l'espace des paramètres, et ce sous-espace ne peut révéler certaines caractéristiques qui pourraient se révèler importantes pour le modèle. La gravité de ce problème est en quelque sorte atténuée par la montée en puissance des ordinateurs modernes. Mais la disponibilité de plus de puissance de calcul peut également avoir des effets néfastes. Elle peut encourager les scientifiques à utiliser rapidement des modèles de plus en plus complexes, mais conceptuellement prématurés, notamment des hypothèses ou des mécanismes mal compris générant l'introduction de paramètres ajustables supplémentaires. Cela peut conduire à une augmentation de l'inadéquation du modèle et, pas nécessairement à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents empiriques. En conséquence, l'utilisation de simulations peut modifier la pondération attribuée aux différents objectifs de la science. Enfin, la disponibilité et la puissance des ordinateurs peuvent séduire les scientifiques à faire des calculs qui n'ont pas le degré de fiabilité auquel l'on peut s'attendre. Il est donc important de ne pas se laisser emporter par les moyens que les nouveaux ordinateurs puissants offrent et, mettent ainsi hors de vue les objectifs réels de la recherche.

Une fois le modèle connu, cette modélisation doit être traduite par rapport au système cible. C'est à ce moment que la fonction de représentation des modèles devient importante. Les modèles ne peuvent nous instruire sur la nature de la réalité que si nous supposons que (au moins en partie) les aspects du modèle, ont des équivalents dans le monde.

Quels sont ces différents modes de modélisation ? Bien que de nombreuses études de cas aient été faites sur la façon dont certains modèles spécifiques sont construits, il ne semble pas y avoir de concepts généraux sur la façon dont le transfert de connaissances doit être réalisé, à partir d'un modèle jusqu'à sa cible. C'est une question difficile et donc notre travail tente d'amener des éléments de réponse en proposant des outils et méthodes pour réaliser en conception mécanique les activités de

modélisation tout en maîtrisant les différentes hypothèses inhérentes au processus de conception. A partir d'un système réel, les différentes étapes proposées de modélisation doivent permettre de proposer un outil de simulation dont toutes les hypothèses peuvent être identifiées exhaustivement et l'écart à la cible caractérisée.

2 MODELES DU REEL

Une chose, un phénomène et le réel sont consubstantiels. La représentation du réel est une abstraction qui correspond à définir un ou plusieurs modèles. Ce chapitre met en avant les différents types de modèles imaginés ou utilisés.

Quelques rêveurs, pour me le faire entendre, disent qu'un point géométrique est un être simple. Mais un point géométrique est une supposition, une abstraction de l'esprit, une chimère.

VOLTAIRE [2]

SOMMAIRE

2.1 Introduction aux modèles *22*
2.1.1 Réel et modèle 22
2.1.2 Modèle fini – modèle infini 24
2.1.3 Modèle adapté - modèle inadapté 25
2.1.4 Modèle primitif – modèle de simulation 28
2.2 Système *32*
2.2.1 Composant. 32
2.2.2 Interaction 33
2.2.3 Interface 34
2.3 Comportement physique *38*
2.3.1 Modélisation énergétique d'un système 38
2.3.2 Champ 43
2.3.3 Flux 44
2.4 Synthèse *45*
Bibliographie du chapitre 2 ..... *160*

[2]. *Œuvres complètes de VOLTAIRE – Philosophie. Imprimerie de FAIN, Paris, 1817, p 721*

Au cours du processus de développement du produit, le concepteur doit modéliser le produit d'un point de vue géométrique et mécanique. Ces modélisations permettent diverses activités qui sont, selon différents registres :

- communication technique dans l'entreprise dans le service de bureau d'études et avec les autres services ;
- communication avec le client et le sous-traitant ;
- communication commerciale ;
- génération de trajectoire d'outil ;
- prédiction du comportement du système par simulation mécanique, aérodynamique, thermomécanique…

Ces modèles ont des définitions et des détails qui dépendent de l'objectif poursuivi et de l'avancement dans le processus de conception (conception préliminaire, conception architecturale ou conception détaillée). À une étape de la conception, la modélisation du système physique n'est jamais parfaite et n'est pas unique, car adaptée à l'activité visée. Les modèles sont donc la cause d'incertitudes avec souvent des risques mal maîtrisés. La conséquence peut être un comportement réel du système éloigné des résultats de la simulation par exemple. La modélisation doit permettre d'appréhender au mieux les phénomènes physiques que nous voulons formaliser [Nadeau 2007].

Ce chapitre s'attache à mettre en avant les différents types de modèles imaginés ou utilisés, les objets manipulés par ces modèles et les comportements physiques modélisés entre ces objets.

2.1 INTRODUCTION AUX MODELES

2.1.1 REEL ET MODELE

Avec le constructivisme, les philosophes [Bachelard 1938] définissent une approche du produit de l'esprit humain en interaction avec la réalité, et non le reflet exact de la réalité elle-même. Ce chapitre s'appuie sur le postulat qu'il existe deux mondes, le monde physique (le réel) et le monde abstrait (les modèles). Le monde physique est considéré en tant qu'ensemble de choses et de phénomènes que l'homme peut observer. Le monde abstrait représente les pensées, les modèles que l'homme conceptualise. Les modèles scientifiques sont principalement utilisés pour prédire et fournir des explications aux phénomènes ou aux choses observables. Ils sont des représentations des phénomènes ou des choses qui tiennent lieu du système étudié. Cette relation de représentation permet au concepteur de faire des inférences et d'obtenir des informations concernant le système représenté. Le terme représentation doit être compris comme un moyen de communiquer et d'acquérir des connaissances.

Dans le cadre de la modélisation des spécifications géométriques cette distinction entre réel et modèle a été clairement exprimée

afin de pouvoir lever les ambiguïtés. Le terme de « skin » diffusé par Ballu & Mathieu [Ballu 1995] pour nommer l'interface, ou la peau de la pièce en français qui sépare la matière de la pièce de son environnement, est introduit pour son aspect physique. Le terme « surface de la pièce » n'a pas été utilisé à cause de sa connotation mathématique et dans ce cas de son appartenance au monde abstrait. Le but est de différencier clairement la peau de l'objet physique (« skin »), de son modèle exprimé sous forme de surface géométrique, le terme de « skin modèle » est alors utilisé, voir la figure 2.1. Cette distinction entre le sens commun de surface (physique) et le sens géométrique (abstrait) apparaît dans la norme ISO 14660-1.

Surface réelle d'une pièce : ensemble des éléments qui existent physiquement et séparent la totalité de la pièce de son environnement [ISO 14660-1 : 1999]

Elément géométrique : point, ligne ou surface [ISO 14660-1 : 1999]

La surface réelle de la pièce est formée d'un ensemble d'éléments. Mais comment ces éléments sont-ils définis ? La norme ISO 22432 définit des éléments réels comme des éléments géométriques correspondant à une partie de la surface réelle de la pièce tout en précisant dans une note qu'il est impossible de prédire la géométrie totale de la pièce réelle en raison de ses imperfections géométriques. La représentation se situe à une échelle d'observation définissant la surface comme une interface entre la matière et son environnement [Bourdet 2007]. La grande réussite de Ballu et Mathieu a consisté à introduire la notion de modèle de surface dans les normes de spécification géométrique des produits (GPS).

Modèle de surface non idéale : «skin model» modèle de surface de géométrie non idéale.

NOTE 1 Le modèle de surface non idéale est un modèle virtuel utilisé pour exprimer l'opérateur de spécification et l'opérateur de vérification en considérant une surface continue (voir le Tableau 1 et l'ISO 17450-1) [ISO 22432 : 2011].

La note 1, et plus particulièrement l'item « modèle virtuel », a pour objectif de sensibiliser le lecteur à la nature imaginaire du « skin modèle ». En effet, comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, ce modèle est un modèle infini, qui ne peut être qu'imaginé, car il peut prendre une infinité de formes. Evidemment, il est possible de représenter une instance de « skin modèle » particulière, mais cette représentation ne sera qu'une parmi une infinité d'autres représentations possibles. Il s'agit donc d'un modèle imaginaire qui propose de définir une représentation du système comme une activité cognitive. Le « skin modèle » n'est pas la peau de la pièce (physique), mais l'idée que se fait le concepteur lorsqu'il imagine l'ensemble des défauts possibles à partir de la géométrie nominale.

Dans le domaine de la spécification géométrique des produits (GPS), la surface est le point d'entrée de la pièce et non la matière. La nouvelle version, du mois d'août 2011, de la norme ISO 8015 énonce les principes fondamentaux permettant d'assurer une compréhension univoque des spécifications géométriques ainsi que les règles d'indication, sur les dessins, des opérateurs de spécification. Parmi, les 13 principes, le principe de la pièce rigide

permet de rappeler l'hypothèse implicite de la spécification géométrique qui consiste à considérer la pièce comme étant un solide indéformable.

Le concept de « skin » modèle répond à la problématique de différentiation réel/modèle qui peut être étendu aux matériaux et à leurs propriétés physicochimiques dans les champs de la thermique, de la mécanique, ou de l'électricité, par exemple.

Quel que soit le comportement physique d'un système étudié, le modèle nominal exprime les intentions du concepteur. Lorsque le concepteur définit un matériau, un alliage de titane (T-A6V ou grade 5), par exemple, le concepteur considère des propriétés nominales du matériau comme la résistance à la traction de 860 MPa [NF EN ISO 5832-3 2012]. Cette valeur de la résistance à la traction est une propriété normative définie par expérimentation.

La prise en compte de la variabilité des propriétés permet d'introduire différents modèles. Ces modèles présentent plus ou moins de variations pouvant porter sur la géométrie ou la matière. Nous nous attachons à montrer la multiplicité de modèles utilisables en figure 2.1.

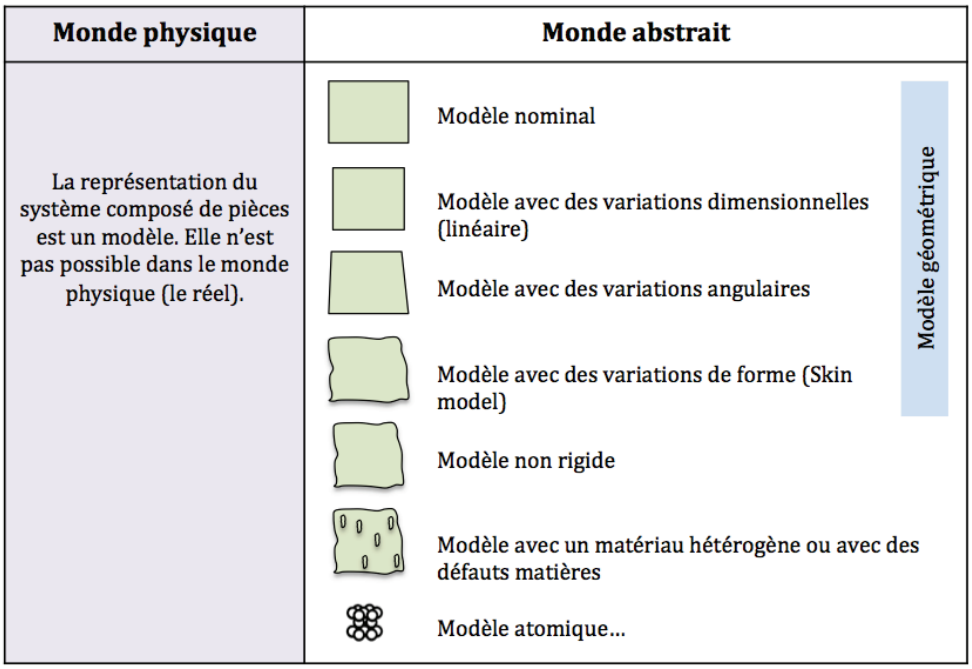


figure 2.1 - Monde physique et monde abstrait (avec différents types de modèles)

2.1.2 MODELE FINI – MODELE INFINI

En fonction des variations prises en compte, les modèles contiennent plus ou moins d'informations. Plus le modèle comprend de variations par rapport au nominal, plus il contient d'informations. Cette information peut-être infinie lorsque toutes les variations imaginables sont prises en compte, nous parlerons alors de modèle infini. Un modèle infini n'est pas utilisable pour réaliser des simulations de par l'impossibilité d'identifier, d'enregistrer, un nombre infini d'informations.

Par exemple, le « skin modèle » (l'image de la surface réelle de la pièce) est formé d'un ensemble infini d'éléments géométriques

tant il est impossible de décrire la géométrie totale de la pièce réelle en raison de ses imperfections géométriques.

Chaque modèle possède donc un certain nombre de paramètres. Ce nombre peut-être plus ou moins grand et peut même être infini. Un plan possède 3 paramètres de position, une droite, 4 paramètres, une géométrie définie en CAO, n paramètres, un profil mesuré avec un rugosimètre, x paramètres. Un « skin » modèle possède un nombre infini de paramètres.

Une distinction entre les modèles finis et infinis peut être réalisée, basée sur ce nombre de paramètres. Les notions de modèle fini et de modèle infini sont liées à un critère objectif qui ne dépend ni du concepteur, ni du modélisateur, ni de l'environnement.

Nous adopterons les définitions suivantes.

Modèle infini : Un modèle infini est identifié par un ensemble infini de paramètres indépendants.

Par exemple, le « skin modèle », ou le modèle de la surface réelle de la pièce comporte un nombre infini de paramètres. Ce type de modèle de la peau ne permet aucune identification. Dans le domaine de la physique, un champ de pression de contact entre deux solides est a priori quelconque à cause des variabilités des géométries locales, il est donc défini avec un nombre infini de paramètres.

Il faut rappeler qu'un modèle infini ne permet aucune identification. À ce niveau de modélisation, aucune simulation n'est possible.

Modèle fini : Un modèle fini est identifié par un ensemble fini de paramètres.

Par exemple, un plan est défini par un nombre fini de paramètres. La description de celui-ci par son équation permet d'identifier les paramètres pertinents (en nombre fini) nécessaires à sa définition. De manière plus générale, le modèle nominal défini en CAO est un modèle fini. Dans le domaine de la physique, un champ de pression de contact entre deux solides, uniforme ou linéaire, est caractérisé par un nombre fini de paramètres.

2.1.3 MODELE ADAPTE - MODELE INADAPTE

Nous venons de voir que les modèles infinis ne permettaient pas de faire de simulation, car l'humain ou un système informatique ne peut faire des calculs que sur des nombres finis d'informations. Mais cela ne signifie pas pour autant que tous les modèles finis peuvent être simulés. En effet, un modèle qui contient beaucoup d'informations ne peut pas être considéré pour la simulation à cause des temps de calcul que cela peut engendrer. Nous qualifions ces modèles de modèles inadaptés (à la simulation).

Des modèles comportant trop peu d'informations sont également inadaptés, car ils ne permettent pas de prédire le comportement du système avec suffisamment de précision lors d'une simulation.

Les modèles adaptés sont par opposition des modèles finis ayant un nombre de paramètres suffisamment faible pour être pris en

compte dans une simulation et suffisamment grand pour limiter les incertitudes (figure 2.2).

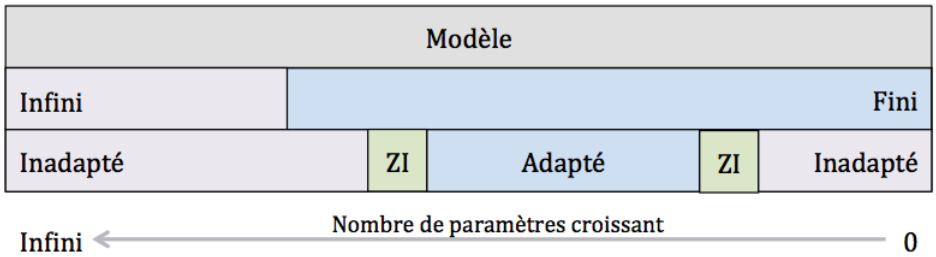


figure 2.2 - Modèles et nombre de paramètres.

Les notions de modèle adapté et de modèle inadapté sont donc distinguées en second lieu, ces notions sont liées aux notions de modèles finis et infinis, mais aussi aux critères en termes de qualité, coût et délais de l'activité simulation. Nous souhaitons ainsi qualifier les modèles en fonction de leur aptitude à représenter le réel, dans un objectif donné, tout en nécessitant des ressources limitées (calculs et humains) lors d'une mise en œuvre dans une activité de simulation.

Définitions et exemples

Nous adopterons les définitions suivantes.

Modèle adapté : Un modèle adapté est un modèle fini dont la simulation est en adéquation avec les ressources disponibles, les performances attendues (la qualité), les délais et les coûts.

Par exemple, la modélisation d'une chaîne de cotes 1D, avec comme hypothèse aucun défaut de forme et d'orientation, n'est que peu consommatrice en ressources et sera donc considérée comme une modélisation adaptée si elle est suffisamment précise pour le cas d'étude.

Modèle inadapté : Un modèle inadapté est un modèle infini ou un modèle fini entraînant une simulation ne répondant pas aux critères de performances, de délais ou de coût.

Par exemple, la simulation du fonctionnement d'un moteur thermique peut amener à simuler le comportement des composants, leurs tenues mécaniques (plasticité, géométrie, dilatation…) et le comportement des fluides (mécanique des fluides, thermodynamique). La multiplicité des paramètres et le couplage des phénomènes physiques peut demander des ressources importantes en totale inadéquation avec les ressources disponibles pour un bureau d'études.

Lorsque les ressources disponibles sont suffisantes pour simuler une solution de conception par calcul par éléments finis, par exemple, ce modèle fini par définition est qualifié de modèle adapté. Mais pour un niveau de conception donné, le calcul par éléments finis peut engager des ressources et des temps de calcul importants et inappropriés dans un cycle de conception industriel. Ce modèle fini devient un modèle inadapté. Une simulation par le calcul de résistance des matériaux utilisant la théorie des poutres peut s'avérer suffisante. Dans ce cas, le modèle de calcul en RDM est un modèle adapté.

Distinction entre modèles adaptés et inadaptés

Si les modèles finis et infinis ont une transition franche et clairement définie, il n'en est pas de même entre les modèles adaptés et inadaptés. Cette transition incertaine est définie par la zone intermédiaire (ZI) définie dans le tableau de la figure 2.2.

Vernat et al. [Vernat 2010] proposent une procédure pour la formalisation et la qualification des modèles adaptés spécifiquement aux exigences de la conception. Les concepts de Parcimonie, d'Exactitude, de Précision et de Spécialisation (PEPS) permettent d'identifier d'un point de vue qualitatif l'aptitude de ces modèles à simuler les comportements physiques étudiés.

Par exemple, un modèle qui n'est pas parcimonieux ne contribue pas à la prise de décision, car sa mise en place nécessiterait des moyens prohibitifs (programmation, calculs…). Ainsi, la parcimonie est une mesure inverse de la complexité d'un modèle. Elle diminue avec le nombre et le niveau de couplages entre les caractéristiques du modèle.

Un modèle inexact n'aide pas à la prise de décision, car il conduit soit à des résultats faux, soit à des résultats qui sont occasionnellement exacts. Ainsi, l'exactitude mesure la différence qui sépare le modèle choisi avec la réalité qu'il est censé représenter. Cette réalité peut être définie à travers un comportement de référence obtenu par simulation ou par un comportement expérimental obtenu par des essais. Ces comportements sont réputés de référence par les experts du domaine concerné.

Pour Vernat et al. un modèle imprécis donne des résultats qui sont trop vagues pour aider à la prise de décisions en laissant le modélisateur en attente de réponses. Ainsi l'imprécision mesure l'aspect vague ou mal défini associé à la distinction de plusieurs valeurs pour le même paramètre d'un modèle et dont cette distinction de valeurs représente un groupe de possibilités. L'imprécision est une mesure qui est définie en termes de contraste à la précision et correspond à la notion de variabilité de la réponse du modèle considéré.

Un modèle dont le domaine d'application est réduit augmente sa spécialisation. Aussi, la probabilité d'exploitation de ce modèle pour l'aide à la décision tend à diminuer avec sa spécialisation et cela peut aller jusqu'à l'abandon complet du modèle.

Il est intéressant de mettre en perspective les termes définis par Vernat et al dans l'acronyme PEPS avec ceux du Vocabulaire International des termes fondamentaux de Métrologie (VIM 3). Il se trouve des équivalents, des compléments ou des contradictions. Pour les résultats de la mesure, le VIM définit :

- l'exactitude comme l'étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande ;
- la justesse comme l'étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence ;

- la fidélité comme l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées.

Note : le terme mesurage a été introduit dans le domaine de la métrologie pour qualifier l'action de mesurer. Le terme mesurande définit la grandeur particulière soumise à un mesurage.

Note : le concept d'exactitude n'est pas une grandeur et ne s'exprime pas numériquement.

Ainsi, les termes « exactitude » et « précision » utilisés dans l'acronyme PEPS correspondent respectivement aux termes « justesse » et « fidélité » définis dans le VIM. Nous utiliserons par la suite ces derniers termes qui sont plus universels et portent à moins de confusion.

L'intérêt de ces concepts est de permettre de distinguer un modèle adapté d'un modèle inadapté. Le concept de parcimonie est directement lié au nombre maximum de paramètres du modèle pour qu'il soit utilisable tandis que les concepts de fidélité et de justesse sont liés au nombre minimal de paramètres pour assurer une certaine qualité des résultats.

La scission entre les modèles adaptés et inadaptés est dépendante des paramètres retenus. L'approche du modélisateur quant à un choix de modèles adaptés ou inadaptés dépend principalement de la fidélité et de la justesse. Lorsqu'un modèle n'est ni juste ni fidèle, alors il est qualifié de modèle inadapté. Cependant, il existe des cas où le modélisateur ne cerne pas la nature du modèle en tant que modèles adapté ou inadapté. Les causes sont diverses, elles peuvent se regrouper autour de différents items.

- un modèle très spécialisé ou non parcimonieux peut être à la limite des performances attendues ;
- un modèle peut-être juste, mais pas fidèle ou fidèle, mais pas juste ;
- la subjectivité du modélisateur dont les spécifications ne sont pas en accord avec les performances attendues.

Lorsque le modèle correspond à l'un de ces items, alors il est dans une zone intermédiaire ne permettant pas de le qualifier de modèle adapté ou de modèle inadapté.

2.1.4 MODELE PRIMITIF – MODELE DE SIMULATION

La définition d'un modèle adapté est théoriquement le résultat d'un processus de modélisation. L'objectif du processus de modélisation est de permettre d'effectuer des calculs au travers d'un modèle de simulation pour une activité donnée. Il consiste à passer d'un modèle qualifié de primitif par la suite et qui est inadapté (et normalement infini) à un modèle de simulation adapté en passant par des modèles intermédiaires. Ces notions sont précisées dans ce chapitre et les chapitres suivants. Toute la difficulté de l'activité de modélisation est de réaliser ce passage d'un modèle inadapté à un modèle adapté.

Les notions de modèle primitif et de modèle de simulation sont définies par rapport à l'activité de modélisation.

Modèle primitif

Modèle primitif : Un modèle primitif est le modèle imaginé par le concepteur qu'il suppose être le plus proche de la réalité.

Le modèle primitif doit permettre de considérer les détails pertinents des choses et des phénomènes du réel par rapport à l'activité de modélisation. Le modèle primitif tente d'intégrer les défauts ou les particularités du réel. Généralement, le modèle primitif devrait être un modèle infini, et donc inadapté, afin de prendre en compte l'ensemble des défauts imaginables sur une pièce. Cependant, le modèle primitif peut être fini par méconnaissance des défauts réels par le concepteur ou bien pour simplifier sa réflexion.

Le modèle primitif dépend des connaissances du concepteur et des premières hypothèses intuitives qu'il pose. Il est possible de donner différents types de modèles primitifs dont certains sont illustrés en figure 2.3. Le modèle primitif peut intégrer des défauts géométriques de tous ordres, comme le « skin modèle» qui est un modèle primitif géométrique particulier, mais l'extension du « skin modèle » à la mécanique ou à la physique en général, conduit à définir des modèles primitifs incluant la notion de matière avec les propriétés physicochimiques associées et les variabilités sur ces propriétés. Les variabilités considérées peuvent être globales ou locales. Il est possible d'imaginer des modèles primitifs plus détaillés encore en considérant des modèles au niveau atomique, mais la précision de ces modèles va très généralement au-delà de nos besoins de concepteurs.

Le modèle primitif le plus juste est le modèle intégrant le plus de phénomènes. Si le modèle primitif n'est pas assez riche, certains phénomènes essentiels ne pourront pas être considérés lors de la simulation.

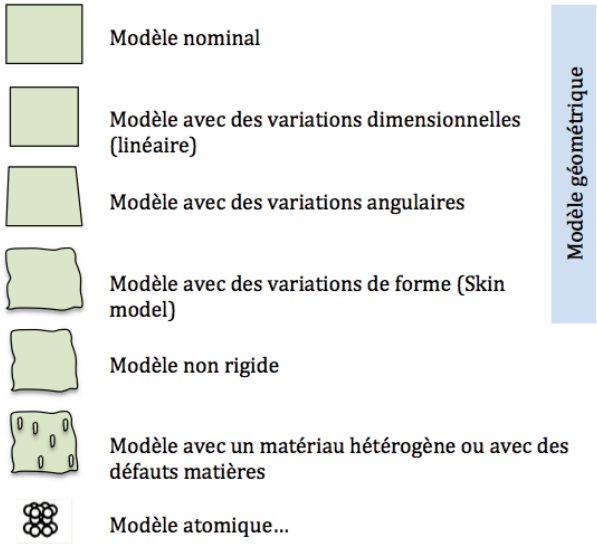


figure 2.3 - Exemples de modèles primitifs

Ce type de modèle est qualifié de primitif, car il s'agit du premier modèle de réflexion. Ce modèle ne devrait pas servir à la simulation puisqu'il devrait être par essence infini.

Pour la modélisation du volume, nous distinguons différents modèles en fonction des paramètres géométriques. Le modèle nominal définit un volume nominal dont les caractéristiques sont finies et sans variation. Ce modèle correspond aux intentions du concepteur ou du modélisateur. À partir de ce modèle, les variations des caractéristiques permettent de définir des modèles avec des variations dimensionnelles linéaires, avec des variations angulaires ou avec des variations de forme (fig. 2.4).

Dans le cas général, les paramètres géométriques de forme, d'orientation ou dimensionnels linéaires sont définis avec une échelle d'observation macro géométrique. Les paramètres géométriques de forme peuvent être également définis avec une échelle d'observation micro géométrique.

Dans cette échelle d'observation, le modèle atomique traite de la modélisation des liaisons entre les atomes. Lorsque deux atomes se lient, ils peuvent former une molécule. Les entités chimiques dont nous sommes entourés sont des molécules, soient des combinaisons d'éléments (atomes) de nature et de nombre divers. Il se crée entre les éléments des liaisons de différentes forces. Le cristal est constitué d'une répartition régulière des atomes, des ions ou des molécules suivant les trois dimensions de l'espace. La notion de réseau cristallin est décrite par une entité mathématique qui correspond à un ensemble de points. Quelle que soit l'échelle d'observation, la définition de l'attribut volume reste invariante.

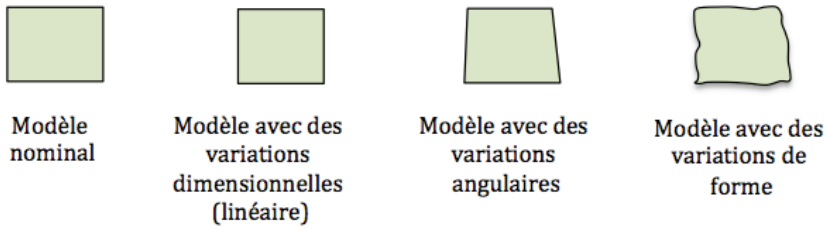


figure 2.4.- Modélisation de l'objet volume (exemples).

Modèle de simulation

Modèle de simulation : Un modèle de simulation est un modèle adapté défini par le concepteur afin de simuler le comportement du système.

Dans le modèle de simulation, les caractéristiques pertinentes (paramètres, détails ...) des choses et des phénomènes physiques sont considérées en vue de réaliser des activités de simulation. Idéalement, le modèle de simulation est le résultat d'un processus de simplification du modèle primitif.

Ce processus permet d'obtenir un modèle adapté qui peut être utilisé pour le calcul (c'est pourquoi il est fini) et conduit à la quantification des phénomènes. Chaque étape du processus de simplification est justifiée par des hypothèses et conduit à définir un modèle intermédiaire.

Il peut y avoir plusieurs modèles de simulation en fonction de l'activité de simulation spécifique, de la précision attendue et du concepteur. Le concepteur cherchera toujours à définir son modèle de simulation en caractérisant la « distance » avec le modèle primitif, afin de minimiser les incertitudes.

Modèle intermédiaire

Modèle intermédiaire : Un modèle intermédiaire est le résultat d'une étape du processus de modélisation conduisant du modèle primitif au modèle de simulation.

La dimension de l'espace des paramètres d'un modèle intermédiaire est comprise entre la dimension de l'espace des paramètres du modèle de simulation et celle du modèle primitif. Les modèles intermédiaires sont différents les uns des autres par la dimension de l'espace des paramètres et/ou par la nature des paramètres. Le nombre de modèles intermédiaires dépend du processus de simplification défini par le concepteur.

Plusieurs cas sont envisageables :

1. Supposons que le modèle primitif soit identique au modèle de simulation. Dans ce cas, il n'y a pas de modèles intermédiaires.

2. Supposons que le modèle primitif soit un modèle avec un nombre fini de paramètres n_p (fig. 2.5). Dans ce cas, un ou plusieurs modèles intermédiaires peuvent être nécessaires. Le modèle primitif étant fini, tous les modèles sont finis.

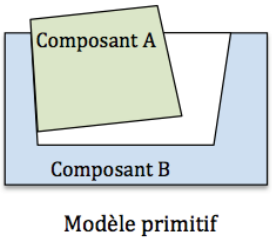


figure 2.5 - Modèle géométrique primitif fini.

3. Supposons que le modèle primitif soit un modèle infini (fig. 2.6). Dans ce cas, plusieurs modèles intermédiaires peuvent être nécessaires. Le nombre et la nature des modèles intermédiaires sont définis par le concepteur.

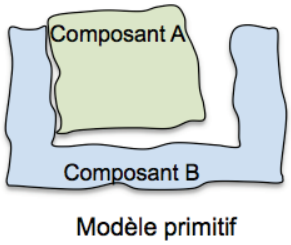


figure 2.6 - Modèle géométrique primitif infini.

Plaçons nous dans le cas des modèles géométriques, les modèles intermédiaires, mais aussi les modèles primitifs et de simulation, diffèrent par le type de défauts géométriques pris en compte (position, orientation, taille, forme, état de surface).

Supposons que le concepteur considère deux modèles intermédiaires :

- un modèle intermédiaire de dimension ni : à variations linéaires (état de surface, forme et orientation parfaits, seules la position et la taille des surfaces varient) ;
- un modèle intermédiaire de dimension nj à variations linéaires et angulaires (les orientations des surfaces varient en plus des positions et de la taille).

Alors ce modèle intermédiaire possède une dimension $n_j > n_i$. Le nombre de paramètres du modèle permet ainsi de classer les modèles intermédiaires.

2.2 SYSTEME

Lors des activités de développement d'un produit, les modèles manipulés sont des systèmes au sens où les modèles sont généralement constitués de composants en interactions. Une automobile est composée d'un châssis, d'un moteur, d'un système de transmission, d'une direction, de sous-ensembles roulant… Ces sous-ensembles sont en relation, des actions mécaniques sont transmises entre les sous-ensembles.

Les interactions sont des interactions à distance ou de contact. Les interactions de contact s'établissent au travers d'interfaces. Ces différentes notions demandent un développement présenté dans les paragraphes suivants.

2.2.1 COMPOSANT

Un composant est le modèle d'une pièce, d'un sous-ensemble ou même d'une partie d'une pièce.

Un composant est donc une partie du système qui a son propre comportement. La décomposition du système est relative à l'objectif poursuivi. Ainsi, à des fins de modélisation au sein même d'une pièce, comme en RDM par exemple, une « coupe virtuelle » et deux composants au sein d'une même pièce peuvent être considérés.

En tant que modèle, il peut être plus ou moins riche comme développé précédemment. Le modèle peut être limité à de la géométrie, ou bien il peut inclure la notion de matière. A l'extrême, le composant peut être réduit à une « boîte noire » dont le comportement est a priori modélisé.

Le plus souvent, le composant est vu comme un volume contenant une substance, de la matière. En chaque point du volume est défini un type de matière, nous parlerons de « volume matière ».

Volume

Le « volume » définit un domaine de l'espace par un nombre infini de points bornés ou par un ensemble de points définis par une fonction continue de trois paramètres.

Matière

Au cours de ce travail, nous souhaitons prendre en compte, non seulement les aspects géométriques (volume), mais également physiques (matière). La matière des composants doit donc être modélisée, une modélisation usuelle consiste à associer une matière à un composant. Ce n'est pas suffisant, cela ne permet pas de modéliser les variations de propriétés, désirées ou non, au sein des composants. La matière doit donc être définie en chaque point du volume. En chaque point, la matière est caractérisée par des propriétés thermo-physiques, mécaniques (module de Young…), chimiques, thermiques, magnétiques, ou électriques … qui s'appliquent à toutes les descriptions des comportements physiques. Ces propriétés dépendent des états (pression, température, concentration). Ces propriétés sont totalement abstraites. Ce type de propriété s'applique à un solide, à un liquide, à un gaz ou à une combinaison.

Par exemple, le module d'Young ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour le comportement élastique d'un matériau. Le module d'Young varie en fonction de la température et de la concentration des aciers.

Représentation

Graphiquement, nous représenterons un composant par le sommet d'un graphe, figure 2.7.

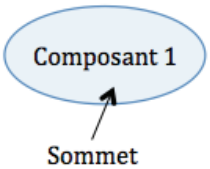


figure 2.7 - Représentation d'un composant

2.2.2 INTERACTION

Une interaction est une action réciproque entre deux composants. Elle permet de véhiculer de l'énergie, de la matière ou de l'information (fig.12b). Nous limiterons ici les interactions aux échanges sous forme d'énergie.

Ces interactions sont soit de contact soit à distance.

Interaction de contact

Une action de contact est par exemple une action mécanique (force) entre deux composants. Le contact est défini par des éléments surfaciques limités, les interfaces, par lesquelles ont lieu des échanges et des interactions mécaniques.

Une interaction de contact est représentée par une arête dont les extrémités sont associées à un pôle qui représente un élément surfacique du composant. Ce pôle se trouve en périphérie de l'élément de représentation du composant (fig. 2.8b).

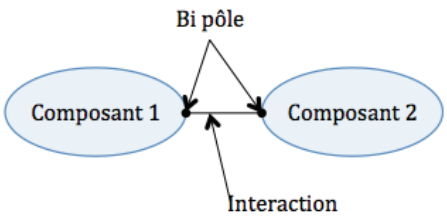


figure a - interaction de contact

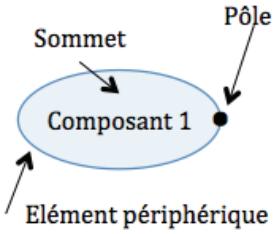


figure b - pôle : élément surfacique

figure 2.8 - Interaction de contact

Interaction à distance

Une action à distance est par exemple l'action de la gravité ou d'une force électrostatique sur un composant ou entre des composants, figure 2.9a. L'action à distance est la conséquence d'un champ (physique) en interaction avec l'élément volume – matière du composant.

Une interaction à distance est représentée par une arête dont les extrémités sont associées à un pôle qui représente un élément volume-matière du composant. Ce pôle se trouve à l'intérieur du sommet qui représente le composant (fig. 2.9b).

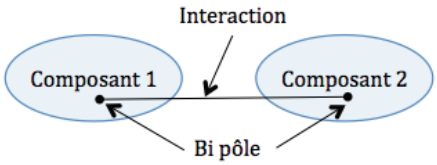


figure a - interaction à distance

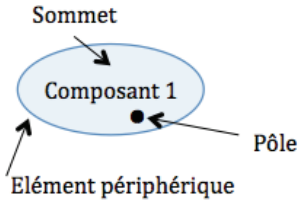


figure b - pôle : volume-matière

figure 2.9 - Interaction à distance

Selon le type de l'interaction, on distingue différents champs de force :

- le champ gravitationnel résultant de l'interaction gravitationnelle entre masses ;
- le champ électromagnétique résultant de l'interaction électromagnétique entre les charges électriques ;
- le champ électrofaible associé à l'interaction faible de la physique des particules.

2.2.3 Interface

L'identification de l'interface est subjective, car elle dépend du choix du modélisateur, de ses intentions et de ses interprétations des modèles physiques et mathématiques. Dès lors, l'item « interface réelle » est à l'image de l'item « skin modèle » défini dans le langage GPS. Ainsi, une interface réelle est l'idée que se fait le concepteur dans une approche réaliste de l'interface. Une définition très générale permet de définir une interface comme un lieu entre deux composants ou deux milieux par lequel ont lieu des échanges et des interactions, figure 2.10a. En superposant partiellement les éléments représentant les composants, cette

portion du schéma de la figure 2.10b représente l'interface entre les deux composants. Comme cela a déjà été illustré, l'interface sera représentée par la suite par deux pôles situés en périphérie des composants, l'arête entre les deux pôles représentant l'interaction possible.

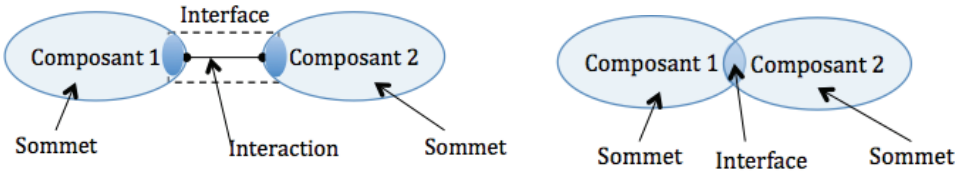


figure a - décomposition

figure b - schéma

figure 2.10 - Interface

Interface et surface

Une interface est généralement modélisée par deux surfaces et par voie de conséquence les termes interface et surface sont amalgamés. Pour une interface solide/liquide, solide/gaz ou liquide/gaz, les deux surfaces sont généralement considérées comme confondues d'un point de vue géométrique. Pierre Bourdet utilise le terme d'interface pour modéliser la surface réelle de la pièce, « la forme réelle d'un objet correspond à l'interface entre la matière et son environnement » [Bourdet 2007]. Considérant que l'environnement d'une pièce isolée est l'air, surface et interface sont confondues (fig. 2.11).

figure a - modèle avec des variations de forme

figure b - schéma

figure 2.11 - Interface, modèle avec des variations de forme

Pour une interface solide/solide, l'interface est modélisée par deux portions de surface des éléments en contact par lesquelles ont lieu des interactions, figure 12.

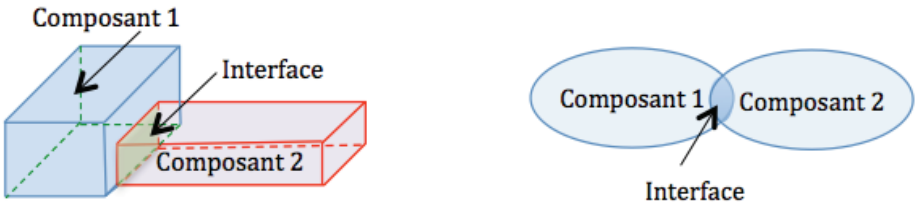


figure a - modèle nominal

figure b - schéma

figure 2.12 -. Interface, modèle nominal

Le choix du modèle primitif (modèle nominal, modèle avec des variations de forme…) ne modifie pas la représentation sous

forme de graphe (fig. 2.13 b), par contre elle entraîne un questionnement sur la définition de l'interface. Par rapport au modèle nominal, la notion d'interface est clairement établie, les zones de contact sont bien identifiées. Dans le cas d'un modèle avec variations de forme, les contacts dépendent de la forme des surfaces, le contact n'est plus réalisé sur la totalité des surfaces. Néanmoins, l'interface sera modélisée par les portions de surfaces potentiellement en contact.

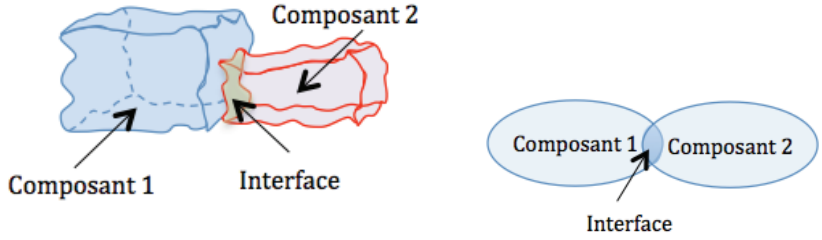


figure a - modèle avec des variations de forme

figure b - schéma

figure 2.13 - Interface, modèle avec des variations de forme

Interface et environnement

En général, le composant de type environnement dans la phase gaz est négligé par le concepteur. Ce constat conduit à considérer l'interface comme l'ensemble de tous les éléments surfaciques du composant sans interaction, ni échange avec l'environnement. Or, l'environnement peut avoir une influence sur les échanges, par exemple thermique entre les composants. L'environnement peut également avoir un rôle de lubrification entre les composants.

Si le concepteur souhaite intégrer l'environnement comme un composant intervenant dans la modélisation du système, alors le schéma s'enrichit et doit intégrer les différentes interfaces, figure 2.14 b.

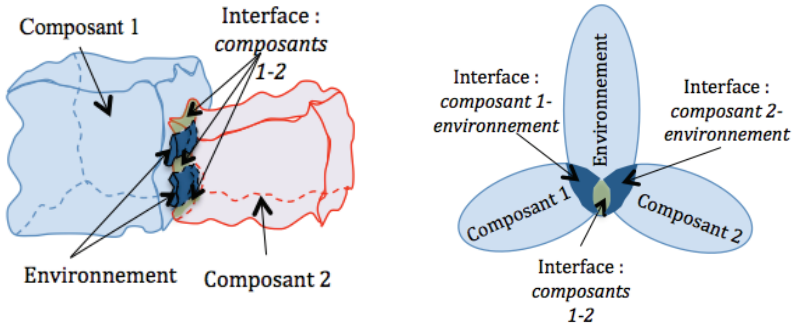


figure a - modèle avec des variations de forme

figure b - schéma

figure 2.14 - Interface, modèle avec des variations de forme

Pour répondre à la schématisation sous forme de graphes des interfaces complexes, ou multiples entre les composants, nous proposons de décomposer la figure 2.14b en utilisant la représentation de la figure 2.10a (fig. 2.15). En effet, il existe une interface directement entre les composants (contact entre

composants) et des interfaces entre chacun des composants et l'environnement.

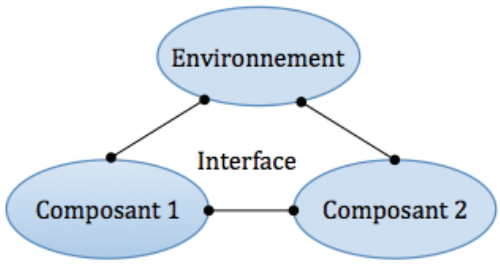


figure 2.15 - Interface complexe, schéma décomposé

Interface et interphase

Pour rappel, et plus particulièrement dans les domaines de la physique, la définition très générale de l'interface est un lieu d'échange entre deux composants ou deux milieux. La notion « d'épaisseur » de l'interface doit être précisée ; en effet, si nous considérons que dans le réel il n'y a pas de limite précise entre composants, c'est-à-dire qu'il y a une « certaine épaisseur » de l'interface, du point de vue de la modélisation, l'interface n'a pas d'épaisseur. Si pour un besoin donné, cette épaisseur doit être modélisée, alors un troisième composant intermédiaire doit être identifié, celui-ci ayant lui-même alors une interface avec chacun des composants initiaux. Par exemple, lorsqu'il y a une variation de composition chimique entre les milieux ou les composants, l'épaisseur de la zone perturbée, modélisée initialement comme interface, est généralement plus importante qu'une seule limite entre les composants. Cette zone perturbée, ce volume perturbé ou cet élément inter composant est appelé une interphase, figure 2.16 b.

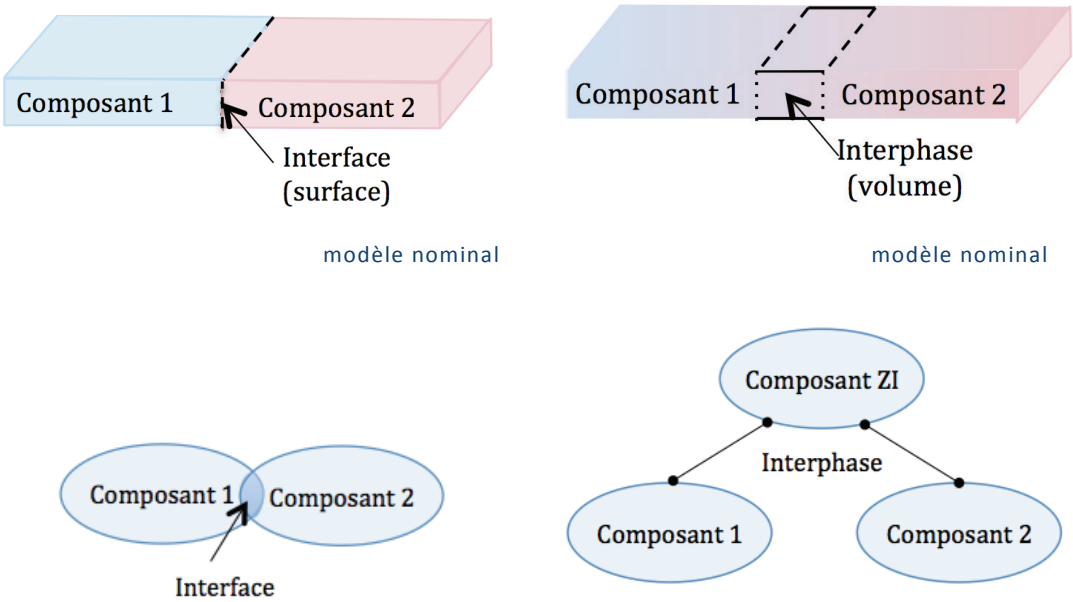


figure a - modèle interface

figure b - modèle interphase

figure 2.16 - Interaction de contact, types de modèle : interface, interphase.

L'interface (fig. 2.16a) continue cependant d'être assimilée à une surface tant que les phénomènes liés à l'interphase sont

considérés comme négligeables. La modélisation à une échelle plus fine et en fonction des hypothèses ou des intentions du modélisateur permet de remplacer l'interface originelle par un composant interphase (ou une succession d'interphases) lié aux composants par des interfaces (fig. 2.16b). Par exemple, le volume de diffusion entre deux métaux qui présentent une solution solide continue est modélisé comme une interface ou comme une interphase en fonction des intentions du modélisateur et de ses interprétations des modèles physiques et chimiques. La zone interphase (ZI) est modélisée par un composant hybride en fonction des intentions du concepteur et issu des composants (fig. 2.16).

2.3 COMPORTEMENT PHYSIQUE

2.3.1 MODELISATION ENERGETIQUE D'UN SYSTEME

Afin d'expliciter, de contrôler ou de prédire le comportement physique d'un système, il est nécessaire de déterminer les échanges d'énergie et de matière au sein de ce système ou plutôt de son modèle. Pour caractériser des échanges, il est nécessaire de pouvoir mesurer certaines grandeurs caractéristiques de ces échanges et d'être capable d'associer ces grandeurs mesurées à des grandeurs locales. En effet, les propriétés de la matière sont associées à un état local.

Aujourd'hui les chercheurs en physique générale et théorique ont montré qu'il était possible de modéliser les évolutions des systèmes énergétiques par l'utilisation de modèles sous forme de potentiels thermodynamiques. Il est possible de proposer une forme de potentiel thermodynamique pour chaque phénomène physique. Les systèmes évoluent de manière à atteindre une valeur minimale de ce potentiel afin de se retrouver dans un état d'équilibre thermodynamique. Parmi les potentiels thermodynamiques les plus couramment utilisés se trouvent l'énergie libre (U) et l'enthalpie (H).

Le potentiel thermodynamique est généralement défini par une fonction introduisant la somme de termes correspondant au produit de deux variables conjuguées, l'une dénommée « force généralisée » et l'autre déplacement généralisé. Ces notations font référence à la mécanique où le produit de la force et du déplacement génère une variation du niveau énergétique.

La variable force généralisée est une variable extensible c'est-à-dire qu'elle dépend directement du volume du système. Par exemple, on recense la masse, le nombre de particules du système, le volume, la surface, la longueur, la charge électrique, l'entropie, l'enthalpie, les forces comme étant des variables extensives.

La variable « déplacement généralisé » est une variable intensive c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas du volume du système. Par exemple, on recense la vitesse, l'accélération, la pression, la température, la densité, la masse volumique, comme étant des variables intensives.

Dans un état d'équilibre, chaque point local du système se situe à un niveau énergétique minimal de son potentiel thermodynamique. Mais il faut remarquer qu'il est extrêmement difficile de déterminer le niveau des variables conjuguées à l'échelle locale.

Pour Enzo Tonti, la description de la physique est basée sur un modèle différentiel. Ainsi depuis Newton, toutes les lois physiques, des champs classiques à la physique quantique, s'expriment par des équations différentielles [Tonti 2003]. Ces équations différentielles s'appuient sur des fonctions de base, qu'elles soient scalaires, vectorielles, ou tensorielles. Tonti met en évidence l'apparition initiale historique de variables intégrées qui correspondent à des variables mesurables. En effet, il est possible de construire des variables (variables intégrées) en effectuant une intégration sur la ligne, la surface ou le volume, ou de transformer les équations différentielles en intégrant les équations à l'aide des théorèmes de Gauss et de Stokes. Les variables (variables globales) issues de l'intégration de ces équations se réfèrent à des lignes, des surfaces ou des volumes (fig. 2.17a). Par exemple, la mesure de l'intensité électrique permet d'identifier la quantité de charges électriques (électrons) qui traversent une surface par unité de temps. Cette variable « charge électrique » est difficilement mesurable sans changer l'échelle d'observation. Celle-ci correspond à une équation topologique qui prend en compte la surface traversée par ces électrons (fig. 2.17b). Ce changement d'échelle est un point clé qui permet de définir une configuration géométrique : point, ligne, surface, volume. Dans notre exemple, la variable globale est l'intensité du courant électrique.

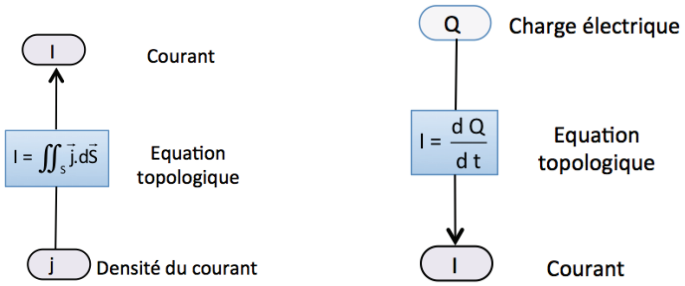


figure a - variable intégrée figure b - variable différentielle

figure 2.17 - Courant (I), variable globale

À partir de ce premier constat, la mesure des variables (globales), Enzo TONTI propose de les classer par rapport à deux critères : « quelle est la cause ? » ou « qu'est ce qu'elles génèrent ? ». Le premier item correspond à la variable source, le second, à la variable de configuration. L'introduction de ce nouveau vocabulaire par rapport à celui des variables forces généralisées et déplacements généralisés est justifiée par l'échelle de description. De plus, Tonti explique que les mots « source » et « configuration » ont un sens physique plus compréhensible pour l'ensemble des communautés scientifiques. Si on prend l'exemple de l'écoulement de l'eau dans un torrent, la pression et le débit sont les deux variables conjuguées. Il apparaît alors que le débit

est lié à la source considérée. D'ailleurs suivant les saisons et les conditions atmosphériques le débit variera. Le débit est bien une variable extensive. La pente du torrent, qui correspond à sa configuration va donc générer une différence de pression liée à la différence d'altitude entre les deux points considérés. Si l'on souhaite alimenter une usine hydro-électrique on recherchera une configuration où la différence d'altitude entre le point haut et le point bas est la plus grande possible. La pression est bien une variable intensive. Le produit des deux variables conjuguées permettra de définir la puissance disponible.

On peut faire une analyse identique pour le domaine électrique, la variable source est l'intensité électrique, et la variable de configuration est la tension. En fonction de la configuration du système, ici la résistance ohmique du composant dans lequel circulent les électrons, la tension mesurée a des valeurs différentes.

Enzo Tonti considère que les variables physiques peuvent être scindées en trois classes : variables de configuration, variables sources et variables d'énergie.

Les variables de configuration décrivent la « configuration » d'un système physique. Les variables de configuration peuvent être des variables géométriques et cinématiques de la mécanique telles que la vitesse linéaire, la vitesse angulaire par exemple, mais aussi la tension électrique (fig. 2.18), le flux magnétique, les déplacements généralisés au sens de la thermodynamique, etc.

Les variables sources décrivent les « sources » d'un champ. Elles désignent des quantités telles que des charges électriques, des courants, des masses gravitationnelles, entropie ou magnétiques, les forces généralisées au sens de la thermodynamique. L'intensité du champ ou le flux d'énergie thermique ne sont généralement pas considérés comme de telles forces. Ces variables impliquent une causalité

Les variables d'énergie sont obtenues par le produit d'une variable de configuration avec une variable source. Les variables d'énergie peuvent être les différentes formes d'énergie: cinétique, potentielle, interne, l'énergie libre, enthalpie, travail, puissance, puissance électrique (Pu =UI), lagrangien, action, etc.

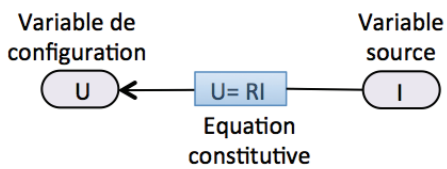


figure 2.18 - Loi d'Ohm, variables de configuration et source

L'intérêt de cette approche est également de faire un lien entre les grandeurs physiques et les grandeurs géométriques associées. Les variables globales sont généralement celles que nous mesurons « physiquement ». Ainsi, des longueurs, des aires (surfaces), des volumes géométriques peuvent être associés à des variables sources ou de configuration et peuvent être dotés de signes. L'examen de l'ensemble de ces variables montre que bon nombre d'entre elles ne se réfèrent pas seulement à un élément

géométrique de l'espace (longueur, aire, volume), mais aussi à la notion d'orientation extérieure ou intérieure de l'élément de l'espace (ligne, surface, volume géométrique). Or, depuis la géométrie euclidienne, l'orientation de la géométrie fait défaut et par voie de conséquence, la physique a hérité de ce manque d'orientation. Depuis 1827, date de la publication du livre de Möbius, le calcul barycentrique, la notion d'orientation est systématiquement inscrite dans la géométrie [Möbius 1827]. D'ailleurs, Möbius et Chasles développèrent le concept de segment orienté AB qui sera appelé vecteur par Hamilton en 1843. Dès lors, nous pouvons nous poser la question de savoir si une longueur négative, une surface négative, ou un volume négatif a un sens ou une signification. Nous sommes éduqués à considérer que l'aire d'un rectangle est le produit de sa base par sa hauteur et, à ce titre, la quantité est positive. Mais après Möbius nous sommes invités à considérer non seulement le rectangle en soi, mais aussi son orientation. Nous ne sommes pas habitués à considérer les prolongements négatifs d'éléments spatiaux en dépit du fait que les mathématiques donnent des formules pour mesurer l'extension d'un élément de l'espace doté de signe. Par exemple, le signe de l'aire d'un triangle dépend de l'ordre dans lequel les sommets sont pris en compte. Ainsi l'évaluation de l'aire d'un polygone orienté peut se décomposer en triangles en prenant, par exemple, un sommet avec une arête orientée par rapport à un repère. Cette arête orientée est le segment défini par deux points (sommets) consécutifs dans un ordre identifié. En additionnant les zones orientées de chaque triangle, on obtient la superficie du polygone orienté. Le signe dépend strictement de l'ordre dans lequel les points sont pris (fig. 2.19). La géométrie analytique tient compte des signes.

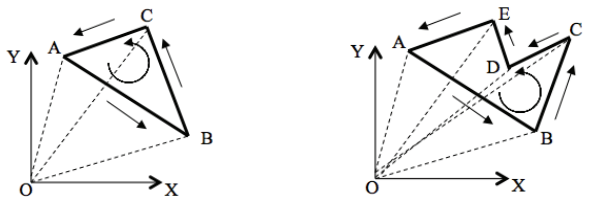


figure a - triangle figure b - polygone

figure 2.19 - Surfaces orientées – triangle – polygone

Un autre constat d'Enzo Tonti est que lorsque nous appliquons des notions mathématiques et géométriques à la description de la physique nous devons être ouverts à l'extension de la définition des variables physiques pour tenir compte de toutes les fonctionnalités que les objets mathématiques et géométriques présentent. Un exemple est l'interprétation d'un signe plus et d'un signe moins que les mathématiques obligent à considérer lorsque l'on effectue la racine carrée d'un nombre. Ce constat vient du fait que Tonti considère que les livres de physique ne traitent pas de la notion d'orientation en détail tout simplement parce que les livres de géométrie ne traitent pas de ces notions. Par contre si les livres sur la topologie algébrique utilisent la notion d'orientation alors ils ne distinguent pas les deux types d'orientation : l'orientation intérieure et l'orientation extérieure d'un élément de l'espace (point, ligne, surface, volume géométrique).

E. Tonti propose de définir des règles pour rendre robustes les orientations intérieures et extérieures des éléments de l'espace. Par exemple, pour une surface si l'une des deux faces est choisie, l'orientation est une orientation extérieure. Pour une orientation intérieure, il est nécessaire de prendre la direction du contour de la surface.

Dans le tableau (fig. 2.20) les orientations intérieures et extérieures d'un point posent la question de leur légitimité. D'un point de vue mathématique, un point n'a pas d'orientation. Il faut donc considérer une extension vers la physique dans une approche différente. Supposons une source d'eau avec deux aspects différents, la fontaine et le puits. Quand un point est conçu comme une fontaine ou un puits, il sera doté d'une orientation respectivement positive ou négative lorsque les lignes seront entrantes ou sortantes.

Orientation intérieure		Orientation extérieure	
	L'orientation intérieure d'un point (P) est une orientation positive (pour des raisons historiques).		L'orientation extérieure d'un volume ($\tilde{V}$) est une orientation positive est celle avec les normales vers l'extérieur.
	L'orientation intérieure d'une ligne (L) est la notion de base utilisée pour donner un sens aux orientations de tous les autres éléments géométriques.		L'orientation extérieure d'une surface ($\tilde{S}$) est l'orientation interne de la ligne qui traverse la surface.
	L'orientation intérieure d'une surface (S) est une orientation compatible avec ses bords, c'est-à-dire une direction à suivre le long de la frontière de la surface.		L'orientation extérieure d'une ligne ($\tilde{L}$) est l'orientation intérieure d'une surface normale à la ligne la traversant.
	L'orientation intérieure d'un volume (V) est une orientation compatible avec ses faces.		L'orientation extérieure d'un point ($\tilde{P}$) est l'orientation interne du volume contenant le point.

figure 2.20 - Orientations intérieures et extérieures

En conclusion, les variables globales sont définies à partir des variables sources ou de configuration et des éléments de l'espace, mais pas seulement. Elles ont également besoin de l'orientation intérieure ou extérieure de leur élément de l'espace.

L'échelle d'observation géométrique permet au concepteur de modéliser un composant avec un volume géométrique, ou simplement une portion de la surface du volume ou encore une portion de ligne de la surface suivant les hypothèses retenues.

Les éléments de l'espace, point, ligne, surface, volume géométrique sont des éléments fermés. Certains de ces éléments

tout ou en partie, sont des éléments qui seront le lieu d'interface ou d'interaction avec des composants.

2.3.2 CHAMP

Ramenons ce qui est exposé précédemment à la modélisation d'un système sous forme de composants et d'interfaces, lieux d'interactions. Les composants sont soumis à des interactions de contact ou à distance. Les interactions de contact correspondent à des échanges énergétiques au travers des surfaces du composant en interface avec d'autres composants. Les interactions à distance correspondent à l'action de l'environnement dans lequel le composant se situe.

Un champ est une entité décrite par l'ensemble des valeurs d'une grandeur physique en tous les points de l'espace. D'ordinaire, le champ dépend du temps (évolution du champ). Il peut être écrit comme un scalaire, un vecteur, ou un tenseur. On appelle couramment « champ en un point et au temps t » les valeurs de la grandeur prise en un point et un instant déterminé.

Nature physique d'un champ

On peut classer les champs d'après leur nature physique : champ thermique (température), champ de densité, champ électromagnétique (ensemble des champs électrique et magnétique dans le cas où ils dépendent du temps), champ des déformations (tenseur des déformations), champ de la fonction d'onde en mécanique quantique (solution de l'équation de Schrödinger), etc.

Dans le cadre de la mécanique classique, un champ gravitationnel est dû à la présence d'une masse susceptible d'exercer une influence gravitationnelle sur tout autre corps à proximité immédiate ou pas. Le champ gravitationnel est un champ vectoriel qui dérive d'un champ scalaire nommé « potentiel gravitationnel ». Ce potentiel est un potentiel newtonien qui permet de décrire une interaction à distance. Par exemple, l'accélération d'une particule soumise uniquement à la force de gravitation de Newton est donnée directement par la valeur du champ gravitationnel.

Dans le cadre de l'électromagnétisme, un champ (électromagnétique) est la représentation dans l'espace de la force électromagnétique qu'exercent des particules chargées. Le champ électromagnétique est la composition de deux champs vectoriels qui peuvent être mesurés indépendamment. Ces deux champs sont indissociables :

- la séparation des composantes magnétique et électrique n'est qu'un point de vue dépendant du référentiel d'étude ;
- les équations de Maxwell régissant les deux composantes électrique et magnétique sont couplées si bien que toutes les variations de l'un induisent des variations de l'autre.

Le comportement des champs électromagnétiques est décrit de façon classique par les équations de Maxwell et plus généralement par l'électrodynamique quantique.

Nature mathématique d'un champ

On peut également classer les champs d'après la nature mathématique de la fonction représentative, à savoir d'après les propriétés de transformation de cette fonction dans une transformation du système de coordonnées :

- champ scalaire ou tensoriel d'ordre zéro (potentiel, température, densité, etc.) ;
- champ vectoriel ou tensoriel du premier ordre (champ électrique, champ des vitesses, champ de gravitation, etc.), transformation identique à celle d'un vecteur ;
- champ tensoriel d'ordre 2 (tenseur des déformations, constante diélectrique locale dans un milieu anisotrope et inhomogène, etc.), transformation identique à celle des produits de 2, 3..., n composantes d'un vecteur.

Champs dans le modèle d'un système

Dans le modèle du système, plusieurs champs peuvent être considérés :

- Dans le volume : dans les composants, aussi bien dans les composants représentant des solides (pièces, sous-ensembles) que dans des composants liquides (lubrifiant), des composants gazeux (air) ;
- Au niveau des surfaces : en particulier aux interfaces des composants afin de modéliser les interactions entre composants, pression de contact, température…

2.3.3 Flux

Le flux par définition est un scalaire qui peut être calculé soit sur une courbe soit sur une surface, mais il faut noter que toutes les deux doivent être orientées. Le flux d'un champ de vecteurs à travers une surface (orientée) est défini comme étant l'intégrale sur la surface, du produit scalaire entre le vecteur et la normale (orientée) à la surface au point considéré.

$$\phi = \int_S \vec{A} \cdot \vec{n}\, dS$$

Où $\vec{A}$ représente le champ vectoriel et dS la normale unitaire à la surface.

Par exemple, le « flux des particules » (de vitesse v et de concentration n) à travers une surface, c'est-à-dire le nombre des particules la traversant par unité de temps, est égal à nv cos α ds. Le flux à travers une surface finie S s'obtient par sommation (intégration). Nous dirons qu'un flux peut se propager entre deux composants dont les sommets sont reliés par un bipôle représentant une interface (fig. 2.21). Cette notion est importante, car elle permettra par la suite de montrer l'influence des phénomènes physiques sur des fonctions ou des spécifications.

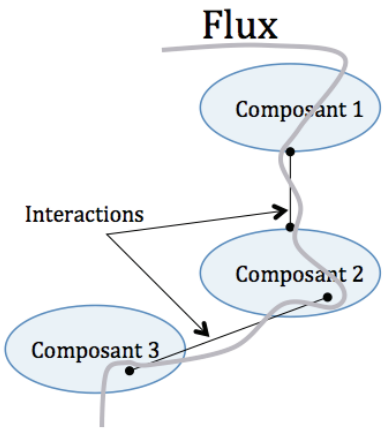


figure 2.21 - Représentation du flux passant entre les composants et à l'intérieur des composants.

2.4 SYNTHESE

La modélisation du système physique n'est jamais parfaite et n'est pas unique, car elle est adaptée à l'activité visée. Les modèles sont donc la cause d'incertitudes avec souvent des risques mal maîtrisés.

Quel que soit le comportement physique d'un système étudié, le modèle nominal exprime toujours les intentions du concepteur. Ainsi, à partir du modèle nominal, la prise en compte de la variabilité des propriétés permet d'introduire différents modèles. Ces modèles présentent plus ou moins de variations pouvant porter sur la géométrie ou la matière. Cependant, la conception et la modélisation sont essentiellement basées sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène…), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulière.

Pourtant, plus le modèle comprend de variations par rapport au nominal, plus il contient d'informations. Cette information peut être infinie lorsque toutes les variations imaginables sont prises en compte, nous parlerons alors de modèle infini. À ce niveau de modélisation, aucune simulation n'est possible. Quasiment jamais, un modèle que l'on ne peut qu'imaginer n'est pas considéré. Pourtant, ce type de modèle ne peut être ignoré si l'on désire définir un modèle pour la simulation en posant correctement les hypothèses de simplification. Voilà la raison pour laquelle la notion de modèle infini a été introduite.

Ce modèle infini doit être la base du processus de simplification conduisant du modèle primitif au modèle de simulation. Le modèle de simulation est un modèle adapté défini par le concepteur afin de simuler le comportement du système. Le modèle primitif est un modèle, imaginé par le concepteur, pour réfléchir à l'influence de l'ensemble des défauts du système sur les performances du produit.

Lors des activités de développement d'un produit, les modèles manipulés sont des systèmes au sens où les modèles sont généralement constitués de composants en interactions. La modélisation à une échelle plus fine et en fonction des hypothèses

ou des intentions du modélisateur permet de remplacer l'interface originelle par un composant interphase (ou une succession d'interphases) liée aux composants par des interfaces.

Cependant, afin d'expliciter, de contrôler ou de prédire le comportement physique d'un système, il est nécessaire de déterminer les échanges d'énergie et de matière au sein de ce système ou plutôt de son modèle.

3 PROPRIETES

Objet est le nom du *module* dont il est nécessaire de définir ses propriétés et son type de manière générique afin de le manipuler. Ce chapitre propose de classer les objets et de définir leurs différentes propriétés. Il propose également de définir les liens entre les propriétés à partir d'un ensemble d'opérations.

Il y a un temps pour vivre et il y a un temps pour témoigner de vivre. Il y a aussi un temps pour créer, ce qui est moins naturel.
Albert CAMUS [3.1]

SOMMAIRE

3.1 Définition d'un objet *48*
3.1.1 Type d'un objet 48
3.1.2 Propriété 50
3.1.3 Propriétés de base et propriétés dérivées 55
3.2 Opérations géométriques *58*
3.2.1 Description des opérations 59
3.2.2 Synthèse sur les opérations géométriques 67
3.3 Extension àu comportement mécanique *70*
3.3.1 Besoins 70
3.3.2 Exemples d'opérations 72
3.3.3 En synthèse. 75
3.4 Opérations physiques *76*
3.4.1 Décomposition 77
3.4.2 Restriction 79
3.4.3 Transformation 81
3.4.4 Logique 88
3.4.5 Synthèse 90
3.5 Synthèse *90*
Bibliographie du chapitre 3 ..... *161*

[3.1]. *Noces, in œuvres complètes, Pléiade, Gallimard, 2006, T. 1, p. 109*

Afin de répondre à des problématiques de conception, il est nécessaire de définir un *module* structuré et limité constitué d'un ensemble de données et de procédures qui décrivent leur manipulation. Ainsi défini, ce module est nommé : objet, et dont il sera nécessaire de définir ses propriétés, son type de manière générique afin de le manipuler. Nous classerons les objets et nous définirons les différentes propriétés. Nous nous attacherons à définir les liens entre les propriétés à partir d'un ensemble d'opérations.

3.1 DEFINITION D'UN OBJET

3.1.1 TYPE D'UN OBJET

Les objets ont des propriétés de diverses natures : couleur, masse, coefficient d'élasticité, matière, longueur, défaut de forme… Afin de les manipuler plus facilement de manière générique les objets sont regroupés par classes. Une classe d'objets rassemble des objets ayant des similitudes définies par ce que nous appellerons un type.

Le mot « type » (du grec tupos, empreinte, modèle) désigne de façon générale un modèle abstrait réunissant les traits essentiels de tous les êtres ou objets de même nature, l'ensemble des traits caractéristiques d'un groupe ou d'une famille de choses. Dans le langage courant, il peut être synonyme de « genre ». [Wikipedia]

En géométrie, le type d'un élément caractérise la classe d'éléments de forme similaire. Ainsi, le type plan regroupe tous les plans [Ballu 1993]. Les éléments de type plan ont en commun la propriété de coplanarité des points, l'ensemble des points de l'élément doit être coplanaire. Ils partagent également d'autres propriétés qui sont des propriétés de situation dans l'espace, mais avec des valeurs différentes permettant de distinguer les plans les uns des autres.

Le type cercle regroupe tous les cercles de différents diamètres. Dans ce cas, les éléments de type cercle ont en commun la propriété que les points soient situés sur un cercle (points dans un plan et distance à un point, appelé centre, identique pour tous les points de l'élément). Les éléments de type cercle sont distingués par les valeurs prises par exemple par les propriétés diamètre et de situation dans l'espace. Il est possible de considérer un type « cercle de diamètre Ø 16 », c'est un type cercle avec une propriété supplémentaire imposant la valeur de la propriété de diamètre. Le type cercle est associé à une classe. Une sous-classe est une classe avec une contrainte additionnelle sur une ou plusieurs propriétés. Ainsi, il est ajouté une ou des contraintes additionnelles, au sens où l'on vient restreindre la classe père, figure 3.1.

Au-delà de la géométrie, le type d'un composant[3.2] ou d'une pièce correspond également à une classe d'éléments ayant les mêmes propriétés. Le type composant de guidage en rotation permet de classer les composants par famille afin de les manipuler plus facilement.

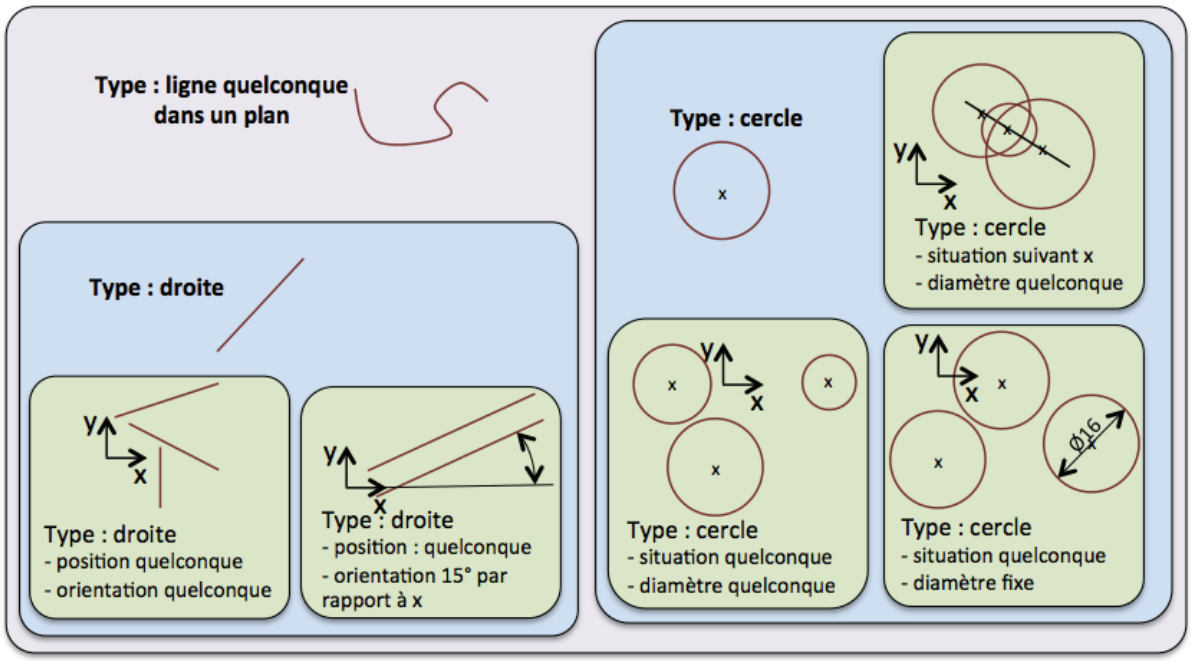


figure 3.1 — Types géométriques

La figure 3.2 illustre une proposition de décomposition du type père en sous types, et par cascade, d'arriver à un choix de composant, dont le type final, est la référence du constructeur. Cette figure propose une décomposition non exhaustive dont la réponse illustre un choix de type : référence.

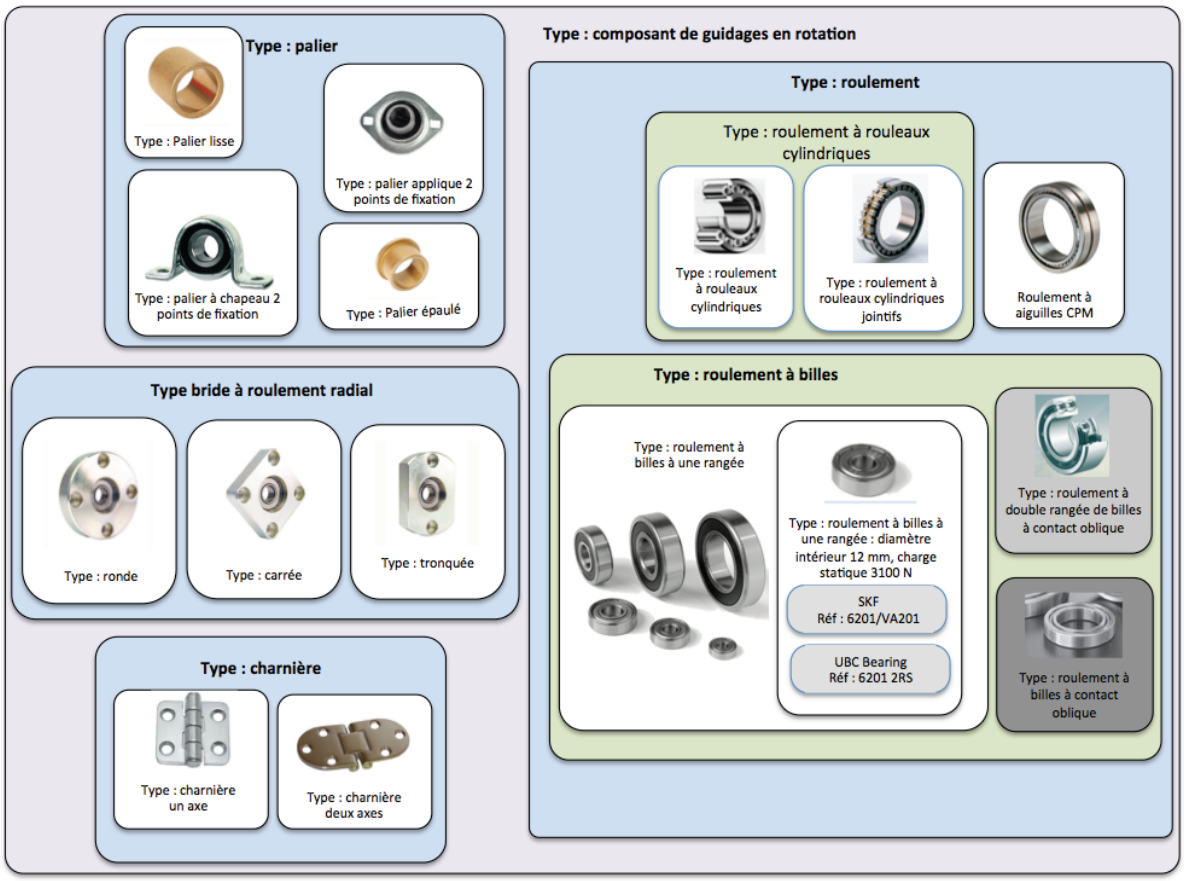


figure 3.2 - Types composants (Images HCP)

[3.2]. *Note : un composant est un objet à finalité technologique.*

La propriété qualitative élémentaire est un type référence : SKF — référence 6201/VA201 ou UBC Bearing — référence 6201 2RS. Dans notre exemple, la décomposition génère des types dont les propriétés sont exclusives. Cependant à un état de décomposition donné, il peut exister des intersections de classes par leurs propriétés communes.

3.1.2 PROPRIETE

Nous venons de voir au travers des types que la notion de propriété est essentielle dans la définition d'un objet. Les propriétés peuvent définir le comportement d'un matériau, la nature de l'élément géométrique, la référence d'un matériau, la référence d'un composant ou le diamètre d'un cylindre, par exemple.

Ces propriétés sont très similaires aux « propriétés internes » définies par Hubka et Eder [Hubka 1982], aux « propriétés » définies par Weber [Weber 2008] et aux « paramètres de conception » définis dans la conception axiomatique.

Les propriétés de la figure 3.3 ne constituent pas une liste exhaustive. Ces propriétés sont scindées en deux groupes de propriétés qualitatives, quantitatives qui sont eux-mêmes constitués de sous-groupes.

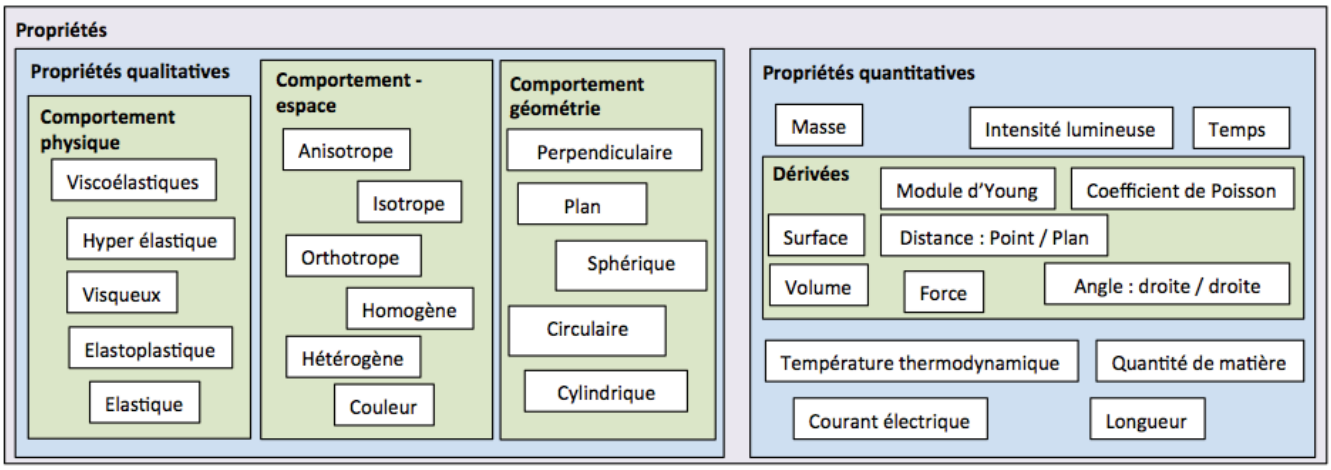


figure 3.3 - Propriétés

Un objet de type surface vérifie la propriété qualitative consistant à être une variété de dimension 2 et est identifié par les coordonnées des points dans un repère cartésien (propriété quantitative), figure 3.4.

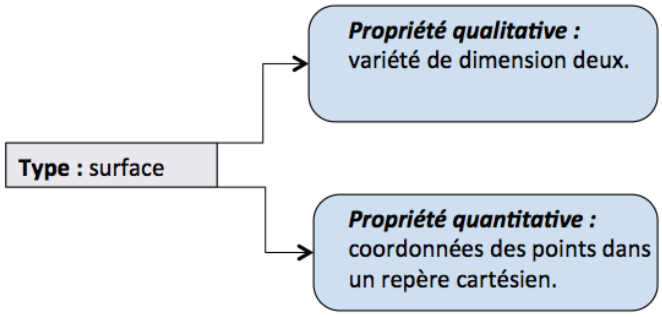


figure 3.4 – Type : surface, les propriétés

Propriétés quantitatives

Les propriétés quantitatives peuvent décrire par exemple la structure, la forme et la consistance des matériaux d'un produit. Elles s'expriment sous la forme d'un nombre (booléen, entier, réel) et d'une référence (pour les propriétés réelles). La référence définit l'unité de la grandeur quantifiée : longueur, masse, force, contrainte… Nous allons voir par la suite qu'il est possible de distinguer des propriétés de base (correspondant aux unités de base) et des propriétés dérivées.

La valeur d'une propriété permet de différencier l'objet décrit parmi les objets ayant la même propriété. Ces propriétés peuvent être directement définies par le concepteur ; elles peuvent être liées à des choix de modélisation. Les propriétés quantitatives sont très similaires aux « caractéristiques » définies par Weber, aux « grandeurs » définies par le VIM [VIM3 2012], aux « caractéristiques géométriques » définies par les spécifications géométriques du produit [ISO 25378 2011] et aux « caractéristiques » définies par le système de management de la qualité [ISO 9000 2012].

[grandeur, VIM 3 : 2012]

« propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence »

[caractéristique géométrique, ISO 25378 2011]

« NOTE 3 La caractéristique géométrique permet d'évaluer une grandeur pouvant être associée, par exemple, à une dimension angulaire, linéaire, carrée, volumique, etc. »

[caractéristique, ISO 9000 2012]

« trait distinctif »

Par exemple, un cercle de diamètre 16 mm (fig. 3.1) correspond à un objet de type cercle avec une propriété quantitative, le diamètre, dont la valeur est connue, 16 mm (fig. 3.3).

PROPRIETES QUALITATIVES

Le vocabulaire international de métrologie [VIM 3 : 2012] définit la notion de propriété qualitative.

[propriété qualitative, VIM 3 : 2012] « Propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on ne peut pas exprimer quantitativement »

Les propriétés qualitatives sont généralement utilisées pour décrire le comportement d'un objet, elles correspondent à des choix de conception ou des choix de modélisation effectués par le concepteur (par exemple, la fonction, la sécurité et la fiabilité, les propriétés esthétiques, la montabilité, le respect de l'environnement, etc., figure 3.3). Ces propriétés ne peuvent donc pas s'exprimer quantitativement, mais elles permettent de définir des liens ou des contraintes sur ou entre les propriétés quantitatives. Elles correspondent au comportement ou à la référence d'un matériau, par exemple. Donnons quelques

exemples de propriétés qualitatives afin de mieux comprendre ce qu'elles englobent :

- Les propriétés homogène ou hétérogène constituent un ensemble de propriétés liées au matériau. Lorsque toutes les portions de matière ont un comportement identique, le matériau peut-être qualifié d'homogène ;
- Les propriétés anisotrope, isotrope, orthotrope, homogène ou hétérogène constituent un ensemble de propriétés liées aux comportements mécaniques du matériau. Ainsi, lorsque les modules de Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement sont égaux dans chaque direction alors le matériau est isotrope ;
- Les propriétés élastique, viscoélastique, hyper élastique, élastoplastique ou visqueux constituent un ensemble de propriétés liées aux comportements physiques du matériau. Ces propriétés peuvent changer ou se combiner en fonction de la variation des hypothèses.
- Les propriétés plane, cylindrique, sphérique, perpendiculaire ou circulaire constituent un ensemble de propriétés liées aux comportements géométriques. Par exemple, lorsque tous les points d'une surface sont à une distance constante d'un même axe alors il existe des relations, voire des liens particuliers entre les points. Cette propriété est une propriété qualitative du comportement géométrique cylindrique. Ainsi, l'ensemble de ces points appartient à un objet particulier, un cylindre ;
- La propriété ergonomique peut impliquer par les normes des valeurs de propriétés quantitatives dans un environnement particulier. Par exemple, les conditions de travail et les critères de protection de la santé des utilisateurs au poste de travail de bureau utilisant des sièges imposent des principes généraux et exigences minimales en matière d'ergonomie [NF EN 1335-1 2000].

[Sièges de travail de bureau, NF EN 1335-1:2000]

« 6.12 Longueur n de la zone utile de l'accotoir

La longueur n de la zone utile de l'accotoir est la distance horizontale entre deux lignes verticales passant par les extrémités avant et arrière de la zone utile de l'accotoir (voir figure 15b)).

Pour un accotoir non horizontal, arrondi vers l'avant ou non rigide, la mesure de n est prise dans un plan horizontal situé à 20 mm au-dessous du point le plus élevé de la zone utile de l'accotoir (voir figure 15a)) ».

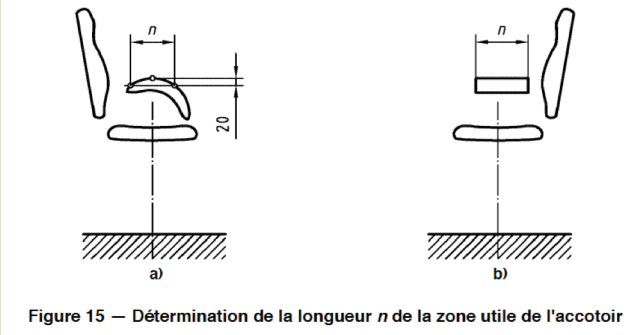


Figure 15 — Détermination de la longueur *n* de la zone utile de l'accotoir

figure 3.5 – Extrait de la norme NF EN 1335-1

Liens entre type et propriétés

Les notions de type, propriétés qualitatives et propriétés quantitatives sont étroitement liées. Les objets d'une classe donnée sont d'un même type. Le type est défini par une ou plusieurs propriétés qualitatives. Les différents éléments de la classe se différencient par des valeurs différentes de propriétés généralement quantitatives. Une sous-classe revient à restreindre les éléments par des contraintes sur les propriétés quantitatives et ainsi à définir de nouvelles propriétés qualitatives aboutissant à la définition d'un sous-type.

Afin d'illustrer notre propos, deux exemples géométriques sont présentés par la suite.

EXEMPLE 1 : PLAN

Un objet de type surface est composé d'un ensemble d'objets de type point vérifiant la propriété de continuité de la surface (propriété qualitative) et il est identifié par les coordonnées des points dans un repère cartésien (propriété quantitative).

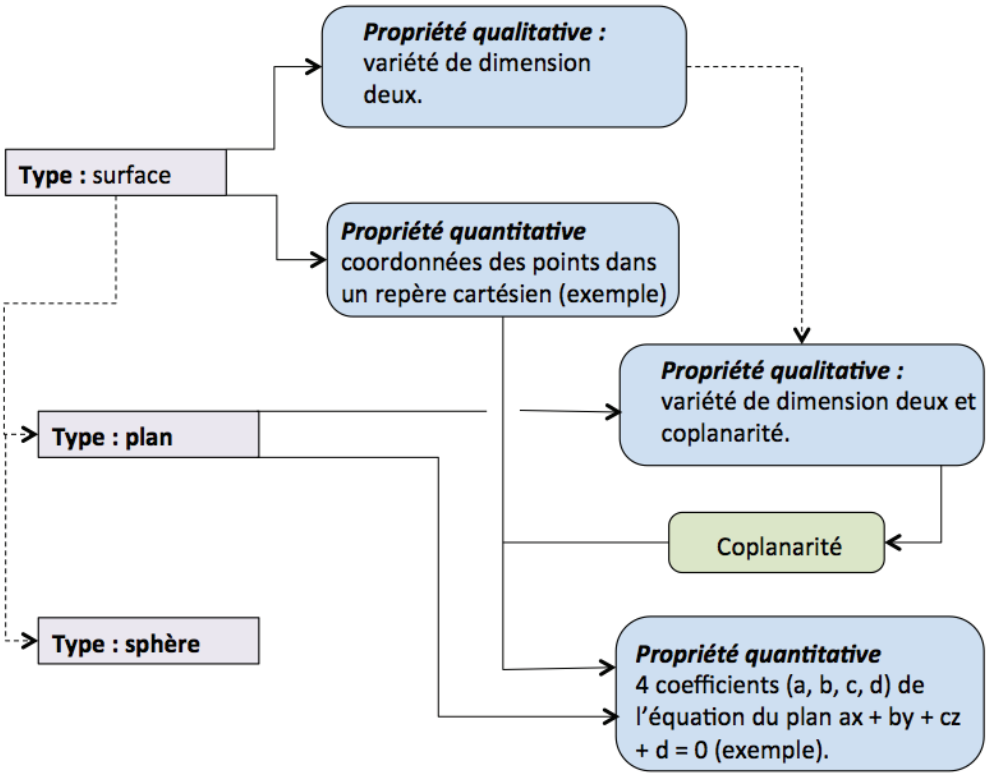


figure 3.6 – Type : plan, les propriétés

Le type plan est un sous-type du type surface. Un objet de type plan est composé d'un ensemble d'objets de type point vérifiant : la propriété de continuité de la surface (propriété qualitative du type surface) et la propriété de coplanarité. Cette propriété peut être exprimée de la manière suivante :

- Quels que soient les quatre points non alignés : A, B, C et D de l'objet, alors $\left(\overrightarrow{AB} \wedge \overrightarrow{AC}\right) \bullet \overrightarrow{AD} = 0$.

Un plan particulier est identifié par trois propriétés de situation de l'objet dans l'espace. Ces propriétés peuvent être en nombre supérieur, mais dans ce cas elles sont liées.Ces propriétés dépendent du choix du modèle de description, ainsi les propriétés peuvent être les suivantes :

- les quatre coefficients (a, b, c, d) $\in \mathbb{R}^4$ de l'équation ax + by + cz + d =0 avec $\sqrt{a^2+b^2+c^2}=1$ (Fig. 3.6).
- les composantes d'un vecteur normal unitaire n et les coordonnées d'un point A du plan.

EXEMPLE 2 : BIPLAN

L'objet de type biplan est composé de deux plans parallèles en vis-à-vis. Les points d'un objet de la classe biplan vérifient les propriétés qualitatives d'appartenance à deux plans parallèles. Cependant en prenant un ensemble de points au lieu de deux plans, les propriétés qualitatives sont la variété de dimension 2 et le parallélisme.

Parallélisme

Soient B et B' deux variétés linéaires d'un même espace affine A, de directions F et F' respectivement. On dit que B' est 'parallèle' à B si F' ⊆ F.

Pour cet objet, les propriétés quantitatives sont, par exemple, les cinq coefficients (a, b, c, d, e) des équations des deux plans ax + by + cz + d = 0 et ax + by + cz + e = 0, avec d≠e, sachant que ces coefficients sont liés. Le jeu de propriétés quantitatives n'est pas unique. En effet, il est possible de choisir un vecteur directeur, un point du plan médian et la distance entre les plans. Là encore, le concepteur fait le choix du jeu de propriétés quantitatives adéquat en fonction des besoins.

3.1.3 PROPRIETES DE BASE ET PROPRIETES DERIVEES

Les propriétés de base sont associées aux unités de base, tandis que les propriétés dérivées sont associées aux unités dérivées.

Propriétés de base

Historiquement, les unités de base sont nécessaires au système de mesure afin d'établir et de définir les propriétés (caractéristiques) d'un objet ou des échanges d'information. Le développement du système impérial britannique de normes de mesure a commencé au 13e siècle, puis il s'est bien établi au 18e siècle. Ce système britannique s'est propagé dans de nombreuses régions du monde, y compris aux États-Unis, par le biais du commerce et de la colonisation. Aux États-Unis, le système a progressivement évolué vers le système américain (USCS) qui est d'usage courant aujourd'hui.

En France, il y a environ 300 ans, le concept du système métrique est né. Puis, il fut officialisé dans les années 1790, au moment de la Révolution française. Dans les années 1950, un nouveau système d'unités a été créé lorsque le système métrique a subi une révision majeure. Officiellement adopté en 1960, il est communément dénommé SI (système international d'unités). Bien que certaines unités SI soient les mêmes que dans l'ancien système métrique, le système international introduit beaucoup de nouvelles fonctionnalités et de simplifications. Ainsi, le SI est une amélioration du système métrique dont la longueur, le temps, la masse, et la force sont les unités de mesure nécessaires en mécanique. Cependant, seulement trois de ces quatre quantités sont indépendantes. La force est liée par la loi de Newton à la longueur, au temps et à la masse.

Ainsi le Système international d'unités, comme le système métrique, est basé sur les grandeurs de longueur, de temps et de masse comme grandeurs fondamentales. Dans ces systèmes, la force est dérivée de la loi de Newton, car la grandeur force est exprimée en fonction des grandeurs de base de longueur, de temps, et de masse. Le système international (SI) est défini comme un système absolu d'unités, car les mesures des trois grandeurs fondamentales sont indépendantes de l'emplacement où les mesures sont effectuées. Ainsi ces mesures ne dépendent pas des

effets de la gravité terrestre. Par conséquent, les unités SI de longueur, de temps et de masse peuvent être utilisées n'importe où sur la terre, dans l'espace, sur la lune, ou même sur une autre planète. C'est l'une des raisons pour lesquelles le système international (SI) a toujours été préféré pour le travail scientifique.

Le système britannique impérial était le système utilisé auparavant, il est toujours en usage dans certaines communautés et plus particulièrement aux États-Unis d'Amérique.

Il est fondé à partir des quantités fondamentales de longueur, de temps et de force. La quantité dérivée de la masse est issue de la relation de la loi de Newton. Par conséquent, l'unité de force est définie comme la force exercée par une masse étalon soumise à l'accélération de la pesanteur, ce qui signifie que l'unité de force varie avec l'emplacement et l'altitude. Pour cette raison, ce système est appelé système gravitationnel d'unités. Le système international est préférable sans doute parce que le poids est une des propriétés facilement discernables et parce que les variations d'attraction gravitationnelle ne sont pas perceptibles. Cependant, il est clair que dans le monde moderne et le monde technologique, un système absolu est préférable.

Le Système international dispose de sept unités de base à partir desquelles toutes les autres unités sont dérivées. Les unités de base de la mécanique sont le mètre (m) pour longueur, la seconde (s) pour le temps, et le kilogramme (kg) pour la masse. Le courant électrique, la température thermodynamique, la quantité de matière ou l'intensité lumineuse sont également des grandeurs quantitatives de base du système international de grandeur [VIM3 : 2012]. Sont-elles suffisantes pour exprimer toutes les propriétés quantitatives ?

Propriétés dérivées

Aux unités de base correspondent des propriétés de base, mais celles-ci ne représentent qu'un petit sous-ensemble des propriétés quantitatives. Toutes ces propriétés non décrites sont définies à partir des propriétés de base, nous qualifierons ces propriétés de dérivées.

DISTANCE POINT - DROITE

Le langage GeoSpelling s'appuie sur le système international d'unités. Il utilise les propriétés (caractéristiques) de distance et d'angle. La propriété (caractéristique) d'unité de longueur entre deux points définit la propriété quantitative de base distance point – point. La propriété distance point – droite est dérivée de la distance entre deux points. Ceci est en contradiction avec les auteurs de ce langage qui considèrent que la propriété de distance point - droite constitue une propriété quantitative de base (ou élémentaire) du langage GeoSpelling, car cette propriété permet de définir les distances entre éléments géométriques... En vérité, la propriété de base est bien la distance entre deux points. Toutes les autres propriétés dans le langage GeoSpelling en sont dérivées, même si certaines propriétés dérivées sont elles-mêmes dérivées de propriétés dérivées.

VOLUME

Parmi les propriétés quantitatives dérivées, il existe des propriétés géométriques telles que la surface et le volume. En effet, une propriété volume est une propriété dérivée d'une propriété quantitative de base longueur. Pour définir cette propriété dérivée, il est nécessaire de définir une relation à partir de la propriété longueur.

Pour un objet de type parallélépipède, les propriétés de base l_p, l_l et l_h sont les longueurs des côtés du parallélépipède (profondeur, largeur et hauteur). La propriété quantitative volume est une propriété dérivée de ces longueurs. En figure 3.7, la propriété surface est définie par le produit de la profondeur par la largeur, et la propriété volume par le produit de la surface par la hauteur. La définition du volume passe par la définition d'un opérateur constitué de deux opérations.

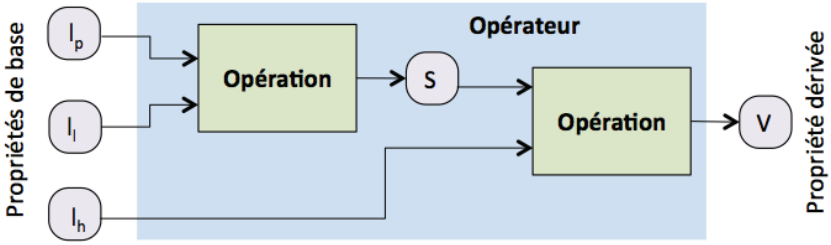


figure 3.7 – Opérateur, V (volume) propriété dérivée

MODULE DE YOUNG

Autres types de propriétés dérivées, les propriétés de module d'Young, module de cisaillement et coefficient de Poisson sont définies à partir des mêmes propriétés de base : longueur et force. La force étant elle-même une propriété dérivée. La propriété module de Young permet de définir une propriété sur la déformation élastique du matériau. Elle est issue d'une part de la contrainte qui correspond au rapport de la force par la surface où elle s'applique et d'autre part de la déformation qui correspond à l'allongement divisé par la longueur initiale. Ainsi, le comportement du solide soumis à une contrainte et qui se déforme de façon élastique conduit à définir cette propriété caractérisant une relation de proportionnalité entre la déformation et la contrainte. La courbe de traction met en relation la propriété quantitative dérivée : force en fonction de la propriété de base : longueur.

Le module d'élasticité correspond à la pente de la droite représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans le domaine élastique. Si nous considérons la courbe issue d'un essai de traction, le processus de détermination peut être décomposé sous la forme d'un ensemble d'opérations (fig. 3.8). Les propriétés de base *ll* et *lp* (respectivement longueur, profondeur) déterminent la section *S0* normalisée de l'éprouvette d'essai avec *S0 = ll x lp*. L'emploi d'une machine de traction impose d'utiliser la cellule de force de ce moyen afin de réaliser l'expérimentation. La propriété dérivée *Fi* (force) fournie par la cellule d'effort est indépendante de la longueur initiale de l'éprouvette. Elle est pilotée par la variation de la résistance

électrique d'une jauge de déformation résistive située à l'intérieur de la cellule d'effort. Le facteur de jauge *k* est le coefficient de proportionnalité entre *ΔR/R* et *Δlj/lj0* [Asch 1983]. Il dépend du conducteur utilisé pour la fabrication de la jauge et quantifie sa sensibilité. Le matériau et la forme de la cellule d'effort étant connus, il est alors possible de transformer la variation de résistance électrique en déformation de la cellule puis en effort correspondant à cette déformation.

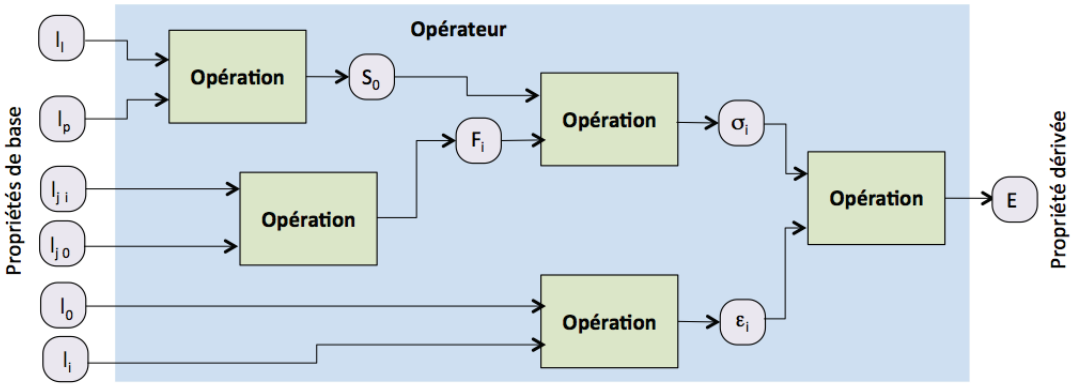


figure 3.8 – Opérateur, E (module d'Young) propriété dérivée

SYNTHESE

Les propriétés dérivées sont issues d'un processus constitué d'un ensemble d'opérations ordonnées appelé opérateur. De tels opérateurs permettent de compléter les propriétés de base en créant de nouvelles propriétés appelées propriétés dérivées.

La liste des propriétés dérivées n'est pas exhaustive.

Les propriétés de base sont considérées comme indépendantes de toute opération.

Les propriétés présentées sont des propriétés de base ou dérivés d'objets idéaux (modèles finis). La suite du chapitre développe les opérations et les opérateurs qui permettront la définition de propriétés dérivées d'objets imparfaits (modèles infinis). Ils serviront de manière générale à la manipulation des objets dans le processus de modélisation comme nous le verrons au chapitre suivant.

Dans un premier temps sont présentées les opérations sur des objets géométriques déjà existantes dans GeoSpelling ou bien dans les normes de spécification géométrique des produits, puis ces opérations sont étendues à la mécanique et à la physique à la fin du chapitre.

3.2 OPERATIONS GEOMETRIQUES

Le langage GeoSpelling proposé par Ballu et Mathieu [Ballu 1995] est utilisé pour décrire les propriétés quantitatives entre les éléments idéaux et non idéaux. En effet, il permet l'expression des spécifications géométriques du produit à partir d'un langage commun. Ce modèle est basé sur les opérations géométriques qui sont appliquées non seulement aux propriétés quantitatives

idéales définies par les systèmes CAO, mais aussi aux propriétés quantitatives non idéales qui peuvent représenter une partie de la surface réelle, le « skin » modèle. Pour une spécification, des éléments géométriques sont déduits du « skin » modèle par des opérations géométriques. Ces opérations sont des outils spécifiques permettant de générer des éléments ou des valeurs de propriétés (caractéristiques). Ces opérations sont utilisées dans le domaine géométrique de l'ingénierie mécanique pour spécifier une exigence sur un produit. Elles permettent de définir un opérateur associé à chaque spécification, cet opérateur est appelé opérateur de spécification.

3.2.1 DESCRIPTION DES OPERATIONS

A la base, GeoSpelling a été développé autour de cinq opérations : partition, extraction, collection, association et construction. Cette liste a été complétée par la normalisation [ISO 17450-1 2011], les nouvelles opérations sont les suivantes : filtrage, reconstruction, réduction et évaluation. La dernière opération a pour objectif d'associer une valeur de propriété (caractéristique) à des éléments géométriques. Les paragraphes suivants permettent de mieux cerner ces différentes opérations.

Partition

L'opération appelée partition est utilisée pour identifier des éléments limités [ISO 17450-1 2011] [ISO/CD 18183-1 2012]. A partir du « skin » modèle, le premier problème qui se pose pour la définition d'une spécification est l'identification de différentes parties de ce modèle à partir du modèle nominal. Physiquement, la partition est par exemple effectuée lors du palpage de points sur une MMT (machine à mesurer tridimensionnelle) en choisissant le lieu des points sur la pièce ; sachant que l'on ne « s'approche pas trop » des arêtes de la pièce, la partition est assez naturelle et ne pose pas de questions s. Par contre, avec le développement de nouvelles technologies de mesure optique, un grand nombre de points est obtenu sans les associer à des surfaces particulières et ces points se situent entre autres au niveau des arêtes de la pièce. Cette technologie entraîne donc des problématiques de partition appelée segmentation dans ce domaine de recherche [Woo 2002].

La segmentation est le processus de partitionnement du nuage de points numérisé. La majorité des méthodes de segmentation de nuages de points peut être classée en trois catégories : méthode de détection de contour, méthode des régions et méthodes hybrides. Les méthodes de détection de bord tentent de déceler les discontinuités dans les surfaces qui forment les limites fermées des composants dans les données de points. Fan et al. [Fan 1987] ont utilisé les propriétés de courbure de la surface locale pour identifier les limites importantes dans la plage de données. Chen et Liu [Chen 1997] ont segmenté les données en les découpant et en les ajustant à des NURBS. Les points de jonction ont été détectés par le calcul de la courbure maximum de la NURBS. Milroy et al. [Milroy 1997] ont utilisé une approche basée sur le contour semi-automatique de section transversale de modèles orthogonaux (OCS). Dans ce modèle, les propriétés différentielles de surface sont estimées en chaque point, et les

extrémités de courbure sont identifiées comme des points de bord possibles. Ensuite, un contour actif est utilisé pour relier les points de bord. Yang et Lee [Yang 1999] ont identifié des points de bord comme les points de courbures extrêmes par l'estimation de la courbure de la surface. Dans ce domaine, les contributions sont importantes. Néanmoins, cette opération n'est toujours pas définie avec rigueur, surtout sur le « skin » modèle qui est une surface considérée comme continue.

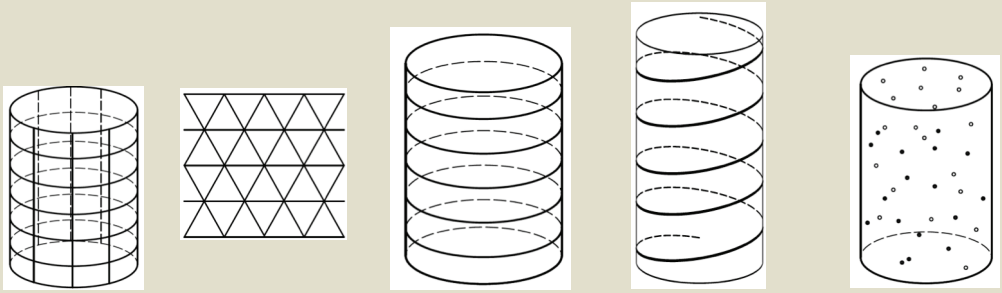
Extraction

L'opération appelée extraction est un cas particulier de la partition, au sens où l'extraction permet d'identifier des points particuliers d'un élément géométrique.

Physiquement, l'extraction correspond à la mesure de points sur une surface à l'aide d'un comparateur, d'une MMT ou encore d'un rugosimètre (un rugosimètre relève un ensemble de points, et non pas une ligne continue). Le terme d'extraction vient du fait que l'on vient extraire de l'information d'un élément. En réalisant une extraction, on obtient une certaine connaissance de l'élément géométrique, mais pas toute l'information, car le nombre de points est toujours fini.

Le processus d'extraction défini par la norme GPS [ISO 14406 2011] s'applique aux différentes surfaces ayant les géométries nominales suivantes : sphérique, plane, cylindrique, de révolution, prismatique hélicoïdale et complexe. Par exemple pour une surface cylindrique, plusieurs stratégies d'échantillonnage sont normalisées (fig. 3.9).

Une stratégie d'échantillonnage peut consister à définir des profils équidistants dans des directions spécifiées, qui forment une grille qui n'est pas nécessairement une grille orthogonale, par exemple une grille triangulaire (fig. 3.9 - 12b). Avec ou sans motif, les critères d'échantillonnage dépendent du type de filtrage et des critères associés (longueur d'onde, fréquence de coupure…). Il y a un certain nombre de théorèmes d'échantillonnage qui majorent la quantité d'information perdue, le théorème de Nyquist par exemple.



a – Cage a – Spécifiée c – Stratifié d – Hélicoïdal e – Par points

figure 12 - Processus d'échantillonnage – surface cylindrique

[grille orthogonale (cage), ISO 14406:2011]

« Stratégie d'échantillonnage, cas particulier d'une grille orthogonale, consistant en une série de profils orthogonaux par rapport à la direction locale de l'axe et équidistants le long de l'axe, et de profils de génératrice à angles/espacement égaux par rapport à l'axe » (fig. 12a)

figure 3.9 – Stratégie d'échantillonnage (Norme ISO 14406 :2011)

[Théorème de Nyquist, Nyquist 1928]

> *« Si l'on sait qu'un signal infiniment long ne contient pas de longueurs d'ondes plus courtes qu'une valeur spécifiée, le signal peut être reconstruit d'après les valeurs du signal à intervalles réguliers, à condition que l'intervalle soit inférieur à la moitié de la longueur d'onde spécifiée. »*

Les ondelettes relèvent d'un théorème équivalent au théorème de Nyquist [Nyquist 1928]. Le nombre de points d'échantillonnage doit être supérieur ou égal au nombre de degrés de liberté du modèle mathématique.

[3.2.2. degrés de liberté, ISO/TS 16610-1 2006]

> *Le degré de liberté du modèle mathématique est le nombre de paramètres indépendants requis pour décrire entièrement un modèle mathématique donné.*

Ce théorème est utilisé pour déterminer l'intervalle d'échantillonnage équidistant maximal théorique sans perte d'information. Cela signifie que le profil primaire ne peut être entièrement reconstruit à partir du profil primaire extrait que si, et seulement si, l'intervalle d'échantillonnage équidistant est inférieur au maximum théorique [Walter 1992].

Pour les filtres morphologiques [ISO/TS 16610-40 2006], il n'y a pas de théorème équivalent au théorème de Nyquist, qui permet d'élaborer un échantillonnage équidistant universel ne présentant pas de perte d'information. En revanche, il y a un certain nombre de théorèmes d'échantillonnage morphologique [Haralick 1989] qui majorent la quantité d'information perdue.

La stratégie d'échantillonnage peut aussi consister à prendre des points sur la surface selon une distribution aléatoire (fig. 3.9 - 12e). La stratégie d'échantillonnage s'applique à une portion de surface, c'est-à-dire, à une partie d'une surface partitionnée.

Ainsi l'opération d'extraction présente deux volets distincts dans la collecte de l'ensemble des points. Le premier volet est le choix de la taille de l'échantillon, soit le nombre de points extraits. Le second volet est la localisation ou le motif de la zone d'extraction. Dans l'exemple de vérification d'une spécification de planéité sur MMC (machine à mesurer par coordonnées) , Kim et al [Kim 2000] proposent quatre types de stratégie d'extraction pour constituer l'ensemble des points : l'échantillonnage de la séquence de Hammersley, l'échantillonnage de la séquence de Halton-Zaremba, l'échantillonnage systématique aligné et l'échantillonnage aléatoire systématique.

Les différentes stratégies d'échantillonnage ont pour objectif de limiter le nombre de points considérés tout en maîtrisant la perte d'information sur l'élément géométrique.

Filtrage

L'opération appelée filtrage est une opération permettant de ne retenir qu'une partie des informations d'un élément géométrique. Par exemple, il permet de distinguer la rugosité, l'ondulation, la forme, etc. Dans le cas d'une extraction de points (géométrie discréte), l'opération de filtrage permet également de gérer les points aberrants ou erronés. Dans ce cas, cette opération doit permettre de les supprimer. La norme ISO/TS 16610 définit la terminologie de base et la structure des principales méthodes utilisées pour le filtrage GPS [ISO/TS 16610-1 2006]. Le filtre de profil linéaire [ISO/TS 16610-20 2006] sépare les profils en composantes de longueur d'onde longue et composantes de longueur d'onde courte. Par exemple, pour un filtre à deux voies, les deux filtres sont normalement un filtre passe-haut et un filtre passe-bas qui sont représentés par leur fonction de transfert, respectivement H_W et H_R. Le but est de séparer les données d'entrée en une composante de basse fréquence (longueur d'onde longue) et une composante à haute fréquence (longueur d'onde courte) (fig. 3.10).

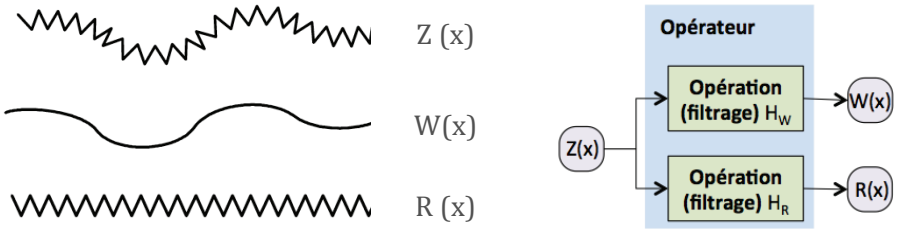


figure 3.10 - Processus d'échantillonnage

En terme de rugosité, le profil *Z(x)* est séparé en une composante d'ondulation *W(x)* et une composante de rugosité *R(x)* respectivement par un filtre passe-bas $H_W(\omega)$ et un filtre passe-haut $H_R(\omega)$.

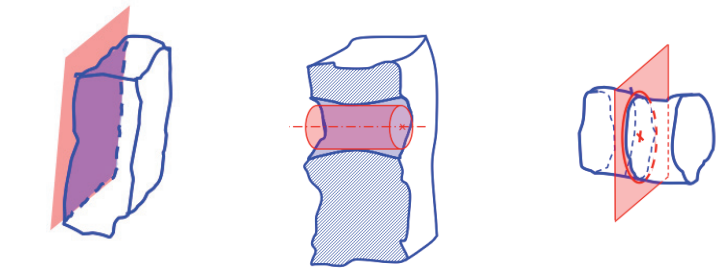
Le filtre de profil linéaire de type gaussien du fait de sa propriété de transmission gaussienne, s'est développé ces dernières années en parallèle avec les technologies basées sur l'emploi du numérique. C'est le seul filtre actuellement normalisé pour les mesures de rugosité, d'ondulation et d'écart de forme. Ce filtre est également connu sous l'appellation filtre à phase [ISO 11562 1998]. Un des principaux avantages de ce filtre de profil est qu'il

ne crée pas de déphasages et ne produit pas de distorsions dissymétriques du profil, contrairement au filtre traditionnel RC. Le filtre RC (encore appelé 2CR ou 2RC, parce que constitué de 2 filtres analogiques RC en série) était décrit dans la norme ISO 3274 de 1998. Ces filtres sont historiquement les plus anciens. Ils se trouvent sur les appareils d'atelier d'ancienne génération encore en service. Néanmoins, le filtrage électrique de type RC n'est toléré que pour le calcul des paramètres Ra et Rz, car l'influence des distorsions est en générale négligeable pour ces deux paramètres. Leur emploi tend à disparaître au profit des filtres à phase, à cause des problèmes de type "électrique.

Association

L'opération appelée association est une opération permettant d'identifier des éléments idéaux par rapport à des éléments non idéaux selon des critères. Les éléments associés et les critères peuvent être simples : l'association d'un plan selon les moindres carrés (Gauss) ou selon le minimax (TChebychev), l'association d'un cylindre selon le critère de diamètre maximum inscrit ou minimum circonscrit par exemple... D'autres associations peuvent être complexes, avec plusieurs éléments associés simultanément avec des contraintes par rapport à des éléments idéaux déjà identifiés : association d'un ensemble de droites à des lignes médianes (ou élément dérivé) en position théoriquement exacte entre elles et perpendiculaires à un plan.

Considérons le cas d'une surface nominalement plane où cette opération permet d'associer un plan. L'association fait le lien entre la surface et le plan. Pour ce dernier, le nombre fini de propriétés est inférieur au nombre de propriétés du plan nominal. En ce sens, cette opération est similaire à un filtrage un peu particulier.



Plan extérieur matière minimisant la plus grande distance | Cylindre inscrit de diamètre maximal | Cercle circonscrit de diamètre minimal

figure 3.11 – Exemple d'associations

En métrologie tridimensionnelle, l'association consiste à « ajuster » des éléments géométriques idéaux à un ou plusieurs ensembles de points avec un point de vue particulier lié au critère d'association. En général, l'ajustement de données expérimentales a pour objectif de filtrer les erreurs de mesure. Par exemple, avec cet objectif, Golub utilise la décomposition en valeurs singulières pour réaliser un ajustement aux moindres carrés [Golub 1996]. En métrologie, les écarts des points par rapport au modèle nominal sont essentiellement dus aux défauts de fabrication et non aux erreurs de mesure des points. L'objectif n'est donc pas de filtrer ces erreurs, mais d'associer des éléments liés au comportement de la pièce avec ces défauts. Ainsi, la mise en position d'une pièce par

rapport à des pièces voisines peut être simulée par des surfaces tangentes, extérieures à la matière. A cause de cet aspect fonctionnel, et non pas métrologique, l'association couvre de nombreux besoins, avec des critères plus ou moins complexes. Les éléments associés peuvent être :

- des éléments simples (droite, cylindre, sphère, cercle, surface gauche…) ;
- des éléments composés (collection d'éléments simples), sans propriétés quantitatives (caractéristiques) variables entre eux (deux plans parallèles distants, un groupe de cylindres régulièrement répartis sur un cylindre…), ces éléments sont nominalement définis entre eux par un « motif » ;
- des éléments composés avec des propriétés quantitatives (caractéristiques) variables entre eux (deux plans parallèles avec une distance variable, un plan et un cylindre parallèles avec une distance variable…), le « motif » possède des paramètres intrinsèques variables.

Selon la fonction spécifiée et vérifiée, le critère peut être :

- les moindres carrés (plan des moindres carrés, cercle des moindres carrés…) ;
- un minimum, maximum ou minimax (critère minimax, cercle inscrit de diamètre maximal…) ;
- un critère avec des contraintes (plan des moindres carrés perpendiculaire à un autre plan, cylindre inscrit de diamètre maximal perpendiculaire à une droite…).

Le critère est composé de contraintes et d'un objectif comme pour l'optimisation en mathématique. Il est énoncé à l'aide des propriétés. Une contrainte est une équation ou une inéquation portant sur une propriété, un objectif est directement une propriété quantitative.

De nombreux travaux sur l'association d'éléments simples [Bourdet 1976], [Bourdet 1984], [Bourdet 1988] ont conduit à des algorithmes robustes [Anthony 1984], [Forbes 1989]. Différents critères ont été abordés : Tchebychev [Bourdet 1987], [Goch 1982], [Goch 1990], [Goch 2008], [Lotze 1986], [Shunmugam 1987], [Tsukada 84], [Tsukada 85], plus grande ou plus petite distance [Bourdet 1987], [Goch 2008], somme des distances [Shunmugam 1987]. Des bases de données de points ont été diffusées pour servir de référence pour des intercomparaisons [Wäldele 1993] et des logiciels de référence ont été développés [Anthony 1996] [Diaz 1995] [Shakarji 1998].

Nous pouvons conclure que l'opération d'association peut être définie avec rigueur au travers de l'expression des contraintes et de l'objectif. La définition d'une opération d'association est donc robuste. De plus, pour la métrologie, il existe de nombreux algorithmes pour la résolution des problèmes d'optimisation qui en découlent. Ces algorithmes répondent à la plupart des cas rencontrés en spécification géométrique.

Reconstruction (interpolation)

L'opération appelée reconstruction est une opération créant un élément continu (fermé ou non) à partir d'un élément non continu, un élément extrait par exemple (fig. 3.12).

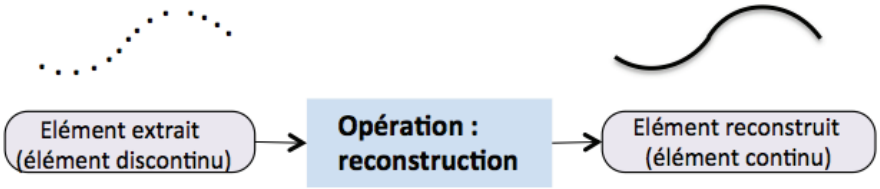


figure 3.12 - Opération de reconstruction

L'élément reconstruit doit si possible être reconstruit sans perte d'information à partir de l'élément extrait. Cette notion de perte d'information dépend essentiellement de l'échantillonnage discret définissant l'élément extrait. La reconstruction est réalisée par interpolation et consiste en la construction d'une courbe à partir des points de l'élément extrait. L'élément géométrique obtenu par la reconstruction passe par les points de l'élément extrait et suivant le type d'interpolation, il vérifie des propriétés supplémentaires. Le type d'interpolation le plus simple est l'interpolation linéaire qui consiste à « associer » un segment rectiligne à deux points contigus. Il existe différents types d'interpolation : linéaire, cubique, cosinus, polynomiale.

L'intersection entre un élément extrait et un élément idéal qui est continu est impossible en l'état. En effet, l'élément extrait est un élément discontinu. Il est donc nécessaire de procéder à une reconstruction de l'élément extrait sans perte d'information afin de le rendre continu, permettant ainsi l'intersection entre les deux éléments.

Si la reconstruction peut être assimilée à une forme d'association quant à la continuité entre les points, les points extraits restent les éléments de base de l'élément reconstruit. Ce constat conduit à exclure l'approximation de fonction qui consiste à chercher la fonction la plus proche possible d'une fonction donnée selon certains critères. Il n'est généralement pas imposé de passer par les points de l'élément extrait.

L'interpolation étant bien développée d'un point de vue mathématique, l'opération de reconstruction est également bien maîtrisée. Comme pour d'autres opérations, la difficulté essentielle est de bien choisir le modèle d'interpolation en fonction du besoin.

Réduction

L'opération appelée réduction est une opération utilisée pour établir un élément dérivé par une méthode de calcul. Cette opération permet de réduire le nombre de propriétés quantitatives (caractéristiques). Ainsi le cylindre peut être identifié par les propriétés quantitatives : propriétés de situation de l'axe et diamètre. Le résultat de l'opération de réduction appliquée au cylindre permet d'identifier son axe, les propriétés quantitatives sont alors réduites aux propriétés de situation de l'axe, sans le diamètre (fig. 3.13).

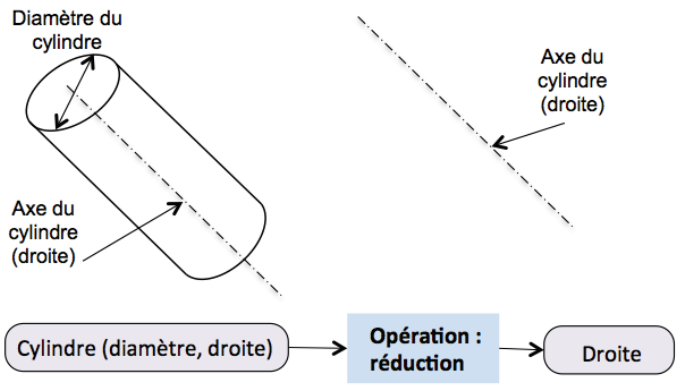
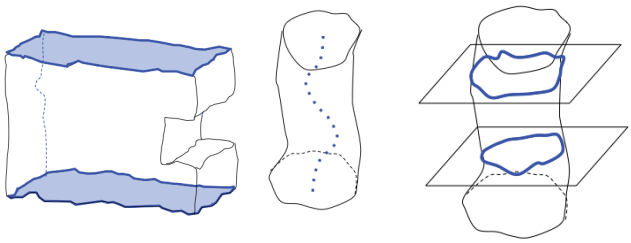


figure 3.13 - Opération de réduction

Collection

L'opération appelée collection est une opération permettant de former un élément géométrique à partir de plusieurs autres éléments géométriques. Le nombre d'éléments qui rentrent dans la collection peut être fini ou infini (fig. 3.14).



Collection de deux surfaces nominalement planes et parallèles

Collection d'un nombre infini de centres de sections

Collection des sections d'une surface nominalement cylindrique.

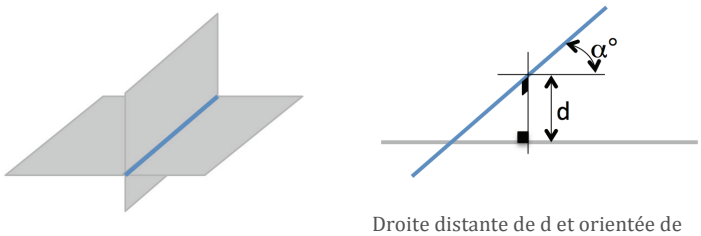
figure 3.14 – Exemple de collections

Lorsque le nombre d'éléments est fini, l'opération de collection conserve la distinction des éléments constitutifs, c'est-à-dire que chacun des éléments peut être identifié individuellement. Pour un nombre infini d'éléments comme dans le cas de l'axe médian (centres de sections), il n'y a pas de distinction des éléments.

Construction

L'opération appelée construction est une opération permettant de construire un ou plusieurs éléments idéaux, à partir d'autres éléments idéaux. La construction peut être simple : la construction d'un plan perpendiculaire à une droite et passant par un point, la construction d'un point intersection d'un plan et d'une droite... D'autres constructions peuvent être complexes, avec plusieurs éléments construits simultanément : construction d'un ensemble de droites réparties sur un cylindre avec un calage angulaire par rapport à un plan.

La construction est définie par un critère composé uniquement de contraintes d'égalité. Les contraintes sont des équations portant sur des propriétés sur les éléments géométriques déjà identifiés et en cours de définition (fig. 3.15).



Droite intersection de deux plans

Droite distante de d et orientée de α° par rapport à une droite

figure 3.15 – Collection de 4 cylindres de même diamètre

La construction peut être vue mathématiquement comme un cas particulier d'association. En effet, la construction est une opération d'association pour laquelle le critère ne contient pas d'objectif, mais seulement des contraintes d'égalité. Ces opérations sont néanmoins distinguées, car leurs objectifs sont différents. L'objectif de l'association est de remplacer des éléments non-idéaux par des éléments idéaux, alors que l'objectif de la construction est de définir de nouveaux éléments idéaux qui ne sont pas rattachés directement à des éléments non-idéaux.

L'opération de construction est aussi une opération bien maîtrisée.

Évaluation

Une opération a été ajoutée afin de définir et d'évaluer une propriété. La propriété porte sur les éléments définis grâce aux opérations précédentes, à partir du « skin » modèle. Cette propriété peut-être une propriété de base ou une propriété dérivée.

Il faut noter qu'une propriété dérivée est elle-même définie par un opérateur dont la dernière opération est l'évaluation d'une propriété plus basique.

3.2.2 SYNTHESE SUR LES OPERATIONS GEOMETRIQUES

Cette partie va mettre en évidence les principaux points à retenir sur les opérations géométriques.

Expression de la sémantique des spécifications

Les opérations géométriques présentées permettent de décrire la sémantique des spécifications géométriques. Les opérations géométriques décrivent le processus définissant la propriété géométrique entre les éléments idéaux et non idéaux. Or, une spécification géométrique est une condition sur une propriété géométrique. Pour une spécification par zone, une localisation d'une surface plane par rapport à un plan par exemple (fig. 3.16), la propriété quantitative est la distance des points de la surface à un plan contraint en position.

L'ensemble des opérations décrites permet de définir les éléments géométriques identifiés à partir du « skin » modèle. Ces éléments géométriques sont nécessaires pour définir la propriété géométrique, la distance dans le cas de la figure 3.16.

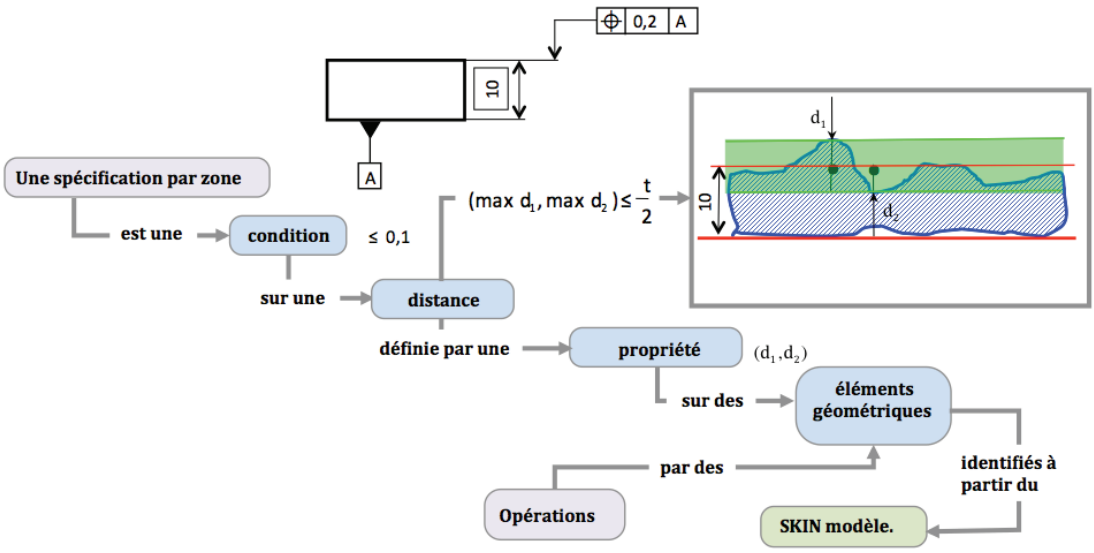


figure 3.16 - Les opérations dans le processus de spécification

Classification des opérations

Les opérations, au nombre de neuf, décrites dans la norme ISO 17450-1 ISO 17450-1 2011] peuvent être regroupées sous quatre classes d'opérations plus générales (fig. 3.17) :

- les opérations d'extraction, filtrage, réduction et association sont des opérations réduisant le nombre d'informations (restriction) ;
- les opérations de construction, de reconstruction et également d'évaluation créent de nouvelles informations (transformation) ;
- l'opération de partition permet de décomposer l'information (décomposition) :
- l'opération de collection permet de regrouper de l'information (logique).

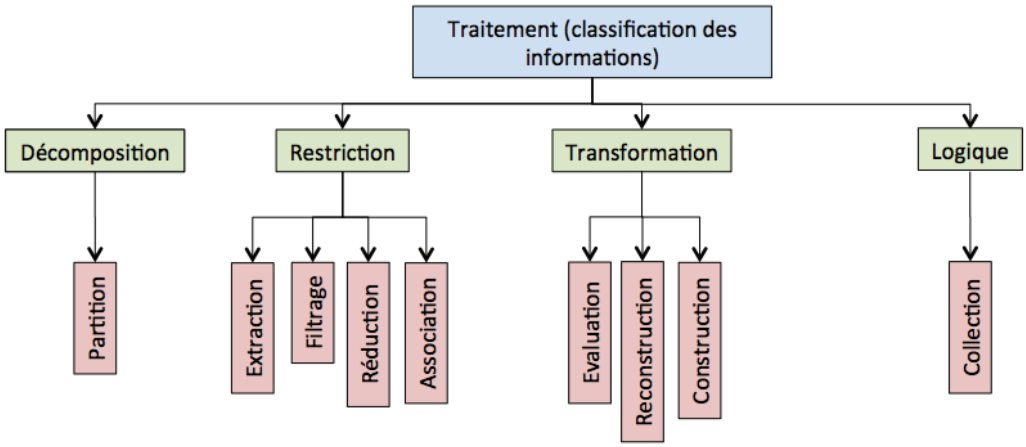


figure 3.17 – Synoptique des opérations GPS

Entrées/Sorties

De manière générale, une opération est une application entre des objets en amont de l'opérateur, nommés opérandes ou entrées, et des objets en aval de l'opérateur, nommés résultats ou sorties. Par

exemple, l'association d'un élément géométrique de type plan avec une surface nominalement plane met en œuvre une association (fig. 3.18) où l'entrée est la surface nominalement plane et la sortie est un plan. L'intersection entre deux plans possède deux entrées, deux plans et une sortie, une droite. Le nombre d'entrées et de sorties n'est pas défini a priori.

Cependant, cela ne suffit généralement pas, il faut indiquer également un critère. Pour l'association, cela se traduit par des contraintes et un objectif, par exemple une contrainte extérieure matière et un objectif minimax.

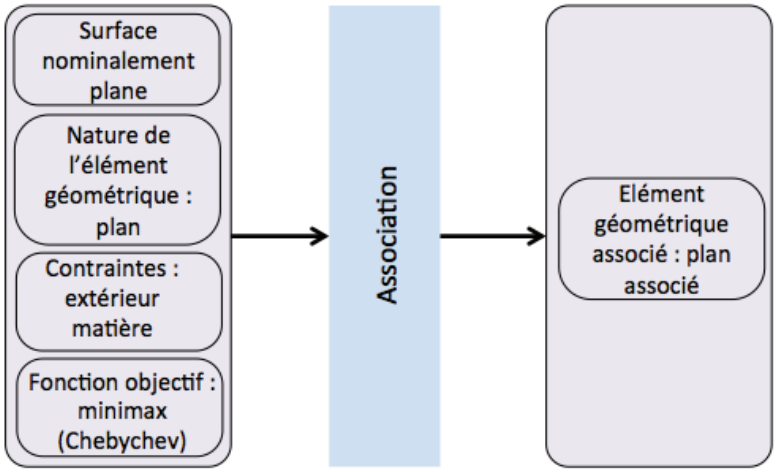


figure 3.18 - Opération d'association

Critère

La plupart des opérations demandent l'introduction d'un critère. Le critère peut prendre différentes formes selon l'opération : type de filtre et longueurs d'onde pour un filtrage, contraintes et objectifs pour une association, contraintes pour une construction… Ces critères portent eux-mêmes sur des propriétés des éléments, ainsi une contrainte pour une association, peut être sur l'angle entre deux plans.

Hopp [Hopp 1990] a dégagé un certain nombre de critères d'association d'un plan pour une surface nominalement plane, dont quelques exemples sont explicités ci-dessous :

- *plan, tel que la surface réelle (la feuille d'épaisseur nulle), sur laquelle est exercée une force gravitationnelle normale au plan et une force de réaction du plan, soit en équilibre*
- *plan tangent extérieur à la matière parallèle au plan défini selon le critère des moindres carrés*
- *plan défini selon le critère de Tchebychev sur tous les points de la surface réelle*
- *plan défini selon le critère de Tchebychev sur les points de la surface convexe minimale, extérieure à la matière*
- *plan tel que son déplacement angulaire maximal soit minimal*

En regardant les travaux d'un point de vue général, nous pouvons donner un ensemble de critères qui se dégagent. Cet ensemble de critères n'est évidemment pas exhaustif. Tout d'abord les critères d'association les plus couramment utilisés pour des applications en métrologie sont :

- *le critère des moindres carrés [Bourdet 1976], [Bourdet 1984], [Clement 76], [Anthony 1984], [Forbes 1989]*

- *le critère de Tchebychev [Bourdet 1987], [Lotze 1986], [Shunmugam 1987], [Tsukada 84], [Tsukada 85]*

Pour les critères moins courants :

- *Goch [Goch 1982] a travaillé sur l'utilisation de la somme des puissances p ième des distances à minimaliser afin d'exprimer le critère de Tchebychev en utilisant la limite de ce critère pour p infini*
- *Shunmugam [Shunmugam 1987] a utilisé la somme des distances à minimaliser.*

Le descriptif de tous ces critères met en évidence l'étendue importante des choix possibles de critères d'association d'un élément idéal à un élément réel. Aucune règle aujourd'hui ne nous renseigne sur les relations de ces critères avec les besoins fonctionnels.

3.3 EXTENSION AU COMPORTEMENT MECANIQUE

Le retour d'expériences concernant les opérations géométriques conduit à s'interroger sur leur transfert à des propriétés autres que géométriques, c'est-à-dire à des propriétés physiques au sens large.

De manière à prendre en compte des aspects matière ou comportement matière, il est nécessaire d'étendre la notion d'opération géométrique à des opérations sur les volumes, la matière, les champs...

L'objectif premier est de reprendre les opérations existantes, d'identifier les manques et de les compléter si nécessaire. Le besoin est illustré au travers de l'analyse de la mesure expérimentale des déformations d'un matériau et la détermination du module d'élasticité (module d'Young).

3.3.1 BESOINS

L'emploi d'une machine de traction disposant d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée illustre le processus expérimental. Cette machine est équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage.

figure 3.19 - Extensomètre (photo de Tinius Olsen)

Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN (fig. 3.19). Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette [Iso 6892-1

2009]. L'effort est exercé par l'entraînement en translation d'une des deux fixations.

Généralement, un extensomètre est fixé aux extrémités de la zone de mesure afin de mesurer des déformations. Ce signal est indispensable pour régler le déplacement de la traverse lorsqu'un essai de traction à vitesse de déformation constante est effectué par exemple, ce qui est le mode d'essai le plus usité. Comme alternative, le déplacement de la traverse peut être réglé de façon à ce que la contrainte de traction ou de compression augmente selon une fonction du temps prédéfinie (fatigue oligocyclique à amplitude de contrainte constante).

Aujourd'hui, l'informatique moderne permet à l'utilisateur de définir des fonctions à volonté. Elles sont stockées sous forme numérique ou calculées au fur et à mesure par un programme numérique. Le logiciel de contrôle se charge de presque toutes les tâches survenant lors d'un essai, du début jusqu'à la fin des mesures. Le rôle de l'utilisateur se réduit au choix du type d'essai à effectuer et à l'échange des éprouvettes. Après le choix du type d'essai, l'utilisateur doit entrer les paramètres particuliers pour l'essai prévu. Il s'agit notamment des valeurs pour la force ou le déplacement maximal, le nombre de cycles, ainsi que des paramètres qui déclenchent un arrêt automatique de l'essai. Avec ces informations, le programme numérique passe à l'initialisation de la machine de traction, des instruments de mesure utilisés pour les signaux reçus du capteur de force et de l'extensomètre (voltmètre digital, convertisseur analogue-digital).

Une vue plus détaillée d'une éprouvette illustre la prise par les mordaches (fig. 3.20) et l'ajout de l'extensomètre sur la droite de l'échantillon. Les extrémités de l'échantillon sont plus importantes au niveau de la prise de sorte que la rupture ne se produit pas près de ces pinces. En effet, une rupture près d'une des pinces n'apporterait pas l'information souhaitée sur la matière, car la répartition des contraintes n'est pas uniforme. Pour un échantillon bien conçu, la rupture se produira dans la partie prismatique de l'échantillon où la distribution des contraintes est uniforme lorsque l'éprouvette est soumise uniquement à la tension pure.

figure 3.20 - Eprouvette entre pinces avec un extensomètre à couteau attaché (photo de Courtesy of MTS Systems Corporation)

Quelles sont les opérations mises en œuvre pour ce mode expérimental ?

3.3.2 EXEMPLES D'OPERATIONS

Dans cet essai, la définition de l'éprouvette est normalisée [ISO 6892-1 2009]. Les extrémités de l'échantillon sont plus importantes au niveau de la prise de sorte que la rupture ne se produise pas près des pinces. La section transversale des éprouvettes peut-être circulaire, carrée, rectangulaire, annulaire, ou dans des cas particuliers, une autre section transversale uniforme], (fig. 3.21). Dans notre exemple, la section S_0 de l'éprouvette est rectangulaire.

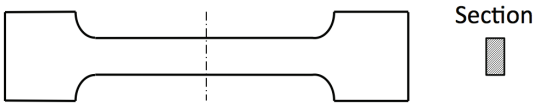
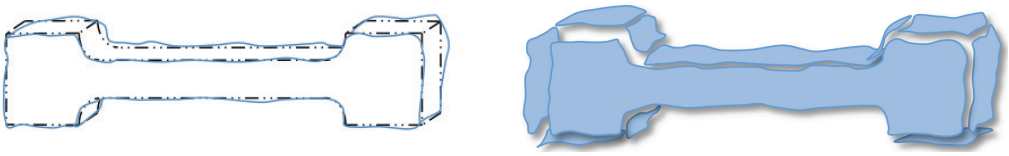


figure 3.21 - Eprouvette – section rectangulaire

La section de l'éprouvette reste constante durant cet essai, soit $S = S_0$. Cette hypothèse impose de définir une portion de l'éprouvette de section S_0. Cependant la définition normalisée de l'éprouvette est l'expression de son modèle nominal. Quelles sont les opérations nécessaires pour définir à partir du modèle primitif (fig. 3.22) les propriétés quantitatives de l'éprouvette ?

figure 3.22 – Modèle primitif de l'éprouvette

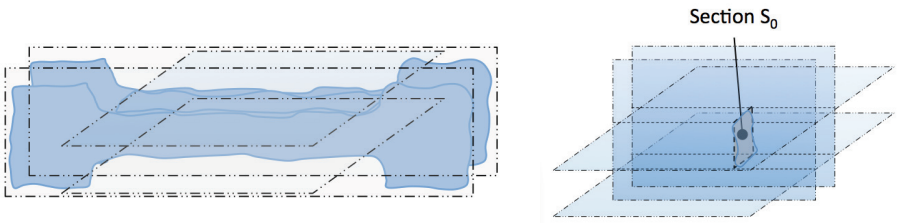
L'association du modèle nominal de l'éprouvette sur le modèle primitif (fig. 3.23a) permet de partitionner le modèle primitif (fig. 3.23b).



a - Association b - Partition

figure 3.23 – Opérations d'association et de partition

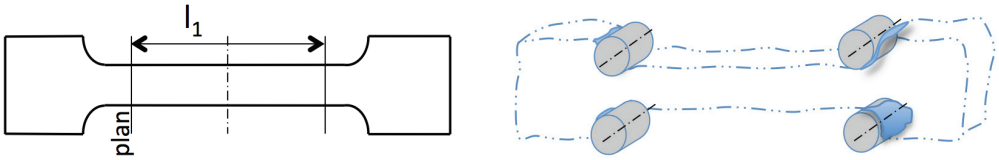
Cependant, afin de déterminer la section S_0, il est nécessaire d'associer des éléments géométriques aux quatre surfaces nominalement planes du corps de l'éprouvette. Ainsi, à chaque surface nominalement plane est associée un plan à l'aide d'un critère (fig. 3.24a). Les plans sont contraints à être parallèles deux à deux et perpendiculaires aux deux autres. La section transversale aux quatre plans associés détermine la surface S_0 (fig. 3.24b).



a - Plans associés b - Section S_0

figure 3.24 – Association – faces latérales

Afin de déterminer la longueur de la partie calibrée l_1 (fig. 3.25a), quatre cylindres sont associés aux quatre surfaces qui au nominal sont les rayons de raccordement. Ces cylindres sont contraints en orientation par rapport aux plans associés précédemment (fig. 3.25b).



a – Longueur de la partie calibrée

b – Opérations d'association

figure 3.25 - Longueur de la partie calibrée

Deux plans (Pl_1, Pl_2) sont obtenus par une opération de construction. Ils sont contraints en orientation à être perpendiculaires aux quatre plans précédents, ils passent par un des deux axes des cylindres de chaque extrémité. Ils doivent vérifier que leur distance l_1 est supérieure à une valeur minimale donnée (fig. 3.26).

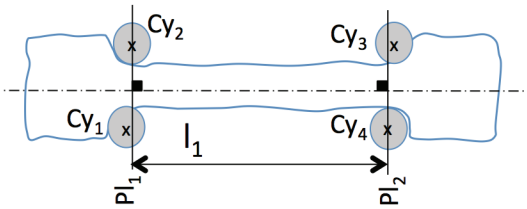
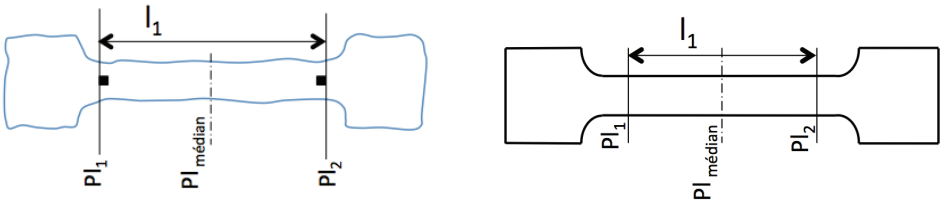


figure 3.26 – Construction de la longueur de la partie calibrée

Il est souvent nécessaire de déterminer un repère associé à l'éprouvette. Par exemple le plan médian peut être construit à partir des deux plans précédents (fig. 3.27a).



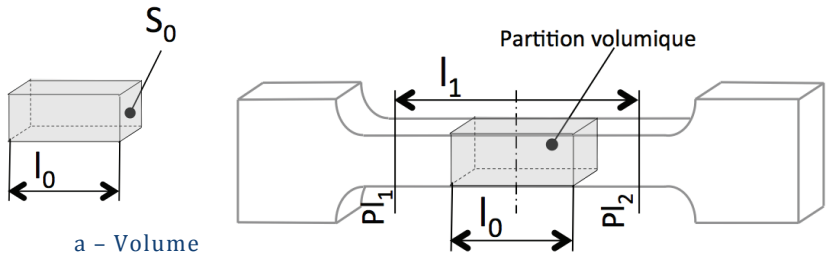
a – Opération de construction

b - Modèle nominal

figure 3.27 - Construction – plan médian

Lors de la détermination des propriétés du matériau, la prise en compte de son hétérogénéité constitue une difficulté majeure. Comme pour la partie géométrique, il est nécessaire d'idéaliser le matériau en le considérant comme « continu » en moyennant ses propriétés à une certaine échelle en fonction de la microstructure et des phénomènes physiques observés. Le volume sur lequel les propriétés sont moyennées est appelé volume élémentaire représentatif (VER) (fig. 3.28a). Il doit être suffisamment petit pour s'adapter au moyen de mesure et suffisamment grand pour pouvoir décrire le comportement moyen du matériau.

Ces hypothèses étant posées, le volume élémentaire représentatif peut être identifié par une opération de « partition volumique » sur le modèle nominal (fig. 3.28b).

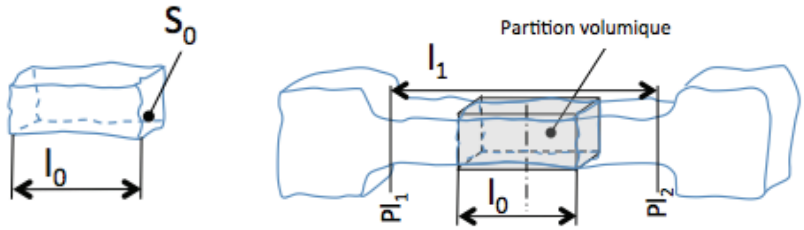


a – Volume élémentaire représentatif

b- Partition volumique

figure 3.28 – « Partition volumique » appliquée au modèle nominal

Mais cette opération de partition volumique doit être appliquée au modèle primitif de l'éprouvette (fig. 3.29a).



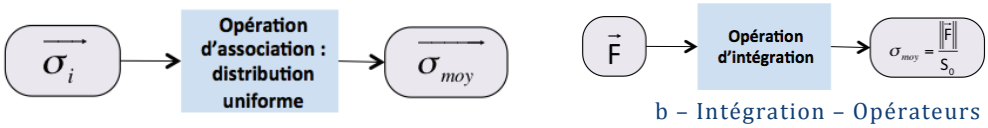
a – Volume élémentaire représentatif

b- Partition volumique

figure 3.29 – « Partition volumique » appliquée au modèle primitif

La partition volumique est une opération sur les éléments géométriques. Cette opération est donc encore purement géométrique. L'élément VER est un volume dont les deux faces de section droite sont des surfaces idéales par la nature même du parallélépipède utilisé pour la partition.

Le module d'Young longitudinal est déterminé par un essai de traction. L'élément (VER) est sollicité en imposant un chargement axial normal à la section droite de celui-ci. La distribution détaillée de la contrainte est statiquement indéterminée. Le choix d'associer à cette expérimentation un modèle de distribution uniforme de la contrainte (fig. 3.30a) est une hypothèse considérant le comportement réel de l'éprouvette comme proche du comportement lié à une sollicitation moyenne homogène (fig. 3.31). Cet aspect définitionnel du VER est l'expression d'une opération de l'opérateur de spécification. Cependant, l'opérateur de vérification pose la question de l'orientation et de la position du VER par rapport au moyen mis en œuvre dans cette expérimentation et à la direction des actions mécaniques (fig 3.30b).



a – Association – Opérateur de spécification

b – Intégration – Opérateurs de spécification et de vérification.

figure 3.30 – Association cas d'un modèle uniforme - Intégration

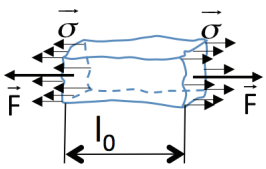


figure 3.31 – Chargement centré

Les couteaux de l'extensomètre (fig. 3.20) sont initialement distants de la longueur l_0 participant à la définition du VER. Tout au long de l'expérimentation, la longueur mesurée varie sous l'action de la charge. Les couteaux de l'extensomètre participent à une opération de partition (fig. 3.32).

figure 3.32 – Opération de partition volumique

3.3.3 EN SYNTHESE.

Les opérations sur des éléments géométriques sont appliquées à l'expérimentation sur la mesure des déformations d'un matériau et la détermination du module d'élasticité (module d'Young). Au travers de ce processus expérimental, les opérations : construction, partition, association sont appliquées en l'état.

Afin de définir le VER, il est nécessaire de définir les critères géométriques pour l'opération de partition volumique pour étendre son application aux volumes avec les contraintes locales normales à sa section droite. En réalité, cette partition géométrique n'est jamais physiquement réalisée, car la section est souvent mesurée au pied à coulisse sans prendre en compte l'orientation de celle-ci. En effet, l'effet de l'incertitude sur cette mesure est négligeable sur le résultat de l'expérimentation.

L'association est une opération sur des éléments géométriques. Le choix d'un modèle de distribution uniforme pour ce processus expérimental est similaire à une opération d'association d'un modèle de comportement mécanique. Ainsi, cette opération d'association sort du cadre strict des éléments géométriques.

L'ensemble des opérations ordonnées de ce processus expérimental forme un opérateur (fig. 3.33).

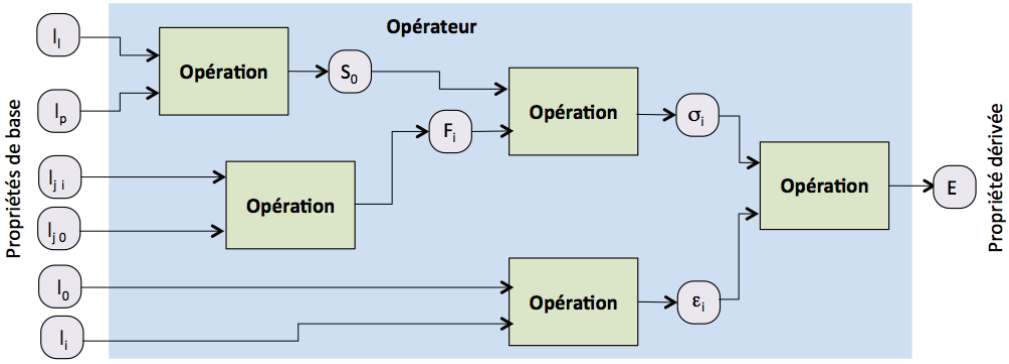


figure 3.33 – Opérateur, E (module d'Young)

3.4 OPERATIONS PHYSIQUES

Entre les opérations géométriques et les opérations associées au comportement mécanique, il apparaît des préoccupations communes. Cependant, dans le domaine de la physique, les besoins de décrire des comportements, d'appliquer des lois de conservations ou de caractériser des variations (flux) conduisent à identifier, modifier des opérations existantes ou à en définir de nouvelles.

En partant de la classification des opérations géométriques en quatre grandes classes, nous allons essayer de poursuivre en ce sens pour les opérations physiques. Les opérations permettant de décomposer l'information en plusieurs parties sont des opérations dites de décomposition. Les opérations qui réduisent l'information sont appelées opérations de restriction. Les opérations qui permettent de créer de l'information et de la transformer sont appelées opérations de transformation. Enfin, les opérations permettant de rechercher des informations communes, complémentaires ou encore de regrouper des informations sont des opérations de type booléen (fig. 3.34 et 3.35).

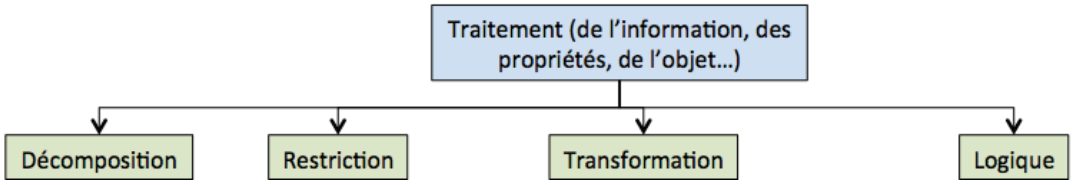


figure 3.34 – Classes d'opérations

Opération	Sous opération	Champ d'application
Traitement (de l'information, des propriétés, de l'objet...)	Décomposition (de l'information, des propriétés, de l'objet ...)	Permet de définir le domaine de l'étude
	Restriction (de l'information, des propriétés, de l'objet...)	Permet de réduire l'information afin d'en retenir qu'une part.
	Transformation (de l'information, des propriétés, de l'objet...)	Permet de transformer les informations, les propriétés ou les objets.
	Logique (de l'information, des propriétés, de l'objet...)	Permet de faire des opérations booléennes.

figure 3.35 – Description des classes d'opérations

Dans les paragraphes suivants, un certain nombre d'opérations appartenant à ces quatre classes sont présentées ; cependant, nous n'avons pas la prétention de définir une liste exhaustive d'opérations, ni une décomposition univoque en paquets. Par exemple, la construction est une opération géométrique définie dans la norme ISO 17450-1 [ISO 17450-1 2011] qui a un sens du point de vue de la spécification géométrie, mais qui en dehors de ce contexte est très vague. En effet, l'acception donnée au terme construction peut englober l'ensemble des champs des mathématiques et de la physique.

Dans la fin de ce chapitre, nous allons reprendre chaque classe d'opérations, la détailler et l'illustrer.

3.4.1 DECOMPOSITION

L'opération de «décomposition» (fig. 3.36) permet de définir un domaine ou espace d'étude. Le choix de la dimension de cet espace peut conduire à limiter ou à augmenter la région où se trouvent les informations à considérer et les actions à mener. En complément de la décomposition, il est possible d'appliquer d'autres opérations. Par exemple, pour limiter les informations contenues dans ce domaine il est possible d'appliquer une opération de restriction.

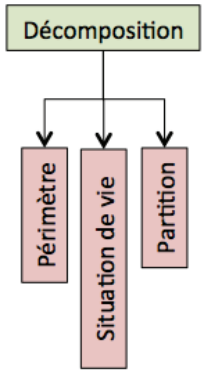


figure 3.36 - Décomposition

Périmètre

La définition du périmètre d'un produit est l'une des premières phases d'un projet. Elle permet de définir ce qui sera à l'intérieur du produit et ce qui sera à l'extérieur de celui-ci. Cette notion est essentielle, car elle aidera ensuite le concepteur à caractériser ce qui devra être fait au titre du contrat, ou du cahier des charges fonctionnel. Le périmètre du produit délimite les frontières du produit. Du point de vue des parties prenantes, il couvre la totalité des livrables y compris le produit. Ces livrables pourront faire l'objet d'évolutions et de modifications tout au long du cycle de vie du produit. Il importe donc de préciser dès le début ce qui sera et ne sera pas dans ce périmètre.

La définition du périmètre du produit a pour principal objectif de décrire les activités qui en font partie et les activités qui en sont exclues.

Situation de vie

Le cycle de vie est une succession de situations entre sa conception et sa fin de vie. Pour un besoin donné, il est nécessaire de déterminer les différentes situations de vie du cycle de vie à étudier (ainsi que les périodes transitoires entre celles-ci) et qui sont nécessaires à la définition du produit. La phase d'utilisation d'un produit n'est qu'une partie de son existence. L'utilisateur, en phase d'achat du produit, n'aura pas le même besoin qu'en phase d'utilisation, ou en phase de maintenance. La décomposition est dans ce cas temporelle.

Partition

Dans le cadre des spécifications géométriques, le concepteur partitionne le « skin » modèle pour « restreindre » le périmètre fonctionnel à un domaine où seules une ou des portions de la

surface de la pièce sont prises en compte. Pour le modèle nominal surfacique, le périmètre peut correspondre aux frontières d'un élément géométrique défini par les arêtes créées par les intersections des surfaces entre elles. Ainsi, la partition est utilisée pour identifier des éléments géométriques limités [ISO 17450-1 2011]. Nous avons déjà montré pour le « skin » modèle que la notion d'arête est plus délicate, car elle n'existe pas, mais l'idée de périmètre fonctionnel est là.

La partition peut être étendue aux volumes et à la matière présente dans ces volumes. Dans l'exemple de l'essai de traction, la définition de l'éprouvette est normalisée ; elle correspond par définition à un modèle nominal. Quel que soit le modèle primitif, le périmètre fonctionnel est limité par les deux faces de section droite. Par chacune de ces deux faces transitent les flux où la distribution détaillée de la contrainte est statiquement indéterminée. Entre les deux sections droites pouvant être qualifiées de surface entrante et de surface sortante, les flux circulent. La matière entre les deux sections est nécessaire à la propagation des flux. Dans cet essai de traction, le domaine d'étude est le «volume matière» situé entre les deux sections ou VER et l'opération de partition doit permet de l'isoler.

Le critère de partition peut-être purement géométrique, par exemple une surface correspondant à une surface particulière du modèle nominal ou un volume correspondant au VER. Cependant le critère peut être lié à des propriétés mécaniques.

Ainsi, la partition d'une surface peut être définie en fonction d'un critère de dureté de la surface, la « partition surface 250 HB » définit l'ensemble des portions de surface où la valeur de la dureté superficielle du matériau est supérieure à 250 HB (dureté Brinell). La « partition volume 210 GPa » est également une opération de décomposition, mais sur un volume où la valeur du module d'Young du matériau est supérieure à 210 GPa.

Synthèse

La décomposition est une opération ayant pour principal objectif de définir le domaine dans lequel les activités sont menées (fig. 3.37).

Opération	Sous opération	Champ d'application
Décomposition	Périmètre de l'étude du produit	Le critère d'application est le champ d'application du projet étudié
	Situation de vie	Le critère d'application est la situation de vie étudiée du produit.
	Partition	Le « critère » d'application est la géométrique définissant la délimitation de la « surface » ou du « volume ».

figure 3.37 - Opération périmètre fonctionnel

3.4.2 RESTRICTION

L'opération de restriction permet de réduire le nombre de propriétés, ou d'informations, par une sous-opération de filtrage, d'échantillonnage, ou d'approximation (fig. 3.38).

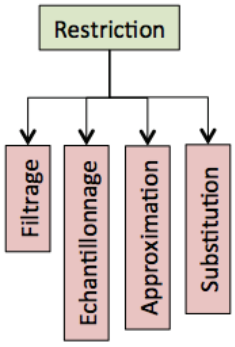


figure 3.38 - Opération de restriction

Filtrage

Le filtrage est une opération permettant de ne retenir qu'une part des informations d'un élément physique. Le type de filtre et les critères de filtrage sont nécessaires pour déterminer les informations de l'élément retenues afin de définir une solution unique. Il existe de nombreux filtres mécaniques, numériques…

Echantillonnage

L'échantillonnage est une opération permettant la sélection d'une partie dans un tout. Par rapport au filtrage, il n'y a pas transformation de l'information, mais uniquement sélection d'une partie de l'information existante.

Typiquement en géométrie, cette opération s'applique aux différentes surfaces ayant les géométries nominales : sphérique, plane, cylindrique, de révolution, prismatique hélicoïdale et complexe. Pour une surface, l'échantillonnage consiste à identifier un ensemble de points particuliers. Ainsi pour une surface cylindrique, il existe plusieurs stratégies d'échantillonnage selon le lieu des points retenus dont les dénominations sont normalisées (cage, spécifiée, stratifiée, hélicoïdale, par points …) Pour un élément géométrique, cette opération est appelée extraction dans la norme ISO 17450-1 [Iso 17450-1 2011].

D'un point de vue plus général en mécanique, l'échantillonnage est toute sélection d'information dans l'espace ou dans le temps. L'échantillonnage traduit bien les stratégies de prise de mesure : déformation, température, vitesse en différents points d'une pièce, d'un ensemble mécanique. En réalisant l'échantillonnage, on obtient une certaine connaissance du système étudié, mais pas toute l'information, car l'information identifiée dans l'espace ou dans le temps est toujours finie. Il existe un certain nombre de théorèmes sur l'échantillonnage qui relient la quantité d'information perdue avec la stratégie d'échantillonnage, le théorème de Nyquist par exemple.

Approximation

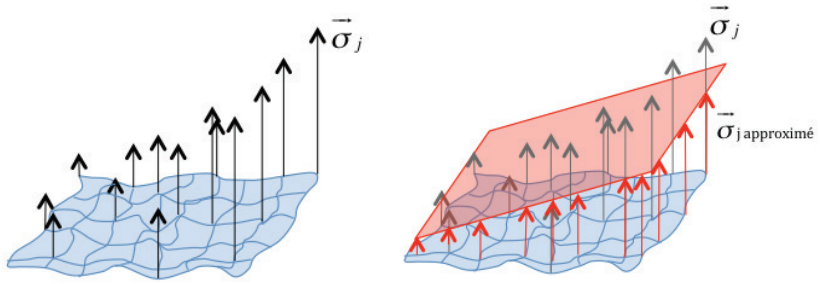
L'approximation est une opération permettant d'associer un modèle idéal à un ensemble fini ou infini de points. Le modèle associé peut être défini sans passer par un des points du modèle initial suivant le critère et les contraintes de l'opération d'association. L'opération d'approximation permet de définir un modèle associé dont le nombre de paramètres est inférieur ou égal au nombre de paramètres du modèle initial.

Considérons une surface nominalement plane. L'opération d'approximation peut permettre d'associer un modèle de type plan à cette surface selon un critère donné afin de réduire le nombre des informations de la surface nominalement plane en les réduisant aux informations du plan associé. Cette opération d'approximation sur une surface nominalement plane est l'opération d'association définie par la norme ISO 17450-1 [Iso 17450-1 2011]. Cette opération est proche d'une opération de filtrage.

Pour un contact entre deux surfaces planes de deux solides, un modèle de répartition de pression linéaire est également une approximation qui est très similaire à l'association en géométrie, avec un critère des moindres carrés par exemple.

Pour le module d'Young longitudinal, un modèle de distribution uniforme de la contrainte a été considéré dans la partie précédente. Il s'agit d'une approximation avec en sortie la valeur moyenne de la distribution des contraintes. C'est bien une opération de restriction d'information liant la distribution détaillée de la contrainte à la contrainte moyenne.

Dans tous les mécanismes, la transmission des efforts en fonctionnement se fait par l'intermédiaire des surfaces de liaison. Le modèle de répartition de pression de contact (fig. 3.39a) entre les deux surfaces planes peut être appoximé par un modèle de répartition linéaire (fig. 3.39b), par exemple.



a – répartition de pressions de contact non linéaire

b – modèle de répartition de pressions de contact linéaire

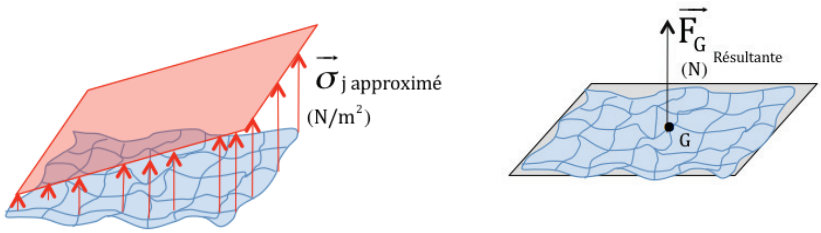
figure 3.39 – Approximation

Substitution

Considérons une surface géométrique telle qu'un cylindre. Un objet de type cylindre est identifié par les propriétés quantitatives de situation de son axe et de dimension intrinsèque. L'opération de substitution permet de restreindre cet objet à son élément de

situation, son axe. Cette opération peut être également utilisée pour établir un élément dérivé par une méthode de calcul.

Par exemple, dans le cas précédent, le modèle de répartition linéaire de pression de contact (fig. 3.40a), peut être substitué par un modèle correspondant à une force résultante (fig. 3.40b), en un point G barycentre des pressions de contact approximées.



a – modèle de répartition de pressions de contact linéaire

b – modèle de répartition de pressions de contact linéaire

figure 3.40 – Substitution

Synthèse

La restriction d'informations est une opération permettant de limiter ou de sélectionner les informations ou les propriétés requises (fig. 3.41). Cependant, la réduction de l'information, le choix de quelques propriétés parmi un ensemble suppose de filtrer l'information à partir de critères. Ce filtrage implique généralement un échantillonnage discret, c'est-à-dire un nombre fini de points pour un élément surfacique extrait par exemple.

Opération	Sous-opération	Champ d'application
Restriction d'informations	Filtrage	Cette opération permet de sélectionner des types d'information suivant un critère.
	Echantillonnage (extraction)	Cette opération permet de sélectionner les informations en un nombre réduit de points selon une stratégie. .
	Approximation (association)	Cette opération permet d'approximer ou d'homogénéiser l'ensemble des informations suivant un critère
	Substitution	Cette opération permet de modifier les types d'information suivant un critère.

figure 3.41 - Opération restriction d'informations

3.4.3 Transformation

L'opération de transformation doit permettre de répondre aux besoins de décrire des comportements, d'appliquer des lois de conservation et de caractériser des variations (flux) dans le domaine de la physique (fig. 3.42).

Une loi physique peut être un lien entre les propriétés qui décrivent un phénomène physique. La loi des gaz parfaits, PV = nRT, relie directement les trois propriétés pression, volume et température.

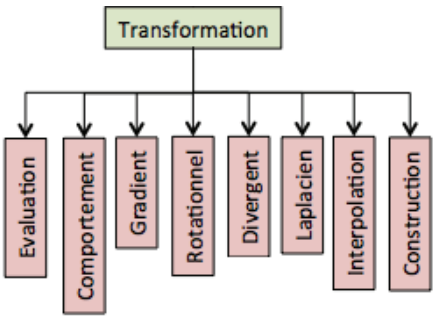


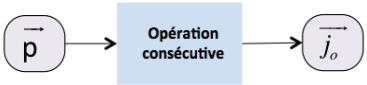
figure 3.42 - Opération de transformation

Évaluation

L'évaluation est une opération permettant de définir et d'évaluer une propriété. La propriété porte sur les éléments définis à partir des différentes opérations. Cette propriété peut être une propriété de base ou une propriété dérivée.

Comportement

Le comportement est une opération permettant d'établir une équation de comportement ou une loi de comportement définissant un rapport entre deux propriétés quantitatives duales (fig. 3.43a). Le produit de ces propriétés est homogène à une énergie. Dans cette opération, les champs de tenseurs en entrée et en sortie sont du même ordre.



a – Opération de comportement

$\vec{j_o} = -\lambda \vec{p}$ où λ est la conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$

b – Conduction thermique

figure 3.43 – Opération de comportement

Loi de Fourier

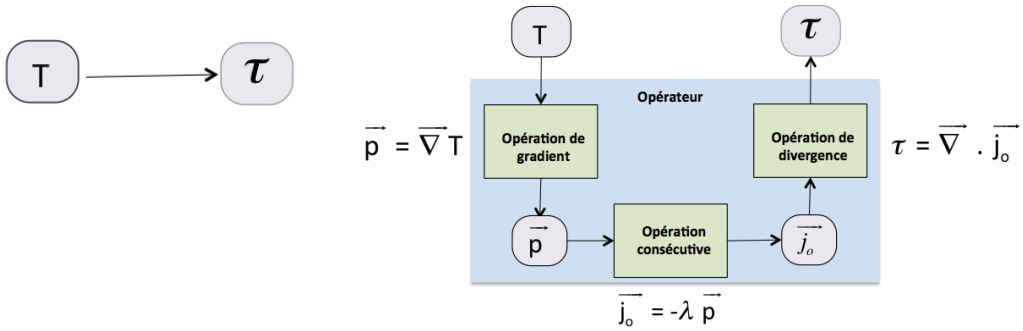
La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse. La conduction thermique est établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1824.

En physique et en ingénierie, une équation de comportement ou une loi de comportement est un rapport entre deux propriétés quantitatives qui est spécifique à une matière ou un objet, et se rapproche de la réponse de ce matériel à des stimuli externes, généralement des champs de scalaires ou des champs de forces appliquées.

Changement d'ordre des tenseurs

Cependant, le lien entre deux propriétés quantitatives n'est pas forcément directement issu d'une opération constitutive et peut demander un changement d'ordre des tenseurs pour les propriétés mises en œuvre (fig. 3.44). Le lien entre le champ de température et le flux de la densité du courant thermique n'est pas un lien directement obtenu par une opération constitutive. Afin de faire le lien entre les champs, il est nécessaire de définir

des opérations de transformation. Parmi ces transformations, certaines permettent de modifier les ordres des tenseurs. Afin d'expliciter le lien entre les deux champs scalaires, l'opérateur de la figure 3.44b met en œuvre des opérations de transformation d'un champ de scalaire en un champ de vecteur et réciproquement.



a – Opération constitutive

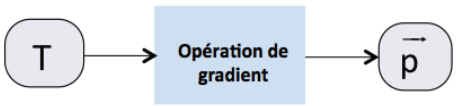
b – Opérateur

figure 3.44 - Le lien entre le flux de la densité de courant thermique (τ) et le champ de température (T)

La loi d'inductance d'un dipôle électrique, $u = L \frac{di}{dt}$, relie la tension à l'inductance et à la variation de courant en fonction du temps. Ces exemples montrent que, en général, le lien entre deux ou plusieurs propriétés quantitatives n'est pas direct, mais nécessitent la mise en place de dérivées temporelles ou de dérivées spatiales d'un scalaire ou d'un vecteur. Ainsi, avant d'écrire la relation que nous devons traiter, il est nécessaire d'effectuer un traitement sur une propriété pour en obtenir une autre. Parmi ces opérations, quatre sont décrites : le gradient, la divergence, le laplacien et le rotationnel. Dans le cadre de la simulation, la dérivée temporelle est une opération généralement utilisée ; elle n'est pas développée dans ce chapitre.

GRADIENT

Dans l'exemple de la figure 3.45b, le champ de température (T) peut varier dans l'espace et l'expression de cette variation est le champ de vecteur ($\vec{p}$). Ainsi, le gradient est une opération permettant de caractériser la variation d'un champ dans l'espace. Le champ de densité de flux de chaleur est alors proportionnel au champ de gradient de température (fig. 3.45b). Le gradient est une opération s'appliquant à tous les tenseurs (scalaire, vecteur, matrice) et permettant de passer d'un tenseur d'ordre p à un tenseur d'ordre p+1.



$\vec{p} = \overrightarrow{\text{grad}}\, T$ ou $\vec{p} = \vec{\nabla} T$

a – Opération de gradient

b – Variation de température dans l'espace

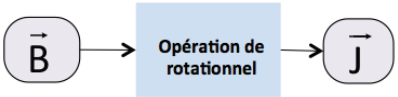
figure 3.45 - Variation de température au point considéré

Supposons un élément géométrique de dimension trois où l'ensemble des points appartient à une surface. En un point P de cette surface qui est régulière (au sens où le vecteur gradient ne s'annule pas), la surface admet un plan tangent au point P. Ainsi, le vecteur gradient est orthogonal à ce plan et son intensité correspond à la valeur de sa norme.

Cependant, cette opération gradient a des implications en physique où un champ vectoriel irrotationnel peut être identifié au gradient d'un potentiel scalaire (appelé énergie potentielle). Cet opérateur permet d'appréhender certains champs vectoriels sous un angle complémentaire, légitimant des abstractions essentielles comme en physique par exemple, car la force "dérive" de l'énergie potentielle. Ainsi, le gradient est un opérateur différentiel où la force est la dérivée de l'énergie potentielle. Il existe des exemples où en mécanique des fluides, le champ des vitesses d'un écoulement irrotationnel dérive d'un potentiel. Ou encore en électromagnétisme où le champ électrique dérive du potentiel électrique.

ROTATIONNEL

Un champ de courant électrique génère un champ magnétique, ce qu'a montré l'expérience historique d'Ørsted. Ainsi, ce champ magnétique tourne autour du champ de courant électrique et il est d'autant plus intense que le courant l'est. La première équation locale du champ magnétique (la forme locale du théorème d'Ampère) met en relation (fig. 3.46) le champ magnétique (B), avec le champ du courant de densité (J) et la perméabilité magnétique (μ).



a – Opération de rotationnel

$$\vec{J} = \frac{\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{B}}{\mu} \quad \text{ou} \quad \vec{J} = \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{B}}{\mu}$$

b – Champ du courant de densité

figure 3.46 - Variation de température au point considéré

Le rotationnel est une opération différentielle (fig. 3.46b) qui, à un champ vectoriel ($\vec{B}$), fait correspondre un autre champ vectoriel ($\vec{J}$). Cette opération exprime la tendance qu'ont les lignes de champ d'un champ vectoriel à tourner autour d'un point ou d'un axe de rotation orienté de telle sorte que la rotation ait lieu par rapport à lui et dans le sens direct. En mécanique des fluides, la notion de rotationnel de la vitesse décrit une rotation de la particule fluide. Si l'écoulement est irrotationnel alors son rotationnel est nul en tout point.

LAPLACIEN

Dans certains problèmes de mécanique des fluides, par exemple l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion volant à vitesse modérée (régime subsonique), nous pouvons considérer que l'écoulement est stationnaire incompressible et irrotationnel. Soit une fonction de dimension 2, u(x1, x2), l'incompressibilité se traduit par l'opération gradient, $\overrightarrow{\text{grad}}\ .\ \vec{u} = 0$. Le fait que l'aile soit imperméable implique sur $\partial\Omega$ désignant le bord de l'aile, la

condition $n_1u_1 + n_2u_2 = 0$. Ainsi, il existe une fonction courant Φ dans Ω, nous obtenons $(\vec{u_1}, \vec{u_2}) = \overrightarrow{rot} \wedge \vec{\Phi} = (\partial x_2 \vec{\Phi}, -\partial x_1 \vec{\Phi})$. Or le fait que le fluide soit irrotationnel entrîne la relation $-\Delta\vec{\Phi} = 0$, où Δ est le Laplacien conduisant à traiter des problèmes aux limites. De là, nous pouvons donner une interprétation à un certain nombre d'équations classiques de la physique.

- Le laplacien $\Delta u = 0$ traduit le fait que la solution est toujours égale à sa moyenne prise sur un voisinage. Par exemple, la hauteur d'une membrane attachée par son bord satisfait l'équation de Laplace. Ceci traduit le fait que la hauteur de la membrane en un point est toujours égale à la moyenne des hauteurs sur un petit cercle centré en ce point.

- L'équation de la chaleur $u'_t = \alpha^2 \Delta u$ décrit l'évolution d'un champ de température. Elle peut s'interpréter comme le fait que la variation de température $u'(x, y)$ au point de coordonnées (x, y) est proportionnelle à $\Delta u(x, y)$, c'est-à-dire à la concavité de la membrane au point de coordonnées (x, y). Ainsi, si $u(x, y)$ est inférieur à la moyenne de u dans un voisinage de (x, y), alors la température en ce point va augmenter.

DIVERGENCE

L'analyse du principe fondamental de la statique local permet d'écrire l'équation d'équilibre sur un parallélépipède infiniment petit qui a pour origine le point M du solide (fig. 3.47). Les arêtes du parallélépipède s'appuient sur les axes du repère (M, x_1, x_2, x_3), dont les longueurs sont respectivement (dx_1, dx_2, dx_3). Soit f la force par unité de volume qui s'applique sur cet élément. Suivant une direction donnée $\vec{e_1}$ par exemple, la projection de l'équation d'équilibre de ce parallélépipède sous l'action de la force de volume f et des forces de contact appliquées par le reste du solide est $\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} + f_1 = 0$.

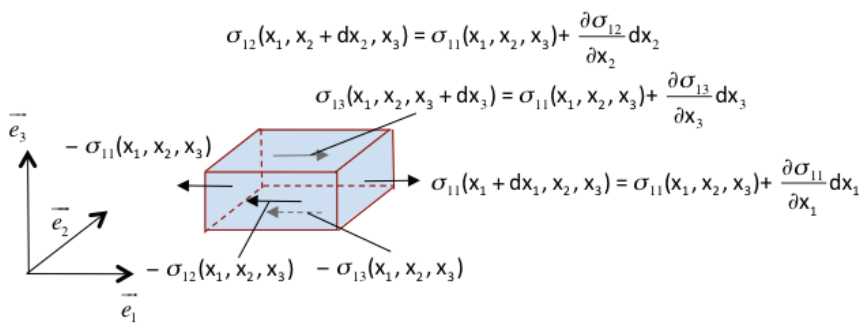


figure 3.47 – Equilibre d'un élément cubique

En écrivant les autres termes de l'équation d'équilibre en projection dans les directions $\vec{e_2}$, $\vec{e_3}$, les deux autres équations complétant le système d'équations d'équilibre sont :

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} + f_2 = 0$$

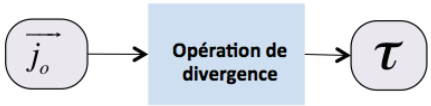
$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + f_3 = 0$$

Ce système d'équations scalaires peut s'écrire sous une forme vectorielle utilisée en mécanique des milieux continus :

$$\overline{Div} \,.\, \overline{\overline{\sigma}} + \bar{f} = \bar{0}$$

En raison de son utilisation dans les calculs de flux de champ de vecteurs, la divergence intervient en physique pour exprimer des lois de conservation ainsi que pour la formulation locale des lois physiques. La divergence est notamment utilisée dans les équations de la mécanique des fluides ou les équations de Maxwell. Elle s'applique à tous les tenseurs (scalaire, vecteur, matrice) et elle permet de passer d'un tenseur d'ordre p à un tenseur d'ordre p-1.

Par exemple, dans les transferts thermiques, les phénomènes de diffusion se manifestent lorsque, dans un milieu donné, existe une inhomogénéité de température. Il se crée alors un champ de courant thermique ($\overrightarrow{j_o}$ au point O) qui tend à uniformiser cette grandeur intensive même en l'absence de mouvement macroscopique du milieu. Le flux du champ densité de courant thermique ($\boldsymbol{\tau}$) est fonction du champ de courant thermique ($\overrightarrow{j_o}$) (fig. 3.48a).



$\boldsymbol{\tau} = \text{div}\ \overrightarrow{j_o}$ ou $\boldsymbol{\tau} = \overrightarrow{\nabla} \,.\, \overrightarrow{j_o}$

a – Opération de divergence

b – Flux de la densité de courant

figure 3.48 - Variation de température au point considéré

Interpolation

Dans le cas d'une information discrète, il peut être nécessaire d'augmenter le nombre de points sans changer la nature de la propriété de l'élément. L'interpolation consiste en une opération mathématique identifiant une courbe à partir de données discrètes. En géométrie, l'interpolation est nommée reconstruction dans la norme ISO 17450-1 [Iso 17450-1 2011]. Ainsi le type le plus simple d'interpolation est l'interpolation linéaire qui consiste à « associer » un segment rectiligne à deux points contigus. Cependant, il est à noter que la qualité de la reconstruction dépend essentiellement de la densité des données discrètes. Il existe différents types d'interpolation : linéaire, cubique, cosinus, polynomial.

L'interpolation doit être distinguée de l'approximation, qui consiste à chercher la fonction ou l'objet le plus proche selon les

critères retenus comme l'association d'un plan à un ensemble de points selon des critères.

L'interpolation est une opération permettant de définir un plus grand nombre fini (voire infini) de points à partir d'un nombre fini de points suivant un critère.

Construction

La construction est une opération permettant de définir un ou plusieurs objets idéaux, à partir d'autres objets idéaux. Cette opération est définie par un critère composé uniquement de contraintes. Les contraintes sont des équations portant sur des propriétés sur les éléments construits et des éléments idéaux d'entrée déjà identifiées. A ce stade de notre étude, cet opérateur n'a pas trouvé d'interprétation dans le domaine de la physique. Cependant, cette opération est définie dans le langage GeoSpelling.

Synthèse

La transformation d'informations est une opération permettant de modifier le type des informations ou les propriétés requises (fig. 3.49).

Opération	Sous-opération	Champ d'application
Transformation	Evaluation	Cette opération permet de définir et d'évaluer une propriété.
	Comportement	Cette opération permet de lier des propriétés quantitatives dont les tenseurs sont du même ordre.
	Gradient	Cette opération permet d'indiquer de quelle façon une propriété varie dans l'espace.
	Rotationnel	Cette opération permet d'exprimer la tendance qu'ont les lignes de champ d'un champ vectoriel à tourner autour d'un point ou d'un axe.
	Divergence	Cette opération permet de sommer des actions agissant sur un élément géométrique donc de faire des lois de conservation ou des bilans
	Laplacien	Cette opération permet de traiter des problèmes aux limites
	Interpolation	Cette opération permet de définir des valeurs de propriétés sur un domaine à partir de données discrètes.
	Construction	Cette opération permet de définir un ou plusieurs objets idéaux, à partir d'autres objets idéaux.

figure 3.49 - Opération restriction d'informations

3.4.4 LOGIQUE

La décomposition, la restriction ou la transformation des informations ou des propriétés sont des opérations permettant de délimiter l'espace dans lequel sont traités et transformés les informations. Cependant, il peut être nécessaire d'unir, d'intersecter, ou de complémenter des informations : objets ou propriétés.

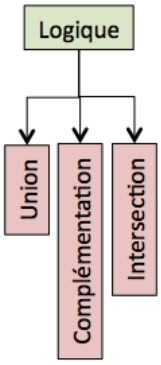
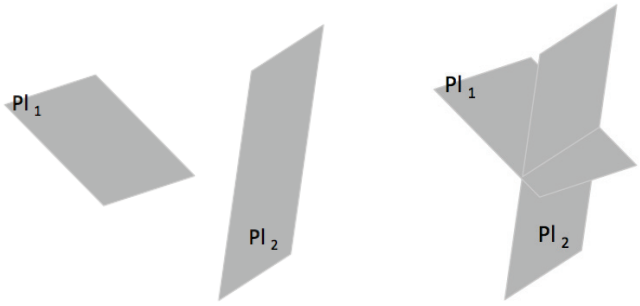


figure 3.50 - Opération restriction d'informations

A ce stade de notre étude, les opérateurs logiques n'ont pas trouvé d'interprétation dans le domaine de la physique.

Union

Supposons la collection de deux plans non nominalement parallèles (fig. 3.51a), chacun d'eux appartient à un type particulier. L'union de ces deux plans (fig. 3.51b) est un objet dont le type est différent. Ainsi, la classe d'invariance d'un objet de type plan est de dimension 3, et l'union des deux plans confère à cet élément géométrique un type différent dont la classe d'invariance est de dimension 1 [Iso 17450-1 : 2011].



a – Deux plans quelconques b – Union

figure 3.51 - Opération d'union

Complémentation

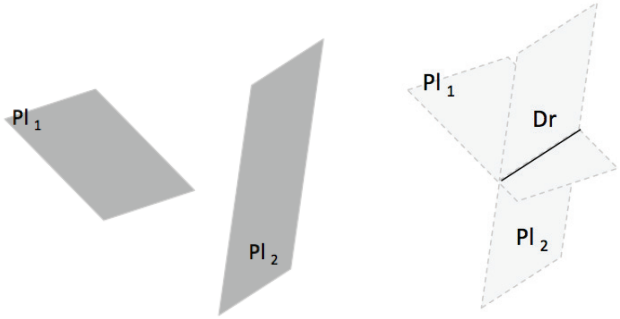
Supposons une surface de type plan dont la surface est tronquée par un disque (fig. 3.52a), chacun d'eux appartient à un type particulier. Le complément de l'objet (fig. 3.52b) est la surface disque.

a – Plan tronqué b – Complémentation

figure 3.52 - Opération de complémentation

Intersection

Supposons la collection de deux plans non nominalement parallèles (fig. 3.53a), chacun d'eux appartient à un type particulier. L'intersection de ces deux plans (fig. 3.53b) est un objet dont le type est différent. Ainsi, la classe d'invariance d'un objet de type plan est de dimension 3, et l'intersection des deux plans confère à cet élément géométrique, la droite, un type différent dont la classe d'invariance est de dimension 2 [ISO 17450-1 : 2012].



a – Deux plans quelconques b – Intersection

figure 3.53 - Opération d'intersection

Cette opération d'intersection recouvre en partie l'opération géométrique de construction définie dans la norme ISO 17450-1 [Iso 17450-1 : 2011].

Synthèse

La logique d'informations est une opération permettant de limiter ou de sélectionner les informations ou les propriétés requises (fig. 3.55).

Opération	Sous-opération	Champ d'application
Logique d'informations	Union	Cette opération permet de rassembler les informations de plusieurs objets en information sur un seul objet.
	Complémentation	Cette opération permet de définir des informations complémentaires par rapport à des informations initiales
	Intersection	Cette opération permet de définir un ensemble d'informations communes à plusieurs objets.

figure 3.55 – Opération logique d'informations

3.4.5 SYNTHESE

L'ensemble des opérations et des sous-opérations est synthétisé en figure 3.56. La liste de ces opérations n'est pas exhaustive.

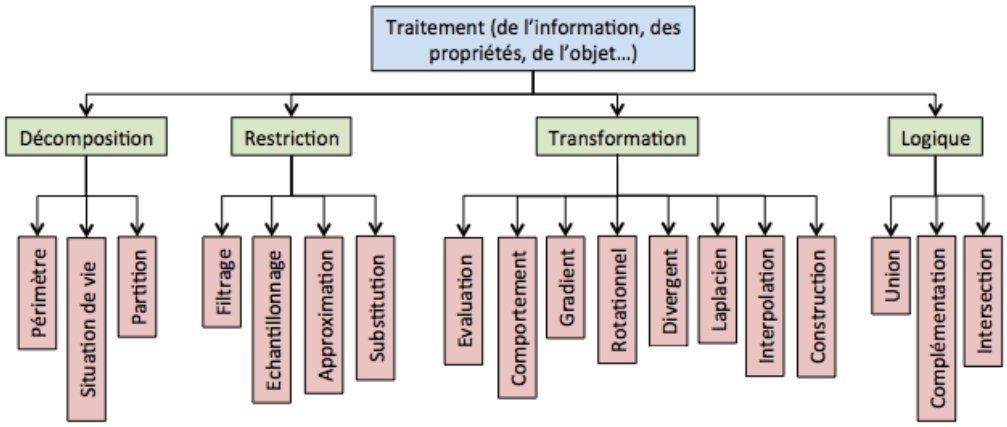


figure 3.56 – Synoptique des opérations

3.5 SYNTHESE

Le classement des objets de manière générique en types et sous-types contribue à définir leurs propriétés tant qualitatives que quantitatives. Ces propriétés sont des propriétés de base ou dérivés d'objets idéaux (modèles finis).

Les opérations et les opérateurs présentés définissent les propriétés dérivées d'objets imparfaits (modèles infinis). En effet, les propriétés de base sont intrinsèques, elles sont indépendantes de toute opération.

Si à la base, GeoSpelling a été développé autour de cinq opérations : partition, extraction, collection, association et construction alors cette liste a été complétée par la normalisation [ISO 17450-1 2011] et les nouvelles opérations sont les suivantes : filtrage, reconstruction, réduction et évaluation. La dernière opération a pour objectif d'associer une valeur de propriété à des éléments géométriques. L'ensemble de ces opérations permet de définir les éléments géométriques identifiés à partir du « skin » modèle. Ces éléments géométriques sont nécessaires pour définir la propriété géométrique. De cette analyse, les opérations peuvent être regroupées sous quatre classes plus générales (restriction, transformation, décomposition, logique) et constitue une base de réflexion où des opérations géométriques aux opérations associées au comportement mécanique, il apparaît des préoccupations communes. Cependant, dans le domaine de la physique, les besoins de décrire des comportements, d'appliquer des lois de conservation ou de caractériser des variations (flux) ont conduit à identifier, modifier des opérations existantes ou à en définir de nouvelles.

Une opération est une application entre des objets en amont de l'opérateur, nommés opérandes ou entrées, et des objets en aval de l'opérateur, nommés résultats ou sorties. Les opérateurs et les opérations servent à la manipulation des objets dans le processus de modélisation, comme nous le verrons au chapitre suivant.

4 PROCESSUS DE MODELISATION

Pour évaluer la faisabilité d'une solution, le comportement physique du système doit être simulé ou expérimenté en fonction de ses propriétés pertinentes. Ce chapitre propose un processus de modélisation en vue de la simulation du système en utilisant les concepts de description présentés dans les deux chapitres précédents.

Les premières phrases, les premières idées, sont rudimentaires, chaotiques, approximatives. À partir de ce premier matériau, il faut creuser et l'on creuse vers plus de clarté possible. Au fond du trou, il y a la clarté. On ne monte pas, on creuse ! La clarté est au fond.

Daniel PENNAC[4]

SOMMAIRE

4.1 Processus de modélisation et de simulation 93
4.1.1 Généralités 93
4.1.2 Dans la pratique 94
4.1.3 Synthèse sur le processus de modélisation et de simulation 100
4.2 Description du processus de simplification par un opérateur 101
4.2.1 Condition de jeu minimal 101
4.2.2 Condition de contrainte maximale admissible 105
4.3 Schéma procédural 109
4.3.1 condition de jeu minimal 110
4.3.2 condition de contrainte maxi. 113
4.3.3 Synthèse 118
4.4 Spécification 118
4.4.1 Spécifications fonctionnelles 119
4.4.2 Spécifications liées aux hypothèses 121
4.5 Synthèse 123
Bibliographie du chapitre 4 164

[4]. *À propos de l'écriture du Journal d'un corps, Gallimard, 2012.*

L'étude et la compréhension de systèmes réels reposent généralement sur la création de modèles représentant de façon abstraite les différents composants, fonctions et comportements impliqués. Pour évaluer la faisabilité d'une solution, le comportement physique doit être alors simulé ou expérimenté en fonction des propriétés pertinentes du système. Lorsque le système est composé d'une multitude de sous-systèmes interagissant les uns avec les autres, le comportant globale devient complexe et empêche un raisonnement humain intuitif intelligible et sans erreur [Albers 2007]. De manière classique, lors des processus de simulation, les pièces mécaniques sont avant tout considérées comme géométriquement parfaites, essentiellement parce que visuellement elles paraissent parfaites. La surface de la pièce est vue comme un ensemble de surfaces sans défaut de formes (plan, cylindre, cône idéaux), ni défauts d'orientation [Ullman 2003] [Chase 1988] [Wang 1990]. Ce modèle permet de faire intervenir des paramètres géométriques et physiques considérés dans leur état nominal. Les systèmes de C.A.O. sont basés sur cette modélisation nominale et intègrent de nombreux modules performants de simulation de cinématique, de dynamique des mécanismes, de calcul de structures et de chaînes de cotes. Cependant, les défauts géométriques ont une influence parfois non négligeable. Il en est de même pour d'autres types de défauts comme les défauts des matériaux et la présence d'hétérogénéité dans une pièce. Les imperfections de fabrication, les phénomènes et les choses du monde réel ont des conséquences sur le fonctionnement réel des produits et sont la cause possible de dysfonctionnements. Il apparaît que la modélisation et la communication des différentes variations d'un produit mécanique sont essentielles pour la conception du produit, le processus de fabrication et le processus de contrôle ainsi que dans le déploiement d'une activité de conception intégrée. Dans cette logique, l'objectif de ce chapitre est de proposer des éléments permettant de structurer le processus de modélisation d'un système tout en mettant en évidence les incertitudes de simulation dues au choix du modèle. Il tente d'apporter une méthodologie de modélisation. L'objectif n'est pas de faire une liste exhaustive des processus, mais d'introduire les éléments (modèles, artefacts…) nécessaires au développement d'un modèle en vue de sa simulation.

Pour illustrer de façon simple le processus de modélisation, un exemple industriel dont la fonction est de participer à la sécurité du conducteur lors de l'utilisation d'un véhicule automobile et plus particulièrement dans le cas d'un dysfonctionnement provoqué par la collision de celui avec son environnement (véhicules, bâtiments, obstacles divers).

Le système étudié est un renvoi sangle pour une ceinture de sécurité. La figure 4.1 décrit le système qui permet de maintenir une sangle de sécurité en position et en orientation par rapport au châssis dans les différentes phases d'utilisation.

Ce chapitre traite du processus de modélisation, il n'aborde pas l'analyse fonctionnelle qui est développée dans le chapitre V. Nous considérons une solution particulière, déjà conçue, le périmètre

d'étude est limité au renvoi sangle lui-même et aux vis de fixation sur le chassis.

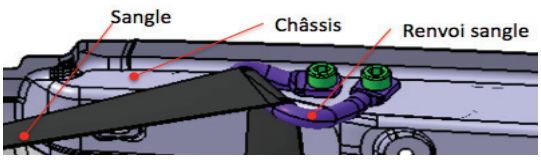


fig a – Système, sangle et châssis

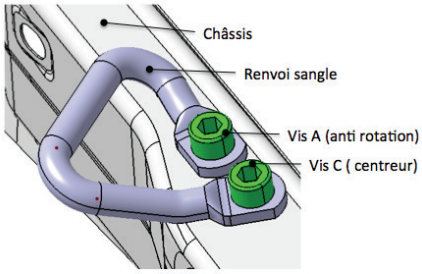


fig b – Système et châssis

figure 4.1 — Exemple industriel (Autoliv)

4.1 PROCESSUS DE MODELISATION ET DE SIMULATION

4.1.1 GENERALITES

Le processus de modélisation est un ensemble d'activités aboutissant au modèle de simulation. Le processus comprend une première étape de modélisation sous la forme d'un modèle primitif. Le modèle primitif est un modèle imaginaire, aussi complet que possible, aussi proche du système réel étudié qu'il est possible de l'imaginer. Ensuite, ce modèle primitif étant par définition très complexe, une série d'étapes de simplification est mise en œuvre pour aboutir au modèle de simulation. A chaque étape est défini un modèle intermédiaire. Les différents modèles sont issus d'hypothèses subjectives du concepteur, elles dépendent de sa connaissance technique et scientifique et de son expérience. La simulation est le calcul effectué pour simuler le comportement du système en considérant le modèle de simulation afin d'en prédire le comportement.

Modèle de simulation

Le modèle de simulation est le modèle adapté défini par le concepteur en vue de simuler le comportement du système.

Dans le modèle de simulation, les propriétés pertinentes (paramètres, détails...) des choses et des phénomènes physiques (matériau, géométrie, géométrie discrète, conditions aux limites, comportement plastique, comportement élastoplastique…) sont considérées en vue de réaliser des activités de simulation. Idéalement, le modèle de simulation est le résultat d'un processus de simplification du modèle primitif.

Processus de simplification

Le processus de simplification permet de passer du modèle primitif au modèle de simulation et fait partie du processus de modélisation. Il a pour objectif de diminuer le nombre de paramètres et d'aboutir à un modèle fini.

Le processus de simplification peut être décomposé en plusieurs étapes. Chaque étape du processus de simplification du modèle est

justifiée par des hypothèses et conduit à définir un modèle intermédiaire.

Activité de simulation

L'activité de simulation comprend des activités de résolution (traitement) et des activés d'évaluation (post-traitement) à partir d'un modèle de simulation (prétraitement).

L'activité de résolution met en œuvre des outils mathématiques (éléments finis, théorie des mécanismes, torseurs des petits déplacements par exemple) et des logiciels (traitement des éléments finis, analyse/synthèse de tolérances). L'activité de résolution permet par exemple de déterminer des températures et/ou des contraintes aux nœuds d'un maillage.

L'activité d'évaluation est une activité permettant d'évaluer, d'analyser les valeurs obtenues dans l'activité de résolution. Ainsi l'activité d'évaluation peut consister à déterminer la contrainte maximale ou moyenne au niveau de l'ensemble des nœuds d'un maillage. La contrainte maximale correspond alors au résultat de l'activité d'évaluation. Cette activité met en œuvre des outils mathématiques et des logiciels.

En synthèse, l'activité de résolution s'apparente à de l'observation de l'activité de simulation, alors que l'activité d'évaluation s'apparente à de l'interprétation de l'activité de simulation en général. Cependant, il existe des cas où cette activité de simulation peut être une interprétation liée à l'observation ou dans un modèle déclaratif, tout à la fois.

4.1.2 DANS LA PRATIQUE

Dans la pratique, analysons maintenant les types de modèles de simulation ainsi que les méthodes de résolution et d'évaluation mises en œuvre. De manière classique, lors des processus de simulation, les pièces mécaniques sont avant tout considérées comme parfaites, essentiellement parce que visuellement elles paraissent parfaites. La surface de la pièce est vue comme un ensemble de surfaces sans défaut de formes (plan, cylindre, cône...) en situations exactes [Ullman 2003] [Chase 1988] [Wang 1990] et les matériaux sont considérés comme homogènes. Ce modèle permet les études où interviennent des paramètres de conception [Turner 1987] tels que la masse, l'inertie, le volume. Les systèmes de C.A.O. sont basés sur cette modélisation nominale intégrant de nombreux modules performants de simulation de cinématique, de dynamique des mécanismes, de calcul de structures et de chaînes de cotes 1D ou 3D. Pourtant, l'analyse d'un système n'est pas aussi simple que cela puisse paraître, des choix sont à faire en ayant pleine conscience des conséquences sur les résultats obtenus.

Choix d'un modèle de simulation

Le concepteur doit définir le modèle de simulation en fonction du système et des propriétés à étudier. L'analyse fonctionnelle externe et interne étant réalisée dans le chapitre V, elle met en évidence les relations fonction – structure et la décomposition du

système permet de suivre le cheminement des flux fonctionnels au sein du système et transitant vers les milieux extérieurs.

L'analyse fonctionnelle interne conduit à décomposer les fonctions en des fonctions techniques élémentaires. Pour l'exemple du renvoi sangle, nous retiendrons deux fonctions techniques :

- l'une purement géométrique, le jeu minimal entre la vis et le trou de passage de vis du composant renvoi sangle permettant d'assurer l'assemblage (fig. 4.2a),
- l'autre fonction porte sur la tenue mécanique et conduit au dimensionnement du renvoi sangle soumis aux sollicitations mécaniques générées par la sangle.(fig. 4.2b).

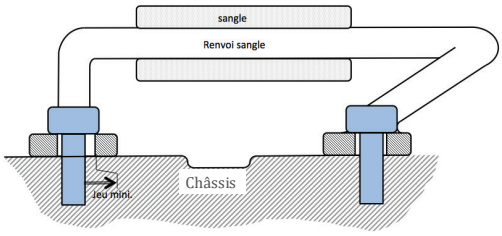


figure a – assemblage

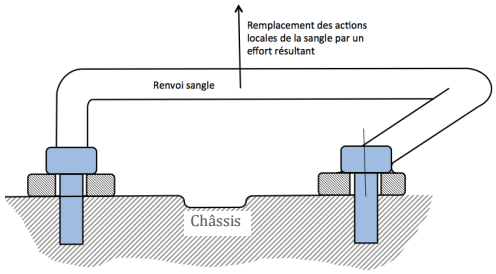


figure b – tenue mécanique

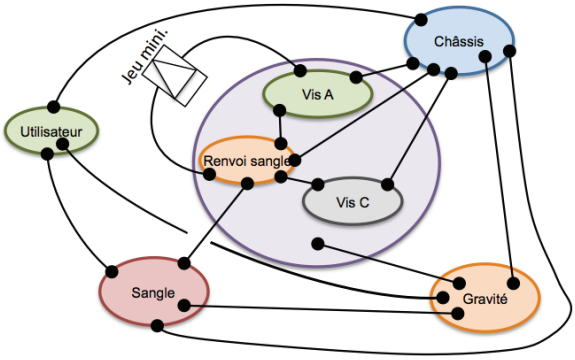


figure c – graphe fonctionnel

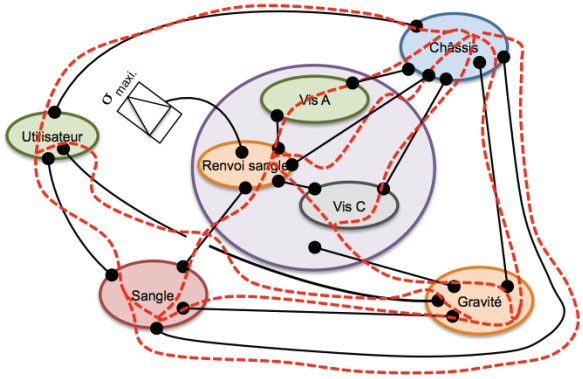


figure d – graphe fonctionnel

figure 4.2 – Modèles de simulation

Le modèle de simulation de la figure 4.2d fait appel à des propriétés mécaniques, mais également à des propriétés géométriques. Avec les hypothèses : matériau homogène, comportement mécanique infiniment rigide, le modèle de simulation de la figure 4.2c fait appel à des propriétés principalement géométriques de contact.

PROPRIETES GEOMETRIQUES

Le dimensionnement géométrique nominal est déduit d'un modèle de simulation dimensionnelle dont la propriété simulée est une distance minimale entre les surfaces des composants de notre système. Dans ce cas particulier étudié, la propriété dimensionnelle linéaire est issue d'une simulation géométrique dimensionnelle dont la valeur est le résultat d'une chaîne de cotes unidirectionnelle (chaîne de cotes 1D), figure 4.2a.

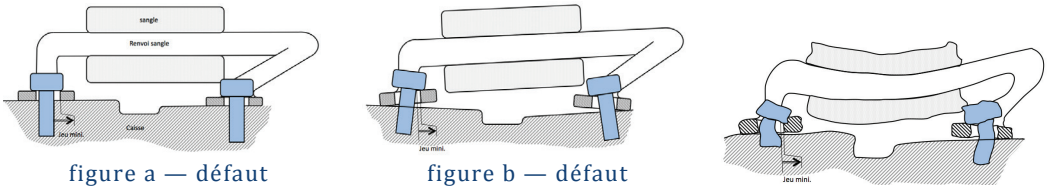


figure a — défaut dimensionnel linéaire

figure b — défaut d'orientation

figure c — défaut de forme

figure 4.3– modèles de simulation

Cependant, les défauts géométriques ont une influence parfois non négligeable. Ces défauts sont des défauts de dimensions linéaires (fig. 4.3a), d'orientation (fig. 4.3b) et de forme (fig. 4.3c). Le modèle de simulation doit s'enrichir de propriétés supplémentaires intégrant les variations de dimensions linéaires, angulaires ou de forme suivant le choix du modèle. Les outils mathématiques doivent s'adapter au traitement de l'ensemble des propriétés identifiées dans le modèle de simulation. Il est à noter que dans ce cas l'outil de chaîne de cotes unidirectionnelle (chaîne de cotes 1D) est en inadéquation avec les modèles de simulation avec des défauts d'orientation ou de forme (fig. 4.3).

PROPRIETES MECANIQUES

Le modèle de simulation doit également s'enrichir pour caractériser les défauts matériaux (matière, hétérogénéité…) pour la pièce renvoi sangle, soumise à des sollicitations mécaniques (fig. 4.2b).

Le processus de modélisation permet de déterminer un modèle adapté en considérant des hypothèses simplificatrices. Quel est le type de modèle retenu ? La figure 4.4 illustre deux modèles envisageables. Chacun d'entre eux correspond à des méthodes de résolution différentes.

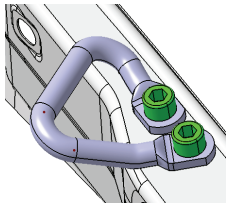


figure a — renvoi sangle en situation

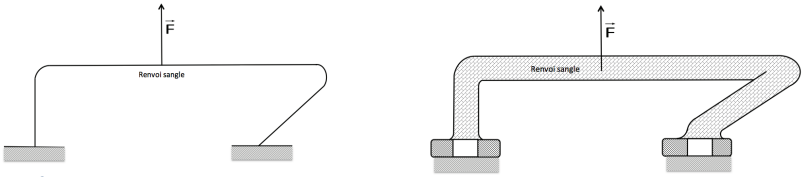


figure b – poutre gauche

figure c —modèle volumique maillé

figure 4.4 — Choix d'un modèle de simulation : dimensionnement statique du renvoi sangle

Le choix du modèle de simulation, impliquant des méthodes de résolution particulières, est un compromis entre le problème posé « quelles grandeurs veut-on calculer et avec quelle précision ? » et les moyens disponibles pour y répondre. Les éléments du modèle de simulation retenu sont issus d'un certain nombre d'hypothèses basées sur les sciences, et il faut connaître leur domaine de

validité pour pouvoir vérifier que le modèle est satisfaisant du point de vue de la précision.

La figure 4.4b est un modèle de simulation où l'interaction sangle/châssis est modélisée par des liaisons encastrements. Le modèle est un modèle de type poutre gauche encastrée aux deux extrémités. Cette modélisation correspond à une liaison infiniment rigide entre la poutre et le châssis. Si le modèle n'admet pas de solution analytique, il est alors nécessaire de chercher une solution approchée de ce modèle. Une solution possible est de discrétiser le problème. Le choix d'un modèle numérique permet de traiter les équations mathématiques.

La figure 4.4c est un modèle de simulation où l'interaction sangle/châssis est également modélisée par des liaisons encastrement. Cependant, ce modèle est de type volumique. Le processus de modélisation doit fixer les propriétés à calculer et conduire à la définition d'un maillage dans le cadre de la méthode des éléments finis. Le choix du maillage dépend essentiellement de la précision recherchée, de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage influence le maillage.

Les hypothèses sur le comportement permettent de définir quel modèle retenir pour représenter le comportement du matériau. Le comportement est-il linéaire ? Doit-on modéliser la rigidité des liaisons ? Si le matériau est hétérogène, peut-on utiliser une méthode d'homogénéisation ?

La même figure 4c peut être définie avec un exemple de conditions aux limites différentes où les hypothèses associées au matériau sont un matériau homogène avec un comportement élastoplastique, une géométrie nominale avec une discrétisation de cette géométrie (maillage), et des champs de pressions uniformes (renvoi sangle / vis, renvoi sangle / châssis). Les déplacements relatifs du renvoi sangle par rapport au châssis, tant latéral qu'axial sont supposés nuls. Or, il est possible de modifier les hypothèses des conditions aux limites, en supposant par exemple, un champ de pression non uniforme dans la modélisation des contacts : vis, renvoi sangle, châssis. La modification des conditions aux limites entraîne la définition d'un nouveau modèle de simulation pour une même propriété simulée.

Si maintenant on introduit les hypothèses suivantes dans le modèle, figure 4.4c :

- le matériau est isotrope avec une déformation élastique linéaire ;
- les contraintes sont déduites sous la forme d'un torseur exprimé au centre de la section comprenant efforts et moments ;
- le milieu d'étude est unidimensionnel, soit de type poutre gauche qui correspond à un solide engendré par une surface plane S dont le centre de section G décrit une courbe C de sorte que la surface S est perpendiculaire à la courbe C au point considéré.

Alors le résultat de la simulation de la figure 4.4c est très proche du résultat du modèle de la figure 4.4b, sauf cas particulier.

CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites sont des éléments appartenant à la définition du modèle de simulation. Dans ce domaine, les défauts de forme dans le modèle géométrique discrétisé ont peu d'influence sur les conditions aux limites. Par contre, les variations de champs de pressions ou de contraintes aux limites imposées sur la géométrie seront des premiers ordres sur les valeurs des contraintes mécaniques obtenues.

Généralement, les composants intervenant dans les assemblages (vis, écrou, rivet…) sont substitués par des conditions aux limites traduisant des comportements simplifiés. Ceux-ci peuvent s'avérer éloignés de la réalité. Les conditions aux limites exprimées dans le cadre des modèles de simulation de la figure 4.4 sont des cas généralement usités dans la mécanique des milieux continus (MMC).

Cependant, il est possible d'identifier des modèles de simulation plus complexes qui dans la pratique ne sont pas ou peu utilisés. Ainsi, les composants vis et châssis ne sont pas substitués par des modèles de type liaison avec les conditions et les hypothèses aux limites de type encastrement infiniment rigide (figure 4.5). Pour ces nouveaux modèles de simulation, les conditions aux limites peuvent introduire des champs de pression non uniformes, des déplacements relatifs entre les composants, des variations de forme (fig. 4.5b) et des variations de la géométrie discrétisée par le choix du maillage sur chaque composant du système. Les actions mécaniques sont uniformes ou non, et peuvent être simulées avec des comportements différents (variation angulaire des actions de la sangle sur le renvoi sangle, fig. 4.5b). Il est à noter que lors de l'utilisation de différentes pièces mécaniques en contact, il est nécessaire d'introduire des éléments traduisant l'adhérence / le frottement présent entre ces pièces. La définition de ces interactions engendre une grande difficulté dans la résolution du problème mathématique où la convergence des calculs n'est pas assurée naturellement.

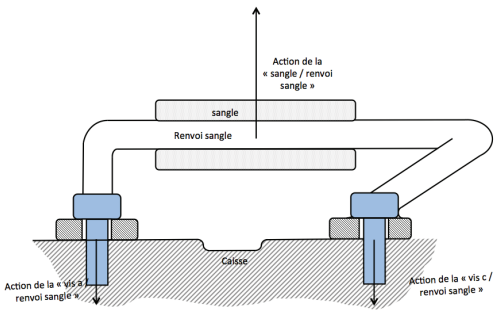


figure a — actions mécaniques – géométrie nominale

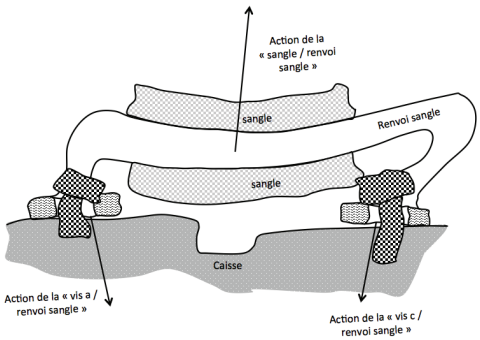


figure b — actions mécaniques – défaut de forme

figure 4.5 – Modèle de simulation

Choix d'une méthode de résolution

Pour un modèle de simulation, différentes méthodes de simulation ou de résolution peuvent être envisagées. Ces différentes méthodes peuvent être équivalentes, c'est-à-dire apporter des résultats identiques, mais parfois l'usage d'une méthode particulière change en réalité le modèle de simulation. Supposons le modèle de simulation avec des défauts dimensionnels linéaires et une propriété de jeu minimal entre les deux surfaces cylindriques de notre système, le corps de la vis et le trou de passage de vis du renvoi sangle (fig. 4.3a). Dans ce cas, deux principes de calcul sont possibles. Le premier est défini par la méthode de chaîne de cotes uniaxiale suivant la direction de la propriété à simuler, et le second, par la méthode du torseur des petits déplacements. Les activités de simulation sont a priori différentes par le simple choix de la méthode de simulation, mais les résultats peuvent être identiques si seule une composante du torseur des petits déplacements est influente. Dans ce cas, une méthode plus performante que nécessaire a été utilisée, mais cela ne pose aucun problème du point de vue du résultat, les méthodes sont équivalentes pour le modèle de simulation considéré.

Supposons le modèle de simulation avec des défauts de forme et la même propriété de jeu minimal que le cas précédent (fig. 4.3a). En reprenant les deux principes de calcul précédents (la méthode de chaîne de cotes uniaxiale suivant la direction de la propriété à simuler, et la méthode du torseur des petits déplacements), la méthode de chaîne de cotes uniaxiale s'avère incompatible avec cette activité de simulation pour un modèle de simulation avec des défauts de forme. Cependant, si l'outil de chaîne de cotes uniaxiale est maintenu dans cette activité de simulation alors une simplification du modèle est réalisée par le simulateur, consciemment ou inconsciemment. Le modèle de simulation est modifié par l'usage de la méthode de résolution.

Supposons un modèle de simulation avec des conditions aux limites différentes où les hypothèses associées au matériau sont un matériau homogène avec un comportement élastoplastique, une géométrie nominale avec une discrétisation de cette géométrie (maillage), et des champs de pression uniformes (renvoi sangle / vis, renvoi sangle / châssis). Les déplacements relatifs du renvoi sangle par rapport au châssis, tant latéral qu'axial sont supposés nuls. Dans ce cas, deux méthodes de calcul sont possibles. La première est basée sur la théorie des poutres (souvent appelée RDM, résistance des matériaux), et la seconde, sur la Méthode des Eléments Finis (MEF). L'usage de la seconde méthode entraîne ici aussi une modification du modèle de simulation, celui-ci est discrétisé, entraînant des résultats différents.

Choix d'une méthode d'évaluation

L'évaluation est la phase de post-traitement de l'activité de simulation. Cette phase de post-traitement est une activité qui met enœuvre des fonctions mathématiques qui traitent les résultats intermédiaires de l'activité de résolution pour obtenir les résultats de la propriété fonctionnelle à évaluer.

Reprenons les deux des cas traités précédemment :

- Soit l'activité de résolution de la méthode des éléments finis permettant de déterminer en chaque nœud du maillage les valeurs de la contrainte. L'activité d'évaluation utilise des fonctions mathématiques permettant de déterminer, par exemple, la valeur maximale de la contrainte du matériau.
- Soit l'activité de résolution de la chaîne de cotes uniaxiale permettant de déterminer des résultats intermédiaires qui peuvent être un ensemble de valeur. L'activité d'évaluation utilise des fonctions mathématiques pouvant être des lois statistiques définissant la valeur moyenne et l'écart type par exemple.

4.1.3 SYNTHESE SUR LE PROCESSUS DE MODELISATION ET DE SIMULATION

Pour conclure, le processus de modélisation et de simulation (fig. 4.6) est un ensemble d'activités aboutissant à la valeur de la propriété (caractéristique) fonctionnelle à simuler. Cette activité comprend des activités de modélisation (prétraitement) aboutissant au modèle de simulation, des activités de résolution (traitement), des activés d'évaluation (post-traitement).

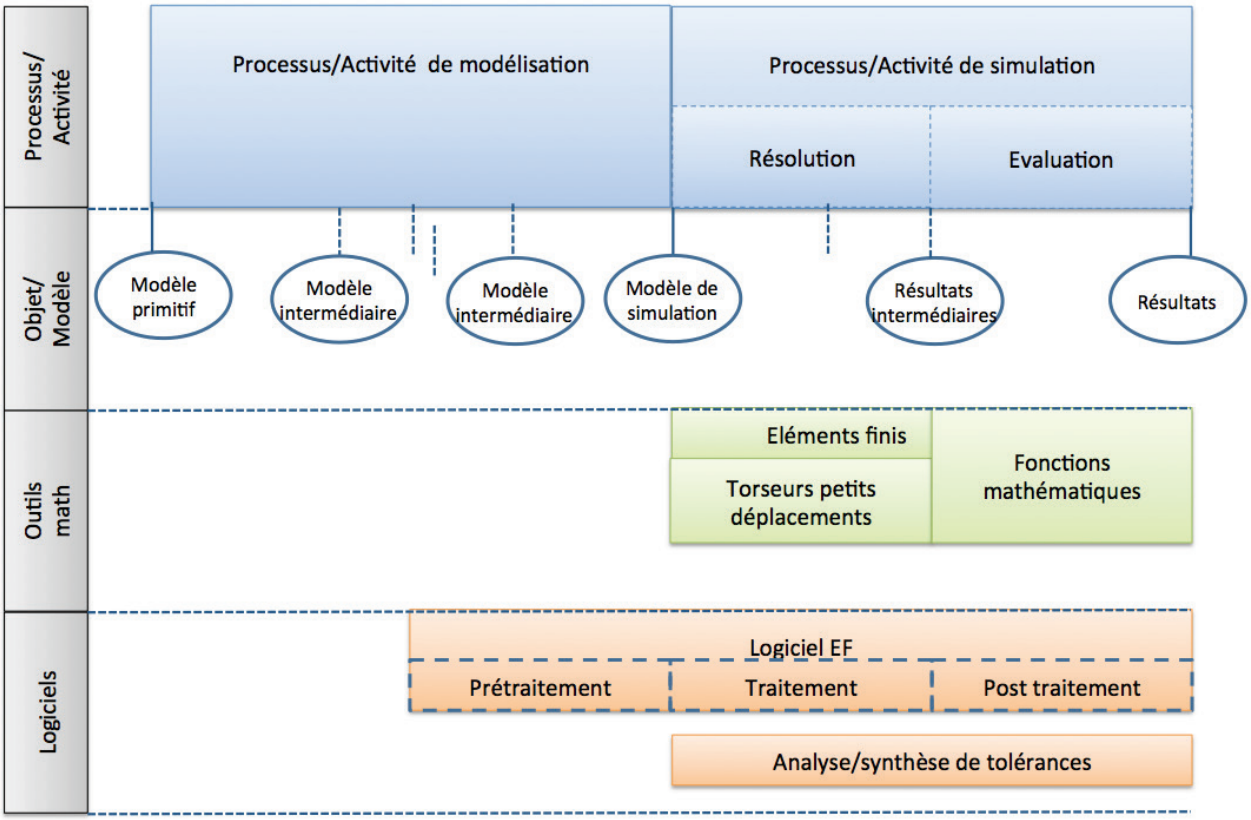


figure 4.6 – Processus de modélisation – processus de simulation

Le modèle de simulation est obtenu à partir d'un processus de modélisation qui comprend un processus de simplification. Ce processus s'appuie sur des hypothèses permettant de passer du modèle primitif au modèle de simulation. Souvent, les hypothèses sont implicites, ce qui empêche la validation du modèle de

simulation. Les hypothèses doivent être énoncées explicitement pour une bonne traçabilité du processus.

Les choix des outils mathématiques (éléments finis, torseurs des petits déplacements, par exemple) et des logiciels (logiciel d'éléments finis, analyse : synthèse de tolérance) doivent être justifiés lors du processus de simulation.

La figure 4.6 reprend les processus de modélisation et de simulation avec sur la deuxième ligne les éléments manipulés (modèles ou résultats), sur la troisième ligne, les outils mathématiques utilisés pour la simulation (dans le cadre de notre exemple) et sur la quatrième ligne les logiciels qui peuvent être mis en œuvre (toujours pour l'exemple).

4.2 DESCRIPTION DU PROCESSUS DE SIMPLIFICATION PAR UN OPERATEUR

Le processus de simplification qui permet de passer du modèle primitif au modèle de simulation fait partie du processus de modélisation. Entre ces deux modèles, les étapes du processus conduisent à identifier plusieurs modèles intermédiaires. Il a pour objectif de diminuer le nombre de paramètres en posant des hypothèses.

Il est nécessaire de définir l'ensemble des opérations de définition de ce processus de simplification avec la possibilité d'avoir différents modèles intermédiaires et en y associant les hypothèses nécessaires. Chaque modèle intermédiaire peut être défini par des opérations ou opérateurs. Un opérateur est un ensemble ordonné d'opérations.

Les notions d'opérateur et d'opération sont définies au chapitre III (fig. 3.4) et vont être illustrées au travers des exemples : condition de jeu minimal (fig. 4.7), condition de contrainte maximale admissible (fig. 4.9).

4.2.1 CONDITION DE JEU MINIMAL

Afin d'illustrer le processus de simplification, nous considérons la propriété de jeu minimal entre le corps de la vis et le trou de passage de vis du composant renvoi sangle.

Supposons un modèle primitif avec des défauts de forme, avec des composants dont le comportement est « réel » et des matériaux hétérogènes (fig. 4.7).

Le processus de simplification de notre exemple comporte cinq étapes :

- la première pouvant être décrite par un opérateur d'approximation reposant sur l'homogénéisation du matériau ;
- la seconde, également par un opérateur d'approximation reposant sur l'association d'un type de comportement mécanique ;

- la troisième, par un opérateur de partition reposant sur des extractions ;
- la quatrième, par un opérateur de substitution reposant sur l'agrégation de la vis et du châssis ;
- la cinquième, par un opérateur également d'approximation reposant sur des associations.

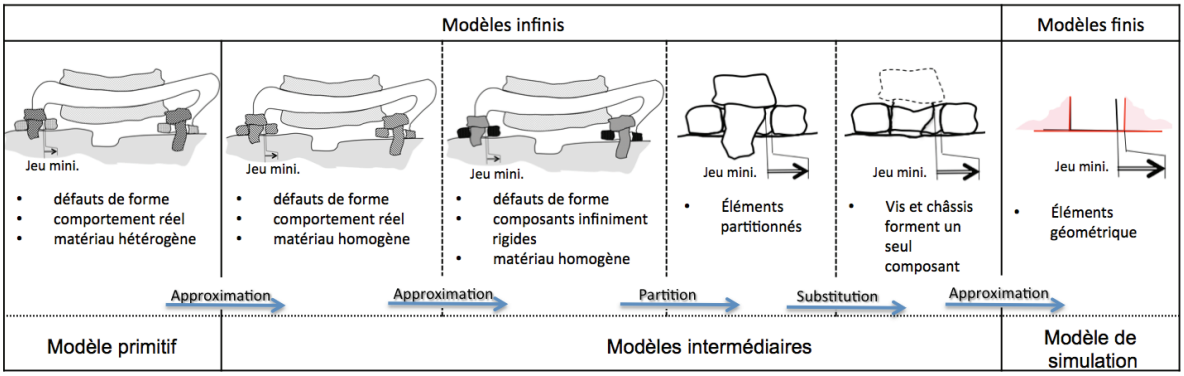


figure 4.7 — Processus de simplification – condition de jeu minimal

Dans l'industrie, il n'est pas rare de constater que le modèle primitif est directement le modèle de simulation (fig 4.7). Les hypothèses du modèle primitif de notre processus de simplification ne sont presque jamais usitées.

Les opérateurs sont définis en fonction des besoins du concepteur et des hypothèses formulées pour aborder en particulier des aspects autres que géométriques comme la modélisation de phénomènes physiques : l'homogénéisation du matériau ou l'identification d'un type de comportement mécanique pour cet exemple.

Les paragraphes suivants reprennent l'usage des trois types d'opérations utilisées pour l'exemple.

Approximation

L'opération d'approximation est utilisée à plusieurs reprises dans ce processus de modélisation pour :

- identifier un matériau homogénéisé à partir du matériau hétérogène.

A partir de l'hétérogénéité du matériau, cette opération est utilisée pour homogénéiser l'ensemble des informations provenant du matériau hétérogène. Cette opération revient à considérer qu'il n'y a pas de variation de propriétés dans le matériau qui serait due à des défauts ou à la présence de phases différentes au sein du matériau.

- identifier un comportement de type indéformable à partir du comportement « réel ».

À partir du comportement « réel » du matériau, cette opération est utilisée pour identifier un comportement de type indéformable.

- associer un modèle idéal à partir du modèle avec défaut de forme.

A ce stade du processus de simplification, l'opération appelée approximation est utilisée pour associer des éléments géométriques à des éléments partitionnés. Dans ce cas, l'opération est identique à l'opération géométrique d'association définie dans la norme ISO 17450-1 [ISO 17450-1 2011] et dans le projet de norme sur [ISO/DTS AAAAA-1 2013].

En figure 4.8a, le critère des moindres carrés est appliqué aux quatre éléments surfaciques afin de déterminer les éléments géométriques. Cependant pour les surfaces cylindres, les cylindres sont obtenus en ajoutant une contrainte d'orientation par rapport à leur plan respectif. L'opération d'association (d'approximation) étant réalisée, le contact entre les différents éléments géométriques (plans, cylindres) génère un déplacement relatif entre les composants.

En figure 4.8b, le critère minimax est appliqué aux deux surfaces nominalement planes. Pour les surfaces nominalement cylindriques, les cylindres sont, soit de plus grand diamètre dans le cas d'un alésage, soit de plus petit diamètre dans le cas d'un arbre. Dans les deux cas, ils sont tangents à l'extérieur de la matière avec une contrainte supplémentaire, d'être contraints en orientation par rapport à leur plan. L'opération d'association (d'approximation) étant réalisée, le contact entre les différents éléments géométriques (plans, cylindre) génère un déplacement relatif entre les composants.

Les critères des figures (4.8a, 4.8b) sont différents. Lorsque les éléments géométriques sont en contact, les déplacements relatifs des composants sont généralement différents.

L'opérateur est constitué de l'ensemble des associations. Le modèle obtenu correspond au modèle de simulation traité par une chaîne de cotes 1D (fig. 4.8).

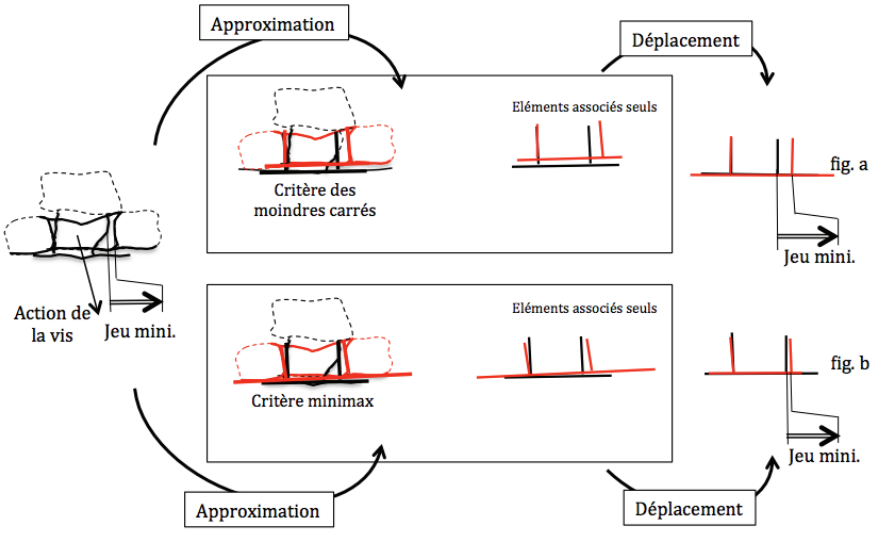


figure 4.8 – Opération d'approximation

Substitution

L'opération de substitution est utilisée pour remplacer partiellement ou complètement un ou plusieurs composants par leurs effets. Les effets peuvent être de plusieurs types : action mécanique ou déplacement relatif entre les composants dans nos

exemples. Au niveau des vis, nous avons un déplacement relatif entre la surface hélicoïdale de la vis (le filetage) et la surface hélicoïdale du châssis (le trou taraudé). L'opération de substitution agrège les deux composants (vis, châssis) en un seul (fig. 4.9) au niveau de leur surface hélicoïdale partitionnée. L'hypothèse d'une condition de jeu nul entre la vis et le châssis repose sur cette opération.

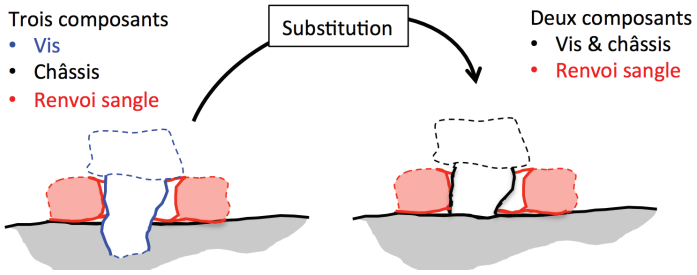


figure 4.9 – Opération d'approximation

Partition

L'opération appelée partition est utilisée pour identifier des éléments bornés. Elle permet d'obtenir des parties limitées d'éléments. Elle est utilisée ici pour obtenir, à partir du modèle primitif de la surface (« skin modèle ») des éléments correspondant aux éléments géométriques nominaux. La partition est établie selon des critères à définir. Dans notre cas, l'objectif de la partition est de définir les parties du skin modèle qui ont une influence sur le jeu. Ces différentes parties sont limitées par les arêtes du skin modèle, mais autant la notion d'arête est précise pour le modèle nominal, autant elle est floue pour le skin modèle. En effet, il n'y a pas vraiment d'arête si on observe une pièce mécanique avec suffisamment d'acuité. Le critère de partition peut donc varier avec des résultats différents pour les surfaces partitionnées. La conséquence est de générer des déplacements relatifs différents entre les deux composants renvoi sangle et châssis et d'obtenir un jeu différent entre les pièces. La figure 4.10 illustre ces propos en montrant deux partitions différentes (entourées en rouge dans la figure) et en exagérant leur différence. Si nous considérons le deuxième modèle intermédiaire (fig. 4.13b) obtenu par les partitions de chacune des quatre surfaces, nous posons alors comme hypothèse que le critère de partition a une influence négligeable sur le jeu [ISO/CD 18183-1 2012]. L'opérateur est constitué des quatre partitions.

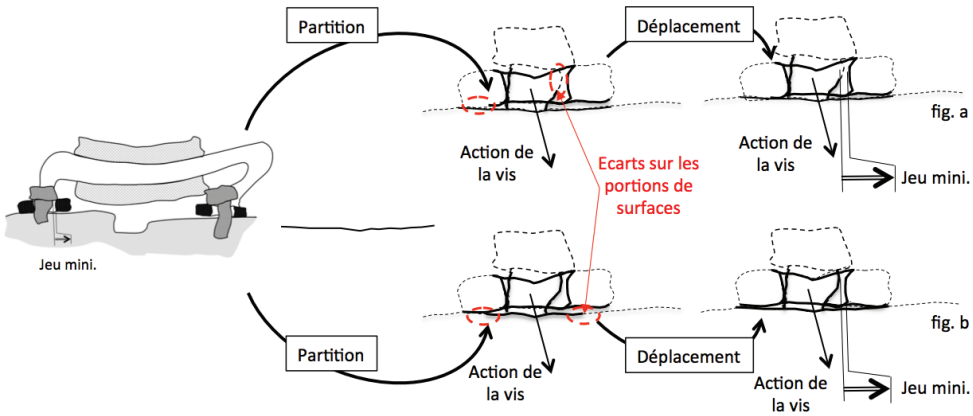


figure 4.10 – Opération de partition

4.2.2 Condition de contrainte maximale admissible

La fonction étudiée correspond au renvoi sangle qui doit résister aux actions mécaniques locales de la sangle. Ces actions locales de la sangle sont ramenées à un effort résultant. À partir du modèle primitif dont les hypothèses sont un modèle avec des défauts de forme, un matériau hétérogène et un comportement du composant « réel », le modèle de simplification doit permettre d'isoler la propriété étudiée, la contrainte mécanique maximale équivalente.

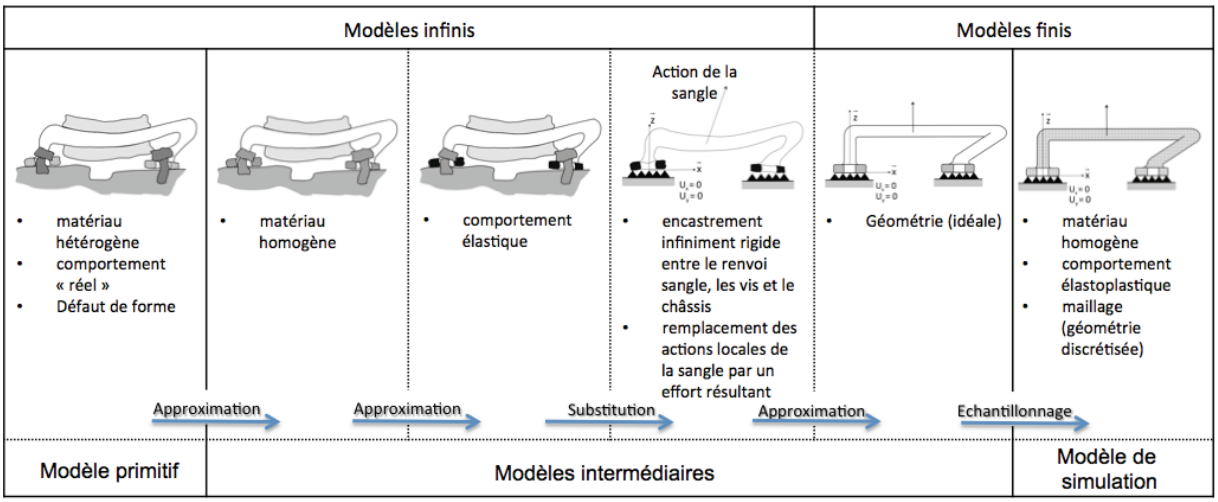


figure 4.11 — Processus de simplification – condition de contrainte maximale équivalente

Le processus de simplification de notre exemple (fig. 4.11) comporte cinq étapes :

- les deux premières pouvant être décrites par un opérateur d'approximation permettant d'homogénéiser l'ensemble des informations issues de l'hétérogénéité du matériau en un matériau homogène et d'approximer le comportement du matériau par un comportement élastique ;
- la troisième par un opérateur de substitution permettant de traduire les conditions de déplacements générés par la liaison encastrement infiniment rigide entre les vis, le renvoi sangle et le châssis ;
- la quatrième par un opérateur d'approximation permettant d'associer un modèle géométrique idéal au skin modèle (défaut de forme) ;
- la dernière par un opérateur d'échantillonnage permettant de définir la discrétisation de la géométrie idéale (maillage).

Les paragraphes suivants reprennent l'usage des trois types d'opérations utilisées pour l'exemple.

Approximation

L'opération d'approximation est utilisée à plusieurs reprises dans ce processus de modélisation pour :

- identifier un matériau homogène à partir du matériau hétérogène, déjà présenté ci-dessus ;
- identifier un comportement élastique à partir du comportement « réel ».

À partir du comportement « réel » du matériau (courbe expérimentale de traction monotone, fig. 4.12a), cette opération est également utilisée pour identifier un comportement type du matériau. L'association d'une courbe type (fig. 4.12b) à la courbe expérimentale du matériau de notre composant renvoi sangle permet de qualifier le comportement de notre matériau (fig. 4.15c). L'opération d'approximation permet de qualifier le comportement de notre matériau.

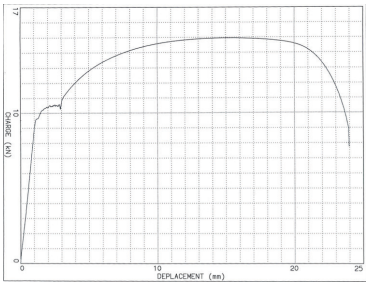


figure a — courbe de traction monotone du matériau

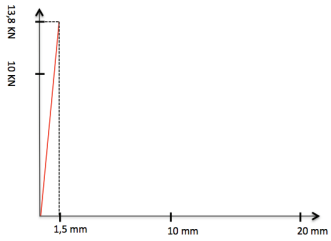


figure b — courbe type de traction monotone d'un acier

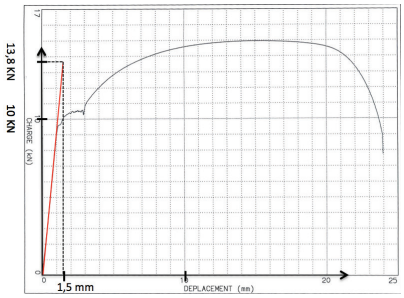


figure c – approximation du comportement du matériau

figure 4.12 – Opération d'approximation – comportement matériau

- associer un modèle idéal à partir du modèle avec défaut de forme.

Cette opération est utilisée pour associer un ou des éléments finis à un ou des éléments infinis, selon un critère donné. Le critère d'une association est défini par un objectif et selon les cas des contraintes.

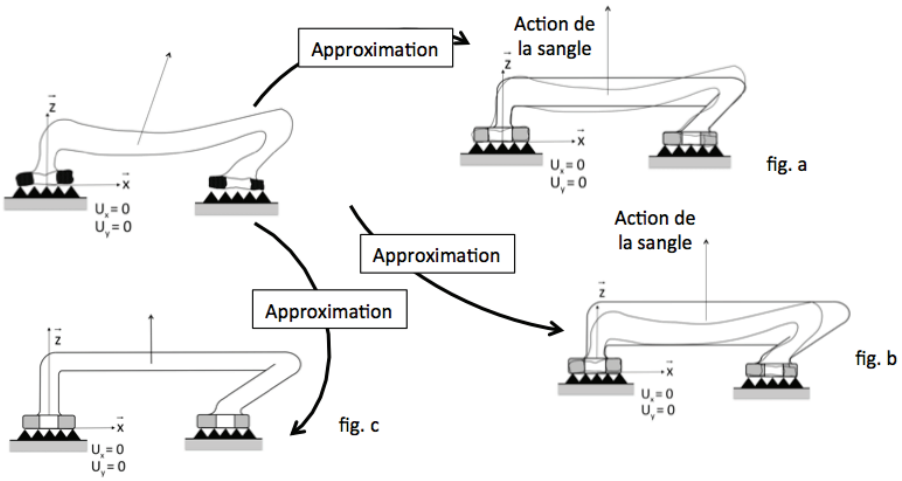


figure 4.13 – Opération d'approximation

Lors de la conception préliminaire, le concepteur a des difficultés à imaginer les défauts de forme, d'orientation ou de position de la pièce puisqu'à ce stade, le concepteur n'a aucune information sur les moyens de fabrication. Cependant, il doit calculer la tenue mécanique du composant à partir d'une géométrie idéale. Cette géométrie est le résultat d'une association à la surface (modèle infini). Dans l'exemple, la géométrie idéale est une géométrie associée avec des variations dimensionnelles linéaires à l'élément surfacique (modèle infini) générant des dimensions différentes (fig. 4.13) selon le critère d'association.

Les critères considérés sont :

- en figure 4.13a, l'association d'une géométrie idéale du renvoi sangle selon le critère des moindres carrés sans d'autres contraintes ;
- en figure 4.13b, l'association d'une géométrie idéale contrainte à être à l'extérieur de la matière ;
- en figure 4.13c, l'association d'une géométrie nominale (sans aucune variation dimensionnelle).

Nous posons alors comme hypothèse que les défauts de forme des surfaces et le choix du critère d'association sont négligeables sur la condition étudiée.

Substitution

L'opération de substitution est utilisée pour remplacer partiellement ou complètement un ou plusieurs composants par leur effet. Les effets sont de deux types : action mécanique ou déplacement relatif entre les composants. Dans notre cas, nous avons les deux types de substitution.

- Les actions de la vis et du châssis sont substituées par différents types de liaisons.

  En figure 4.14a, elles sont substituées par deux liaisons encastrements infiniment rigides. Aucune mobilité n'est admise entre le renvoi sangle et le châssis.

  En figure 4.14b, elles sont substituées par une liaison encastrement infiniment rigide au niveau de la vis-centreur et par une liaison pivot qui autorise des mobilités en rotation au niveau de la vis locating entre les composants renvoi sangle et châssis.

  En figure 4.14c, elles sont substituées par une liaison encastrement infiniment rigide au niveau de la vis centreur et par une liaison plane qui autorise des mobilités en translation suivant les directions x et y entre les composants renvoi sangle et châssis au niveau de la vis locating.

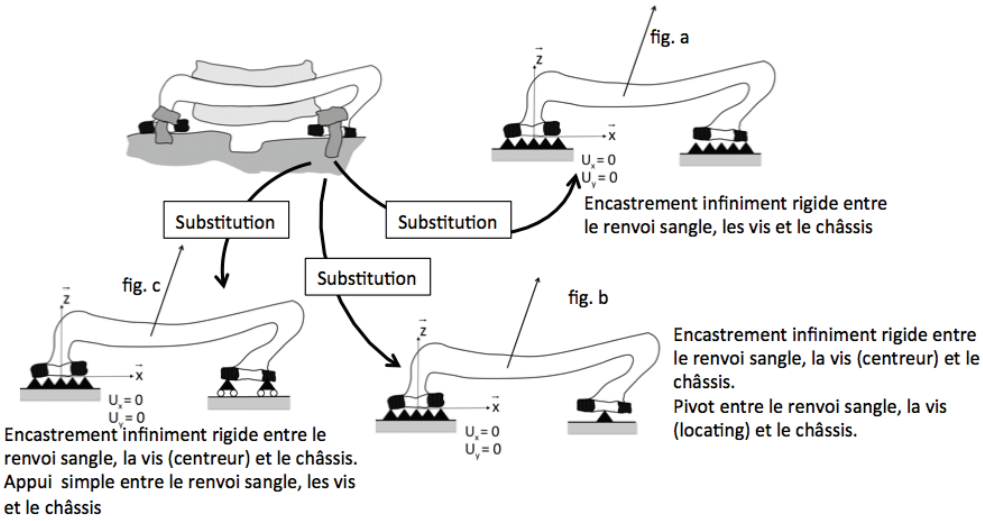


figure 4.14 – Opération de substitution

- Les actions locales de la sangle sont remplacées par un effort résultant sur le renvoi sangle (fig. 4.15a), par des contraintes locales réparties uniformément (fig. 4.15b) ou par des contraintes locales non uniformes (fig. 4.15c). Dans ces cas, cette substitution intègre des opérations de partition et d'approximation. L'objectif principal du processus ordonné d'opérations étant la substitution, ce processus est appelé un opérateur de substitution.

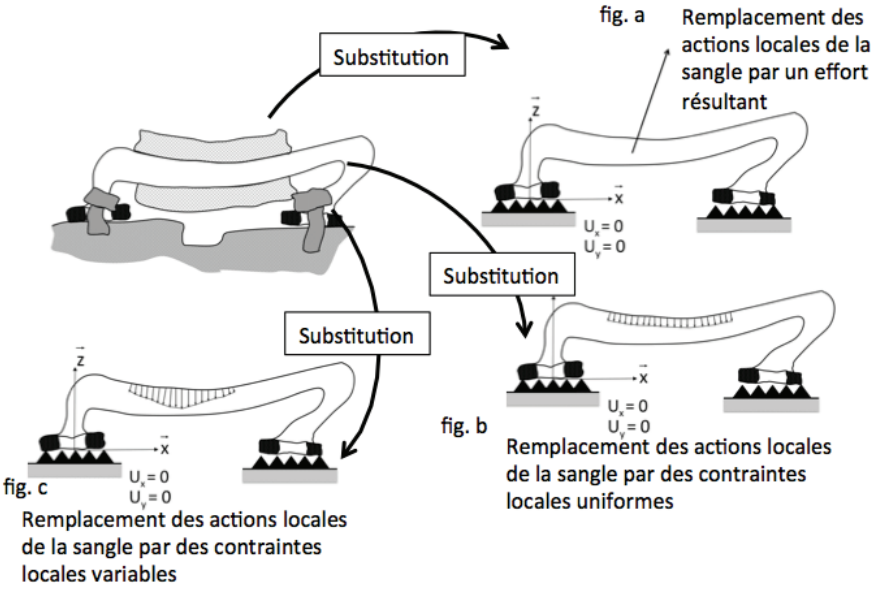


figure 4.15 – Opération de substitution

Échantillonnage

L'opération d'échantillonnage est utilisée pour discrétiser la géométrie idéale du composant en un nombre fini de points. Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments. Le mailleur prend en entrée la géométrie, c'est-à-dire le fichier produit par le modeleur géométrique, et fournit en sortie un maillage. Ceci comprend une information géométrique sur les sous-volumes et une information topologique sur la connectivité entre les éléments. Les maillages non structurés sont sous la forme d'une liste d'éléments

interconnectés. Les formes sont souvent des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions, et des tétraèdres, des cubes ou des hexaèdres en trois dimensions. La connectivité d'un élément est la liste de ses voisins. Un élément possède un voisin par arête ou par face, selon que le maillage est bi- ou tridimensionnel. Dans le cas des maillages structurés, la connectivité est par définition implicite, et donc le maillage se résume à une simple liste de nœuds.

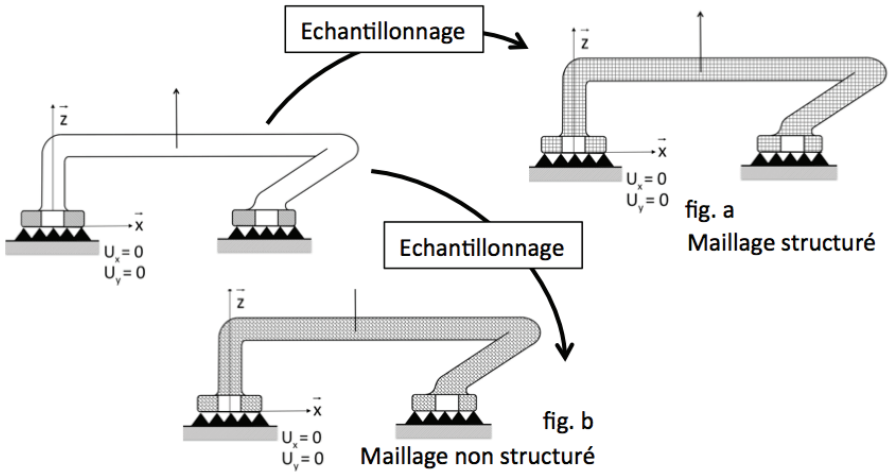


figure 4.16 – Opération d'échantillonnage — maillage

Les figures 4.16a et 4.16b sont deux exemples de discrétisation de la géométrie idéale du composant.

4.3 SCHEMA PROCEDURAL

Le schéma procédural a pour objectif de représenter les opérateurs permettant de passer d'un modèle à l'autre. Dans le schéma procédural, les objets sont toujours représentés par les sommets d'un graphe de formes circulaires ou elliptiques et les opérations sont représentées par des sommets rectangulaires, les liens entre les éléments et les opérations sont représentés par les arêtes du graphe. Ainsi la figure 4.17 représente un élément du système étudié, le renvoi sangle. Des objets : matériau et surface complètent l'élément renvoi sangle. Ils sont représentés par des pôles (fig. 4.17). Ces objets ont des propriétés, telles que le comportement du matériau de type élastique, infiniment rigide, ou élastoplastique par exemple.

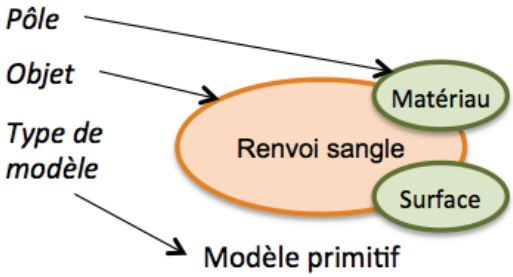


figure 4.17 – Elément : renvoi sangle – Pôles : matériau, surface

Cependant, le nom du pôle peut également exprimer la propriété de l'objet considéré, par exemple : homogène, pour définir la propriété de l'objet matériau. Le modèle primitif du composant

renvoi sangle fait apparaître deux objets, le matériau et la surface. Pour le premier, le matériau a pour propriété d'être hétérogène avec un comportement mécanique « réel » et pour le second, la surface est considérée comme un seul élément avec des défauts de forme.

4.3.1 CONDITION DE JEU MINIMAL

La condition de jeu minimal s'exprime entre le corps de la vis (centreur) et le trou de passage de vis du renvoi sangle (fig. 4.18a). Pour l'étude de cette condition, nous considérons certains éléments du système : vis centreur, renvoi sangle et châssis (fig. 4.18b).

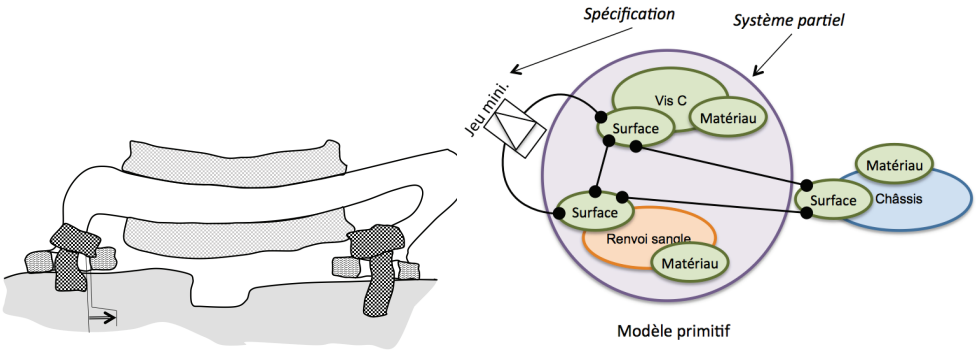


figure a — Modèle primitif figure b — Schéma de flux

figure 4.18 – Schéma de flux – Modèle primitif

Ainsi en figure 4.19, l'approximation est représentée par un rectangle, les entrées de l'opération sont les pôles (matériau) hétérogènes du modèle primitif des composants (renvoi sangle, vis c, châssis) et les sorties sont les matériaux homogènes représentés par les pôles des composants. Le pôle homogène correspond à l'objet matériau avec cette propriété (homogène).

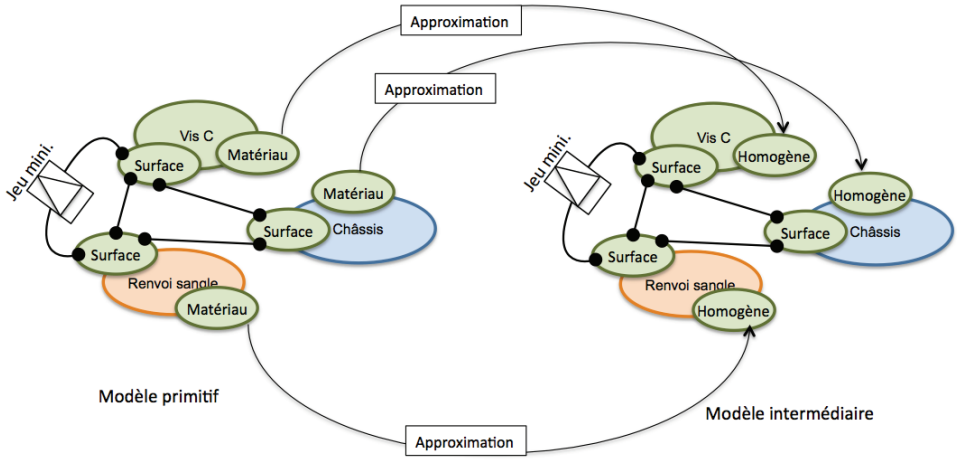


figure 4.19 – Schéma procédural de l'approximation — Homogène

En figure 4.20, l'approximation est également représentée par un rectangle, les entrées de l'opération sont les pôles (matériau) homogènes du modèle intermédiaire et les sorties sont le comportement infiniment rigide (inf. rigide) du matériau représenté par un pôle pour chaque composant.

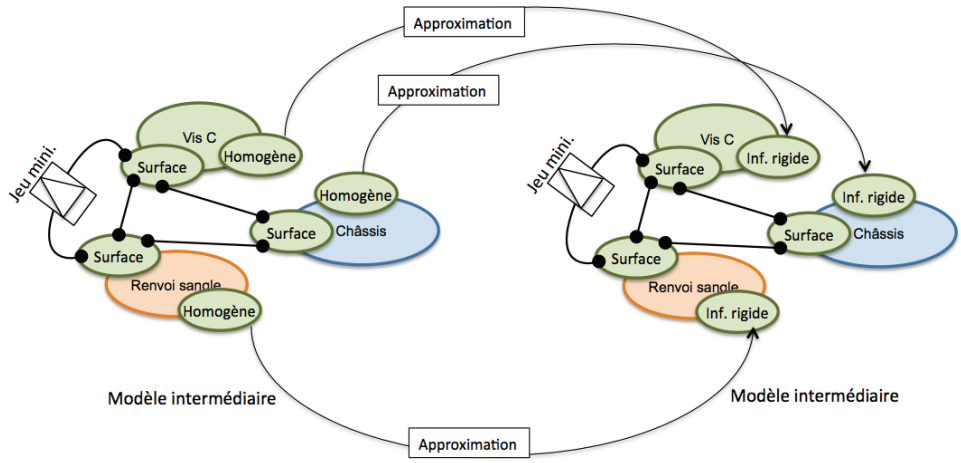


figure 4.20 – Schéma procédural de l'approximation – Comportement infiniment rigide

En figure 4.21, les partitions des surfaces S-PLRS, S-PLc, S-CYRS, S-HeVc, S-HeC et S-CYVc sont représentées par des rectangles, les entrées des opérations sont les surfaces avec leur défaut de forme du modèle intermédiaire des composants du système restreint et les sorties sont les deux surfaces nominalement planes, les deux surfaces nominalement hélicoïdales et les deux surfaces nominalement cylindriques obtenues par six opérations de partitions. Ces six surfaces sont représentées par des pôles des composants renvoi sangle, vis c (centreur) et châssis.

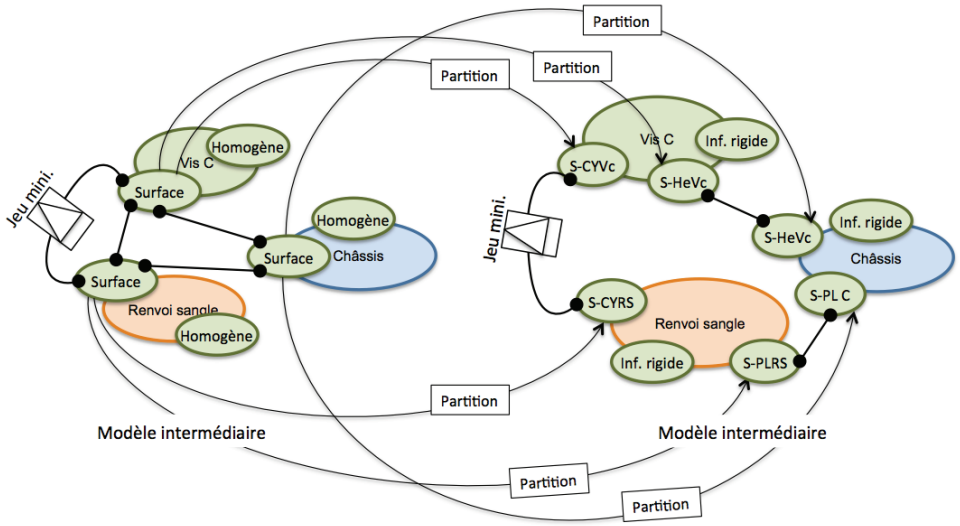


figure 4.21 – Schéma procédural de la partition

En figure 4.22, l'opération de substitution permet de substituer les deux surfaces hélicoïdales et leur interaction par un élément virtuel composite : vis c et châssis. Les entrées de la substitution sont les deux surfaces partitionnées hélicoïdales, la sortie est un élément virtuel liant les deux composants.

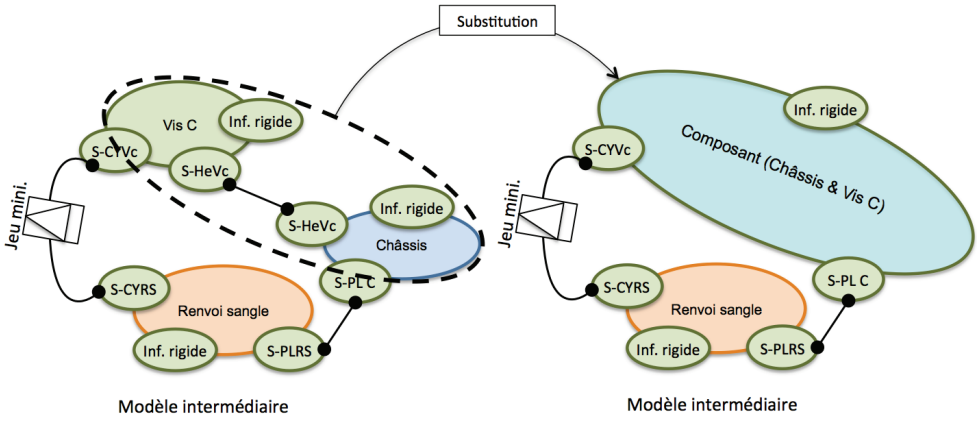


figure 4.22 – Schéma procédural de la substitution

En figure 4.23, l'approximation du plan PLRS et du cylindre CYRS est représentée par un rectangle, les entrées de l'association sont les deux surfaces partitionnées, les sorties sont le plan PLRS et le cylindre CYRS. Une seule approximation est représentée, car le critère retenu impose une association simultanée avec une contrainte de perpendicularité entre le cylindre et le plan pour le composant renvoi sangle. L'approximation du plan PLC et du cylindre CYVc est représentée également par un rectangle, les entrées de l'association sont les deux surfaces partitionnées de l'élément composite (vis c, châssis), les sorties sont le plan PLC et le cylindre CYVc. Une seule approximation est également représentée, car le critère retenu impose une association simultanée avec une contrainte de perpendicularité entre le cylindre et le plan pour le composant composite (vis c, châssis).

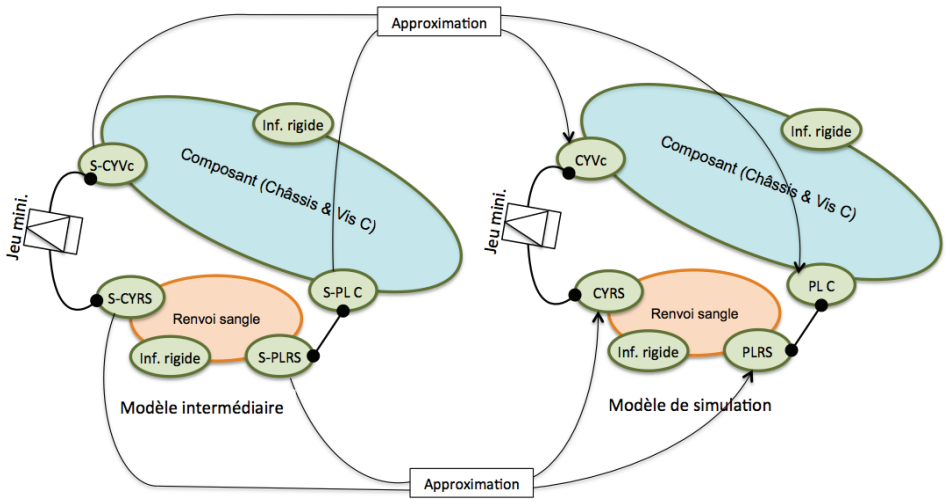


figure 4.23 – Schéma procédural de l'approximation

Le schéma procédural complet de la condition de jeu minimal (fig. 4.7) représente les opérateurs permettant de passer d'un modèle à l'autre à partir du modèle primitif pour atteindre le modèle de simulation (fig. 4.24).

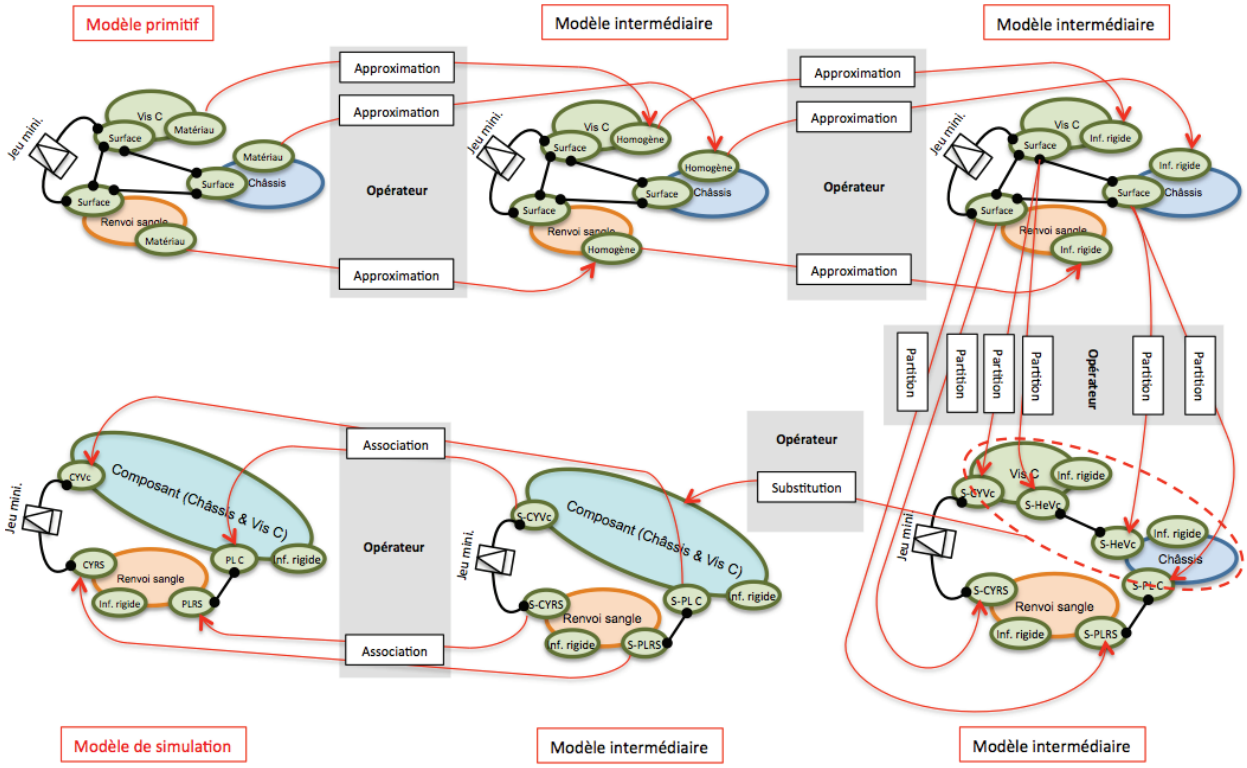


figure 4.24 – Schéma procédural complet de la condition de jeu minimal

4.3.2 CONDITION DE CONTRAINTE MAXIMALE

La condition de contrainte maximale admissible (fig. 4.25a) s'applique au composant renvoi sangle lorsque celui-ci est soumis aux actions mécaniques de la sangle (fig. 4.25b).

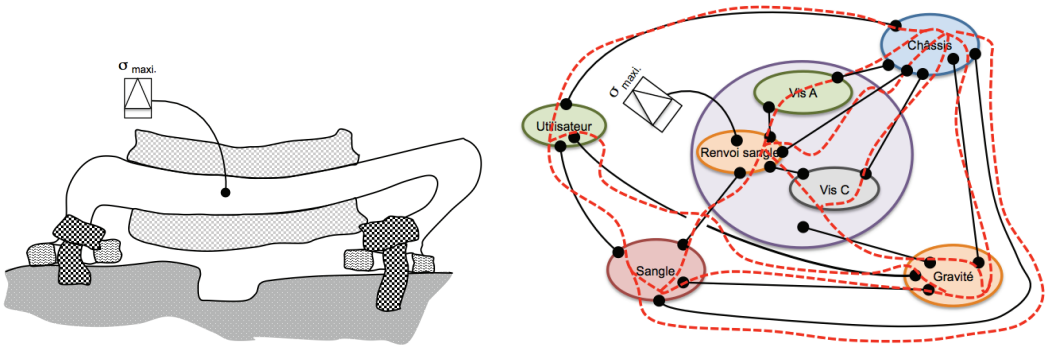


figure a — Modèle primitif

figure b — Schéma de flux

figure 4.25 – Schéma de flux – Modèle primitif

Le flux fonctionnel influençant la fonction FS1 (voir chapitre V) est véhiculé par les interactions et est représenté en figure 4.25b par des traits pointillés rouge passant le long des interactions concernées. Le flux fonctionnel représente les phénomènes physiques circulant dans les éléments et le système en interaction. Il transite entre autres dans le châssis, les vis, le renvoi sangle et la

sangle correspondant aux éléments appartenant au périmètre de l'étude de notre système.

En figure 4.26, l'approximation est représentée par un rectangle, les entrées de l'opération sont les pôles (matériau) hétérogènes du modèle primitif des composants (renvoi sangle, vis C, vis A, châssis, sangle) et les sorties sont les matériaux homogènes représentés par les pôles des composants. Le pôle homogène correspond à l'objet matériau avec cette propriété (homogène).

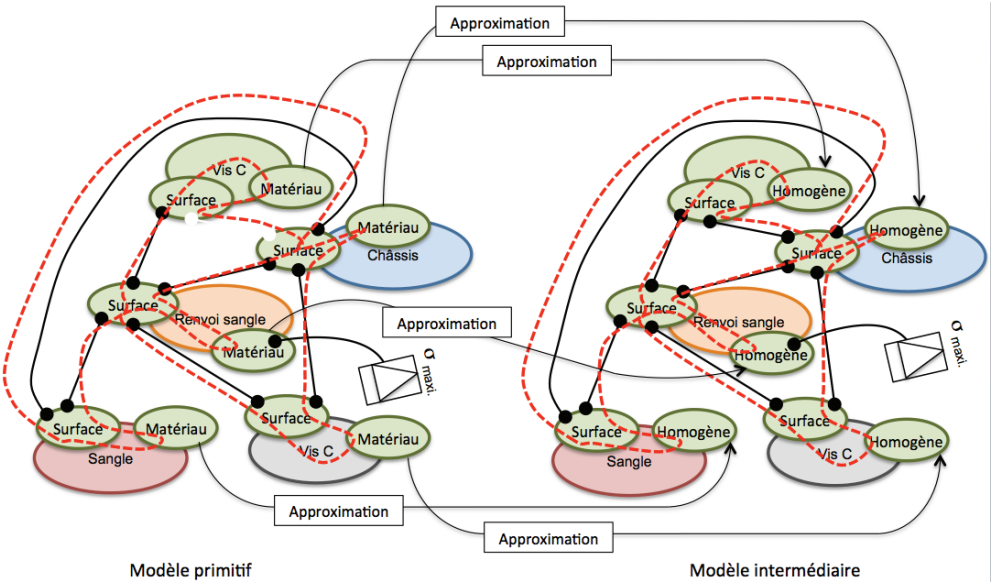


figure 4.26 – Schéma procédural de l'approximation — Homogène

En figure 4.27, l'approximation est également représentée par un rectangle, les entrées de l'opération sont les pôles (matériau) homogènes du modèle intermédiaire des composants (renvoi sangle, vis C, vis A, châssis, sangle) et les sorties sont les matériaux avec un comportement mécanique élastique représenté par les pôles nommés « élastique » associé à chaque composant.

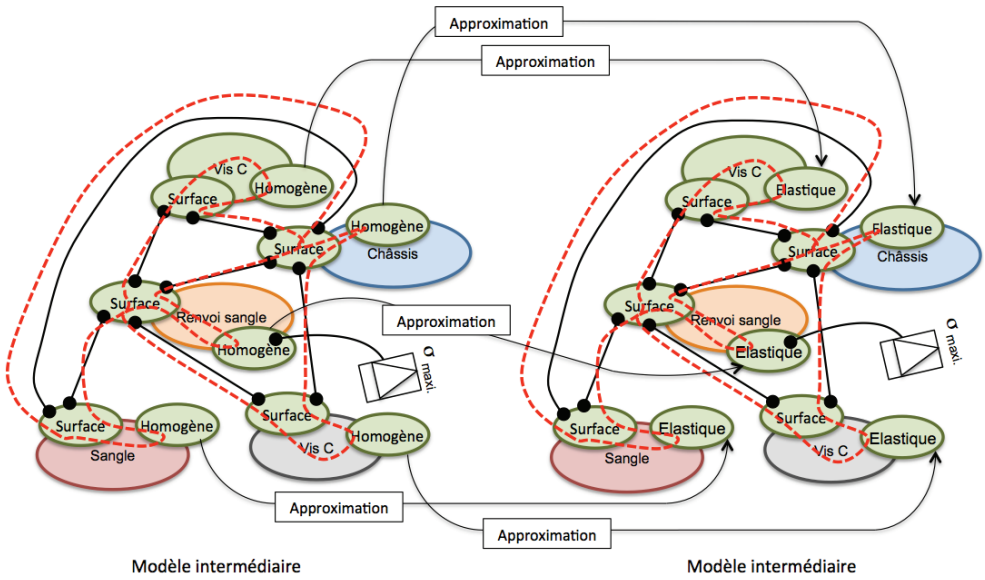


figure 4.27 – Schéma procédural de l'approximation – Comportement élastique

En figure 4.28, les opérations de substitution sont représentées par un rectangle, les entrées de l'opération sont les pôles des composants à substituer et les sorties sont des composants virtuels représentant, d'une part, les liaisons encastrements infiniment rigides (CVV) et, d'autre part, l'effort résultant (S) en remplacement pour ce dernier des actions locales de la sangle sur le renvoi sangle (fig. 4.28).

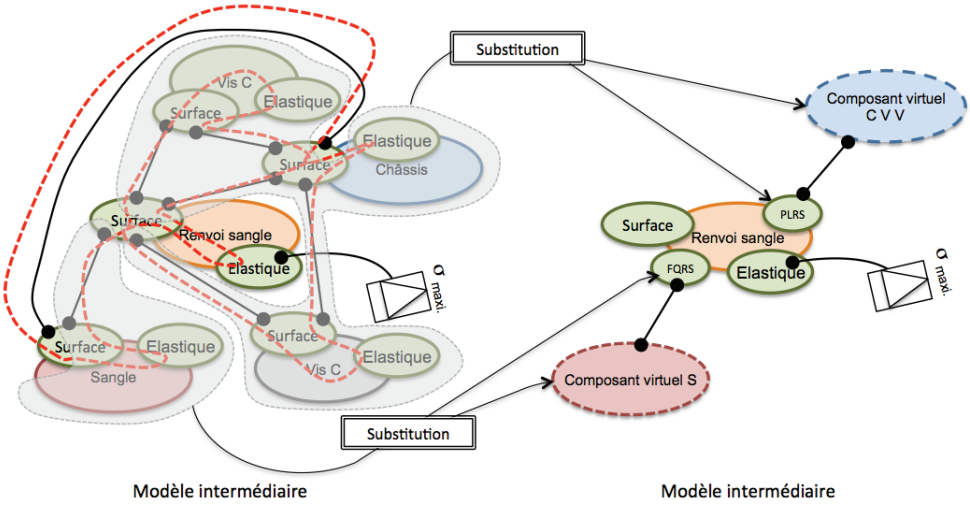


figure 4.28 – Schéma procédural de l'opérateur de substitution

La figure 4.29 est une représentation partielle du système étudié pour illustrer l'opération de substitution de la sangle en interaction avec le renvoi sangle.

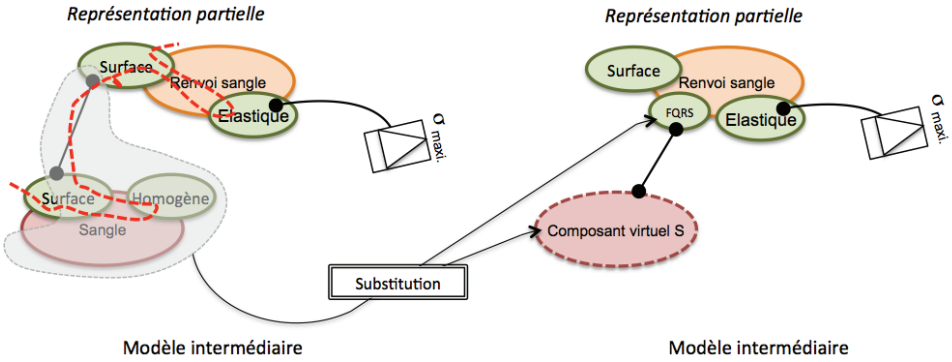


figure 4.29 – Schéma procédural de l'opérateur de substitution pour la sangle

Cet opérateur de substitution (rectangle double trait) est un processus d'opérations comportant trois étapes :

- la première pouvant être décrite par une opération de substitution (rectangle simple trait) reposante sur le remplacement du composant sangle par ses effets sous la forme d'un composant virtuel ;
- la seconde, un opérateur de partition reposant sur l'extraction d'une surface ou d'un volume ;
- la troisième, un opérateur d'approximation reposant sur une association (fig. 4.30).

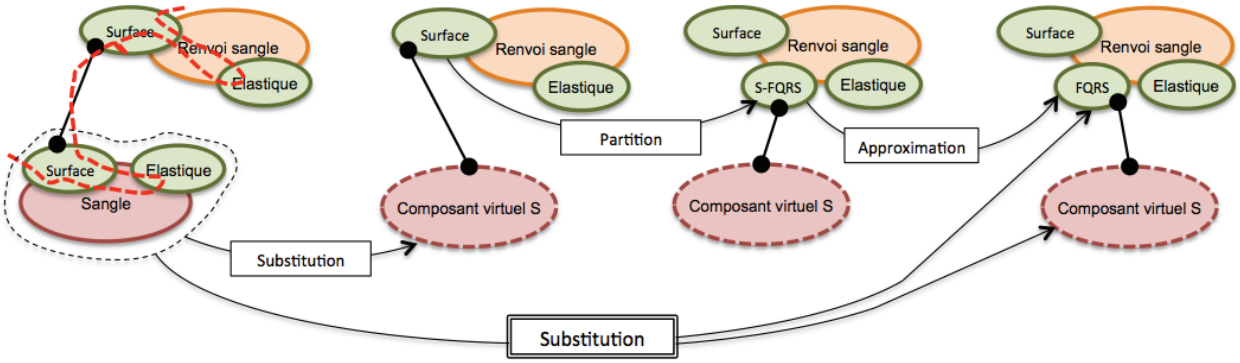


figure 4.30 – Décomposition de l'opérateur de substitution

Cet opérateur qui décrit un processus d'opération ordonnée a pour nom, le nom de l'opération principale de ce processus, ici, l'opération de substitution.

Le composant virtuel (S) a pour effet de remplacer les actions locales de la sangle par un effort résultant. La partition repose sur l'extraction d'une portion de la surface de forme quelconque du renvoi sangle (S-FQRV) soumise aux actions locales de la sangle. L'approximation repose sur l'association d'une portion de la géométrie idéale du renvoi sangle (FQRV) selon le critère des moindres carrés sans ajouter d'autres contraintes.

La figure 4.31 est une représentation partielle du système étudié pour illustrer l'opération de substitution des composants châssis et vis en interaction avec le renvoi sangle.

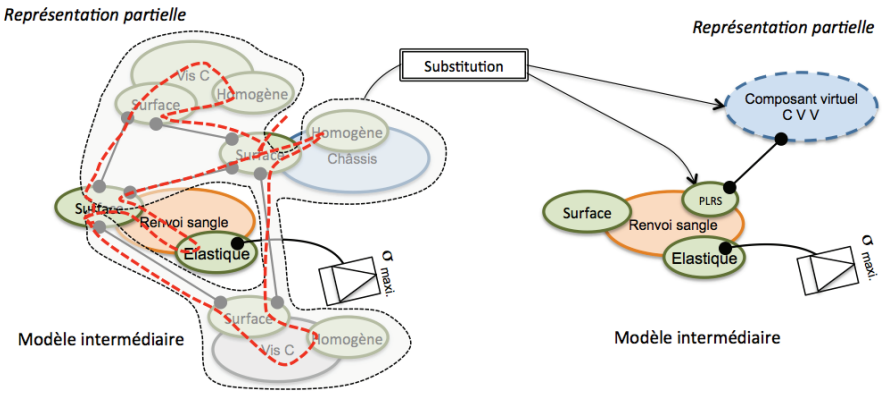


figure 4.31 – Schéma procédural de l'opérateur de substitution pour le châssis et les deux vis

Cet opérateur de substitution est un processus d'opération comportant également trois étapes :

- la première pouvant être décrite par une opération de substitution reposant sur le remplacement des composants châssis et vis par leurs effets sous la forme d'un composant virtuel ;
- la seconde, un opérateur de partition reposant sur l'extraction de surfaces ;
- la troisième, un opérateur d'approximation reposant sur une association (fig. 4.32).

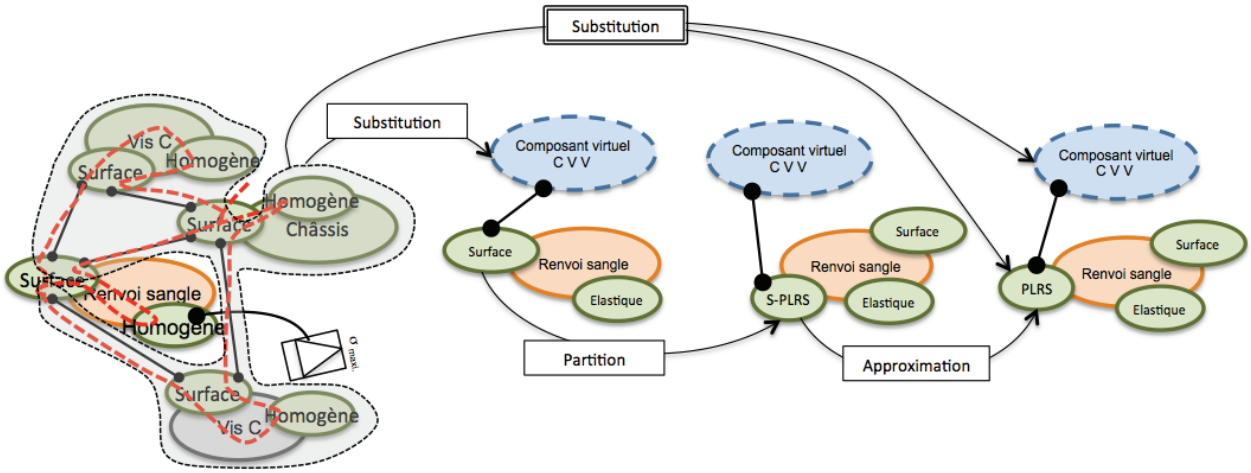


figure 4.32 – Décomposition de l'opérateur de substitution

Le composant virtuel (CVV) a pour effet de remplacer l'assemblage du renvoi sangle par les deux vis sur le châssis par des liaisons encastrements infiniment rigides. La partition repose sur l'extraction de portions de surfaces nominalement planes (S-PLRS) du renvoi sangle. L'approximation repose sur l'association d'une portion de plan (PLRV) selon le critère des moindres carrés sans d'autres contraintes.

En figure 4.33, l'approximation est représentée par un rectangle, l'entrée de l'opération est le modèle intermédiaire (défauts de forme) et la sortie est la géométrie idéale.

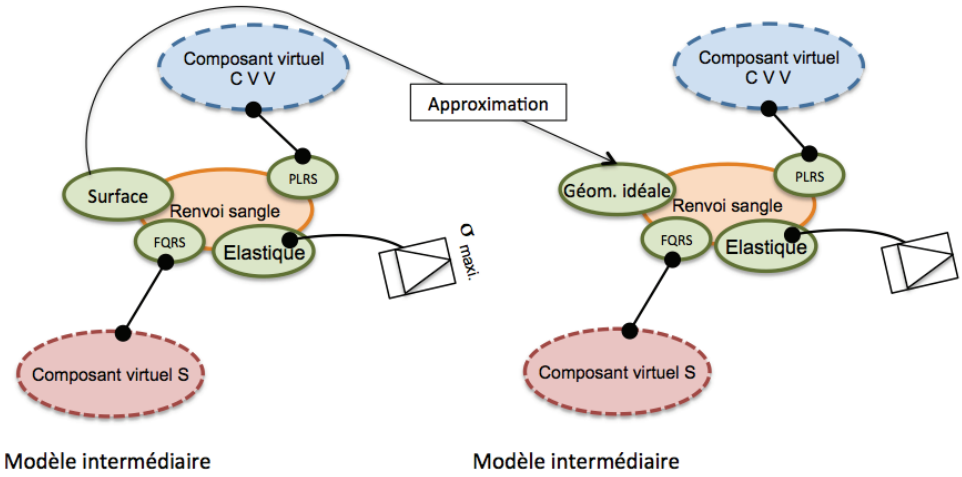


figure 4.33 – Schéma procédural d'approximation – Géométrie idéale

En figure 4.34, l'échantillonnage est représenté par un rectangle, l'entrée de l'opération est la géométrie idéale et la sortie est la géométrie discrétisée obtenue par un maillage du composant renvoi sangle.

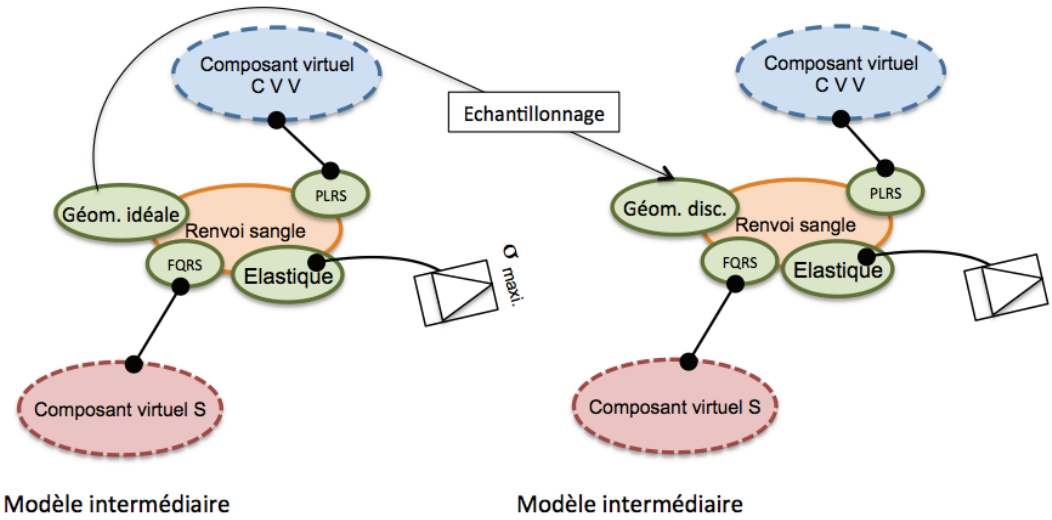


figure 4.34 – Schéma procédural d'échantillonnage – Géométrie discrétisée (maillage)

4.3.3 SYNTHESE

Le schéma procédural vise à définir l'ensemble des opérations de définition de ce processus de simplification avec la possibilité d'avoir différents modèles intermédiaires et en y associant les hypothèses nécessaires.

Les hypothèses sont généralement des propriétés soumises à des conditions.

En figure 4.26, l'opération d'approximation permet de passer d'un matériau hétérogène à un matériau homogène. Derrière cette opération se pose la question de l'hypothèse à poser sur l'influence de la différence de propriété matière entre deux points sur la propriété fonctionnelle. Dit autrement, en supposant que l'on puisse faire la simulation des deux modèles intermédiaires, avant et après homogénéisation, la différence de résultat doit être suffisamment faible pour les deux simulations. L'hypothèse réalisée lors de cette étape de simplification est que cet écart soit inférieur à une incertitude tolérancée.

Comment peuvent être formulées les hypothèses dans un processus de modélisation ? La réponse est apportée dans la partie suivante relative aux spécifications.

4.4 SPECIFICATIONS

Geospelling proposé par Ballu et Mathieu [Ballu 1995] permet de décrire les propriétés quantitatives sur des éléments géométriques et d'exprimer ainsi des spécifications sur ces propriétés. Pour eux, une spécification est une condition sur une propriété. Les éléments géométriques sont issus du « skin modèle » que nous appelons plus généralement modèle primitif. La propriété sur laquelle porte directement la condition est une propriété de base, mais l'opérateur comprenant l'ensemble des opérations de définition des éléments et la propriété de base définit une propriété dérivée telle que définie au chapitre 3. La norme ISO 17450-1 définit l'opérateur de spécification comme l'ensemble des opérations mises en œuvre, dont l'évaluation finale qui permet de poser la condition. L'opérateur de vérification qui

est la description des opérations réalisées pour contrôler la spécification dans la réalité, est également défini dans cette norme. En effet, un opérateur de vérification ne peut pas être une simulation parfaite d'un opérateur de spécification donné, il en résulte d'ailleurs une cause importante d'incertitude de mesure. Nos travaux tendent à montrer que nous pouvons étendre les opérations à toutes les propriétés de la physique (chapitre 3), en conséquence la notion de spécification peut également être étendue. Cette notion de spécification, uniquement appliquée au modèle primitif dans GeoSpelling, peut être appliquée à tout modèle au cours du cycle de modélisation (modèles intermédiaires et modèle de simulation). Nous avons déjà fait apparaître des spécifications dans les graphes de la partie précédente.

Les spécifications sont traditionnellement utilisées pour identifier les propriétés fonctionnelles, au sens large, comprenant les spécifications issues directement des fonctions principales du produit, les spécifications issues des fonctions techniques, les spécifications issues des contraintes de fabrication…

Nous allons étendre l'usage des spécifications aux spécifications permettant de limiter l'influence des simplifications réalisées au cours du processus de modélisation et aux spécifications permettant d'identifier cette influence. Ces spécifications permettent la gestion des hypothèses de modélisation.

Ces différentes applications des spécifications sont décrites par la suite.

4.4.1 SPECIFICATIONS FONCTIONNELLES

La réalisation d'une fonction implique la transformation d'une énergie, d'un flux d'énergie, de matière ou d'information entre des objets, ou le changement d'état causé par un ou plusieurs de ces flux [ULLMAN 03] (fig. 4.35a). Pour chaque fonction lui correspond une propriété soumise à une condition, soit une spécification fonctionnelle (fig. 4.35b). La fonction développée dans l'exemple correspond à une position du renvoi sangle telle que la vis puisse se placer sans qu'il y ait une interférence entre le corps de la vis et le trou de passage de vis du renvoi sangle. La réalisation de cette fonction s'exprime par la spécification de jeu minimal entre la vis A et le renvoi sangle (fig. 4.35b).

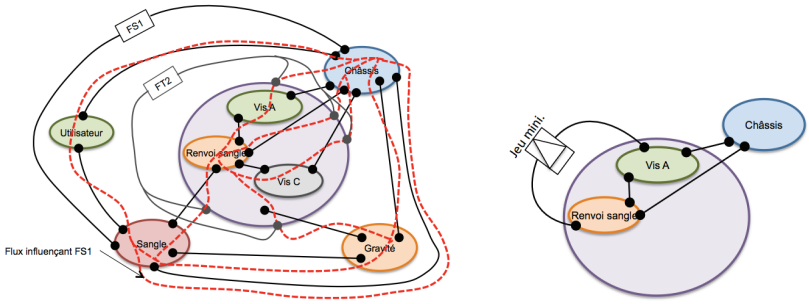


figure a – Fonctions figure b – spécification

figure 4.35 – Graphe fonctionnel — Spécification

Cette spécification de jeu minimal (fig. 4.36a) est un opérateur de spécification (fig. 4.36b). Cet opérateur est constitué d'un

ensemble d'opérations. Parmi les opérations, l'évaluation définit l'expression de la condition.

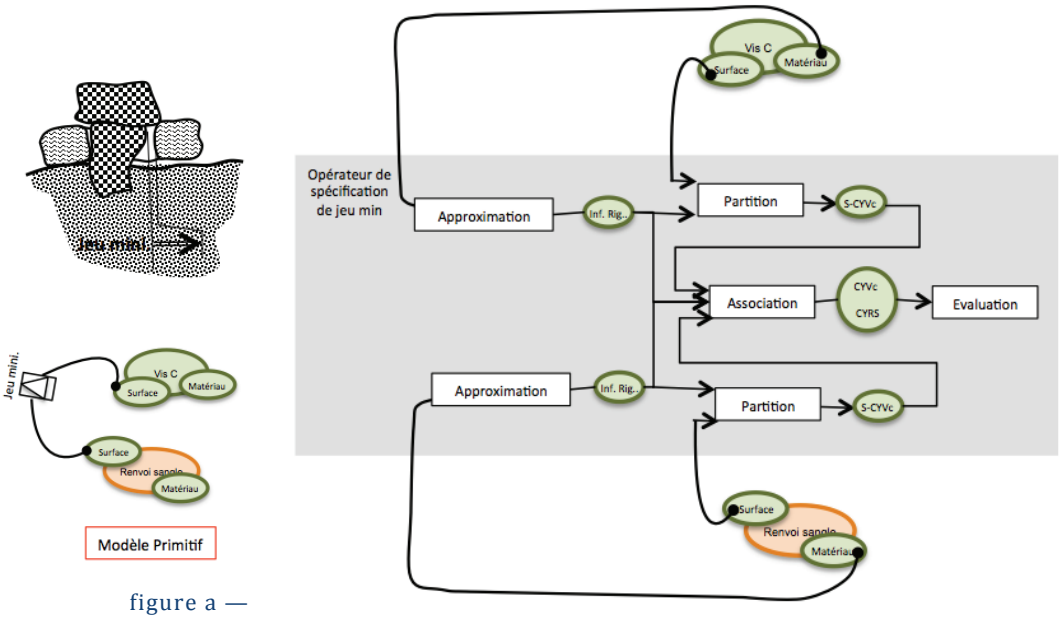


figure a — Spécification de jeu mini.

figure b — Opérateur de spécification

figure 4.36 – Spécification – Modèle primitif

Cependant si la spécification est de même nature suivant le type de modèle : primitif, intermédiaire, ou de simulation, alors l'opérateur de spécification peut être constitué d'un ensemble d'opérations évoluant en fonction du type de modèle. La description des opérateurs de spécification est différente dans les cas du modèle primitif (fig. 4.36b) et du modèle intermédiaire (fig. 4.37b)

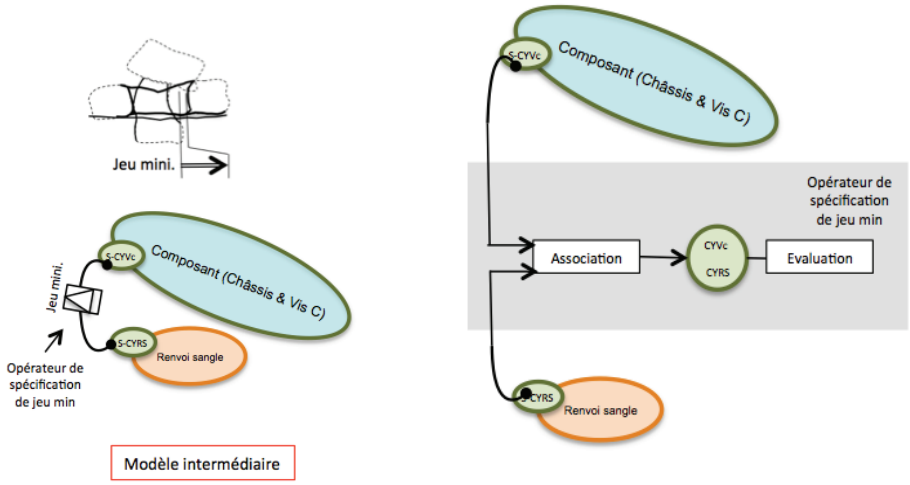


figure a — Spécification de jeu mini.

figure b — Opérateur de spécification

figure 4.37 – Spécification – Modèle intermédiaire

Ces opérateurs de spécification sont des exemples qui illustrent la diversité des opérations en fonction du type de modèles.

4.4.2 SPECIFICATIONS LIEES AUX HYPOTHESES

Au cours du processus de simplification, du modèle primitif au modèle de simulation, différents modèles intermédiaires sont définis afin de réduire le nombre de propriétés. Cependant, les hypothèses permettant de séquencer ce processus ne doivent pas altérer le résultat de la simulation. Quelles sont-elles ?

Dans l'un des cas traités, l'opération d'approximation permet de passer du modèle primitif avec des composants dont le matériau est hétérogène, au modèle intermédiaire avec des matériaux homogènes. Derrière cette opération se pose la question de l'hypothèse effectuée sur les propriétés du matériau pour le modèle primitif. En effet, cette opération induit l'hypothèse que la différence de propriété matériau entre deux points est suffisamment faible pour que son influence soit négligeable sur la propriété simulée. Ces hétérogénéités sont supposées inférieures à des valeurs limites définies par le concepteur dont la conséquence est une variation admissible des valeurs simulées entre les deux modèles consécutifs. Afin de spécifier ces valeurs limites, nous définissons des spécifications de maîtrise de la simplification. Il s'agit que la simplification n'amène pas trop de modifications du modèle vis-à-vis de la propriété à simuler. En figure 4.38, pour le modèle primitif, le pôle matériau hétérogène de chaque élément a pour spécification les propriétés matériaux soumises à des valeurs limites, les conditions permettant de considérer le matériau comme homogène.

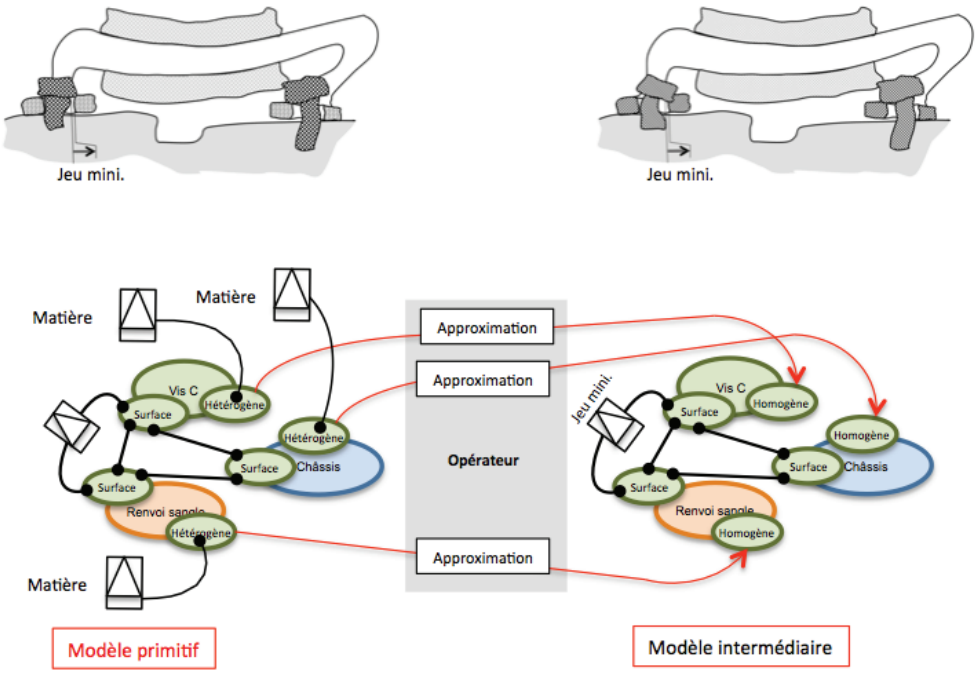


figure 4.38 – Spécification liée à l'hypothèse matière

En figure 4.39, nous posons l'hypothèse de défauts de forme des deux surfaces (S-CYVc et S-PL C par exemple) et d'orientation entre elles négligeables par rapport à la valeur simulée du jeu minimal. Cependant, pour assurer que ces défauts sont négligeables, il est nécessaire de définir des spécifications sur les écarts de forme de chaque surface et sur l'écart d'orientation entre elles.

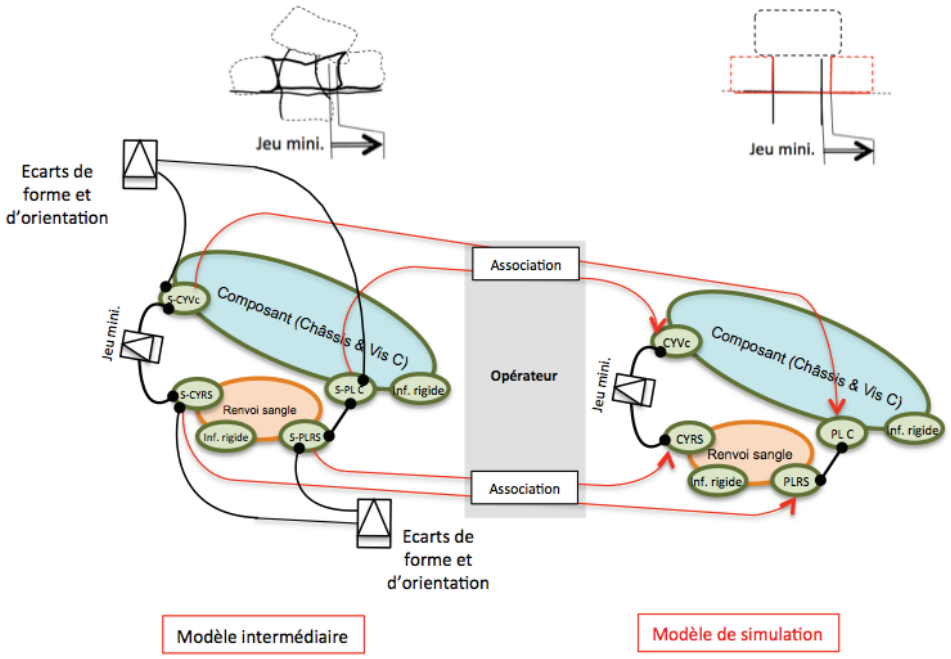


figure 4.39 – Spécification liée aux hypothèses d'écarts de forme et d'orientation

Nous venons de définir des spécifications pour maîtriser les objets simplifiés dans l'étape. Il faut assurer que les objets du modèle de l'étape n qui vont être transformés et simplifiés à l'étape n+1 ne pourront pas avoir une influence trop importante. Mais quelle est l'influence, l'incertitude sur la valeur simulée entre chaque modèle ?

Il faut définir une propriété et une condition liée à l'écart entre les valeurs simulées de deux modèles consécutifs. Afin d'y répondre, nous posons une spécification entre les spécifications de jeu minimal des deux modèles consécutifs (fig. 4.40).

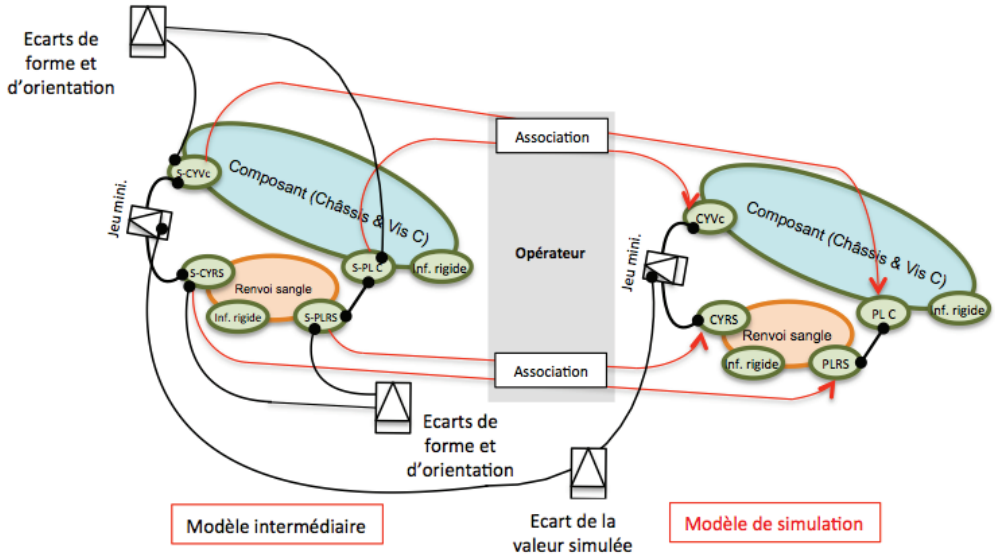


figure 4.40 – Niveau de spécifications dans le processus de modélisation

Cette propriété est appelée : propriété de validation de l'hypothèse de l'étape de simplification. Elle est définie comme la différence entre les deux propriétés à simuler. Afin de valider l'hypothèse de simplification du modèle de simulation, il faut que

cette différence soit inférieure à un certain seuil. Si elle n'est pas validée, soit il faut abaisser la limite admissible sur les spécifications de maîtrise de la simplification (défaut de forme), soit la nature de la simplification en elle-même n'est pas admissible.

4.5 SYNTHESE

Nous commençons dans ce chapitre à appliquer les concepts présentés dans les chapitres précédents au processus de modélisation et de simulation. Le processus de modélisation comprend le choix d'un modèle primitif et sa simplification pour obtenir le modèle de simulation. Cette simplification est effectuée en plusieurs étapes successives donnant lieu à des modèles intermédiaires.

Chaque modèle est décrit par des objets et des interactions entre ces objets. La spécification fonctionnelle ou à simuler est elle-même définie pour chaque modèle.

Du point de vue de la modélisation géométrique et physique des systèmes, l'apport est essentiellement sur la notion de modèles primitif, intermédiaire ou de simulation. En effet, habituellement, la modélisation est essentiellement basée sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène…), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulières. Mais quasiment jamais, un modèle que l'on ne peut qu'imaginer n'est considéré.

Pourtant, ce type de modèle ne peut pas être ignoré si l'on désire définir un modèle pour la simulation en posant correctement les hypothèses de simplification. Voilà la raison pour laquelle la notion de modèle infini a été introduite. Dans nos exemples, ce modèle infini est le modèle primitif de la figure 4.18a. Ce modèle infini doit être la base du processus de simplification conduisant du modèle primitif au modèle de simulation.

Le modèle de simulation est un modèle adapté défini par le concepteur afin de simuler le comportement du système. Le modèle primitif est un modèle, imaginé par le concepteur, pour réfléchir à l'influence de l'ensemble des défauts du système sur les performances du produit.

Le schéma procédural vise à définir l'ensemble des opérations de définition de ce processus de simplification avec la possibilité d'avoir différents modèles intermédiaires et en y associant les hypothèses nécessaires. L'objectif est de poser au mieux les hypothèses, activité généralement négligée lors de l'activité de modélisation. Ici, des spécifications de maîtrise de la simplification et de validation des hypothèses sont introduites à cette fin.

Les concepts présentés doivent pouvoir être utilisés pour traiter la modélisation des différents phénomènes mécaniques en jeu dans un système.

5 PROCESSUS DE CONCEPTION

Le processus de conception vise à définir la décomposition fonctionnelle du système. Ce chapitre propose une vision générale permettant d'appréhender les différents types de modélisation avec une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation

Les faits ne pénètrent pas dans le monde où vivent nos croyances, ils n'ont pas fait naître celles-ci, ils ne les détruisent pas ; ils peuvent leur infliger les plus constants démentis sans les affaiblir.

Marcel PROUST [5]

SOMMAIRE

5.1 Introduction au processus de conception *126*
5.1.1 Définition du processus de conception 128
5.1.2 Périmètre de l'étude 130
5.1.3 Éléments et interactions 130
5.2 Démarche d'analyse et de structuration *132*
5.2.1 Analyse du besoin 132
5.2.2 Analyse fonctionnelle externe 133
5.2.3 Analyse fonctionnelle technique 139
5.3 Modèle primitif dans le processus de conception *146*
5.4 Synthèse *150*
Bibliographie du chapitre 5 ..... *165*

[5]. *Du côté de chez Swann, Pléiade, Gallimard, [1918] 1987, p. 146.*

Concevoir un produit ou un système consiste à passer de l'expression d'un besoin à la définition des propriétés (caractéristiques) d'un objet permettant de le satisfaire et à la détermination de ses modalités de fabrication. L'activité de conception est une transformation provoquant un changement d'état du système. Pour Mistree [Mistree 1990], il s'agit d'un procédé de conversion d'information qui caractérise les besoins et les exigences pour un artefact, en des connaissances sur le produit. Suh définit la conception comme les interactions entre ce que nous voulons réaliser et comment nous voulons le réaliser [Suh 1990].

Cependant, la conception peut être vue également comme un processus. Ce processus de conception est une séquence d'activités de conception nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit [Reymen 2001]. Pour Wood, l'objectif d'un processus de conception est de synthétiser des systèmes qui réalisent les fonctions et les performances désirées. Le processus de conception est conduit au travers de phases différenciées entre autres par le niveau d'abstraction de la représentation du système.

Dans ce chapitre, nous proposons :

- un processus de conception visant à définir la décomposition fonctionnelle du système, où à chaque étape, l'activité de simulation est définie par un processus de modélisation ;
- une vision générale permettant d'appréhender les différents types de modélisation avec une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation.

5.1 INTRODUCTION AU PROCESSUS DE CONCEPTION

Afin d'illustrer le processus de conception, un exemple industriel décrit un système global dont la fonction est d'assurer la sécurité du conducteur lors de l'utilisation du véhicule. Nous nous intéresserons plus particulièrement au cas d'un dysfonctionnement provoqué par la collision du véhicule avec son environnement (autres véhicules, bâtiments, obstacles divers) qui correspond à une situation de vie particulière faisant l'objet d'un développement (fig. 5.1).

figure a – conduite

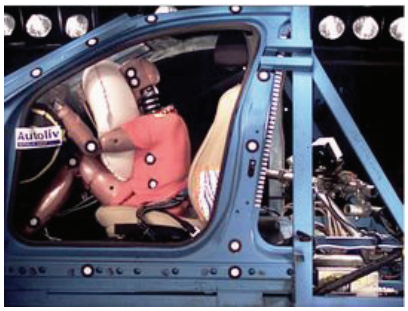


figure b – choc

figure 5.1 – Situations de vie (Image Autoliv)

Ce système global est constitué d'un châssis, d'un enrouleur, d'un renvoi sangle, d'un siège et de différentes accroches permettant de maintenir la sangle dans l'environnement (volume libre) avec l'utilisateur (fig. 5.2).

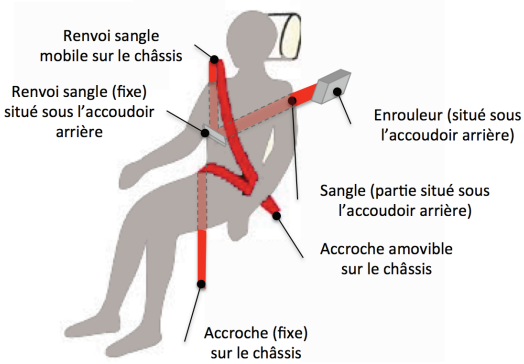


figure 5.2 – Eléments du système global

Dans la situation de vie « choc », l'énergie emmagasinée par l'utilisateur (conducteur, passager) est transmise à la sangle fixée au châssis. Ainsi l'utilisateur est maintenu afin d'éviter toutes collisions avec les éléments environnants.

De ce système global, nous retenons une partie des éléments qui font l'objet de notre étude. Ces éléments deviennent des éléments du milieu d'utilisation qui correspondent à des objets dont toutes les caractéristiques sont connues. La figure 5.3 décrit les éléments qui appartiennent à notre système dont l'étude doit nous permettre de définir une solution technique répondant au besoin du client final. Afin d'illustrer notre démarche, nous connaissons les éléments constituant notre système. Ces éléments : renvoi sangle, vis A, vis C (fig. 5.3b), permettent de maintenir une sangle de sécurité en position et en orientation par rapport au châssis en fonction des situations de vie.

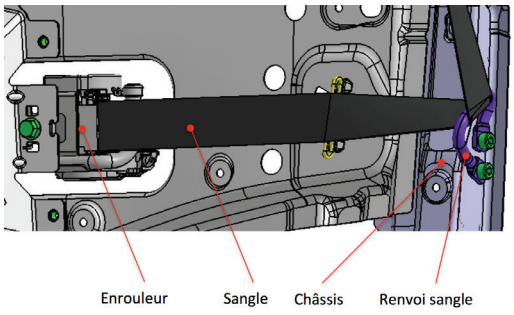


figure a – système, sangle et châssis

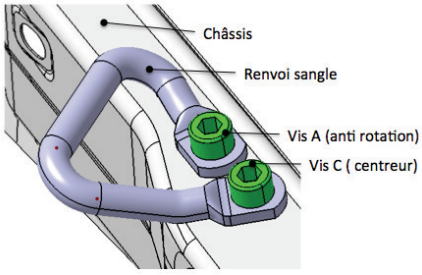


figure b – système et châssis

figure c – composant : renvoi sangle

figure 5.3 — Exemple industriel (Autoliv)

Dans un premier temps, l'utilisateur actionne la sangle qui coulisse dans le système à partir de l'enrouleur jusqu'à l'accroche amovible associée au châssis. Puis, ainsi maintenue, la sangle coulisse en fonction des déplacements lents de l'utilisateur. Lors d'un choc dangereux du châssis, la sangle maintenue par les attaches, le renvoi sangle amovible, l'enrouleur et le renvoi sangle maintiennent le conducteur en position. Évidemment, il s'agit d'une solution très particulière afin d'illustrer les concepts. Le positionnement et le maintien de la sangle sur le châssis sont

réalisés par l'action des vis (A, C) sur le renvoi sangle d'une part et par les attaches, les renvois sangles et l'enrouleur d'autre part.

Le périmètre de notre étude étant délimité nous pouvons nous intéresser à un processus de conception pour identifier une séquence d'activités nécessaire pour créer une représentation du produit.

5.1.1 Definition du processus de conception

Le processus de conception est une séquence d'activités de conception, nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit [Reymen 2001]. L'objectif d'un processus de conception est de synthétiser des systèmes qui réalisent les fonctions et les performances désirées [Wood 2001]. Il existe beaucoup de description de processus de conception. Cependant, selon Suh, il existe plusieurs pratiques et démarches de conception, mais une trame est commune aux activités de conception [Suh 1990] :

- Connaître et comprendre les besoins du client ;
- Définir le problème à résoudre pour satisfaire les besoins ;
- Conceptualiser la solution ;
- Effectuer l'analyse, pour optimiser la solution proposée ;
- Vérifier la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins des clients initiaux.

Ce processus de conception est une transformation d'informations (besoins, exigences) et de contraintes demandées en description d'une structure (un système technique) qui est capable de satisfaire ces demandes [Hubka 2001]. Nous retiendrons un processus issu de documentations normatives [NF-X50-100 2011].

L'analyse fonctionnelle [Afnor 2011] est utilisée dans les premières phases d'un projet pour créer ou améliorer un produit. Les outils utilisés se présentent le plus souvent sous la forme de graphes ou de diagrammes d'analyse. L'objectif de ce processus est de recenser caractériser, ordonner, hiérarchiser, et valoriser les fonctions du produit.

- Recenser afin de déterminer et d'identifier les fonctions du produit ;
- Caractériser afin d'énoncer les critères d'appréciation, les niveaux et la flexibilité de ces fonctions ;
- Ordonner afin de classifier les fonctions en fonction de services et fonctions techniques ;
- Hiérarchiser afin d'attribuer à chaque fonction un poids ou une valeur lié à son importance.

Il existe deux niveaux dans l'analyse fonctionnelle, l'analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) [NF-X50-100 2011] mettant en évidence des fonctions liant le système à son environnement (les éléments du milieu extérieur), et l'analyse fonctionnelle

technique (ou interne) liant les fonctions internes du système avec ce même environnement.

- Pour l'analyse fonctionnelle du besoin (externe), l'analyse du cycle de vie permet tout d'abord l'identification exhaustive des situations de vie. Pour une situation donnée sont identifiés les éléments du milieu extérieur et les fonctions de service. Ces fonctions sont les actions attendues d'un produit (ou réalisées par lui) pour répondre à un élément du besoin de l'utilisateur [NF-X50-100 2011]. Ces fonctions sont caractérisées par leurs critères d'appréciation qui sont des paramètres valués et permettent d'apprécier la manière dont la fonction est remplie ou une contrainte respectée. Ainsi le système, par les interactions et les flux, permet d'assurer des fonctions. La méthode APTE [Bretesch 2000] issue des principes de « Value Analysis » de L. D. Miles [Miles 1961] est un outil permettant de réaliser l'inventaire des milieux environnants et de conduire l'analyse fonctionnelle du besoin [NF-EN1325-1 1996] .

- Pour l'analyse fonctionnelle technique (interne), les fonctions techniques sont mises en évidence. Ces fonctions internes au produit entre les constituants sont choisies par le concepteur dans le cadre d'une solution pour assurer des fonctions de services. Si les fonctions de service sont voulues et sont directement perçues par le client final, les fonctions techniques sont alors le plus souvent ignorées du client et ne donnent pas directement de la valeur au produit. Elles résultent d'actions internes au produit et dépendent de la conception et des solutions technologiques choisies pour réaliser les fonctions de service dont elles dépendent pour la qualité du produit.

L'analyse fonctionnelle du besoin étant réalisée, il est possible de poursuivre par l'analyse fonctionnelle technique qui met en évidence les relations « fonction – structure ». Ce prolongement de l'analyse fonctionnelle permet une décomposition des fonctions de service en des fonctions techniques.

Pour chaque fonction, nous postulons qu'il existe une caractéristique unique soumise à une condition. Cette remarque conduit à définir une spécification implicite pour chaque fonction.

Note, ce postulat pose la question de l'expression de la fonction. En effet, lorsque la caractéristique unique est difficilement identifiable pour une fonction donnée, il est généralement convenu d'associer un ensemble de propriétés. Cette remarque implique que la décomposition fonctionnelle n'est pas triviale.

Or, ce processus de conception est totalement différent du processus de modélisation (chapitre précédent). Ce dernier est un ensemble d'activités aboutissant au modèle de simulation. Le processus comprend une première étape de modélisation sous la forme d'un modèle primitif. Le modèle primitif est un modèle imaginaire, aussi complet que possible, aussi proche du système réel étudié que possible. Ensuite, ce modèle primitif étant par

définition très complexe, une série d'étapes de simplification est mise en œuvre pour aboutir au modèle de simulation.

Ce processus de modélisation peut s'appliquer à chaque stade de la décomposition fonctionnelle du processus de conception.

5.1.2 Perimetre de l'etude

Le cadrage du processus de conception comprend, à partir de l'examen du contexte d'ensemble du projet, la définition du périmètre du projet, des limites du sujet étudié et des degrés de liberté sur la définition des besoins et la recherche de solutions.

Le périmètre de l'étude est identifié dans la situation de vie « choc ». La sangle, le châssis, l'enrouleur, l'utilisateur, le milieu ambiant, l'environnement et l'utilisateur sont à l'extérieur de notre système. Ces éléments sont nommés les éléments du milieu extérieur (Afnor 2011). Il est nécessaire de préciser certains de ces éléments derrière leur simple vocable :

- l'élément du milieu extérieur « châssis » comprend le châssis lui-même, le siège, les attaches (fixes et amovibles), le renvoi sangle mobile et l'enrouleur (fig. 5.2) ;
- l'élément du milieu extérieur « milieu ambiant » comprend l'ensemble des objets ayant des actions à distance telles que la gravité, le champ magnétique par exemple, ou des actions de type température, humidité, etc. Dans notre étude, nous considérons principalement la gravité ;
- l'élément du milieu extérieur « environnement » correspond aux éléments environnants qui ensemble par leurs surfaces contribuent à définir un espace dans lequel notre système doit s'insérer sans interagir avec l'ensemble de ces éléments environnants.

5.1.3 Éléments et interactions

À partir de notre périmètre d'étude et du cycle de vie de notre système, nous avons retenu trois situations de vie pertinentes :

- Conduite : La sangle est maintenue en place par le système et maintient l'utilisateur lors de la conduite, le système étant posé sur le châssis ;
- Choc : La sangle est maintenue en place par le système et maintient l'utilisateur lors du choc, le système étant posé sur le châssis ;
- Repos : La sangle est maintenue en place par le système sans action de l'utilisateur, le système étant posé sur le châssis.

L'utilisateur n'est présent que dans les deux premières situations de vie (figure 5.4a). Le graphe est identique dans ces deux situations, seules les caractéristiques des éléments (châssis, environnement, utilisateur, sangle, gravité) peuvent changer.

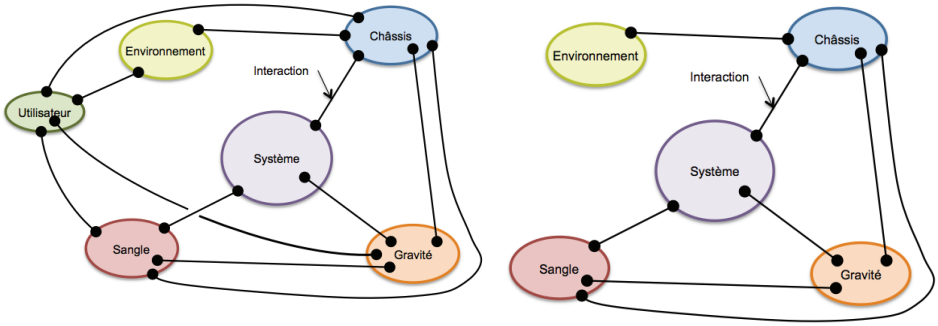


figure a — situations de vie : conduite et choc

figure b — situation de vie : repos

figure 5.4 — Éléments et interactions

Les arêtes des graphes en trait continu représentent les interactions entre les éléments (composants, système, utilisateur) dans chaque situation de vie. L'interaction est une action réciproque entre deux éléments. Une interaction est un lien entre deux composants liés à un phénomène physique. Les interactions peuvent être des interactions de contact ou à distance. Une interaction de contact est par exemple une action mécanique (force) entre les deux solides comme la sangle avec le système, une interaction à distance est par exemple une force gravitationnelle ou une force électrostatique. Ce lien est susceptible de véhiculer un flux d'énergie, de matière ou d'information entre les composants.

Les interactions de contact sont représentées avec des arêtes aboutissant sur le bord des sommets représentant les éléments, alors que les arêtes représentant les interactions à distance aboutissent à l'intérieur des sommets (fig. 5.4, interactions avec la gravité). Par contre, il n'y a pas d'interaction entre le système et l'élément dénommé « environnement » puisque dans notre cas, il n'y a pas de contact avec le système ni d'action à distance. L'élément «environnement» correspond au volume dans lequel notre système doit s'insérer sans entrer en contact.

Le périmètre de l'étude est formé du système et de tous les éléments en interaction avec lui. La figure 5.4a illustre les interactions dans la situation de vie correspondant par exemple au choc. L'élément utilisateur est en contact avec le châssis, la sangle et l'environnement. Ce dernier élément correspond au volume dans lequel le système doit s'intégrer sans générer d'interaction, c'est-à-dire, sans être en contact avec des éléments environnants (sièges arrière et passager, cache style, passager arrière…). L'élément gravité est en interaction à distance avec les éléments sangle, utilisateur, système et châssis. L'élément sangle est en interaction avec le système, l'environnement, le châssis. Pour ce dernier, l'interaction avec la sangle est triple puisqu'elle est fixée par une de ses extrémités au châssis, puis à l'accroche amovible fixée également au châssis et elle est guidée et maintenue par le renvoi sangle amovible (fig. 5.2).

5.2 DEMARCHE D'ANALYSE ET DE STRUCTURATION

La démarche d'analyse et de structuration du processus de conception va être détaillée. Nous proposons une démarche de recherche des propriétés à simuler depuis l'émergence du concept jusqu'aux choix et à la réalisation d'une solution. La démarche se déroule en trois phases, chacune correspondant à un niveau d'analyse différent : analyse du besoin, analyses fonctionnelles externe et interne. L'utilisation des outils de l'analyse fonctionnelle, de la structure ou de la démarche est privilégiée. Cependant, les outils sont parfois complétés, comme nous le proposerons en figure 5.8, afin de préciser les notions de flux et de fonction. Pour la structuration de la démarche, nous avons souhaité également scinder l'analyse fonctionnelle du besoin en deux phases, l'analyse du besoin et l'analyse fonctionnelle externe.

- l'analyse du besoin est la première étape de l'analyse fonctionnelle du besoin. Dans ce processus de conception, elle permet d'exprimer le périmètre de l'étude, les critères de qualification du client et également toutes les situations de vie de référence ;
- à partir de l'expression de ce besoin, l'analyse fonctionnelle externe permet de lister les fonctions liées au produit à concevoir. Les flux dits fonctionnels sont alors présents ;
- la dernière phase de cette démarche est l'analyse fonctionnelle interne (ou technique). Elle permet de prolonger la décomposition fonctionnelle, vers une décomposition structurelle où les composants élémentaires sont identifiés, et leurs interactions formalisées. Les flux fonctionnels sont également présents ainsi que les flux induits.

5.2.1 ANALYSE DU BESOIN

Expression fonctionnelle du besoin

Le processus de conception, dans sa démarche, pour être rationnel et efficace, commence par une formulation exhaustive du besoin exprimé ou implicite des utilisateurs. A ce stade, nous disposons de l'expression du besoin du client en termes marketing, économiques, des délais et de résultats attendus. L'analyse fonctionnelle permet de traduire et d'intégrer dans le processus de conception le besoin pour l'utilisateur final, le client ou le concepteur [Prudhomme 2003]. Cependant, l'expression du besoin sous la forme fonctionnelle ne préjuge pas de la constitution du système. Le processus de validation du besoin permet de vérifier que celui-ci est correctement exprimé [NF-X50-100 2010]. L'expression fonctionnelle du besoin est une fonction « globale » traduisant la raison d'être du système.

Cycle de vie du produit

Le concepteur, ou le client, liste et hiérarchise les situations de vie (phases de vie) lui paraissant importantes. Cependant, de nouvelles situations de vie émergent en raison de l'évolution du

contexte économique, politique, industriel, comme la fin de vie du produit et le recyclage par exemple. Ainsi, l'évolution du cycle de vie par ces nouvelles situations de vie rend prématurément obsolète le produit qui n'a pas intégré, pendant sa conception, les contraintes relatives à ces situations de vie. Certaines situations de vie deviennent incontournables comme le recyclage par exemple, et sont imposées par des normes.

Dans notre exemple, nous avons énuméré trois situations de vie liées au cycle de vie du produit (fig. 5.4). Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) exprimé par le client définit les attentes pour le produit, mais dans la plupart des cas, il ne mentionne pas systématiquement les situations de vie du produit. Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer ces situations à partir des fonctions exprimées (fig. 5.5).

5.2.2 Analyse fonctionnelle externe

Le système, par les interactions et les flux, permet d'assurer des fonctions. La méthode APTE [Bretesch 2000] issue des principes de « value Analysis » de L. D. Miles [Miles 1961] est un outil permettant de réaliser l'inventaire des milieux environnants et de conduire l'analyse fonctionnelle externe [NF-EN1325-1 1996]. Ainsi, l'expression fonctionnelle du besoin implique de traduire le besoin en une liste de fonctions (services et contraintes). Pour cela, après avoir listé tous les éléments extérieurs au système dans chaque situation de vie (commercialisation, mise en place, utilisation, choc, conduite, maintenance, fin de vie) et avoir répondu pour chaque élément à la question : « quel service la solution va-t-elle apporter à un élément (ou à plusieurs à la fois)? ». Il faut formuler chaque service en une phrase complète incluant deux éléments avec un verbe d'action à l'infinitif dont le sujet est le système à concevoir. Cette phrase constitue une fonction de service lorsque deux éléments extérieurs interviennent, ou une fonction contrainte lorsqu'un seul élément extérieur intervient.

Graphe des interacteurs [FD X 50-159 2013]

En figure 5.5 est représenté au centre, le système, objet de l'étude et, est précisé son périmètre, en distinguant le système et ses éléments environnants, le système est considéré comme une « boîte noire » dont on pourra modifier la conception, alors que les éléments extérieurs, ne sont pas modifiables. Les interacteurs du produit, c'est-à-dire les éléments, personnes, matériels, matières, constituent l'environnement du produit. Il est important de ne pas oublier d'interacteurs, car il manquera des fonctions qui pourront s'avérer essentielles. Dans la mesure du possible, il faut décrire succinctement chaque interacteur afin que les participants à l'analyse partagent la même vision. L'étude de façon exhaustive des relations fonctionnelles entre les interacteurs et le produit définit un lien reliant :

- deux interacteurs en passant par le produit ;
- un interacteur au produit.

Dans ces deux cas, il s'agit d'une fonction (verbe d'action à l'infinitif (service à rendre), de sens positif et suivi d'un ou de

deux compléments (les interacteurs considérés)). Chaque fonction est exprimée exclusivement en termes de finalité.

Durant la situation de vie « choc », les fonctions de l'exemple sont les suivantes (fig. 5.5) :

- FS1 : Maintenir en position la sangle par rapport au châssis (lors du choc) ;
- FC1 : ne pas endommager la sangle ;
- FC2 : ne pas interférer avec l'environnement (volume libre) ;
- FC3 : ne pas agresser le châssis ;
- FC 4 : s'adapter au milieu ambiant (gravité, température …).

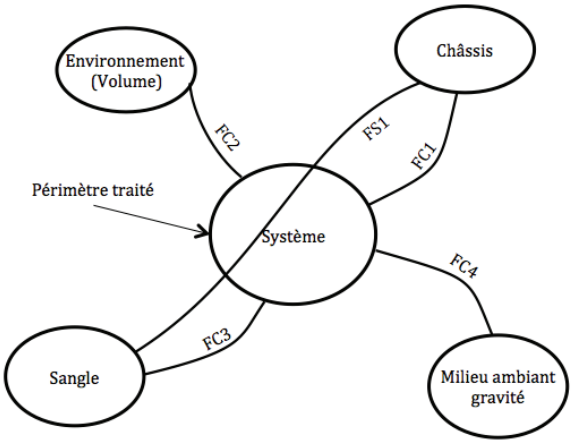


figure 5.5 – Graphe des interacteurs — Fonctions (FS1, FC1, FC2, FC3, FC4)

Les traits de la figure 5.5 représentent des fonctions. Il faut bien distinguer la représentation de la figure 5.5 de la représentation de la figure 5.4a. En effet, les arêtes du graphe en figure 5.4a représentent des interactions, tandis que celles de la figure 5.5 représentent des fonctions. Pour faire le lien avec les fonctions, il faut préciser que les interactions représentées par les arêtes de la figure 5.4a permettent de satisfaire des fonctions par des flux physiques, ce ne sont pas les fonctions elles-mêmes.

Le graphe des interacteurs est défini dans la norme FD X 50-159, fiche 04 [FD X 50-159 2013].

> « Cet outil est désigné graphe des interacteurs ou des milieux extérieurs, mais aussi graphe des milieux environnants (méthode MIME). En raison de son caractère visuel, il permet une analyse synthétique et exhaustive des relations du produit avec son environnement, mais aussi de la réalité du périmètre traité. »

Une approche différente du graphe

Considérons la fonction FS1 en figure 5.5 ; l'arête qui lui est associée permet de représenter comment la fonction de positionnement est assurée entre le châssis et la sangle par le système. Celui-ci permet d'assurer la fonction grâce à un flux fonctionnel énergétique de type mécanique.

Les flux fonctionnels sont portés par les interactions entre les composants. La notion de fonction est donc à différencier de la notion d'interaction. Dans notre exemple, pour la situation de vie en fonctionnement, nous souhaitons développer la notion de fonction (fig. 5.6a) en la superposant à la notion d'interaction de la figure 5.4a (fig. 5.6b). Les fonctions sont ainsi représentées par un sommet rectangulaire et des liens vers les éléments concernés. Les deux notions sont ainsi parfaitement distinguées (fig. 5.6a).

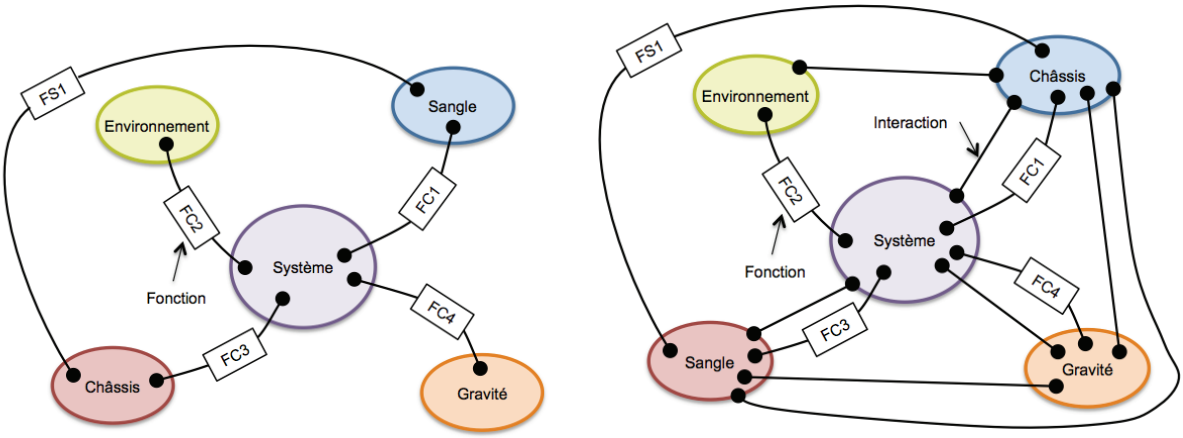


figure a — sans les interactions

figure b — avec les interactions

figure 5.6 – Fonctions

Rappelons que le graphe des interacteurs (fig. 5.5) représente les fonctions dans la situation de vie : choc. Nous avons souhaité différencier ces fonctions des interactions et des flux.

En figure 5.6a, seules les fonctions sont représentées sur le graphe, avec d'une part la fonction de service (FS1) entre deux éléments du milieu extérieur en relation avec notre système, et avec d'autre part les fonctions contraintes entre les éléments du milieu extérieur et le système.

En figure 5.6b, les interactions sont définies entre les éléments du milieu extérieur et le système, mais pas seulement, puisque les interactions sont également présentes entre l'environnement et le châssis, entre le châssis et la gravité et également entre la gravité et la sangle. Ces trois dernières interactions ne sont pas présentes dans le graphe initial des interacteurs (fig. 5.5), car seules les fonctions intervenant avec le système sont décrites. Les interactions et les fonctions sont distinctes dans notre représentation graphique.

Cet amalgame entre fonction et interaction est présent dans le fascicule de documentation [FD X 50-159 2013]. La norme précise qu'une fonction est forcement en lien avec un élément du milieu extérieur appelé interacteur.

> « Interacteur : élément de l'environnement du produit en interaction directe ou indirecte avec lui au cours de son cycle de vie ; il peut être physique (une personne par ex.), matériel ou immatériel. Il peut être affecté ou concerné par le produit ou simplement en relation avec lui sans l'utiliser » [NF EN 16271 2013]

Cependant, l'utilisateur intervient dans le flux qui transite par la sangle, le châssis et le système. Il est en interaction avec le châssis, la sangle, l'environnement et la gravité, mais il n'a aucune interaction directe avec notre système. Or cet élément du milieu extérieur utilisateur doit être représenté ainsi que ses interactions avec les autres éléments et le système (fig. 5.7) afin de permettre une description exhaustive de la circulation du flux en figure 5.8 influençant les fonctions FC1 et FS1 par exemple. Dans cette analyse, nous sortons du périmètre précédent pour définir une vue d'ensemble pour modéliser correctement l'ensemble des flux se propageant au travers des interactions.

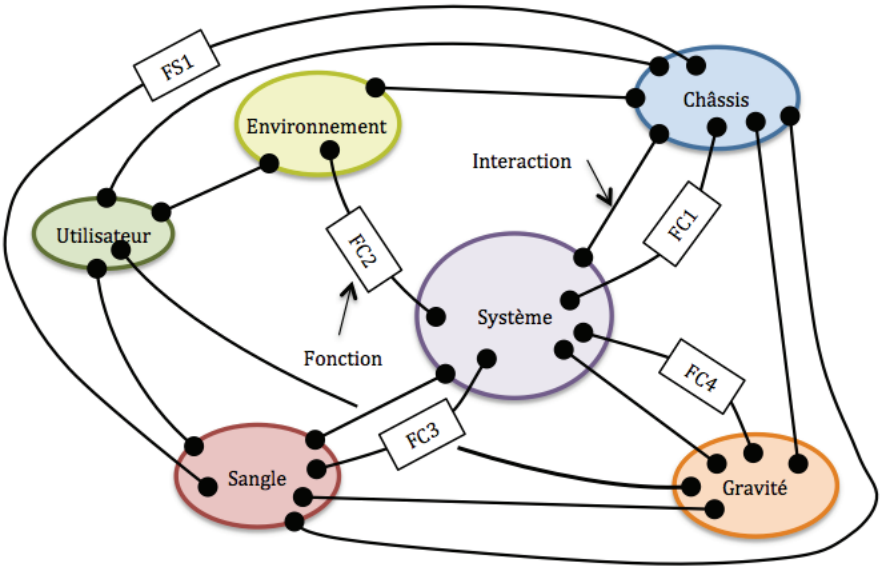


figure 5.7 – Fonctions et interactions

Propagation des flux fonctionnels

Les flux fonctionnels représentent les phénomènes physiques circulant dans les éléments et le système en interaction pour réaliser les fonctions que le produit doit assurer. Ces flux fonctionnels sont de différentes natures : matière, énergie, contact, estime de l'utilisateur… Le flux fonctionnel influençant la fonction FS1 est véhiculé par les interactions et est représenté en figure 5.8 par des traits pointillés rouge passant le long des interactions concernées. Le système permet de positionner la sangle par rapport au châssis, le flux passant d'une part par le système et d'autre part par la « gravité » , le châssis, la sangle, l'utilisateur et ses interactions. La sangle est positionnée et maintenue d'une part par le système afin de maintenir l'utilisateur en appui sur son siège. D'autre part, elle se fixe d'autre part sur l'accroche amovible, le renvoi sangle mobile et l'enrouleur qui

sont intégrés au composant châssis. Le renvoi sangle est nécessaire lorsque le système d'enroulement ne permet plus d'assurer directement la position de la sangle, car sa position répond à des contraintes de volume utile. Cette configuration est représentée en figure 5.3a. Dans notre cas, le flux fonctionnel influençant la fonction FC1 est identique à celui influençant la fonction FS1. Seule la partie entre les pôles de la fonction FC1 est à considérer dans l'étude représentée en figure 5.8 par des traits pointillés rouges passant le long de l'interaction entre le châssis et le système. Dans le cas général, les flux peuvent être de nature différente entre les différentes fonctions de service et de contrainte.

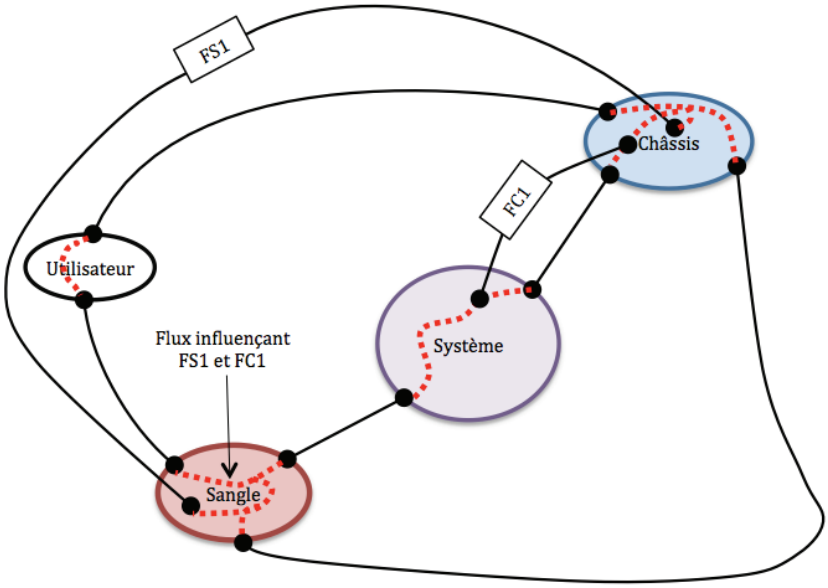


figure 5.8 — Interactions, fonctions FS1 et FC1 et flux associés

Dans la suite de notre étude, nous poserons l'hypothèse que les interactions de l'élément du milieu extérieur « gravité » sont négligeables par rapport aux interactions des autres éléments du milieu extérieur (châssis, sangle), figure 5.8. L'élément du milieu extérieur environnement n'intervient pas dans les flux influençant les fonctions FC1 et FS1, nous avons également simplifié le graphe de la figure 5.8 (fig. 5.9).

Toujours dans cette même situation de vie « choc », lors du ralentissement du véhicule, l'analyse du parcours du flux influençant FS1 montre le besoin de transmettre l'énergie de l'utilisateur par l'intermédiaire de la sangle au système et au châssis. La seconde boucle de ce flux définie entre la sangle et le châssis provient du choix du périmètre de notre étude qui impose une accroche de la sangle en plus d'un point. Dans notre cas, nous avons le renvoi sangle qui matérialise un point de maintien ; et pour le châssis, le maintien est triple puisque la sangle est fixée à l'une de ses extrémités au châssis, puis l'accroche amovible fixée également au châssis et au renvoi sangle mobile.

Rappelons que dans notre cas, le flux fonctionnel influençant la fonction FC1, est identique à celui influençant la fonction FS1. Cependant, seule la partie du flux passant par l'interaction système/châssis et bornée par les pôles de la fonction FC1 est à considérer.

Décomposition fonctionnelle de FS1 en FS1.1

La fonction FS1 « maintenir en position la sangle par rapport au châssis lors du choc » (fig.5.9) se traduit en une fonction FS1.1 « maintenir en position la sangle par rapport au châssis à partir des surfaces : surface sangle et appui plan, et trous taraudés du châssis ».

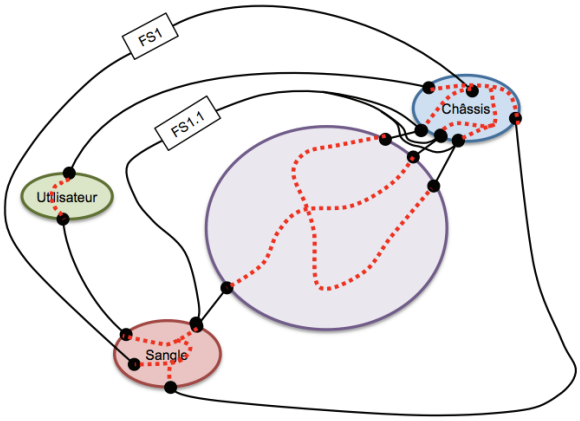


figure 5.9 – Décompositon fonctionnelle FS1 – FS1.1

Dans cette décomposition, l'architecte produit intègre les interactions dans le périmètre traité par le concepteur du système. Ce point de vue est un parti pris dans l'analyse de la prise en charge des interactions. Dans le cas général, les responsabilités ne sont pas clairement définies. Tantôt, le concepteur prend en compte les interactions dans le périmètre de son étude afin de rendre robuste sa conception alors que l'architecte produit ne lui avait pas clairement défini cette tâche.

Afin de répondre à cette question, nous avons supposé que l'architecte produit définissait les tâches. Ce périmètre de l'étude est représenté en figure 5.10a. A partir de cette figure, nous proposons une simplification de la représentation du graphe où les traits pointillés représentent l'unicité des pôles des éléments du milieu extérieur. Le contour du périmètre de l'étude est circonscrit à la bulle système qui comporte également les interactions (fig 5.10b). Ces interactions sont donc de la responsabilité du concepteur du système.

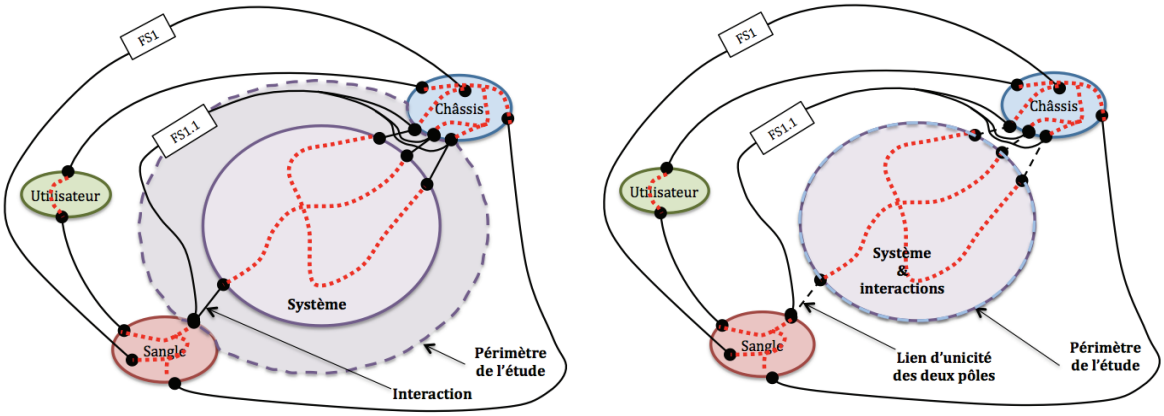


figure a – périmètre de l'étude, système et interactions

figure b – représentation simplifiée

figure 5.10 – Périmètre de l'étude

A ce stade de l'analyse fonctionnelle, rappelons que la fonction FS 1.1 permet de définir les surfaces des composants sangle et châssis en interaction avec le système. Pour le châssis, les surfaces sont l'appui plan et les deux trous taraudés (centreur et locating). Pour la sangle, la surface est la portion de la sangle en contact avec le système.

La bulle (fig. 5.10b) représentant le système avec les interactions dans un périmètre de l'étude est nommée par la suite la bulle périmètre de l'étude (fig 5.11).

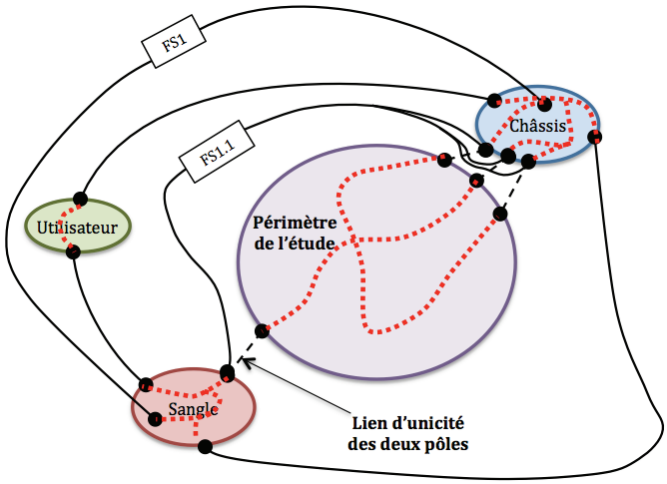


figure 5.11 –Représentation simplifiée du périmètre de l'étude

L'ingénieur architecture est capable d'analyser, de concevoir et de dimensionner des systèmes aux différentes échelles. Dans le secteur de l'automibile, il est capable de scinder les véhicules en des sous-ensembles afin de gérer la conception simultanée des différents groupes d'éléments, liaison au sol, groupe motopropulseur… Cette décomposition permet de définir la responsabilité des concepteurs dans la définition des pièces d'un système et des interactions.

5.2.3 Analyse fonctionnelle technique

L'analyse fonctionnelle externe étant réalisée, il est possible de poursuivre par l'analyse fonctionnelle interne qui met en évidence les relations « fonction – structure ». Par une décomposition du système, nous allons représenter le cheminement des fonctions au sein du système. C'est une représentation qui superpose le point de vue fonctionnel et technologique [Turner 1987] et met en évidence les interactions entre les composants du système et les milieux. Une telle décomposition du système correspondant à notre exemple industriel est décrite par la figure 5.7, pour la situation de vie en utilisation. Afin de pouvoir maintenir en position la sangle, nous avons vu que le système retenu dans notre exemple est constitué d'une pièce principale, le renvoi sangle (fig. 5.3c) et de deux vis permettant un pré positionnement du composant principal (vis centreur, vis anti rotation) (fig. 5.3b). Ces pièces et leurs interactions sont représentées dans la bulle périmètre de l'étude (fig 5.12). Nous prenons le soin d'illustrer notre exemple, ici alors que dans la démarche de conception cette figure arrive bien trop tôt.

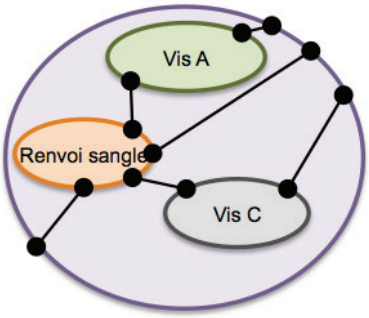


figure 5.12 — Pièces et interactions du périmètre de l'étude

Décomposition fonctionnelle FS1.1 - FT1

La décomposition de la fonction FS1.1 en une fonction FT1, « maintenir la sangle par rapport au châssis » n'est pas unique. La fonction FT1 (fonction technique 1) de la figure 5.13 reprend l'ensemble des surfaces définies par la fonction FS1.1. Cependant, le concepteur peut définir une fonction FT1 proposant un principe technique ne s'appuyant que sur une partie des surfaces définies par la fonction FS1.1 (fig. 5.11). Parmi l'ensemble des propositions, la première consiste à maintenir les pièces du périmètre de l'étude avec un principe technique par assemblage vissé (fig. 5.12a) et pour la seconde, avec un principe technique par collage (fig. 5.13b). Ces deux exemples sont principalement issus d'une industrialisation particulière où le châssis est une plateforme commune à plusieurs véhicules. Le choix du type de fonction FT1 est généralement de la responsabilité de l'architecte produit en premier et du concepteur en second lorsque l'architecte ne donne pas de réponse plus précise quant à l'obligation d'utiliser les surfaces prescrites.

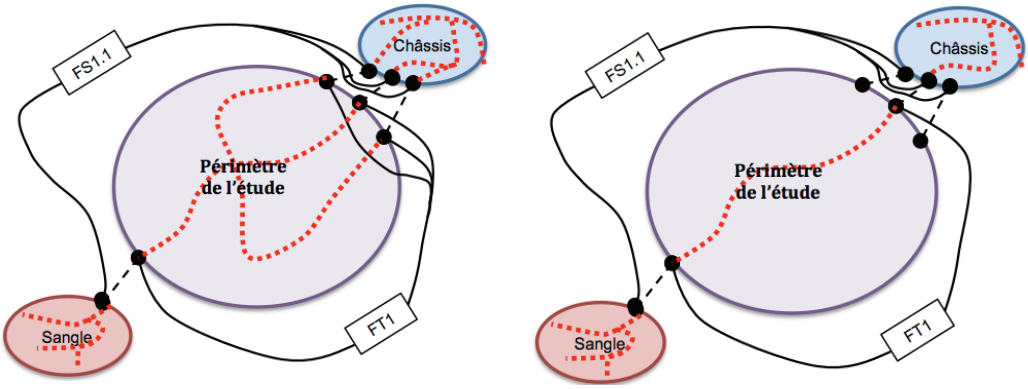


figure a – première proposition

figure b – seconde proposition

figure 5.13 – Décompositon fonctionnelle FS1.1 – FT1

Dans la suite de notre développement, nous retenons la fonction FT1 dont le principe technique est par assemblage vissé (fig. 5.13a).

La fonction FT1 traduit le maintien lors du choc, de l'orientation et de la position du système sur le châssis. Ce système dispose des volumes matières des composants permettant de faire circuler le flux fonctionnel. Ce flux influençant la fonction FT1 est représenté en figure 5.13a par des traits pointillés rouges passant le long des interactions concernées.

Décomposition structurelle

Le graphe (fig. 5.14) met bien en évidence non seulement les interactions entre les éléments du milieu extérieur et les composants du système, les interactions entre les composants du système eux-mêmes, mais également les interactions entre les éléments du milieu extérieur (par exemple interaction avec la sangle).

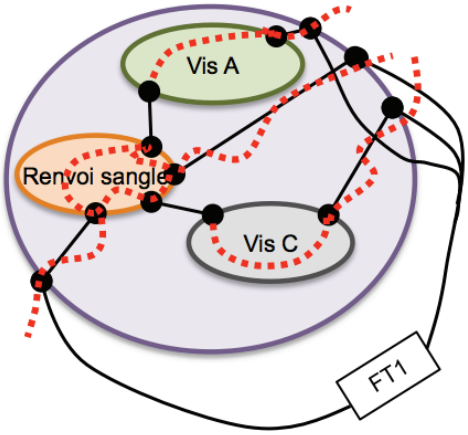


figure 5.14 — Propagation du flux dans le système

Les graphes présentés permettent la représentation des éléments, des interactions, des fonctions, des spécifications et des flux, mais ces graphes n'indiquent pas les modèles physiques de comportement retenus. Par exemple, la figure 5.14 illustre les interactions entre les composants renvoi sangle, vis A et vis C, qui impliquent un modèle de comportement. Dans ce chapitre, la modélisation présentée est une modélisation topologique au sens où seuls des objets et des liens ont été mis en place, aucun modèle de comportement physique n'est défini. Il est donc nécessaire de regarder plus en détail la place des différents modèles physiques. Ces aspects ont été vus dans le chapitre précédent (chapitre IV) lors de la détermination du processus de modélisation qui permet de passer du modèle primitif ou modèle de simulation.

Décomposition de la fonction FT1

A partir de la fonction FT1, « maintenir la sangle par rapport au châssis lors du choc » (fig. 5.14), il est possible de continuer la décomposition fonctionnelle (fig. 5.15) jusqu'au niveau des pièces individuelles (fig. 5.16).

La fonction FT1.1 « maintenir la surface du composant (en interaction avec la sangle) par rapport à ses surfaces (en interaction avec les surfaces du châssis (appui plan , deux trous taraudés)) » (fig. 5.15) est issue de la décomposition fonctionnelle de la fonction FT1. Elle caractérise la position et le maintien de la surface (en interface avec la sangle) du renvoi sangle en appui plan sur ses surfaces. Les mobilités du renvoi sangle dans le plan sont bloquées par la surface hélicoïdale de la vis C (centrage) et par la surface hélicoïdale de la vis A (anti rotation). Les fonctions interactions (FI) présentes sur le graphe sont des fonctions techniques relatives aux phénomènes supportés par les interactions entre les objets (système, composant…). La fonction FI 1.4 spécifie les comportements physiques et géométriques

entre les surfaces planes du renvoi sangle en interaction avec les surfaces planes du châssis.

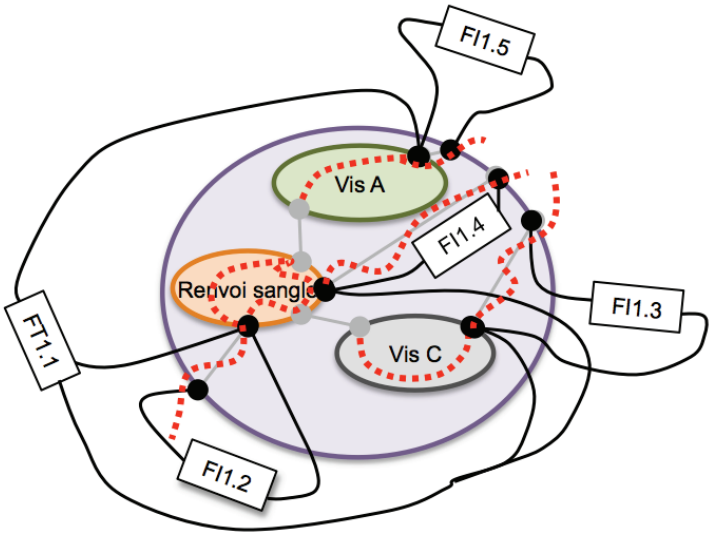


figure 5.15 – Décomposition fonctionnelle

Décomposition de la fonction FT1.1

En figure 5.16, les surfaces fonctionnelles définies dans l'expression de la fonction intègrent l'ensemble des propriétés nécessaires au respect de la spécification fonctionnelle. À partir de la fonction FT1.1, la décomposition de cette fonction en sous-fonction n'est pas unique. Parmi les possibilités, nous présentons (fig. 5.17) trois décompositions possibles à partir d'hypothèses définies par l'architecte produit.

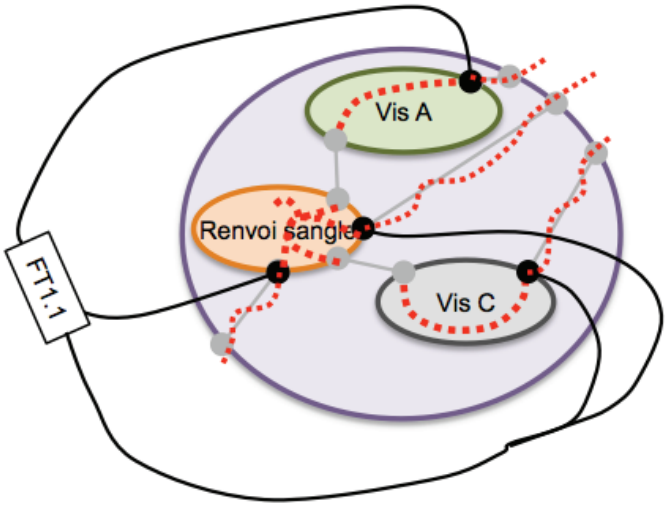


figure 5.16 – Décomposition fonctionnelle

- En figure 5.17a, la fonction FT 1.1.1 « orienter et maintenir la surface du renvoi sangle (en contact avec la sangle par rapport à ses surfaces appui plan et passages de vis » est issue de la décomposition fonctionnelle de la fonction FT1.1. La fonction FI 1.1.5 « transmettre une adhérence entre la surface plane renvoi sangle et la surface plane sous tête de la vis C » correspond à l'hypothèse du concepteur ou de l'architecte. La fonction FT 1.1.3 « transmettre l'action de contact sous tête de la

vis à sa surface hélicoïdale » est une fonction propre au composant vis.

- En figure 5.17b, la fonction FT 1.1.1 « maintenir la surface du renvoi sangle (en contact avec la sangle) par rapport à ses surfaces appui plan et passages de vis » (fig. 5.17a) est issue de la décomposition fonctionnelle de la fonction FT1.1. La fonction FT 1.1.3 « « transmettre une adhérence entre la surface plane simulée du renvoi sangle vue de la vis centreur par rapport à sa surface hélicoïdale » est une fonction qui intègre l'interaction entre les deux composants vis C et renvoi sangle contrairement à la même fonction dans le cas précédent (fig. 5.17a).
- En figure 5.17c, la fonction FT 1.1.1 « orienter et maintenir la surface du renvoi sangle (en contact avec la sangle) par rapport à sa surface appui plan et les surfaces simulées des vis » est issue de la décomposition fonctionnelle de la fonction FT1.1. Cette fonction intègre les interactions entre les surfaces de passage de vis et les surfaces corps des vis contrairement à la même fonction dans le cas de la figure 5.17a.

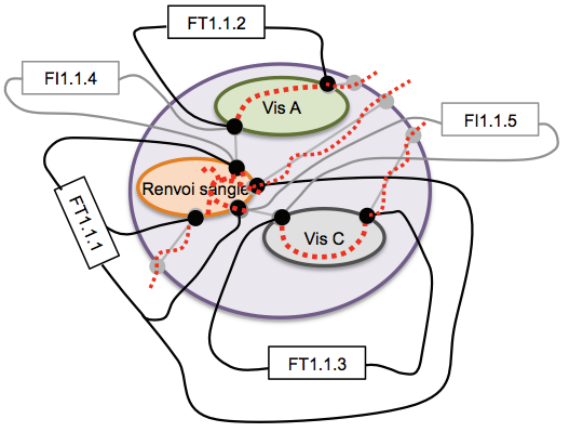


figure a – FT1.1.1, 1er cas

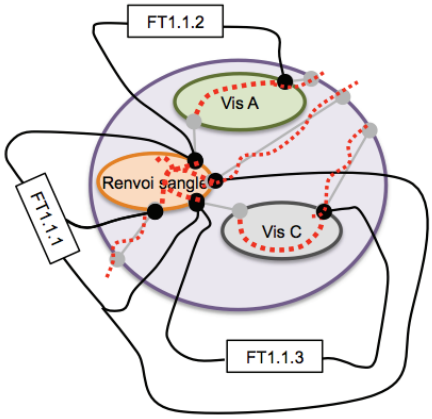


figure b – FT1.1.1, 2e cas

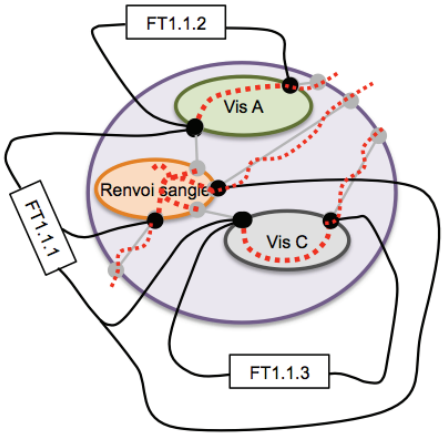


figure c – FT1.1.1, 3e cas

figure 5.17 – Hypothèses associées à la décomposition fonctionnelle

A partir de ce niveau de la décomposition dans le processus de conception, nous proposons d'intégrer le processus de modélisation. Nous étudions deux fonctions, l'une associée à la fonction du composant renvoi sangle (FT 1.1.1), et l'autre, associée à l'interaction entre le composant renvoi sangle et la vis C (FI 1.1.5).

Analyse de la fonction FI 1.1.5

Analysons la fonction FI1.1.5 (fig. 5.17a). La spécification associée à cette fonction est un déplacement relatif entre les deux composants vis C et renvoi-sangle situé entre les deux plans constituant l'interface entre la vis C et le renvoi-sangle (plan sous tête de vis, appui plan du renvoi sangle) lors de l'action mécanique de la sangle et de l'utilisateur dans la situation de vie : choc. Ce déplacement relatif dans les plans interfaces est défini à partir du déplacement relatif d'un des nœuds choisi par le concepteur. Ce déplacement est une propriété dimensionnelle qui est soumise à une condition de distance linéaire maximale appelée : jeu maximal au niveau de l'interaction définie dans la dernière colonne du tableau de la figure 5.20.

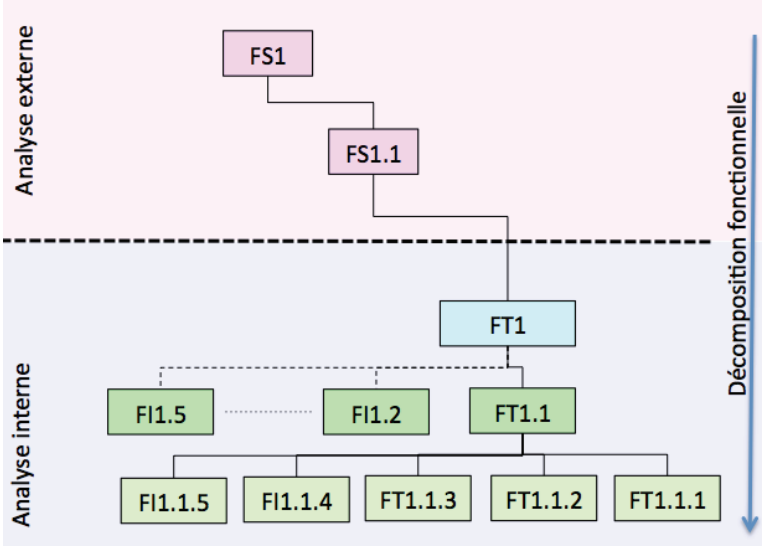


figure 5.18 – Décompostion partielle de la fonction FT 1 (fig 5.17a)

Cependant, la simulation de cette spécification ne dépend pas du processus de conception (fig. 5.18), mais du processus de modélisation (fig. 5.19) permettant de simplifier le modèle primitif (fig. 5.19b) afin d'obtenir un modèle de simulation (fig. 5.19c).

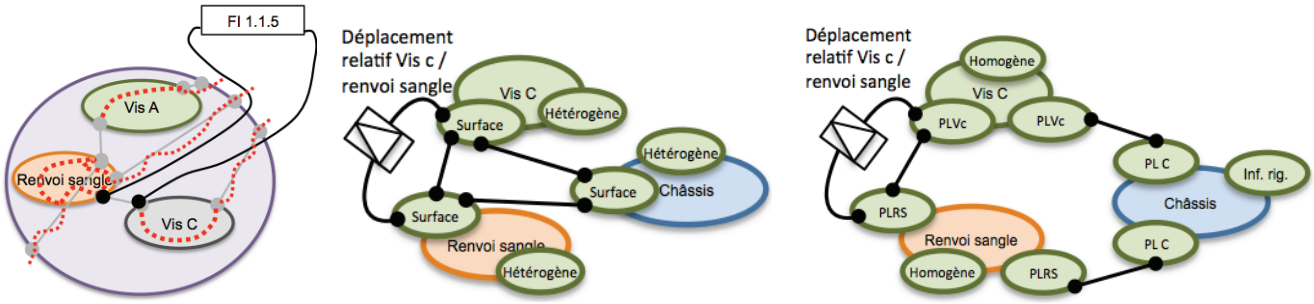


figure a – FI1.1.5 figure b – modèle primitif figure c – modèle de simulation

figure 5.19 – FI 1.1.5 - Modèles primitif et de simulation- situation de vie : choc.

Le processus de modélisation et les opérations sont définis dans le tableau en figure 5.20.

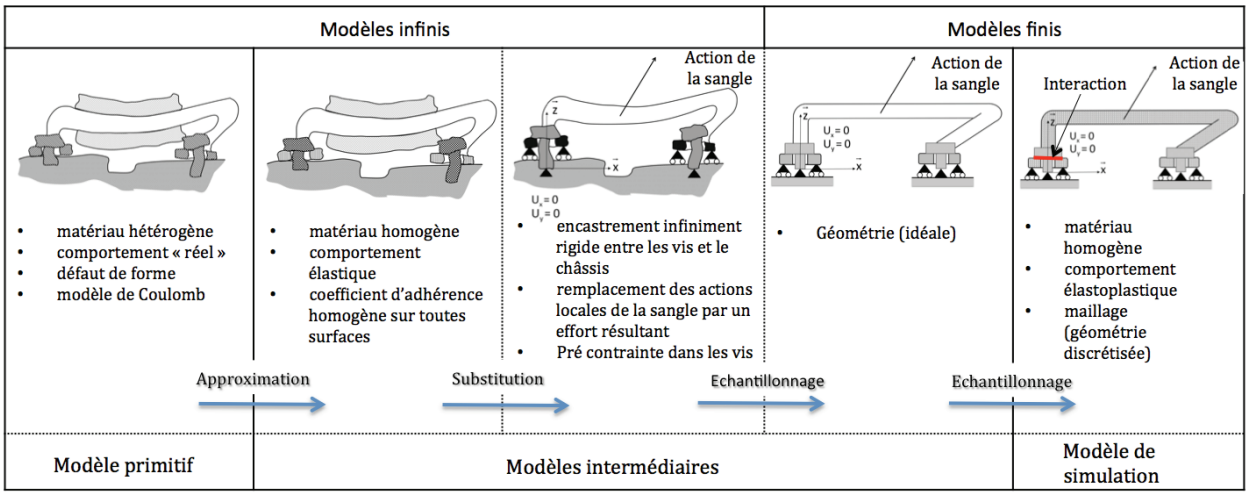


figure 5.20– Processus de modélisation – situation de vie : choc

Analyse de la fonction FT 1.1.1

Analysons la fonction FT1.1.1 (fig. 5.17a). La spécification associée à cette fonction est une contrainte maximale équivalente dans le volume matériau du composant renvoi sangle lorsque celui-ci est soumis aux sollicitations mécaniques des composants sangle, vis A, vis C et châssis. Cette propriété mécanique est soumise à une condition de contrainte maximale.

La simulation de cette spécification ne dépend pas du processus de conception (fig. 5.18), mais du processus de modélisation (fig. 5.21) permettant de simplifier le modèle primitif (fig. 5.21b) afin d'obtenir un modèle de simulation (fig. 5.21c).

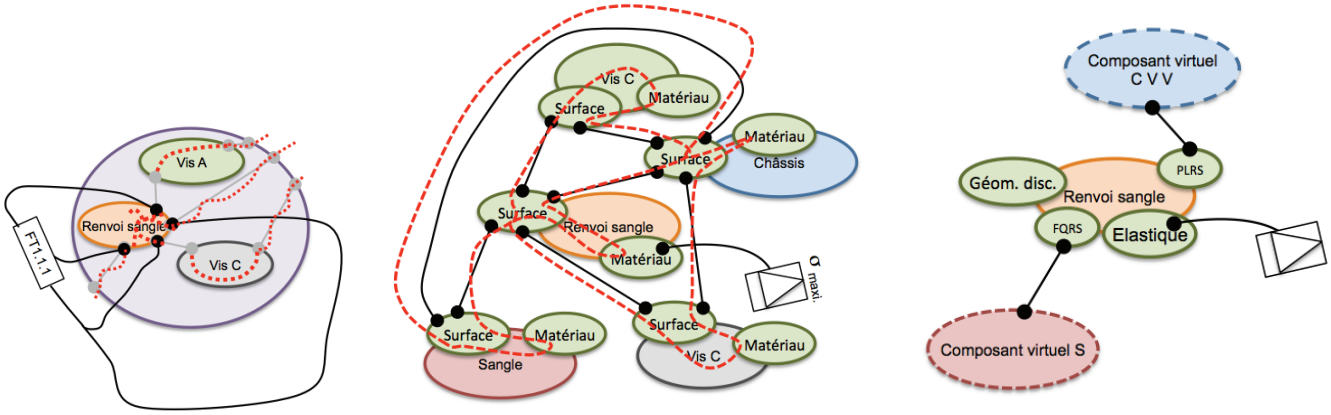


figure a – FT 1.1.1 figure b – modèle primitif figure c – modèle de simulation

figure 5.21 – FT1.1.1 — Modèles primitif et de simulation

Le processus de modélisation et les opérations sont définis dans le tableau en figure 5.22.

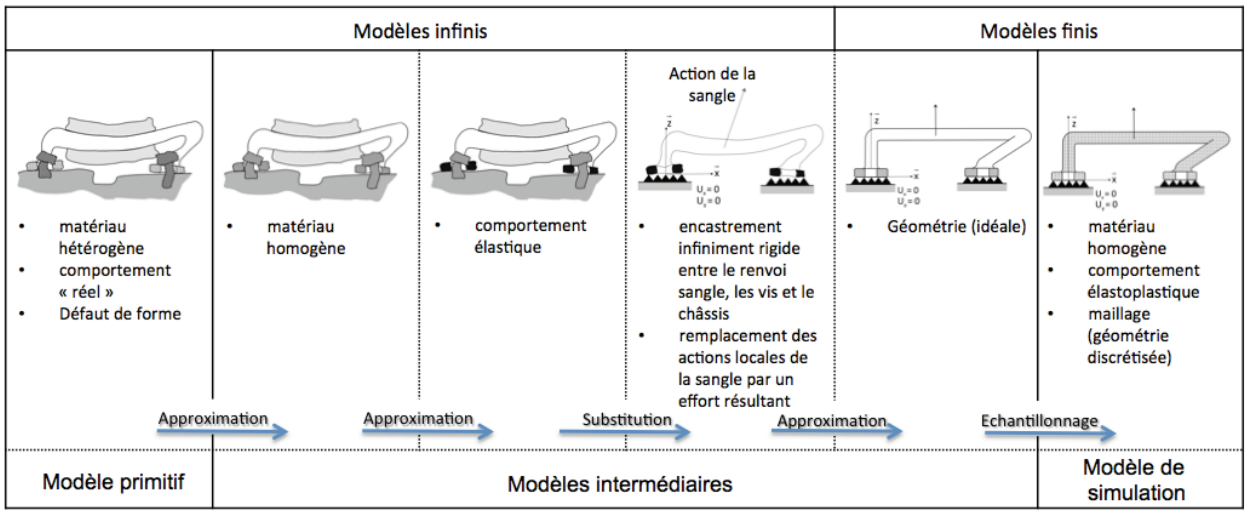


figure 5.22 – Processus de modélisation

Synthèse

Avec la décomposition fonctionnelle, nous avons représenté le cheminement des fonctions au sein du système. C'est une représentation qui superpose le point de vue fonctionnel et technologique. Elle met en évidence les interactions entre les composants du système et les milieux. Cependant, nous avons fait des hypothèses au cours de cette décomposition et à des stades différents. Par exemple, en considérant que l'élément du milieu extérieur gravité était négligeable dans l'environnement du système étudié par rapport aux autres éléments dans cette situation de vie « choc ».

À quel moment apparaissent ces hypothèses dans cette décomposition fonctionnelle représentée en figure 5.18 ?

Il est nécessaire de préciser quel est le modèle primitif à chaque stade de la décomposition fonctionnelle.

5.3 MODELE PRIMITIF DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

La figure 5.18 décrit le cheminement de la décomposition fonctionnelle pour une fonction identifiée dans le processus de conception. Cependant, à chaque étape de cette décomposition, la question du modèle primitif pour la spécification fonctionnelle n'est soit jamais évoquée, soit supposée sans que les hypothèses associées à ce modèle soient explicitement identifiées. Cela étant, nous proposons de reprendre cette figure afin de faire apparaître les différents modèles avec leurs hypothèses.

Modèle pour FS1

En figure 5.23a, la décomposition fonctionnelle de la fonction FS1 en une fonction FT1 ne fait pas apparaître d'hypothèses de simplification. Afin de comprendre le processus de simplification, il est nécessaire d'étendre le graphe de décomposition en intégrant les différents modèles intervenant dans ce processus (fig. 5.23b).

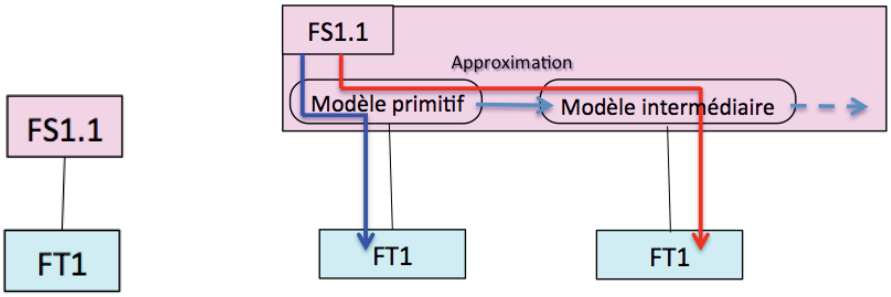


figure a – fonction figure b — fonction -modèle

figure 5.23 – Modèle primitif –décomposition fonctionnelle, FT1

Le trait bleu (fig. 5.23b) décrit le processus de conception permettant de décomposer la fonction FS1 en une fonction FT1. Ce processus correspond à la figure 5.24a qui prend en compte l'ensemble des éléments du milieu extérieur.

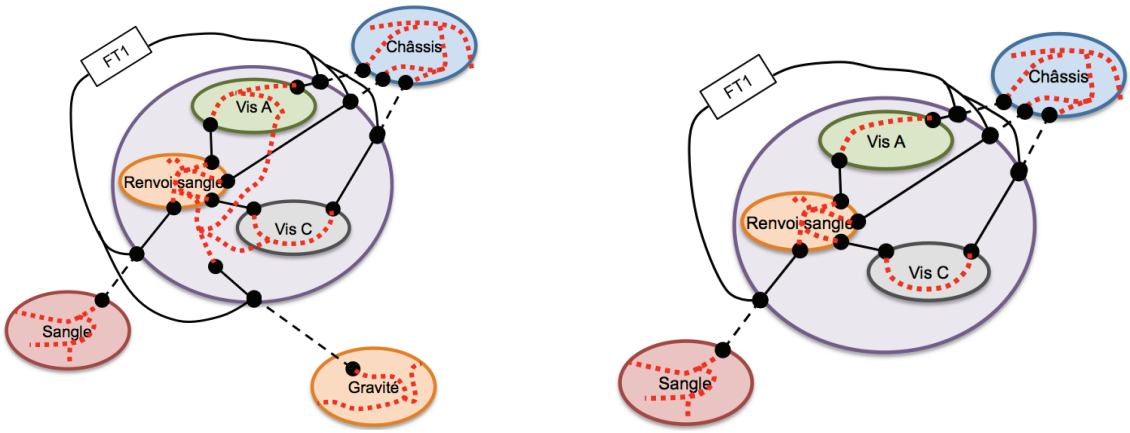


figure a – FT1 / modèle primitif de FS1 figure b – FT1 / modèle intermédiaire de FS1

figure 5.24– Graphes des fonctions – flux– interactions

Le trait rouge (fig. 5.23b) décrit le processus de conception permettant de décomposer également la fonction FS1 en une fonction FT1. Cependant dans ce processus, une opération d'approximation permet de reconsidérer l'ensemble des éléments du milieu d'utilisation. Ainsi le modèle intermédiaire est créé. Il est constitué d'un environnement dont les éléments sont le châssis et la sangle. L'utilisation de cette opération correspond à l'hypothèse suivante : « la gravité est négligeable par rapport aux autres propriétés du système ».

Modèle pour FT1

En figure 5.25a, la décomposition de la fonction FT1 en une fonction FT1.1 ne permet pas de définir les hypothèses du modèle primitif.

Pour une même décomposition fonctionnelle, le graphe de la figure 5.25b présente plusieurs chemins en fonction des hypothèses du modèle primitif ou des modèles intermédiaires.

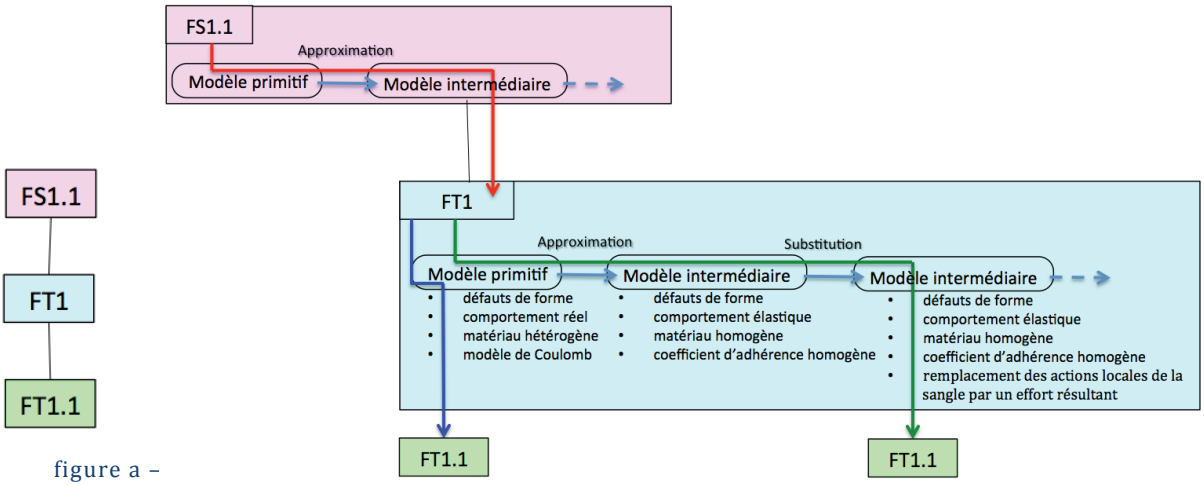


figure a – fonction

figure b — fonction — modèle

figure 5.25 – Modèle primitif – décomposition fonctionnelle, FT1.1, situation de vie « choc »

Le parcours bleu permet de décomposer la fonction FT1 en une fonction FT1.1 en définissant les hypothèses du modèle primitif :

- défauts de forme ;
- comportement réel ;
- matériau hétérogène ;
- modèle de Coulomb.

Les opérations d'approximation (figure 5.22) permettent de se déplacer du modèle primitif vers un modèle intermédiaire avec les hypothèses :

- défauts de forme ;
- comportement élastique ;
- matériau homogène ;
- coefficient d'adhérence homogène ;
- remplacement des actions locales de la sangle par un effort résultant.

Ces opérations sont dans le processus de modélisation explicité au chapitre 4.

Ces hypothèses simplificatrices se propagent dans le processus de conception aux fonctions filles. De la même façon, les fonctions FT1 et FT1.1 héritent de l'hypothèse simplificatrice de la fonction FS1.1.

Le graphe de décomposition fonctionnelle (fig. 5.18) est enrichi pour intégrer le processus de modélisation à chaque étape de la décomposition.

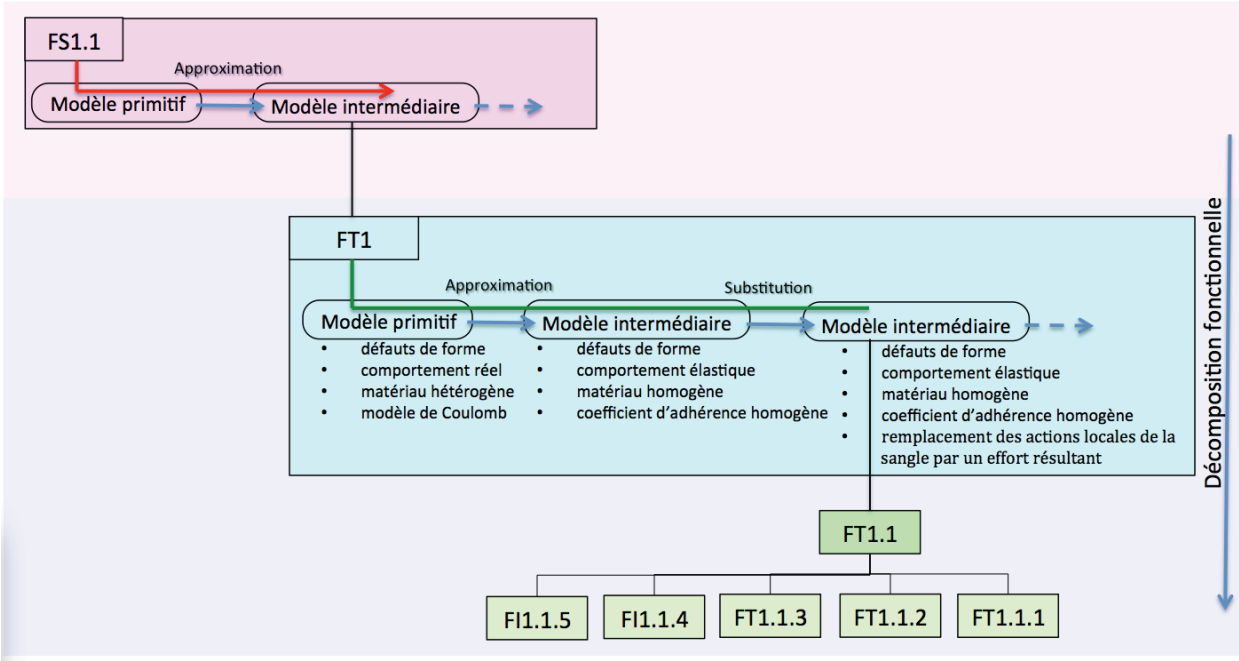


figure 5.26 – Décomposition fonctionnelle — modèle, FT1.1.1

Les modèles primitifs des fonctions FT1.1, FT1.1.1 héritent par défaut des hypothèses du modèle intermédiaire de la fonction FT1 (fig. 5.14). Ainsi, le modèle primitif de la FT1.1.1 traitée dans le tableau de la figure 5.22 est différent puisqu'il hérite des hypothèses du modèle intermédiaire de la fonction FT1 (fig. 5.26).

Traçabilité du processus de conception

Généralement, dans les bureaux d'études, la conception et la modélisation sont essentiellement basées sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène…), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulières.

Pour la fonction FT1, considérons des modèles avec des écarts dimensionnels linéaires (fig. 5.26) correspondant à une première itération de la décomposition fonctionnelle. Pour une même décomposition fonctionnelle de la fonction FT1, nous pouvons considérer un modèle intermédiaire enrichi des défauts de forme, un comportement « réel », un coefficient d'adhérence non homogène et des matériaux hétérogènes. Cet enrichissement du modèle intermédiaire correspond à une seconde itération du processus de conception.

Ainsi, la figure 5 .26 illustre la traçabilité du processus de conception permettant de structurer et de tracer les hypothèses de simulation. Dans une démarche de capitalisation du processus de conception, ce schéma (fig. 5.26) permet d'identifier à quel moment (jour, heure) les choix des hypothèses sont actés ou modifiés.

5.4 SYNTHESE

Nous proposons une vision unique de la modélisation des systèmes pour les différentes activités de conception. Alors qu'elles sont souvent disjointes, les visions du produit en conception préliminaire, en conception détaillée et en simulation sont ici regroupées en une vision globale.

Pour chaque modèle, quelle que soit l'étape de la conception ou de modélisation, le schéma de flux permet de définir un modèle topologique intégrant les éléments, les interactions, les exigences et les flux physiques en jeux. Les apports essentiels sont la représentation uniforme de ces concepts, quelles que soient l'étape de conception ou de modélisation et la représentation sans ambiguïté des fonctions et des exigences sur ces schémas.

Du point de vue de la modélisation géométrique et physique des systèmes, l'apport est essentiellement sur la notion de modèles primitif, intermédiaire ou de simulation. En effet, la conception et la modélisation sont essentiellement basées sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène…), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulières (fig. 5.22). Presque jamais, un modèle que l'on ne peut qu'imaginer n'est pas considéré. Pourtant, ce type de modèle ne peut être ignoré si l'on désire définir un modèle pour la simulation en posant correctement les hypothèses de simplification. Voilà la raison pour laquelle la notion de modèle infini a été introduite. Dans nos exemples, ce modèle infini est le modèle primitif de la figure 5.24.

Le processus de modélisation vise à définir l'ensemble des opérations de définition de ce processus de simplification avec la possibilité d'avoir différents modèles intermédiaires et en y associant les hypothèses nécessaires.

Le processus de conception vise à définir la décomposition fonctionnelle du système, où à chaque étape, l'activité de simulation est définie par un processus de modélisation. Le schéma de traçabilité du processus de conception permet de structurer ou de remettre en cause les hypothèses de ce processus et de structurer également les hypothèses de simulation.

Nous proposons une vision globale permettant d'appréhender les différents types de modélisation avec une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Cette approche nous permet d'appréhender les différents niveaux de détails (systémique) lors de la décomposition fonctionnelle et structurelle du produit. Elle permet également de poser les hypothèses émises lors de l'élaboration des modèles physiques pour la simulation.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire de recherche, nous avons présenté un **cadre de modélisation pour la simulation et la conception des produits**. Nous proposons une vision cohérente de la modélisation des systèmes pour les différentes activités de conception alors qu'elles sont souvent disjointes. Ainsi les visions du produit en conception préliminaire, en conception détaillée et en simulation sont dans nos travaux regroupées en une **vision globale**. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Cette approche nous permet d'appréhender les différents niveaux de détails (systémique) lors de la décomposition fonctionnelle et structurelle du produit. Nous proposons une **traçabilité du processus de conception et du processus de modélisation** permettant de remettre en cause, le cas échéant, les choix de conception et d'hypothèses de modélisation.

Pour un état donné de la décomposition fonctionnelle, le **processus de modélisation** inclut des phases de simplification, qui à terme permettent une activité de simulation. Cette activité offre la possibilité d'avoir différents types de modèles selon les hypothèses retenues.

Pour modéliser au plus près la réalité physique, nous proposons la notion de **modèle infini,** qui est appliquée aussi bien à la géométrie qu'à la matière ou aux phénomènes physiques en jeu. La conception et la modélisation sont essentiellement basées sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène…), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulières. Jamais, un modèle infini, que l'on ne peut qu'imaginer, n'est considéré. Pourtant, ce type de modèle ne peut être ignoré si l'on désire définir des exigences ou élaborer un modèle pour la simulation en posant correctement les hypothèses de simplification.

Parmi les modèles infinis, nous distinguons en premier lieu le **modèle primitif**. Ce modèle infini est une extension du « skin » modèle, il est imaginé par le concepteur, pour réfléchir à l'influence de l'ensemble des défauts du système sur les performances du produit. Ce modèle présente plus ou moins de variations portant sur la géométrie et la matière. Nous montrons que plus le modèle comprend de variations par rapport au nominal, plus il contient d'informations.

Le processus de simplification est effectué à partir du modèle primitif, et des interactions entre les objets. Cette simplification effectuée en plusieurs étapes successives donne lieu à des modèles intermédiaires. Chaque modèle est décrit par des objets et des interactions entre ces objets. La spécification fonctionnelle est elle-même définie pour chaque modèle. Le **modèle de simulation,** résultat de la simplification, est un modèle adapté,

défini par le concepteur afin de simuler le comportement du système.

Afin de caractériser ces différents modèles, nous précisons la notion de **propriété**. Nous proposons de définir les objets d'un modèle par un ensemble de propriétés. Un classement des objets de manière générique en types et sous-types contribue à définir leurs propriétés tant qualitatives que quantitatives. Ces propriétés sont des propriétés de base ou dérivées d'objets idéaux (modèles finis). Ainsi, nous proposons une description des modèles élaborés à partir des propriétés identifiées.

Nous proposons des **opérations** permettant de définir les propriétés dérivées à partir des propriétés de base et de définir le processus de simplification.

Le schéma procédural permet la traçabilité de l'ensemble des opérations. L'objectif est de poser au mieux les hypothèses, activité généralement négligée et mal tracée lors de la modélisation. Ici, des spécifications de maîtrise de la simplification et de validation des hypothèses sont introduites à cette fin.

Nous voici, aux confins de cette thèse qui s'achève, munis de nouveaux espaces à explorer, et de nouveaux outils pour nous y aider : processus de modélisation, processus de conception, opérateurs, modèles infini et fini.

En paraphrasant mes deux directeurs de thèse « il y a un temps pour boucler ». Le terme boucler est perçu dans l'acception la plus commune : terminer, boucler un dossier. C'est fermer la boucle de la sangle qui le contient. Boucler la boucle pour revenir au point de départ est ce sentiment omniprésent ouvrant les perspectives de travaux complémentaires, dont les premiers items sont : mise en situation, découpage architectural, aide à l'architecte produit, formalisation du processus.

MISE EN SITUATION

La vision globale proposée permet d'appréhender les différents types de modélisation avec une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Au terme de notre travail, un futur axe de réflexion est de caractériser notre outil par rapport aux méthodologies de conception existantes dans la littérature. Ainsi nous pourrions déterminer le domaine d'emploi de nos propositions et montrer les apports par rapport à certaines démarches. L'applicabilité de notre démarche sur des cas d'une complexité industrielle doit permettre de valider la mise en œuvre de notre travail.

DEMARCHE ARCHITECTURALE

Cette vision permet de proposer des éléments pour préciser la définition et le découpage des fonctions et sous-fonctions nécessaires à la conception des systèmes et sous-systèmes. De la même manière, notre démarche permet de clarifier la définition des spécifications quelle soit leur nature et le niveau de

décomposition. La poursuite de ce travail doit permettre de dégager des méthodologies pour guider une telle activité. Les modèles et les concepts mis en place sont suffisamment généraux pour servir de supports à la description de différentes stratégies de découpage architectural.

FORMALISATION DES PROCESSUS

Les opérations proposées pour manipuler les modèles permettent d'alimenter un modèle informatique. Il est ici envisagé de décrire les spécifications et les schémas procéduraux sous forme informatique. D'une part, la structure des modèles en termes d'objets, de classes et de propriétés est compatible avec la notion d'objets informatiques, d'autre part les opérations utilisées sont similaires à la notion de fonction dans un programme informatique. Un des axes de développement est de définir une syntaxe complète et robuste pour être sans ambiguïté.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE DES REMERCIEMENTS

[Bachelard 1934] Bachelard, G., 1934. Le nouvel esprit scientifique. 7e éd. Paris : Presses universitaires de France, 1934.

[Morin 1996] Morin, E., 1996. Le besoin d'une pensée complexe. Le magazine littéraire, Vol. Hors-série, n° 1966-1996 : La passion des idées, p. 120-123, 1996.

BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION

[Ballu 1995] Ballu, A., Mathieu, L., 1995. Univocal Expression of Functional and Geometrical Tolerances for Design, Manufacture and Inspection. Proceedings of 4th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, Japan, 31-51.

[Iso 17450-1 2011] ISO 17450-1, 2011. Geometrical product specifications (GPS) — General concepts — Part 1 : Model for geometric specification and verification / Spécification géométrique des produits (GPS) — Concepts généraux — Partie 1 : Modèles pour la spécification et la vérification géométrique, ISO.

[Pahl & al 2007] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K-H , 2007. Engineering Design — A Systematic Approach. Wallace K, Blessing L (Trans. and Eds.) 3rd ed. 2007, Springer, Berlin

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 1

[Achinstein 1968] Achinstein, P., 1968. Concepts of Science. A Philosophical Analysis. Baltimore: Johns Hopkins Press.

[Anwer 2013] Anwer, N., Ballu, A., Mathieu L., 2013, The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design, Annals of the CIRP, 62(1), 143–146

[Bailer-Jones 2002] Bailer-Jones C. A. L., 2002. Modelling Data: Analogies in Neural Networks, Simulated Annealing and Genetic Algorithms, in Magnani and Nersessian 2002: 147–165.

[Barbrousse 2009] Barbrousse, A., Ludwig, P., 2009. Fictions and Models", In Mauricio Suárez (ed.): Fictions in Science, Philosophical Essays on Modelling and Idealisation, London: Routledge, 56–75.

[Bell 1977] Bell, J., Machover, M., 1977. A Course in Mathematical Logic, Amsterdam: North-Holland.

[Berliner 1988] Berliner, C., Brimson, J. A., 1988. Cost management for today's advanced manufacturing: the CAM-I conceptual design. Harvard Business School Press.

[Black 1962] Black, M., 1962. Models and Metaphors. Studies in Language and Philosophy. Ithaca, New York: Cornell University Press.

[Brewer 1994] Brewer, W. F., Chinn, C. A., 1994. Scientists' Responses to Anomalous Data: Evidence from Psychology, History, and Philosophy of Science, in: Proceedings of the 1994 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume 1: Symposia and Invited Papers, 304–313.

[Brown 1991] Brown, J., 1991. The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences. London: Routledge.

[Cartwright 1991] Cartwright, N., 1989. Nature's Capacities and their Measurement. Oxford: Oxford University Press.

[Da Costa 2003] Da Costa, Newton, and Steven French, 2003. Science and Partial Truth: A Unitary Approach to Models and Scientific Reasoning. Oxford: Oxford University Press.

[Dufaure 2008] Dufaure J., Teissandier, D., 2008, A tolerancing framework to support geometric specifications traceability, Int J Adv Manuf Technol, 36:894–907

[Falgarone 2006] Falgarone, H., Chevassus, N., 2006, Structural and functional analysis for assemblies, Editeurs Elmaraghy H. A., Elmaraghy W. H., Advances in design, Springer, Series in Advanced Manufacturing pp 87-96

[Fenves 2008] Fenves S. J., Foufou S., Bock C., Sriram R. D., 2008, CPM2: A Core Model for Product Data, Comput. Inf. Sci. Eng., 8(1)

[Finger 1989a] Finger, S., Dixon, J. R., 1989a. A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. Research in Engineering Design, 1(1), pp. 51-67. doi:10.1007/BF01580003

[Finger 1989b] Finger, S., & Dixon, J. R., 1989b. A review of research in mechanical engineering design. Part II: Representations, analysis, and design for the life cycle. Research in Engineering Design, 1(2), pp. 121-137. doi:10.1007/BF01580205

[Forster 1994] Forster, Malcolm, and Elliott Sober, 1994. How to Tell when Simple, More Unified, or Less Ad Hoc Theories will Provide More Accurate Predictions", British Journal for the Philosophy of Science 45: 1–35.

[Galison 1997] Galison, P., 1997. Image and Logic. A Material Culture of Microphysics. Chicago: Chicago: University of Chicago Press.

[Gendler 2000] Gendler, T., 2000. Thought Experiment: On the Powers and Limits of Imaginary Cases. New York and London: Garland.

[Gero 2004] Gero, J. S., Kannengiesser U., 2004. The situated function–behaviour–structure framework, Design Studies 25, pp. 373–391.

[Giard 2000] Giard, V., 2000. Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception. Comptabilité Contrôle Audit, 6(2), pp. 43.

[Giere 1988] Giere, R., 1988. Explaining Science: A Cognitive Approach. Chicago: University of Chicago Press.

[Giere 2004] Giere, R., 2004. How Models Are Used to Represent Reality, Philosophy of Science 71, Supplement, S742–752.

[Gomes de Sá 1999] Gomes de Sá, A., Zachmann, G., 1999, Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes, Computers & Graphics, 23(3), 389-403

[Grandjean 2013] Grandjean, J., Ledoux, Y., Samper, S. , 2013, On the role of form defects in assemblies subject to local deformations and mechanical loads, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65, 9-12.

[Harris 2003] Harris, T., 2003. Data Models and the Acquisition and Manipulation of Data, Philosophy of Science 70: 1508–1517.

[Hartmann 1996] Hartmann, S., 1996. The World as a Process. Simulations in the Natural and Social Sciences, in Hegselmann et al. 1996, 77–100.

[Hellman 1988] Hellman, D. H. (ed.), 1988. Analogical Reasoning. Kluwer: Dordrecht.

[Hesse 1963] Hesse, M., 1963. Models and Analogies in Science. London: Sheed and Ward.

[Hesse 1974] Hesse, M., 1974. The Structure of Scientific Inference. London: Macmillan.

[Hodges 1997] Hodges, W., 1997. A Shorter Model Theory. Cambridge: Cambridge University Press.

[Holyoak 1995] Holyoak, K., Thagard, P., 1995. Mental Leaps. Analogy in Creative Thought. Cambridge, Mass.: Bradford.

[Horváth 2004] Horváth, I., 2004. A treatise on order in engineering design research. Research in Engineering Design, 15(3), pp. 155-181. doi:10.1007/s00163-004-0052-x.

[Hubka 1982] Hubka, V., Eder, W. E., 1982. Principles of Engineering Design. Butterworths Scientific, London.

[Humphreys 2004] Humphreys, P., 2004. Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method. Oxford: Oxford University Press.

[Koller 1994] Koller, R., 1994. Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen (3., völlig neubearb. u. erw. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.

[Kroes 1989] Kroes, P., 1989. Structural Analogies between Physical Systems, British Journal for the Philosophy of Science 40: 145–154.

[Laymon 1982] Laymon, R., 1982. Scientific Realism and the Hierarchical Counterfactual Path from Data to Theory, Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Volume 1, 107–121.

[Laymon 1991] Laymon, R., 1991. Thought Experiments by Stevin, Mach and Gouy: Thought Experiments as Ideal Limits and Semantic Domains, in Horowitz and Massey 1991, 167–91.

[Magnani 2002] Magnani, L., Nersessian, N., (eds.), 2002. Model-Based Reasoning: Science, Technology, Values. Dordrecht: Kluwer.

[Magnani 1999] Magnani, L., Thagard, P. (eds.), 1999. Model-Based Reasoning In Scientific Discovery. Dordrecht: Kluwer.

[Mäki 1994] Mäki, U., 1994. Isolation, Idealization and Truth in Economics", in Bert Hamminga and Neil B. De Marchi (eds.), Idealization VI: Idealization in Economics. Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, Vol. 38: 147–168. Amsterdam: Rodopi.

[Mayo 1996] Mayo, D., 1996. Error and the Growth of Experimental Knowledge. Chicago: University of Chicago Press.

[McMullin 1968] McMullin, E., 1968. What Do Physical Models Tell Us? , in B. van Rootselaar and J. F. Staal (eds.), Logic, Methodology and Science III. Amsterdam: North Holland, 385–396.

[McMullin 1968] McMullin, E., 1985. Galilean Idealization, Studies in the History and Philosophy of Science 16: 247–73.

[Morgan 1999] Morgan, M., 1999. Learning from Models, in Morgan and Morrison 1999, 347–88.

[Morgan 2003] Morgan, M., 2003. Experiments without Material Intervention: Model Experiments, Virtual Experiments and Virtually Experiments, In: H. Radder (ed.): The Philosophy of Scientific Experimentation, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 217–235

[Morrison 1998] Morrison, M., 1998. Modelling Nature: Between Physics and the Physical World, Philosophia Naturalis 35: 65–85.

[Morrison 2009] Morrison, M., 2009. Fictions, Representations and Reality, In: Mauricio Suárez (ed.): Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation, London: Routledge, 110–135.

[Mundy 1986] Mundy, B., 1986. On the General Theory of Meaningful Representation, Synthese 67: 391–437.

[Musgrave 1981] Musgrave, A., 1981. Unreal Assumptions' in Economic Theory: The F-Twist Untwisted, Kyklos 34: 377–387.

[Norton 1991] Norton, J., 1991. Thought Experiments in Einstein's Work, in Horowitz and Massey 1991, 129–148.

[Pahl & Beitz 2007] Pahl, G., Beitz, W., Schulz, H.-J., Jarecki, U., 2007. Engineering Design: A Systematic Approach. (K. Wallace & L. T. M. Blessing, Trans.) (3rd éd.). Springer.

[Parker 2008] Parker, W.S., 2008. Franklin, Holmes and the Epistemology of Computer Simulation, International Studies in the Philosophy of Science 22(2): 165–183.

[Parker 2009] Parker, W.S., 2009. Does Matter Really Matter? Computer Simulations, Experiments and Materiality, Synthese 169: 483–496

[Pimmler 1994] Pimmler T., Eppinger., S. D., 1994. Integration analysis of product decompositions, Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, MN, 343–351.

[Psillos 1995] Psillos, S., 1995. The Cognitive Interplay between Theories and Models: The Case of 19th Century Physics, in Herfel et al. 1995, 105–133.

[Reiss 2003] Reiss, J., 2003. Causal Inference in the Abstract or Seven Myths about Thought Experiments, in Causality: Metaphysics and Methods Research Project. Technical Report 03/02. LSE.

[Rodenacker 1991] Rodenacker, W. G., 1991. Methodisches Konstruieren: Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele (4., überarb. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.

[Roucoules 2006] Roucoules, L., et al., 2006, IPPOP: an open source collaborative design platform to link product, design process and industrial organisation information, Proceding of IDMME, cdrom.

[Stone 2000] Stone, R., Wood, K., 2000. Development of a Functional Basis for Design, Journal of Mechanical Design, Vol. 122, No. 4, 2000, pp. 359-370.

[Sudarsan 2005] Sudarsan, R. , Fenves, S.J., Sriram, R.D., Wang, F. , 2005, A product information modeling framework for product lifecycle management, Computer-Aided Design, 37(13), pp1399-1411.

[Suh 1990] Suh, N. P., 1990. The Principles of Design. Oxford University Press, USA.

[Suh 2001] Suh, N. P., 2001. Axiomatic Design: Advances and Applications, Oxford University Press, Oxford.

[Suppe 1989] Suppe, F., 1989. The Semantic View of Theories and Scientific Realism. Urbana and Chicago: University of Illinois Press.

[Suppes 1962] Suppes, P., 1962. Models of Data, in Ernest Nagel, Patrick Suppes and Alfred Tarski (eds.), Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress. Stanford: Stanford University Press, 252–261. Reprinted in Patrick Suppes: Studies in the Methodology and Foundations of Science. Selected Papers from 1951 to 1969. Dordrecht: Reidel 1969, 24–35.

[Suppes 2002] Suppes, P., 2002. Representation and Invariance of Scientific Structures. Stanford: CSLI Publications.

[Swoyer 1991 Swoyer, C., 1991. Structural Representation and Surrogative Reasoning", Synthese 87: 449–508.

[SysML 2012] OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™), 2012, http://www.omg.org/spec/SysML/1.3/PDF

[Teller 2001] Teller, P., 2001. Twilight of the Perfect Model, Erkenntnis 55, 393–415.

[Tomiyama 1987] Tomiyama, T. and Yoshikawa, H.,1987. Extended General Design Theory. in Yoshikawa H, Warman EA, (Eds.) Design Theory for CAD. North-Holland, Amsterdam, pp. 95–130.

[Tomiyama 1997] Tomiyama, T., 1997. A note on research directions of design studies. Proceedings of the 11th ICED Vol. 3, pp. 29-34, Tampere university of technology.

[Tomiyama 2006] Tomiyama, T., 2006. A classification of design theories and methodologies. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference.

[Tomiyama 2009] Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., Kimura, F., 2009. Design methodologies: Industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2), pp. 543-565. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.003

[Van Fraassen 1980] Van Fraassen, Bas C., 1980. The Scientific Image. Oxford: Oxford University Press.

[Weber 2008] Weber, C., 2008. How to Derive Application-specific Design Methodologies, Proceedings of Design 2008, Dubtrovnik, Croatia, pp. 69–80.

[Winsberg 2001] Winsberg, E., 2001. Simulations, Models and Theories: Complex Physical Systems and their Representations, Philosophy of Science 68 (Proceedings): 442–454.

[Winsberg 2001] Winsberg, E., 2003. Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World, Philosophy of Science 70: 105–125.

[Winsberg 2009] Winsberg, E., 2009. A Function for Fictions: Expanding the Scope of Science, In: Mauricio Suárez (ed.): Fictions in Science. Philosophical Essays on Modelling and Idealisation, London: Routledge, 197–191.

[Winsberg 2010] Winsberg, E., 2010. Science in the Age of Computer Simulation, Chicago: Chicago University Press.

[Yoshikawa 1981] Yoshikawa, H., 1981. General Design Theory and a CAD/CAM System. Man-Machine communication in CAD/CAM (Sata T., & Warman E.), pp. 35-58, Amsterdam

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 2

[Bachelard 1938] Bachelard, G., 1938. *La Formation de l'esprit scientifique Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Éditions Vrin. (ISBN 2-7116-1150-7)

[Ballu 1995] Ballu, A., Mathieu, L., 1995. *Univocal Expression of Functional and Geometrical Tolerances for Design*, Manufacture and Inspection. Proceedings of 4th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, Japan ; 31-51

[Bourdet 2007] Bourdet, P. & Schneider, F., 2007. *Spécification géométrique des produits : Cotation et tolérancement ISO*, Dunod.

[Iso 8015 2011] Iso 8015, 2011. *Spécification géométrique des produits (GPS) -- Principes fondamentaux -- Concepts, principes et règles,* ISO

[ISO 14660-1 1999] Iso 14660-1, 1999. *Spécification géométrique des produits (GPS) - Éléments géométriques - Partie 1: Termes généraux et définitions,* ISO.

[ISO 22432 2011] Iso 22432, 2011. *Spécification géométrique des produits (GPS) - Éléments utilisés en spécification et vérification,* ISO.

[Möbius 1827] Möbius, A., F., 1827. *Der barycentrische Calcül : ein neues Hilfsmittel zur analytischen Behandlung der Geometrie,* Leipzig (1827)

[Nadeau 2007] Nadeau, J.-P., Pailhès, J., 2007. *Analyse et structuration du problème lors d'une séance* de créativité, 10ème Colloque National AIP PRIMECA.

[NF EN ISO 5832-3 2012] NF EN ISO 5832-3, 2012. *Implants chirurgicaux - Produits à base de métaux - Partie 3 : Alliage à forger à base de titane, d'aluminium 6 et de vanadium 4.* AFNOR, 09 – 2012.

[Tonti 2003] Enzo TONTI, E., 2003. *A Classification Diagram for Physical Variables (preliminary draft),* Diagrammi.tex.

[Vernat 2010] Vernat, Y. , Nadeau, J.-P. , Sébastian, P., 2011. *Formalization and qualification of models adapted to preliminary design,* Int J Interact Des Manuf (2010) 4:11–24

[VIM3 2012] VIM 3, 2012. *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux, et termes associés* (VIM), 3e édition, JCGM.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 3

[Anthony 1984] Anthony, G. T., Cox, M. G., 1984. The design and validation of software for dimensional metrology, National Physical Laboratory, Report DITC 50/84

[Anthony 1996] Anthony, G.T. et coll., 1996. Reference software for finding Chebyshev best-fit geometric elements. Precision Engineering, 19(1), 28-36.

[Asch 1983] Asch, G., et al., 1983. Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod , pages 377-408.

[Ballu 1993] Ballu, A., 1993. Identification de modèles géométriques composés pour la spécification et la mesure par coordonnées des caractéristiques fonctionnelles des pièces mécaniques, mémoire de thèse, université de Nancy

[Ballu 1995] Ballu, A., Mathieu, L., 1995. Univocal Expression of Functional and Geometrical Tolerances for Design, Manufacture and Inspection. Proceedings of 4th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, Japan, 31-51.

[Ballu 2009] Ballu, A., 2009. Caractérisation et métrologie de la géométrie et des déplacements pour le tolérancement et la biomécanique. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches (HDR), LMP – laboratoire de mécanique physique de Bordeaux 1 - UMR 5459

[Bourdet 1976] Bourdet, P., Clément, A., 1976. Controlling surface with a 3 axis measuring machine, Annals of the CIRP, Volume 25/1, p 359-361.

[Bourdet 1984] Bourdet, P., Clément, A., Weill, R., 1984. Methodology and comparative study of optimal identification processes for geometrically defined surfaces, proceeding of international symposium on metrology for quality control in production, Tokio.

[Bourdet 1987] Bourdet, P., 1987. Contribution à la mesure tridimensionnelle : modèle d'identification des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles. Thèse d'état, Nancy I.

[Bourdet 1988] Bourdet, P., Clément, A., A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model, annals of the CIRP, volume 37/1, p 503-506

[Chen 1997] Chen, Y.H., Liu, C.Y., 1997. Robust segmentation of CMM data based on NURBS, The International Journal of Advanced Manufactur- ing Technology 13, 530–534.

[Diaz 1995] Diaz, C. & Hopp, T., 1995. Evaluation of Software for Coordinate Measuring Systems. Proceedings of the 1995 SEM Clinic..

[Fan 1987] Fan, T., Medioni, G., Nevatia, R., 1987. Segmented description of 3-D surfaces, IEEE Transactions on Robotics and Automation RA-3 (6) 527–538.

[Forbes 1989] Forbes, A. B., 1989. Least-squares best-fit geometric elements, National Physical Laboratory, Report DITC 140/89.

[Goch 1982] Goch, G., 1982. Theorie der Prüfung gekrümmter Werkstück-oberflächen in der koordinatenmeBtechnik, Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation, Hochschule der bundeswehr Hamburg.

[Goch 2008] Goch, G. & Lübke, K., 2008. Tschebyscheff approximation for the calculation of maximum inscribed/minimum circumscribed geometry elements and form deviations. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57(1), 517-520.

[Haralick 1989] Haralick, M., 1989. The Digital Morphological Sampling Theorem, IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 37, No 12, pp. 2067-2090

[Hopp 1990] Hopp, T.H., 1990. The mathematics of datums. ASPE Newsletter, American Society of Precision, Engineering, September, 4-9.

[Hubka 1982] Hubka, V., Eder, WE., 1982. Principles of Engineering Design, Butterworths Scientific, London.

[ISO 3274 1998]. Iso 3274, 1998. Geometric product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Nominal characteristics of contact (stylus) instruments, ISO.

[ISO 6892-1 2009]. Iso 6892-1, 2009. Matériaux métalliques -- Essai de traction -- Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante, ISO.

[ISO 9000 2005] Iso 9000, 2005. Systèmes de management de la qualité -- Principes essentiels et vocabulaire, ISO.

[ISO 11562 1998] Iso 11562, 1998. Geometric product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method. Metrological characteristics of phase correct filters, ISO.

[ISO 14406 2010] Iso 14406, 2010. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Extraction, ISO

[ISO/TS 16610-1 2006] Iso/Ts 16610-1, 2006. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Filtrage -- Partie 1 : Vue d'ensemble et concepts de base, ISO.

[ISO/TS 16610-20 2006] Iso/TS 16610-20, 2006. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Filtrage -- Partie 20 : Filtres de profil linéaires : Concepts de base, ISO.

[ISO/TS 16610-40 2006] Iso/Ts 16610-40, 2006. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Filtrage -- Partie 40 : Filtres de profil morphologiques : Concepts de base, ISO.

[ISO 17450-1 2011] Iso 17450-1, 2011. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Concepts généraux -- Partie 1 : Modèle pour la spécification et la vérification géométriques, ISO.

[ISO/CD 18183-1 2012] Iso/cd 18183-1, 2012. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Partitionnement -- Partie 1 : Concepts de base, ISO

[ISO 22432 2011] Iso 22432, 2011. Spécification géométrique des produits (GPS) -- Éléments utilisés en spécification et vérification, ISO

[ISO 25378 2011] Iso 25378, 2011. Spécification géométrique des produits - Caractéristiques et conditions - définitions, ISO.

[Lotze 1986] Lotze, W., 1986. Precision leng measurement by computer-aided coordinate measurement, J. of physics. E : Scientific instruments, vol. 19, p 495-501

[Milroy 1997] Milroy, M.J., Bradley, C., Vickers, G.W., 1997. Segmentation of a wrap- around model using an active contour, Computer-Aided Design 29 (4), 299–320.

[NF EN 1335-1 2000]. NF EN 1335-1, 2000. Mobilier de bureau - Sièges de travail de bureau - Partie 1 : dimensions - Détermination des dimensions, AFNOR

[Nyquist 1928] Nyquist, H., 1928. Certain topics in telegraph transmission theory, AIEE Trans., Vol. 47, pp. 617-644,1928,

[Shakarji 1998] Shakarji, C.M., 1998. Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System. Journal or research of the national institute of standards and technology, 103, 633-641.

[Shunmugam 1987] Shunmugam, M. S., 1987. New approach for evaluating form errors of engineering surfaces, Computer-Aided design, Vol. 19, N° 7

[Tsukada 1984] Tsukada, T., Kanada, T., Okuda, K., 1984. An evaluation of roundness from minimum zone center by means of an optimization technique, Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 18, N° 4, p 317-322

[Tsukada 1985] Tsukada, T., Kanada, T., Okuda, K., 1985. Minimum zone evaluation of cylindricity deviation by some optimization

techniques, Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., 3/1984, Vol. 19, N° 1, p 18-23

[VIM3 2012] VIM 3, 2012. Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux, et termes associés (VIM), 3e edition, JCGM.

[Wäldele 1993] Wäldele, F. et coll., 1993. Testing of coordinate measuring machine software. Precision Engineering, 15(2), 121-123..

[Weber 2008] Weber, C., 2008. How to Derive Application-specific Design Methodologies, Proceedings of the Design 2008, vol. 1, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, pp. 69–80

[Woo 2002]. Woo, H., Kang, Wang, S., et al,2002. A new segmentation method for point cloud data, International Journal of Machine Tools & Manufacture. 42 (2):167-178.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 4

[Albers & al 2007] Albers, A., & Alink, T., 2007. Support of Design Engineering Activity for a Systematic Improvement of Products, The Future of Product Development Proceedings of the 17th CIRP, Design Conference, Part 3, 105-114.

[Ballu & al 1995] Ballu, A., & Mathieu, L., 1995. Univocal Expression of Functional and Geometrical Tolerances for Design, Manufacture and Inspection. Proceedings of 4th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, 31-51.

[Chase & al 1988] Chase, K.W., Greenwood, W.H., 1988. Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis, Review ASME, 1(1): 50-59, 1988.

[Dantan & al 2008] Dantan, J.Y., Ballu, A., Mathieu, L., 2008. Geometrical Product Specifications - Model for Product Life Cycle. Computer-Aided Design; 40:493-501.

[Kurowski 1995] Kurowski, P.M., 1995. When good engineers deliver bad FEA , Machine Design, Editedby Paul Dvorak.

[ISO/dts AAAAA-1 2013] Iso/Dts AAAAA-1, 2013. Geometrical product specifications (GPS) — Association - Part 1: Basic Concepts - Spécification géométrique des produits (GPS), ISO, ISO TC213 AG12 N0163 Association Part 1 for Helsinki

[ISO 17450-1 2011] Iso 17450-1, 2011. Geometrical product specifications (GPS) — General concepts — Part 1: Model for geometric specification and verification / Spécification géométrique des produits (GPS) — Concepts généraux — Partie 1: Modèles pour la spécification et la vérification géométrique, ISO.

[ISO/CD 18183-1 2012] Iso/cd 18183-1, 2012. Geometrical product specifications (GPS) — Partitioning - Part 1: Basic Concepts — Spécification géométrique des produits (GPS), ISO.

[Nadeau & al 2007] Nadeau, J.P., & Pailhès, J., 2007. Analyse et structuration du problème lors d'une séance de créativité, 10ème Colloque National AIP PRIMECA.

[Turner & al 1987] Turner, J.U., & Wozny, MJ, 1987. Tolerances in computer-aided geometric design », The visual computer, 3(4):214-226.

[Ullman 2003] Ullman, D., 2003. The mechanical design process, 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education, New York.

[Wang & al 1990] Wang, N., & Ozoy, T.M., 1990. Representation of Assemblies for Automatic Tolerance Chain Generation, Engineering with computers, 6:121-126, 1990.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 5

[Bretesch 2000] De La Bretesch, B., 2001. *La méthode APTE. Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*, éditions Petrelle ISBN : 2-84440-019-1

[Hubka 2001] Hubka, E., 2001. *Design Science*, edited for the web by Filippo A. Salustri.

[Miles 1961] Miles, L. D.,1961. *Techniques of Value Analysis and Engineering,* McGraw-Hill Book Company, New York.

[Mistree 1990]. Mistree, F., Smith, W.F., Bras, B.A., Allen, J.K., Muster, D., 1990. *Decision-Based Design : A Comte porary Paradigm for Ship Design*. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 98, 1990.

[NF-EN1325-1 1996] NF EN 1325-1, 1996. *Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle — Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle*, CEN - AFNOR.

[Prudhomme 2003] Prudhomme, G., Zwolinski, P., Brissaud, D., 2003. *Integrating into the designe process the needs of those involved in the product life-cycle*, Journal of Engineering Design, vol 14, n°3.

[Reymen 2001] Reymen, I., 2001. *Improving design processes though structured reflexion- A domain independent approach,* Ph. D Thesis , Eindhoven, The Netherlands.

[Shu 1990] Suh, N.P.,2001. *The principales of design*, Oxford University Press, New York, 1990

[Turner 1987] Turner, J.U., Wozny, MJ., 1987. *Tolerances in computer-aided geometric design*, The visual computer 3(4):214-226

[Wood 2001] Wood, K.L. Greer, K.L., 2001. *Function-based synthesis methods in engineering desig,* in formal engineering design synthesis, Erik K. Antonsson and Jonathan Cagnan Editors, Gambridge University Press,.

[Yannou 2001] Yannou, B., 2001. *Préconception de produits*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, INPG.

RESUME

La conception de produits a pour objectif de définir techniquement un produit en satisfaisant les besoins de l'ensemble des clients du cycle de vie du produit. Les enjeux industriels conduisent à développer des modèles et des outils d'aide à la conception afin de répondre aux besoins clients tout en optimisant le triptyque coût-qualité délais.

L'objectif de cette thèse est de proposer une vision globale permettant d'appréhender les différents types de modélisation. Pour atteindre cet objectif, une analyse globale de ces notions est nécessaire afin d'obtenir une représentation commune du système pour les différentes activités de conception et de simulation.

L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les dépendances et les relations entre ces activités. Cette approche doit permettre d'appréhender les différents niveaux de détails (systémique) lors de la décomposition fonctionnelle et structurelle du produit. Elle doit également permettre de suivre l'élaboration des modèles physiques pour la simulation.

Nous proposons une traçabilité du processus de conception et du processus de modélisation permettant de remettre en cause, le cas échéant, les choix de conception et les hypothèses de modélisation.

Ce travail est fondé sur des concepts de GeoSpelling comme le « skin modèle », les opérations et les propriétés. Ils sont enrichis d'autres concepts comme les modèles finis et infinis et les modèles primitif et de simulation.

Mots clés : conception mécanique, modèle produit, modélisation, processus de modélisation, processus de conception, analyse de tolérance.

ABSTRACT

Product design aims to technically define a product satisfying the needs of all customers during the product life cycle. Industrial issues lead to develop models and tools supporting design to meet customer needs and contributing to costs-quality-and time optimisation.

The objective of this thesis is to propose an overall vision making it possible to apprehend the various types of modeling. To achieve this goal, a comprehensive analysis of these concepts is necessary in order to obtain a common representation of the system for the various activities of design and simulation.

The advantage of this approach is to highlight the dependencies and relationships among those activities. This approach should allow to apprehend the various levels of detail (systemic) during the functional and structural decomposition activity. It should also enable to monitor the development of the physical models for the simulation.

We propose a traceability of the design process and of the modeling process allowing to review as appropriate the design choices and the modeling assumptions.

This work is based on concepts of GeoSpelling as the "skin model", the operations and the properties. They are complemented by other concepts as the finite and infinite models and the primitive and simulation models.

Keywords : mechanical design, product model, modeling, modeling process, design process, tolerance analysis.