



HAL
open science

Un modèle pour l'intégration des couplages multiphysiques et la prise en compte de la fabricabilité au cours du processus de conception des microproduits.

Matthieu Museau

► To cite this version:

Matthieu Museau. Un modèle pour l'intégration des couplages multiphysiques et la prise en compte de la fabricabilité au cours du processus de conception des microproduits.. Autre. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008. Français. NNT: . tel-00425084

HAL Id: tel-00425084

<https://theses.hal.science/tel-00425084>

Submitted on 20 Oct 2009

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.

THESE
présentée par

Matthieu MUSEAU

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR
DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1

Discipline : Génie Mécanique
Soutenue publiquement le 02 décembre 2008

**Un modèle pour l'intégration des couplages
multiphysiques et la prise en compte de la
fabricabilité au cours du processus de conception des
microproduits**

Composition du jury :

Hans Nørgaard HANSEN	Professeur (Danmarks Tekniske Universitet)	Président
Mihael JUNKAR	Professeur (University of Ljubljana)	Rapporteur
Patrick MARTIN	Professeur (Arts et Métiers ParisTech, CER de Metz)	Rapporteur
Lionel ROUCOULES	Professeur (Arts et Métiers ParisTech, CER d'Aix en Provence)	Examineur
Henri PARIS	Professeur (Université de Grenoble)	Directeur de thèse
Cédric MASCLET	Maître de Conférences (Université de Grenoble)	Co-directeur de thèse

Thèse préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
(Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble)

Table des matières

Table des matières.....	3
Table des figures.....	5
Remerciements.....	7
Introduction générale.....	9
Chapitre 1 Contexte : la conception de microproduits.....	11
1.1 Qu'est ce qu'un microproduit.....	11
1.1.1 Les microproduits, objets de notre étude.....	11
1.1.2 Pourquoi miniaturiser ?.....	12
1.1.3 Les grandes familles de microproduits.....	12
1.2 Les spécificités des microproduits.....	19
1.2.1 Les effets d'échelle.....	19
1.2.2 Les couplages multi physiques.....	20
1.2.3 La fabrication des microproduits.....	21
1.3 La conception des microproduits.....	25
1.3.1 Les acteurs de la conception de microproduits.....	25
1.3.2 Un processus de conception de microproduits.....	26
1.3.3 Les outils d'aide à la conception de microproduits.....	28
1.3.4 Les manques et les limites dans les outils existants.....	31
1.4 Conclusion.....	32
Chapitre 2 Des modèles pour supporter l'activité de conception.....	33
2.1 Introduction.....	33
2.2 Le concept de modèle-produit.....	33
2.2.1 Les fonctions.....	34
2.2.2 Les composants, ou structures.....	34
2.2.3 Les comportements.....	34
2.3 CoDeMo.....	35
2.3.1 Le modèle-produit de CoDeMo.....	35
2.3.2 Le modeleur CoDeMo.....	39
2.4 Le modèle PPO dans le cadre du projet IPPOP.....	41
2.4.1 Présentation du projet IPPOP et du modèle associé.....	41
2.4.2 Le modèle-produit de PPO.....	42
2.5 Une conception "au juste besoin" de microproduits.....	44
2.5.1 Composition de l'environnement de conception.....	44
2.5.2 Application de l'environnement de conception collaborative et intégrée à la re-conception d'un MEMS.....	45
2.6 Conclusion.....	51
Chapitre 3 Concepts et modèle pour la conception de microproduits.....	53
3.1 Introduction.....	53
3.2 Le concept de fonction.....	53
3.2.1 Définition.....	53
3.2.2 Les fonctions des systèmes microfluidiques.....	54
3.2.3 Les fonctions des MEMS.....	55
3.3 Le concept de principe physique.....	56
3.3.1 Définition.....	56
3.3.2 Quelques principes physiques mis en œuvre dans les microproduits.....	57
3.4 Le concept de couplage.....	59
3.4.1 Définition.....	59
3.4.2 Exemples, différents principes d'actionnement d'un switch.....	60

3.4.3	La gestion des couplages dans les modèles-produits existants	64
3.5	Le concept de fabricabilité	65
3.5.1	Définition	65
3.5.2	Exemple : réalisation d'un système microfluidique	66
3.6	Organisation des concepts présentés au sein d'un modèle de microproduits	70
3.6.1	Objectifs	70
3.6.2	Modélisation de produits par l'UML	70
3.6.3	Un modèle de microproduits	73
3.7	Conclusion	77
Chapitre 4	Exemples : utilisation du modèle lors de la conception de deux microproduits ...	79
4.1	Introduction	79
4.2	Utilisation du modèle lors de la conception d'un MEMS switch RF	79
4.2.1	Expression des besoins du client	79
4.2.2	Principes physiques mis en œuvre	80
4.2.3	Procédés de fabrication du produit	81
4.2.4	Évolution du modèle au cours du processus de conception	83
4.3	Modélisation d'un système microfluidique	90
4.3.1	Expression des besoins du client et clarification du cahier des charges	90
4.3.2	Procédés de fabrication	92
4.3.3	Principes physiques mis en œuvre	94
4.3.4	Évolution du modèle au cours du processus de conception	96
Conclusion et perspectives	101
Références	103

Table des figures

Figure 1.1 Principe d'un accéléromètre capacitif.....	13
Figure 1.2 Accéléromètre AD-XL50 [Del08]. (a) puce et (b) images MEB du capteur.....	14
Figure 1.3 Capacité variable, micro plaque [You96].....	15
Figure 1.4 Réseau de peignes interdigités. Image MEB [Bor03] et schéma de principe.....	16
Figure 1.5 Capacité variable digitale [Bra01].....	16
Figure 1.6 Micro laboratoire [Let08].....	17
Figure 1.7 Schéma de la matrice DLP de Texas Instrument.....	18
Figure 1.8 Image MEB d'un micro miroir.....	18
Figure 1.9 Schéma de dépôts successifs de couches sans polissage.....	22
Figure 1.10 Image MEB de dépôts successifs de couches avec polissage.....	22
Figure 1.11 Schéma d'une gamme de fabrication VLSI.....	22
Figure 1.12 Gravure du produit en phase aqueuse a), en phase sèche b), et formation de produits parasites c).....	23
Figure 1.13 Matrice d'emboutissage [Jun07].....	24
Figure 1.14 L'équipe de conception d'un microproduit [Dgr04].....	26
Figure 1.15 Une modélisation du processus de conception, avec un aspect temporel marqué [Dgr04].....	27
Figure 1.16 Modèle paramétré d'un condensateur à capacité variable (gauche) et image MEB du produit fini (droite) [Sch04].....	30
Figure 1.17 Matrice utilisée lors des campagnes d'essais [Sch04].....	31
Figure 2.1 Attributs d'une entité d'usinage [Rou99].....	36
Figure 2.2 Association de liens par une relation dans le modèle de données [Cha97].....	37
Figure 2.3 Association entre le modèle de données et le modèle de connaissance, organisation du modèle de données dans une vue métier d'usinage [Rou99].....	37
Figure 2.4 Traductions entre le modèle fonctionnel et le modèle de données [Rou99].....	38
Figure 2.5 Construction progressive des vues [Rou99].....	38
Figure 2.6 Architecture du modèleur CoDeMo [Rou99].....	40
Figure 2.7 Décomposition multi-vues dans CoDeMo [Rou99].....	41
Figure 2.8 Diagramme de classe du modèle PPO [Noe08].....	42
Figure 2.9 Diagramme de classe du modèle-produit de PPO [Sad08].....	43
Figure 2.10 L'environnement supportant l'activité de conception [Kle08].....	44
Figure 2.11 Modèles utilisés dans la démarche de conception [Kle08].....	46
Figure 2.12 L'interrupteur à re-concevoir [Reb01].....	46
Figure 2.13 Les concepts du modèle FPPT [Kle08].....	48
Figure 2.14 Schéma FPPT de la solution technologique de l'interrupteur [Kle08].....	48
Figure 2.15 Bijection entre le modèle expert et le modèle d'interface [Kle08].....	49
Figure 2.16 Apparition des peaux et squelettes d'usage. Première vue géométrique [Kle08].	49
Figure 2.17 Squelettes de fabrication de l'interrupteur.....	50
Figure 3.1 Structure de type cantilever.....	58
Figure 3.2 Effort de rappel ($g < g_0$).....	58
Figure 3.3 Principe de fonctionnement d'un bilame [Chu93].....	61
Figure 3.4 Schéma de l'actionnement thermique dans un switch.....	61
Figure 3.5 Mise en oeuvre d'une commande électrostatique dans un switch [Pot03].....	63
Figure 3.6 Tolérances relatives pour la fabrication de différents produits [Mad02].....	66
Figure 3.7 Système microfluidique : schéma et représentation géométrique 3D (dimensions en millimètres).....	67
Figure 3.8 Réalisation de la matrice d'emboutissage.....	68

Figure 3.9 Électrode avant (en haut) et après (en bas) réalisation de la matrice d'emboutissage	69
Figure 3.10 Matrice d'emboutissage réalisée par micro EDM.....	69
Figure 3.11 Représentation de la classe voiture.....	71
Figure 3.12 Instance de la classe voiture	71
Figure 3.13 Exemple de multiplicité : nombre minimum de points dans un polygone	72
Figure 3.14 Relation d'agrégation	72
Figure 3.15 Exemple d'une classe association	72
Figure 3.16 Modélisation d'un microproduit.....	73
Figure 4.1 Procédé d'évaporation utilisé pour le dépôt de la bicouche titane/or	82
Figure 4.2 Dépôt de métaux par électrolyse	83
Figure 4.3 Différentes architectures de MEMS switch RF [Reb01].....	83
Figure 4.4 Déflexion d'une poutre soumise à un actionnement électrostatique [Pot03].....	85
Figure 4.5 Modèle du switch à cet état du processus de conception	85
Figure 4.6 Évolution du modèle après identification des paramètres couplés.....	88
Figure 4.7 Évolution du modèle après prise en compte des contraintes de fabricabilité.....	89
Figure 4.8 Vue géométrique du produit après la clarification du cahier des charges. Perspective, à gauche et vue de dessus, à droite	91
Figure 4.9 Stratégie d'usinage des canaux	93
Figure 4.10 Réalisation de l'insert.....	93
Figure 4.11 Canal de section arbitraire	94
Figure 4.12 Modèle du produit après identification des principes physiques.....	97
Figure 4.13 Dessin de définition du système microfluidique	98
Figure 4.14 Évolution du modèle après l'intégration des couplages et des procédés de fabrication	100

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Patrick Martin et Mihael Junkar pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail et pour leurs commentaires des plus judicieux.

Je remercie Hans Nørregard Hansen d'avoir bien voulu présider le jury. Je le remercie également de m'avoir accueilli à plusieurs reprises au sein de son laboratoire durant ces trois années de thèses.

Je remercie Lionel Roucoules pour sa participation au jury et pour toutes les discussions que nous avons eues ces trois dernières années qui m'ont bien aidé dans la réalisation de mes travaux.

Un grand merci à mes deux encadrants, Cedric Masclet et Henri Paris, pour tous leurs conseils sur mes travaux et pour leur disponibilité et leur réactivité, en particulier lors de la période de rédaction du manuscrit.

Merci beaucoup à Arnaud De Grave, pour son accueil au Danemark, pour ces idées et conseils nombreux et d'une manière plus générale, pour tous les bons moments passés ensemble.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé à un moment ou un autre de mon travail, notamment Frédéric Noel et Mohsen Sadeghi au laboratoire G-SCOP, ainsi que Jean-Sébastien Klein Meyer au laboratoire LASMIS.

Merci beaucoup à tous les membres du laboratoire G-SCOP pour l'ambiance chaleureuse et les moments conviviaux passés ensemble au cours de ces dernières années. Un clin d'œil particulier pour Rosalinde qui partageait mon bureau durant la dernière période.

Merci enfin à mes parents et à ma famille pour leur soutien sans faille durant cette expérience.

Introduction générale

Les microproduits, objets de nos travaux, sont présents en quantité importante dans notre vie quotidienne, intégrés par exemple dans des produits de consommation comme les ordinateurs, mais également dans nos moyens de transport ou au sein d'appareils médicaux. Les microproduits sont donc des composants de produits ayant pour certains une durée de vie limitée et un fort taux de renouvellement, comme les téléphones portables. Paradoxalement, les coûts de développement et les temps de mise sur le marché de nouveaux microproduits restent élevés. Cela est dû, en partie, au fait que ces produits, qui s'appuient sur des technologies multidisciplinaires, restent aujourd'hui conçus dans un processus de conception orienté "R&D", comportant de nombreuses itérations afin d'obtenir un produit économiquement fabricable et remplissant les fonctions attendues. L'objectif de notre étude est de proposer un outil permettant à la fois une meilleure gestion des différents principes physiques mis en œuvre dans les microproduits, directement associés aux fonctions remplies et une prise en compte de la fabricabilité, dans le but de diminuer le nombre d'itérations lors du processus de conception.

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres. Le premier présente les différentes catégories de microproduits et leurs spécificités vis-à-vis des "macro" produits. Ensuite, un état de l'art sur la conception de ces produits nous permet de souligner les manques et limites dans les principaux outils dédiés et existants, notamment concernant la prise en compte des spécificités des microproduits, tout en rappelant la nécessité pour les différents acteurs du processus de conception de travailler selon les principes de la conception intégrée [Tic94].

Dans le second chapitre, nous revenons sur certains concepts et outils développés pour la conception de produit dans le contexte de conception intégrée. Nous cherchons en particulier à évaluer dans quelle mesure le concept de modèle-produit supporte les spécificités liées à la conception de microproduits. Après une présentation de quelques outils basés sur ce concept, nous mettons en avant les avantages que ceux-ci peuvent apporter lors de la conception de microproduits en soulignant tout de fois que la gestion des différents principes physiques couplés n'est pas forcément évidente. Nous terminons ce chapitre en présentant les récents travaux concernant la caractérisation d'un processus de conception au juste besoin et à son application aux microproduits [Kle08] : nous nous appuyons sur certains résultats pour la suite de nos travaux.

Le chapitre trois nous permet de détailler quatre concepts manipulés lors de la conception de microproduits : les concepts de fonction, principe physique, couplage et fabricabilité. D'abord nous présentons ce que nous entendons par fonction, dans le cadre de notre étude et nous montrons que les fonctions techniques mises en œuvre dans les microproduits sont limitées : sans prétendre être exhaustifs, nous en listons les principales. Ensuite nous montrons qu'il existe un lien entre les fonctions réalisées et les principes physiques mis en

œuvre dans les produits et nous illustrons ces propos en prenant pour exemple deux principes fréquemment présents dans ces produits : l'électrostatique et la mécanique. Cela nous permet de présenter le concept de couplage et le fait que les décisions prises lors de la conception de microproduits peuvent se faire dans deux contextes distincts, respectivement par l'intégration d'expertises métier ou d'expertises liées aux couplages entre plusieurs métiers différents. Enfin nous illustrons la forte dépendance existante entre la géométrie du produit, le choix des procédés de fabrication et l'ensemble du système de production par la présentation du concept de fabricabilité. La dernière partie du chapitre est consacrée à l'organisation des concepts présentés au sein d'un modèle dont l'objectif est de représenter le produit et les informations s'y rapportant au cours du processus de conception.

Le quatrième chapitre nous permet d'appliquer les concepts et le modèle présentés dans le chapitre précédent sur deux exemples. Pour cela, nous nous intéressons à la conception de deux microproduits : un MEMS switch RF et un système microfluidique. Dans les deux cas, après avoir détaillé les fonctions remplies, les principes mis en œuvre et une partie des procédés de fabrication utilisés, nous montrons l'évolution de la modélisation des deux produits conçus, au cours de leur conception, en fonction des prises de décision.

Enfin nous concluons sous la forme d'une synthèse des résultats obtenus et nous mettons en évidence les perspectives issues de ce travail.

Chapitre 1

Contexte : la conception de microproduits

1.1 Qu'est ce qu'un microproduit

1.1.1 Les microproduits, objets de notre étude

Notre travail a pour objets d'étude les microproduits. Nous utilisons comme définition de microproduits celle proposée par Arnaud De Grave [Dgr04] qui définit trois catégories principales de microproduits : les micro pièces mécaniques, les micro composants et les micro systèmes électro-mécaniques (MEMS). Nous en redonnons les caractéristiques principales ci-dessous.

- Les **micros pièces mécaniques** sont des pièces le plus souvent monolithiques, issues du domaine des produits mécaniques dont les dimensions sont réduites, parfois de manière drastique. Les méthodes de fabrication utilisées pour leur réalisation sont aussi bien des miniaturisations de procédés mécaniques que des procédés développés à partir de l'industrie du silicium.
- Les **micros composants** sont des produits présentant des fonctions simples qui sont adaptés des composants électroniques en vue d'obtenir de meilleures performances. Ils ne sont pas autonomes et agissent sur les circuits intégrés comme des composants électroniques classiques. Pour cela, ils seront ajoutés sur le produit global, tel un micro switch d'antenne assemblé sur la carte d'un téléphone portable de la même manière que le microprocesseur. Lorsqu'ils présentent des mouvements mécaniques mis en jeu, ceux-ci sont plus souvent des déformations de pièces souples que des mouvements de solides rigides. Enfin, ces produits intègrent à la fois des fonctions électroniques et mécaniques réalisées dans un même flux, en utilisant des technologies issues de l'industrie du silicium.
- Les **MEMS** sont des micros composants avec une plus grande autonomie en termes de fonctionnement et d'énergie. Un MEMS est un produit en lui-même, pouvant réaliser plusieurs fonctions, comme la détection d'une information, son traitement puis une action sur le monde extérieur. C'est souvent un produit multi disciplinaire où plusieurs principes physiques sont mis en œuvre sur un même substrat.

1.1.2 Pourquoi miniaturiser ?

Les microproduits, tels que nous les avons définis dans la partie précédente, envahissent notre vie quotidienne puisqu'ils sont présents dans un grand nombre d'objets courants : téléphones portables, véhicules, vidéo projecteurs... Avant de présenter plus dans le détail les grandes familles de microproduits, nous tenons à rappeler les principaux avantages que représente la miniaturisation des produits.

- La taille des produits implique un faible volume et un faible poids, ce qui est extrêmement intéressant des applications portables (téléphones, ordinateurs) ou lorsque tout excès de poids revient extrêmement cher (aéronautique).
- Les microproduits, fabriqués avec des procédés de fabrication de masse, (voir partie 1.2.3) ont un prix de revient individuel peu élevé.
- Du fait des faibles masses mise en jeu et de certains modes d'actionnement (électrostatique par exemple) la consommation énergétique des MEMS et micro composants, est plus faible que celle d'un "macro" produit qui remplirait les mêmes fonctions.

1.1.3 Les grandes familles de microproduits

Les domaines d'application des microproduits sont nombreux, que ce soit dans l'automobile, les télécommunications, l'aéronautique, l'optique, la biologie et le médical ou l'informatique (cette liste n'est pas exhaustive). Cependant bien que les domaines d'application et les produits eux-mêmes soient nombreux, les produits peuvent être regroupés en famille de produits. Nous ne prétendons pas donner une liste figée et complète des familles de produits, mais les microproduits les plus courants se classent parmi : les capteurs, les MEMS RF, les systèmes microfluidiques et les systèmes optiques. Notre objectif n'est pas de proposer un catalogue de produits, mais d'en présenter quelques-uns, emblématiques, afin de mieux comprendre les différentes catégories de microproduits, les fonctions réalisées et les principes physiques mis en œuvre. Nous détaillerons dans le chapitre 3 les concepts de fonction et principe physique.

1.1.3.1 Les capteurs

Les capteurs sont des microproduits répandus dans de nombreux domaines d'application : gyroscopes utilisés dans le domaine de l'automobile [Del08], des capteurs de position [Del08], des capteurs de pression [Par00], capteur de température et de concentration de gaz [Bar00]. Prenons pour exemple l'un des plus grands succès de l'utilisation des microproduits comme capteurs : les accéléromètres d'Airbag.

Différents principes physiques peuvent être mis en œuvre dans les accéléromètres existants pour détecter une accélération : par exemple, l'électrostatique et la mécanique, dans les accéléromètres capacitifs, dont le principe de fonctionnement est schématisé Figure 1.1. La masse mobile du système soumis à une accélération se met en mouvement, entraînant une variation de capacité entre deux électrodes. La mesure de cette variation permet la détection de l'accélération.

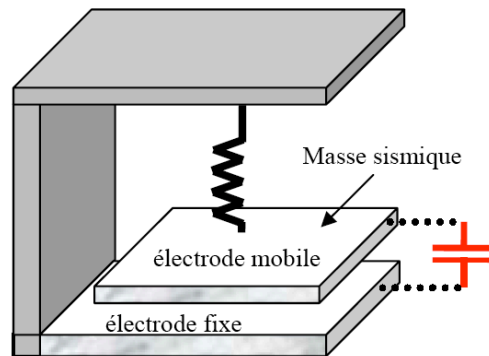
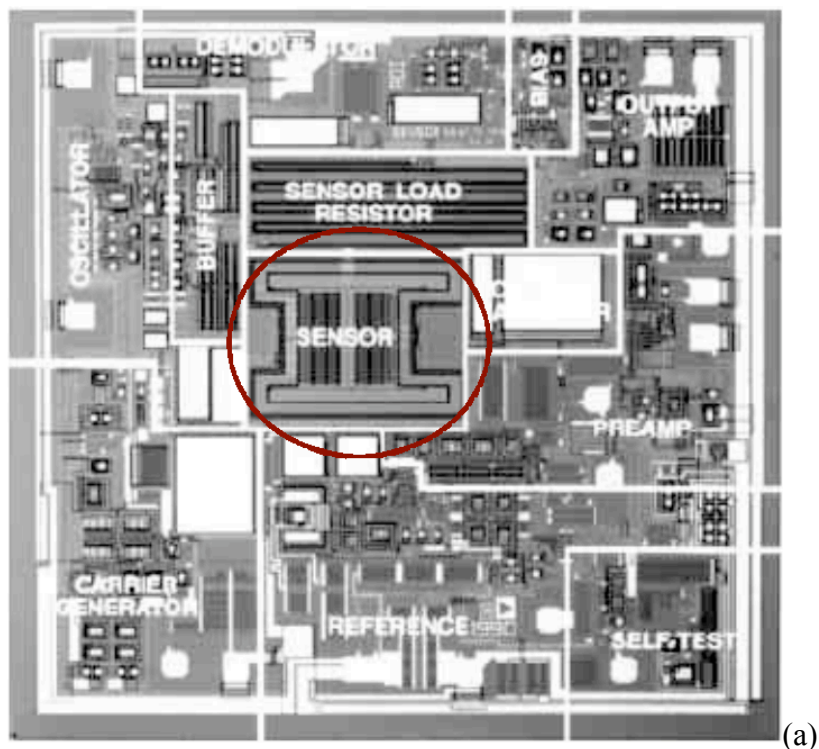


Figure 1.1 Principe d'un accéléromètre capacitif

C'est sur ce principe de fonctionnement que se base l'accéléromètre AD-XL50, commercialisé depuis 1993 par la société Analog Device, voir Figure 1.2.



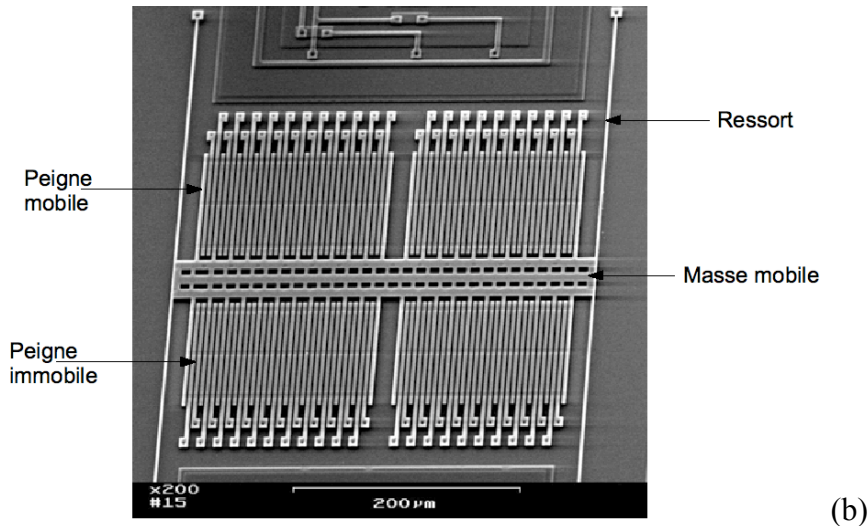


Figure 1.2 Accéléromètre AD-XL50 [Del08]. (a) puce et (b) images MEB du capteur

La Figure 1.2.a. représente une vue globale de la puce, incluant le capteur, entouré en rouge, dont l'image MEB en vue de dessus est montrée Figure 1.2.b. Ce capteur est composé de peignes, c'est-à-dire d'un ensemble de poutres longues de $150\mu\text{m}$ et suspendues à $2\mu\text{m}$ du substrat. La moitié des poutres est immobile, l'autre est fixée à une masse mobile, elle même reliée au substrat par quatre ressorts. Le mouvement de la masse mobile engendré par une accélération provoque une variation de la capacité formée entre les peignes mobiles et immobiles. La mesure de cette variation permet de détecter l'accélération à laquelle est soumise le système.

1.1.3.2 Les MEMS-RF

Le sigle MEMS-RF désigne l'ensemble des systèmes de communication micro-ondes réalisés par des techniques issues de l'industrie du silicium. Malgré leur sigle, par rapport aux catégories de microproduits que nous avons proposées, ils peuvent être classés parmi les micro composants ou les MEMS. Plusieurs produits sont regroupés sous ce sigle, dont les micro commutateurs (switch), capacités variables, résonateurs et systèmes d'identification par radiofréquences (RFID). Ils sont apparus au début des années 90 comme une alternative aux composants semi-conducteurs, car ils rendent possible l'accroissement des fréquences d'opération des composants tout en en réduisant les pertes [Yao00].

Afin d'illustrer cette famille de produits, prenons pour exemple les capacités variables, qui constituent une grande partie des composants MEMS-RF que l'on peut trouver dans la littérature. Cette famille est composée de capacités variables analogiques et digitales. Les capacités variables analogiques sont capables de fournir de manière continue toutes les valeurs comprises dans une plage de variation. Cette plage est déterminée par un gap d'air entre deux électrodes conductrices dans lequel se forme la capacité souhaitée. Cette capacité

devient variable par déplacement d'une électrode par rapport à l'autre. Il existe deux grandes technologies utilisées pour la réalisation de capacités variables analogiques.

- L'utilisation de micro poutre ou micro plaque se déplaçant par rapport à une électrode fixe. Le rapprochement de la poutre (ou de la plaque) au dessus de l'électrode entraîne une réduction du gap d'air entre les deux électrodes impliquant ainsi une augmentation de la capacité. La Figure 1.3 montre la vue de dessus d'une micro plaque suspendue au dessus du substrat par quatre micro poutres permettant l'obtention d'une capacité variable de 1 à 5 pF pour une fréquence de 1GHz [You96].

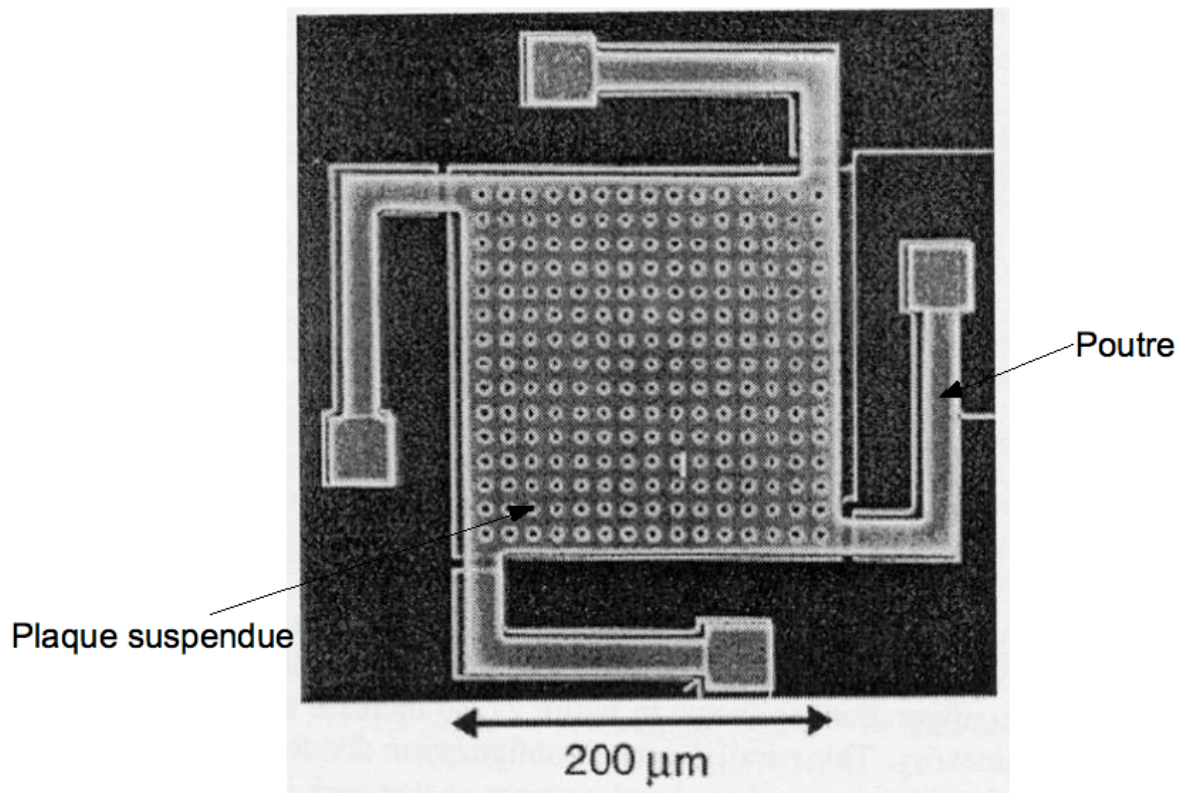


Figure 1.3 Capacité variable, micro plaque [You96]

- L'utilisation de réseaux de peignes interdigités, dont le mouvement latéral permet de faire varier la surface en regard entre les deux électrodes modifiant ainsi la capacité. La Figure 1.4 montre l'image MEB d'un réseau de peignes et un schéma de principe. Ce réseau est capable de fournir une variation de capacité de 2 à 30 pF à une fréquence de 500 Hz.

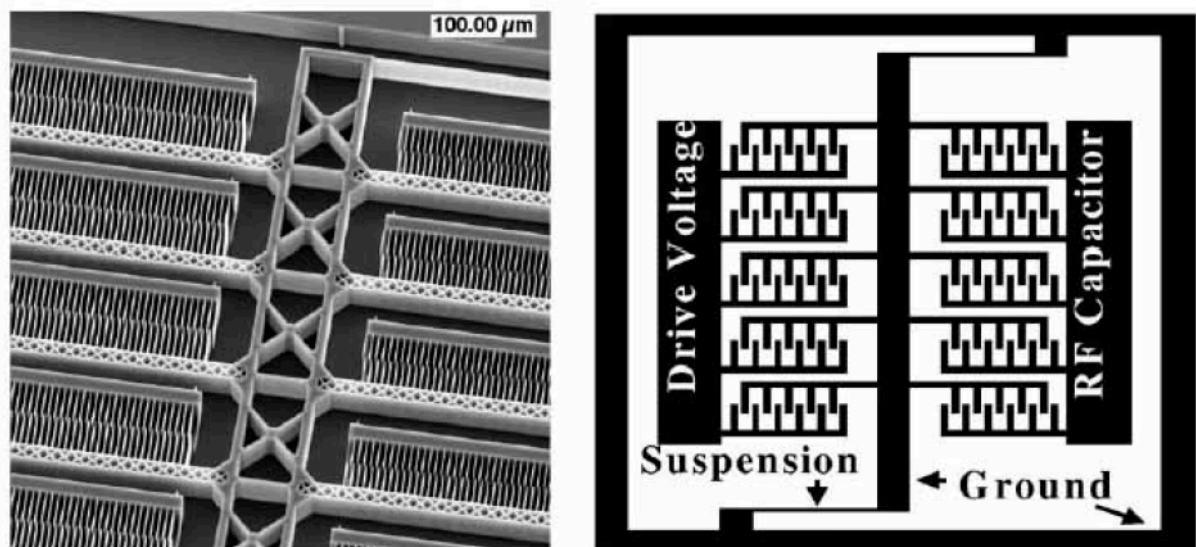


Figure 1.4 Réseau de peignes interdigués. Image MEB [Bor03] et schéma de principe

Le choix de l'une ou l'autre technologie dépend en partie des performances attendues, notamment en ce qui concerne la plage de variation de capacité et la fréquence de commutation souhaitée. En effet, l'utilisation de micro poutre ou micro plaques ne permet pas de mettre en vis à vis entre les électrodes une aussi grande surface que l'utilisation de réseau de peignes (quelques centaines de μm^2 contre quelques dizaines de mm^2). Les capacités de ce type sont donc plus faibles que celle des réseaux de peignes et présentent une plage de variation moins élevée. Cependant, les composants micro-poutre et micro-plaque peuvent être utilisés pour des applications hautes fréquences, alors que les réseaux de peignes se limitent souvent à des fréquences inférieures à 1GHz.

À la différence des capacités variables analogiques, les capacités variables numériques ne permettent pas l'obtention de valeurs continues dans une plage de variation déterminée. En effet, celles-ci sont généralement constituées d'un réseau de capacités commutées par des micros switches et la plage de variation dépend des valeurs des capacités du réseau et du nombre de combinaisons possibles. La variation se fait donc selon des valeurs discrètes. La Figure 1.5 montre une capacité variable digitale formée de 4 micro commutateurs, permettant ainsi 16 combinaisons de valeurs [Bra01].

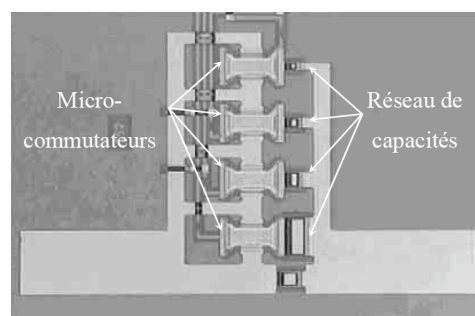


Figure 1.5 Capacité variable digitale [Bra01]

1.1.3.3 Systèmes microfluidiques

Les premières applications fluidiques des microsystèmes ont été la réalisation de buses pour les cartouches d'imprimantes à jet d'encre [Pel98]. Mais aujourd'hui, les applications sont également biologiques et médicales, car les microproduits permettent de travailler sur une très faible quantité de liquide sur un grand nombre d'échantillons. C'est le cas des micro laboratoires (lab on chip) [Let08] constitués de micro canaux, réservoirs, micro valves et micro pompes, comme le montre la Figure 1.6. Ces produits sont le plus souvent associés à des systèmes d'analyse des propriétés du fluide (mesure de température et de pression, par exemple) qui ne sont pas l'objet de notre étude.

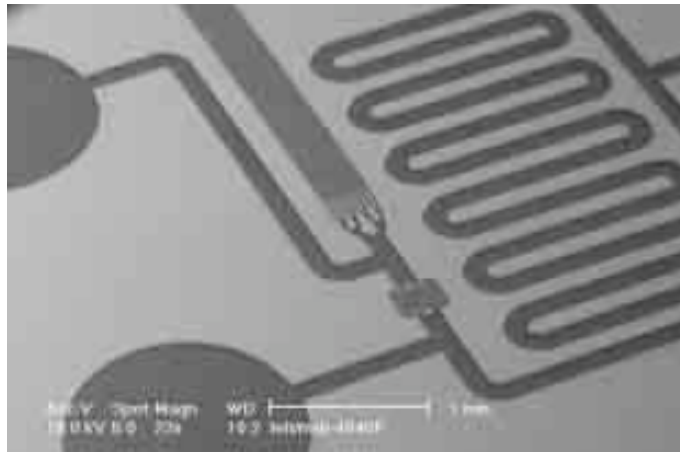


Figure 1.6 Micro laboratoire [Let08]

1.1.3.4 Les systèmes optiques

Actuellement, une des principales applications optiques des microproduits est la réalisation de micro miroirs, comme ceux qui sont présents dans la matrice DLP (Digital Light Processing) de Texas Instrument présentée Figure 1.7. L'objectif est de remplacer à terme les écrans de télévision et d'ordinateurs par un ensemble de micro-miroirs chacun associés à un pixel. Cette technologie est déjà présente dans certaines salles de cinéma où les projecteurs conventionnels sont remplacés par des projecteurs numériques utilisant un support d'information numérique au lieu de la pellicule.

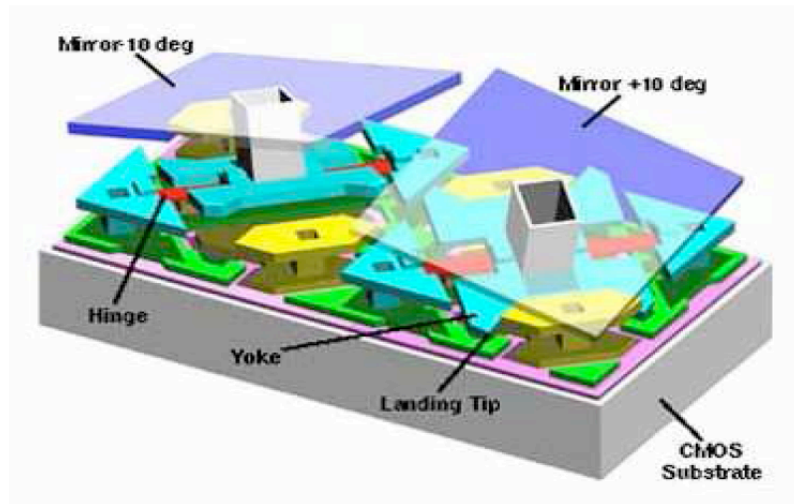


Figure 1.7 Schéma de la matrice DLP de Texas Instrument

Sur la Figure 1.8 représentant une image MEB d'un micro miroir nous pouvons distinguer trois principes physiques différents mis en œuvre sur un même substrat : l'optique (miroir réfléchissant le faisceau vers l'écran ou vers un puits de lumière), l'électrostatique (huit électrodes assurant le déplacement du miroir) et mécanique (les ressorts de rappel). Lors de la conception d'un tel produit, il sera nécessaire d'intégrer les expertises métier de chaque discipline et de favoriser la collaboration des différents acteurs afin d'obtenir un produit ayant le comportement attendu. De plus, le fait que l'ensemble du produit soit réalisé par les mêmes procédés de fabrication, sans opération d'assemblage (cf. 1.2.3) renforce la difficulté de gérer indépendamment chaque métier impliqué.

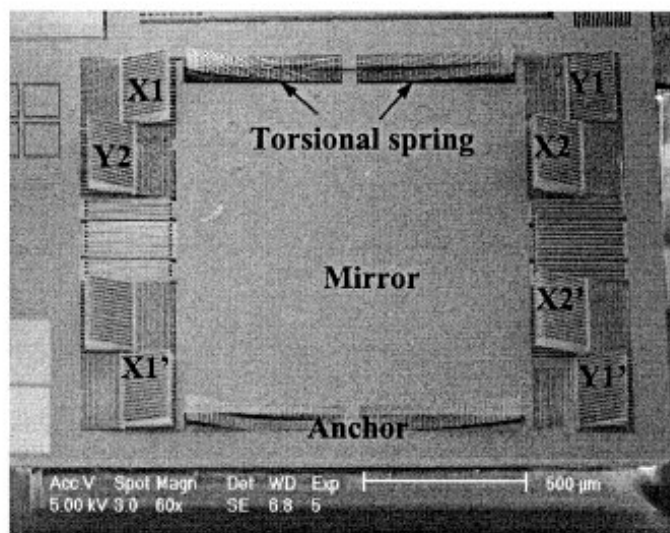


Figure 1.8 Image MEB d'un micro miroir

Dans cette partie, nous avons présenté les principales familles de microproduits afin de nous familiariser avec les fonctions assurées (capteur, actionnement d'un miroir...) et les

principes physiques mis en œuvres : fluide, optique, électrostatique, mécanique... Nous ferons référence à ces fonctions réalisées et aux principes physiques manipulés dans le chapitre 3, lors de la présentation des concepts et d'un modèle pour la conception de microproduits. La partie suivante présente les spécificités des microproduits pour nous permettre ensuite de les intégrer au mieux lors du processus de conception.

1.2 Les spécificités des microproduits

Les microproduits s'inscrivent dans une échelle allant de l'ordre du micron à quelques millimètres. Ces dimensions sont soit les dimensions globales du système, soit les dimensions caractéristiques des éléments dans un produit plus grand. Par exemple, l'épaisseur d'une poutre (quelques μm) dans un accéléromètre de quelques centaines de μm . Cette taille des produits entraîne certaines spécificités à prendre en compte lors du processus de conception.

1.2.1 Les effets d'échelle

Les effets d'échelle résultent de la modification de l'influence et de la hiérarchie des principes physiques mis en œuvre, conséquence directe de la taille des produits. Par exemple, lorsque les forces d'adhésions deviennent supérieures à la gravité, ce qui permet (en partie) aux mouches de marcher au plafond, grâce à la forme pointue de leurs pattes. À cette échelle, deux sphères de diamètre équivalent ont des forces d'attraction supérieures à la gravité terrestre [Wau01]. Ces effets d'échelle entraînent une modification du comportement des matériaux par rapport à ceux rencontrés en "macro" conception. Par exemple, en dessous de $300\mu\text{m}$, l'écoulement d'un fluide est toujours laminaire [Col04]. Cela signifie que si deux fluides doivent être mélangés, il faut mettre en place des solutions techniques pour créer un "micro mixage" [Che05]. Certaines de ces solutions sont dites actives, par exemple l'application de forces electro-hydrodynamiques (EHD) pour mélanger des fluides ayant des propriétés électriques différentes [Yaz07]. D'autres sont dites passives, comme la modification de la géométrie afin de favoriser la création de turbulences pour mélanger deux fluides [Gou06].

Ces effets d'échelle impliquent une remise en cause de certaines hypothèses formulées en "macro" conception et par conséquent de certains modèles numériques. Si une simulation de mixage de fluide à l'échelle des microproduits est réalisée en utilisant les outils numériques utilisés dans le monde "macro", des turbulences risquent d'apparaître alors qu'aucune solution technique particulière n'a été mise en place pour les créer. Les hypothèses faites n'étant plus valides à l'échelle des microproduits et les phénomènes physiques les plus influents n'étant plus les mêmes, la solution simulée est alors loin de la solution réelle et le bon fonctionnement du produit est alors compromis. Il y a donc une réelle nécessité d'intégrer les expertises métier lors de la conception de microproduits, particulièrement celles qui sont liées

aux principes physiques mis en œuvre à ces échelles. Cette intégration permet notamment de développer des modèles numériques fiables utilisés lors des simulations de comportement des microproduits [Jin06].

1.2.2 Les couplages multi physiques

Les couplages multi physiques sont une autre conséquence de la taille des produits. À cause des effets d'échelle, certaines forces habituellement négligées doivent être prises en compte. Ainsi, les phénomènes physiques mis en œuvre dans les MEMS ne sont pas indépendants et interagissent les uns sur les autres. Un exemple classique est le couplage électromécanique, que nous avons déjà évoqué lors de la présentation du principe de fonctionnement d'un accéléromètre capacitif, voir Figure 1.1. La modification de la capacité entre les deux électrodes suite au déplacement de l'électrode mobile par rapport à l'électrode fixe, résultant de l'accélération mesurée, nécessite la mise en œuvre de deux principes physiques dépendants : la mécanique et l'électrostatique. Nous reviendrons dans le détail sur ce type de couplage et la manière dont il doit être pris en compte au cours du processus de conception dans le chapitre 3. Ce que nous voulons souligner ici, c'est que les couplages sont désirés pour le bon fonctionnement des microproduits : dans le cas de l'accéléromètre, le couplage électromécanique est nécessaire pour détecter l'accélération, mais c'est un phénomène complexe dont la maîtrise est difficile et l'on obtient souvent le résultat souhaité après réalisation d'une série de prototypes.

Comme pour les effets d'échelle, les couplages ne sont aujourd'hui pris en compte que lors des simulations, en utilisant des modèles numériques adaptés. Le principal problème actuellement est que ces modèles numériques, lorsqu'ils existent, ne sont pas toujours suffisamment fiables et robustes pour simuler parfaitement ces phénomènes complexes. Cumulées à d'autres erreurs liées à ces échelles, comme des incertitudes sur les propriétés physiques des matériaux utilisés ou les tolérances des produits obtenus, ces erreurs, non prises en compte dans les modèles de comportement du produit, perturbent fortement les résultats de simulation et en réduisent l'intérêt. Comme pour la prise en compte des effets d'échelle, de nombreux travaux de recherche sont en cours pour travailler à l'augmentation de la fiabilité des modèles numériques utilisés, que ce soit pour simuler le comportement du produit [Yua05] ou son procédé de fabrication. Il faut alors permettre l'échange d'informations entre les différents spécialistes des phénomènes physiques mis en œuvre et les technologues afin de créer des modèles plus robustes, qui devront être mis à la disposition des concepteurs lors des conceptions ultérieures.

1.2.3 La fabrication des microproduits

La fabrication des microproduits s'effectue aujourd'hui par deux grandes familles de procédés : les techniques dérivées de l'industrie du silicium (VLSI¹), utilisées pour fabriquer en grande partie les MEMS et micros composants, et la miniaturisation des procédés mécaniques classiques, utilisés majoritairement pour la fabrication des micros pièces mécaniques.

1.2.3.1 Techniques VLSI¹

Par "technique VLSI", nous désignons l'ensemble des techniques utilisées historiquement pour la réalisation de circuits intégrés sur silicium, qui ont été adaptés depuis pour la fabrication des microproduits, en particulier les micros composants et les MEMS. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles ces techniques ont été adaptées pour la fabrication de microproduits. D'abord, la réalisation de l'électronique de commande à l'aide de ces technologies est bien connue des électroniciens, car les circuits intégrés sont fabriqués avec ces techniques depuis de nombreuses années (la première production en série d'un circuit intégré date de 1954). Ensuite, les propriétés mécaniques du silicium sont suffisantes pour la réalisation de parties mobiles, déformables ou non [Pet82]. Enfin, il est possible de réaliser simultanément l'ensemble du produit en utilisant une combinaison de ces techniques. Les procédés VLSI furent pendant longtemps la seule manière de réaliser des microproduits et les produits fabriqués à base de silicium sont toujours prédominants sur le marché.

Ces techniques peuvent être regroupées en quatre catégories :

- Techniques additives, qui consistent à déposer de fines couches de matériaux, d'épaisseur pouvant aller de quelques nanomètres à une centaine de microns, sur un substrat de silicium, le wafer. Ce film peut ensuite être gravé localement grâce aux procédés de lithographie et de gravures. Les matériaux déposés peuvent l'être de deux manières : soit par réaction chimique, soit par réaction physique.
- Techniques sélectives, qui permettent de sélectionner certaines parties du wafer pour y appliquer des opérations additives ou soustractives.
- Techniques soustractives (gravure) qui peuvent être réparties en quatre catégories : gravure humide ou sèche, l'une et l'autre pouvant être isotrope ou anisotrope.
- Techniques de polissage, ou planarisation mécano chimique (CMP), qui permettent d'aplanir une couche déposée. En effet, sans cela, une couche déposée au cours du process de fabrication suit la topologie des couches sous-jacentes et en cas de nombre

¹ Very Large Scale Integration

important de dépôts, il y a formation d'un relief important (voir Figure 1.9 & Figure 1.10)

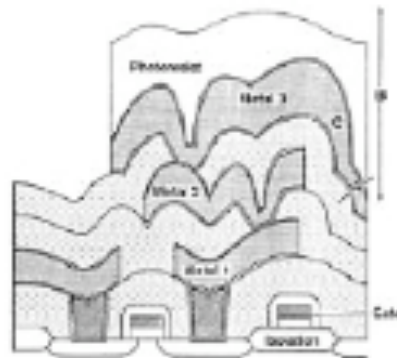


Figure 1.9 Schéma de dépôts successifs de couches sans polissage

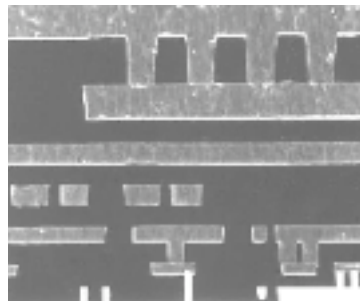


Figure 1.10 Image MEB de dépôts successifs de couches avec polissage

Il faut ensuite combiner chacune de ces techniques pour construire la gamme de fabrication du produit. Exemple, une gamme constituée de 4 étapes de fabrication, schématisée Figure 1.11

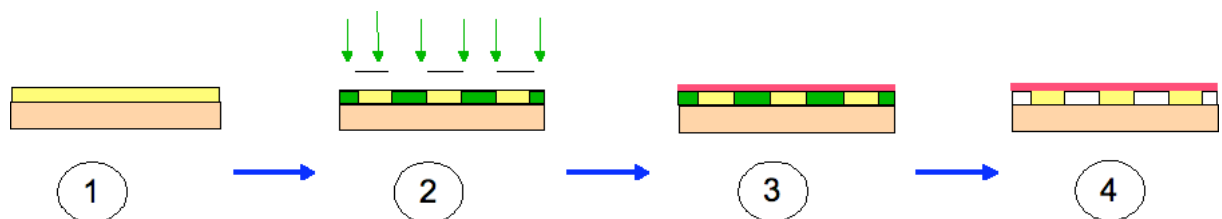


Figure 1.11 Schéma d'une gamme de fabrication VLSI

- L'étape 1 consiste à déposer une couche de résine photosensible sur le substrat
- L'étape 2 consiste à venir sélectionner la zone qui sera ensuite gravée localement. Pour cela une partie seulement de la résine est exposée, grâce à l'utilisation un masque.
- L'étape 3 consiste à venir déposer la couche de matériau, future structure suspendue
- L'étape 4 consiste à enlever la couche de résine pour libérer la structure suspendue

La fabrication du produit se fait donc en 2D ½ par l'organisation d'étapes élémentaires au sein d'une gamme de fabrication. Pour cela il est nécessaire de pouvoir identifier et extraire les capacités de chacune des techniques mises en œuvre au cours de la séquence afin d'identifier la manière dont le choix des procédés influe sur la forme et la qualité des surfaces fabriquées. Sans être exhaustif, nous avons montré [Mus07] qu'il était possible d'extraire des informations sur les capacités des procédés et de les mettre à disposition des acteurs du processus de conception, puisque le choix des procédés influe directement sur :

- La qualité (épaisseur et uniformité) des matériaux déposés sur le wafer. Par exemple certains procédés de déposition chimiques mal maîtrisés provoquent l'apparition de pelures, ou *hillocks*. De même, le procédé de dépôt par centrifugation, fréquemment utilisé pour le dépôt des résines photosensibles n'offre une planéité de dépôts que de $\pm 10\%$ sur l'ensemble de la surface du substrat.
- La forme des parties gravées (parois verticales ou formes rondes, ratio profondeur/largeur). Exemple, Figure 1.12.a, les parois gravées par un procédé de gravure en phase aqueuse ne sont pas verticales mais suivent les plans cristallins du substrat, alors que Figure 1.12.b, les parois gravées en phase sèche sont verticales et offrent un ratio profondeur/largeur des motifs beaucoup plus élevé.
- La formation de produits parasites. La Figure 1.12.c, montre la formation "d'herbe" conséquence d'une mauvaise maîtrise du procédé de déposition par réaction chimique
- ...

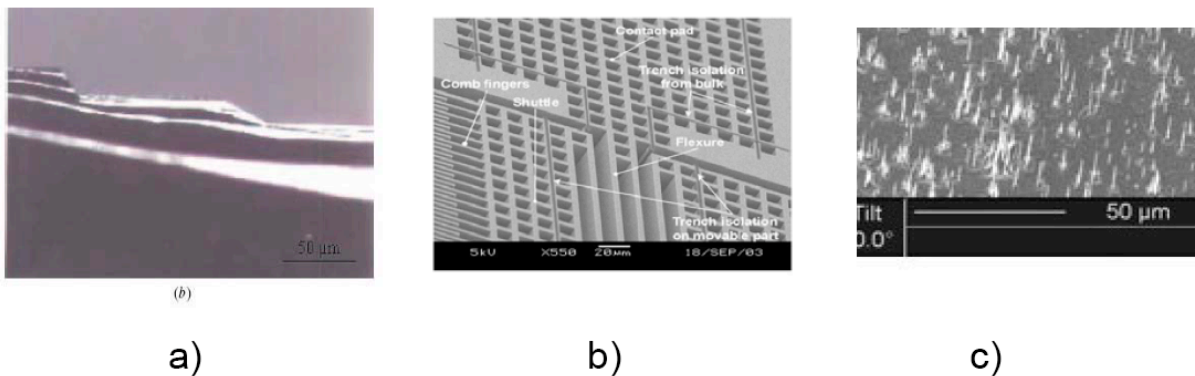


Figure 1.12 Gravure du produit en phase aqueuse a), en phase sèche b), et formation de produits parasites c)

Nous verrons dans le chapitre 3 que la capacité des procédés peut avoir une grande influence sur le comportement du produit final; il est donc nécessaire de mettre à disposition de l'équipe de conception l'ensemble des informations relatives aux capacités des procédés de fabrication. Nous montrons un exemple de la prise en compte des capacités des procédés de fabrication VLSI au cours de la conception d'un MEMS switch RF, dans le chapitre 4.

Ces procédés sont de plus en constante évolution : il y a également une nécessité de maintenir à jour ces informations, afin d'éviter le risque que les concepteurs se basent sur des procédés obsolètes.

1.2.3.2 Miniaturisation des procédés mécaniques classiques

Les techniques VLSI, qui dominent la fabrication des microproduits depuis plus de vingt ans, permettent de fabriquer des produits à base de silicium. Cependant il y a eu récemment l'émergence d'une demande pour des microproduits composés d'autres matériaux [Dim05]. Certains procédés de fabrication conventionnels comme le tournage ou le fraisage ont été miniaturisés pour pouvoir réaliser des formes à l'échelle des microproduits [Uri04]. Mais pour pouvoir être compétitif face aux techniques de production traditionnelles, il faut mettre en place des méthodes de fabrication capables de produire une grande diversité de produits à un coût raisonnable. Il paraît alors évident de s'intéresser à la miniaturisation des procédés de répllication utilisés dans le monde macroscopique, comme l'injection plastique ou l'emboutissage. La Figure 1.13 montre l'exemple d'une matrice réalisée pour l'emboutissage à chaud de microproduits [Jun07]. Nous reviendrons dans le détail sur la miniaturisation de procédés mécaniques dans le chapitre 3, lorsque nous évoquerons le concept de fabricabilité, puis dans le chapitre 4 en traitant la conception d'un système microfluidique.



Figure 1.13 Matrice d'emboutissage [Jun07]

La fabrication du produit, que ce soit par les techniques VLSI ou la miniaturisation de procédés existants est donc à intégrer dans le processus de conception, de manière à concevoir

des produits fabricables à moindre coût. Ce concept de fabricabilité est présenté dans le chapitre 3.

1.3 La conception des microproduits

Pour cette partie, nous nous sommes grandement inspirés des résultats des travaux menés par Arnaud De Grave dans sa thèse de doctorat portant sur la conception intégrée des MEMS [Dgr04]. Aujourd'hui, ce type de microproduit est en très grande majorité fabriqué par des techniques VLSI. Voilà pourquoi, lorsqu'il est question de la fabrication du produit dans cette partie, ce sont majoritairement les procédés issus de l'industrie du silicium qui sont évoqués.

1.3.1 Les acteurs de la conception de microproduits

Dans sa thèse [Dgr04], Arnaud De Grave a caractérisé l'équipe de conception d'un microproduit et plus particulièrement d'un micro composant ou d'un MEMS, dans un contexte industriel donné. Cette équipe, qui doit travailler selon les principes de co-conception de l'ingénierie concurrente, est composée de trois spécialistes :

- Le concepteur MEMS. Il est responsable du concept général du produit ainsi que de sa géométrie. Il choisit le principe de fonctionnement de l'application, conçoit le produit dans toutes ses dimensions et réalise la version du dossier de masque qui est fournie à l'équipe de dessin.
- Le spécialiste du design électronique VLSI. Dans le cadre d'un MEMS autonome ce spécialiste, concepteur de la partie électronique du produit, prend part entièrement à la conception du système global. Dans le cadre d'un micro composant, il est plutôt considéré comme client
- L'équipe du packaging, qui joue un rôle essentiel pour la bonne commercialisation des produits en exerçant cependant moins d'influence lors du processus de conception.

Cette équipe de conception doit travailler en collaboration avec d'autres acteurs, comme le montre la Figure 1.14. Ces acteurs sont :

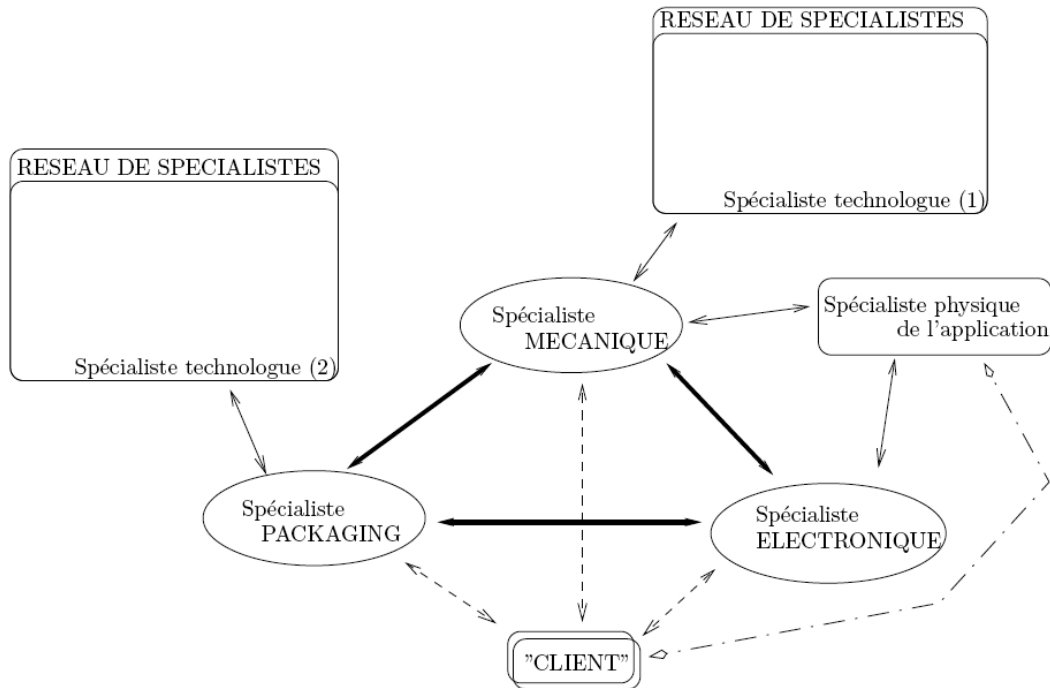


Figure 1.14 L'équipe de conception d'un microproduit [Dgr04]

- L'équipe de spécialistes de la physique de l'application. Ce sont les spécialistes des principes physiques qui sont mis en œuvre selon l'application (radio fréquences, biologie, optique, fluide...) Leur rôle est essentiel car il est impossible pour le concepteur de microproduits de connaître certains paramètres très spécifiques.
- L'équipe de fabrication.
- Le client, instigateur de la première version du cahier des charges fonctionnel.

Cette description de l'équipe de conception, non exhaustive et dépendante des microproduits développés, permet une meilleure compréhension du processus, que nous décrivons en suivant.

1.3.2 Un processus de conception de microproduits

Arnaud De Grave [Dgr04] a également proposé un processus de conception de microproduit, dont la représentation est basée sur une approche "top-down" du type de celle de Pah & Beitz [Pah96]. Cette représentation (Figure 1.15) comporte cinq étapes placées de façon linéaire avec un décrochement marquant un passage pour l'étape de caractérisation/test. En effet, cette étape agit comme un distributeur d'informations une fois le prototype obtenu. C'est à partir de ces informations que les acteurs du processus de conception décident de

continuer sur cette géométrie en améliorant tel ou tel point ou bien de partir dans une autre gamme de solutions.

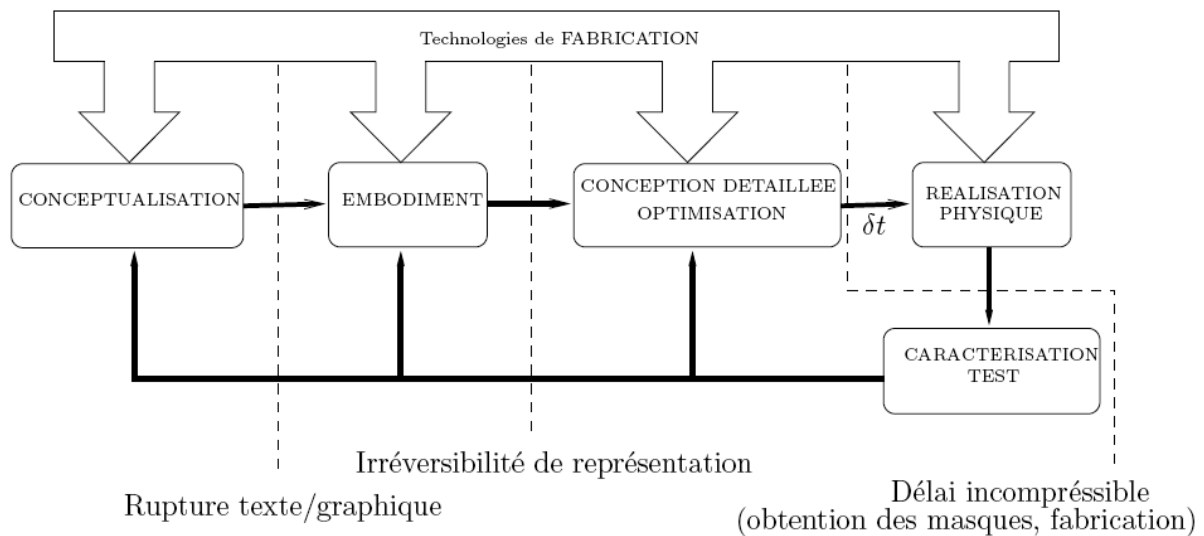


Figure 1.15 Une modélisation du processus de conception, avec un aspect temporel marqué [Dgr04]

La phase de conceptualisation, dans laquelle s'effectue un travail de clarification de la première version du cahier des charges et de recherche d'idées, de solutions et de principes, est extrêmement informelle et le domaine des microproduits dans lequel nous nous plaçons n'a que peu d'influence sur les méthodes.

La phase d'embodiment a pour objectif implicite d'aboutir à une première représentation du produit principalement à des fins de négociation et de communication avec les autres acteurs du processus de développement du produit. Une fois cette géométrie produite les modifications ne seront plus que minimales. Lors de cette phase, le concepteur doit agir sur trois fronts en concomitance : la géométrie planaire, les étapes de fabrication représentant la demi-dimension restante et les matériaux principaux, ceux qui jouent une part importante dans les fonctionnalités et dans les contraintes de fabrication.

La phase de conception détaillée et d'optimisation consiste à s'assurer que le produit, avec les choix faits dans les étapes précédentes, peut être réalisé et répondre aux spécifications. Tous les détails des éléments du produit sont complétés : géométrie exacte, choix des matériaux... C'est lors de cette étape que sont effectuées les simulations par éléments finis, puis la réalisation et l'envoi des documents nécessaires à la réalisation du produit.

La Figure 1.15 montre aussi trois irréversibilités qui apparaissent dans le processus de conception. La première survient avec l'apparition d'une représentation graphique marquant un saut dans le processus de conception, ce qui est classique et non spécifique aux microproduits. La seconde intervient après la phase d'embodiment, lorsque la première

géométrie du produit est déterminée et mise sous un format spécifique aux outils d'optimisation. Cette géométrie devient alors bornée à de petites modifications. Cette irréversibilité agit "dans les deux sens", c'est-à-dire qu'après la phase de caractérisation, un retour vers la phase d'embodiment (et plus encore vers la phase de conceptualisation) est beaucoup plus difficile qu'un retour vers la phase de conception détaillée. La troisième irréversibilité provient du délai incompressible δt , qui apparaît une fois que le dossier de masque est envoyé à l'équipe de dessin et lorsque les lots sont lancés dans la chaîne de production : le projet se trouve en attente pendant ce délai.

Nous proposons dans la partie suivante d'analyser les principaux outils d'aide à la conception de microproduits afin de voir comment ils assistent les concepteurs au cours des différentes étapes du processus de conception modélisé précédemment.

1.3.3 Les outils d'aide à la conception de microproduits

Il existe de nombreux outils utilisés par les concepteurs de microproduits. Les outils d'aide à la génération de concept, utilisés pendant la phase de conceptualisation, sont identiques à ceux utilisés dans la conception mécanique et électronique, avec toutes les difficultés rencontrées dans ces deux domaines : travail sur la conception d'un nouveau produit, choix et comparaisons effectués a priori, difficulté de produire une conception originale, etc. Il existe aussi des outils de simulation FEM ou analytique du comportement du produit et des outils de simulation de processus de fabrication. Ces outils sont utilisés tardivement dans le processus de conception, lors de la phase de conception détaillée, et supportent plus ou moins bien les spécificités des microproduits, notamment en raison de la fiabilité des modèles numériques utilisés, voir partie 1.2. Nous proposons dans cette partie de ne présenter que des outils utilisés lors de la totalité du processus : les outils intégrés spécifiques, qui permettent de concevoir le produit totalement et les bases de données partagées, qui fournissent des informations sur les technologies de fabrication utiles tout au long du processus de conception.

1.3.3.1 Outils intégrés spécifiques

Ces outils sont des environnements CAO dédiés aux microproduits, permettant de concevoir le système complètement, intégrant des simulations de comportements et de fabrication. Lorsque les produits sont ensuite fabriqués par des techniques VLSI, ces logiciels permettent d'obtenir des dessins de masques de lithographie et le détail de la gamme de fabrication. De nombreux logiciels existent, nous avons choisi de prendre pour exemple le logiciel COVENTORWARE©, car c'est le seul à se revendiquer explicitement comme appliquant une méthode DFM aux microproduits.

La méthode DFM (Design For Manufacture) est une méthode de conception qui préconise de prendre en compte les contraintes de fabrication au plus tôt lors du processus de conception d'un produit afin d'en garantir la fabricabilité et d'en réduire les coûts de production [Kuo01]. Ces méthodes sont utilisées depuis la fin des années 80 pour la conception des "macro" produits, par exemple en intégrant des contraintes liées à l'usinage [Boo89] ou au moulage par injection [Dew87]. Depuis quelques années, [Sch04] propose une adaptation de cette méthode aux microproduits. Il considère que le processus de conception se compose de quatre étapes, dont certaines permettent le chevauchement des activités de conception et de fabrication. Bien qu'une partie du vocabulaire soit semblable, ces étapes sont différentes de celles décrites dans le processus de conception top-down de Pahl & Beitz [Pah96] et dans le processus de conception modélisé dans la partie précédente. Nous présentons brièvement ces étapes et la manière dont elles sont intégrées dans le logiciel associé.

- **Technical Specification Development.** C'est lors de cette phase que l'on identifie le besoin du client, qui est ensuite retranscrit dans un cahier des charges. Dans la théorie, il est important que ce document maintienne les besoins originaux du client et ne soit pas influencé par tel ou tel moyen de fabrication, ou par les affinités des équipes de conception avec tel ou tel procédé. C'est également dans cette phase que le cahier des charges est transformé en spécifications techniques, point de départ de l'étape suivante.
- **Conceptual Design Phase.** Lors de la conception d'un nouveau produit, il est essentiel de pouvoir évaluer et développer simultanément plusieurs concepts, plusieurs manières de réaliser le produit. Cela sous-entend de pouvoir créer et évaluer ces concepts rapidement afin de déterminer lesquels sont les plus viables. Une manière d'y arriver, pour la conception de microproduits, est de créer puis d'utiliser des bibliothèques de composants standards paramétrés que les concepteurs peuvent assembler entre eux, pièce par pièce afin de concevoir une structure plus complexe. Certaines bibliothèques de composants sont fournies dans le logiciel et permettent par exemple des simulations de comportement électromécanique, optique, fluide... En fait, chaque composant est le modèle d'un élément réel et représente son comportement sous forme de variables utilisables par le concepteur. Après assemblage de ces composants entre eux, un modèle schématique (plus complexe) du produit est obtenu et il est possible d'avoir une caractérisation rapide et précise de son comportement. Cela permet de concevoir sous contraintes en définissant, par exemple, les paramètres comme l'épaisseur du substrat ou le gradient de contrainte maximum admissible tout en tenant compte des caractéristiques des procédés existants. Illustration de cette phase dans le logiciel, avec la création d'un modèle de condensateur à capacité variable, construit à partir d'éléments paramétrés (16 poutres et deux plaques), voir Figure 1.16. Ce modèle permet l'obtention rapide de données sur le comportement du produit conçu, comme sa

première fréquence de résonance, ou la valeur de la tension d'entrée (tension qui permet le plaquage de la plaque fixe sur la plaque mobile).

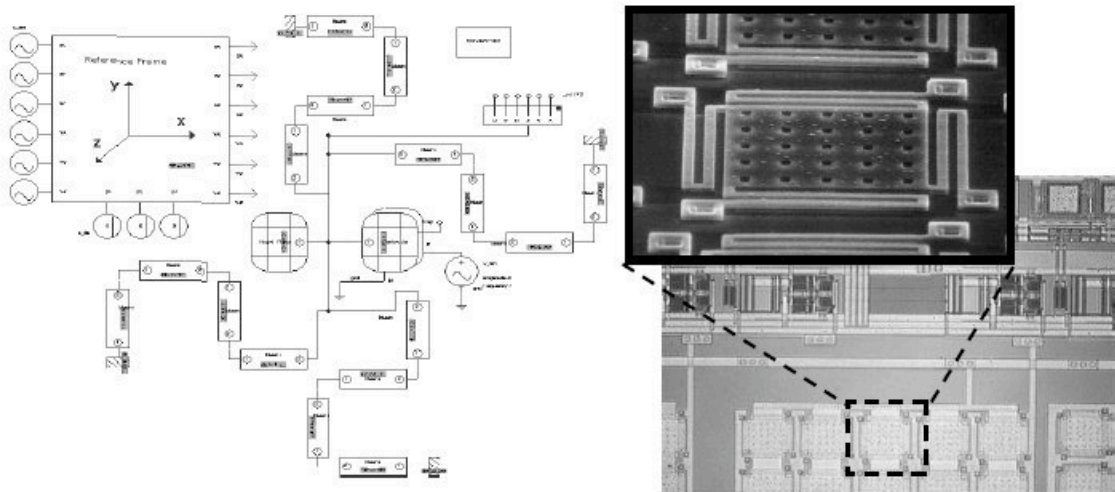


Figure 1.16 Modèle paramétré d'un condensateur à capacité variable (gauche) et image MEB du produit fini (droite) [Sch04]

- **Detailed Design Phase.** C'est lors de cette phase que les concepteurs peuvent procéder à une analyse plus détaillée en simulant tout ou partie du modèle schématique afin d'obtenir un comportement plus précis du produit ou d'étudier des effets qui ne pouvaient être obtenus au niveau schématique de conception précédent. C'est également lors de cette phase que sont simulés les effets couplés des phénomènes physiques pour optimiser et garantir le fonctionnement du produit conçu. Enfin, la fabrication virtuelle du produit est aussi simulée plus finement, afin d'optimiser les tolérances de fabrication en fonction des procédés retenus. Illustration de cette phase dans le logiciel : la phase précédente a permis de donner l'information d'une tension d'entrée située autour de 7V. Lors de cette phase, les concepteurs combinent des informations issues de la caractérisation des capacités des procédés de fabrication retenus et des matériaux utilisés avec une analyse de Monte Carlo pour caractériser la distribution des tensions d'entrée sur un certain nombre de produits. Cela permet d'obtenir avec précision l'influence des procédés de fabrication sur la valeur de la tension d'entrée.
- **Manufacturing Phase.** Le but de cette phase est de fournir aux concepteurs, notamment lors des deux phases précédentes, des informations sur les procédés de fabrication et les matériaux utilisés. Lors de cette étape, des campagnes d'essais sont menées pour déterminer l'aptitude des procédés à réaliser telles ou telles morphologies (parois verticales ou non, rugosité minimale, épaisseur de couche minimale déposée,

etc.) La Figure 1.17 montre un exemple de géométries testées sur une matrice lors des campagnes d'essais.

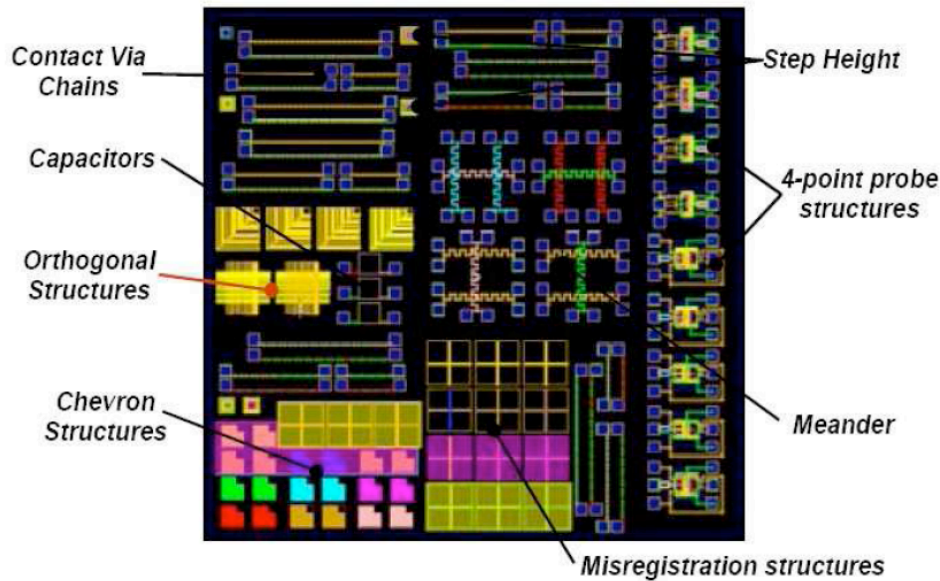


Figure 1.17 Matrice utilisée lors des campagnes d'essais [Sch04]

1.3.3.2 L'utilisation de bases de données partagées sur internet

Certains sites comme [Exc08] mettent à la disposition des concepteurs un catalogue de procédés de fabrication avec des informations précises sur leurs capacités, telle l'épaisseur minimum d'une couche déposée ou la profondeur maximale de matière pouvant être gravée. Il est alors possible de construire une gamme de fabrication en utilisant ces informations et de la soumettre ensuite à une équipe d'experts. Si la gamme est validée, le produit peut ensuite être fabriqué avec les procédés sélectionnés. La soumission de la gamme se fait donc une fois que le produit est déjà conçu. Le point fort de cet outil reste cependant la grande facilité de le maintenir à jour, en fonction des nouveaux procédés de fabrication ou de l'évolution des procédés existants.

1.3.4 Les manques et les limites dans les outils existants

Une des principales limites dans les outils existants est la façon dont ces outils gèrent les spécificités des microproduits au cours du processus de conception. Il n'existe pas d'outil d'aide à la génération de concept dédiés aux microproduits : ceux qui sont utilisés lors de la phase de conceptualisation sont identiques à ceux utilisés en conception mécanique ou électronique, avec leurs propres limites. Les outils de simulation utilisés lors de la phase d'optimisation intègrent les spécificités des microproduits à travers l'utilisation de modèles représentant le comportement du produit avec plus ou moins de fiabilité, notamment à cause de la taille des produits, des effets d'échelles et des couplages multi physiques, comme nous

l'avons souligné dans la partie 1.2. Les outils dédiés à la conception de microproduits, que nous avons évoqués dans le paragraphe précédent, n'intègrent pas eux non plus convenablement les spécificités de ces produits. La fabrication est intégrée dans l'outil informatique dédiés aux microproduits, dans les phases de *conceptual design* et *detailed design*, grâce aux informations sur la capacité des procédés de fabrication obtenues lors de la phase *manufacturing*. Mais dans la phase de *conceptual design*, les concepteurs font l'hypothèse que la fabricabilité garantie de chaque élément paramétré implique la fabricabilité de l'ensemble du produit, ce qui est loin d'être démontré. Dans la phase de *detailed design*, les concepteurs simulent la fabricabilité et le comportement du produit avec des modèles qui, dans ce cas encore, ne sont pas toujours fiables.

L'autre grande limite dans les outils existants est le moment au cours duquel sont gérées les spécificités lors de la conception. En effet, les simulations de comportement et de fabricabilité s'effectuent après la phase d'embodiment, lors de la phase de conception détaillée et de l'optimisation du produit. Or pendant ces deux phases, la géométrie du produit n'évolue que très peu. Les spécificités que nous avons évoquées sont donc prises en compte une fois la géométrie du produit pratiquement figée, c'est-à-dire lorsque les retours vers les phases précédentes sont difficiles à effectuer, comme nous l'évoquions dans la partie 1.3.2. Il y a donc un manque d'outils pour assister les concepteurs et permettre une bonne communication entre les différents experts.

1.4 Conclusion

Après avoir rappelé les caractéristiques des différentes catégories de microproduits nous avons présenté, dans ce chapitre, les spécificités de ces produits liées aux effets d'échelle, couplages multiphysiques et procédés de fabrication. Nous avons également souligné que la prise en compte de ces spécificités dans les outils existants pouvait être améliorée. Permettre aux différents acteurs d'un processus de conception de microproduits de travailler selon les principes de la conception intégrée entraîne une meilleure gestion des différents principes physiques couplés et des contraintes liées aux procédés de fabrication. Nous proposons d'orienter notre travail sur l'étude d'un modèle permettant de supporter les échanges d'expertises entre différents acteurs, dans ce contexte de conception. La question que nous nous posons maintenant est : les concepts et outils développés autour de la conception intégrée de produits et/ou systèmes mécaniques peuvent-ils supporter les spécificités des microproduits au cours de leur conception ?

Chapitre 2

Des modèles pour supporter l'activité de conception

2.1 Introduction

Nous avons montré dans le chapitre précédent que la conception de microproduits nécessite la collaboration de différents acteurs tout au long du processus de conception, collaboration permettant à chacun d'exprimer ses propres contraintes contribuant à l'émergence du produit. Arnaud De Grave [Dgr04] a montré dans ses travaux de thèse l'intérêt pour l'équipe de conception de travailler selon les principes de la conception intégrée [Tic94], [Bri98]. Nous proposons donc d'analyser certains concepts et outils développés dans ce contexte de conception afin d'étudier en particulier leur aptitude à supporter les spécificités des microproduits au cours de leur conception. Parmi les concepts développés, celui de modèle-produit nous semble particulièrement intéressant. Dans une première partie nous présentons ce concept et les éléments de base qu'il manipule. Puis nous nous intéresserons aux outils développés notamment au sein de l'équipe Conception Intégrée de l'ancien laboratoire 3S, devenu G-SCOP, en particulier les modèles produits utilisés dans le modèleur CoDeMo et le projet IPPOP. Ensuite nous présenterons comment ces concepts ont été utilisés au sein du laboratoire LASMIS afin de proposer un outil permettant une conception au juste besoin de microproduits.

2.2 Le concept de modèle-produit

La modélisation de produit est une approche qui vise à structurer les connaissances et les informations reliées au produit. Dans l'un des premiers articles présentant ce concept, [Kra93] donne comme objectif au modèle-produit de rendre possible le partage d'informations autres que purement géométriques. Cette notion a fait l'objet de nombreuses études au sein du pôle Conception Intégrée de l'ancien laboratoire 3S, désormais intégré au laboratoire G-SCOP où ces travaux de thèse sont menés. Ainsi, d'après [Tic97], [Bri01], le modèle produit est défini comme "une structure multi-vues dépendant des activités de conception et des différents métiers intervenant sur le produit durant son cycle de vie". Suite à l'étude de nombreux modèles existants, [Bet06] propose une liste d'éléments de base, aussi appelés concepts pivots, d'un modèle-produit pour la conception collaborative. Il s'agit des concepts de fonction, structure et comportement, qui représentent le noyau de la plupart des modèles-produits de la littérature.

2.2.1 Les fonctions

La norme EN 1325 donne une définition normalisée de la notion de fonction : il s'agit de "l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants". Deux types de fonctions sont distinguées :

- Les fonctions de service, c'est à dire "les actions demandées à un produit ou réalisées par lui, afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur". Elles peuvent être exprimées indépendamment du choix de solutions techniques.
- Les fonctions techniques, c'est à dire "les actions d'un constituant ou actions intervenant entre les constituants du produit afin d'assurer les fonctions de service". Elles sont induites par les principes de solution adoptés pour réaliser le produit et ne sont pas explicitement demandées par les utilisateurs du produit.

La décomposition fonctionnelle d'un produit n'est pas unique : pour le même système physique, il est possible d'exprimer ses fonctions de différentes manières et plusieurs solutions techniques peuvent être apportées à une même fonction. Il est également possible d'associer aux fonctions des attributs de performance servant à évaluer le taux de réalisation de la fonction [Sch00]. Cette performance étant caractérisée par : les niveaux d'appréciation, les limites d'acceptation de ces niveaux et leur flexibilité.

2.2.2 Les composants, ou structures

Un composant est un élément du domaine physique et a pour but de satisfaire une fonction particulière. [Cha94] définit la structure d'un produit comme étant la spécification de l'ensemble des composants qui constituent le produit et les relations entre les composants. La signification d'un composant dépend du niveau hiérarchique auquel il appartient. Au plus bas niveau, il devient un composant physique avec des spécifications précises de géométrie, de matériau et de tolérance [Hin99]. À un niveau élevé, il n'est pas nécessairement physique et représente un principe de solution et/ou un concept général. En effet, bien qu'un composant soit défini comme un élément du domaine physique, ce terme n'implique pas qu'il soit une pièce ou un assemblage d'un produit physique [Alb92].

Les composants sont organisés entre eux dans des relations structurelles spécifiques pour établir le produit. Pour cela ils disposent de connexion d'entrée et de sortie pour créer ces relations.

2.2.3 Les comportements

Contrairement aux concepts de fonctions et composants, que l'on trouve de manière récurrente dans la littérature, la notion de comportement reste ambiguë et diffère selon les

modèles. Dans le modèle FBS, [Ger90] définit le comportement d'un produit comme étant le pont entre sa structure et sa fonction. Dans ce sens, la fonction est formulée comme la relation entre le besoin exprimé par l'utilisateur et le comportement du produit. D'autres points de vue sont aussi adoptés pour caractériser les comportements. [Qia96] dénombre trois types de comportements : spatial (comportement des objets dans l'espace), temporel (comportement dans le temps) et esthétique (aspect visuel, sonore, plus généralement sensoriel qui émane de l'objet)

De par cette diversité de définition dépendant des modèles, la notion de comportement est donc plus floue que les deux autres concepts clés. [Lab04] propose une définition du comportement regroupant les définitions existantes : "le comportement décrit la dynamique de l'objet. Il peut comprendre un ensemble de lois et de règles (modèles continus) ainsi qu'une suite séquentielle d'états (modèles discrets) représentant l'évolution d'une structure suite à une excitation (ou simulation) au cours d'un processus donné".

Après avoir présenté les concepts pivots que l'on retrouve dans la majorité des modèles-produits, nous présentons dans les parties suivantes quelques exemples de modèles et d'applications existantes.

2.3 CoDeMo

CoDeMo (Cooperative Design Modeler) est un modèleur de conception intégrée dont l'objectif est d'assister les concepteurs dans la création du modèle-produit lié à une étude de conception bien précise [Rou99]. La méthode de conception intégrée sur laquelle repose les travaux ayant aboutis à la création du modèleur est celle décrite par [Tic94], qui considère notamment que le processus de conception est composé de deux phases : la phase de conception initiale et la phase de conception détaillée. Nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de précisions. Avant de nous intéresser à l'outil informatique, nous présentons tout d'abord le modèle-produit manipulé par cet outil.

2.3.1 Le modèle-produit de CoDeMo.

Ce modèle se base sur la notion de *vues*. Chapa [Cha97] écrit qu'une *vue métier* est générée "par la description du produit faite en appliquant le savoir faire et en prenant en compte les règles d'un métier particulier". En effet, la vision d'un objet est tout à fait subjective et dépend des préjugés, de la culture que chacun a et de nombreux facteurs inconnus. Ainsi, les acteurs intervenant au cours de la conception du produit ont des connaissances différentes, par exemple en technologie, en calcul, en fabrication... Une vue métier est créée à partir de chacun des types de connaissances et les différentes vues sont mises en relation pour confronter les différentes connaissances de chacun et créer les compromis de conception. Les vues sont créées à partir d'*entités métiers*, formalisant la connaissance métier,

c'est-à-dire le moyen donné aux acteurs pour décrire le produit dans leur vue métier. Ces entités représentent le vocabulaire qu'utilise un métier particulier pour décrire ses propres données du produit et sont composées d'un nom générique, d'un nombre fini de caractéristiques qui la décrivent et de ses comportements, liés à l'utilisation de l'entité. Voir Figure 2.1, exemple de définition de quelques attributs d'une entité d'usinage.

Vocabulaire métier		Valeurs particulières
Nom générique	Opération	Chariotage_1
Caractéristiques	Vitesse_coupe	250 (m/min)
	Vitesse_avance_outil	0,2 (mm/tr)
Comportements	Comp_dec	Une opération est incluse dans une phase d'usinage
	Comp_temps	Le temps de l'opération est fonction de la géométrie à usiner et des vitesses d'usinage

Figure 2.1 Attributs d'une entité d'usinage [Rou99]

L'organisation de la connaissance de chaque métier par l'intermédiaire d'un modèle de données [Cha97] permet ensuite la mise en place de relations entre les caractéristiques des entités pour prendre en compte les interactions entre les métiers lors du processus de conception. Le modèle de données réalise en effet une structuration de la connaissance par l'intermédiaire des composants, liens et relations des différentes vues du produit.

- Un composant, comme son nom l'indique, compose l'objet. Il est indispensable à la description complète de l'objet qu'il compose à un certain niveau d'abstraction.
- Un lien est une caractéristique d'un composant permettant un regard externe sur celui-ci. Il permet l'interface d'un composant avec d'autres composants, il est indispensable à son appréhension depuis l'extérieur.
- Une relation est l'élément du modèle de données qui formalise une association entre un ou plusieurs liens, pouvant appartenir à un seul ou plusieurs composants. Lorsqu'une relation associe des liens d'un même composant, elle spécifie un comportement de celui-ci. Par contre, lorsqu'elle associe des liens entre divers composants, elle apporte une contrainte entre ceux-ci.

La symbolique graphique des éléments du modèle de donnée ainsi qu'un exemple d'association de liens par une relation est représenté Figure 2.2.

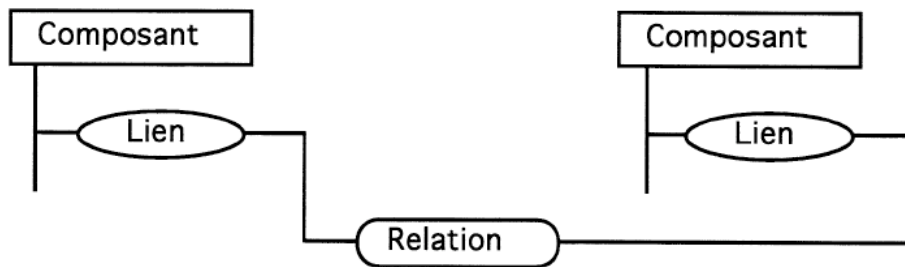


Figure 2.2 Association de liens par une relation dans le modèle de données [Cha97]

L'opérateur de décomposition lié à ce modèle donne la possibilité d'avoir des niveaux de granularité différents dans la description du produit et par là même de réaliser les décompositions multi-vues. Il y a association du modèle de connaissances (entités dans ce cas) au modèle de données et ce dans n'importe quelle vue du produit. La Figure 2.3 montre un exemple d'association dans une vue métier d'usinage.

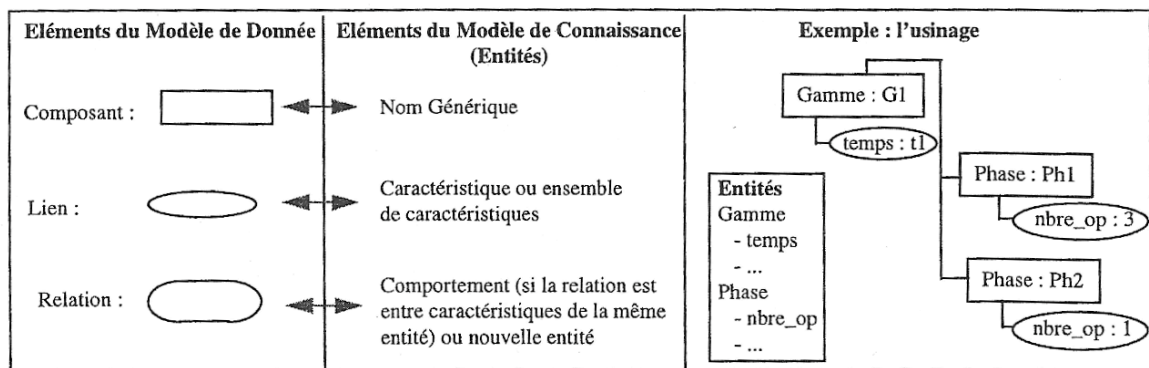


Figure 2.3 Association entre le modèle de données et le modèle de connaissance, organisation du modèle de données dans une vue métier d'usinage [Rou99]

Différentes vues du produit sont ensuite créées à partir de ce modèle. Nous présentons la création des vues métiers et de la vue particulière *Géométrie* au cours du processus de conception (voir Figure 2.5). Certaines de ces vues étant déduites d'un modèle fonctionnel (voir Figure 2.4), nous présentons également ce modèle.

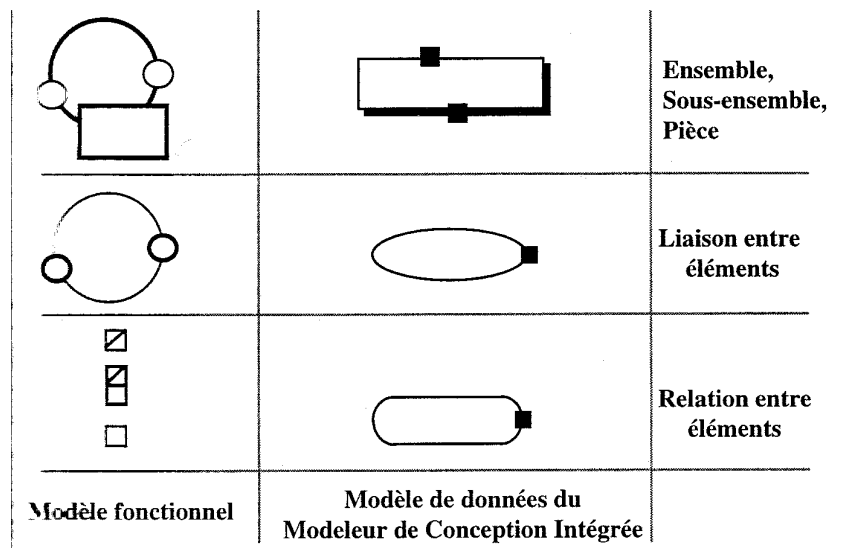


Figure 2.4 Traductions entre le modèle fonctionnel et le modèle de données [Rou99]

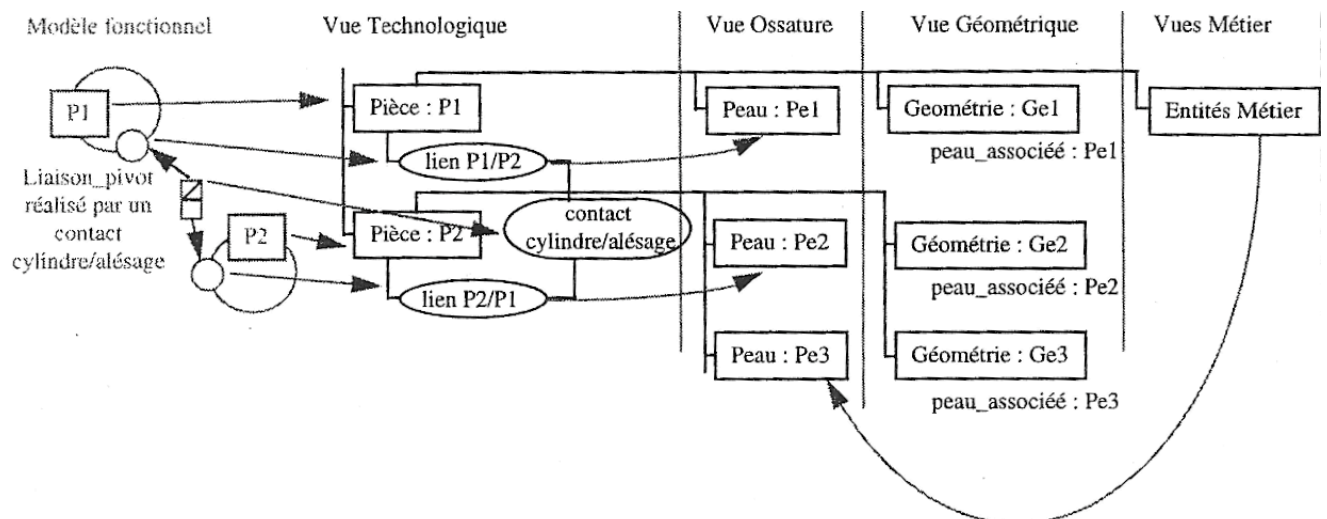


Figure 2.5 Construction progressive des vues [Rou99]

- **Le modèle fonctionnel** introduit par Constant [Con96] est basé sur la circulation des flux au sein d'un système et permet théoriquement la prise en compte de phénomènes multiphysiques (mécanique, fluide, électrique puis magnétique). Roucoules [Rou99] lui a apporté un complément, d'abord pour l'intégration de phénomènes magnétiques, puis pour utiliser ce modèle afin de guider les technologues au fur et à mesure de la conception du produit, lorsque les fonctions sont remplacées par la technologie.
- **La vue technologique** représente la décomposition structurelle (technologique) du produit. Elle est déduite du modèle fonctionnel.
- **La vue ossature**, représente le produit par ses surfaces fonctionnelles en utilisant les entités peaux [Bel94].

- **La vue géométrique** se construit à partir des deux premières, le but étant d'associer la géométrie du produit à ses surfaces fonctionnelles et dans le même temps à la technologie.
- **Les vues métier**, se construisent après les vues ossature et géométrie, lorsque les acteurs métiers peuvent introduire leurs connaissances sur le produit en créant leur propre vue. Ils vont dans un premier temps récupérer les données déjà existantes dans d'autres vues, puis les traiter avec leurs propres applications métier et pour finir introduire dans leur vue les données résultant de leur évaluation du produit.

Ce modèle produit a ensuite été intégré dans un modelleur, CoDeMo

2.3.2 Le modelleur CoDeMo

Afin d'assister les concepteurs dans la création du modèle produit présenté précédemment, ce modelleur supporte différentes tâches :

- Donner la possibilité de créer dynamiquement les différentes vues du modèle-produit
- Représenter le modèle-produit de façon adéquate pour que les acteurs connaissent l'état d'avancement du projet de conception et puissent y insérer leurs connaissances provenant de leurs applications spécifiques
- Gérer la cohérence des données par l'intermédiaire des relations dans le modèle-produit en propageant les contraintes dans le modèle et en faisant apparaître les compromis lorsqu'une relation est violée
- Permettre un travail multi-sites, multi-plateformes pour donner la possibilité à plusieurs acteurs de travailler sur la conception du même produit de manière délocalisée.

La Figure 2.6 montre l'architecture du modelleur CoDeMo permettant de réaliser les différentes tâches. Ce modelleur permet ainsi d'avoir plusieurs représentations des données du produit, en intégrant une représentation graphique voir Figure 2.7. Il intègre une base de données permettant que toutes les opérations réalisées par un acteur soient propagées et visibles par les autres. En résumé, le modelleur CoDeMo peut très bien s'insérer sur une plateforme plateau projet afin d'assister les différents acteurs dans la gestion collaborative des informations de conception.

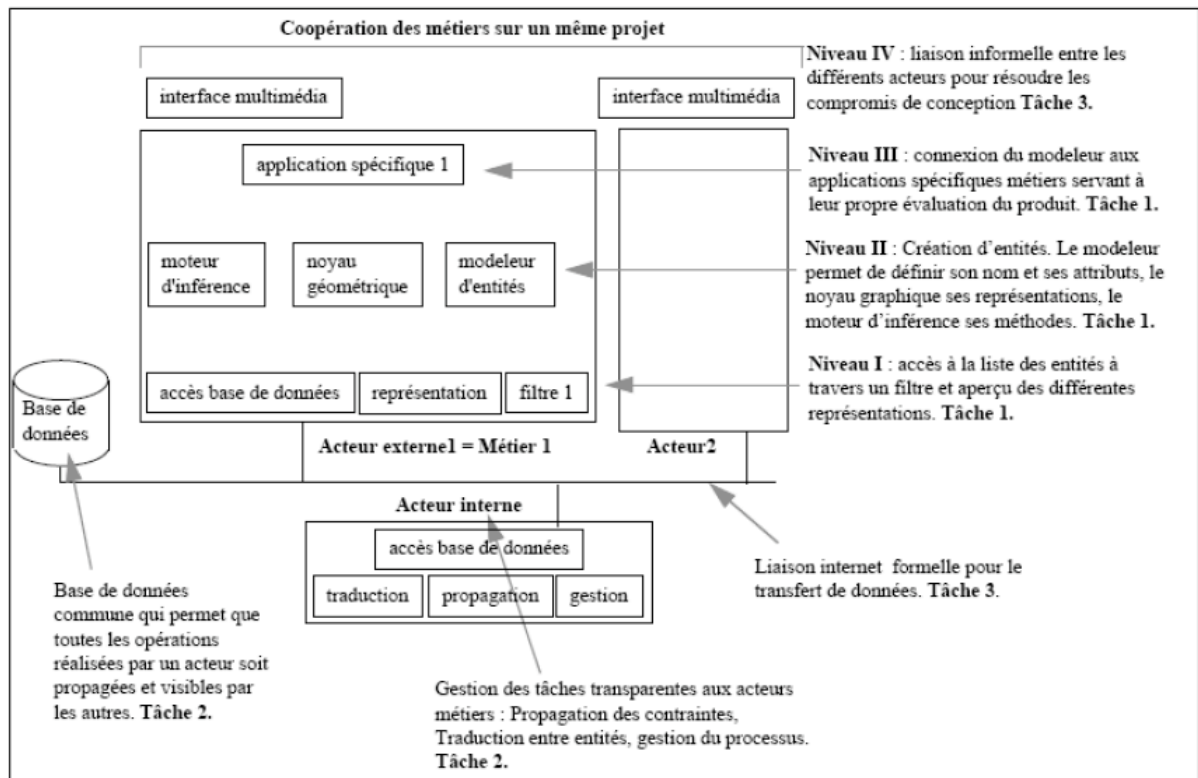


Figure 2.6 Architecture du modeler CoDeMo [Rou99]

Le modeler CoDeMo et le concept du modèle-produit manipulé retiennent notre attention car ils ont été conçus pour permettre à différents acteurs de collaborer au cours du processus de conception selon les principes de la conception intégrée, principes qui s'appliquent également pour la conception de microproduits. De plus, CoDeMo permet la conception de produits multiphysiques comme l'a montré [Rou99] via l'application du modeler à la conception de moteurs électriques mettant en jeu des principes mécaniques et magnétiques. Enfin, la diversité des métiers pouvant utiliser ce type d'outil au cours de la conception de produits est importante, comme l'a montré [Pim07] en adaptant le modeler à la conception de meubles en bois. Cependant, nous nous demandons si cet outil supporte certaines spécificités des microproduits, comme par exemple les couplages multiphysiques. Dans le chapitre 3 nous définissons le concept de couplage et nous montrons qu'il n'est pas directement modélisable au sein d'une vue métier. Nous nous intéressons donc à la manière d'enrichir les concepts et outils existants afin que ces derniers soient plus adaptés à la conception de microproduits.

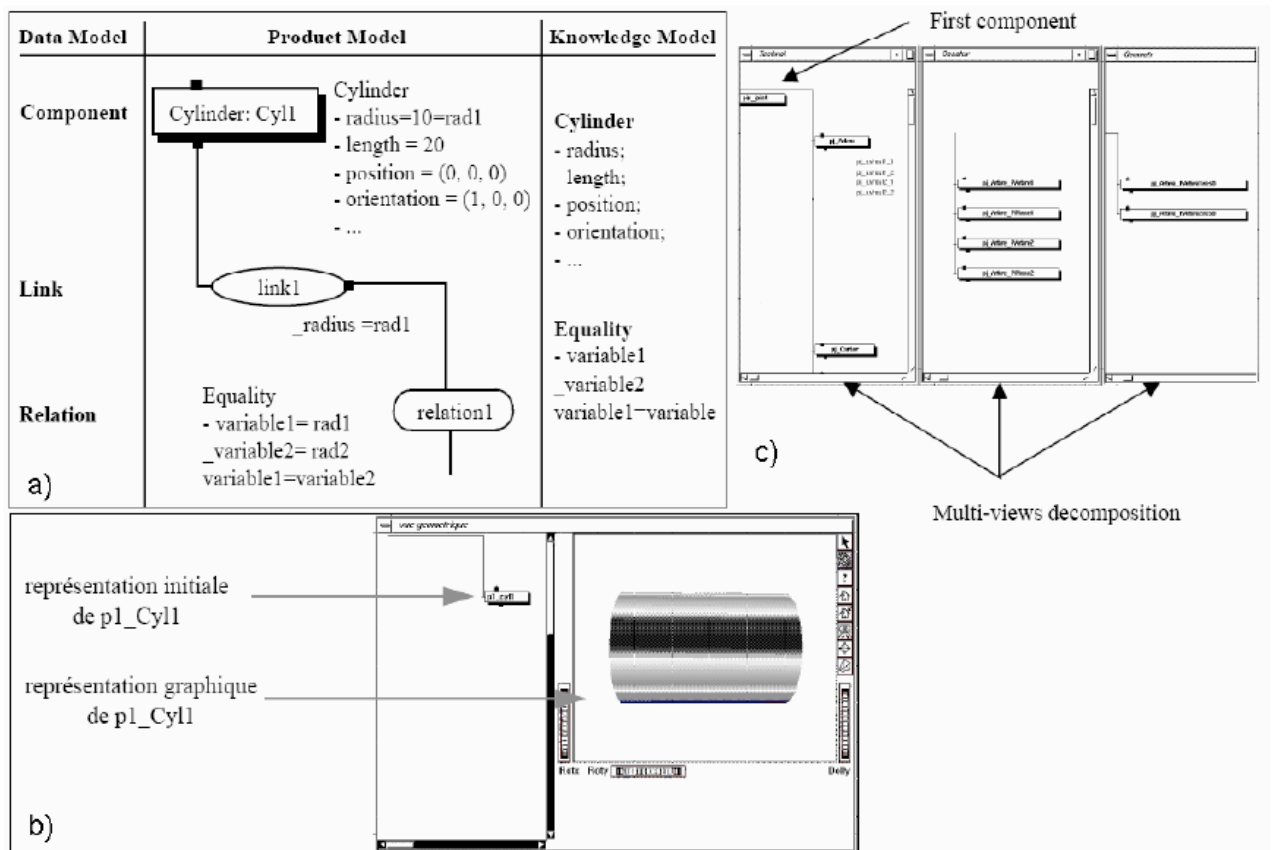


Figure 2.7 Décomposition multi-vues dans CoDeMo [Rou99]

2.4 Le modèle PPO dans le cadre du projet IPPOP

2.4.1 Présentation du projet IPPOP et du modèle associé

Le projet IPPOP (Intégration Produit Processus Organisation pour l'amélioration de la performance en Ingénierie) a pour but d'intégrer les dimensions relatives au produit, au processus de conception et à l'organisation du système dans lequel se déroule la conception. Le modèle PPO a été développé dans le cadre de ce projet. Il intègre des modèles produit, processus et organisation, voir Figure 2.8

- Le modèle produit formalise les connaissances technologiques relatives au produit au cours du processus de conception. Il peut être lié aux modèles de CFAO existants à des fins de représentation pour permettre aux acteurs de construire la définition du produit.
- Le modèle de processus gère les données concernant le déroulement et les ressources du processus de conception, à des fins de réutilisation en particulier. Il peut être lié aux outils de gestion de projet et de SGDT existants.

- Le modèle d'organisation gère les données organisationnelles du projet : définition et organisation de projets, indicateurs de performances.

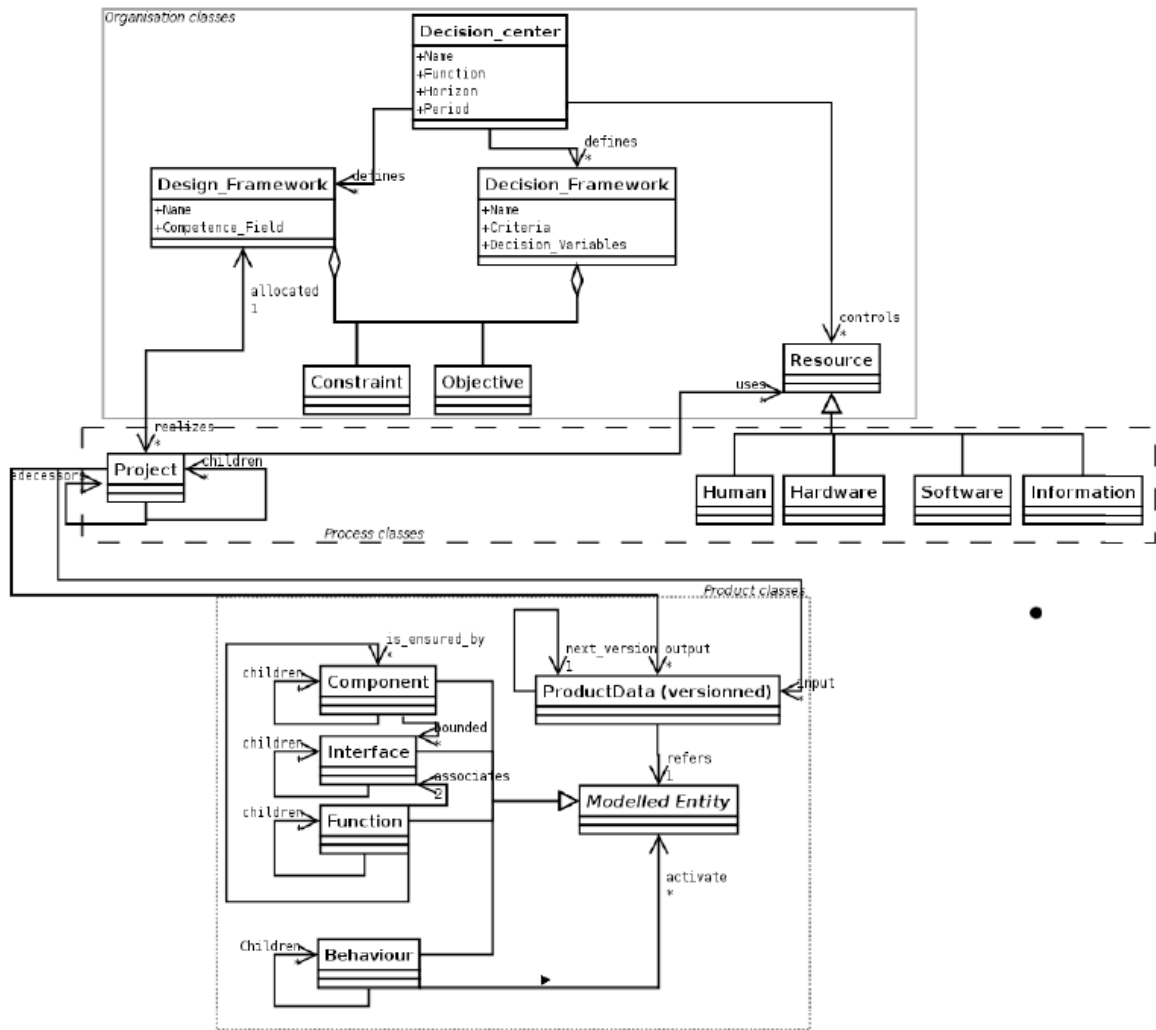


Figure 2.8 Diagramme de classe du modèle PPO [Noe08]

Dans le cadre de nos travaux, nous allons nous intéresser plus en détail au modèle-produit de PPO.

2.4.2 Le modèle-produit de PPO

Le modèle-produit de PPO est une extension du modèle de données "composant-lien-relations" de CoDeMo évoqué dans la partie 2.3.1. Il est constitué de quatre éléments de base : un composant, une interface, une fonction et un comportement, voir Figure 2.9. [Sad08]

- Un composant permet de donner une représentation structurale du produit, il peut être divisé en sous-composants pour présenter un assemblage, un sous assemblage ou une pièce.

- Une interface est le lien entre un composant et un éléments du milieu extérieur (interface d'un autre composant, fonction, etc.)
- Une fonction représente les relations entre composants via leurs interfaces. Elle définit un objectif à atteindre par le produit à concevoir.
- Un comportement définit l'état du modèle dans les différentes phases du cycle de vie du produit. Un comportement est défini par déclaration des composants, interfaces et fonctions.

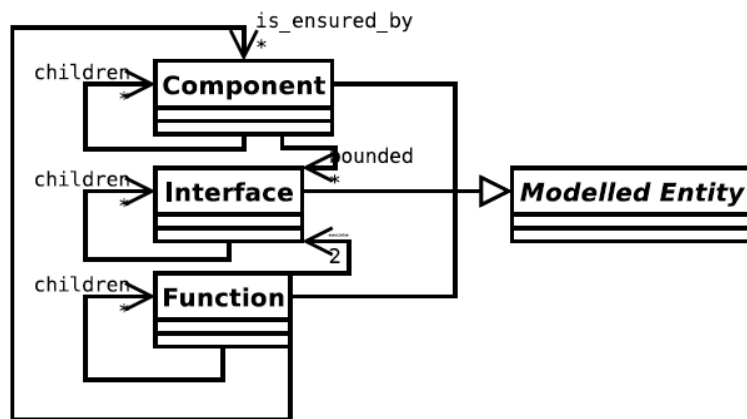


Figure 2.9 Diagramme de classe du modèle-produit de PPO [Sad08]

Ce modèle permet ainsi la représentation multi vues du produit [Bet06]. Par exemple, pour une pièce estampée, dans une vue destinée au forgeron, un cordon de bavure est indispensable pour la description complète de la pièce et constitue un sous-composant de la pièce. Dans une autre vue, l'expert d'usinage verra ce cordon de bavure comme une quantité de matière à enlever, c'est-à-dire par les caractéristiques qui le concernent. Comme il doit estimer l'effort d'ébavurage dépendant de l'épaisseur du cordon et de son périmètre moyen, ces deux caractéristiques lui sont accessibles en étant associées à une interface de composant cordon de bavure, cette interface permettant de connecter ce composant à des fonctions particulières.

Comme nous l'avons fait après avoir présenté le modèle-produit de CoDeMo, nous nous interrogeons également sur la possibilité d'utiliser ce modèle pour la conception de microproduits. Comme le modèle-produit de CoDeMo, le modèle-produit de PPO utilise aussi la notion de vue, que nous ne pensons pas adaptée au mieux à la gestion des couplages multiphysiques (voir notre définition des couplages dans le chapitre 3).

2.5 Une conception "au juste besoin" de microproduits

Nous présentons dans cette partie l'approche de conception collaborative et intégrée développée au sein du laboratoire LASMIS. Cette approche supporte l'émergence du produit au juste besoin. La solution finale émerge par l'intégration des contraintes des différentes expertises tout au long du processus. Cette approche nous intéresse, car la conception collaborative et intégrée est particulièrement adaptée à la conception des microproduits, comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent. Ensuite, cette approche reprend certains concepts que nous avons évoqués au début de ce chapitre, notamment en ce qui concerne la modélisation de produits. Enfin, lors de ses récents travaux de thèse, Klein Meyer [Kle08] a proposé une adaptation de cette approche de conception et des concepts manipulés à la conception d'un MEMS, ce qui suscite notre intérêt.

2.5.1 Composition de l'environnement de conception

Pour assister les concepteurs à suivre l'approche de conception décrite dans le paragraphe précédent, [Kle08] se repose sur trois concepts pour représenter les informations : le modèle de partage, le modèle d'interface et le modèle expert, voir Figure 2.10.

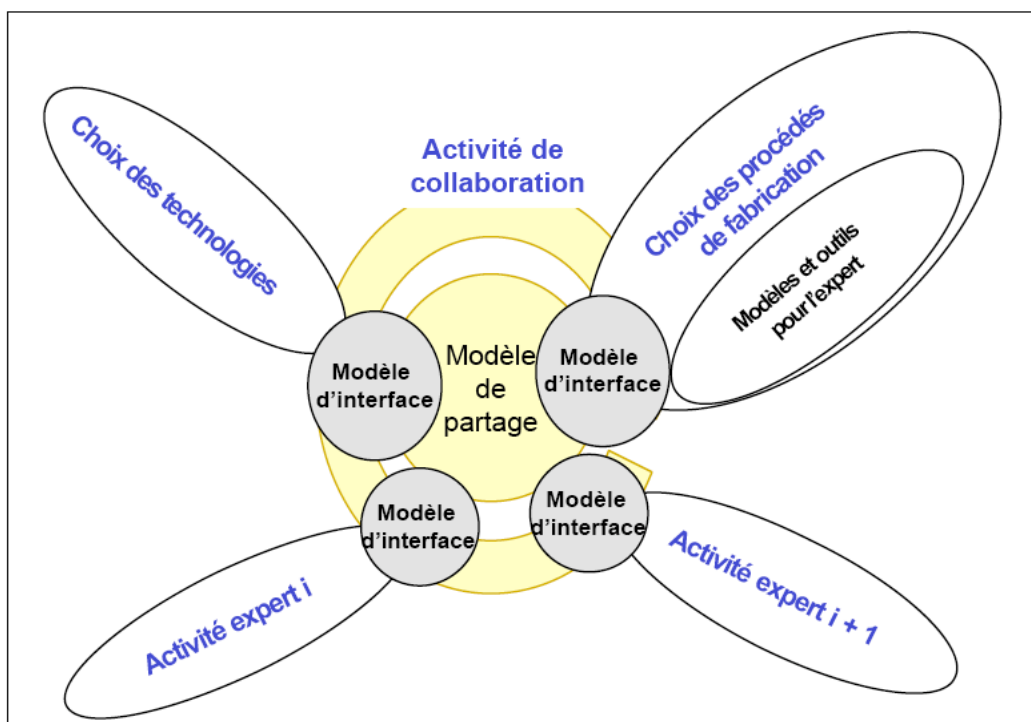


Figure 2.10 L'environnement supportant l'activité de conception [Kle08]

- Le modèle de partage assure la cohérence de l'information au cours du processus de conception, permettant à chaque activité experte d'accéder aux données utiles et

nécessaires, résultants d'autres activités, afin de démarrer sa propre expertise. Ce modèle permet également de détecter les conflits entre certaines informations par propagation des contraintes. Il gère trois différents niveaux d'information : les informations du produit, du processus et organisationnelles. Il s'agit du modèle PPO intégré au sein du projet IPPOP que nous avons évoqué dans la partie 2.4.

- Le modèle métier offre à l'expert métier les informations et outils dont il a besoin lors du déroulement de son activité. Il existe deux catégories de modèles, les modèles simplifiés, permettant aux concepteurs de réaliser des expertises au plus tôt et les modèles avancés, utilisés pour réaliser des expertises plus fines, ayant besoin d'un grand nombre d'informations sur le produit et donc utilisés plus tard lors du processus de conception.
- Le modèle d'interface, lie le modèle de partage et le modèle expert en sélectionnant et traduisant les informations de telle sorte qu'elles soient compréhensibles et utilisables. Les modèles d'interface utilisés dans cette approche se basent sur la notion de flux [Con96] [Eyn99] [Rou07] et d'entités peaux et squelettes, d'usage ou de fabrication [Bel94] [Rou99]. Nous invitons le lecteur à consulter ces références pour plus de précisions.

L'organisation des différents modèles au sein de l'environnement est présentée Figure 2.11 : on y retrouve les modèles experts, d'interface et de partage. La description du rôle de chaque modèle est proposée dans la partie suivante, lorsque nous présentons l'application de cet environnement de conception à la re-conception d'un MEMS.

2.5.2 Application de l'environnement de conception collaborative et intégrée à la re-conception d'un MEMS

Afin de valider cette démarche de conception, [Kle08] propose de re-concevoir un micro interrupteur électrique, afin de valider en particulier les modèles experts et d'interfaces utilisés lors du processus de conception (voir Figure 2.11). Dans cette partie, nous présentons d'abord le produit utilisé lors de l'activité de re-conception. Ensuite nous nous intéressons aux modèles utilisés lors de l'activité.

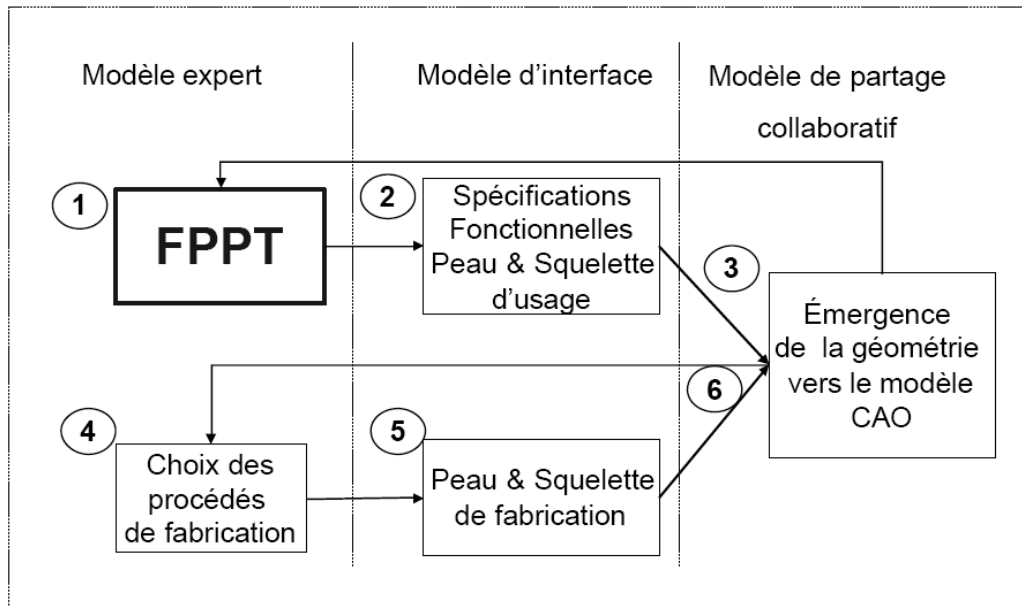


Figure 2.11 Modèles utilisés dans la démarche de conception [Kle08]

2.5.2.1 Présentation du produit support de l'activité

Le produit re-conçu est un micro interrupteur électrique présenté par Rebeiz [Reb01], voir Figure 2.12. Le principe de cet interrupteur est simple : une poutre se déforme et l'extrémité va réaliser un contact entre deux bornes, permettant ainsi au courant de passer de l'une à l'autre. La force permettant à la poutre de se courber est une force électrostatique, produite entre deux électrodes.

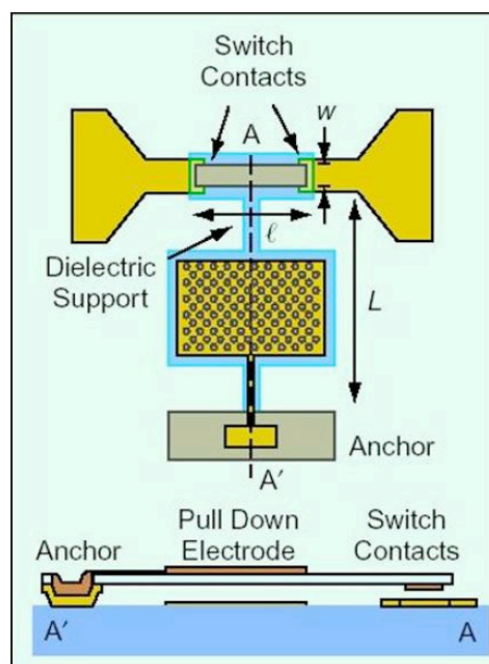


Figure 2.12 L'interrupteur à re-concevoir [Reb01]

2.5.2.2 Modélisation FPPT

L'approche FPPT (Fonction - Principe Physique - Technologie) permet de formaliser le lien entre une fonction et sa technologie associée par un principe de la physique. Cette approche est basée sur un modèle (cf. Figure 2.13) dont l'utilisation commence avec l'identification préalable de fonctions techniques, puis le concepteur choisit un ou plusieurs principes physiques pouvant répondre aux besoins de sa fonction et sélectionne enfin une ou plusieurs technologies pouvant réaliser le ou les principes physiques choisis.

Concernant l'interrupteur, les fonctions peuvent être

- Permettre le passage d'un courant électrique
- Empêcher le passage d'un courant électrique
- Permettre d'alterner entre les deux fonctions précédentes

La permission, ou non, du passage du courant électrique, est assurée par le principe physique de conductivité électrique des matériaux. Deux fonctions supplémentaires ont émergé de la troisième : permettre le mouvement et appliquer une force. Ces deux fonctions sont remplies par le principe de déformation de la poutre (loi de Hooke) et par la force électrostatique. Le schéma FPPT résultant de ces choix est présenté Figure 2.14. Les paramètres et technologies retenus suite à cette modélisation permettent à [Kle08] de proposer des simulations d'optimisation et de robustesses que nous ne présentons pas.

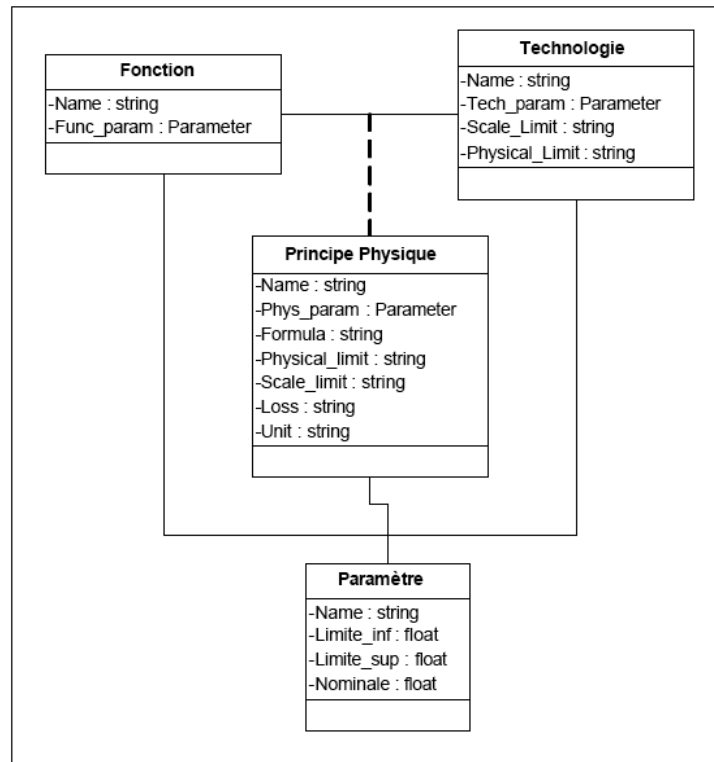


Figure 2.13 Les concepts du modèle FPPT [Kle08]

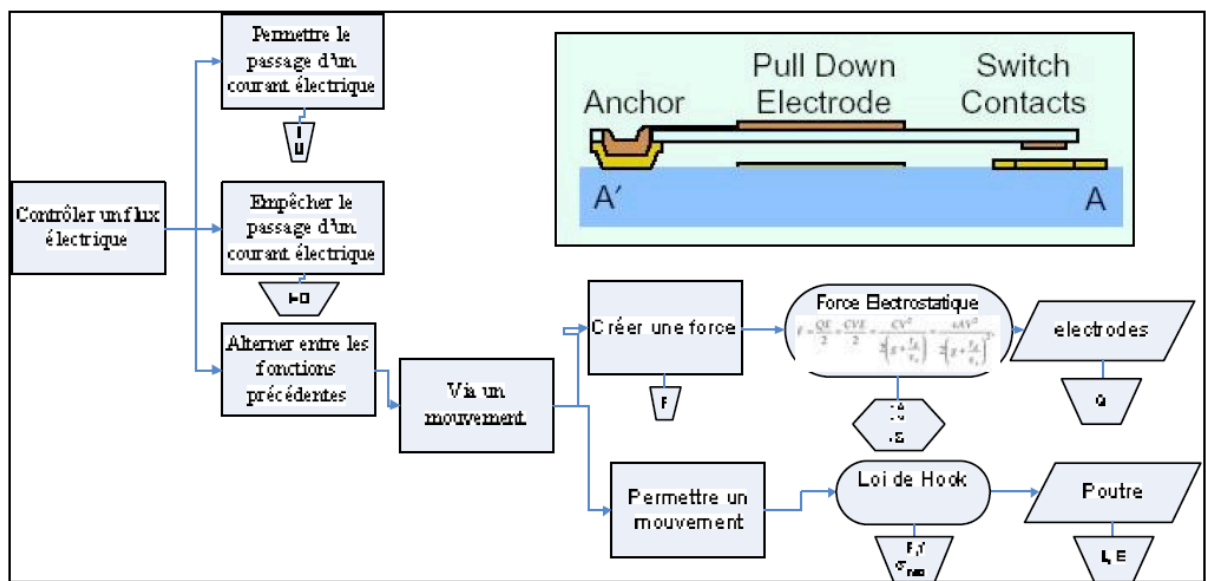


Figure 2.14 Schéma FPPT de la solution technologique de l'interrupteur [Kle08]

2.5.2.3 Modélisation d'interface : modélisation des flux et les peaux et squelettes d'usage.

La bijection existante entre le modèle FPPT et le modèle d'interface d'usage (cf. Figure 2.15) permet au concepteur de faire émerger les peaux et squelettes d'usage du produit. En

réalisant cette étape, les flux d'énergie, les surfaces frontières (peaux d'usage) apparaissent et une première vue géométrique de la poutre devient disponible, voir Figure 2.16.

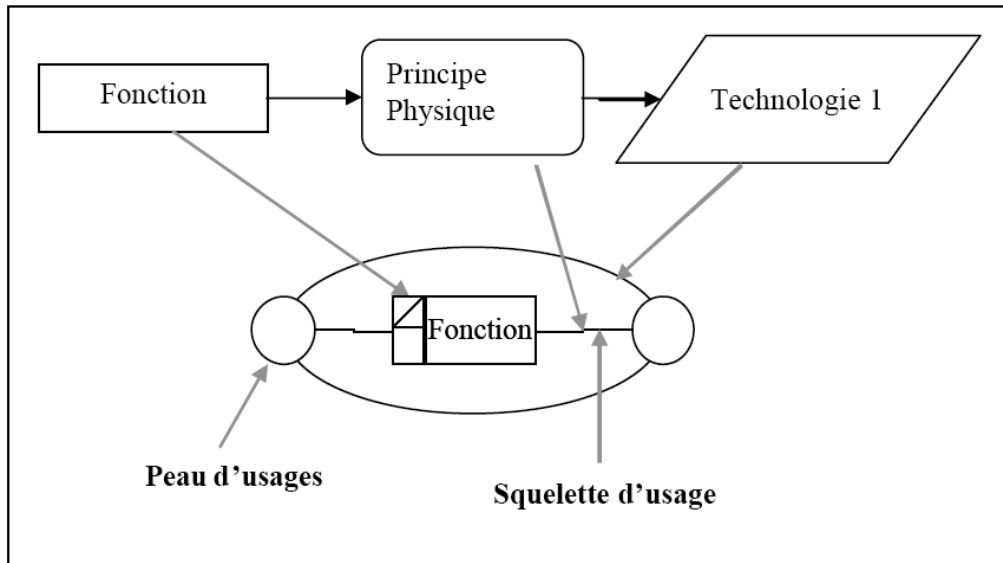


Figure 2.15 Bijection entre le modèle expert et le modèle d'interface [Kle08]

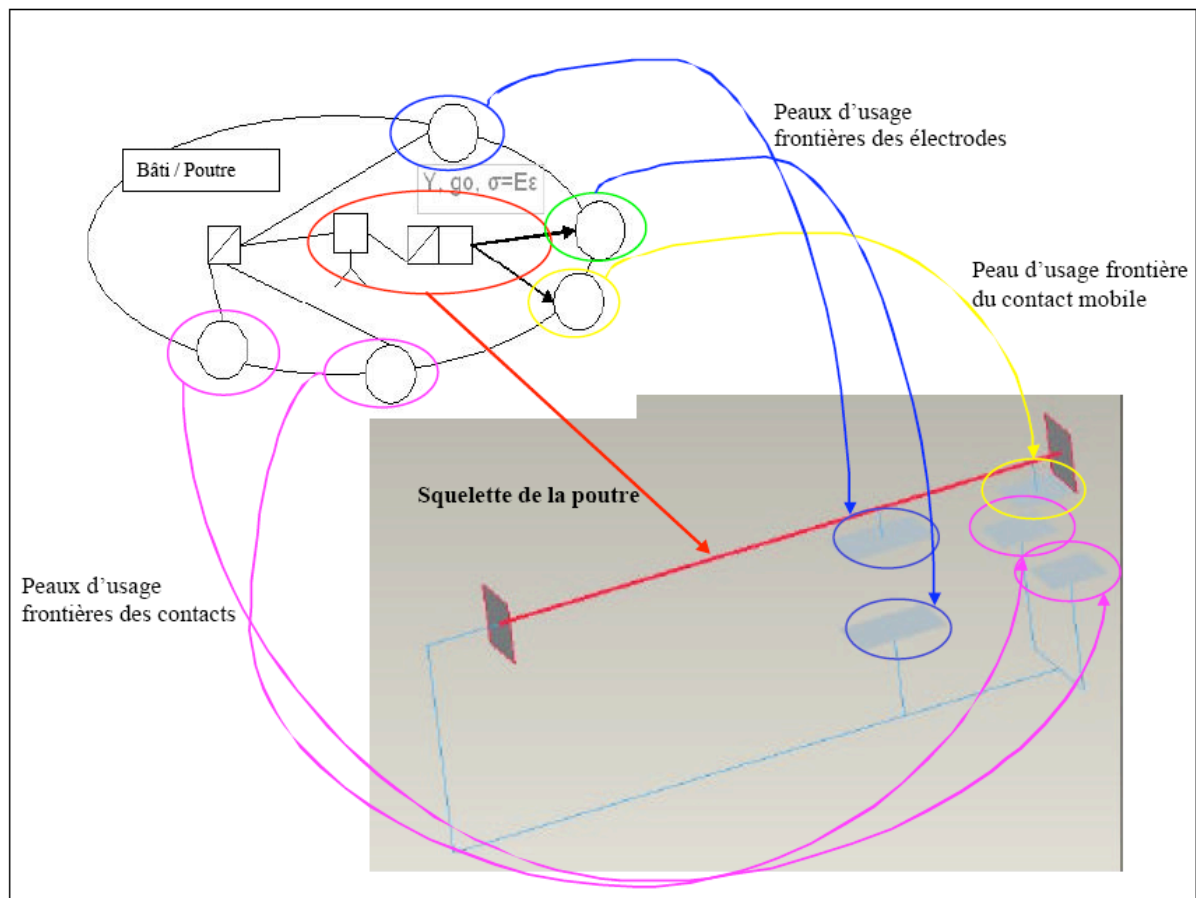


Figure 2.16 Apparition des peaux et squelettes d'usage. Première vue géométrique [Kle08]

2.5.2.4 Choix et modélisation des procédés de fabrication.

L'expert en fabrication intervient après la définition des peaux et squelettes d'usage (i.e. les spécifications fonctionnelles) pour déterminer les procédés de fabrication et au moins une gamme de fabrication afin de proposer une ou plusieurs alternatives. Cet expert définit un ensemble de peaux et squelettes de fabrication pour chaque opération de la gamme. Pour réaliser l'interrupteur, il choisit les procédés VLSI (voir chapitre 1), impliquant certaines contraintes sur la définition du produit : la surface la plus étendue du produit doit être parallèle au plan du wafer, l'épaisseur des couches déposées doit être la plus uniforme possible entre les différentes séquences de la gamme de fabrication et les matériaux des différentes couches déposées doivent être compatibles. Une modélisation des procédés VLSI par les concepts de peaux et squelettes de fabrication est alors possible (voir Figure 2.17). La fibre neutre du squelette de fabrication correspond à la direction perpendiculaire au plan du wafer. La section du squelette est liée au masque utilisé dans la gamme de fabrication et les peaux de fabrication représentent les surfaces de matière résultantes des opérations de fabrication.

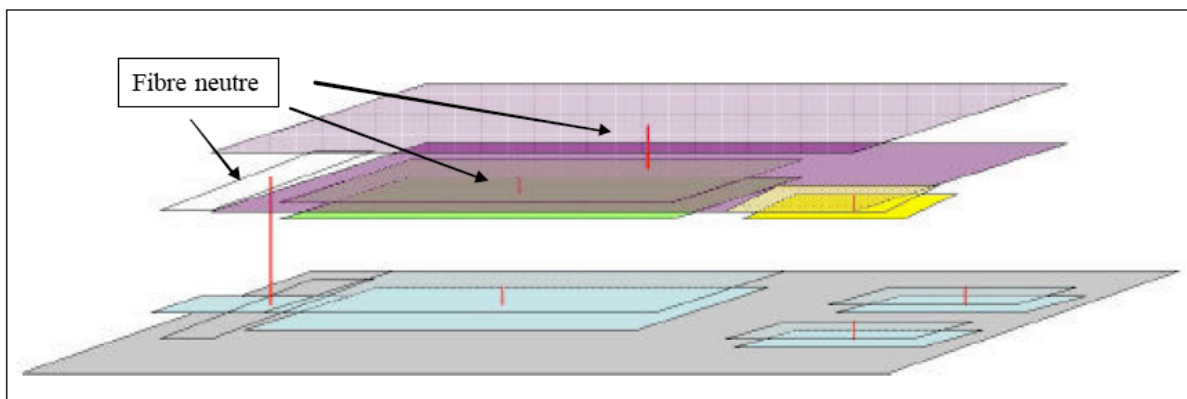


Figure 2.17 Squelettes de fabrication de l'interrupteur

L'adaptation de l'approche de conception au juste besoin à la conception d'un MEMS, via la proposition d'un environnement de conception se basant sur les modèles présentés retient notre intérêt. En particulier, [Kle08] montre qu'il est possible d'établir le lien entre les fonctions que doit remplir un microproduit et la technologie retenue via les principes physiques. C'est un résultat fort sur lequel nous nous appuyerons pour la suite de nos travaux. En effet, dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons également aux concepts de "fonction" et "principe physique" dans le cas des microproduits. Mais nous ne rentrerons pas dans le détail du choix des technologies retenues, puisque ces travaux montrent que ce choix est justifié par les fonctions remplies et les principes physiques mis en œuvre.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à différents modèles et outils, développés dans un contexte de conception intégrée de produits. Les modèles-produits favorisent la collaboration de différents acteurs et l'échange d'expertises, indispensable pour la prise en compte des spécificités des microproduits au cours de leur conception, ce qui retient notre intérêt. Cependant, les modèles-produits comme CoDeMo et PPO utilisent la notion de *vue métiers* et chaque métier voit le produit avec ses propres entités et utilise ses propres outils. Aussi, nous pensons que cette notion de *vue* est difficilement compatible avec la notion de couplages multiphysiques et la forte imbrication des différents métiers associés au couplage. La question que nous posons maintenant est : pouvons-nous proposer un modèle capable de supporter les aspects multiphysiques des microproduits et la formalisation d'expertises liés à la gestion des couplages ? Le chapitre suivant, après la définition de concepts, propose un modèle permettant de répondre à cette question.

Chapitre 3

Concepts et modèle pour la conception de microproduits

3.1 Introduction

Nous débutons ce chapitre par la présentation de concepts à prendre en compte lors du processus de conception de microproduits. Tout d'abord nous donnons une définition et quelques exemples des concepts de fonctions et principe physiques, dans le cadre de la conception de microproduits. Ensuite nous détaillons le concept de couplage que nous avons déjà évoqué dans ce manuscrit. Enfin nous proposons la prise en compte des contraintes liées à la fabrication du produit à travers le concept de fabricabilité. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous proposons d'intégrer les concepts présentés au sein d'un modèle supportant la représentation de microproduits au cours de leur conception.

3.2 Le concept de fonction

Nous avons montré dans le chapitre précédent qu'un concept de fonction était présent dans tous les modèles-produits rencontrés dans la littérature. Nous allons définir dans cette partie ce que nous entendons par fonction dans le cas d'un processus de conception de microproduits. Puis nous présenterons les fonctions rencontrées le plus fréquemment dans ce type de produits. Pour cela nous considérerons deux catégories de microproduits : les MEMS (incluant les micros composants) et les systèmes microfluidiques.

3.2.1 Définition

Nous prenons pour définition de fonction le terme le plus générique de la norme EN 1325 c'est à dire "l'action d'un produit ou de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité". Nous englobons ainsi les fonctions de services et les fonctions techniques. Cela dépend en effet de l'acteur exprimant la fonction, de l'avancement du processus de conception ou des choix technologiques effectués. Afin d'évaluer la performance de la fonction, l'acteur exprimant cette fonction peut la compléter d'un critère d'appréciation, c'est-à-dire un caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie, ou une contrainte respectée. Ce critère doit être associé à un niveau, la grandeur repérée dans l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction. Ce niveau est complété d'une flexibilité exprimant les possibilités d'admettre un écart entre le niveau atteint par une solution proposée et le niveau recherché en tant qu'objectif.

Prenons l'exemple de la conception d'un accéléromètre. La fonction, telle qu'elle peut être exprimée par le client, est certainement une fonction de service : mesurer une accélération. Le client peut ensuite préciser un critère (l'accélération à mesurer), un niveau (la plage de valeur de l'accélération à mesurer) et une flexibilité associée. Cette fonction de service peut être accompagnée de critères, comme l'encombrement maximum du capteur. Si l'équipe de conception retient comme choix technologique la réalisation d'un accéléromètre capacitif, cette fonction de service est transformée en fonctions techniques : rendre possible le déplacement d'une masse mobile et mesurer la variation de la capacité engendrée par le déplacement de cette masse mobile.

Bien que les microproduits soient nombreux, nous avons constaté lors de nos études bibliographiques que le nombre de fonctions techniques mises en œuvre pour répondre aux fonctions de service est limité. Sans prétendre être exhaustif, nous allons présenter dans la suite de cette partie, les principales fonctions des microproduits. Nous avons séparé ces produits en deux catégories. D'abord les systèmes microfluidiques, puis les autres microproduits, en particulier les MEMS et micros composants.

3.2.2 Les fonctions des systèmes microfluidiques

Les travaux actuels sur la microfluidique concernent principalement les applications biologiques et médicales par la réalisation de "lab on chip", laboratoires d'analyse sur puce que nous avons présentés dans le chapitre 1. À partir de nos travaux bibliographiques sur ces produits, nous avons recensé les fonctions suivantes :

- Faire entrer et faire sortir le fluide du système, ce qui nécessite la création d'une interface avec le monde extérieur, impliquant divers problèmes comme l'étanchéité.
- Transporter le fluide, fonction pouvant avoir plusieurs finalités. Par exemple, permettre l'acheminement du fluide d'un point A à un point B, de l'entrée à un réservoir, etc. Mais cette fonction est parfois couplée à un ou plusieurs phénomènes physiques, par exemple afin de créer un déplacement de fluide suffisamment long pour permettre le refroidissement d'un fluide.
- Stocker le fluide, dans des micros réservoirs, afin que les systèmes d'analyse du fluide qui sont souvent associés aux systèmes microfluidiques puissent opérer.
- Projeter le fluide. C'est une des fonctions remplies, par exemple, par les buses d'imprimantes à jet d'encre.
- Mélanger plusieurs fluides. Nous avons montré, dans le chapitre 1, qu'à cause des effets d'échelle et de l'écoulement fluide toujours laminaire, des solutions

techniques doivent être mises en place pour permettre le mélange de plusieurs fluides [Che05]

- Séparer deux fluides, par exemple lorsque deux phases en présence, comme l'huile et l'eau doivent être isolées [Ang05]
- Filtrer un fluide, par exemple pour récupérer certaines particules présentes dans des solvants [He99]
- Permettre un échange thermique, dans le but par exemple de réaliser des systèmes de refroidissement d'autres microproduits [Iva03]
- Créer une différence de pression, fonction qui figure explicitement dans le cahier des charges d'un projet auquel nous avons participé. [Guo06]

Nous ne prétendons pas proposer la totalité des fonctions présentes dans les systèmes microfluidiques, cette liste n'est pas figée, nous voulons simplement montrer que le nombre de fonctions remplies par ce type de produit est limité et qu'une grande partie des produits présents sur le marché combine plusieurs fonctions que nous avons identifiées. Nous nous posons maintenant la question de savoir si ce constat peut être étendu aux autres microproduits, en particulier les MEMS et micros composants.

3.2.3 Les fonctions des MEMS

La grande diversité des produits au sein de chaque famille de microproduits présentés dans le chapitre 1 rend délicat l'établissement d'une liste de fonctions aussi précise que pour les systèmes microfluidiques. Les fonctions de service des produits dépendent de la famille du produit et de son domaine d'application. Par exemple :

- Pour un accéléromètre (famille des capteurs), la fonction de service est de mesurer une accélération. Le critère est l'accélération à mesurer, le niveau est la plage de mesure de cette accélération et la flexibilité la tolérance associée à ce niveau.
- Pour un condensateur à capacité variable analogique (famille des MEMS RF), la fonction de service est de fournir à l'utilisateur toutes les valeurs de capacité comprises dans une plage de variation donnée. Là aussi il est possible d'associer à cette fonction un critère (la plage de capacité), niveau (valeurs limites de la plage) et flexibilité.
- Pour un micro miroir (famille des MEMS optiques), la fonction de service est de renvoyer un faisceau lumineux dans deux directions différentes.
- Etc.

Cependant, le nombre de fonctions techniques mises en œuvre pour réaliser ces fonctions de service est plus limité et les fonctions peuvent être communes à différentes familles :

- Permettre le déplacement d'un élément. Cet élément pouvant être une poutre, un réseau de poutre (peigne), ou une plaque. Nous retrouvons cette fonction dans une grande majorité de produits, quelle que soit la famille à laquelle appartient le produit. Le déplacement d'un peigne est mis en œuvre dans un accéléromètre capacitif [Del08], un MEMS RF analogique [Bor03] et pour le mouvement de certains micros miroirs. Le déplacement d'une poutre permet le fonctionnement des micros switches [Reb01] mais aussi des MEMS RF numériques [Bra01].
- Actionner le déplacement d'un élément (switchs, MEMS RF numériques, micro miroirs...)
- Mesurer le déplacement d'un élément, ou sa fréquence de résonance (accéléromètres, résonateurs, filtres RF...)
- Permettre ou empêcher le passage d'un courant électrique (micros switches, MEMS RF numériques...)

Là encore, sans être exhaustifs, nous présentons des fonctions d'un niveau conceptuel suffisamment élevé pour pouvoir représenter une grande partie des microproduits. Par exemple, bien que dans le chapitre 1 nous n'ayons présenté que les accéléromètres à détection capacitive, la fonction "permettre le déplacement" s'applique à la quasi totalité des autres accéléromètres [Cha05] : les accéléromètres à détection piezorésistive utilisent le déplacement d'une plaque ou d'une poutre suspendue, la détection piezoélectrique utilise une plaque suspendue par quatre poutres, la détection à effet tunnel un réseau de peigne... La diversité des produits conçus vient également du principe physique mis en œuvre pour réaliser tout ou partie de la fonction technique. Le concept de principe physique est présenté dans la partie suivante.

3.3 Le concept de principe physique

3.3.1 Définition

D'après le dictionnaire, "un principe est une loi de portée générale relative à une science, notamment la physique, non démontrée mais vérifiée par ses conséquences" [Tlf08] (principe d'inertie, principes de la thermodynamique, etc.). Nous proposons une définition plus générale, sans restriction aux lois non démontrées. Nous définissons un principe physique comme une loi ou un théorème décrivant un comportement observé dans le monde réel, sans restriction à un domaine physique particulier, dont la validité à l'échelle des microproduits a

été confirmée. Un principe physique est composé de paramètres avec unités et il est formalisable littéralement, de manière à décrire le comportement observé.

Pour réaliser les fonctions des microproduits, des principes physiques sont directement mis en œuvre, mais sans qu'il y ait bijection entre fonction et principe physique : un principe physique peut réaliser plusieurs fonctions différentes et une fonction peut être réalisée par plusieurs principes physiques différents. Par exemple, la déflexion d'une poutre, nécessaire au fonctionnement d'un switch, peut être assurée par des principes électrostatiques, piézoélectriques, magnétiques, acoustiques ou thermiques. Nous n'allons pas proposer un catalogue de principes physiques, mais dans la partie suivante, nous en présentons quelques-uns, qui seront ensuite utilisés dans les exemples illustrant d'autres concepts (le couplage, notamment) et le modèle-produit.

3.3.2 Quelques principes physiques mis en œuvre dans les microproduits

3.3.2.1 L'électrostatique, dans les condensateurs plans

L'électrostatique est fréquemment mis en œuvre dans les microproduits. Dans la quasi-totalité des cas, il s'agit de créer une force ou de faire varier une capacité entre deux surfaces planes, séparées par un gap. Nous nous retrouvons donc dans le cas d'étude des condensateurs plans. Lorsque deux surfaces conductrices planes en vis-à-vis sont séparées par un isolant, la capacité C qui est la constante de proportionnalité entre la charge (quantité d'électricité Q) qu'il acquiert quand il est soumis à une tension U est donnée par l'Équation 3.1, avec g le gap entre les électrodes, S la surface en vis à vis des deux électrodes et ϵ_0 la permittivité du vide.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{g}$$

Équation 3.1

L'application d'une tension U entre les deux plaques provoque l'apparition d'une force d'attraction entre ces plaques, dont l'expression du module est donnée par l'Équation 3.2.

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon_0 S}{g^2}$$

Équation 3.2

3.3.2.2 La loi de Hooke

La loi de Hooke est une loi de comportement des solides soumis à une variation de faible amplitude, issue de la RdM et utilisée classiquement en "macro" mécanique. C'est également un principe physique, s'appuyant sur les lois de la mécanique, fréquemment utilisé dans les microproduits, en particulier dès qu'une poutre joue un rôle de ressort de rappel. Des études comparatives entre des résultats de simulations numériques et ceux d'une modélisation du

comportement par la loi de Hooke ont en effet montré la validité de cette loi à cette échelle [Pot03]. Par exemple sur une structure de type cantilever (cf. Figure 3.1) il est possible de modéliser le gradient de contraintes internes résultant du déplacement de la structure par un effort de rappel en bout de poutre (cf. Figure 3.2). La relation entre la force de rappel et le déplacement de la structure est donnée par l'Équation 3.3, avec g le gap entre les deux électrodes, g_0 le gap initial et k la constante de raideur du cantilever.

$$F_{\text{rappel}} = -k(g - g_0). \text{ À l'extrémité du cantilever : } k = \frac{3.E.I}{L^3} \text{ avec } I = \frac{W.H^3}{12}$$

Équation 3.3

Avec E le module d'young du matériau, I le moment d'inertie du cantilever, L sa longueur, W sa largeur et H son épaisseur.

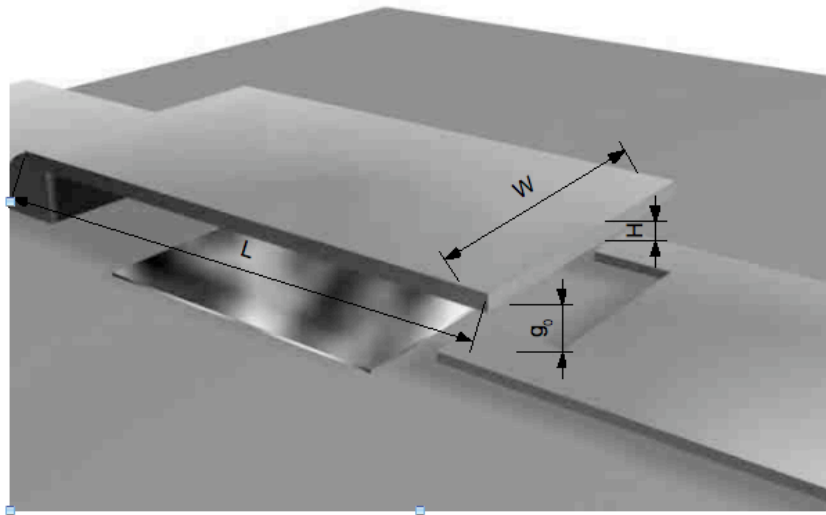


Figure 3.1 Structure de type cantilever

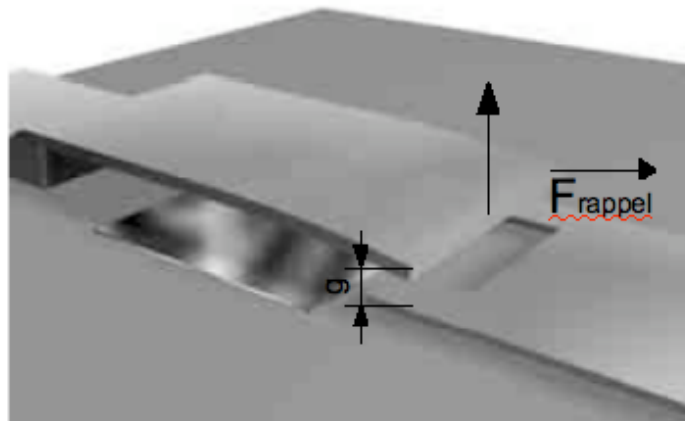


Figure 3.2 Effort de rappel ($g < g_0$)

3.4 Le concept de couplage

3.4.1 Définition

Comme cela a été présenté dans le chapitre 1, une des conséquences de la taille des produits est que les phénomènes physiques mis en œuvre ne sont pas indépendants et interagissent les uns sur les autres : ils sont couplés. Cela signifie que certains paramètres du produit (formes, géométrie du produit, matériaux retenus, etc.) influent sur plusieurs principes physiques mettant en œuvre les fonctions désirées. Par exemple les paramètres géométriques du cantilever que nous avons évoqués précédemment influent à la fois sur la valeur de l'effort de rappel due à l'élasticité de la poutre et sur la valeur de la tension d'actionnement nécessaire à sa propre déflexion.

Cette non indépendance entre les différents principes physiques implique le fait que les décisions permettant au produit d'évoluer tout au long de son processus de conception peuvent être prises dans deux contextes distincts :

- Dans le premier cas, les expertises propres à chaque métier permettent de faire avancer la définition du produit. Nous entendons par *expertises métier* les savoirs faire, connaissances et règles expertes formalisés, propres à un métier particulier. Dans ce cas, chacun des spécialistes des principes physiques mis en œuvre peut exprimer ses propres contraintes sur les paramètres couplés de manière à ce que le produit remplisse les fonctions attendues. Nous sommes donc dans un cas classique d'échange de données entre experts, conduisant à la définition des domaines de validité de chaque paramètre couplé, dans le but d'éviter que la modification d'un paramètre du produit impliqué dans un principe physique rende invalides des fonctions remplies par d'autres principes physiques. Reprenons l'exemple du cantilever : l'augmentation de l'épaisseur d'une poutre de section rectangulaire augmente sa raideur, ce qui peut être souhaité afin d'obtenir un effort de rappel important. Mais cela implique aussi l'augmentation de la tension à appliquer pour provoquer la déflexion de la poutre, entraînant éventuellement d'autres problèmes.
- Dans le second cas, les connaissances ou règles déclanchant les prises de décision ne peuvent pas être rattachées à un métier particulier : elles sont issues du couplage et de connaissances formalisées par l'ensemble des métiers impliqués. Nous les appelons *expertises couplées*. La formalisation de ces expertises couplées nécessite l'étroite collaboration de différents acteurs : spécialiste des principes physiques, experts matériaux et/ou équipes de caractérisation. Nous entendons par *étroite collaboration* (qui est un terme assez subjectif) le fait que plusieurs métiers différents travaillent à la formalisation d'expertises couplées de manière plus forte que par un simple échange d'informations de données ou de contraintes. C'est par exemple dans ce contexte que

sont menées les campagnes d'essais afin de caractériser les géométries qu'il est possible de réaliser avec les procédés VLSI, comme nous le présentons dans la partie 1.3.3.1. Le résultat de ces collaborations peut être ensuite formalisé sous la forme de connaissances ou règles expertes, afin de pouvoir être réutilisé dans les conceptions futures ou le même type de couplage apparaît. Il faut pour cela préciser quels sont les limites et le domaine de validité de ces règles ou connaissances lors de leur formalisation.

Nous illustrons la gestion des couplages multiphysiques dans les deux exemples suivants. Ces deux exemples présentent deux actionnements différents retenus pour le fonctionnement d'un switch. Le premier principe est l'actionnement thermique. Nous montrons que la mise en œuvre de ce type d'actionnement ne peut se faire sans l'intégration d'expertises couplées. Le second principe est l'actionnement électrostatique. Dans ce second cas, nous montrons que même si une partie du dimensionnement du produit peut se faire sous la forme d'échange d'informations, certaines prises de décisions nécessitent tout de même l'intégration d'expertises couplées directement issues de la formalisation de connaissances et règles issues de différents métiers.

3.4.2 Exemples, différents principes d'actionnement d'un switch

Les switches sont des micros interrupteurs ayant pour fonction de service de laisser passer ou non un courant électrique entre deux électrodes. L'alternance entre ces deux états est le plus souvent effectuée par la déformation d'un élément mobile, de type poutre, dont l'actionnement peut être effectué par de nombreux principes physiques, dont la thermique et l'électrostatique, que nous présentons dans cette partie.

3.4.2.1 Cas de l'actionnement thermique

Ce mode d'actionnement utilise la différence de dilatation d'un couple de matériaux pour générer un déplacement. Le principe est d'utiliser une structure composée d'un empilement de couches de matériaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents [Con04]. Lorsque la structure est chauffée, le fait que les matériaux aient des coefficients de dilatation thermique différents provoque une variation de courbure de la poutre et donc un déplacement de son extrémité non encastree. Par exemple, dans le cas d'un bilame (donc d'un empilement de deux couches) chacune des couches chauffée va subir un allongement respectif ΔL_1 et ΔL_2 , avec $\Delta L_1 < \Delta L_2$. La relation de continuité à l'interface des couches transforme cet allongement en gradient de contraintes, générant une déformation de la poutre, voir Figure 3.1

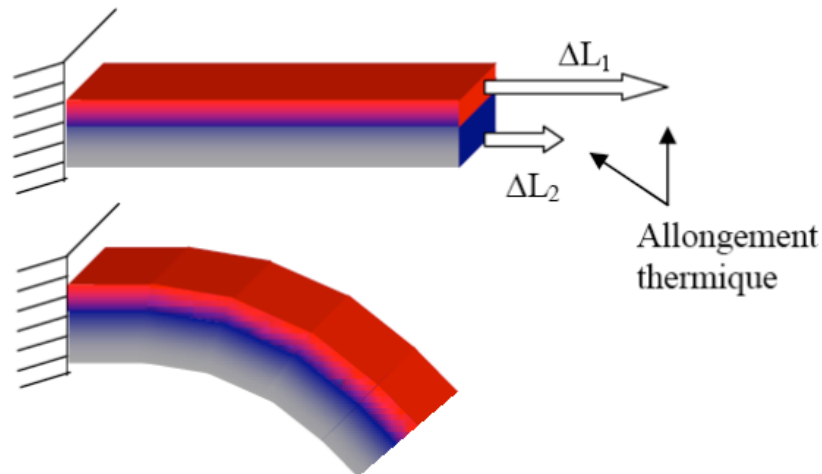


Figure 3.3 Principe de fonctionnement d'un bilame [Chu93]

Ce principe est fréquemment utilisé pour l'actionnement des microproduits, voir Figure 3.4. Pour cela, un film résistif est inséré dans la structure déformable, afin de former des résistances de chauffe. Le passage d'un courant dans ces résistances chauffe la micro poutre et le matériau dilatable, déposé sur la structure. Ce couple de matériaux permet la réalisation d'un bilame qui fléchit lorsqu'il est chauffé, activant ainsi le composant. En l'absence de courant, les résistances et le matériau dilatable refroidissent et se rétractent, la micro poutre reprend alors sa position initiale.

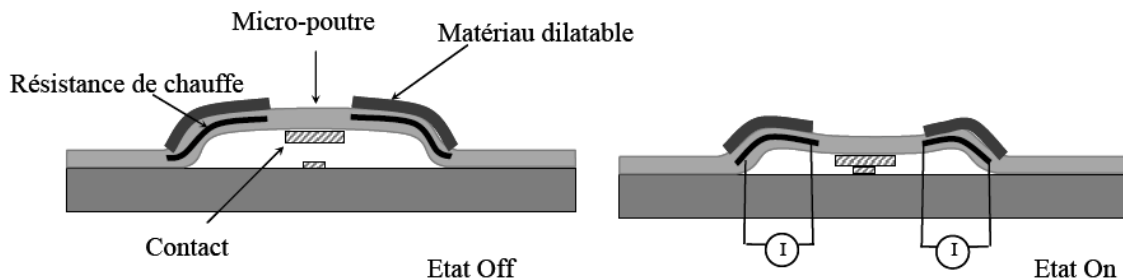


Figure 3.4 Schéma de l'actionnement thermique dans un switch

La réalisation de ce type de composant nécessite de maîtriser le réchauffement du bilame et le comportement des matériaux induits, la déformation de la poutre qui en résulte, les conséquences sur la qualité du contact, le tout en s'assurant de la compatibilité des matériaux retenus, entre eux et vis à vis des procédés de fabrication disponibles. Plusieurs expertises métier sont donc nécessaires pour la conception du switch. Nous en présentons quelques-unes à titre d'exemple, sans prétendre les avoir toutes identifiées :

- Le réchauffement du bilame via la résistance de chauffe nécessite l'expertise d'un électricien et des informations sur la résistance électrique du matériau utilisé.

- Les valeurs de la résistance électrique du matériau traversé par la résistance et du coefficient de dilatation des matériaux, sont fournies par l'expert matériaux.
- La relation de comportement de la poutre issue des contraintes relatives aux différents coefficients de dilatation des matériaux utilisés est exprimée par un expert mécanicien. Idem pour l'expression de la valeur de l'effort au niveau du contact.
- La liste des matériaux pouvant être superposés provient d'expertises relatives aux procédés de fabrication.

La question que nous nous posons à présent est : les connaissances ou règles permettant de prendre une décision quant à l'évolution de la conception du produit sont-elles relatives à un métier unique ? Nous pensons que non. Le choix du couple de matériaux pour réaliser le switch nécessite de s'assurer que :

- La différence entre les coefficients de dilatation des matériaux est suffisante pour que le switch commute en un temps restreint et pour une puissance d'actionnement limitée. C'est une expertise couplée entre les métiers matériaux, mécanique et électricité.
- L'effort au niveau du contact est suffisant pour une bonne transmission du signal; règle issue du couplage entre les matériaux, la mécanique, l'électricité et la transmission de signal.
- Il est possible de réaliser l'empilement des couches de matériau structural, de chauffe, dilatable et de contact retenus, en accord avec les expertises de fabrication. (voir concept de fabricabilité, partie 3.5)
- Les contraintes à l'interface n'engendrent pas un décollement des différentes couches.

Cette technologie ne fait donc pas référence à un métier unique, mais à l'imbrication forte d'expertises issues de différents métiers.

3.4.2.2 Cas de l'actionnement électrostatique

Un autre type d'actionnement répandu est l'utilisation de forces électrostatiques. La mise en œuvre de ce type de commande nécessite deux électrodes conductrices aux bornes desquelles on applique une tension (cf. 3.3.2.1) générant une force faisant fléchir l'électrode mobile vers son électrode d'actionnement (cf. Figure 3.5), permettant au switch d'alterner entre l'état ouvert et l'état fermé.

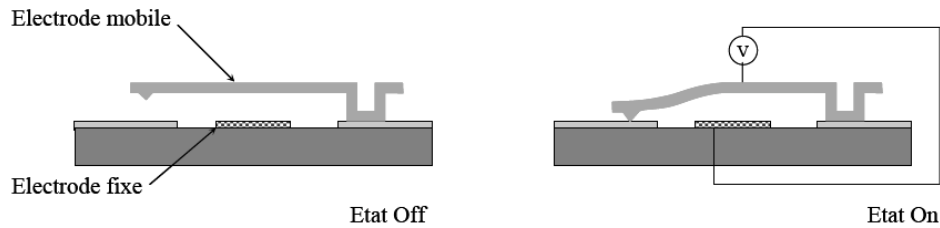


Figure 3.5 Mise en oeuvre d'une commande électrostatique dans un switch [Pot03]

Lors de l'absence de potentiel, l'effort de rappel dû à l'élasticité de la poutre permet le retour dans la position d'origine.

Nous sommes donc en présence de deux principes physiques : électrostatique et mécanique. Ces principes sont couplés, puisque certains paramètres géométriques sont des variables qui interviennent dans les deux principes physiques. Il est possible d'explicitier plus distinctement le rôle de chaque principe physique dans le comportement du produit :

- L'expertise électrostatique permet d'exprimer la relation entre la tension d'application, l'effort de rappel, la surface de l'électrode, le gap et certains paramètres géométriques de la poutre, comme nous l'avons présenté dans la partie 3.3.2.1, via l'Équation 3.1 et l'Équation 3.2.
- L'expertise mécanique permet d'exprimer la relation liant l'effort de rappel en fonction du gap et des paramètres géométriques de la poutre et du matériau la constituant via la loi de Hooke, Équation 3.3 présentée dans la partie 3.3.2.2.
- L'expertise matériaux fournit les informations nécessaires à l'expertise mécanique (valeur du module d'Young de la structure du cantilever) sous la forme classique d'un échange de données.

Chaque expert semble ainsi pouvoir traduire l'ensemble de ses propres contraintes en termes de restriction sur les domaines de validité des paramètres géométriques. C'est effectivement possible, jusqu'à un certain stade de la conception, où les prises de décision sont directement issues de connaissances couplées. C'est le cas des calculs de la tension d'actionnement et de la raideur minimale de la poutre :

- La tension d'actionnement est la tension nécessaire pour faire passer le switch de "l'état off" à "l'état on". Nous verrons dans la partie 4.2 que la force de rappel évolue linéairement en fonction du déplacement de la poutre alors que la force électrostatique évolue avec le carré de ce déplacement. Cela implique un phénomène instable lors de l'établissement du contact : la poutre commence à fléchir sous l'application de la tension puis se plaque brusquement contre la zone de contact. La valeur du seuil de la tension pour laquelle le plaquage se produit est une connaissance issue d'expertises

couplées entre les métiers de la mécanique, de l'actionnement électrostatique, des matériaux retenus et des équipes de caractérisation. Elle ne peut être rattachée à aucun métier particulier : aucun expert ne peut, seul, définir le seuil de la tension de plaquage.

- La raideur minimale de la poutre est la raideur nécessaire pour que la structure ne reste pas collée au niveau des contacts lors de l'absence de tension, mais retrouve sa position initiale. L'expertise mécanique permet d'exprimer la relation liant l'effort en bout de poutre en fonction de sa raideur. Mais la valeur du seuil de la raideur à partir duquel le retour de la poutre est garanti est une expertise couplée, issu de l'étroite collaboration entre les experts mécanique, matériaux et les équipes de caractérisation. L'expertise mécanique, prise en compte indépendamment des autres, ne permet pas d'exprimer la raideur minimum en bout de poutre. La valeur de cette raideur n'est donc pas liée à un métier particulier.

3.4.3 La gestion des couplages dans les modèles-produits existants

Nous avons illustré, via les deux exemples précédents, le fait que certaines décisions, au cours du processus de conception d'un microproduit, ne pouvaient être prises sans expertises (connaissances ou règles expertes) n'étant pas rattachées à un métier particulier. Ainsi, il n'est pas suffisant que les différents acteurs de la conception d'un tel produit travaillent avec leurs propres outils, modèles experts et partagent ensuite leurs informations, recommandations ou contraintes issues de leurs propres analyses. Nous pensons donc que les modèles-produits existants peuvent présenter certaines limites lors de la conception de microproduits, (cf. parties 2.3 & 2.4) notamment du fait que :

- La notion de couplage ne peut pas se modéliser au sein d'une *vue métier* tel que définie par [Cha97] (voir partie 2.3), puisque l'expertise résultant de l'étude de principes couplés est issue de plusieurs métiers.
- Le travail de chaque expert au sein de sa propre *vue* et le partage des informations conduisant à l'émergence du produit sous l'expression des contraintes formulées par chacun ne permet pas la mise en place d'une collaboration suffisante pour la gestion des couplages.

Nous ne nions cependant pas les avantages et intérêts des modèles existants que nous avons soulignés dans le chapitre 2. Nous n'avons pas la prétention non plus de proposer un modèle-produit dans un état de maturité aussi avancé que les outils existants. Le modèle que nous proposons dans la partie 3.6 à plutôt pour objectif de venir enrichir les modèles existants, afin que ces derniers soient plus adaptés aux spécificités des microproduits.

3.5 Le concept de fabricabilité

3.5.1 Définition

Les microproduits, comme nous l'avons présenté dans la partie 1.2.3 sont fabriqués soit avec des techniques issues de l'industrie du silicium, soit par la miniaturisation de procédés habituellement utilisés pour la fabrication des "macros" produits. Compte tenu de la taille des microproduits et des motifs les constituant (épaisseur d'une poutre ou largeur d'un canal) ces systèmes sont généralement fabriqués dans leur globalité avec un minimum d'opérations d'assemblage.

Nous définissons comme "fabricabilité" la mise en relation des informations concernant les paramètres du produit (issus de la gestion des couplages multiphysiques) avec les informations relatives aux procédés de fabrication et à l'ensemble du système de production. Ceci a pour objectif de garantir, à chaque fois qu'une plage de valeur sur un des paramètres géométriques du produit est fixée, qu'il sera possible de réaliser ces formes géométriques au sein du produit final. La fabrication du produit doit être prise en compte globalement et non localement. Il n'est donc pas garanti qu'il existe des procédés de fabrication capable de réaliser l'ensemble des géométries souhaitées. Nous insistons donc sur le fait d'intégrer les contraintes liées aux capacités des procédés de fabrication à chaque fois qu'une proposition géométrique du produit est disponible, sans attendre que celle-ci soit figée.

Certes la nécessité d'intégrer les contraintes de fabrication dans le processus de conception n'est pas quelque chose de spécifique aux microproduits. Toutefois, compte tenu des échelles où se situent ces produits, l'influence de la capacité des procédés de fabrication est importante car elle est susceptible de modifier le comportement attendu. C'est ce que rappelle [Mad02] en définissant ce qu'est la tolérance relative. La tolérance relative est définie comme le ratio de la tolérance absolue qu'un procédé est capable de réaliser par rapport à la taille du produit. Pour un procédé de fabrication classique, utilisé pour la réalisation de "macro" produits, la tolérance relative est de l'ordre de 10^{-6} . Pour des procédés de fabrication de microproduits issus de l'industrie du silicium, cette tolérance relative est plutôt de l'ordre de 10^{-2} , ce qui comparativement correspond à la précision dimensionnelle utilisée pour la construction d'une maison, voir Figure 3.6

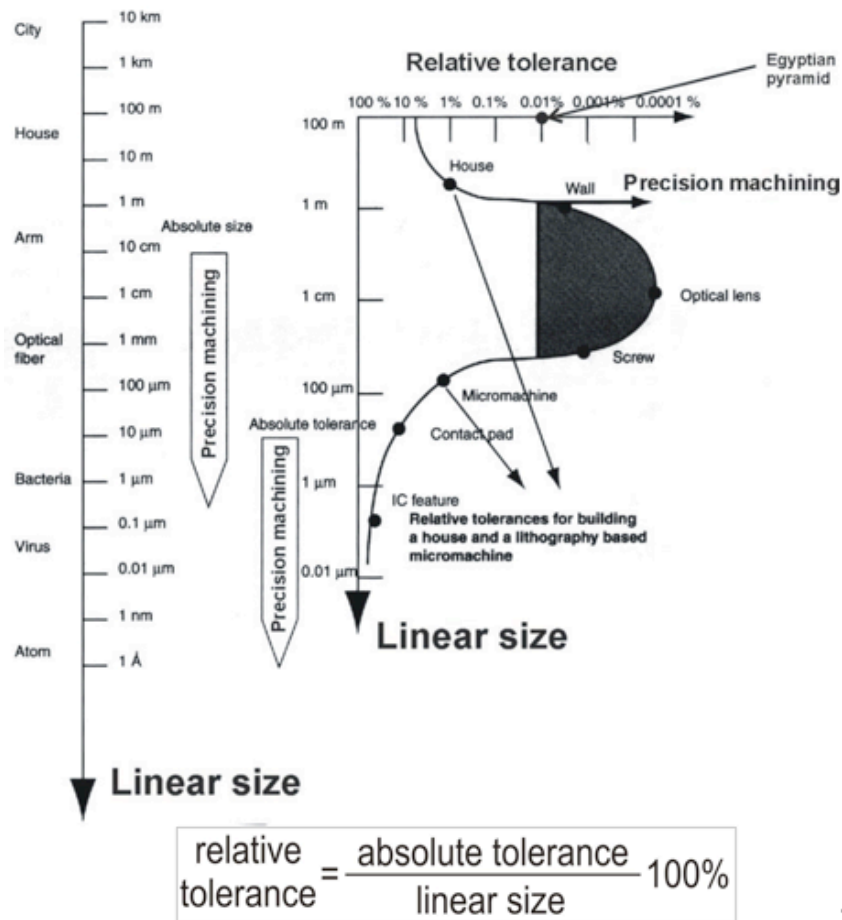


Figure 3.6 Tolérances relatives pour la fabrication de différents produits [Mad02]

La dépendance qu'il existe entre le produit, les procédés de fabrication et l'ensemble du système de production est extrêmement importante, comme le montre l'exemple développé ci-dessous.

3.5.2 Exemple : réalisation d'un système microfluidique

Cette partie a pour objectif d'illustrer la forte dépendance qu'il existe entre la géométrie d'un produit, le choix des procédés de fabrication et les contraintes liées au système de production. Pour cela nous allons présenter comment se sont effectués les choix des procédés pour la fabrication du système microfluidique réalisé en partenariat avec le LAT (Laboratory for Alternative Technologies, Lubljana, Slovénie).

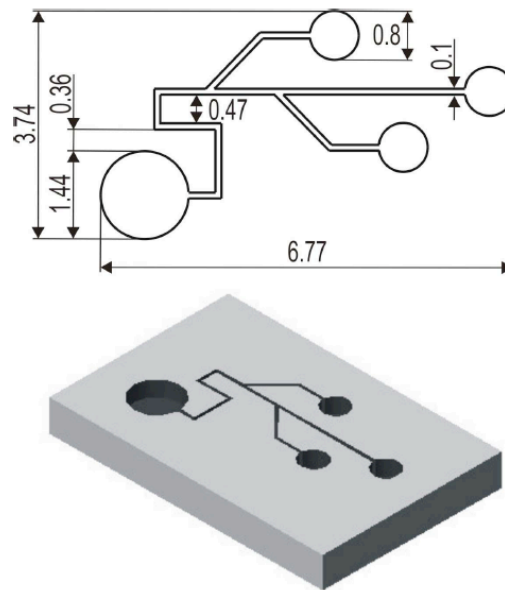


Figure 3.7 Système microfluidique : schéma et représentation géométrique 3D (dimensions en millimètres)

La représentation géométrique du produit que nous souhaitons réaliser est présentée Figure 3.7. Comme il doit être produit en grande série et pour des raisons économiques, un procédé de réplique de masse est envisagé. Le choix est fait de le réaliser par emboutissage à chaud et les contraintes relatives à la géométrie du produit se reportent à présent sur son outillage : il s'agit maintenant de choisir des procédés de fabrication capable de réaliser la matrice d'emboutissage. Les procédés capables d'usiner des matériaux durs (telle une matrice d'emboutissage) que nous avons à notre disposition sont les usinages par micro jet d'eau et micro EDM (Electro Discharge Machining).

L'usinage par micro jet d'eau consiste à enlever de la matière par érosion en projetant de l'eau à haute pression (>400 MPa) sur le matériau. Compte tenu de la pression utilisée, ce procédé peut être employé pour l'usinage de matériaux durs, tels ceux utilisés pour la fabrication d'une matrice d'emboutissage. Le procédé disponible pour réaliser le produit possède une buse permettant d'obtenir une largeur de jet d'eau comprise entre 0,03 et 0,8 millimètres, ce qui semble convenir pour la réalisation des motifs de la matrice. Cependant bien qu'il soit possible de contrôler précisément le déplacement du jet d'eau dans deux dimension, la profondeur du jet est très difficile à maîtriser. En conséquence de la perte d'énergie du flux et des difficultés d'évacuer le liquide, la précision des formes obtenues n'est acceptable que sur une profondeur limitée des rainures usinées. L'état de surface et la rugosité au delà d'une certaine profondeur et au niveau du fond des surfaces usinées ne rend pas ce procédé capable de réaliser une matrice d'emboutissage ayant la qualité désirée.

L'autre procédé disponible est l'usinage par micro EDM (MEDM) dont les principales différences avec l'usinage par EDM classique sont exposées dans [Bla06]. Cette technique de fabrication permet de reproduire les motifs d'une électrode sur une pièce métallique, grâce à

une succession de décharges électriques produites entre l'électrode et la pièce. Cet espace entre l'électrode et la pièce où se produisent les décharges électriques est appelé gap et contient un liquide diélectrique permettant la formation de la décharge. Ce procédé de fabrication a pour avantage, outre son aptitude à usiner des matériaux durs, de pouvoir reproduire fidèlement les motifs de l'électrode sur le matériau usiné. La problématique consiste donc à trouver des procédés capables de réaliser les motifs de l'électrode. Nous avons la possibilité d'utiliser l'usinage par micro jet d'eau présenté précédemment, puisque la buse est capable de réaliser d'obtenir des motifs dont la largeur est comprise entre 0,03 et 0,8 millimètres, d'une qualité acceptable jusqu'à une certaine profondeur. Or cette profondeur acceptable des motifs réalisés sur l'électrode par jet d'eau est plus importante que celle requise par la suite pour la réalisation de la matrice d'emboutissage.

Il est donc possible d'utiliser d'abord l'usinage par micro jet d'eau pour la réalisation de l'électrode, puis le EDM pour la réalisation de la matrice d'emboutissage. La combinaison des deux procédés permet donc la réalisation de l'outillage, comme le montre la Figure 3.8.

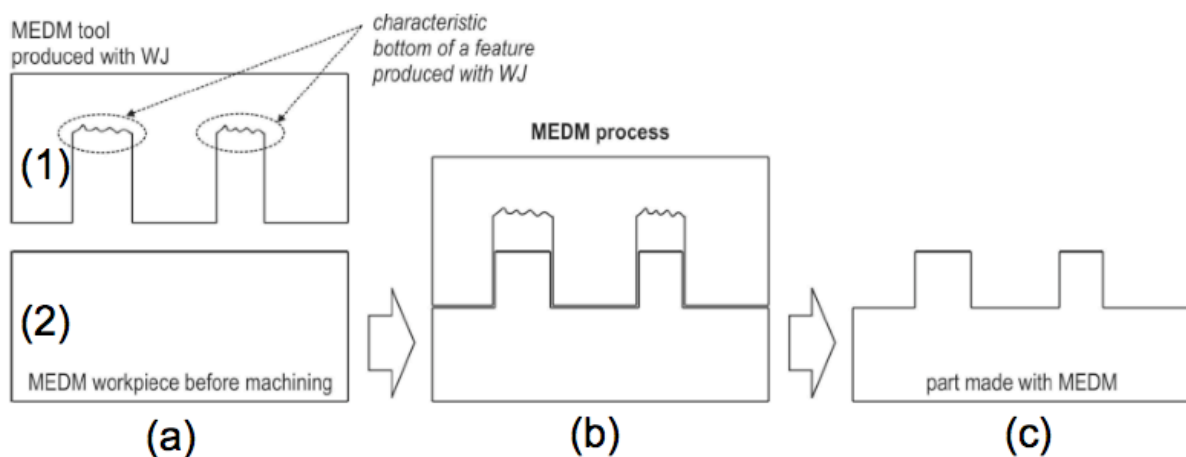


Figure 3.8 Réalisation de la matrice d'emboutissage

Cette figure représente les trois étapes de la fabrication de la matrice (étapes a, b et c) via l'utilisation d'une électrode et la combinaison de deux procédés de fabrications.

- Dans l'étape (a), l'électrode utilisée par la suite dans l'opération de EDM (pièce n°1) est réalisée par micro jet d'eau abrasif : l'état de surface et la rugosité au fond des motifs ne sont pas satisfaisants.
- Dans l'étape (b), la matrice d'emboutissage (pièce n°2) est usinée par EDM. Les motifs pour lesquels l'état de surface n'est pas satisfaisant n'interviennent pas dans la réalisation de la matrice : la profondeur des motifs réalisés par micro jet d'eau est plus importante que celle requise, comme nous l'avons précisé (ce schéma ne représente pas le gap existant entre l'électrode et la matrice).

- Dans l'étape (c), la matrice d'emboutissage est réalisée : l'outillage est prêt pour la fabrication du produit.

Le choix de ce système de production implique certaines modifications géométriques sur le produit final : lors de la réalisation de la matrice d'emboutissage par MEDM, du fait des décharge électrique, l'électrode s'use au fur et à mesure de la réalisation de la matrice, voir Figure 3.9, l'électrode avant et après réalisation de l'outillage. Il en résulte que les motifs transférés au final sur la matrice ne sont pas verticaux mais légèrement coniques (cf. Figure 3.10) et il est impératif de prendre en compte cette "modification" géométrique qui se répercutera sur le produit final , pour obtenir un microproduit performant.

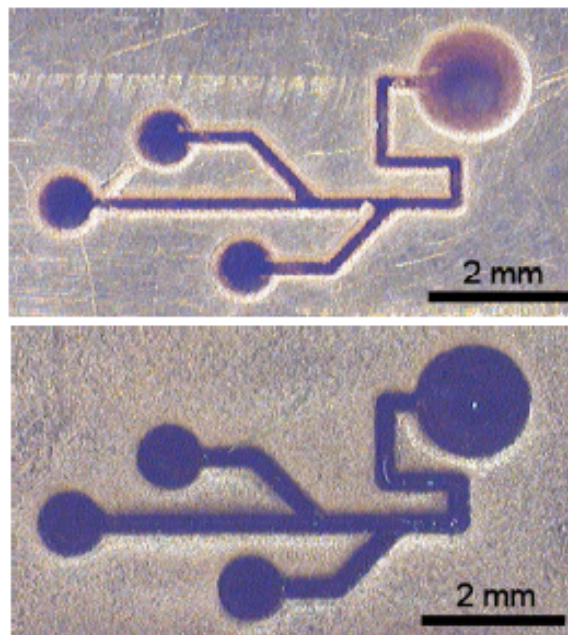


Figure 3.9 Électrode avant (en haut) et après (en bas) réalisation de la matrice d'emboutissage

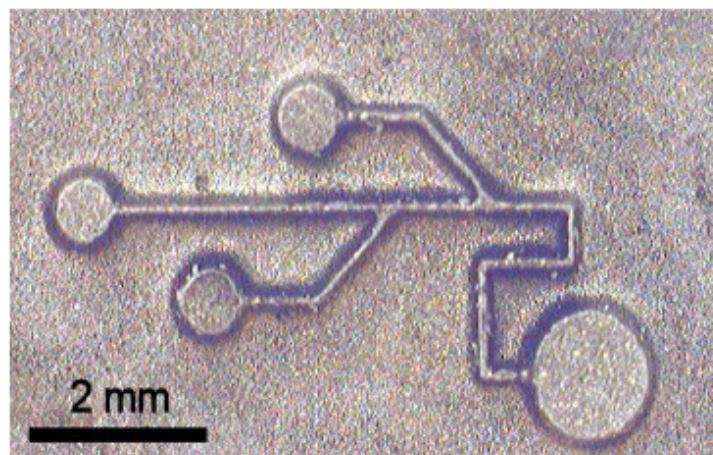


Figure 3.10 Matrice d'emboutissage réalisée par micro EDM

Cet exemple montre donc la forte dépendance existante entre le produit (le système microfluidique) le procédé de fabrication retenu (l'emboutissage à chaud) et l'ensemble du système de production (incluant la réalisation de la matrice d'emboutissage). Il est nécessaire de prendre en compte les informations relatives à la réalisation du produit afin de s'assurer que les paramètres retenus sont fabricables et d'intégrer les éventuelles modifications dues aux procédés retenus. Il s'agit donc de garantir la qualité requise du produit à partir des capacités des différents procédés de fabrication intervenants dans le système de production.

3.6 Organisation des concepts présentés au sein d'un modèle de microproduits

3.6.1 Objectifs

Dans cette partie, nous présentons comment les concepts présentés précédemment peuvent être intégrés dans un modèle de microproduit. Ce modèle a pour objectif de représenter le produit et des informations s'y rapportant tout au long du processus de conception. Nous présentons tout d'abord brièvement le langage utilisé pour modéliser le produit. Puis nous décrivons chaque élément constituant le modèle du produit.

3.6.2 Modélisation de produits par l'UML

UML (Unified Modeling Language) est un langage graphique de modélisation des données qui permet de représenter les divers aspects d'un système complexe. Ce n'est pas une méthode, c'est-à-dire une description normative des étapes de modélisation, ses auteurs ayant estimé qu'il n'était pas opportun de définir une méthode compte tenu de la diversité des cas particuliers. La norme UML 2.0 comporte treize type de graphes permettant de représenter des concepts particuliers. Ces graphes, d'une utilité variable selon les cas ne sont pas tous produits à l'occasion d'une modélisation. Dans notre cas, afin de permettre la représentation d'un microproduit tout au long de son processus de conception nous n'allons utiliser que deux types de graphes : les diagrammes de classes et d'objets. Ces diagrammes sont fortement liés puisque, comme nous allons le préciser, les objets sont définis comme des instances de classes.

3.6.2.1 Classes et objets

Une classe est la description formelle d'un ensemble d'objets ayant une sémantique et des propriétés communes. Les concepts "d'objet" et de "classe" sont donc interdépendants, puisqu'un objet appartient à une classe (c'est une instance de classe) et une classe décrit la structure et le comportement commun d'objets, via la description d'attributs et de méthodes. Dans notre cas, seuls les attributs sont utilisés. Ces attributs représentent les données

encapsulées dans les objets de la classe. Ne pas représenter les attributs d'une classe ne signifie pas que celle-ci n'en contient pas, il s'agit juste d'un filtre visuel destiné à donner un certain niveau d'abstraction de la classe. Par exemple, la classe "Voiture" contient un certain nombre d'attributs comme la marque, la puissance fiscale et le propriétaire, qui sont encapsulées dans tous les objets de la classe. La représentation graphique d'une classe se compose d'un rectangle dans lequel sont inscrits le nom de la classe et ses attributs, voir Figure 3.11.

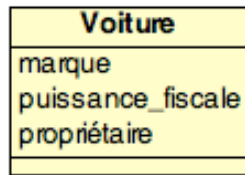


Figure 3.11 Représentation de la classe voiture

Un objet est donc une instance de classe. Par exemple l'objet "2cv" est une instance de la classe "Voiture" et possède les mêmes attributs que l'on peut, ou non, préciser en fonction du niveau d'abstraction souhaité.

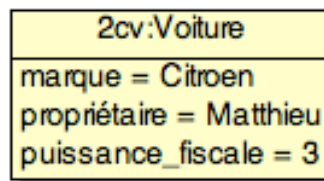


Figure 3.12 Instance de la classe voiture

3.6.2.2 Associations entre différentes classes

Un diagramme de classe représente les classes et leurs associations. Une association est une relation entre deux classes ou plus, qui décrit les connexions structurelles entre leurs instances. L'association est souvent complétée par une multiplicité, définissant le nombre d'objets susceptibles d'occuper la position définie par la terminaison d'association. Les exemples de multiplicité que l'on trouve fréquemment sont :

- Exactement un : 1 ou 1..1
- Plusieurs : * ou 0..*
- Au moins un : 1..*
- De un à six : 1..6

La Figure 3.13 modélise par exemple, qu'un polygone est défini par trois points au minimum.

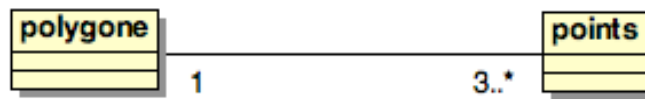


Figure 3.13 Exemple de multiplicité : nombre minimum de points dans un polygone

Certaines associations possèdent des spécificités et leur représentation graphique diffère. C'est le cas de l'agrégation et de la classe association, que nous utilisons dans le modèle de microproduit présenté dans la partie suivante. L'agrégation est une relation non symétrique qui exprime une relation structurelle d'un élément dans un ensemble. Graphiquement, un losange vide est ajouté du côté de l'agrégat. La Figure 3.14 montre une relation de type agrégation : l'entreprise possède au moins un camion.

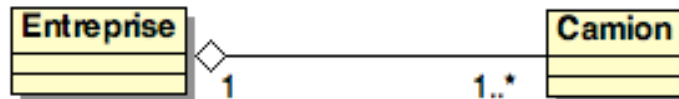


Figure 3.14 Relation d'agrégation

L'autre relation particulière que nous allons utiliser est la classe association. Elle possède à la fois les propriétés des classes et des associations, se connecte à deux ou plusieurs classes et possède également des attributs. Graphiquement, elle est représentée par un trait discontinu entre la classe et l'association qu'elle représente. Par exemple, Figure 3.15, la classe "Cours" réalise une association entre le professeur et les étudiants et les paramètres qui caractérisent cette association sont précisés dans les attributs de la classe, dans ce cas il s'agit du jour du cours et des horaires de début et de fin.

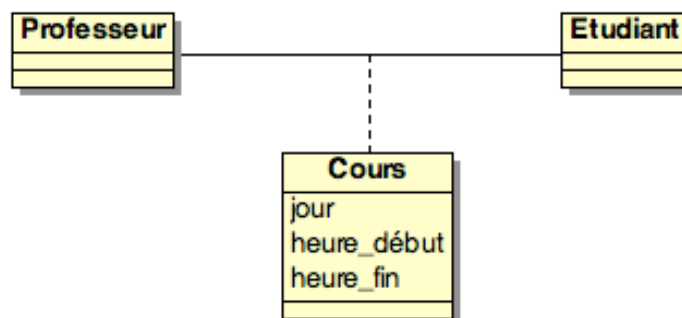


Figure 3.15 Exemple d'une classe association

Nous avons à présent défini l'ensemble des éléments issus de la norme UML que nous utilisons afin de proposer un modèle de microproduits.

3.6.3 Un modèle de microproduits

Le modèle que nous proposons a pour objectif de supporter la représentation d'un microproduit pendant son processus de conception, en intégrant les concepts présentés auparavant. Pour cela, nous utilisons le langage de modélisation UML et le modèle proposé est composé de sept classes, voir Figure 3.16.

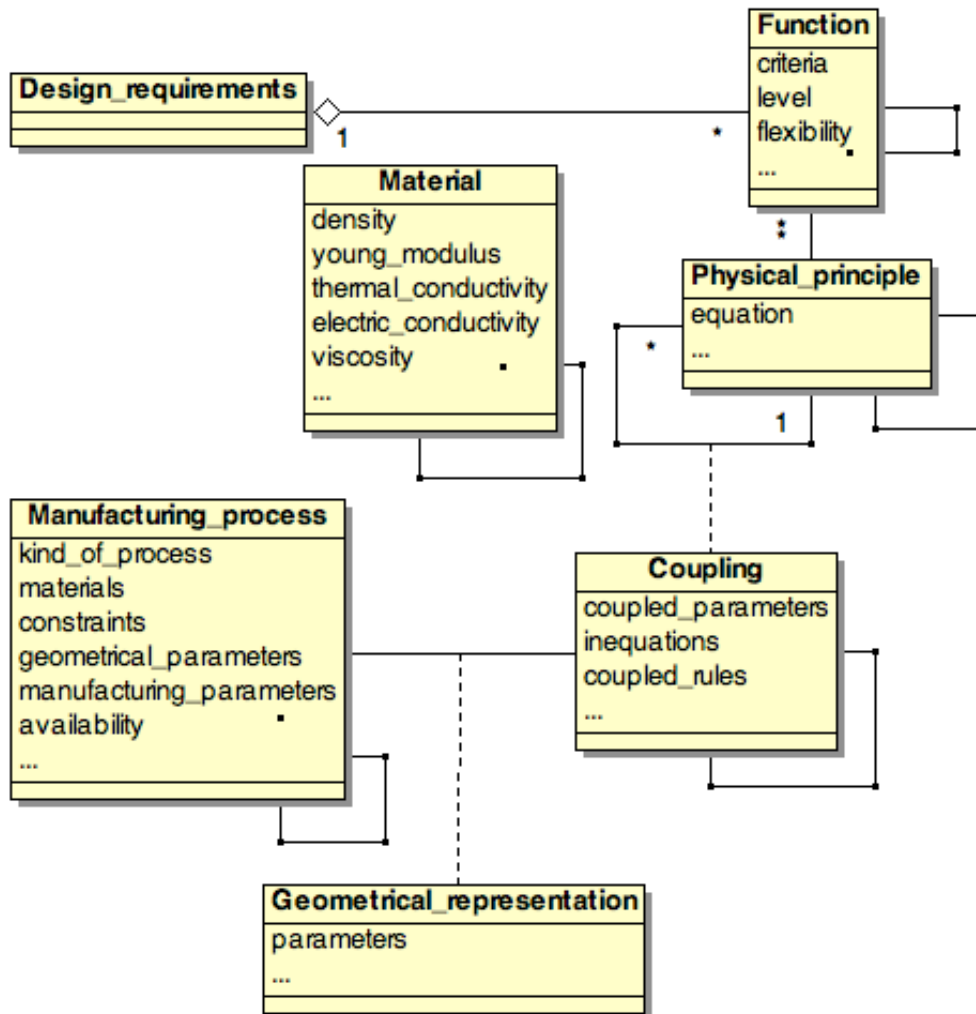


Figure 3.16 Modélisation d'un microproduit

- La classe "Design_requirement" contient l'expression des besoins du client. C'est le cahier des charges du produit contenant des critères, contraintes et au minimum l'expression d'une fonction que le produit doit remplir. Nous avons choisi de ne pas décrire les attributs du cahier des charges : comme nous l'avons précisé dans la partie 3.6.2.1, cela ne signifie pas qu'ils ne sont pas définis, mais que nous choisissons de ne pas les expliciter de manière à ce que le niveau d'abstraction de la représentation soit

suffisamment élevé afin de pouvoir modéliser le cahier des charges du plus grand nombre de produits.

- La classe "Function" représente les fonctions que doit remplir le produit. Elle est utilisée de manière à expliciter le concept de fonction que nous avons présenté : les objets de cette classe sont donc les fonctions que doit remplir le produit, telles que nous les avons définies dans la partie 3.2.1. Afin d'évaluer la performance des fonctions à réaliser, nous avons complété cette classe par les attributs "critère", "niveau" et "flexibilité".
- La classe "Physical_principle" modélise les principes physiques mis en œuvre pour réaliser les fonctions, selon la définition proposée dans la partie 3.3.1. Une fonction peut être réalisée par un ou plusieurs principes physiques et un principe physique peut réaliser une ou plusieurs fonctions, ce qui explique les valeurs de multiplicité retenues. Chaque principe peut être modélisé notamment par son équation, que nous avons déclaré comme attribut.
- La classe "Coupling" représente la gestion des couplages entre les différents principes physiques retenus, sous la forme d'une classe d'association, permettant la navigation entre les instances de la classe "Physical_principle". Cette navigation permet d'abord de lister les paramètres couplés et d'expliquer les inéquations définissant les domaines de validité que les paramètres doivent respecter pour que les fonctions soient remplies. Elle permet ensuite de représenter les règles qui ne sont pas propres à un métier particulier, mais issues de la gestion des couplages.
- La classe "Manufacturing_process" permet la représentation de tous les procédés de fabrication impliqués pour la réalisation du produit (et/ou de son outillage). Elle a pour objectif de représenter l'ensemble des informations nécessaires pour estimer la fabricabilité du produit. Chaque procédé est décrit par l'intermédiaire d'un certain nombre d'attributs, nous en avons listé quelques-uns sans prétendre être exhaustif. Par exemple, la nature du procédé (procédé de fabrication du produit ou de son outillage), les matériaux travaillés, l'expression de contraintes (par l'exemple la taille maximale du moule pour un procédé d'injection plastique), formes géométriques pouvant être réalisés, la disponibilité du procédé, etc.
- La classe "Material" modélise les informations concernant les matériaux utilisés lors de la réalisation du produit (et/ou de son outillage). Elle a pour attributs toutes les données caractéristiques du matériau, nous en avons proposé quelques-unes, encore une fois, sans prétendre être exhaustif. Du point de vue de la représentation UML, elle n'est pas associée *graphiquement* aux autres classes, pour des raisons de lisibilité du modèle. Mais elle est bel et bien associée à toute classe faisant référence à une instance de la classe matériau ou à l'un de ces attributs (comme spécifié dans la norme

UML 2.0). Ce qui signifie par exemple qu'un principe physique faisant intervenir, dans une équation, le module d'Young d'un matériau (qui est un attribut de la classe "Material") déclenche automatiquement l'association entre les deux instances de classe.

- La classe "Geometrical_représentation", comme la classe "Coupling" est une classe association. Son objectif est de permettre la navigation entre les instances des classes "Coupling" et "Manufacturing_process" de manière à proposer une représentation géométrique du produit garantissant sa fabricabilité et le respect des fonctions attendues, quels que soient le niveau et la précision de la représentation du produit, en fonction de l'avancement du processus de conception. Cette représentation du produit est [Cha97] "une description du produit par des modèles géométriques permettant d'appliquer au produit des raisonnements géométriques. Elle n'est propre ni a un métier, ni a un intervenant en particulier". En effet, un grand nombre de métier fait appel à une représentation géométrique du produit sans qu'il y ait un spécialiste géométrie.

Les classes du modèle proposé (à l'exception des classes "Design_requirement" et "Geometrical_representation") sont également associées à elles-mêmes, ce qui signifie une "référence à un niveau d'abstraction supérieur", tel que défini par [Lov06]. D'un point de vue pratique, cela permet, lors du processus de conception d'un produit, de faire référence à un certain nombre de données formalisées lors des conceptions précédentes et stockées dans une base de données en vue d'être réutilisées :

- Nous avons montré que les fonctions remplies et les principes mis en œuvre dans les microproduits ne sont pas infinis et nous en avons listé quelques uns. Par la "référence au niveau d'abstraction supérieur" nous rendons possible d'utiliser des informations relatives aux fonctions et principes physiques précédemment formalisés et réutilisables dans certains cas. Par exemple l'équation de la force électrostatique, associée au principe physique "électrostatique", est stockée dans la base de donnée et disponible par la suite pour la conception de tout produit utilisant ce principe physique.
- Les procédés de fabrication utilisés par une entreprise ou un laboratoire pour la fabrication des microproduits ne sont pas infinis non plus, ils dépendent du matériel mis à leur disposition. Ce modèle rend donc possible de créer une base de données regroupant les procédés disponibles et leurs propriétés, via les valeurs des attributs de la classe "Manufacturing_process". Les informations relatives à un procédé retenu lors d'une conception future sont donc rapidement disponibles. Le raisonnement est identique pour les matériaux utilisés : pour chaque produit conçu, il sera possible de

réutiliser les informations relatives aux matériaux mis en œuvre dans les conceptions précédentes et dont les caractéristiques auront été stockées dans une base de données.

- La gestion des couplages peut se faire dans deux contextes distincts, que nous avons détaillé dans la partie 3.4.1. Dans le cas où des connaissances issues de plusieurs métiers sont formalisées sous forme de règles pouvant être réutilisées par la suite, la mise en place d'une "référence au niveau d'abstraction supérieur" au niveau de la classe "Coupling" permet de faire le lien avec ces règles, sans avoir recours à nouveau à l'étroite collaboration de différents spécialistes qui est nécessaire au moment de la formalisation de l'association de leurs expertises (expertises couplées).

Ce modèle est à la disposition de l'ensemble des acteurs participants à la conception d'un microproduit, tous y ont accès et peuvent ainsi voir ou exprimer des informations relatives au produit. Le premier intérêt de ce modèle est que la représentation des informations est structurée, en tenant compte des spécificités des produits conçus :

- L'association entre fonctions et principes physiques permet d'explicitier l'influence de chaque principe sur le comportement du produit.
- L'association entre les différents principes physiques permet l'identification et la gestion des paramètres couplés du produit. Il rend également possible l'identification des spécialistes impliqués dans les phénomènes de couplages de manière à déclencher l'étroite collaboration nécessaire à la formalisation de connaissances couplées, lorsque cela n'a pas déjà été fait par le passé.
- L'association entre les paramètres géométriques couplés et les procédés de fabrication permet de proposer une représentation géométrique qui soit fabricable et respecte les fonctions attendues, quel que soit le moment où elle est proposée dans le processus de conception.

Le second intérêt du modèle est de permettre la formalisation d'un grand nombre de données (connaissances, informations, règles expertes) relatives aux fonctions et principes physiques mis en œuvres, procédés de fabrication, matériaux utilisés et surtout aux couplages multiphysiques. Ces données, formalisées au sein d'une base qui ne cesse donc de s'enrichir, sont disponibles pour les conceptions futures, sous certaines conditions de validité exprimées lors de leurs formalisations.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle proposant une représentation structurée des microproduits et la formalisation d'expertises, métiers ou couplées relatives à ces produits. Cette représentation permet la prise en compte des couplages multiphysiques et l'intégration de la fabricabilité au cours du processus de conception des microproduits. Le chapitre suivant présente la représentation de deux microproduits, au cours de leur conception, en utilisant le modèle proposé.

Chapitre 4

Exemples : utilisation du modèle lors de la conception de deux microproduits

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'aptitude du modèle présenté dans le chapitre précédent à supporter la représentation de microproduits lors de leur conception. Nous avons choisi pour cela de modéliser deux microproduits suffisamment différents afin de montrer la généralité du modèle et son aptitude à supporter la conception d'un nombre de produits variés. Le premier système modélisé est un MEMS switch RF, réalisé par des techniques VLSI. L'autre produit est un système microfluidique, réalisé par injection plastique. Nous montrons comment le modèle peut être utilisé et à travers des deux exemples, quelles informations sont supportées et quelles sont les différentes évolutions du modèle liées aux prises de décisions.

Afin de justifier les différentes prises de décisions, nous avons besoin de nous appuyer sur différentes expertises et nous précisons dans tous les cas si celles-ci peuvent être rattachées à un métier particulier ou si ce sont des expertises couplées. De plus, nous séparons, dans chacun des exemples, les informations relatives aux principes physiques mis en œuvre et aux procédés de fabrication retenus avant d'aborder la description du processus en lui-même et les évolutions du modèle qui y sont liées. Cette séparation est effectuée pour plus de clarté afin que nous puissions justifier les différentes évolutions du modèle en nous référant à des expertises précédemment explicitées.

4.2 Utilisation du modèle lors de la conception d'un MEMS switch RF

4.2.1 Expression des besoins du client

Le produit modélisé dans cette partie est un MEMS switch RF, c'est-à-dire un micro interrupteur. Les fonctions que doit remplir le produit sont :

- Permettre, ou non, le passage d'un courant d'une zone à l'autre du produit
- Alternner entre les deux états

Cette fonction est généralement assurée par la mise en mouvement d'une structure mobile de type poutre, mouvement s'effectuant entre deux états stables. L'un des états stable permet

le passage du courant, l'autre non. En plus des fonctions exprimées, le produit conçu doit valider un certain nombre de critères :

- Être le plus économe possible en énergie
- Minimiser les pertes de signal lors du passage du courant d'une zone à l'autre
- Être compatible avec un procédé de fabrication de masse de type VLSI afin de réaliser simultanément les parties électriques et mécaniques du produit.

D'autres critères peuvent également être pris en compte, comme le temps de commutation entre les deux états stables ou la température maximum admissible pour la réalisation de la partie mécanique mobile (en vue de protéger la partie électronique de commande) mais, pour simplifier, nous ne prenons pas en compte ces critères supplémentaires au cours du traitement de l'exemple.

4.2.2 Principes physiques mis en œuvre

Les principes physiques mis en œuvre sont ceux qui vont permettre l'actionnement de l'élément mobile et son retour dans sa position initiale. Concernant l'actionnement, plusieurs technologies existent aujourd'hui et différents principes physiques peuvent être utilisés. Au cours de la conception du produit, il faudra choisir un principe physique qui soit compatible avec les critères exprimés précédemment, en particulier la consommation minimale d'énergie. Les connaissances qui permettent de s'orienter rapidement vers le choix du principe physique retenu vis-à-vis de ce critère sont des connaissances couplées, issues de formalisation lors de conceptions antérieures. Nous avons montré par exemple dans la partie 3.4.2 que les connaissances permettant de s'orienter vers la réalisation d'un switch par actionnement thermique en fonction de certains critères, dont la puissance minimale consommée, étaient couplées entre plusieurs métiers.

Pour le choix du principe physique d'actionnement, nous nous appuyons donc sur les expertises couplées relatives aux performances énergétiques des principes d'actionnement existants, expertises formalisées par [Pot03] au cours de ses travaux de thèse concernant la conception de micros commutateurs :

- L'actionnement électrostatique nécessite une tension d'application généralement comprise entre 10 et 100 V et un courant de l'ordre du micro-Ampère. Cependant il ne nécessite au final qu'une faible puissance, car il n'y a consommation de courant que lors des mouvements de la structure. Immobile, le composant ne nécessite pas de puissance, uniquement l'application d'un potentiel pour le maintenir dans l'un des deux états stables, en position fermée.

- L'actionnement thermique nécessite des tensions d'application plus faibles que l'actionnement électrostatique, de l'ordre de 5V, mais un courant de l'ordre de quelques milli-Ampère est nécessaire à la fois pour permettre le mouvement de la structure et pour son maintien en position fléchie. Ce type d'actionnement consomme au final plus de puissance que l'actionnement électrostatique.
- Une commande magnétique, même si elle met en œuvre des tensions d'application inférieure à 10V consomme au final plus de puissance qu'un actionnement électrostatique à cause de la résistance de l'inductance utilisée pour la commande.
- L'actionnement piézo-électrique a des performances énergétiques similaires à l'actionnement électrostatique. Cependant, il est assez peu utilisé en raison des fortes températures nécessaires pour réaliser le dépôt d'un film piézo-électrique ayant les propriétés requise pour permettre un déplacement de la partie mobile suffisant.

Le retour de l'élément mobile en position initiale se fait grâce à la propre élasticité de la poutre. La loi de comportement décrivant ce principe est la loi de Hooke, que nous avons déjà présentée dans la partie 3.3.2.2.

4.2.3 Procédés de fabrication du produit

Le produit est réalisé par des procédés VLSI. Comme nous l'avons rappelé dans la partie 1.2.3.1, cela nécessite l'organisation, au sein d'une séquence de fabrication, d'étapes élémentaires, comme le dépôt de matériaux (matériau de structure, couches sacrificielles...) ou la gravure de certaines parties du produit. Ce sont des opérations complexes qui nécessitent l'intégration d'un nombre important et varié d'informations au cours du processus de conception : difficultés d'adhérence d'un matériau sur le substrat, apparition de tensions superficielles lors de la libération de l'élément mobile (tensions susceptibles ensuite de modifier le comportement attendu), etc. Dans un soucis de simplification, nous allons nous concentrer sur les procédés capables de réaliser la partie mobile du microproduit.

Les procédés de fabrication retenus doivent garantir la fabricabilité du produit. Nous verrons dans la partie 4.2.4 que la réalisation de la partie mobile nécessite le dépôt d'une couche d'or d'une épaisseur supérieure à 3,5 μm . L'or est un matériau posant des problèmes d'adhésion. Pour y remédier, son dépôt doit être précédé de celui d'une fine couche de titane, d'une épaisseur de l'ordre de 20nm. Les procédés de fabrication capables d'effectuer les deux opérations successivement sont les procédés dits d'évaporation. Mais l'épaisseur de la couche d'or déposée ainsi est limitée : par exemple, le procédé "e-beam evaporation", dont les informations concernant ses capacités proviennent du site [Exc08] ne permet pas de déposer une couche d'une épaisseur supérieure à 1 μm , voir Figure 4.1.

Ebeam evaporation (CHA) on front	
Process characteristics:	
Adhesion layer material	titanium
Adhesion layer thickness <small>If no adhesion layer will be used, enter 0 for this field.</small>	20.0 nm 0 .. 50 nm
Material	gold
Perform sheet resistance measurement <small>One measurement per batch on a monitor wafer</small>	<input type="radio"/> yes <input checked="" type="radio"/> no
Thickness <small>Allowed thickness ranges:</small> Ag: 0 .. 0.5um Al: 0 .. 0.2um Au: 0 .. 1um Cr: 0 .. 0.5um Ge: 0 .. 0.025um Ni: 0 .. 1um Si: 0 .. 0.050um Pt: 0 .. 0.1um Ti: 0 .. 0.1um	1 μm 0 .. 1 μm
Wafer size	75 mm

[Rebuild example step](#)

Figure 4.1 Procédé d'évaporation utilisé pour le dépôt de la bicouche titane/or

Ainsi, pour atteindre l'épaisseur souhaitée, il faut ajouter une étape de fabrication supplémentaire : l'électrolyse, utilisée pour les dépôts de métaux avec des épaisseurs importantes, voir Figure 4.2.

DC electrodeposition	
Process characteristics:	
Material Material to be deposited.	gold
Microstructure Specify preferred microstructure of deposited film (if known).	
Residual stress Specify preferred residual stress in deposited film (if known). Positive values refer to tensile film stress.	1.0 MPa <i>unconstrained</i>
Thickness Thickness of film to be deposited.	4 μm <i>unconstrained</i>
Sides processed	either
Equipment	
Comments:	

Figure 4.2 Dépôt de métaux par électrolyse

4.2.4 Évolution du modèle au cours du processus de conception

La première décision prise, au cours du processus de conception du produit, est le choix du principe physique réalisant son actionnement. Compte tenu des critères à respecter, en particulier la faible consommation énergétique, le choix se porte sur un actionnement électrostatique, en raison de la faible puissance que nécessite son actionnement. Le déclenchement de cette première prise de décision est donc issu des expertises couplées relatives aux performances énergétiques des principes d'actionnement existants que nous avons rappelés dans la partie 4.2.2.

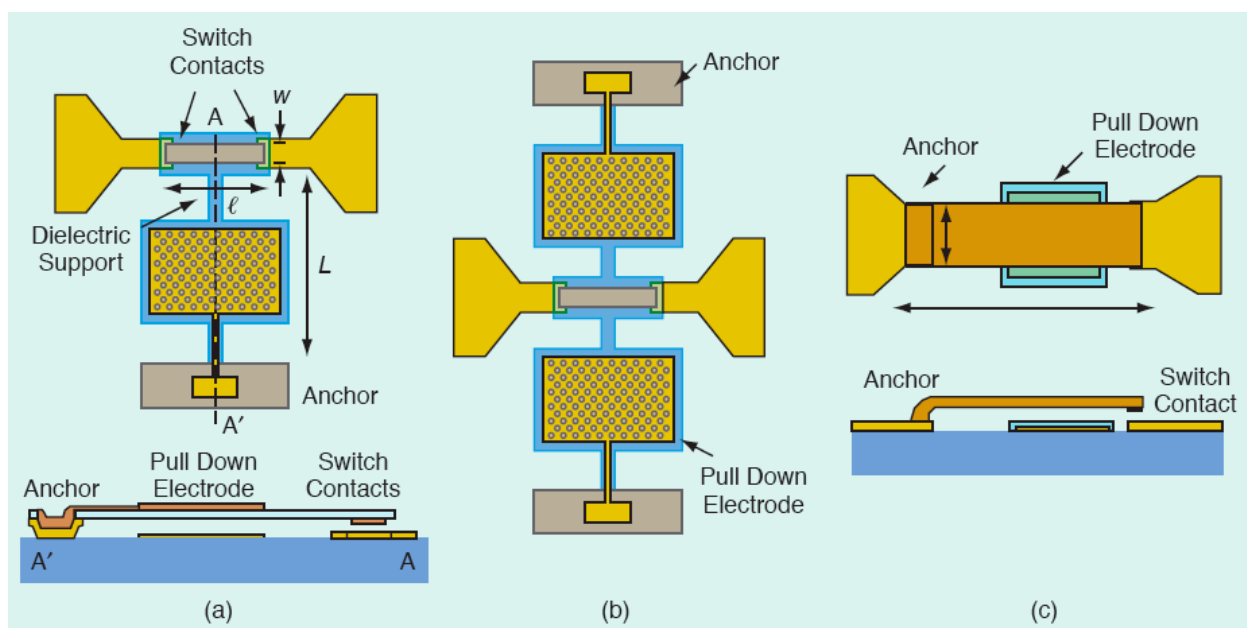


Figure 4.3 Différentes architectures de MEMS switch RF [Reb01]

La Figure 4.3 montre les architectures le plus souvent retenues aujourd'hui lorsque le principe physique utilisé pour l'actionnement est l'électrostatique [Reb01] :

- Le schéma (a) représente une structure mobile, en bleu, ancrée à l'une de ses extrémités et comprenant à l'autre extrémité une zone de contact, de longueur L et de largeur W, permettant le passage d'un courant à travers la zone de contact lorsque la poutre fléchie.
- Le schéma (b) représente une structure fonctionnant sur le même principe que la structure (a) mais comprenant deux électrodes d'actionnement, réparties de part et d'autre de la zone de contact.
- Le schéma (c) représente une autre technologie de switch, dans laquelle l'électrode d'actionnement est située sous la zone traversée par un courant lorsque la poutre suspendue fléchie.

La seconde prise de décision concerne le choix de l'architecture. Cette décision résulte d'expertises métier (matériaux et fabrication). Le choix est fait de se diriger vers la conception d'un produit ayant l'électrode d'actionnement située sous la zone traversée par le courant, (cf. Figure 4.3.c). Selon les expertises matériaux et fabrication, cette structure de type cantilever est tout d'abord plus facile à fabriquer, en raison de la relative simplicité de la géométrie mise en œuvre : la poutre suspendue, possède une section constante et n'est composée que d'un seul matériau (ce qui n'est pas le cas des deux autres structures ayant une électrode déportée, comme le montre la vue en coupe de la structure (a)). Ensuite, la structure de type cantilever est plus compacte que les deux autres. Enfin, par rapport à une structure ayant deux points d'ancrage (comme la structure (b)) la structure de type cantilever est moins sensible à la dilatation des matériaux induite par une augmentation de la température. En effet, les structures de type pont doublement encastrées peuvent présenter des problèmes dus au flambement provoqué par la dilatation des matériaux suite à une augmentation de la température.

La flexion de la poutre soumise à un actionnement électrostatique et les efforts résultants sont représentés Figure 4.4. À l'équilibre, en position fléchie, le principe fondamental de la statique nous permet d'établir une relation entre les trois efforts modélisés, voir Équation 4.1.

$$\vec{F}_{\text{actionnement}} = \vec{F}_{\text{rappel}} + \vec{F}_{\text{contact}}$$

Équation 4.1

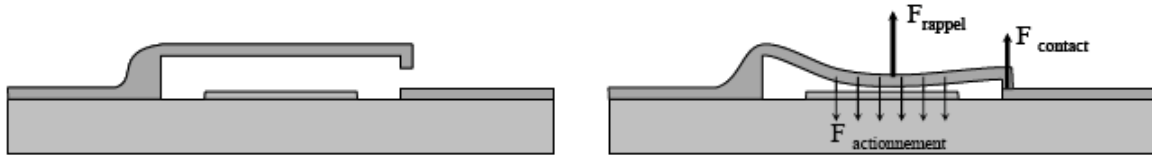


Figure 4.4 Déflexion d'une poutre soumise à un actionnement électrostatique [Pot03]

À ce moment du processus de conception, le produit est modélisé tel que présenté Figure 4.5.

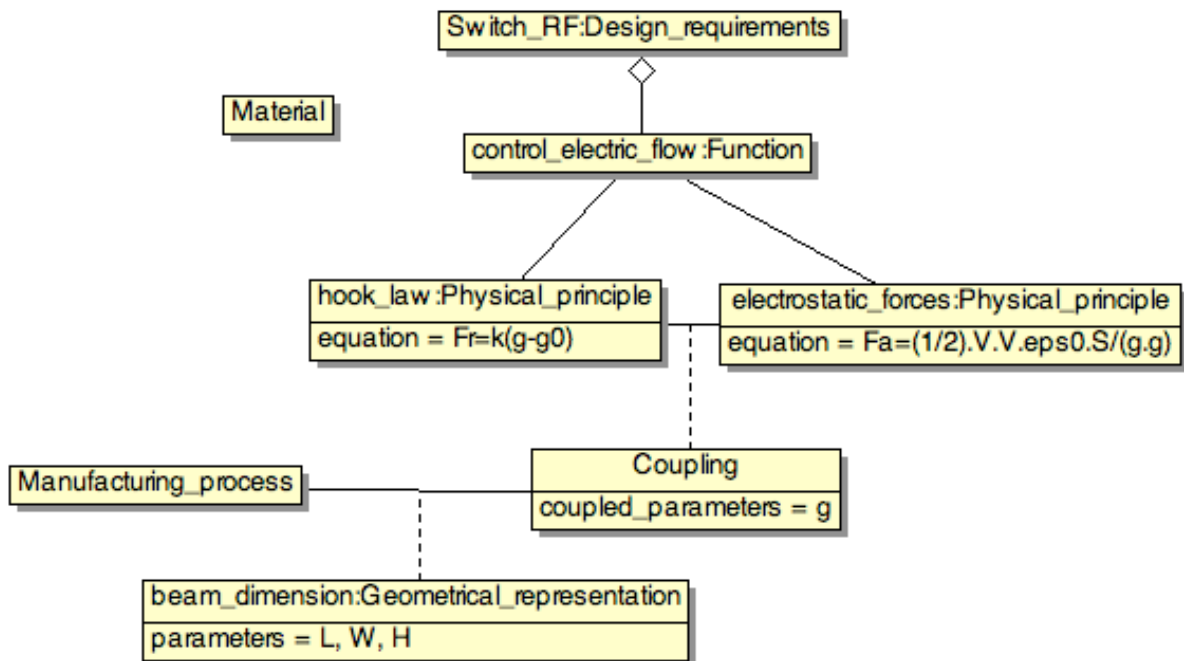


Figure 4.5 Modèle du switch à cet état du processus de conception

Nous retrouvons dans cette première "photo" du switch les informations découlant des premières prises de décision et des expertises métier et couplées à cet état de la conception du produit.

- Le principe physique retenu pour l'actionnement de la poutre est l'électrostatique (résultat d'expertises couplées), et l'effort d'actionnement $F_{\text{actionnement}}$ peut s'exprimer par l'Équation 4.2 (expertise électrostatique).

$$F_{\text{actionnement}} = \frac{1}{2} V^2 \frac{\epsilon_0 S}{g^2}$$

Équation 4.2

- Le retour élastique de la poutre s'exprime par la loi de Hooke, voir Équation 4.3 (expertise mécanique).

$$F_{\text{rappel}} = k(g - g_0)$$

Équation 4.3

- Un paramètre couplé apparaît de manière explicite dans les formules des deux principes physiques mis en œuvre : le gap g , c'est-à-dire la distance séparant l'extrémité de la poutre du contact.
- Le choix de la technologie retenue pour le switch donne une première information concernant la représentation géométrique de l'élément mobile : ce sera une poutre de longueur L , avec une section rectangulaire de largeur W et d'épaisseur H .
- Aucune décision concernant le choix des procédés de fabrication et les matériaux retenus n'a pour le moment été prise.

Afin de respecter le critère consistant à minimiser les pertes de signal lors du passage du courant d'une zone à l'autre, il est recommandé de réaliser l'élément mobile en or (expertise matériaux). L'or est en effet un matériau fréquemment utilisé pour la réalisation de MEMS RF principalement grâce à ses bonnes propriétés électriques [Par00] engendrant de faibles pertes de signal. Ce choix doit être validé par l'équipe de conception, il ne doit pas entrer en contradiction avec les autres critères et fonctions ainsi que les principes physiques retenus pour réaliser les fonctions.

- Le choix d'actionnement électrostatique nécessite l'emploi d'un matériau conducteur ou diélectrique, ce qui est le cas de l'or.
- Les spécialistes de la fabrication valident le fait que les procédés de fabrication VLSI disponibles sont compatibles avec le traitement de l'or, en particulier le procédé de déposition est apte à déposer de fines couches d'or (voir partie 4.2.3)

Le choix du matériau permet d'avancer dans le dimensionnement du produit et en particulier de l'élément mobile, la poutre. Le fait d'avoir choisi un actionnement électrostatique implique que l'un des paramètres à déterminer est la tension d'actionnement, c'est-à-dire la tension pour laquelle le switch passe de l'état ouvert à l'état fermé. Comme nous l'avons rappelé, l'actionnement électrostatique nécessite dans un grand nombre de cas des tensions d'actionnement comprises entre 10 et 100 Volts. Pour la suite de notre exemple, l'expert électrostatique impose de dimensionner un switch pour une tension d'actionnement de 50V maximum.

Compte tenu des faibles masses mises en œuvre, les forces d'inerties peuvent être négligées et il est possible de décrire l'évolution de la tension d'actionnement en fonction du déplacement de la poutre de manière statique, en écrivant l'équilibre existant entre les forces d'actionnement et de rappel, tant que le contact n'est pas fermé, voir l'Équation 4.4.

$$k(g - g_0) = \frac{1}{2} V^2 \frac{\varepsilon_0 S}{g^2}$$

$$\text{Soit } V = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 S} g^2 (g - g_0)}$$

Équation 4.4

La force électrostatique de commande évolue de façon non linéaire lors du déplacement de la poutre, puisqu'elle est inversement proportionnelle au carré du gap g^2 alors que l'effort de rappel est lui proportionnel à g . Cela induit un phénomène instable lors de la déflexion de la poutre : celle-ci commence à fléchir suite à l'application d'une tension puis se plaque contre la zone de contact au bout d'une certaine distance parcourue. La règle permettant de d'exprimer la distance à partir de laquelle le phénomène instable se produit est issue d'expertises couplées, comme nous l'avons présenté dans la partie 3.4.2.2 : pour cette structure de type cantilever, l'instabilité se produit lorsque la poutre fléchie de plus d'un tiers du gap initial, c'est-à-dire lorsque $g < \frac{2}{3} g_0$ [Pot03].

Ensuite, pour un premier dimensionnement du produit, compte tenu de la position de l'électrode d'actionnement, l'expert mécanicien précise que l'effort d'actionnement peut être modélisé par un effort localisé, situé en milieu de poutre [Pot03]. Ainsi, la valeur de la constante de raideur intervenant pour le calcul de la tension d'instabilité doit être calculé en milieu de poutre. Le calcul de la constante de raideur à l'extrémité du cantilever k_L et au milieu de la poutre $k_{L/2}$ est donné dans l'Équation 4.5, en fonction du module d'Young E du matériau utilisé, du moment d'inertie I et des paramètres géométriques du cantilever.

$$k_L = \frac{3.E.I}{L^3} \text{ et } k_{\frac{L}{2}} = \frac{24.E.I}{L^3} \text{ avec } I = \frac{W.H^3}{12}$$

Équation 4.5

La valeur de la tension d'instabilité V_p qui en résulte est l'Équation 4.6

$$V_p = \sqrt{\frac{8k_{\frac{L}{2}}}{27\varepsilon_0 S} g^3}$$

Équation 4.6

L'effort de rappel doit permettre à la poutre de revenir dans sa position initiale lors de la suppression d'une tension d'actionnement. L'un des problèmes à éviter est que la poutre reste collée à la surface de contact, même lorsque la tension est égale à zéro. La règle utilisée pour éviter ce phénomène est issue d'une expertise couplée comme nous l'avons présenté dans la partie 3.4.2.2 : une raideur en bout de poutre k_L supérieure à 10 N/m permet d'éviter les problèmes de collage [Pot03].

L'expression de la tension d'instabilité (donc sa valeur maximale) ainsi que l'expression de la raideur en bout de poutre (donc sa valeur minimale) entraînent l'apparition d'autres paramètres couplés : la longueur, l'épaisseur et la largeur de la poutre, le module d'Young du matériau retenu pour la réalisation de la poutre et la valeur initiale du gap sont directement impliqués à la fois dans le calcul de V_p et k_L . Il est alors possible de poser le système d'équation que ces variables doivent respecter pour que le produit se comporte de manière attendue. Ainsi, pour une poutre en or dont le module d'Young $E=78GPa$ si nous fixons $L=200\mu m$, $W=100\mu m$, pour un gap initial $g_0=1.8\mu m$:

- $V_p < 50V \Leftrightarrow H < 5,1\mu m$
- $k_L > 10N/m \Leftrightarrow H > 3,5\mu m$

Une évolution du modèle à cet état du processus de conception est proposée Figure 4.6

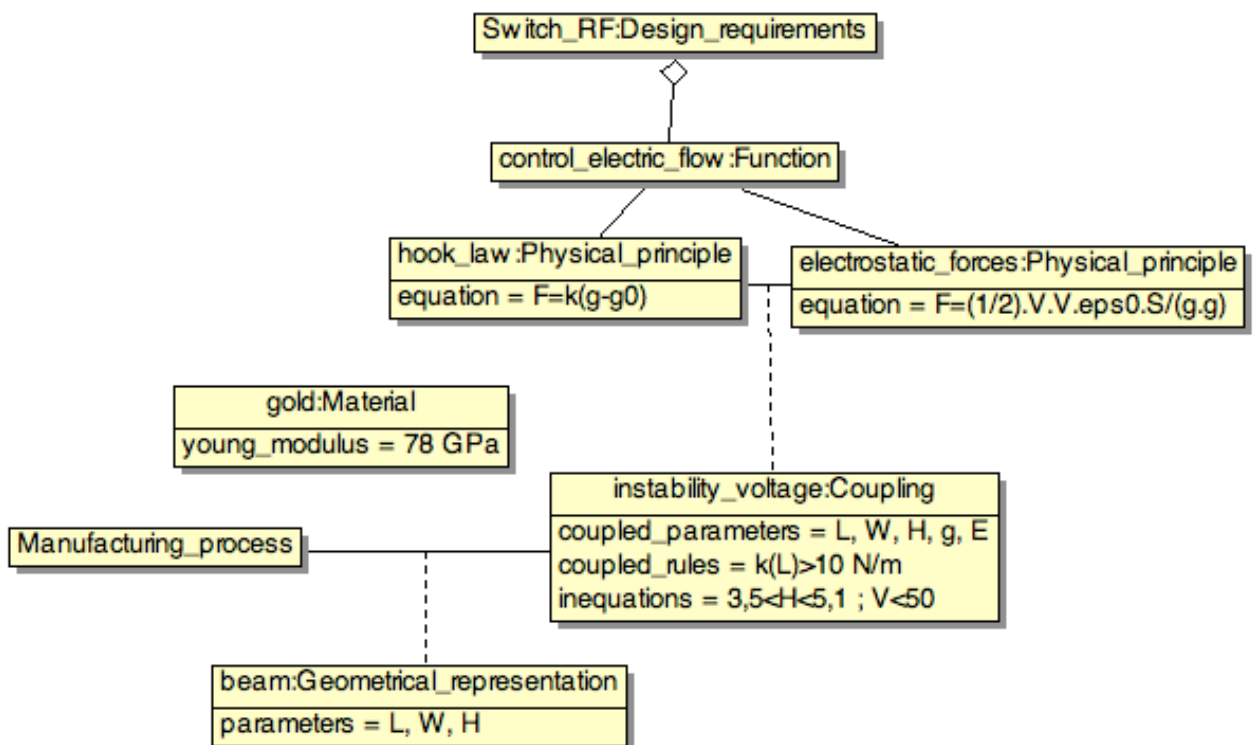


Figure 4.6 Évolution du modèle après identification des paramètres couplés

L'évolution du modèle, donc du produit au cours de sa conception, a été possible grâce à l'intégration des expertises métier et liées aux couplages entre plusieurs métiers : spécialiste de l'électrostatique, expert mécanique, recommandation des équipes de test et caractérisation, spécialiste des matériaux et technologues. La gestion et l'identification des paramètres couplés a permis d'établir des relations entre ces paramètres dépendants afin de respecter les fonctions et critères imposés par le cahier des charges. Cependant, à ce stade de la conception du produit, aucune représentation géométrique n'a encore été proposée. Pour ce faire, il faut intégrer les capacités des procédés de fabrication.

Le switch sera réalisé par des procédés VLSI, le choix du matériau de la poutre étant d'ailleurs effectué en prenant en compte ce critère. Il faut maintenant s'assurer qu'il existe des procédés capables de déposer une couche d'or dont la valeur de l'épaisseur ne contredise pas les inéquations déjà mises en place au niveau des paramètres couplés. Après avoir intégré l'information donnée par les experts des procédés de fabrication concernant les successions d'opérations nécessaires au dépôt d'une couche d'or selon l'épaisseur désirée, une nouvelle évolution du modèle est présentée Figure 4.7.

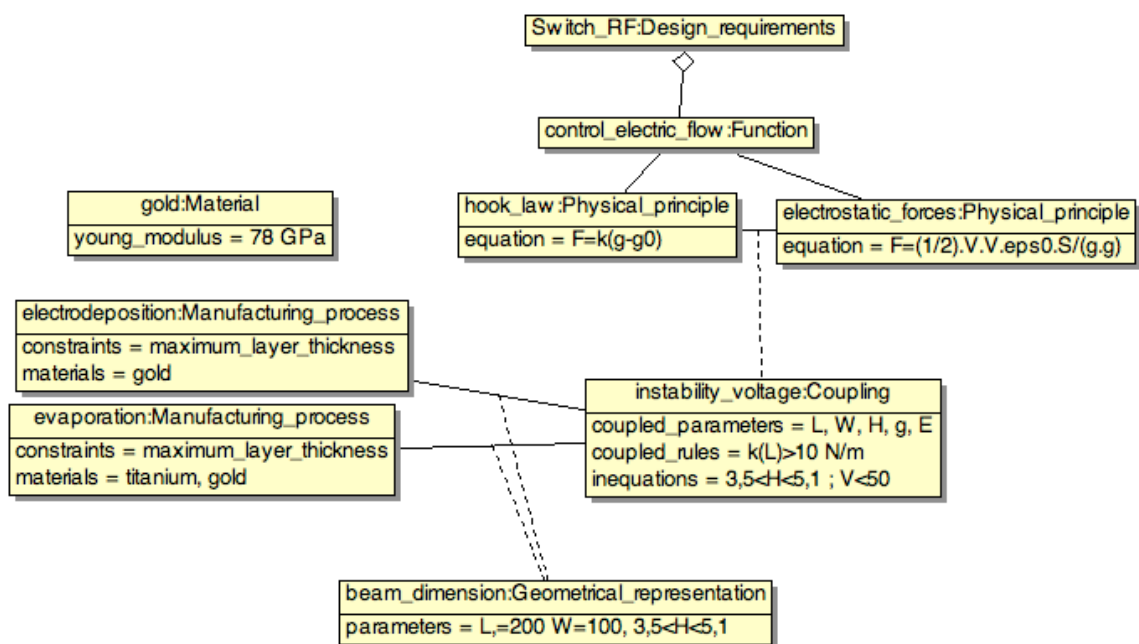


Figure 4.7 Évolution du modèle après prise en compte des contraintes de fabricabilité

Cette évolution propose une représentation géométrique en lien avec les informations concernant les capacités des procédés de fabrication et avec les informations issues de la gestion des couplages. Les paramètres géométriques sont donc ceux d'un produit fabricable et respectant les fonctions prévues.

4.3 Modélisation d'un système microfluidique

L'objectif de cette partie est de montrer l'évolution du modèle proposé et son aptitude à supporter des informations relatives à la conception d'un système microfluidique. Le système a été initialement conçu lors d'un projet de trois semaines au sein de l'université technique du Danemark (DTU) auquel j'ai participé [Guo06].

4.3.1 Expression des besoins du client et clarification du cahier des charges

Les fonctions que doit remplir le système microfluidique, telles qu'exprimées par le client sont :

- Permettre à un fluide chaud de circuler dans un microproduit en matière plastique plus froid, de manière laminaire, en suivant un cheminement suffisamment long pour que les chutes de températures et de pression résultantes soient supérieures à la résolution de l'appareil de mesure utilisé pour les mesurer. La résolution du capteur de température est de $0,01^{\circ}\text{C}$, celle du capteur de pression est de 100 Pa
- Permettre le positionnement de quatre capteurs de mesure : deux capteurs pour mesurer la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide et deux autres pour la différence de pression. La position relative des capteurs les uns par rapport aux autres est imposée par le client car ce dernier dispose déjà d'une plaque sur laquelle les quatre capteurs sont fixés. Le diamètre des trous permettant aux capteurs d'être en contact avec le fluide est imposé également car il dépend directement de la forme des joints que le client possède déjà et qu'il veut donc utiliser.

Après une première étape de clarification du cahier des charges, afin de permettre la réalisation d'un canal dans un bloc en matière plastique, les expertises de fabrication nous incitent à réaliser le produit en deux parties, voir Figure 4.8

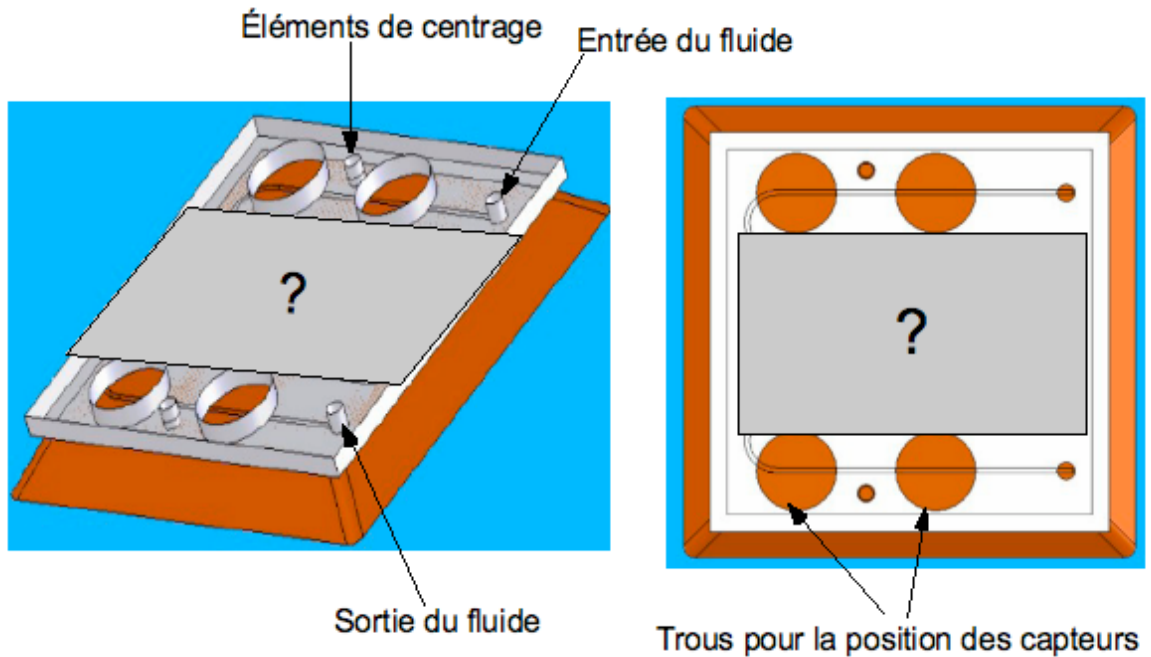


Figure 4.8 Vue géométrique du produit après la clarification du cahier des charges.
Perspective, à gauche et vue de dessus, à droite

Le produit sera donc composé de deux parties :

- Le couvercle, en gris sur la Figure 4.8, comportant deux trous pour y faire entrer et sortir le fluide, deux trous pour y insérer des pions permettant de réaliser le centrage avec la partie inférieure du produit et enfin quatre trous aux dessus desquels seront situés les capteurs. Nous rappelons que le diamètre de ces derniers et leurs positions relatives est imposé par le client, qui compte par la suite insérer dans ces trous des joints toriques et coller sur le couvercle un bloc de céramique comprenant les capteurs.
- Le corps, en marron sur la Figure 4.8, comprenant le canal au sein duquel circulera le fluide. À cette étape de la conception, la seule donnée disponible concernant le canal est que la fibre neutre de sa section doit passer en dessous des quatre capteurs, dont la position relative est imposée.

Pour montrer l'utilisation du modèle de microproduits, nous allons nous intéresser plus spécifiquement à la conception du corps du produit :

- Compte tenu des procédés de fabrication disponibles, quelle sera la forme du canal et sa longueur maximum ?
- La forme et la longueur retenues permettront-elles de satisfaire les besoins du client : la diminution de la chaleur du liquide et les chutes de pression engendrées seront-elles supérieures à la résolution de l'appareil de mesure ?

Dans le paragraphe suivant, nous faisons le point sur les procédés de fabrication disponibles et l'influence de leurs capacités et contraintes sur le produit final, afin d'intégrer ensuite ces informations au cours du processus de conception.

4.3.2 Procédés de fabrication

4.3.2.1 Fabrication du produit

Pour des raisons économiques, nous souhaitons que le corps du produit puisse être fabriqué avec un procédé de réplique de masse. L'expert fabrication nous propose l'injection plastique, puisqu'il dispose d'une presse. Ce choix entraîne plusieurs contraintes qu'il faudra intégrer lors de la conception des produits, en particulier :

- La taille maximale du moule supportée par la presse implique que les canaux devront être inclus dans un carré de 22mm de côté.
- Le corps du produit sera réalisé en polycarbonate.

Nous nous retrouvons à présent avec une problématique similaire à celle développée dans la partie 3.5.2 : la possibilité de réaliser le produit en injection plastique dépend maintenant de la possibilité ou non de réaliser son outillage, c'est-à-dire du moule dans le cas présent.

4.3.2.2 Réalisation de l'outillage

Pour réaliser le moule nous avons à notre disposition :

- Un centre micro EDM (Electro Discharge Machining) à priori tout à fait capable de réaliser le moule, mais dont les temps d'usinage sont extrêmement longs.
- Un centre de fraisage numérique "traditionnel" (non spécialisé dans la micro fabrication) équipé d'une fraise deux tailles de diamètre 1mm
- La possibilité d'appliquer un revêtement de surface à base de nickel sur le moule, de manière à augmenter sa dureté superficielle pour lui garantir une plus grande durée de vie.

L'utilisation du centre de fraisage pour réaliser le moule présente l'avantage d'être beaucoup plus rapide que le centre micro EDM. Le choix d'une fraise deux tailles de diamètre 1mm pour la réalisation de l'outillage implique deux contraintes géométriques repercutées sur le produit final :

- La section du canal sera rectangulaire ou carrée.

- Les canaux seront au minimum espacés de 1mm. En effet puisque la fraise deux tailles est utilisée pour fabriquer le moule, donc le "négatif" du produit final, le diamètre de la fraise correspond à la plus petite distance qu'il est possible d'obtenir entre les canaux.

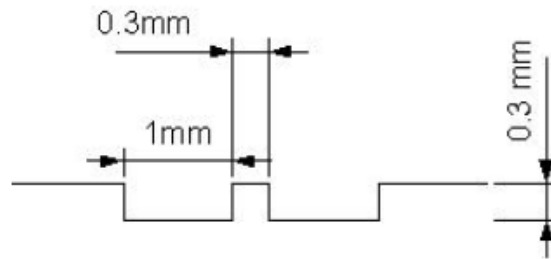


Figure 4.9 Stratégie d'usinage des canaux

La fabrication des canaux s'effectue selon le schéma présenté Figure 4.9, de manière à réaliser des canaux carrés, dont le côté mesure 0,3mm. Selon les expertises issues de la mécanique des fluides, il s'agit en effet de la dimension maximale en dessous de laquelle nous aurons la certitude que l'écoulement du fluide dans le canal sera laminaire [Bru06]. La largeur du canal correspond à la distance entre deux passes de fraisage et les expertises issues de ce procédé de fabrication préconisent de ne pas descendre en dessous de cette valeur.

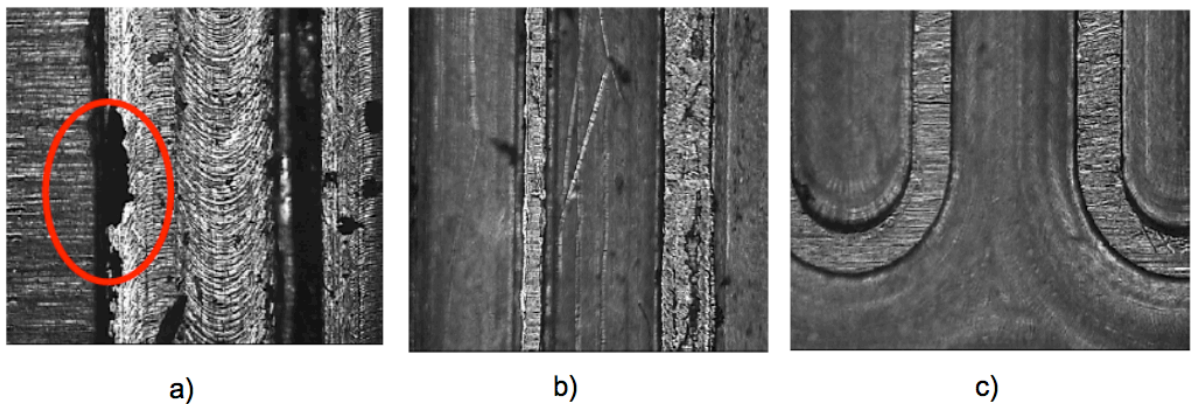


Figure 4.10 Réalisation de l'insert

Les conditions de coupe sont choisies de manière à éviter les problèmes de formation de copeaux adhérents (Figure 4.10.a.) ou d'épaisseurs de canaux variables (Figure 4.10.b.). L'expert fabrication certifie l'obtention de la géométrie désirée (Figure 4.10.c.) : la section des canaux est suffisamment uniforme, de largeur et de profondeur égale à 300 μ m et l'état de surface est jugé acceptable, compte tenu du traitement de surface à base de nickel programmé par la suite.

En conclusion de cette partie, afin de garantir la fabricabilité du produit, il faudra intégrer au cours de la conception, les informations suivantes relatives aux procédés de fabrication, toutes issues des expertises liées à la fabrication :

- Le produit final sera réalisé en polycarbonate, matériau compatible avec la presse à injecter.
- Les canaux doivent être inclus dans un carré de 22mm de côté.
- Il est possible de réaliser des canaux ayant une section carrée au minimum égale à 300µm de côté, dont l'espacement minimum est de 1mm.

4.3.3 Principes physiques mis en œuvre

Il y a deux principes physiques mis en œuvre dans ce produit pour répondre aux fonctions imposées : la chute de pression d'un fluide en écoulement laminaire dans un canal et sa perte de température lorsqu'il évolue dans un matériau plus froid que lui.

4.3.3.1 Chute de pression d'un fluide dans un canal

Les expertises relatives à la mécanique des fluides nous permettent d'exprimer la chute de pression d'un fluide en écoulement laminaire dans un canal de section quelconque, voir Figure 4.11, par l'Équation 4.7 [Bru06.]

$$\begin{aligned} (\partial_y^2 + \partial_z^2)v_x(y,z) &= -\frac{\Delta p}{\eta L} \text{ pour } (y,z) \in C \\ v_x(y,z) &= 0 \text{ for } (y,z) \in \partial C \\ Q &\equiv \int_C v_x(y,z) dydz \end{aligned}$$

Équation 4.7

Avec Δp , la différence de pression (Pa), Q , le débit (m³/s), η , la viscosité dynamique de l'eau, (Pa.s) et L , la longueur du canal (m).

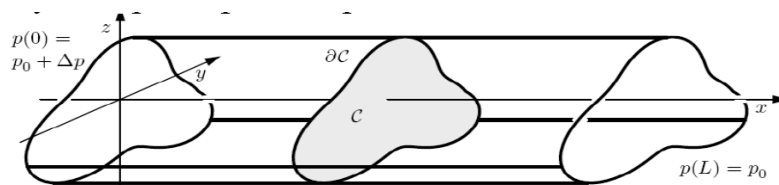


Figure 4.11 Canal de section arbitraire

Lorsqu'il s'agit d'un canal de section rectangulaire, la formule est simplifiée, voir Équation 4.8

$$Q \approx \frac{a^4 \Delta p}{12\eta L} (1 - 0,63)$$

Équation 4.8

Avec a , longueur des côtés de la section carrée (m) et L , longueur du canal, (m)

4.3.3.2 Perte de température dans un canal

Le flux de chaleur dissipé dans un canal peut être exprimé sous la forme d'une puissance [Bav05] voir l'Équation 4.9, avec P_{elec} , la puissance dissipée, Q_m , le débit massique du fluide (Kg/s), C_p , la capacité calorifique de l'eau ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), g , la gravité (m.s^{-2}), ΔH , la différence de charge moyenne de l'écoulement, et T_e , T_s , les températures d'entrée et de sortie ($^{\circ}\text{C}$)

$$P_{elec} = Q_m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) - (Q_m \cdot g \cdot \Delta H) + \text{pertes}_{thermiques}$$

Équation 4.9

Le second terme de cette équation représente la puissance dissipée due à la viscosité de l'eau, que l'on peut négliger compte tenu de l'écoulement laminaire. Ainsi, si l'on considère que les pertes thermiques peuvent elles aussi être négligées, nous pouvons écrire que le flux dissipé grâce à la convection du fluide dans un canal est égale à l'Équation 4.10.a. Il est également possible de définir le flux de chaleur d'un fluide à température T_f vers une paroi de température T_p en fonction du coefficient d'échange thermique h , cf. l'Équation 4.10.b, avec h , coefficient d'échange ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_p et T_f , respectivement les températures de la paroi et du fluide :

$$Q_{conv} = Q_m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (\text{a})$$

$$Q_{conv} = h \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad (\text{b})$$

Équation 4.10

La température du fluide au cours de son écoulement est comprise entre sa température d'entrée et sa température de sortie. L'expert fluidique nous propose de faire l'hypothèse, pour un premier dimensionnement du système, que cette température est égale à la moyenne des deux températures d'entrée et de sortie, voir l'Équation 4.11. Cette hypothèse est fréquemment formulée pour lever une inconnue dans les équations, lorsqu'il n'est pas possible de mesurer la température du fluide tout au long de son écoulement [Mad05].

$$T_f = \frac{T_e + T_s}{2}$$

Équation 4.11

Les deux équations définissant le flux dissipé grâce à la convection du fluide dans un canal et l'hypothèse concernant la valeur de la température du fluide lors de son écoulement nous permettent d'établir l'expression de la température de sortie en fonction du débit massique du fluide, de sa capacité calorifique, de la température d'entrée, de la surface d'échange entre le canal et les parois et du coefficient d'échange thermique, voir Équation 4.12.

$$Q_m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) = h \cdot S \cdot \left(T_p - \left(\frac{T_e + T_s}{2} \right) \right)$$
$$\text{Ainsi : } T_s = \frac{2}{Q_m \cdot C_p + hS} \left[h \cdot S \cdot \left(T_p - \frac{T_e}{2} \right) + Q_m \cdot C_p \cdot T_e \right]$$

Équation 4.12

4.3.4 Évolution du modèle au cours du processus de conception

Nous avons défini dans les deux parties précédentes les expertises métier qui vont nous être nécessaires pour effectuer un premier dimensionnement du produit, que ce soient les expertises relatives aux procédés de fabrication du produit ou celles issues des différents principes mis en œuvre pour réaliser les fonctions souhaitées. Nous allons maintenant montrer l'évolution du modèle de microproduit, en fonction des prises de décisions des différents acteurs et de la prise en compte de ces expertises.

Commençons la conception du produit par intégrer les informations relatives aux principes physiques permettant les chutes de températures et de pression. Aucune information n'est pour le moment disponible concernant la géométrie du canal et il faut donc se contenter pour le moment, pour la chute de pression, de l'Équation 4.7, sous sa forme la plus générique, pour un canal de section quelconque. La formule retenue pour exprimer les pertes de température est l'Équation 4.12, qui n'est pas conditionnée à une section de canal particulière. Une première photo du modèle est alors obtenue, voir Figure 4.12.

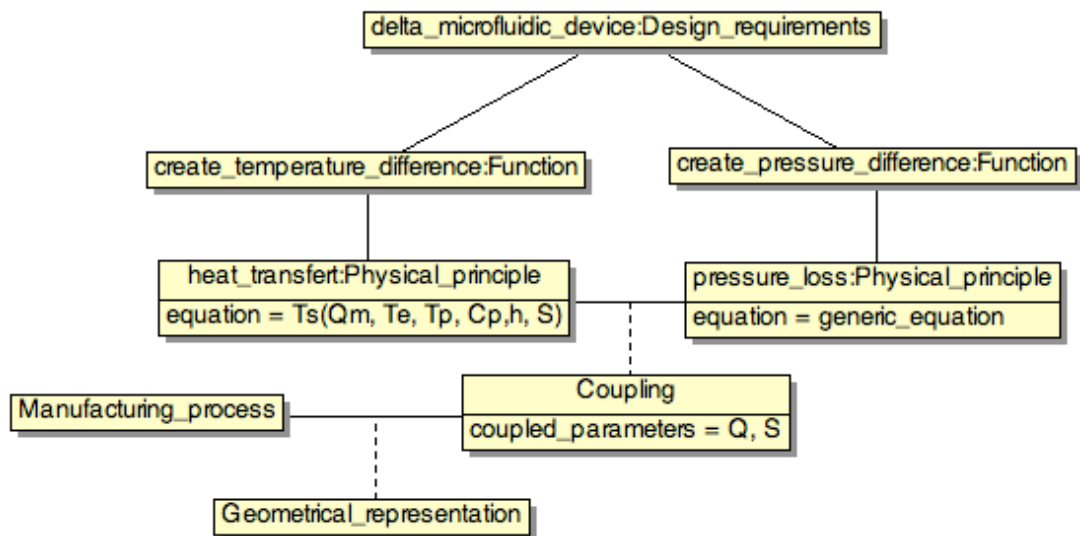


Figure 4.12 Modèle du produit après identification des principes physiques

- Le débit explicitement comme un paramètre influant dans les deux principes physiques, sous forme massique pour les transferts de chaleur et sous forme volumique pour les chutes de pression. Il en est de même pour la surface d'échange.
- Aucun choix de procédé n'a pour le moment été pris en compte, ne permettant pas la proposition d'une représentation géométrique fabricable

Nous choisissons maintenant de fabriquer le produit par injection plastique, ce qui nous apporte deux contraintes supplémentaires : la taille maximale du moule, limitée à 22mm de côté et la fabrication du microproduit en Polycarbonate. Parallèlement, nous savons qu'il est possible de réaliser l'outillage à l'aide d'un centre de fraisage numérique "traditionnel" à l'aide d'une fraise deux taille de diamètre 1mm, ce qui nous apporte les contraintes suivantes : les canaux auront une section carrée de 0,3mm de côté et les canaux seront espacés au minimum de 1mm, voir partie 4.3.2.2.

Nous cherchons maintenant à savoir quel est le plus long cheminement que nous pouvons réaliser dans l'espace alloué sur le moule. Compte tenu de la position et du diamètre des trous pour les mesures, imposés par le client, il nous est alors possible de réaliser 10 méandres de 18,85mm de long, comme le montre le dessin de définition, Figure 4.13. Nous avons entouré en rouge les contraintes relatives à la fabrication du produit et de son outillage ainsi que, en vert, celle relative au diamètre des trous de mesure, restreignant le nombre de méandre fabricables.

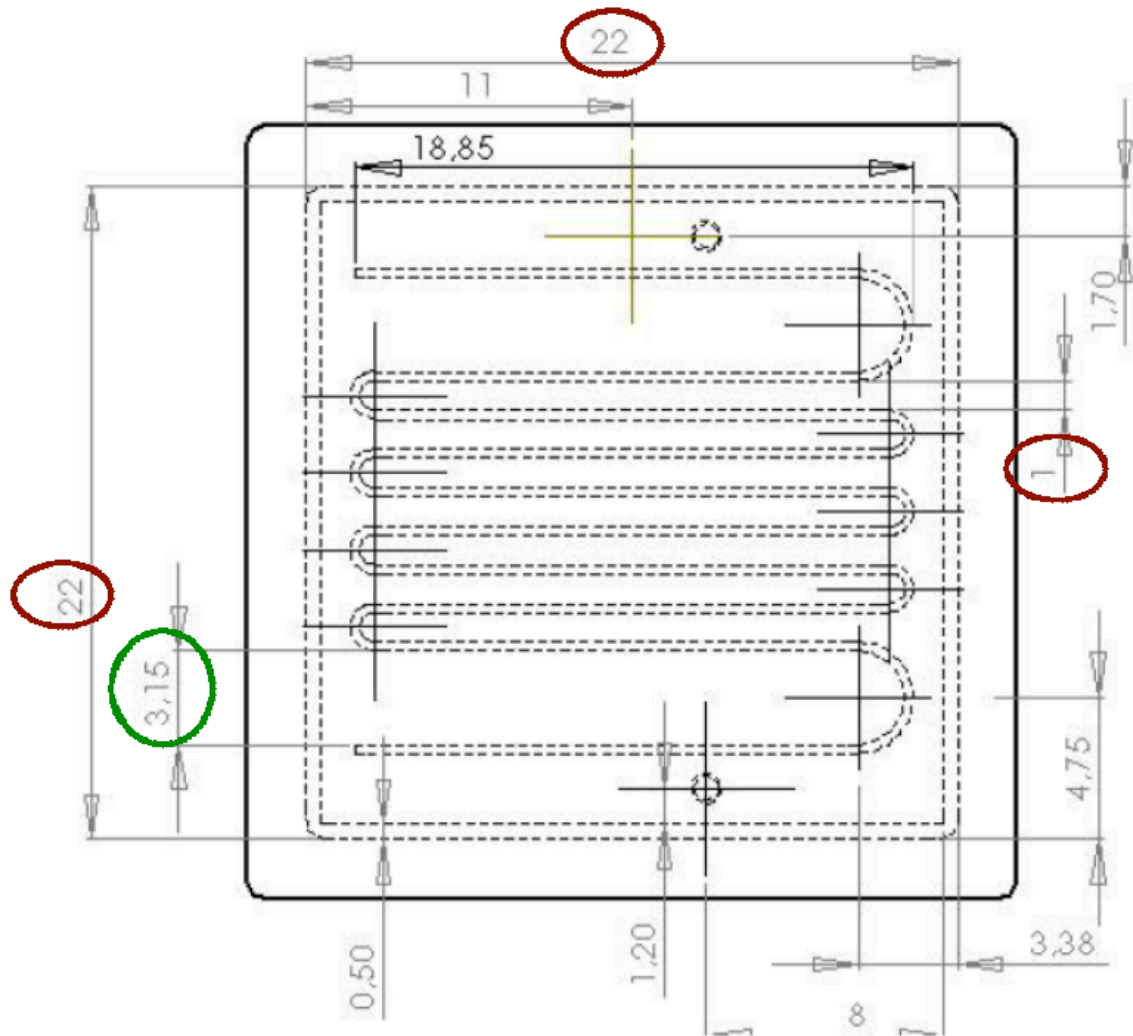


Figure 4.13 Dessin de définition du système microfluidique

Ce dessin montre le nombre maximal de méandres et donc la longueur maximale du canal qu'il est possible de fabriquer. Cependant, il n'est en aucun cas une représentation géométrique du produit tel que nous l'avons défini dans le chapitre 3, car aucune vérification n'a été faite pour le moment afin de valider que cette géométrie proposée permette au produit de remplir ses fonctions.

Les conséquences sur le produit des choix effectués concernant les procédés de fabrication, du produit et de son outillage, impliquent que :

- Le canal aura une section carrée : la formule exprimant les pertes de pression devient l'Équation 4.8
- La longueur totale du canal est de 188.5mm ce qui entraîne, compte tenu de la valeur des côtés de la section, que la surface d'échange globale entre le fluide et la paroi vaut : $S=4.a.L=226,2\text{mm}^2$

Afin de proposer une représentation géométrique du produit qui soit à la fois fabricable et dans le respect des fonctions attendues, il faut s'assurer que les domaines de validité des paramètres couplés leur permettant le respect des fonctions est en accord avec les procédés de fabrication retenus.

- Le débit Q est imposé, il correspond à celui de la pompe utilisée pour la circulation du fluide. $Q=10\text{ml}/\text{min}=(1/6).10^{-6}\text{ l. s}^{-1}=(1/6).10^{-3}.\text{kg.s}^{-1}$
- La température du fluide à l'entrée $T_e=37^\circ\text{C}$
- Hypothèse : compte tenu du faible volume de fluide circulant pendant la durée de l'expérience, la température de la paroi en plastique est supposée uniforme et constante, $T_p=20^\circ\text{C}$
- Les propriétés du fluide utilisé par le client sont identiques à celles de l'eau. Ainsi, $C_p=4185\text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\eta=1,002.10^{-3}\text{ Pa.s}$
- Le coefficient d'échange thermique à la paroi, h , est très complexe à déterminer. Il est issu du couplage qu'il existe entre les caractéristiques thermiques du fluide et du matériau dans lequel il circule, la géométrie du canal et la vitesse de l'écoulement. Il est principalement déterminé grâce à l'étroite collaboration d'experts de la mécanique des fluides, de la thermique, des matériaux utilisés ainsi que par les moyens expérimentaux que nous n'avons pas à notre disposition [Bav05]. La formalisation de ces couplages sous forme de règles indique une grande plage de variation pour le coefficient : $100 < h < 15000$. Afin de ne pas sous dimensionner le produit et de garantir que la chute de température soit supérieure à la résolution de l'appareil de mesure du client, nous prendrons la plus faible valeur rencontrée : $h=100\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur est donnée pour de l'eau en convection libre : comme l'échange de chaleur s'effectue dans le cadre de la convection forcée (avec un débit imposé), le coefficient d'échange sera au minimum égal à cette valeur.

Ainsi, pour une section carrée de 0,3mm de côté :

- $\Delta p > 100\text{Pa} \Leftrightarrow L > 0,149\text{mm}$
- $\Delta t > 0,01^\circ\text{C} \Leftrightarrow L > 21,52\text{mm}$

Les procédés de fabrication envisagés permettent donc de fabriquer un produit garantissant les deux fonctions. La longueur $L=188,5\text{mm}$ permet d'obtenir : $\Delta p=125792\text{Pa}$ et $\Delta t > 0,055^\circ\text{C}$. Compte tenu de l'incertitude sur la valeur du coefficient d'échange nous ne pouvons pas prédire la valeur de la chute de température, mais nous garantissons qu'elle sera supérieure à la résolution de l'appareil de mesure.

L'évolution du modèle est présentée Figure 4.14 :

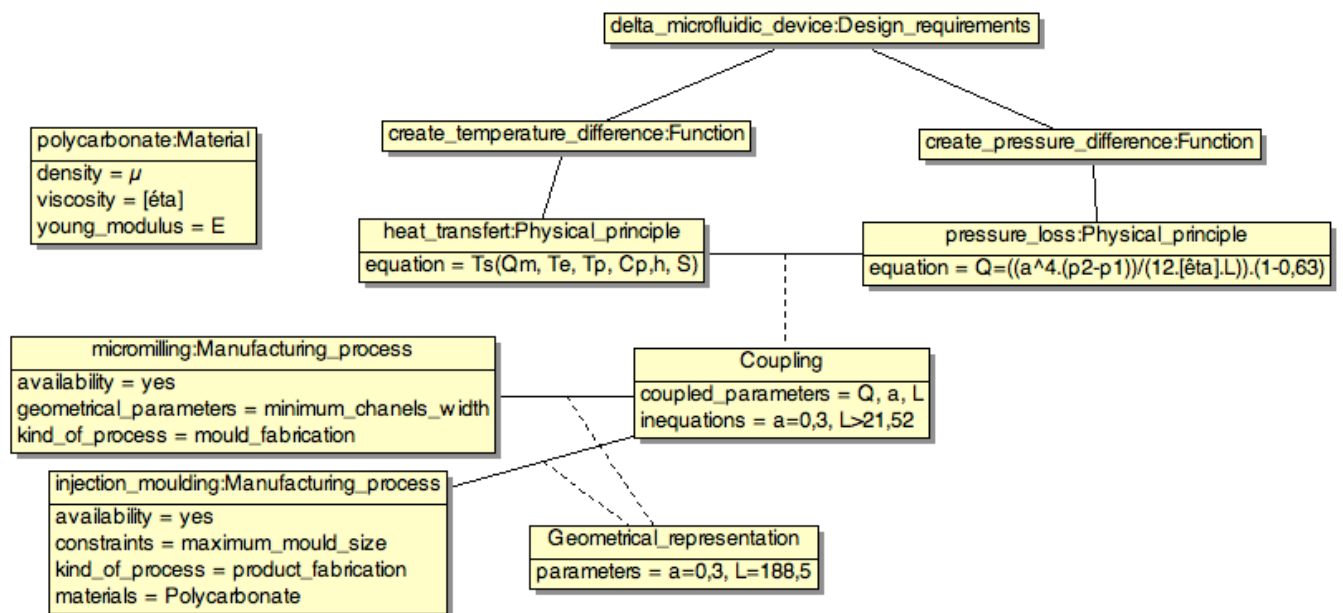


Figure 4.14 Évolution du modèle après l'intégration des couplages et des procédés de fabrication

Cette évolution intègre :

- La prise en compte des procédés de fabrication. Le canal, d'une longueur de 188,5mm, possède une section carré de 0,3mm de côté, ce qui précise l'équation de la chute de pression et la définition de la surface d'échange, par rapport à la Figure 4.12.
- Les domaines de validité des paramètres couplés : pour permettre une chute de température et de pression conforme au besoin du client et compte tenu de la section du canal dépendant des procédés de fabrication, la longueur du canal doit être supérieure à 21,52mm.

Les paramètres géométriques proposés garantissent donc que le produit, fabricable, remplit les fonctions prévues par le cahier des charges.

Conclusion et perspectives

Après avoir, dans le premier chapitre, présenté les microproduits, leurs spécificités, souligné les manques dans les outils existant tout en rappelant la nécessité pour les acteurs du processus de conception de travailler selon les principes de la conception intégrée nous sommes intéressés, dans le second chapitre, aux concepts et outils permettant, lors de la conception de produits, de travailler dans ce contexte de conception intégrée. Nous avons mis en évidence les intérêts que peut représenter le concept de modèle-produit pour la conception de microproduits. Cependant, après la présentation des deux modèles-produits, de CoDeMo et de PPO, nous avons considéré que la notion de *vue métier* ne favorisait pas la gestion des couplages multiphysiques. Ceci nous a conduit, dans le troisième chapitre, à proposer un modèle pour l'intégration des couplages multiphysiques et la prise en compte de la fabricabilité au cours du processus de conception des microproduits. Le premier intérêt du modèle présenté est de proposer une représentation structurées des informations relatives au produit conçu, permettant d'abord d'explicitier l'influence des principes physiques mis en œuvre sur le comportement du produit, ensuite d'identifier les spécialistes impliqués dans les couplages multiphysiques et enfin de garantir en permanence la fabricabilité de la représentation géométrique proposée. Le second intérêt du modèle est de supporter d'une part la formalisation d'expertises métier et d'autre part la formalisation des connaissances relatives aux couplages. Les règles expertes et/ou les contraintes peuvent alors être soit rattachées à une vue métier, soit à la notion de couplage. L'aptitude de ce modèle à supporter la représentation de ces produits et leurs spécificités, lors de leur propre conception, a été démontrée dans le dernier chapitre via l'étude de la conception de deux microproduits. Nous avons démontré la généralité du modèle en modélisant deux microproduits différents, tant par les fonctions réalisées que par les procédés de fabrication retenus.

Nous nous sommes restreints, dans le dernier chapitre, à illustrer la modélisation de microproduits au cours de leur conception. Pour compléter ces travaux, il faudrait à présent détailler la manière dont doit être utilisé le modèle et en particulier comment les acteurs peuvent l'utiliser, à quel moment au cours du processus de conception et quelles sont les actions qui découlent de ses différentes évolutions.

De manière à concrétiser l'utilisation de ce modèle, il serait également intéressant d'envisager son implémentation dans un outil informatique. Des travaux menés en parallèle dans le laboratoire G-SCOP ont conduit au développement d'une plateforme de modélisation dédiée à la formalisation des activités de conception collaborative. La plateforme GAM [Gam08] offre la possibilité de représenter des modèles de produits et leurs instanciations. L'implémentation du modèle proposé dans cette plateforme est donc possible. Les récents travaux de thèse [Sad08] concernant la gestion dynamique des règles métiers, appliqués à cette plateforme, offrent de plus la perspective d'obtenir un outil performant pour la conception des microproduits.

Enfin, il serait intéressant de proposer un moyen permettant de conserver l'ensemble des prises de décision qui conduisent à l'évolution du modèle. Cette gestion de la "dynamique" du modèle permettrait la formalisation d'expertises supplémentaires afin de valider plus rapidement les choix à effectuer lorsque des situations similaires se représentent dans les conceptions futures.

- [Alb92], *L-D Suh, N-P Albano*, **Axiomatic approach to structural design**, Research in Engineering Design, 4 : 171-183, 1992
- [Alt03], *L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissaco*, **Micro Engineering**, Keynote Paper, Annals of CIRP, 52, 2, 2003, 635-658
- [And04], *D. M. Anderson*, **Design for manufacturing and concurrent engineering**, CIM Press, 2004
- [Ang05], *D. E. Angelescu, D. Siess*, **Microfluidic Phase Separation**, Sensors, 2005 IEEE , vol., no., pp. 4 pp.-, 30 Oct.-3 Nov. 2005
- [Bar00], *D.B Bart Van Der Schoot, N.F. De Rooij, H Sundgren, I Lundström*, **A low-power micromachined MOSFET gas sensor**, Journal of microelectromechanical systems, Septembre 2000, vol. 9, n°. 3, p.303-308
- [Bav05], *R. Baviere*, **Etude de l'Hydrodynamique et des Transferts de Chaleur dans des microcanaux**, Thèse de doctorat, Université Grenoble 1 2005
- [Bel94], *P. Belloy*, **Intégration de connaissances métiers dans la conception : un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994
- [Bet06], *S. Bettaieb*, **Contribution à la spécification d'un environnement de conception collaborative intégrant d'expertises métier hétérogènes**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006
- [Bla06], *O. Blatnik a, H. Orbanic a, C. Masolet b, H. Paris b, M. Museau b, J. Valentincic a, B. Jurisevic a and M. Junkar*, **Water jet machining of MEDM tools**, 4M's Annual Conference on Multi-Material Micro Manufacture, Grenoble, 2006
- [Boo05], *G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson*, **Unified Modeling Language User Guide, 2nd edition**, Addison-Wesley Professional, May 2005
- [Boo89], *G. Boothroyd, P. Radovanovic*, **Estimating the cost of machined components during the conceptual design of a product**, Annals of CIRP, 38(1), 157, 1989
- [Bor02], *R. Borwick, P. Stupar, J. Denatale, R. Anderson, C. Tsai, K. Garret*, **A high Q, large tuning range tunable capacitor for RF applications**, IEEE MEMS Conference Technical Digests, 2002, p669 – 672
- [Bor03], *R.L. Borwick, P.A. Stupar, J.F. Denatale, R. Anderson, R. Erlandson*, **MEMS Capacitors Implemented Into RF Filter Systems**, IEEE transactions on microwave theory and techniques, Janvier 2003, vol. 51, n° 1 p 315 -319
- [Bra01], *J. Brank, J. Yao, M. Eberly, A. Malczewski, K. Varian, C. Goldsmith*, **RF MEMS-based tunable filters**, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2001, Vol 11, p276 – 284
- [Bri01], *D. Brissaud, S.Tichkiewitch*, **Product models for life-cycle**, Annals of the CIRP, 50(1) : 105-108, 2001
- [Bri98], *D. Brissaud, O. Garro*, **Conception distribuée, émergence**, Conception de produit mécanique, Méthodes, Modèles, Outils , Hermès, 1998

- [Bru06], *H. Bruus*, **Theoretical microfluidics**, Oxford University Press, ISBN-10 : 0199235082, 2007
- [Cha94], *B. Chandrasekaran*, **Functional representation and causal processes**, *Advanced in Computer*, 38 :73-143, 1994
- [Cha97], *E. Chapa*, **Outils et structure pour la coopération formelle et informelle dans un contexte de conception holonique**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997
- [Che05], *Y. T. Chew, H. M. Xia, C. Shu, S. Y. M. Wan*, **Techniques to enhance fluid micro-mixing and chaotic micromixers**, *Modern Physics Letters B*, Vol. 19, Nos. 28 & 29 (2005) 1567-1570
- [Chu93], *W-H. Chu, M. Mehregany, R. L. Mullen*, **Analysis of tip deflection and force for a bimetallic cantilever microactuator**, *J. Micromech. Microeng.* Vol.3 p.4, 1993
- [Col04], *S. Colin*, **Microfluidique**, Hermes Science Publication, 2004
- [Con04], *François Conseil*, **Simulation, conception et réalisation d'un ordinateur en technologie microsystème pour dispositifs logiques sécuritaires**, thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 2004
- [Con96], *D. Constant*, **Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produit pour la conception intégrée de systèmes mécaniques**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996
- [Del08], <http://www.delphi.com>
- [Dew87], *P. Dewhurst*, **Computer aided assessment of injection molding cost-A tool for DFA analyses**, report n°24, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, University of Rhode Island, 1987
- [Dgr04], *A. D. Grave*, **Conception intégrée de systèmes électro-mécaniques**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004
- [Dgr05], *A De Grave, D. Brissaud*, **Collaboration and integration in the design of MEMS**, Proceedings of the international CIRP design seminar in Shanghai, China, May 2005
- [Dim05], *S. Dimov*, **4M Network of Excellence : An Instrument for Integration of European Research in Multi-Material Micro Manufacture**, First Multi-Material Micro Manufacture (4M) Conference, Karlsruhe, Germany, 2005
- [Eve99], *Eversheim, W. and Schulten, I.*, **Optimal degree of parallelism and integration in design and process planning**, in Kals H., Van Houten F. (eds), *Integration of process knowledge into design support systems*, Kluwer academic publishers, 1999
- [Exc], **Mems and technology exchange**, available at <http://www.mems-exchange.org>
- [Eyn99], *B. Eynard*, **Modélisation du produit et des activités de conception. Contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie**, thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 1999
- [Gam08], **Gam**, available at <http://www.g-scop.inpg.fr/GAM>
- [Ger90], *J-S Gero*, **Design prototype : a knowledge representation schema for design**, *AI Magazine*, 11 (4) : 26-36, 1990

- [Gir04], *D. Girbau, A. Lazaro, L. Pradell*, **Extended tuning range RF MEMS variable capacitors using electrostatic and electrothermal actuators, MEMS/MOEMS Components and Their Applications**, Edited by Janson, Siegfried W.; Henning, Albert K. Proceedings of the SPIE, Volume 5344, pp. 59-70, 2004
- [Gou06], *A. Gouillet, I. Glasgow, N. Aubry*, **Effects of microchannel geometry on pulsed flow mixing**, Mechanics Research Communications, Volume 33, Issue 5, September-October 2006, Pages 739-746
- [Guo06], *K. Guomundsson, B. Sighvatson, A. Islam, M. Museau, A. Gegeckaitė, H. N. Hansen, A. De Grave, P. Friis*, **Delta BioChip, 3 week project, IPL, DTU**, January 2006
- [He99], *B. He, L. Tan, F. Regnier*, **Microfabricated Filters for Microfluidic Analytical Systems**, Analytical Chemistry, Vol. 71, No. 7, April 1, 1999
- [Hin99], *J-D Friedman, G. Hinterdteiner*, **System architecture template**, MIT white paper, 1999
- [Iva03], *M. Ivanova, Y. Avenas, C. Schaeffer, C. Gillot, A. Bricard*, **Apport de la microthermie pour le refroidissement des systèmes**, Journées électrotechniques du club EEA, Amiens, 12-13 mars 2003
- [Jin06], *Si-Yu Jin, Ying-Zheng Liu, Wei-Zhe Wang, Zhao-Min Cao, Hide S. Koyama*, **Numerical evaluation of two-fluid mixing in a swirl micro-mixer**, Journal of Hydrodynamics, , Volume 18, Issue 5, October 2006, Pages 542-546
- [Jun07], *M. Junkar, B. Jurisevic*, **An alternative microtooling strategy for replication processes**, CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol 35, No 5, 2006
- [Kle07], *Klein Meyer J.S., Roucoules L., De Grave A., Chaput J.*, **Case study of a MEMS switch supported by a FBS and DFM framework**, CIRP International Design Seminar, 27 - 28 March 2007, Berlin, "The future of product development", ISBN 978-3-540-69819-7
- [Kle08], *J.S. Klein Meyer*, **Contribution à la modélisation multi-physique des systèmes complexes dans un contexte de DFX. Application à la conception de micro-mécanismes.**, thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2008
- [Kra93], *F. L. Krause, F. Kimura, T. Kjelberg, S. C. Lu*, **Product Modelling**, Annals of the CIRP Vol. 42/2/1993
- [Kra94], *F.-L. Krause, T. Kieswetter, and S. Kramer*, **Distributed product design**, Annals of the CIRP, 43(1) :149{152, 1994
- [Kuo01], *T. C. Kuo, S. H. Huang, H.C. Zang*, **Design for manufacture and design for X : concepts, applications and perspectives**, Computer & Industrial Engineering, 41, 241-260, 2001
- [Lab04], *M. Labrousse*, **Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise**, Ph. D. Thesis, Ecole centrale de Nantes, 2004
- [Let], *CEA LETI*, **Laboratoire d'électronique de technologies de l'information**, www-leti.cea.fr/
- [Let04], *P. Lethbridge*, **Representing Real-World Phenomena More Accurately with Multiphysics Analysis Solutions**, ANSYS Solutions, 2004
- [Lov06], *D. Lovinfosse*, **Manipulation de modèles hybrides pour la liaison CAO-Calculs : spécification d'un environnement d'assistance aux processus de maillage**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006

- [Mad02], *M.J. Madou*, **Fundamentals of Microfabrication : The Science of Miniaturization**, Second Edition, CRC Press, 2002
- [Mad05], *B. Madani, F. Topin, L. Tadrist, K. Bouhadef*, **Mesure du coefficient de transfert de chaleur local paroi-fluide dans un canal a mousse métallique en écoulement liquide et en ébullition**, 12èmes journées internationales de thermique, Tanger, Maroc, novembre 2005
- [Mus07], *M. Museau, C. Masclat, S.Tichkiewitch*, **Integrated design of MEMS, Aiming at Manufacturability**, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Vol. 1, No. 3, August, pp.127–134, ISSN 1955-2513
- [Noe08], *F. Noel, L. Roucoules*, **The PPO design model with respect to digital enterprise**, Journal : International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21 (2), pp. 139-145, 2008
- [Pah96], *G. Pahl and W. Beitz*, **Technologies among product life cycle**, Springer Verlag, 1996
- [Par00], *J.Y PARK, G.H KIM, K.W CHUNG, J.U BU*, **Fully integrated micromachined capacitive switches for RF applications**, IEEE International Microwave Symposium Digest, Vol1, p 283 -286, June, 2000
- [Par00], *J.S Park, Y B Gianchandani*, **A capacitive absolute-pressure sensor with external pick-off electrodes**, Journal of Micromechanics and Microengineering, Octobre 2000, p528 – 533
- [Pel98], *P. Pelegri*, **Microsystèmes et micropompes**, Rapport de stage DESS réalisé au CNES de Toulouse, 1998
- [Pet82], *K.E. Peterson*, **Silicon as a mechanical material**, IEEE, 70 :420-457, 1982
- [Pim07], *K. Pimapunsri*, **Conception intégrée de meubles réalisés en panneaux de fibres ou de particules**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007
- [Pot03], *A. Pothier*, **Conception, réalisation et test de microcommutateurs micro-électromécaniques et application aux circuits hyperfréquences reconfigurables**, thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003
- [Qia96], *L Gero, J-S Qian*, **Function-behavior-structure paths and their role in analogy based design**, Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 10 : 289-312, 1996
- [Reb01], *G. M. Rebeiz, J. B. Muldavin*, **RF MEMS, Switches and Switch circuits**, IEEE microwave magazine, 59-71, December, 2001
- [Reb02], *G.M. Rebeiz*, **RF MEMS : Theory, Design, and Technology**, John Wiley & Sons; 1st edition, June 15, 2002
- [Ren04], *A. Renaudin, V. Zhang, P. Tabourier, J.C. Camart and C. Druon*, **Droplet manipulation using SAW actuation for integrated microfluidics**, μ TAS 2004, Sweden, 26-30 september 2004
- [Rou00], *L. Roucoules, S. Tichkiewitch*, **Codemo : A cooperative design environment - a new generation of CAD systems**, Concurrent engineering : research and applications, 8(4) :263-280, 2000

- [Rou07], *L. Roucoules*, **Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin : des spécifications fonctionnelles du produit au choix des procédés de fabrication (la maîtrise du produit par la maîtrise des procédés)**, Mémoire de synthèse rédigé en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Troyes, 2007
- [Rou99], *L. Roucoules*, **Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999
- [Sab06], *S. Bettaieb*, **Contribution à la spécification d'un environnement de conception collaborative intégrant d'expertises métier hétérogènes**, Thèse de doctorat, Université de grenoble, 2006
- [Sad08], *M. Sadeghi*, **Gestion dynamique des règles métiers dans les systèmes d'information dédiés à la conception collaborative**, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008
- [Sch00], *P-L Johannesso, H. Schachinger*, **Computer modelling of design specifications**, Journal of Engineering Design, 11 (4) : 317-329, 2000
- [Sch04], *G. Schröpfer, M. McNie, M. G. da Silva, R. Davies, A. Rickard, F-X Musalem*, **Designing manufacturable MEMS in CMOS compatible processes - methodology and case studies**, SPIE's Photonic conference, MEMS, MOEMS and Micromachining proceedings, Strasbourg, 26-30th april 2004
- [Sen01], *S.D Senturia*, **Microsystem design**, Kulwer academic publisher, January, 2001
- [Tic94], *S. Tichkiewitch*, **De la CFAO à la conception intégrée**, International Journal of CAD/CAM and Computers Graphics, vol 9 n°5, pp. 609-621, 1994
- [Tic97], *S. Tichkiewitch, M. Veron*, **Methodology and product model for integrated design using a multiview system**, Annals of CIRP, 46(1), 1997
- [Tlfi08], *le Trésor de la Langue Française Informatisé*, <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>,
- [Wau01], *M. Wautelet*, **Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworld**, European Journal of Physics, 22 :601–611, 2001
- [Yao00], *J.J. Yao*, **RF MEMS from a device perspective**, J. Micromech. Microeng, 10, R9-R38, 2000
- [Yaz07], *M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi*, **Fluid Circulation within a Spherical Reservoir with EHD Conduction Pumping**, Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE, Volume , Issue , 23-27 Sept. 2007 Page(s) :45 - 50
- [Yua05], *X.Yuan, S.Cherepko, J.Hwang, C.L.Goldsmith, C.Nordquist, C.Dyck*, **Modeling and characterization of dielectric charging-effects in RF MEMS capacitive switches**, 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Long Beach, USA, 2005

Un modèle pour l'intégration des couplages multiphysiques et la prise en compte de la fabricabilité au cours du processus de conception des microproduits.

Résumé :

La conception des microproduits est une activité multidisciplinaire faisant fréquemment appel à la mise en œuvre de plusieurs principes physiques couplés. Différents acteurs interviennent au cours du processus de conception du produit : spécialistes des principes physiques mis en œuvre, experts des procédés de fabrications, etc. Ces acteurs doivent collaborer selon les principes de la conception intégrée dans le but de concevoir un produit performant tout au long de son cycle de vie.

Le concept de modèle-produit a été développé dans le cadre de la conception d'un "macro" produit, pour permettre l'intégration de l'ensemble des expertises métiers intervenant sur le cycle de vie du produit. Il nous semble donc pertinent d'évaluer dans quelle mesure ce concept pourrait convenir pour la conception de microproduits. Après avoir souligné les limites des modèles existants, la difficulté de les utiliser pour supporter l'étroite collaboration entre les experts des différents principes physiques mis en œuvre et la gestion des couplages multiphysiques, nous présentons les concepts nécessaires à l'élaboration d'un modèle dédié aux microproduits. Le modèle mis en place et son application à la conception de deux microproduits (un MEMS switch RF et un système microfluidique) sont finalement présentés.

Mots-clés : microproduits, conception intégrée, modèle-produit, couplage multiphysiques, fabricabilité, processus de conception.

A model to integrate multiphysical coupling and manufacturability during microproduct design process.

Abstract:

Microproduct design is a multidisciplinary task which most of the time requires to couple several physical principles to obtain the right product behaviour. Various actors are involved throughout the product design process : physical principles and manufacturing processes experts for instance. These actors have to collaborate in accordance with integrated design principles in order to design high-performance products along its entire life cycle.

Product-model concept has been developed for the design of macro products in order to enable the integration of the whole community of experts throughout the product lifecycle. Therefore assessing the relevance of this concept to the design of microproducts seems pertinent. To do so the limits of existing models are first highlighted, as well as the difficulty of applying them as a support for close collaboration between physical principal experts and the control of multiphysical coupling. Then the concepts required for the elaboration of a microproducts dedicated model are presented. The implemented model and its application onto the design of two microproducts (a MEMS switch RF and a microfluidic device) are finally presented and discussed.

Keywords: microproduct, integrated design, product-model, multiphysical coupling, manufacturability, design process.