



**HAL**  
open science

## Eléments de modélisation des systèmes en conception : vue tolérancement géométrique

Frédéric Charpentier, Jérôme Pailhès, Alex Ballu

### ► To cite this version:

Frédéric Charpentier, Jérôme Pailhès, Alex Ballu. Eléments de modélisation des systèmes en conception : vue tolérancement géométrique. Congrès Français de Mécanique (21; 2013; Bordeaux), Aug 2013, France. pp.1-6. hal-00866170

**HAL Id: hal-00866170**

**<https://hal.science/hal-00866170>**

Submitted on 26 Sep 2013

**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.



## Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/7336>

### To cite this version :

Frédéric CHARPENTIER, Jérôme PAILHES, Alex BALLU - Eléments de modélisation des systèmes en conception : vue tolérancement géométrique - - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)

# Eléments de modélisation des systèmes en conception : vue tolérancement géométrique

F. CHARPENTIER<sup>a</sup>, J. PAILHES<sup>b</sup>, A. BALLU<sup>a</sup>

a. Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, (France)

b. Arts et Metiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, (France)

## Résumé :

*La modélisation est présente tout au long du processus de conception. Néanmoins, les travaux existants ne couvrent généralement que certaines activités, que certains points de vue : analyse fonctionnelle, conception préliminaire, conception détaillée, simulation (structure, thermique, tolérancement...). L'objectif de ce papier est de proposer une vision générale permettant d'appréhender les différents types de modélisation. Cette approche doit permettre de poser les hypothèses émises lors de l'élaboration des modèles physiques pour la simulation. Ce processus permet de passer d'un système réel complexe à un modèle simplifié permettant de réaliser des simulations. Ce processus est défini par un ensemble d'opérations et est représenté par un schéma procédural. La définition des modèles de simulation est le résultat de ce processus de modélisation. L'ensemble de ces notions est illustré par un exemple simple du domaine du tolérancement géométrique avec une modélisation par une chaîne de cote.*

## Abstract :

*Modeling is present throughout the design process. Nevertheless, existing studies generally cover only certain activities, and certain technical points of view: functional analysis, preliminary design, detailed design, simulation (structure, thermal, tolerancing, etc.). The purpose of this paper is to present a general overview for different types of modeling. This approach allows to describe and to formulate the assumptions made during the development of physical models for the simulation. This process allows to transform a real complex system into a simplified simulation model. This process is defined by a set of operations and is represented by a procedural scheme. The definition of simulation models is the result of this modeling process. These notions are illustrated using a simple example from the geometrical tolerancing domain with modeling by a tolerance stackup.*

**Mots clés : Modélisation physique, processus de construction de modèles, tolérancement géométrique**

## 1 Introduction

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 à partir des caractéristiques pertinentes du comportement du système. Lorsque le système est composé d'une multitude de sous-systèmes interagissant les uns avec les autres, le comportant global devient complexe et empêche un raisonnement humain intuitif intelligible et sans erreur [1]. 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 défauts de formes (plan, cylindre, cône...) en situations exactes [2][3][4]. 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 intégrant de nombreux modules performants de simulation de cinématique, de dynamique des mécanismes, de calcul de structures et de chaînes de cotes 1D. Pour ces applications, la non prise en compte de certains défauts géométriques et matière sont alors négligeables. Le modèle géométrique nominal est donc un modèle simple permettant une conception relativement aisée du produit jusqu'à son dimensionnement nominal. 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 leur 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 ont 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. Dans cette logique, l'objectif de ce papier 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.

## 1.1 Système étudié

La figure 1 est un exemple académique pour illustrer cet article de façon extrêmement simple. Cet exemple décrit un système permettant de maintenir un cadre d'épaisseur variable en position et en orientation par rapport au support. Dans un premier temps, l'utilisateur place le système sur un support stable, plan et horizontal. Puis, l'utilisateur introduit une partie du cadre dans le système entre les deux composants A et B. Une fois le cadre stabilisé en position, l'utilisateur relâche le cadre qui se maintient par les actions des composants A et B et par l'action de la gravité sur le cadre. Le composant B est interchangeable afin de s'adapter aux différentes épaisseurs d'une même famille de cadres. Le positionnement et le maintien du composant A sont réalisés par l'action des composants B et de la vis.

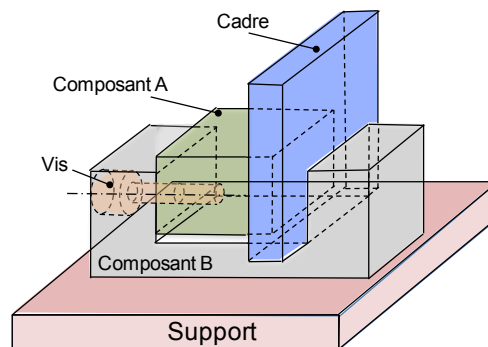


FIG. 1 – Exemple académique

## 1.2 Modèles physiques

Le concepteur doit conduire des simulations afin de prédire le comportement du système. Ces simulations se font à partir de modèles dont les définitions ou les détails dépendent de l'avancement dans le processus de conception (conception préliminaire, conception architecturale ou conception détaillée). A une étape de la conception, la modélisation du système physique n'est pas unique et n'est jamais parfaite, les modèles sont donc la cause d'incertitudes dans les activités de simulation, avec des risques d'incertitudes non maîtrisées. La conséquence peut être un comportement réel du système éloigné des résultats de la simulation. La modélisation doit permettre d'appréhender au mieux les phénomènes physiques que nous voulons formaliser [5].

Notre travail s'appuie sur le postulat qu'il existe deux mondes, le monde physique (le réel) et le monde abstrait (la modélisation). Par exemple, dans le cadre de la modélisation géométrique, l'interface physique qui sépare la matière de la pièce, de son environnement, est bien différenciée de son modèle, le « skin model », terme diffusé par Ballu & Mathieu [6]. Le but est de différencier clairement la peau de l'objet (physique), de son modèle exprimé sous forme de surface géométrique (abstrait).

Dans le cadre de cet article, nous nous attachons à considérer la multiplicité de modèles utilisables. Ces modèles présentent plus ou moins de variations par rapport à un modèle nominal parfait, ces variations peuvent porter sur la géométrie ou la matière. Une description détaillée des différents types de modèles utilisés lors du processus de modélisation est fournie dans la référence [7].

## 2 Processus de modélisation

Le processus de modélisation est donc 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. 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 au moment où le concepteur simule le comportement du système afin d'en prédire le comportement.

### 2.1 Processus de simplification

En ce qui concerne la simulation des variabilités géométriques d'un produit, l'analyse de tolérance 1D est utilisée chaque jour dans l'industrie. Elle est basée sur une méthode simple et bien connue. C'est en raison de sa simplicité et de son universalité que nous l'utilisons dans la suite pour illustrer notre réflexion sur les différents modèles présentés. A l'heure actuelle, la recherche vise à résoudre des problèmes de tolérancement beaucoup plus complexe mais ils ne font pas l'objet de cet article. Le modèle de simulation sera donc constitué de plans parallèles avec des variations de distances entre ces plans (fig. 2).

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.

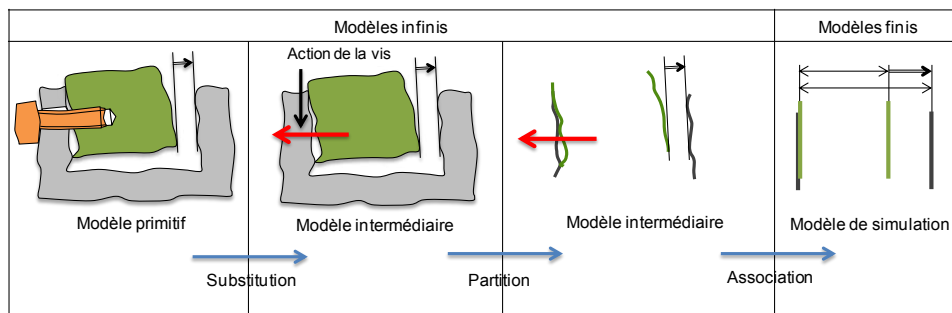


FIG. 2 – processus de simplification

### 2.2 Opérateur - opération

Chaque modèle intermédiaire peut être défini par des opérations ou opérateurs (fig. 2). Un opérateur est un ensemble ordonné d'opérations. Les concepts d'opérations géométriques sont les mêmes que ceux de GeoSpelling [6]. Le langage GeoSpelling a la particularité de permettre une représentation formelle des informations pour les activités de cotation. Il introduit notamment des opérations de partition, d'extraction, de filtrage, d'association, de construction et de collection. Par rapport à GeoSpelling, la liste des opérations n'est pas exhaustive, elle peut être enrichie en fonction des besoins du concepteur et des hypothèses formulées et en particulier pour aborder des aspects autres que géométriques comme la modélisation de phénomènes physiques.

Les notions d'opérateur et d'opération vont être illustrées au travers de l'exemple. Pour l'exemple, nous allons considérer trois types d'opérations, la substitution, la partition et l'association (fig. 2). En effet, le processus de simplification de notre exemple comporte trois étapes, la première pouvant être décrite par un opérateur de substitution permettant de traduire les déplacements générés par l'action physique de la vis, la seconde par un opérateur de partition reposant sur des extractions, la troisième par un opérateur reposant sur des associations.

#### 2.2.1 Substitution

L'opération de substitution est utilisée pour remplacer un ou plusieurs composants par leur effet. Ici elle est utilisée pour remplacer la vis par l'action du composant B sur le composant A. Sur cet exemple, l'intensité de l'effort n'est pas importante parce que le modèle primitif utilisé est considéré comme rigide. Mais la

position du point d'application de l'effort de la vis et la direction de cet effort ont un impact sur la position relative des pièces lorsque les surfaces sont convexes. Le point d'application et la direction de l'effort sont établis en fonction de critères et dépendent donc de ces critères. Le résultat est que des déplacements relatifs différents peuvent être obtenus entre les composants A et B, et donc des jeux différents entre les pièces peuvent donc apparaître. La figure 3 illustre ce phénomène grâce à deux positions différentes de l'effort qui ont été volontairement exagérées. Considérons le premier modèle intermédiaire (fig. 2) obtenu par l'opérateur de substitution, permettant de remplacer la vis par l'effort. Dans ce cas là, nous posons comme hypothèse que le critère de substitution a une influence négligeable sur le jeu.

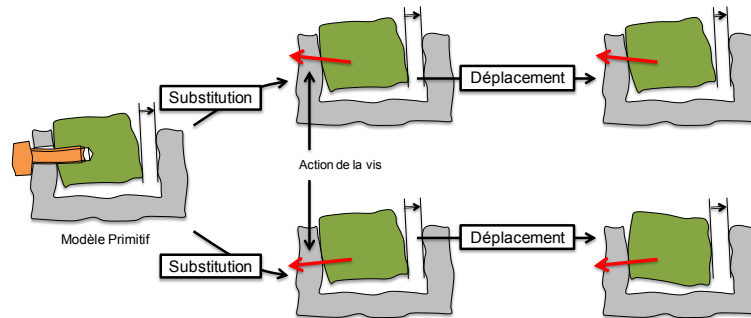


FIG. 3 – Opérateur de substitution

### 2.2.2 Partition

L'opération géométrique 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 model qui ont une influence sur le jeu. Ces différentes parties sont limitées par les arêtes du skin model, 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 A et B et d'obtenir un jeu différent entre les pièces. La figure 4 illustre ces propos en montrant deux partitions différentes et en exagérant leur différence. Si nous considérons le deuxième modèle intermédiaire (fig. 2) 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. L'opérateur est constitué des quatre partitions.

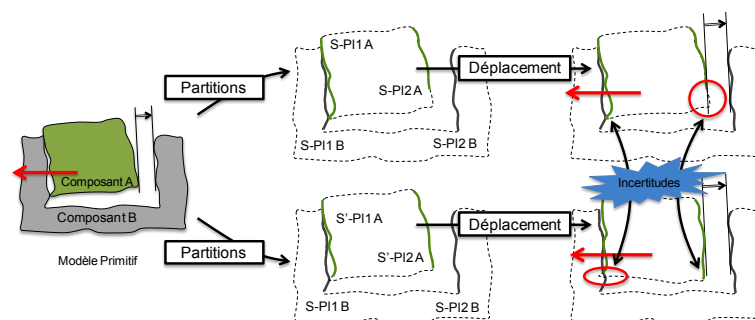


FIG. 4 – Opération de partition

### 2.2.3 Association

L'opération géométrique appelée association 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. Ainsi, le plan des moindres carrés est le résultat d'une association à une surface (modèle infini) avec pour objectif de minimiser la somme des écarts au carré des points, sans contraintes. Un plan tangent extérieur matière est associé avec pour objectif de minimiser la plus grand des écarts à la surface et pour contrainte que le plan soit extérieur à la matière. Selon le critère d'association, les plans sont différents. Dans l'exemple, les plans associés aux éléments surfaciques (modèle infini) génèrent des déplacements

relatifs différents entre les deux composants A et B (fig. 5) selon le critère d'association. Les critères considérés sont : d'une part pour chacune des quatre surfaces, l'association d'un plan selon le critère des moindres carrés, de manière indépendante, et d'autre part pour chacun des deux composants, l'association de deux plans parallèles selon le critère des moindres carrés. Dans le second cas, l'association est contrainte par le parallélisme. Si nous considérons un des nouveaux modèles obtenus par les associations des quatre plans, nous posons alors comme hypothèse que les défauts de forme des surfaces et le choix du critère d'association sont négligeables sur le jeu. L'opérateur est constitué de l'ensemble des associations. Le modèle obtenu correspond au modèle de simulation traité par une chaîne de côtes 1D.

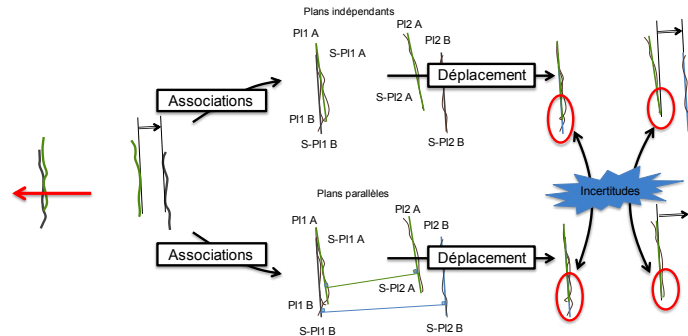


FIG. 5 – Opération d'association

### 3 Schéma procédural et synthèse

Le schéma procédural a pour objectif de représenter les opérateurs permettant de passer d'un modèle à l'autre. Dans le schéma procédural, les éléments sont toujours représentés par des 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 en figure 6, les partitions des deux surfaces S-PLA1 et S-PLA2 sont représentées par rectangles, les entrées des opérations sont le skin modèle du composant A et les sorties sont les deux surfaces nominalement planes obtenues par deux opérations de partitions. Ces deux surfaces sont représentées par des pôles du composant A.



FIG. 6 – Schéma procédural de la partition et de l'association

En figure 6, l'association des plans PLA1 et PLA2 est représentée par un rectangle, les entrées de l'association sont les deux surfaces partitionnées, les sorties sont les deux plans PLA1 et PLA2. Une seule association est représentée car le critère retenu impose une association simultanée avec une contrainte de parallélisme entre les deux plans.

La figure 7 présente une synthèse globale du processus de modélisation en intégrant les schémas de flux et les schémas procéduraux. Les différents modèles physiques établis (modèle primitif, modèle intermédiaire et modèle de simulation) sont illustrés. Pour chacun de ces modèles, un schéma de flux peut être établi, mettant en évidence les éléments du modèle, leurs interactions et les exigences. Les exigences sont représentées par un rectangle avec un triangle à l'intérieur. Enfin, le schéma procédural, montre le processus de simplification du modèle primitif par la mise en place d'opérations successives.



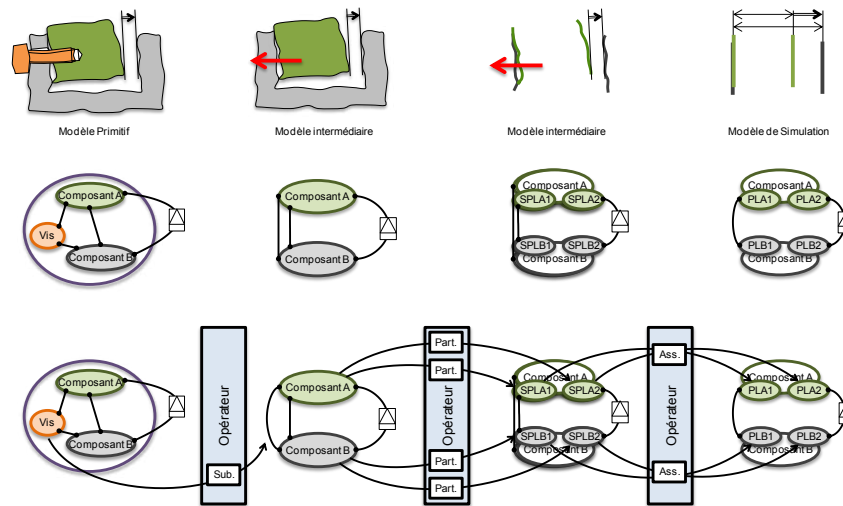


FIG. 7 – Synthèse du processus de modélisation

## 4 Conclusion

Nous proposons dans cet article une vision cohérente 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. Du point de vue de la modélisation géométrique et physique des systèmes, l'apport est essentiellement sur la notion de modèles infinis et inadaptés. En effet, la conception et la modélisation sont essentiellement basés sur des modèles parfaits (géométrie parfaite, matériau homogène...), au mieux quelques écarts sont considérés pour des études plus particulières. Pourtant, si l'on désire définir un modèle pour la simulation en posant correctement les hypothèses de simplification ce type de modèle peut s'avérer insuffisant. Le modèle primitif doit être la base du processus de simplification conduisant 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'exemple développé dans cet article est traité du point de vue géométrique et conduit à une simulation à l'aide d'une chaîne de cotes 1D. Les concepts présentés doivent pouvoir être utilisés pour traiter la simulation des différents phénomènes mécaniques en jeu dans un système. Un travail similaire sur les phénomènes mécaniques, autres que géométriques, est un travail de recherche en cours.

## Références

- [1] ALBERS A., ALINK T., 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, 2007.
- [2] ULLMAN D., The mechanical design process, 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education 2003, New York.
- [3] CHASE K.W., GREENWOOD W.H., Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis, Review ASME 1988, 1(1): 50-59, 1988.
- [4] WANG N., OZSOY T.M., Representation of Assemblies for Automatic Tolerance Chain Generation, Engineering with computers, 6:121-126, 1990.
- [5] NADEAU J.P., PAILHES J., Analyse et structuration du problème lors d'une séance de créativité, 10<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA, 2007.
- [6] ISO 17450-1, Geometric Product Specification (GPS) - General concepts - Part 1: Geometrical Model for specification and verification », ISO 2011.
- [7] CHARPENTIER F., BALLU A., PAILHÈS J., A scientific point of view of a simple industrial tolerancing process, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Huddersfield, 10 pages, 18-19 United Kingdom, Avril, 2012.