HAL open science

Dimensionnement et optimisation en mécanique : Application à la conception intégrée des systèmes mécaniques, aux procédés et aux structures.

Pascal Lafon

To cite this version:

Pascal Lafon. Dimensionnement et optimisation en mécanique : Application à la conception intégrée des systèmes mécaniques, aux procédés et aux structures.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Technologie de Compiègne, 2007. tel-03611019

HAL Id: tel-03611019

https://hal.science/tel-03611019v1

Submitted on 16 Mar 2022

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.

Ecole Doctorale de l'Université de Technologie de Compiègne

Mémoire de synthèse rédigé en vue d'obtenir
l'Habilitation à Diriger des Recherches

Dimensionnement et optimisation en mécanique : Application à la conception intégrée des systèmes mécaniques, aux procédés et aux structures.

Soutenue publiquement à l'université de technologie de Troyes
le 12 décembre 2007

par :

Pascal LAFON

Devant le jury composé de :

Marc Sartor	Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, section 60, Président du jury.
Jean Louis Batoz	Professeur à l'Université de technologie de Compiègne, section 60, rapporteur.
Daniel Coutellier	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, section 60, rapporteur.
Frédéric Noël	Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, section 60, rapporteur.
Philippe Depincé	Maitre de Conférences (HDR) à l'Ecole Centrale de Nantes, section 60, examinateur.
Khémais Saanouni	Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, section 60, examinateur.

Rapport préparé au sein de l'Institut Charles Delaunay (CNRS FRE 2848)
dans l'équipe « Systèmes Mécaniques et Ingénierie Simultanée »
de l'Université de Technologie de Troyes

Table des matières

Deuxième Partie : Synthèse des activités de recherche

INTRODUCTION 13
CHAPITRE 1 FORMULATION D'UNE EXPERTISE CALCUL DE SYNTHESE DE SOLUTIONS 17
1 Introduction : contexte et état de l'art 17
2 Problématique et positionnement scientifique de nos travaux 31
3 Intégration d'une expertise calcul dans le processus d'intégration : notre proposition de démarche 32
4 Résultats 35
5 Conclusions et principaux apports 60
6 Perspectives 61
CHAPITRE 2 OPTIMISATION DES PROCEDES DE MISE EN FORME 63
1 Contexte – état de l'art 63
2 Problématique et positionnement de nos travaux 66
3 Propositions et résultats 67
4 Conclusions et principaux apports 70
5 Perspectives 71
CHAPITRE 3 OPTIMISATION DES STRUCTURES ET COUPLAGE FLUIDE – STRUCTURE 73
1 Contexte – état de l'art 73
2 Problématique et démarche 74
3 Résultats 74
4 Conclusions et principaux apports 79
5 Perspectives 80
CONCLUSIONS 83
PERSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE 85
BIBLIOGRAPHIE 87

Version imprimée en date du : 24/03/2009

Table des figures

Figure 1 : Concept lié à l'émergence d'une solution de produit par intégration des contraintes métier et positionnement de mes activités de recherche. 14
Figure 2 : Evolution des données du produit vers la convergence de la solution en regard des différents types d'activités. 18
Figure 3 : Structuration du modèle « Produit Process Organisation » établie dans le projet IPPOP. 19
Figure 4 : Structure du modèle de produit « composants/liens/relations » avec décomposition mutli-vues. 20
Figure 5 : Modélisations fonctionnelles et structurelles du produit et correspondance entre les deux modélisations. 21
Figure 6 : Les grandes catégories de problèmes et de méthodes d'optimisation : une classification 28
Figure 7 : Principe général d'un algorithme évolutionnaire (ici le cas d'une stratégie évolutionnaire). 29
Figure 8 : Graphe des différentes combinaisons de composants technologiques pour une même fonction technique. 35
Figure 9 : Problème d'optimisation d'un engrenage simple, effet d'une modification des données du problème sur la topologie du domaine des solutions. 36
Figure 10 : Courbes d'évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction du nombre de générations montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et les algorithmes génétiques (GA). 38
Figure 11 : Courbes d'évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction du nombre de générations montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et l'algorithme couplé. 39
Figure 12 : Principales étapes de l'algorithme de couplage entre la stratégie évolutionnaire et le lagrangien augmenté. 40
Figure 13 : Transmission par engrenage, illustration des cas de formulation générique du problème de dimensionnement optimal. 42
Figure 14 : Réducteur à trois étages : configuration initiale (solution industrielle) et optimisée. 43
Figure 15 : Evolution de la valeur moyennée sur la population de la fonction objectif pour le réducteur à trois étages. 43
Figure 16 : Configuration générique d'une liaison pivot isostatique à deux roulements. 44
Figure 17 : Résultats d'optimisation pour deux sens de montage différents. 45
Figure 18 : Les différentes configurations prises en compte dans la formulation du problème. 45
Figure 19 : Front de Pareto du problème de fixation par éléments filetés, comparaison des résultats de deux méthodes. 46
Figure 20 : Diagramme montrant la chronologie des activités de l'expertise calcul. 48
Figure 21 : Composant « structure » arbre de machine, exemple d'évolution de la définition géométrique. 49
Figure 22 : Actigramme IDEF0 modélisant les tâches de l'expertise calcul des composants technologiques « structures ». 50
Figure 23 : Diagramme UML du modèle de données de l'expertise calcul. 51
Figure 24 : Scénario d'utilisation typique des outils de dimensionnement optimal de composant technologique « liaisons ». 53
Figure 25 : Couplage direct CAO / optimisation de composants technologiques «liaison », illustration du synoptique du calcul. 54
Figure 26 : Couplage via le format STEP entre CoDeMo et l'optimisation de composants technologiques « liaisons ». 54
Figure 27 : Représentation multi-vues dans CoDeMo du modèle de produit associé à un composant technologique « liaison ». 55
Figure 28 : Association entre une représentation géométrique du produit et la vue « fonctionnelle » dans CoDeMo. 56
Figure 29 : Représentation géométrique du produit issue de l'expertise « choix des procédés de fabrication ». 56
Figure 30 : Emergence de deux représentations géométriques du produit issues de deux expertises métier dans CoDeMo. 57
Figure 31 : Interface de la maquette de l'application supportant l'expertise dimensionnement de composants « structures ». 58
Figure 32 : Multi-vues et intégration des contraintes métier « calculs » dans le modèle de données du produit géré par « CoDeMo ». 59

Figure 33 : Organigramme simplifié de l'outil de simulation des procédés de mise en forme développé au LASMIS. 65
Figure 34 : Synoptique d'un environnement d'optimisation de la géométrie des outillages. 67
Figure 35 : Exemple de paramétrage d'un outillage dans le logiciel CATIA V5™. 68
Figure 36 : Procédure de détection de pièce correcte à l'issue de la simulation du procédé. 69
Figure 37 : Synoptique des calculs parallèles pour les plans d'expériences. 69
Figure 38 : Exemple de résultats tirés d'un plan d'expériences montrant l'influence de la variation de paramètres géométriques sur l'énergie totale de déformation. 70
Figure 39 : Allure de la répartition de la pression dynamique due à la houle et ancrage d'une digue flottante. 75
Figure 40 : Optimisation topologique : principe du double maillage. 75
Figure 41 : Exemple de topologie optimale, maillage pour le calcul des contraintes mécaniques et répartition des contraintes. 76
Figure 42 : Optimisation de forme avec description évolutive de la géométrie. 77
Figure 43 : Maillage (triangle linéaire) du domaine fluide pour le modèle dynamique. 77
Figure 44 : Synoptique du calcul du coefficient d'atténuation. 78
Figure 45 : Etude paramétrique, influence de la largeur de la digue et de l'angle des lignes d'ancrage sur le coefficient d'atténuation. 78
Figure 46 : Optimisation de forme à partir du modèle de comportement dynamique : description géométrique et solution optimale (pour le béton et une hauteur de houle de 2m). 79

Avant-propos

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches présente une synthèse de mes activités de recherche conduites depuis 1994, date de ma nomination comme maître de conférences à l'université de technologie de Troyes. Ces activités, inscrites dans la continuité de mes travaux de thèse, ont débuté dans le contexte très particulier de la création de l'université de technologie de Troyes en 1994. En effet, dès mon arrivée, tout était à construire : définition des objectifs scientifiques et d'une stratégie pour initier une équipe de recherche sur la thématique de l'ingénierie mécanique et consolidation d'une formation d'ingénieur en Génie des Systèmes Mécaniques démarrée quelques mois plus tôt. L'équipe de l'époque constituée d'un jeune professeur des universités, de deux maitres de conférences fraichement nommés et d'un professeur agrégé avait donc fort à faire. Dans ce contexte motivant et plein de potentialités, mon inexpérience de l'époque à sans doute eu des conséquences sur l'intensité de mes activités de recherche durant les quatre premières années. Néanmoins, plus d'une dizaine d'années plus tard, à l'occasion de la synthèse nécessaire à la rédaction d'une habilitation à diriger des recherches, je perçois le chemin parcouru et l'évolution de mes activités de recherche. Je pense avoir su développer et enrichir ces activités par, entre autres, les collaborations résultant des recrutements successifs de notre équipe de recherche, et en particulier de ceux du thème de recherche sur l'« Intégration pour la conception des systèmes mécaniques ».

Ce document se divise classiquement en trois parties. La première dessine d'un trait rapide le bilan de ces treize années en matière d'enseignement, de recherche et présente mon implication dans la vie de l'établissement au niveau des responsabilités administratives et collectives.

La deuxième partie brosse un tableau plus détaillé de mes activités de recherche. Le thème central de mes travaux concerne les méthodes de dimensionnement et d'optimisation en mécanique. Dans cette partie j'articulerai la synthèse de mes activités autour de trois chapitres, présentant chacun une application de ce thème central à un domaine particulier. Le premier chapitre abordera la spécification de méthodes et d'outils permettant d'intégrer le calcul et l'optimisation des systèmes mécaniques dans le processus de conception. Inscrits dans la continuité de mon travail de thèse, les travaux présentés dans ce chapitre représentent la plus grande partie de mon activité. Dans le second chapitre, je présenterai un thème en émergence concernant l'optimisation des procédés de mise en forme. Ce thème, issu de ma volonté de développer des activités de recherche en synergie avec les activités concernant la simulation des procédés de mise en forme, s'appuie sur les compétences que j'ai acquises dans le domaine de l'optimisation. Enfin dans le troisième chapitre j'exposerai le thème le plus récent, émergeant de la collaboration avec l'université Libanaise de Beyrouth. Cette application concerne l'optimisation de structures flottantes permettant de protéger les installations portuaires des effets de la houle.

Finalement, la troisième partie de ce document regroupe les textes intégraux de mes principales publications.

Deuxième partie :

Synthèse des activités de recherche

INTRODUCTION 13
CHAPITRE 1 FORMULATION D'UNE EXPERTISE CALCUL DE SYNTHESE DE SOLUTIONS 17
1 Introduction : contexte et état de l'art 17
1.1 Le processus de développement de produit et la modélisation des données du produit 17
1.2 Processus de conception : passage du domaine fonctionnel au domaine physique du produit 21
1.3 L'expertise calcul dans le développement de produits mécaniques: une vue générale et intégration dans le processus de conception 23
1.3.1 L'intégration CAO / calcul 24
1.3.2 Le calcul comme synthèse de solutions 25
1.4 L'optimisation en ingénierie mécanique : aperçu des méthodes disponibles 26
1.4.1 Synthèse des algorithmes d'optimisation disponibles 27
1.4.2 Optimisation multicritères 29
1.4.3 L'optimisation en ingénierie mécanique 31
2 Problématique et positionnement scientifique de nos travaux 31
3 Intégration d'une expertise calcul dans le processus d'intégration : notre proposition de démarche 32
3.1 Composants technologiques « liaisons » et « structures » 33
3.2 Intégration au plus tôt dans le processus conception 33
3.3 Optimisation et composants technologiques « liaisons » 34
4 Résultats 35
4.1 Dimensionnement optimal de composants technologiques « liaisons » 35
4.1.1 Algorithmes de résolution adaptés 35
4.1.2 Applications 41
4.2 Composants technologiques « structures » : formulation d'une expertise calcul comme support de synthèse de solution 48
4.3 Intégration du calcul vers l'émergence des solutions 52
4.3.1 Intégration du dimensionnement optimal de composants 52
4.3.2 Intégration de l'expertise de dimensionnement de composants « structures » 57
5 Conclusions et principaux apports 60
6 Perspectives 61
CHAPITRE 2 OPTIMISATION DES PROCEDES DE MISE EN FORME 63
1 Contexte – état de l'art 63
1.1 Contexte industriel et économique 63
1.2 Contexte scientifique – synthèse 63
1.2.1 Simulation numérique des procédés 63
1.2.2 Définition d'outillages et approche métier 65
1.2.3 Optimisation des procédés de mise en forme 66
2 Problématique et positionnement de nos travaux 66
3 Propositions et résultats 67
4 Conclusions et principaux apports 70
5 Perspectives 71
CHAPITRE 3 OPTIMISATION DES STRUCTURES ET COUPLAGE FLUIDE – STRUCTURE 73
1 Contexte – état de l'art 73
2 Problématique et démarche 74
3 Résultats 74
3.1 Optimisation topologique et de forme avec un modèle de comportement statique 74
3.2 Formulation d'un modèle de comportement dynamique 76
3.3 Optimisation avec un modèle de comportement dynamique 79
4 Conclusions et principaux apports 79
5 Perspectives 80
CONCLUSIONS 83
PERSPECTIVES ET PROJETS DE RECHERCHE 85
BIBLIOGRAPHIE 87

Introduction

De nombreux changements sociotechniques apparaissent aussi bien au niveau des petites et moyennes entreprises que des grands groupes industriels. En effet, il s'agit actuellement de prendre en compte, lors du développement de nouveaux produits, une complexité technique croissante et quelques fois mal maîtrisée. Cela engendre des coûts de développement de plus en plus importants, dans des délais toujours plus brefs et dans un marché toujours plus concurrentiel. Pour satisfaire ces contraintes de coûts, les grands groupes industriels n'hésitent plus à délocaliser les sites de production et ceux de développement de leurs produits. Parallèlement, afin de mutualiser ces coûts de développement importants, la relation entre les donneurs d'ordres/prestataires de services s'est transformée en un partenariat pour le co-développement de produit. A cette nécessaire évolution interne des entreprises, s'ajoute celle de leur environnement avec l'émergence de nouveaux marchés, de nouvelles concurrences (pays de l'Est, Asie, ..) et les contraintes plus fortes liées à l'écologie.

Tout ceci accentue le rôle stratégique de la phase de développement d'un produit, qui s'est profondément modifiée depuis une quinzaine d'années sous l'influence de deux idées :

- L'ingénierie simultanée [Sohlenius 1992], permettant de réduire significativement les temps de développement. L'industrie automobile est, à ce titre, un très bon exemple.
- La prise en compte du plus grand nombre de contraintes métier liées au cycle de vie du produit, afin de limiter les itérations dans le processus de développement [Tollenaere 1998].

Au delà de ces deux idées, au demeurant fort simples, leur mise en œuvre concrète et efficace est encore source de nombreuses difficultés. Même si les outils, les méthodes de travail et d'organisation ont évolué, les entreprises ne parviennent pas encore à les exploiter pleinement.

Mes travaux de recherche s'inscrivent pleinement dans cette problématique de spécification d'outils et de méthodes permettant de mieux mettre en œuvre ces idées d'ingénierie simultanée et de conception intégrée. Le thème central de mes travaux concerne les méthodes de dimensionnement et d'optimisation en mécanique. Ce thème se décline dans trois domaines d'application. Le premier concerne la spécification de méthodes et d'outils permettant d'intégrer le calcul et l'optimisation dans le processus de conception. Le deuxième domaine traite de l'optimisation des procédés de mise en forme et le troisième concerne l'optimisation des structures flottantes.

La synthèse de mes activités de recherche présentée dans cette partie est structurée autour de trois chapitres, chacun reprenant les domaines d'application que nous venons d'évoquer. Dans ces trois chapitres, je développerai la présentation de ces applications en détaillant d'abord le contexte afin de mieux préciser la problématique. Les résultats obtenus seront ensuite présentés, chaque chapitre se terminant par les perspectives propres à chaque domaine d'application.

Ces travaux de recherche ont été développés au sein l'équipe des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée de l'Institut Charles Delaunay. Ils contribuent à l'objectif global de l'équipe qui est de développer des méthodes, des modèles et des outils pour la conception intégrée. Actuellement les activités de l'équipe se concentrent sur 3 thèmes :

1. Procédés d'élaboration de matériaux innovants.
2. La simulation numérique des procédés de mise en forme.
3. L'ingénierie intégrée des systèmes mécaniques.

Mes travaux de recherche contribuent majoritairement au thème « ingénierie intégrée des systèmes mécaniques » et plus récemment au thème « simulation numérique des procédés de mise en forme ». La figure 1 expose le principe de l'intégration des connaissances exprimées par les différentes expertises au cour du processus de développement d'un produit. Elle montre que la solution de conception doit émerger de cette intégration de façon à respecter au mieux les contraintes formulées par les expertises mises en œuvre dans le processus de conception. Ceci doit limiter le nombre d'itérations dans le processus de conception en évitant les démarches classiques de type « essai – erreur ». A titre d'exemple, quelques unes des expertises développées par les recherches conduites dans notre laboratoire sont positionnées sur cette figure. Cela montre comment ces expertises contribuent à l'émergence de la solution du produit.

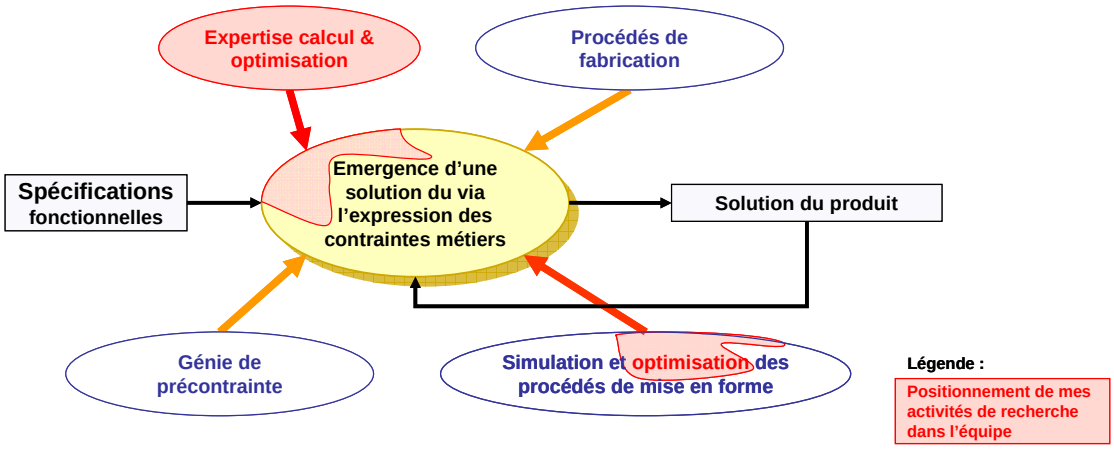


Figure 1 : Concept lié à l'émergence d'une solution de produit par intégration des contraintes métier et positionnement de mes activités de recherche.

Il est intéressant ici de présenter succinctement les travaux de recherches de l'équipe qui sont connexes aux nôtres afin de mieux préciser le contexte de nos activités :

- Le développement de modèles de données offrant un support efficace et robuste de l'intégration des expertises métier dans le processus de conception et d'industrialisation est une partie des travaux de Lionel ROUCOULES [Roucoules 2007]. Nous détaillerons ces aspects, dans le contexte du premier chapitre.
- La définition des méthodes de gestion du cycle de vie des produits pour garantir une plus grande interopérabilité des applications logicielles en conception et la formalisation des processus et protocoles d'échange de données techniques pour assurer la qualité et la cohérence des modèles CAO, IAO ou FAO est la grande partie des travaux de Benoit EYNARD [Eynard 2005]. Ces compétences nous ont permis de mieux spécifier les méthodes d'intégration des outils de dimensionnement et d'optimisation des systèmes mécaniques.

- Le développement des outils de simulation des procédés de mise en forme prenant en compte l'endommagement ductile des matériaux est l'objet des recherches du groupe aminé par Khémais SAANOUNI [Saanouni 2006]. Ces travaux fournissent les outils de simulation que nous utilisons dans les méthodologies d'optimisation que nous présenterons dans le second chapitre.

Chapitre 1 Formulation d'une expertise calcul de synthèse de solutions

1 Introduction : contexte et état de l'art

L'objectif de cette introduction est de présenter brièvement un état de l'art des connaissances permettant de mieux percevoir le processus de développement de produits manufacturés. Ce processus de développement peut être décrit comme l'ensemble des activités permettant de passer d'une description fonctionnelle du produit à développer, à l'ensemble des informations permettant de décrire le futur produit et les moyens de production qui lui sont associés.

Dans cette présentation nous aborderons :

- Une modélisation du processus de développement, modélisation nécessaire pour définir un certain nombre d'hypothèses par rapport à nos travaux de recherche. Nous ne ferons pas état de toutes les modélisations existantes, on pourra en avoir un aperçu dans les travaux de Benoit EYNARD [Eynard 2005] et Dominique DENEUX [Deneux 2002].
- La modélisation des données du produit et les outils associés permettant de stocker, gérer et capitaliser ces données au cours du processus de développement. Cela nous permettra de présenter les concepts et les modèles, sur lesquels nous nous sommes appuyés, pour spécifier les méthodes d'intégration des outils de dimensionnement et d'optimisation. Nous ne ferons pas état de l'ensemble des travaux dans ce domaine, on pourra se référer aux travaux de Lionel ROUCOULES [Roucoules 2007] qui propose un éclairage plus large sur ce thème.
- L'expertise « calcul » au sens large dans le processus de conception. Nous insisterons sur deux aspects qui concernent directement notre problématique, celui de l'intégration CAO / calcul, et celui des activités de calculs comme support de la synthèse de solution.
- Une synthèse des méthodes d'optimisation actuellement disponibles en essayant de balayer l'ensemble des principes d'optimisation utilisés actuellement (hormis les aspects linéaires, très peu utilisés en ingénierie mécanique). Cette synthèse permettra de mieux situer notre apport dans le domaine des méthodes d'optimisation.

1.1 Le processus de développement de produit et la modélisation des données du produit

Dans le contexte actuel tel que nous l'avons introduit précédemment, le processus de développement peut être perçu comme un enchaînement séquentiel ou simultané d'activités [Roucoules 2007] :

- Individuelles asynchrones, au cours desquelles les experts, acteurs de la conception, réalisent des tâches visant à enrichir la représentation du produit. Les experts utilisent alors leur expérience, leurs outils (souvent logiciels), les informations disponibles sur le produit à l'instant t, pour produire d'autres informations, ou simplement valider celles existantes.
- Collectives asynchrones, déclenchées par le responsable du projet, ou par un conflit nécessitant une discussion. Les outils utilisés ici sont asynchrones (mails, forum de discussion, ..) et sont les médias qui supportent une discussion visant à comprendre une

situation donnée ainsi que l'argumentation des autres acteurs du groupe de projet de manière à résoudre le conflit.

- Collaboratives synchrones, qui peuvent être déterminées à l'avance pour des raisons stratégiques (notion classique de jalons dans les projets industriels de développement), ou provoquées par le responsable du projet, comme dans le cas précédent. La différence ici tient au processus de décision mis en œuvre avec des moyens de communications synchrones (revues de projet en présentiel ou par visioconférence...)

Ce processus produit et transforme une très grande quantité d'informations. Les travaux de recherche relatifs à la définition de modèles de données permettant de stocker, de partager et de capitaliser ces informations intègrent les trois dimensions fondamentales liées au produit lui-même, à la conduite du processus de développement de ce produit et enfin aux ressources ou à l'organisation nécessaire pour mettre en œuvre ce processus. [Labrousse 2004, Girard 2005, Krause 2006].

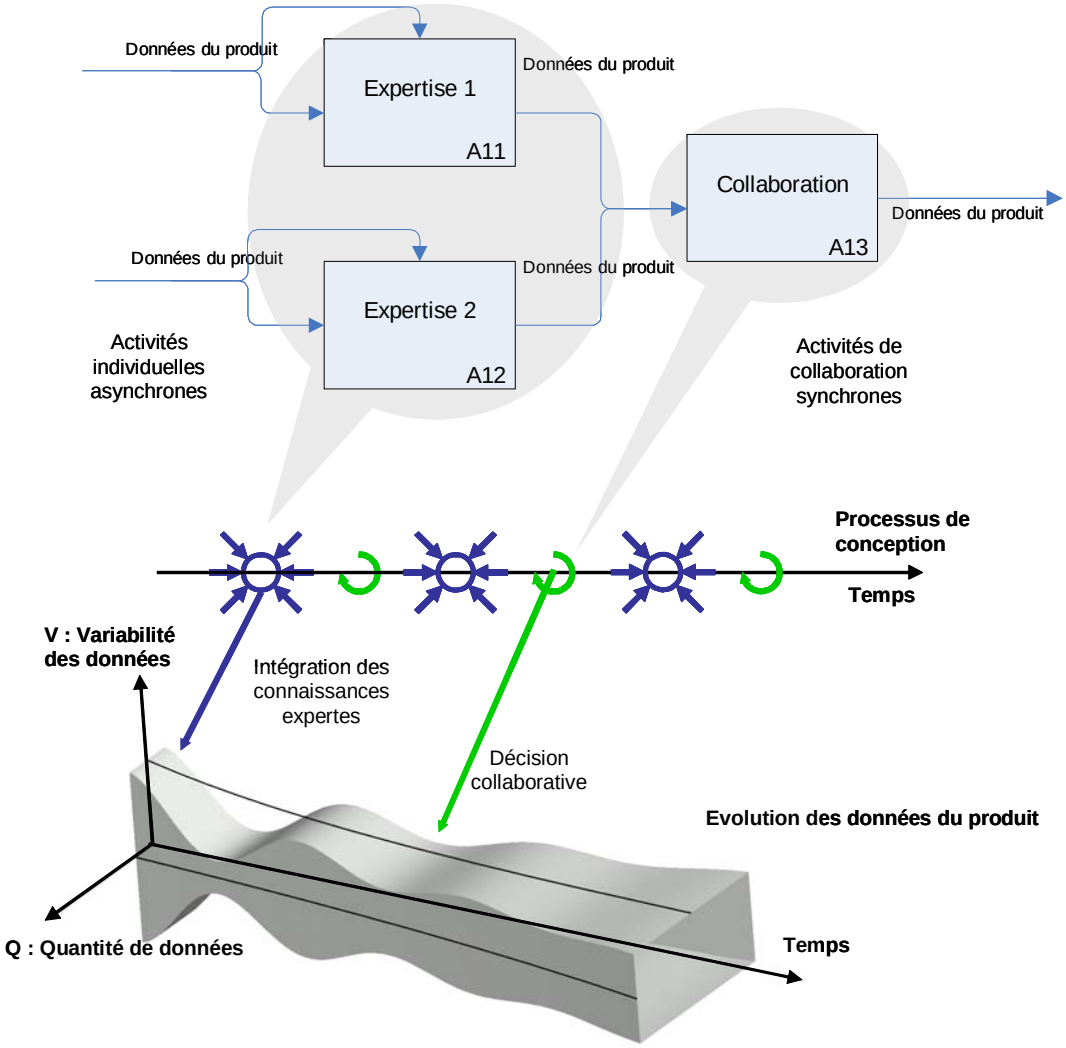


Figure 2 : Evolution des données du produit vers la convergence de la solution en regard des différents types d'activités.

La figure 2 propose une représentation simplifiée de l'évolution des données du produit au cours du temps. Les données sont caractérisées par leur quantité et leur variabilité, c'est-à-dire l'intervalle des valeurs qu'elles peuvent prendre. Cette représentation schématique montre que [Roucoules 2006] :

- La quantité de données augmente tout au long du processus, puisque la définition du produit se précise.
- La variabilité des données par contre diminue en valeur moyenne tout au long du processus car les décisions prises limitent l'espace des possibles. Cependant cette variabilité est normalement sujette à une augmentation lors des phases d'intégration des différentes expertises métier. En effet, de ces phases d'intégration résultent la prise en compte de nouvelles connaissances issues des expertises et donc apparaissent de grandes variabilités associées à ces connaissances.
- Le processus de conception doit assurer la convergence vers une solution de conception unique, parfaitement définie, donc avec une variabilité sur les données quasi nulle.

La mise en œuvre efficace d'un processus de conception intégrée s'appuie nécessairement sur une modélisation des données du produit assurant, le stockage, l'échange, et la cohérence des données du produit.

Les concepts fondamentaux de la littérature traitant de la modélisation du produit[1] ont été analysés lors du projet IPPOP[2], réponse à un appel d'offre du Réseaux National des Technologies Logicielles de l'ANR. L'équipe ICD-LASMIS ayant participé activement à ce projet, nous avons bénéficié naturellement des résultats de ce projet. Afin de préciser le contexte relatif à nos travaux par rapport à la modélisation des données du produit, nous limiterons cette présentation à un sous-ensemble des travaux du projet IPPOP, la modélisation des données produits et plus précisément la partie relative à l'émergence d'une solution de conception.

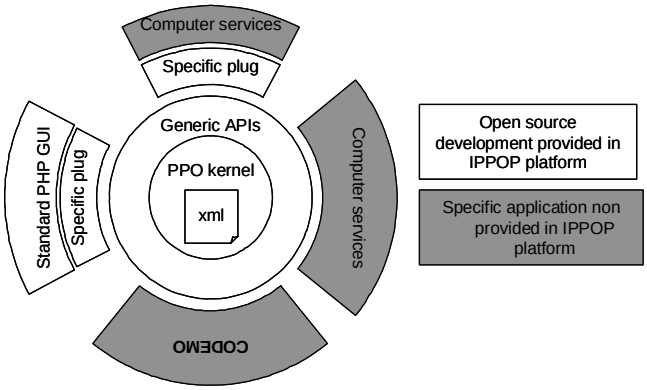


Figure 3 : Structuration du modèle « Produit Process Organisation » établie dans le projet IPPOP.

La figure 3 présente la structure du noyau du modèle « Produit Process Organisation » développé dans le projet IPPOP. La « frontière » relative à nos travaux se trouve au niveau de la partie du modèle produit gérée par l'application « CoDeMo[3] » [Roucoules 2000]. Ce prototype logiciel a été développé dans le cadre de la thèse de Lionel ROUCOULES [Roucoules 1999] à partir de concepts issus des travaux de Serge TICHKIEWITCH [Tichkiewitch 1996]. L'objectif de ces travaux était de définir les concepts de modélisation suffisamment générique permettant de mettre en relation des données de

[1] Par abus de langage et pour alléger l'écriture nous utiliserons « modélisation du produit » pour « modélisation des données de produit ».
[2] IPPOP : Intégration Produit Process Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie. Projet labellisé en décembre 2001. Résultats accessibles sur : http://ippop.laps.u-bordeaux1.fr.
[3] CoDeMo : Cooperative Design Modeler.

produit et de partager ces données entre les différents acteurs du processus de conception. Ces concepts de modélisation présentés sur la figure 4 sont définis comme :

- Composant : qui représente tout objet utilisé pour décrire tout ou partie du produit. La description pouvait être de niveaux granulaires très hétérogènes. Par exemple, un objet « système » représentant le système global à concevoir ou un objet « surface » représentant une surface d'une pièce.
- Lien : qui définit une partie d'un composant qui permet alors à ce dernier d'être mis en relation avec un autre composant.
- Relation : qui formalise la relation entre au moins deux composants par l'intermédiaire des liens.

Les éléments de ce modèle évoluent à l'aide des mécanismes de :

- Décomposition permettant de décomposer un composant en un autre composant. Ceci permettait de garder la trace de modélisation entre les différents niveaux granulaires de représentation. La « surface » devait alors être un sous-composant de la « pièce » lui-même sous-composant du « système ».
- Substitution permettant de remplacer une relation par un ensemble de composants, liens, relations.

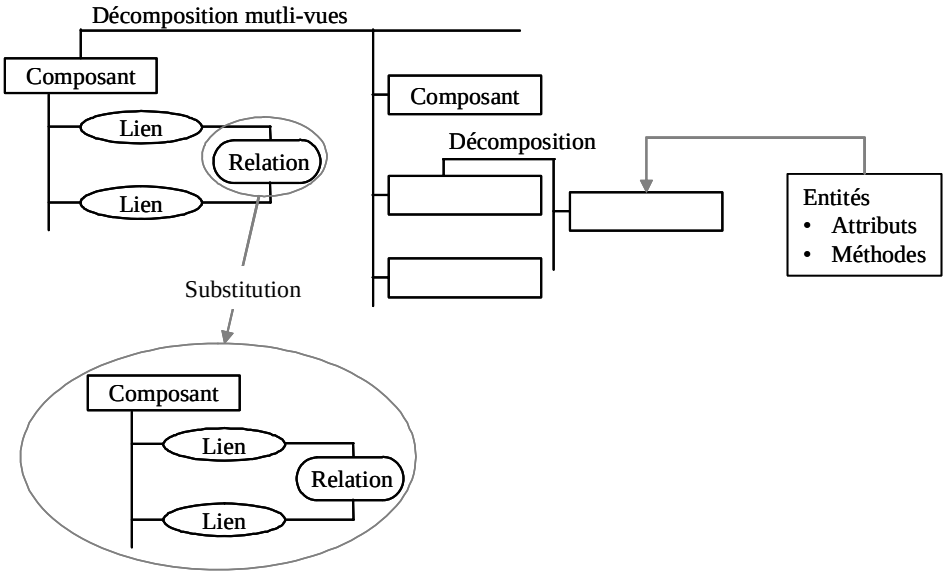


Figure 4 : Structure du modèle de produit « composants/liens/relations » avec décomposition mutli-vues.

Par ailleurs, partant des travaux d'Eric DUPINET [Dupinet 1991], inspiré par les « BondGraph », Damien CONSTANT propose un modèle fonctionnel pour la conception intégrée de produits mécaniques [Constant 1996]. Ce modèle est basé sur la circulation des flux d'énergie au sein d'un système et permet théoriquement de prendre en compte des phénomènes mécaniques, fluides ou électriques, ce qui n'est pas le cas du modèle précédent. Ce modèle fonctionnel est également intégré à « CoDeMo ». La figure 5 montre un exemple de modélisation (celui d'une liaison pivot) et la correspondance entre les modèles fonctionnel et structurel.

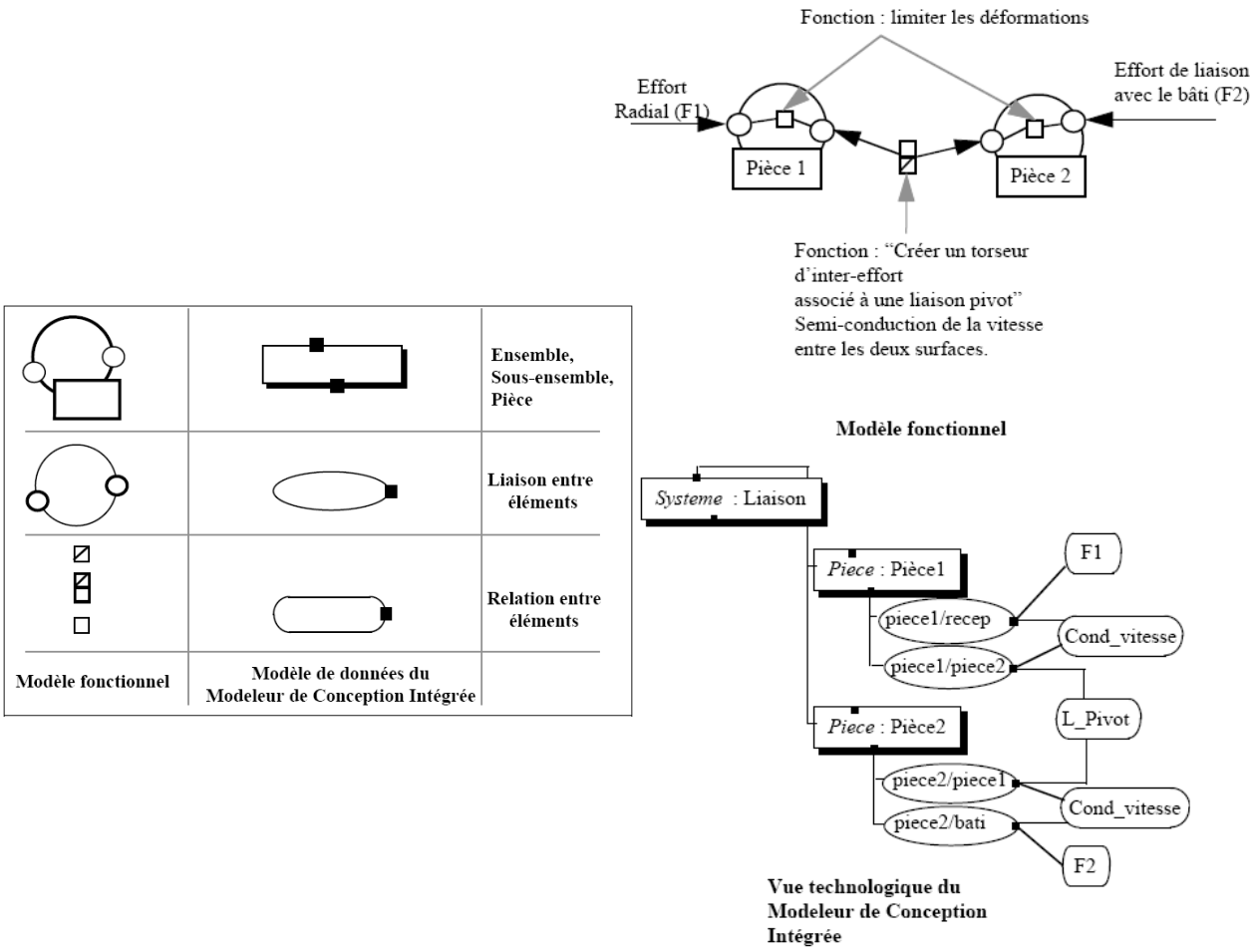


Figure 5 : Modélisations fonctionnelles et structurelles du produit et correspondance entre les deux modélisations.

Le modèle structurel de la figure 4 permet une multi représentation des données du produit, indispensable dans un contexte de conception intégrée. En effet, en fonction de leur expertise, les différents acteurs du projet n'ont pas la même vision du produit et n'ont pas besoin des mêmes informations. Une autre « vue » des données du produit peut être créée par une nouvelle décomposition basée sur les concepts « Composants / Liens / Relations ». La cohérence entre les vues est assurée par des mécanismes de traduction établissant les correspondances les différentes interprétations des éléments de chaque vue métier [Tichkiewitch 1997, Roucoules 1999].

1.2 Processus de conception : passage du domaine fonctionnel au domaine physique du produit

L'objet de cette partie est de présenter de manière très synthétique les éléments de connaissances qui permettent de baliser dans le processus de conception le passage du domaine fonctionnel du produit au domaine physique.

Le contexte des travaux du thème « ingénierie intégrée des systèmes mécaniques » du LASMIS, et donc de mes travaux, concerne les étapes de « conceptual design » et « d'embodiment design » du processus de développement du produit. La phase de « conceptual design » peut se schématiser en la présentant comme le passage de la description fonctionnelle à une description physique du produit. Au cours de cette phase, la structuration du produit et les technologies mises en œuvre apparaissent progressivement.

L'investigation du domaine fonctionnel du produit est aujourd'hui bien supportée par les méthodes d'analyse de la valeur [NF EN 1325-1 1996]. Plusieurs modélisations sont disponibles (APTE[4], FAST[5], QFD[6], [AFAV 1989]) et permettent de formaliser le passage des fonctions de service du produit vers les fonctions techniques à partir de techniques de décomposition. Certains logiciels commerciaux fournissent l'environnement nécessaire pour supporter cette étape (par exemple la suite TDC Knowllence[7]).

La transition entre le domaine fonctionnel et le domaine physique et donc la correspondance entre un ou plusieurs composants technologiques et une ou plusieurs fonctions techniques peut être formalisée à l'aide de travaux issus des « Bond Graph[8] » [Thoma 1975] des concepts « Function Behavior Structure[9] » [Umeda 1990]. Ces modélisations fournissent un support de représentation mais ne sont pas des méthodes de synthèse permettant d'aider les concepteurs dans cette transition. Aucune solution générale satisfaisante n'est pour l'instant proposée, on trouve cependant pour des cas particuliers de produit (mécanisme générateurs de mouvements ou de trajectoires) des méthodes de synthèse morphologique permettant de déterminer la cinématique adéquate pour assurer une trajectoire (la fonction) donnée [Yannou 2001]. Lorsque la morphologie (ou la structure physique) du produit est arrêtée, il faudra choisir les technologies à mettre en œuvre pour satisfaire les contraintes issues du cahier des charges.

Ce choix peut être assisté par un certain nombre d'outils :

- A partir de catalogues ou de bases de données de composants technologiques, avec une correspondance construite mentalement par les concepteurs et/ou basée sur l'expérience métier. De nombreux supports existent, sous différentes formes, la tendance étant à une structuration de base de données facilitant la consultation et la recherche des solutions. [Artobolevski 1976, Aublin 1998, Trace Parts™[10], …].
- A partir de méthode plus avancées, comme la méthode TRIZ [Altshuller 1979], par exemple, qui permet de formaliser le problème de conception, d'appliquer des outils particuliers afin d'interpréter la solution finale. Les résultats proposés dans Malin©, [Nadeau 2004] basés sur cette méthode, proposent alors une approche systématique de recherche de solutions dans les phases amont de conception. Ici se joue une partie de l'innovation en conception [Cavallucci 1999].

Le choix d'une structuration et les choix technologiques se traduisent par une instanciation dans le produit d'un ensemble de pièces, de composants, qu'il est ensuite nécessaire de dimensionner pour garantir, là encore, les contraintes du cahier des charges.

Il est intéressant ici de remarquer que les outils actuels de CAO ou plutôt de modélisation géométrique, sont encore inadaptés à cette étape de « conceptual design ». En effet dans ces logiciels, le produit est décrit par une structure de type nomenclature et par le modèle géométrique des différentes

[4] APTE : APplications des Techniques d'Entreprises : formalisation des interactions entre un produit et son milieu environnant.
[5] FAST : Function Analysis System Technique : technique de décomposition fonctionnelle partant des fonctions de service du produit pour faire apparaître les fonctions techniques puis les solutions technologiques associées.
[6] QFD : Quality Function Deployment, méthode basée sur des matrices « quoi/comment » permettant de formaliser lien entre les attentes du client et les solutions envisagées.
[7] http://www.tdc.fr
[8] Bond Graph : Représentation graphique d'un système faisant apparaître les flux d'énergie.
[9] Function Behavior Structure: concept générique permettant de représenter les fonctions, la structure et le comportement d'un produit.
[10] http://www.traceparts.com

pièces qui le composent. On voit tout de suite que la description fonctionnelle du produit n'est pas présente, et que par conséquent ces outils supportent mieux l'étape « d'embodiment design » [Deneux 2002, Noel 2003].

1.3 L'expertise calcul dans le développement de produits mécaniques: une vue générale et intégration dans le processus de conception

Nous l'avons déjà évoqué, la complexité croissante des produits actuels, la nécessité de réduire le temps du cycle de développement, les coûts engendrés par le développement de prototype physique du produit, accroit le rôle de la simulation numérique et plus généralement du calcul au sens large. L'objectif ultime étant double :

1. Faire des activités de calcul un véritable support de synthèse et de validation de solution tout au long du processus de développement, dans un contexte de conception intégrée.
2. Constituer une véritable maquette numérique qui pourrait se substituer au prototype physique sur l'ensemble de ces fonctionnalités.

Les efforts actuels portent bien sûr sur les activités de calculs liées au produit lui-même mais également sur celles qui sont liées aux moyens de production, qui dans le contexte de l'ingénierie simultanée sont choisis, préparés et organisés le plus en amont possible.

Dans l'acception la plus générale, le calcul est défini comme des opérations effectuées sur des symboles représentant des grandeurs [Pourroy 1998]. Cette définition générale réduite au contexte de la conception de produit mécanique permet de décrire le calcul comme toute activité destinée à évaluer des grandeurs (physiques la plupart du temps) à partir d'un modèle. Même si les outils de modélisation progressent et deviennent de plus en plus accessibles, ces activités nécessitent une très bonne expertise notamment pour les phases cruciales d'analyse d'une situation réelle, du choix des grandeurs à évaluer, du modèle et des moyens de résolution, puis finalement, de l'analyse critique des résultats et de leur validation éventuelle.

L'analyse des pratiques industrielles montrent que les activités de calcul se caractérisent par une grande « dispersion » sur l'ensemble du cycle de développement du produit et mettent en œuvre une multitude de modèles et d'outils. Dans cette définition très générale, elles peuvent intervenir dès la phase de « conceptual design », mais en pratique elles se concentrent sur la phase de « detail design ». Schématiquement, les activités de calculs sont mises en œuvre dans trois situations différentes [Pourroy 1998, Troussier 1999] :

- Les calculs de synthèse de solutions et d'aide à la décision dans les phases amont de la conception. Le produit n'est pas encore ou que partiellement défini, et les requêtes vis-à-vis du calcul sont d'argumenter des choix de principes de solutions, de pré dimensionner certains éléments du produit.
- Les calculs de validation ou d'analyse d'un état de conception donnée. Il s'agit plutôt de calculs sur le comportement du produit, avec une définition (géométries, chargement, etc...) souvent très précise de celui-ci. Ces calculs sont destinés à justifier des choix de conceptions.

- Le calcul en relation avec des essais expérimentaux, destiné à comprendre des comportements de produit inattendus, de recaler et valider des modèles de calculs, ou de mieux cibler des essais couteux. Nous ne détaillerons pas cette catégorie de calculs car étant donné la lourdeur et les coûts de la mise en œuvre des procédures expérimentales, ces calculs sont souvent conduits de manière asynchrone par rapport au processus de développement et participent rarement aux phases amont du développement du produit.

Les calculs de validation concernent la phase de « detail design » et sont, à l'heure actuelle, bien supportés par la plupart des logiciels de simulation du marché. Ces calculs mettent en œuvre une démarche d'analyse bien identifiée. C'est sans doute ce qui explique, d'une part, leur meilleure pénétration dans les pratiques industrielles et d'autre part, par leur nature, leur concentration sur les phases avancées de la conception. Dans ce domaine, les modèles à base d'équations différentielles aux dérivées partielles sont légions, ils sont associés à des méthodes numériques permettant d'obtenir une approximation des grandeurs à évaluer. Les modélisations par éléments finis ont pris ici une place considérable [Batoz 1995, Zienkiewicz 2006]. Sans remettre en cause les progrès spectaculaires dans ce domaine, et tous les bénéfices qu'en tirent les pratiques industrielles, cette concentration a pourtant des conséquences négatives. En effet la généralisation de l'usage des logiciels de CAO, avec en parallèle une large diffusion des logiciels de simulation numérique basés sur la méthode des éléments finis, fait du modèle CAO l'un des points de départ de ces calculs de validation. Cette situation peut alors conduire des itérations longues et coûteuses lorsqu'il est nécessaire de remettre en cause la définition géométrique d'une pièce, sans compter l'impact sur les autres expertises mises en œuvre au cours du processus de développement.

Les calculs de synthèse de solutions ou d'aide à la décision doivent permettre d'éviter de coûteuse remise en question dans les phases de « detail design » et de limiter les itérations nécessaires à la gestion d'un problème. Ce domaine étant en relation directe avec notre problématique de recherche, il sera détaillé dans un paragraphe spécifique. Avant de présenter cet aspect du calcul il nous semble intéressant de présenter la problématique connexe aux calculs de validation, qui est celle de l'intégration CAO et du calcul.

1.3.1 L'intégration CAO / calcul

Les problématiques d'intégration CAO / calcul découlent de l'importance prise par les méthodes de calcul par éléments finis et sont apparues depuis la formalisation des concepts de « conception intégrée » et « d'ingénierie concourante ». Les travaux conduits dans ce domaine ont pour objectif de développer des méthodes et des outils pour faciliter le passage d'un modèle CAO à une modélisation appropriée au calcul. En effet bien souvent le modèle CAO récupéré par l'expert calcul n'est pas adapté à un calcul par éléments finis. Il est nécessaire dans un premier temps « de simplifier » ce modèle voire d'en définir un autre puis de le discrétiser, cette simplification et la discrétisation (maillage) associée dépendent étroitement du type de calcul (analyses statiques, dynamiques, thermiques, …).

Il existe des propositions de méthodes permettant le passage d'un modèle CAO à une modélisation plus appropriée aux calculs [Arabshahi 1991, Armstrong 1996, Donaghy 2000]. Ces méthodes sont cependant difficilement généralisables, et se basent sur des critères essentiellement géométriques, qui ne sont pas les seuls à intervenir dans la définition d'un modèle idéalisé pour le calcul, [Troussier 1999, Fine 2001].

La définition du maillage d'une pièce complexe reste aujourd'hui une tâche longue et délicate malgré les gros progrès accomplis par les outils associés. En effet, même si des méthodes performantes de maillage automatique existent [George 1991, George 2001], leur implémentation dans des outils industriels reste toujours délicate, et les problèmes d'interopérabilité subsistent car [Noel 2003] :

- Les formats de description géométriques ne sont pas standardisés, les outils de CFAO utilisent des formats propriétaires difficilement accessibles.
- Les logiciels de maillage sont un élément des logiciels de simulation numérique par éléments finis et ne s'interfacent souvent qu'à travers des formats d'échange de la géométrie ne permettant pas une réelle association entre le modèle CAO et le modèle de calcul (maillages, conditions limites, lois de comportement).

Des éléments de réponses existent face à ces problèmes, soit chez les grands éditeurs de logiciels de simulation (MSC Software Corporation, ESI Group, ANSYS, ..) soit par exemple à partir de solutions construites sur des logiciels libres, comme le projet SALOME[11], visant à définir un environnement d'interopérabilité entre les différents solveurs, mailleurs et modèles CAO.

Ces activités de calcul génèrent une grande quantité d'informations et de fichiers informatiques, dont la gestion est essentielle pour assurer la continuité et la cohérence de la chaine des informations. On peut citer dans ce domaine les travaux de Sébastien CHARLES [Charles 2005], visant à définir à partir des concepts de gestion des données techniques, un environnement spécifique à la gestion des données de simulation en adressant en particulier les problèmes d'échanges de données par une proposition d'extension de la norme STEP[12].

Finalement, dans la nécessité d'intégrer le calcul au processus de conception comme tout autre expertise, l'intégration CAO / calcul ne répond qu'à une partie de cette nécessité. En effet l'intégration CAO / Calcul favorise la continuité des informations nécessaires aux calculs mais n'adresse pas le problème du retour vers le processus de conception des connaissances expertes produites par le calcul [Noel 2003].

1.3.2 Le calcul comme synthèse de solutions

Le modèle CAO du produit reste aujourd'hui le support privilégié de description du produit. Il devient le point de départ de beaucoup d'activités d'ingénierie, qui conduiront, avec un certain nombre d'itérations, à de nombreuses modifications de ce modèle CAO. Les activités de calculs n'échappent pas à cette règle, et l'importance donnée au modèle CAO limite considérablement la mise en œuvre de calculs de pré-dimensionnement beaucoup plus adaptés à la synthèse de solutions [Deneux 2002]. On pourrait presque schématiser cette situation en distinguant « un avant » et « un après » le modèle CAO du produit. Dans cette distinction, les activités de calculs situées après permettraient de valider des solutions tandis que celles se positionnant avant seraient plutôt utilisées pour la synthèse de solutions. Cette schématisation montre également que le calcul en tant qu'activité de synthèse de solutions est avant tout destiné à la structuration et au dimensionnement du produit plutôt qu'à une évaluation fine de son comportement.

Dans le domaine du dimensionnement des produits mécaniques, il existe pourtant de nombreux modèles de calculs et d'outils qui ne nécessitent pas de modélisation géométrique, donc potentiellement plus adaptés à la synthèse de solutions. Par exemple, en ce qui concerne le

[11] http://www.salome-platform.org
[12] STEP : STandard for the Exchange of Product data.

dimensionnement, on trouvera dans certains ouvrages un panorama assez complet des modèles concernant les composants de systèmes mécaniques usuels [Aublin 1998, Dubbel 1994]. Il existe également des logiciels dédiés d'aide au dimensionnement de composants mécaniques, le CETIM en propose un certain nombre concernant les engrenages, les éléments filetés, les arbres, …. Il n'est pas rare également que certains fournisseurs de composants proposent le téléchargement (souvent gratuit) de petits logiciels d'aide au dimensionnement.

Dans le domaine de la synthèse de mécanismes de transmission de puissance, plusieurs travaux de recherche ont conduit à la formulation d'outils de calculs pour la synthèse de solutions. On peut citer le logiciel « SICAM[13] » proposé par Jean GUILLOT [Guillot 1987], destiné à la synthèse de solutions optimisées pour des mécanismes composés d'engrenages montés sur des paliers à roulements à billes. Ces travaux ont été prolongés avec la proposition de CII, assurant les mêmes fonctions mais construit autour d'un logiciel de CAO plus moderne [Hernot 1995]. Sur le même thème mais en y ajoutant des fonctionnalités d'optimisation topologique, Jean Christophe FAUROUX [Fauroux 1999] propose un environnement intégré destiné à la synthèse de mécanismes de transmission de puissance par engrenage pour des configurations quelconques des arbres d'entrée et de sortie. Les travaux d'Ahmed BENAMARA [Benamara 1999], ont permis également de proposer le logiciel « F-CAD », un environnement basé sur modélisation fonctionnelle de mécanismes, associée à des éléments de modèles CAO paramétrés, d'une base de données de solutions techniques et d'outils de calculs (Procédure RdM, ADAMS, ..).

La synthèse de mécanisme concerne également un domaine d'application particulier, celui des mécanismes en chaînes ouvertes ou fermées avec des cinématiques complexes. Il existe dans ce domaine un grand nombre de propositions [Moon 2003, Lu 2006, Liu 2007, Martin 2007], mais les démarches proposées sont rarement reliées à un contexte de conception intégrée et de modélisation du produit. Cette dernière remarque est d'ailleurs valable pour la plupart des propositions et des outils que nous avons présentés. En effet, il faut distinguer la production de connaissances par les experts calcul, s'appuyant sur les outils que nous venons de présenter, et l'usage de ces connaissances. Ces dernières doivent s'intégrer au modèle de produit pour favoriser la prise de décision dans le cadre collaboratif défini au paragraphe 1.1.

1.4 L'optimisation en ingénierie mécanique : aperçu des méthodes disponibles

L'optimisation concerne quasiment tous les domaines scientifiques, science du vivant, chimie, physique, mathématique, ingénierie, économie, … Les travaux de recherche dans ce domaine peuvent schématiquement être présentés en trois catégories :

- Des travaux dans lesquels des méthodes d'optimisation connues sont appliquées sur des problèmes spécifiques, dans ce cas c'est la formulation d'un problème comme un problème d'optimisation qui en constitue l'apport et l'originalité.
- Des travaux présentant un problème d'optimisation spécifique et une modification adéquate d'un algorithme existant pour résoudre plus efficacement ce problème.
- Des travaux concernant la mise au point de « nouveaux » algorithmes dont la validité est quelques fois démontrée mathématiquement (preuve de convergence globale, vitesse de convergence) et plus souvent établie à partir d'une base de problèmes tests, représentatifs d'une catégorie donnée.

[13] SICAM : Système Interactif de Conception Assistée de Mécanismes.

La particularité de ce domaine est qu'il est adressé par toutes les communautés scientifiques et que de nombreux chercheurs développent, adaptent des méthodes d'optimisation produisant ainsi un foisonnement impressionnant d'algorithmes.

1.4.1 Synthèse des algorithmes d'optimisation disponibles

Dans le domaine de l'ingénierie mécanique le point d'entrée est souvent le problème d'optimisation à résoudre, il paraît alors naturel de présenter les grandes familles d'algorithmes en fonction des types de problèmes qu'elles peuvent traiter. Les problèmes d'optimisation issus de problèmes d'ingénierie peuvent se formuler de manière très générale sous la forme [Minoux 1983] :

$$\text{Trouver :} \quad f(x^*) = \underset{x \in D}{Min}\{f(x)\}$$

$$\text{Avec :} \quad f : x \in S \subset \Re^n \mapsto f(x) \in \Re \text{ et } D \subset S$$

Dans cette écriture S, est l'ensemble des valeurs admissibles du vecteur de variable x et D le domaine des solutions du problème. Cet ensemble est inclus dans $\Re^n$, il permet de tenir compte des restrictions liées aux variables mixtes (continues et discrètes). Le problème consiste donc à calculer la valeur « optimale » x^* du vecteur de variable x qui minimise au moins localement la fonction réelle $f(x)$. Généralement, on préfère une écriture laissant apparaître explicitement la nature de D, l'ensemble des solutions en le définissant par plusieurs fonctions inégalités ou égalités : les fonctions contraintes du problème. On a alors :

$$\text{Trouver :} \quad f(x^*) = \underset{x \in S}{Min}\{f(x)\}$$

$$\text{Tel que :} \quad \begin{cases} c_j(x) \leq 0 & j \in 1 \ldots m \\ c_j(x) = 0 & j \in m+1 \ldots m+l \end{cases}$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} f : x \in S \subset \Re^n \mapsto f(x) \in \Re \\ c_j : x \in S \subset \Re^n \mapsto c_j(x) \in \Re \quad j = 1 \cdots m+l \end{cases}$$

La figure 6 propose une classification des problèmes que l'on peut rencontrer en ingénierie mécanique, associés aux méthodes qui peuvent leur y être appliquées. Nous ne présentons pas la distinction entre les problèmes sans fonction contrainte (assez rare en ingénierie mécanique) et ceux avec fonctions contraintes. En effet, beaucoup de méthodes d'optimisation ont d'abord été développées pour la recherche du minimum d'une fonction de plusieurs variables et ont ensuite été appliquées sur les problèmes avec fonctions contraintes. Le passage de l'un à l'autre est assez simple et repose systématiquement sur le principe de pénalisation, soit directe par la construction d'une fonction qui croît lorsque x « s'éloigne » de D, le domaine des solutions, soit en utilisant la fonction de Lagrange associée au problème ou une composition de celle-ci et des fonctions de pénalisation [Rockafellar 1996, Bertsekas 2003]. Ces dernières, dites, du lagrangien augmenté, analysées dans l'espace des variables duales, permettent de formuler des conditions d'optimalités globales plus générales que les conditions de Kuhn et Tucker limitées par les hypothèses de convexité.

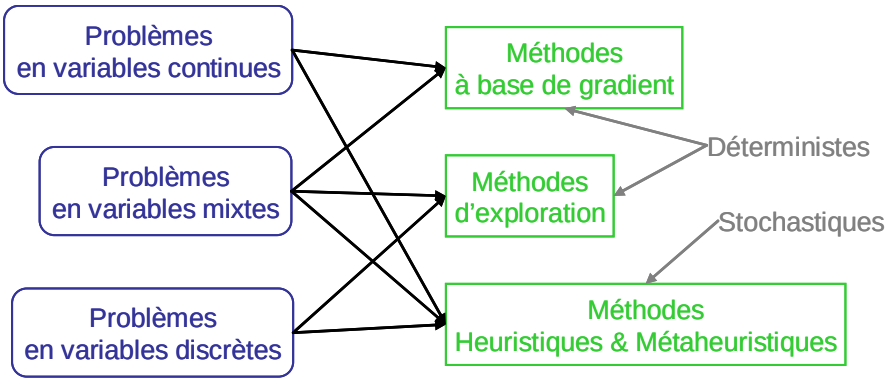


Figure 6 : Les grandes catégories de problèmes et de méthodes d'optimisation : une classification

Les méthodes à base de gradients utilisent les gradients des fonctions du problème pour progresser de manière itérative vers la solution. Ce gradient peut être déterminé analytiquement dans le meilleur des cas ou calculé numériquement par différence finie. Les meilleures implémentations utilisent le principe « quasi newtonien » consistant à construire itérativement une approximation de l'inverse de la matrice du hessien de la fonction minimisé [Broyden 1970]. On trouve de très bonne implémentation de ces méthodes (dites SQP « sequential quadratic programming » [Gill 2005]) pour les problèmes non linéaires avec fonctions contraintes en variables continues. Les méthodes basées sur le gradient convergent pour la plupart des problèmes réels, qui sont rarement convexes, vers un optimal local.

Il est intéressant de mentionner ici une méthode très particulière, qui est plus un principe d'analyse qu'un algorithme d'optimisation : « l'analyse monotone ». A partir des propriétés de monotonie des fonctions contraintes et objectif du problème il est possible soit de simplifier la formulation du problème et d'identifier tout ou partie des fonctions contraintes actives à l'optimum (qui est un optimum global dans ce cas). Ce principe, intégré à des algorithmes de type gradient permet d'accélérer notablement les vitesses de convergence, sous l'hypothèse de monotonie des fonctions [Wilde 1975, Papalambros 1980, Hsu 1997].

Les méthodes d'exploration de l'espace des solutions décomposent cet espace en sous espaces de plus en plus petits. En associant cette décomposition à un principe « d'évaluation » permettant de calculer un minorant de la fonction à minimiser, on peut « éliminer » les sous espaces ne contenant pas un optimum. Ces méthodes sont délicates à mettre en œuvre et leur performance dépend étroitement des mécanismes de décomposition et du principe d'évaluation utilisés [Gondran 1995]. Moyennant certaines précautions dans la décomposition et le choix du principe d'évaluation ces méthodes fournissent tout de même un optimum local.

Les méthodes métaheuristiques d'optimisation ont vu leur champ d'application s'élargir considérablement ces dernières années, et pourtant, elles reposent sur des principes assez anciens[14]. Elles mettent en œuvre des mécanismes itératifs à caractère stochastique permettant une heuristique d'exploration du domaine des solutions. Pour obtenir des résultats significatifs ces méthodes nécessitent un grand nombre d'évaluation du problème d'optimisation. Les métaheuristiques occupent aujourd'hui une place de choix dans l'arsenal des algorithmes d'optimisation. La méthode du recuit simulé [Kirkpatrick 1983], de recherche Tabou [Glover 1986] et les algorithmes génétiques [Goldberg 1989] sont les plus connues. Ces derniers se différentiant des précédents car ils manipulent non pas un

[14] Robbins, H. and Monro, S., A Stochastic Approximation Method, Annals of Mathematical Statistics, vol. 22, pp. 400-407, 1951 (source Wikipédia).

« point » de recherche mais toute une « population » de points de recherche. Les algorithmes génétiques apparus en premier d'une large classe de méthodes, sont vus maintenant comme un cas particulier des méthodes « évolutionnaires » regroupant aussi les « stratégies évolutionnaires ».

Le principe algorithmique de ces méthodes est présenté sur la figure 7, il repose sur un schéma itératif consistant à générer aléatoirement une population d'individus (« point » de recherche) puis à faire « évoluer » cette population avec 3 opérateurs de base :

- La sélection pour choisir en général deux individus.
- Le croissement pour « fabriquer » en général deux nouveaux individus.
- La mutation pour perturber aléatoirement les caractéristiques d'un individu (à l'origine, le gêne de l'individu, correspondant au codage binaire du vecteur variable d'où le nom de la méthode).

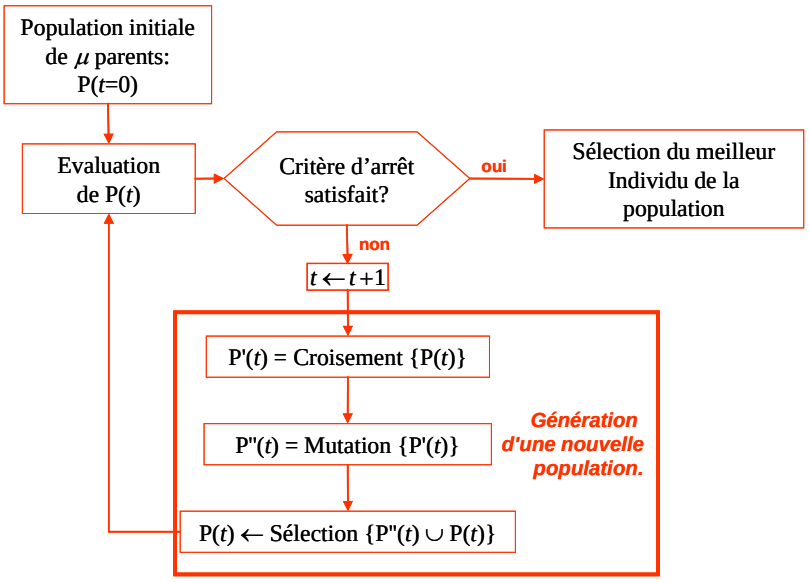


Figure 7 : Principe général d'un algorithme évolutionnaire (ici le cas d'une stratégie évolutionnaire).

En fonction du système de codage, de l'ordre des opérateurs, du moyen de sélection (déterministe ou stochastique) on parlera d'algorithme génétique ou de stratégie évolutionnaire.

Ces algorithmes sont particulièrement adaptés aux problèmes en variables discrètes, donc présentant un caractère combinatoire. Ils présentent en général des performances intéressantes sur les problèmes comportant de nombreux optimums locaux et sont capables d'identifier un meilleur optimum que les méthodes manipulant un seul point de recherche. Ils sont très utilisés dans les problèmes d'ordonnancement, de graphes, … mais rien ne garantit l'optimalité de la solution fournie.

1.4.2 Optimisation multicritères

Les problèmes d'optimisation en ingénierie mécanique sont bien souvent des problèmes multicritères au sens où l'on cherche fréquemment un compromis parmi des critères contradictoires. La formulation mathématique de ce type problème est la suivante :

$$\text{Trouver :} \quad F(x^*) = \underset{x \in S}{Min}\left\{f_1(x), f_1(x), \cdots, f_p(x)\right\}$$

$$\text{Tel que :} \quad \begin{cases} c_j(x) \le 0 & j \in 1 \ldots m \\ c_j(x) = 0 & j \in m+1 \ldots m+l \end{cases}$$

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} F : x \in S \subset \Re^n \mapsto F(x) = \{f_1(x), \ldots, f_p(x)\}^T \in \Re^p \\ c_j : x \in S \subset \Re^n \mapsto c_j(x) \in \Re \quad j = 1 \cdots m + l \end{cases}$$

Pour traiter ce cas, soit on le ramène à un problème mono critère en définissant une fonction d'agrégation $U(x)$ du vecteur de fonction $F(x) \in \Re^P$, le cas classique consiste à écrire par exemple :

$$U(x) = \sum_{k=1}^{k=p} (\beta_k . f_k(x)) \text{ avec } \beta_k \geq 0$$

La solution, obtenue par l'une des méthodes décrites ci-dessus, dépendra du choix du vecteur de coefficient de pondération $\{\beta_1, \ldots, \beta_p\}$ donc d'un choix fait à priori par les concepteurs et qui limite considérablement l'exploration des compromis possibles.

La seconde façon de gérer ces problèmes multicritères est de construire l'ensemble des solutions « non supérieures » ou encore « front de Pareto ». C'est-à-dire l'ensemble $\hat{X}$ des solutions $\hat{x} \in D$ tel que par rapport à l'une des solutions de $\hat{X}$ aucune des fonctions objectifs ne peut être améliorée sans dégradation d'au moins une autre fonction objectif. Autrement dit on aura :

$$f_k(\hat{x}) \leq f_k(x) \text{ pour } k = 1, \ldots, p$$

$$\text{et} \quad f_k(\hat{x}) < f_k(x) \text{ pour au moins un } k \in \{1, \ldots, p\}$$

La construction de front de Pareto est d'un grand intérêt pour les concepteurs car elle permet de faire un choix à partir de l'ensemble des meilleurs compromis possibles. Il existe deux catégories de méthodes permettant d'obtenir le front ou tout du moins une approximation de celui-ci.

- Les méthodes dites « directes » au sens où le problème d'optimisation multicritères est résolu comme un problème mono critère par l'intermédiaire d'une fonction d'agrégation du type de $U(x)$. Pour obtenir le front on fait alors varier les valeurs des coefficients β_k, le problème mono critère étant résolu à chaque fois. Ces méthodes dont il existe plusieurs variantes (NBI[15], AWS[16],) ne permettent pas de capter toutes les parties du front de Pareto surtout si celui-ci n'est pas convexe.
- Les méthodes dites « indirectes » (MOGA[17], NSGA-II[18], SPEA[19]) au sens où le problème d'optimisation multicritères n'est pas résolu. Ces méthodes utilisent toutes des heuristiques et s'appuient sur les algorithmes évolutionnaires. Le front de Pareto est construit itérativement, par des mécanismes appropriés les individus les moins proches du front de Pareto (les dominés dans le langage consacré) sont remplacés progressivement par les individus les plus proches (les dominants). Ces méthodes n'offrent en général aucune garantie de fournir « une bonne approximation » de ce front mais les tests faits sur de nombreux problèmes montrent en moyenne des bons résultats [Huband 2006, Barichard 2003].

Malgré de récents progrès pour beaucoup de problèmes d'ingénierie la construction de ce front n'est pas toujours facilement accessible, comme nous le verrons sur un exemple tiré de nos résultats (paragraphe 4.1.2.3).

[15] NBI : Normal Boundary Intersection [Das 1998].
[16] AWS : Adaptive Weighted Sum method [Kim 2006].
[17] MOGA : Multi Objective Genetic Algorithm [Fonseca(a)(b) 1998]
[18] NSGA-II : Non Sorting dominated Genetic Algorithm [Deb 2002].
[19] SPEA : Swarm Particule Evolutionary Algorithm [Zitzler 2000].

1.4.3 L'optimisation en ingénierie mécanique

L'optimisation fait partie de l'expertise calcul telle que nous l'avons présentée au paragraphe 1.3. Les applications en ingénierie mécanique sont très nombreuses et s'inscrivent dans un objectif de recherche des meilleurs compromis possibles liés aux performances techniques des produits. La notion de compromis est ici fondamentale, elle découle du fait que les objectifs à atteindre sont souvent contradictoires, (masse minimale / rigidité maximale par exemple). Nous limiterons cette présentation aux applications en ingénierie relatives au développement de produit c'est-à-dire essentiellement orientées vers la synthèse morphologie (topologique) et/ou dimensionnelle de produits ou de composants d'un produit. Les applications des méthodes d'optimisation concernent surtout les phases « d'embodiment design » et de « detail design » du processus de conception.

Nous distinguerons ici les approches locales de l'optimisation de systèmes mécaniques au sens où l'on s'adresse à une pièce d'un système et les approches globales applicables à un système mécanique plus ou moins complexe.

Dans les approches locales, on distingue généralement la synthèse par optimisation topologique et celle par optimisation de forme (souvent paramétrique) [Eschenauer 2001, Allaire 2007]. Les méthodes d'homogénéisation et de « level set » permettent d'obtenir des résultats tout à fait satisfaisants autant pour des structures 2D que 3D. Les méthodes proposées restent cependant découplées d'un contexte de conception, par exemple les contraintes liées aux procédés d'obtention ne sont pas prises en compte.

Les approches globales posent plus de problèmes dans la mesure où il s'agirait idéalement d'optimiser la topologie (i.e. la morphologie) d'un système, sa technologie et la topologie et les dimensions de chacun de ces composants. C'est un problème largement ouvert dans la mesure où l'interaction entre la morphologie d'un système et les fonctions qu'il remplit est encore mal caractérisée [Yannou 1998]. Il est donc très difficile de modéliser l'impact d'un changement de morphologie sur les éléments (structure du système, technologies, dimensions, ..) qui en dépendent. Ici la seule solution envisageable est une démarche lexicographique permettant de lister toutes les morphologies possibles, avec le risque d'avoir à explorer un nombre important de possibilités. Pour une application particulière, celle des mécanismes de transmission de puissance c'est la démarche utilisée par Jean Christophe FAUROUX pour développer un outil de synthèse et d'optimisation [Fauroux 1999]. Pour le même type d'application, le système développé par GUILLOT utilise un principe similaire mais avec un espace de solution plus limité car ce système traite des transmissions de puissance par engrenages à axes parallèles. Pour une configuration morphologique donnée, il est possible de formuler un problème d'optimisation pour déterminer par exemple, les différentes dimensions des composants. Pour ces problèmes de grande dimension on trouvera dans PAPALAMBROS [Papalambros 1995, 2002] des techniques de décomposition en sous problèmes plus petits, plus faciles à résoudre.

2 Problématique et positionnement scientifique de nos travaux

Les chapitres précédents ont permis de positionner les éléments de connaissances issus d'une rapide synthèse de l'état de l'art sur 4 domaines. Ils montrent que :

- La modélisation du produit avec la notion de composants / liens / relations et la multi-représentation est indispensable à la mise en œuvre et au support de l'intégration des expertises métier. L'émergence progressive de la solution de conception, satisfaisant aux différentes contraintes formulées par les expertises métier, doit permettre de limiter les itérations dans le processus de conception.

- La phase de « conceptual design » du processus de développement avec le passage du domaine fonctionnel au domaine physique du produit reste une étape délicate, avec notamment celle relative à la synthèse morphologique et dimensionnelle de mécanismes.
- L'expertise calcul est aujourd'hui encore, faute d'outils supports adaptés, fortement centrée sur la validation de solutions, plutôt que sur la synthèse de solutions, capable de fournir un support d'aide à la décision dans les phases de collaborations du processus de conception. Le modèle géométrique du produit y occupe une place importante et reste trop souvent l'un des points d'entrée de beaucoup d'activités d'ingénierie, d'où la difficulté à mettre en œuvre de véritables outils de synthèse de solutions.
- Les algorithmes d'optimisation disponibles aujourd'hui permettent d'adresser une large classe de problème d'optimisation, pour peu que l'on sache choisir l'algorithme adapté au problème. L'optimisation « globale » des systèmes mécaniques est aujourd'hui un problème ouvert, où les réponses apportées par certains travaux sont limitées à un domaine d'application ou à une partie du problème.

Deux limitations apparaissent dans les travaux que nous avons présentés :

- Le défaut d'outils de calculs pour la synthèse de solutions en relation avec un environnement supportant la modélisation du produit. Dans les outils de calculs, nous incluons ici les techniques d'optimisation, qui constituent d'excellents moyens de synthèse de forme ou de synthèse dimensionnelle.
- La difficulté d'intégrer le calcul comme une expertise dans le processus de conception du produit afin que celui-ci puisse contribuer à l'émergence de la solution de conception et plus particulièrement de la géométrie de ses composants.

Les travaux que nous présentons dans cette partie se positionnent dans cette problématique et ont pour ambition d'apporter des éléments de réponse aux limitations que nous venons d'identifier. Même si certains aspects de nos travaux revêtent un caractère suffisamment générique pour être découplé d'un domaine d'application, beaucoup de nos résultats ont été appliqués au dimensionnement d'éléments de systèmes de transmissions de puissance mécanique.

3 Intégration d'une expertise calcul dans le processus d'intégration : notre proposition de démarche

Nous l'avons vu précédemment l'expertise calcul recouvre un grand nombre de situations, nos travaux concernent spécifiquement le domaine du dimensionnement des composants technologiques. La démarche que nous avons proposée s'articule autour de trois concepts :

- La distinction entre composants technologiques « liaisons » et « structures[20] » venant du domaine d'application.
- L'intégration au plus tôt dans le processus de conception par la formalisation d'une expertise « calcul » et la réalisation d'outils d'aide au dimensionnement.
- Le problème du dimensionnement de composants technologiques comme un problème d'optimisation.

[20] Structures doit être pris au sens de la mécanique des structures, c'est-à-dire un ensemble matériel assurant la transmission d'efforts mécaniques entre plusieurs composants technologiques.

Cette démarche nous a permis de développer des outils de dimensionnement optimal de composants technologiques « liaisons ». Ces outils permettent d'intégrer les calculs de synthèse dimensionnelle au processus de conception via des liaisons directes avec les logiciels de CAO ou via un environnement de modélisation des données du produit. Nous avons également spécifié des méthodes pour intégrer le dimensionnement de composants « structures » dans le processus de conception.

3.1 Composants technologiques « liaisons » et « structures »

Ce qui sera développé dans la suite ne prétend pas être applicable à tous les produits et toutes les situations, et s'appliquera plutôt à des produits ou des sous-ensembles de produit destinés à transmettre de la puissance mécanique. Cette application adresse évidemment le domaine du transport au sens large et couvre donc déjà un large domaine d'application. De même nous ne prétendons pas adresser toutes les technologies actuellement disponibles, et les exemples qui seront présentés montrent même qu'il s'agira de technologies classiques du génie mécanique. Ceci ne doit pas apparaître comme une limitation et il faut rappeler que la grande majorité des activités de développement de produit sont des activités de conception dite « routinière ».

Dans le cadre de cette application, la distinction entre les composants technologiques « liaisons » et « structures » est imposé par :

- Le rôle fonctionnel de ces composants dans le processus de conception. En effet les composants technologiques « liaisons » sont la traduction technologique d'une fonction technique élémentaire ou de la décomposition de celle-ci. Ces composants technologiques « liaisons » apparaissent en général en premier dans la phase de « conceptual design », alors que les composants « structures » apparaissent un peu plus tard, comme des éléments intermédiaires assurant la transmission des efforts entre les liaisons [Aublin 1998, Artobolevski 1976].
- La différence entre les modèles de dimensionnement utilisés entre les « liaisons » et les « structures ». Dans le cas des composants « liaisons » ce modèle est complètement lié à la technologie et aux principes physiques sous-jacents. De plus ces modèles font souvent usage de données expérimentales, de formulations analytiques explicites, les rendant exploitables directement sans gros moyens de calculs.

3.2 Intégration au plus tôt dans le processus conception

Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe à propos du contexte de ces travaux, les activités de calculs sont, de part la nature des outils mis en œuvre, surtout concentrées dans les phases de « detailed design », ce qui bien souvent limite considérablement les possibilités de retour en arrière ou de modification du produit. L'intégration au plus tôt dans le processus de conception de l'expertise calcul doit donc permettre à cette expertise de participer pleinement à l'émergence d'une solution et non plus, comme c'est encore trop le cas actuellement, en tant qu'activités de validation. Ces deux positionnements des activités de calculs, au plus tôt et comme validation de solution, sont tout à fait complémentaires, et doivent permettre d'éviter de coûteuses et tardives remises en cause de solutions de conception.

De manière générale, le concept de « au plus tôt » peut être déterminé en précisant qu'il s'agit de contraindre la définition du produit au « juste besoin » en identifiant dans le processus de conception les mécanismes qui autorisent le recours à une expertise. En dehors de toutes considérations liées aux

ressources (humaines, matérielles) disponibles nous considérerons que ces mécanismes reposent essentiellement sur la disponibilité des données nécessaires à une expertise donnée.

Dans notre contexte, où l'on distingue les composants technologiques « liaisons » et « structures » cela se traduit par l'identification des données justes nécessaires au dimensionnement optimal des composants technologiques « liaisons » et à celles permettant de définir les premiers éléments de description géométrique dans le cas composants technologiques « structures ». Ces notions seront détaillées dans la présentation de nos résultats de recherche, paragraphe 4.

3.3 Optimisation et composants technologiques « liaisons »

De manière générale un modèle de dimensionnement d'un composant technologique « liaison » peut être vu comme un ensemble de paramètres liés entre eux par des relations (implicites ou explicites) de type égalités ou inégalités. Parmi ces paramètres, certains sont connus et fixés (i.e. les données du problème) les autres sont « libres » et leur valeur est inconnue. Evaluer le modèle de dimensionnement consiste alors à calculer la valeur de ces paramètres libres. Lorsque le nombre de relations égalités est identique au nombre de paramètres libres, il n'existe, sous certaines conditions mathématiques, qu'une solution. Cette solution sera valide si elle vérifie aussi les relations inégalités du modèle. Plus généralement dans les problèmes réels, le nombre de paramètres libres est bien supérieur au nombre de relations égalités, dans ce cas il existe potentiellement une infinité de solutions et un bon moyen de résoudre le problème de dimensionnement est de formuler un problème d'optimisation en se donnant une ou plusieurs fonctions critères à minimiser.

C'est dans les travaux de Jean GUILLOT [Guillot 1987] que le problème du dimensionnement et du choix technologique d'éléments de mécanismes se formule comme un problème d'optimisation. Cette idée est la base du développement de « SICAM[21] », un prototype logiciel développé au Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse. Mes travaux de thèse [Lafon 1994] ont été développés dans ce contexte.

Nous avons repris et généralisé cette idée pour l'appliquer au contexte que nous avons décrit au paragraphe 3.1. En effet, en toute généralité, on peut en effet considérer que plusieurs composants technologiques puissent assurer une même fonction technique. On peut alors représenter l'ensemble de ces « alternatives » de conception du produit par un graphe (figure 8), chaque sommet représentant un composant technologique donné, les arcs traduisant la compatibilité entre les différents composants. On voit alors qu'il existe une « alternative » de conception, c'est-à-dire un chemin de parcours meilleur que les autres au sens d'un ou plusieurs critères prédéfinis. La recherche de ce « meilleur » chemin de parcours relève de l'optimisation combinatoire. La difficulté essentielle tient cependant au fait que l'évaluation de chaque sommet de ce graphe requiert elle-même la résolution d'un problème d'optimisation et donc que l'évaluation d'un chemin nécessiterait de résoudre autant de problèmes que de sommets présents sur le chemin. On voit ici toute la difficulté qu'il y a, à vouloir aborder l'optimisation « globale » d'un produit dans un contexte de conception. On trouve tout de même des tentatives, toutes récentes, qui apportent quelques éléments de réponse à cette problématique [Radkowksi 2007].

[21] SICAM : Système Interactif de Conception Assistée de Mécanismes.

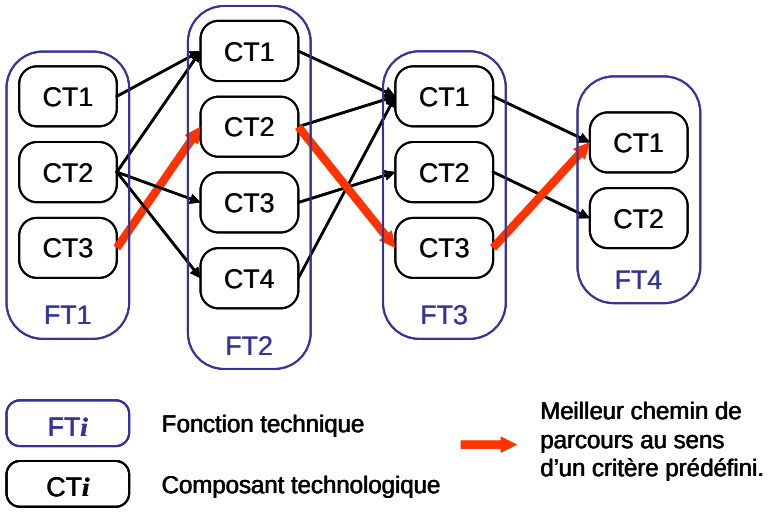


Figure 8 : Graphe des différentes combinaisons de composants technologiques pour une même fonction technique.

On voit clairement que la mise en œuvre de l'idée précédente pose la question du niveau de granularité du composant technologique qui peut être vu, suivant le niveau de décomposition comme un groupe turbopropulseur d'avion ou simplement un actionneur électrique de type « moteur + réducteur à engrenage ». Nous avons postulé que le niveau de granularité est déterminé par la possibilité de formuler le problème d'évaluation du ou des critères choisis pour un composant technologique. Ce problème se formulant comme un problème d'optimisation, cela relève d'une démarche « manuelle » difficilement automatisable.

4 Résultats

Cette partie présente les principaux résultats obtenus dans le cadre de démarche que nous venons d'exposer. Les exemples présentés illustrent le domaine d'application que nous avons précisé. Ces résultats concernent :

- Pour les composants technologiques « liaisons » :
  - La mise au point d'un algorithme de résolution adapté au type de problème d'optimisation formulé à partir du problème dimensionnement de composants technologiques « liaisons »
  - Des exemples de formulation de problèmes d'optimisation pour des composants technologiques « liaisons » fréquemment utilisés en mécanique
- Pour les composants technologiques « structure » une proposition de méthode de synthèse dimensionnelle basée sur des modèles analytiques de dimensionnement.
- La spécification d'outils et d'une démarche d'intégration dans le processus de conception.

4.1 Dimensionnement optimal de composants technologiques « liaisons »

4.1.1 Algorithmes de résolution adaptés

Les problèmes d'optimisation en ingénierie mécanique peuvent très souvent se formuler comme des problèmes d'optimisation multi critères avec des fonctions contraintes non linéaires en variables mixtes.

Ils peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} Min\{F(x,p)\} \\ C_j(x,p) \le 0 \quad j = 1 \ldots m \\ C_j(x,p) = 0 \quad j = m+1 \ldots l \\ x_{Low} \le x \le x_{Up} \end{cases}$$

$$\text{avec} \quad x \in \Re^{nc} \times \Re^{nd}, \; p \in \Re^{np}$$

$$\text{et} \quad F(x,p) = \{f_1(x,p) \cdots f_p(x,p)\}^T$$

Ici $\Re^{nc}$ est l'espace des valeurs continues et $\Re^{nd}$ celui des valeurs discrètes admissibles par le problème, $\Re^{np}$ est l'espace des paramètres « donnés » admissibles par le problème.

De part la nature des modèles de dimensionnement des composants technologiques « liaisons » les problèmes d'optimisation ainsi formulés sont fortement non linéaires et nécessitent l'usage de variables mixtes. De plus dans l'objectif de développer des outils d'optimisation de synthèse dimensionnelle de composants technologiques, ces problèmes d'optimisation doivent pouvoir être résolus pour des valeurs à priori quelconques de p les paramètres « données ». Cette particularité induit des difficultés spécifiques comme l'illustre la figure 9 où l'on constate un changement de topologie du domaine des solutions admissibles, dû à un changement de la valeur des paramètres « données ».

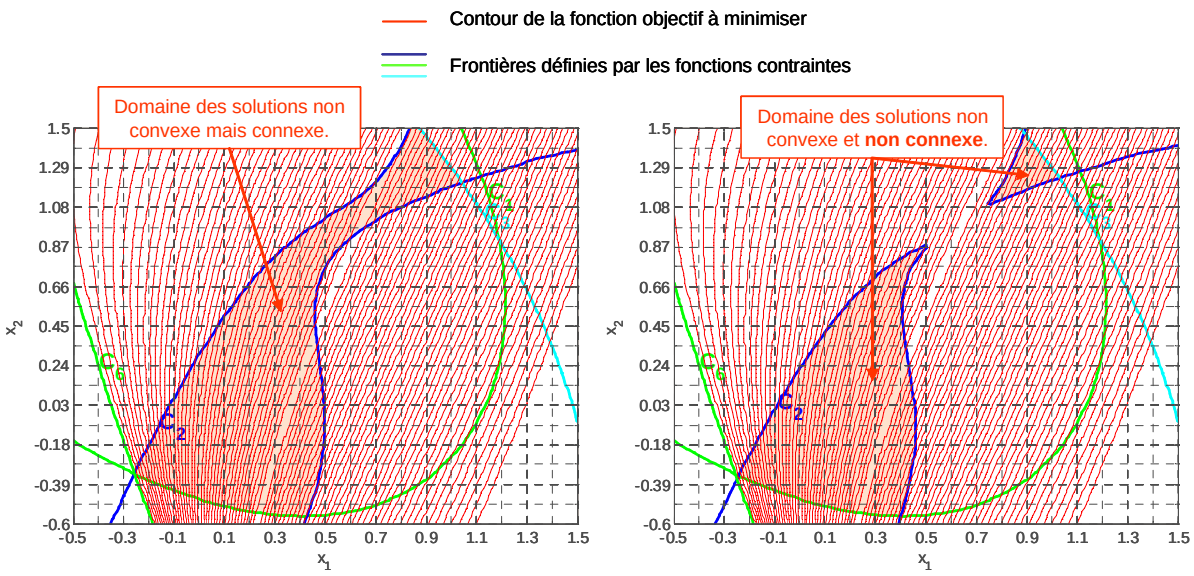


Figure 9 : Problème d'optimisation d'un engrenage simple, effet d'une modification des données du problème sur la topologie du domaine des solutions.

La recherche d'un optimum pour ces problèmes a nécessité la mise au point de méthodes d'optimisation spécifiques. Cela est un peu moins vrai maintenant, car les méthodes métaheuristiques d'optimisation proposent des performances intéressantes, néanmoins nous restons de la plus grande prudence car notre expérience nous montre que des échecs de convergence sont encore possibles (même sur des problèmes admettant une solution), et que la qualité des solutions fournies est parfois questionnable. Il est donc très important de disposer de plusieurs algorithmes d'optimisation pour pouvoir adapter l'algorithme au problème à résoudre, voire pour comparer les résultats obtenus avec des algorithmes différents.

La constitution de cette librairie d'algorithmes d'optimisation a débuté lors de mes travaux de thèse en 1991 et s'est poursuivie jusqu'à la fin de thèse de Laurence GIRAUD MOREAU [Giraud Moreau 1999].

L'objectif de ce travail de thèse était dans un premier temps, d'étudier les algorithmes stochastiques disponibles pour dégager l'implémentation donnant les meilleures performances en termes de vitesse de convergence et de précision, puis dans un second temps d'améliorer les algorithmes existants.

La démarche mise en œuvre dans ce travail de thèse a été de définir un ensemble de problèmes tests de dimensionnement optimal. Une étude bibliographique approfondie montra qu'il existait, au-delà des grands principes des algorithmes évolutionnaires[22], de nombreuses implémentations des opérateurs de base. Afin d'évaluer les performances des différentes implémentations, nous avons utilisé des problèmes tests qui nous semblaient représentatifs et pour lesquels nous disposions d'une solution optimale théorique. Les expérimentations numériques ont clairement montré l'avantage des stratégies évolutionnaires en termes de précision et de vitesse de convergence par rapport aux algorithmes génétiques (figure 10 et tableau 1).

Sur la base de cette expérience nous avons ensuite proposé un algorithme hybride couplant les principes stochastiques des stratégies évolutionnaires pour manipuler les variables discrètes et des techniques d'optimisation déterministes tirées du lagrangien augmentée pour les variables continues. L'une des difficultés fut de coupler des principes algorithmiques très différents puisque les méthodes déterministes à base de gradients ne manipulent qu'un point (vecteur variable) à la fois alors que les méthodes évolutionnaires utilisent plusieurs points (individu dans le langage consacré). La solution que nous avons retenue, consista à plonger dans la population d'individus des mécanismes itératifs déterministes. De sorte que pour chaque génération de la stratégie évolutionnaire on réalise une itération du « lagrangien augmenté » pour tous les individus de la population. La figure 12 donne un aperçu des principales étapes de l'algorithme. Les tests que nous avons conduits, sur les mêmes problèmes d'optimisation, montrent que cet algorithme améliore encore les performances des stratégies évolutionnaires (figure 11 et tableau 2).

[22] C'est le vocabulaire consacré, traduction de « Evolutionnary Algorithm », qui regroupe à la fois les algorithmes génétiques et les stratégies évolutionnaires. [Bäck 1996]

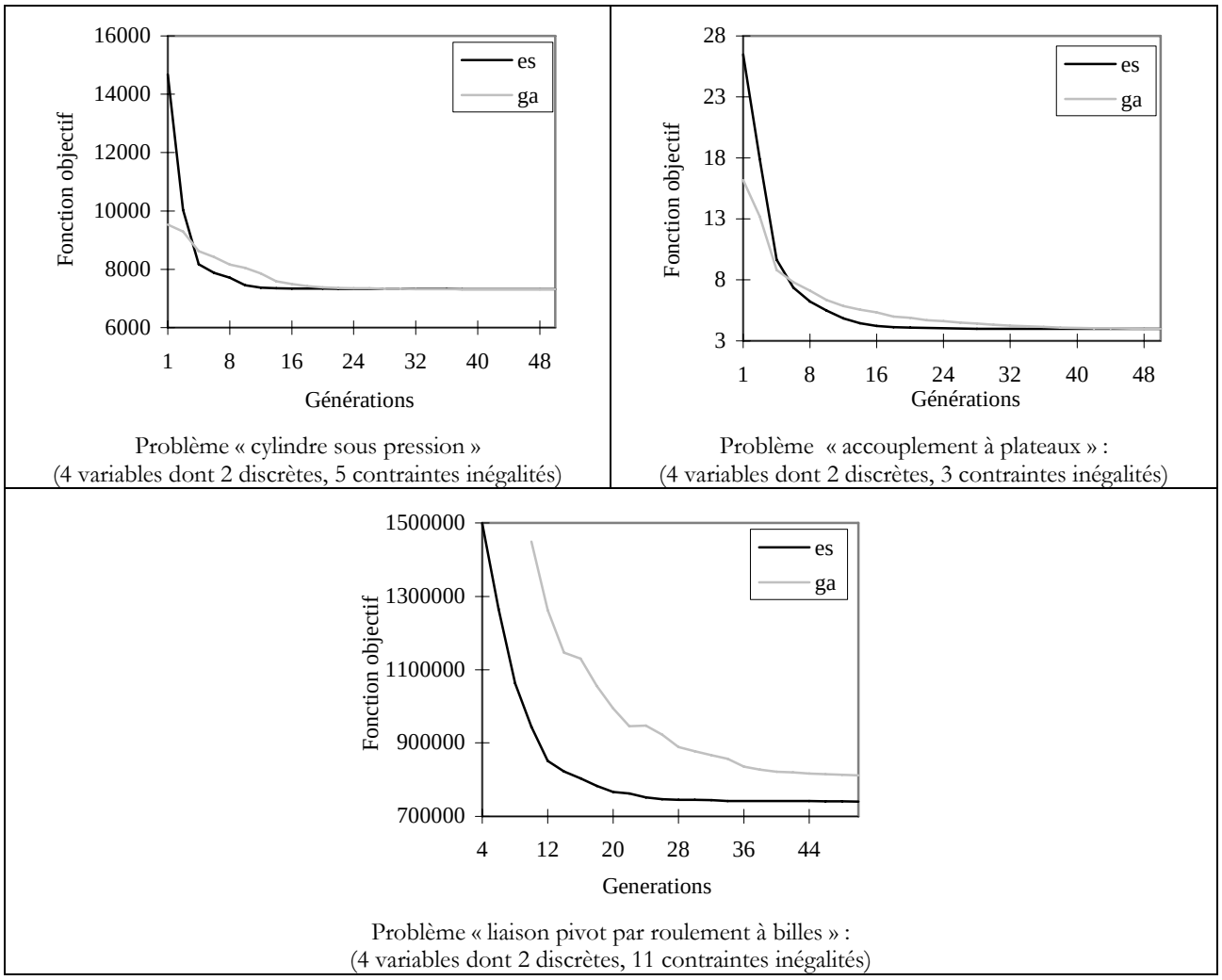


Figure 10 : Courbes d'évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction du nombre de générations montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et les algorithmes génétiques (GA).

Problème	Méthode	Erreur sur f^* (%)	Erreur moyenne (%)	Nbre d'évaluations $f^{théo}$ ±10%	Nbre d'éval. total pour 15 exec.
Prob. 1 cylindre	GA	$4.7\ 10^{-2}$	1.64	590	45000
	ES	0	1.69	267	37605
Prob. 2 plateau	GA	$2.1\ 10^{-1}$	2.44	1626	45000
	ES	0	2.58	700	37605
Prob. 3 roulement	GA	$1.1\ 10^{-2}$	9.0	1620	78750
	ES	0	1.07	754	75105

Tableau 1 : Résultats chiffrés montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et les algorithmes génétiques (GA) en termes de précision et d'efficacité (nombre d'évaluations).

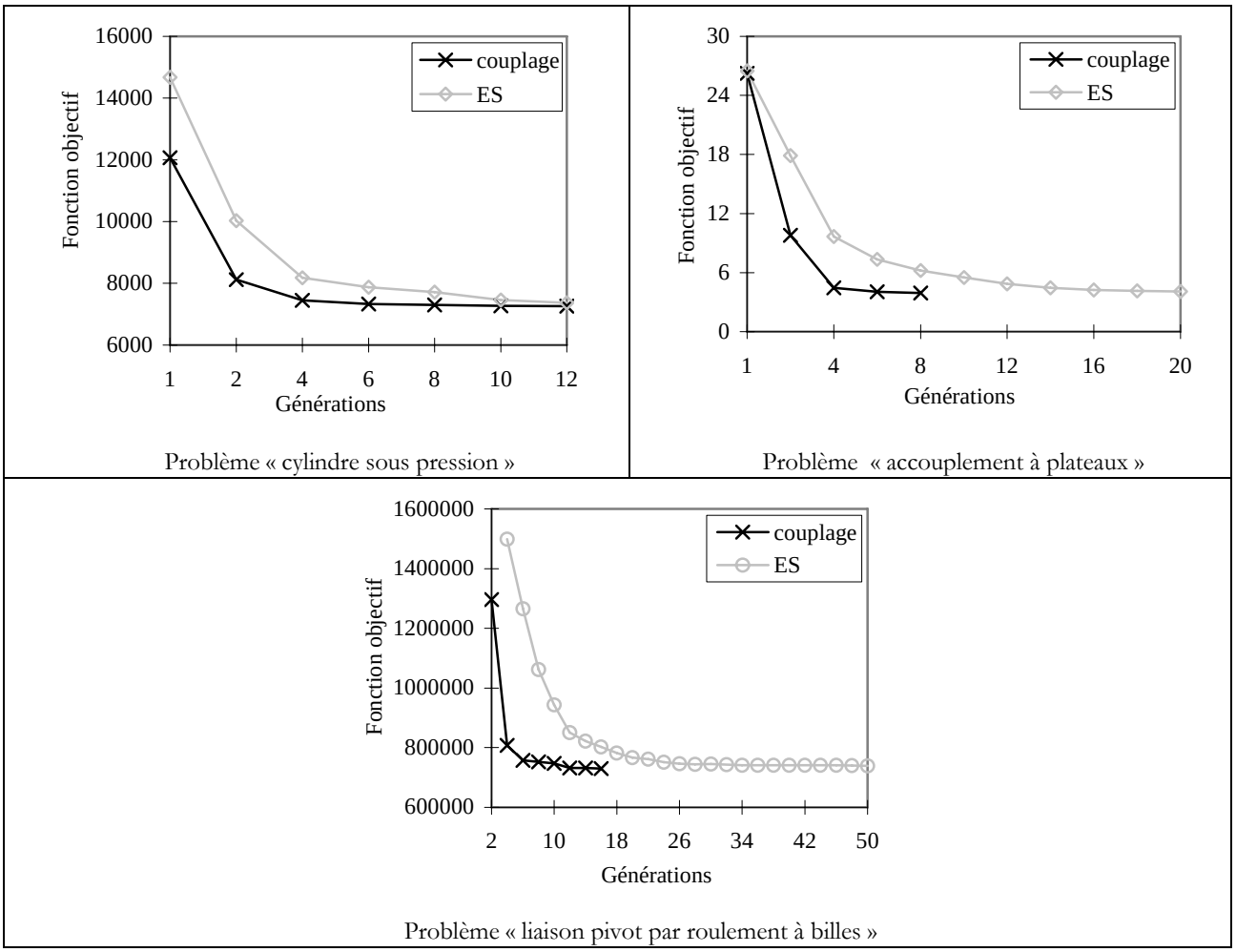


Figure 11 : Courbes d'évolution de la valeur moyenne de la fonction objectif en fonction du nombre de générations montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et l'algorithme couplé.

Problème	Méthode	Erreur* %	Erreur moyenne %	iter 10%	iter total
Problème 1 cylindre	ES	0	1.69	267	37605
	Couplage	0	0.84	174	17507
Problème 2 plateau	ES	0	2.58	700	37605
	Couplage	0	0.68	340	19305
Problème 3 roulement	ES	0	1.07	754	75105
	Couplage	0	0.26	340	23205

Tableau 2 : Résultats chiffrés montrant les différences de performances entre les stratégies évolutionnaires (ES) et l'algorithme couplé en termes de précision et d'efficacité (nombre d'évaluations).

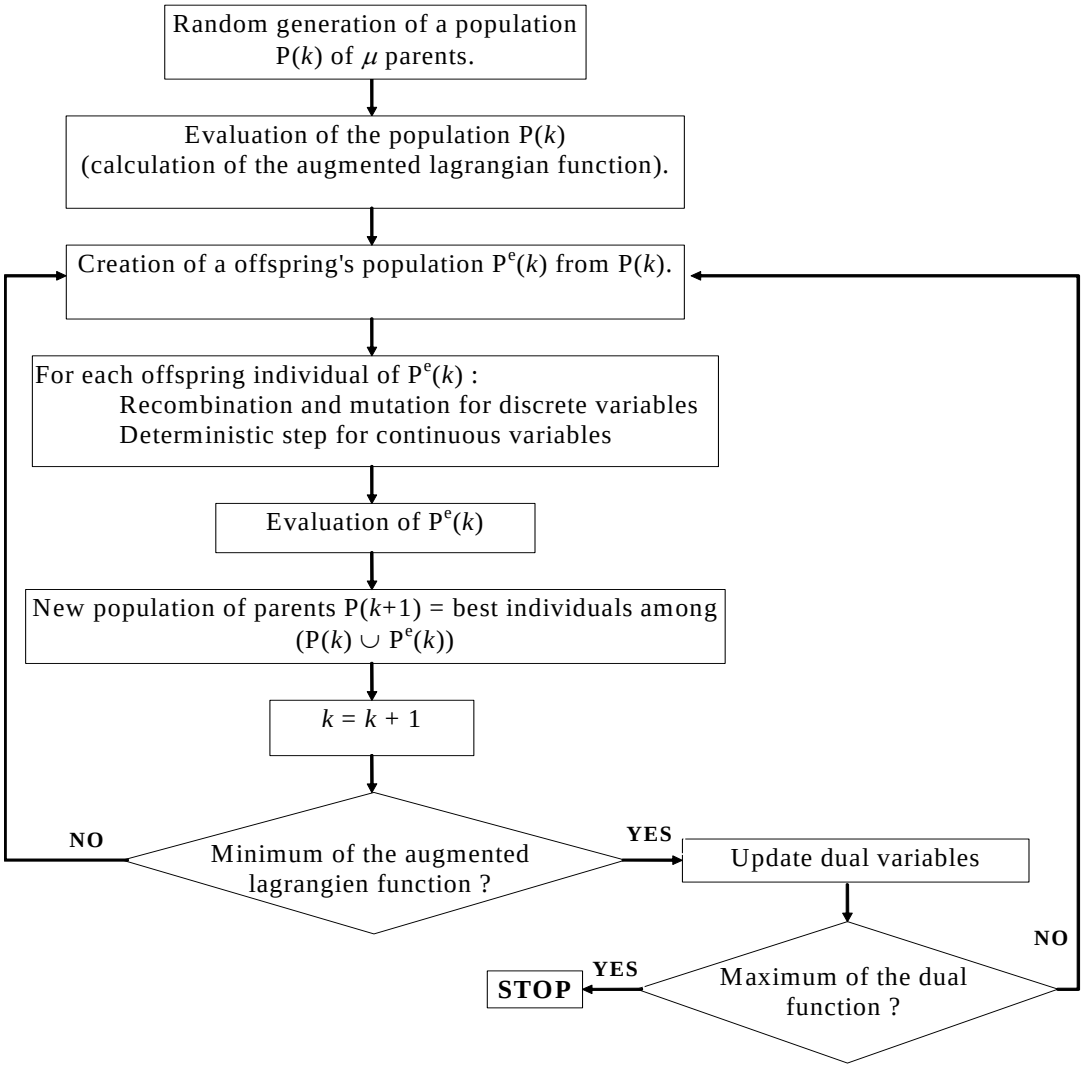


Figure 12 : Principales étapes de l'algorithme de couplage entre la stratégie évolutionnaire et le lagrangien augmenté.

A l'heure actuelle nous disposons d'une librairie de méthode d'optimisation, développée en FORTRAN, qui comporte les algorithmes suivants :

- Minimisation d'une fonction continue par la méthode BFGS.
- Algorithme du lagrangien augmenté pour les problèmes non linéaires avec fonctions contraintes en variables continues.
- Algorithme de séparation et évaluation progressive, couplé avec celui du lagrangien augmenté pour les problèmes non linéaires avec fonctions contraintes en variables mixtes.
- Algorithme génétique classique avec plusieurs opérateurs de sélection, croisement et sélection.
- Algorithme de stratégie évolutionnaire avec plusieurs opérateurs de sélection, croisement et sélection.
- Algorithme de couplé, de stratégie évolutionnaire et de lagrangien augmenté.

Outre les outils numériques, qui sont fondamentaux, nous insistons aussi sur l'expérience dont nous disposons maintenant, à la fois sur la manipulation des méthodes d'optimisations mais également

et c'est sans doute encore plus important, sur la démarche de formulation des problèmes d'optimisation.

4.1.2 Applications

Nous présentons dans ce paragraphe les applications réalisées sur l'optimisation de composants technologiques « liaisons ». Ces travaux ont été développés dans le cadre de plusieurs stages de recherche d'étudiants de DEA et de Master.

	Exemple de fonction technique			
	Transmettre une puissance mécanique		**Réaliser une liaison complète (encastrement)**	**Guider en rotation**
Principes physiques mis en œuvre	Contact	Adhérence	Adhérence	Roulement sans glissement
Technologie	Engrenages	Poulie / Courroie	Vis / Ecrou	Roulement à billes
Modèle de dimensionnement	Théorie des poutres Théorie de Hertz, Données expérimentales	Loi de Coulomb Dynamique des milieux continue curvilignes	Théorie des poutres Données expérimentales	Données expérimentales, Modèle probabiliste de durée de vie
Paramètres de description	Module, nbre de dents, largeur, déport des dentures, …	Type de courroie, diamètre des poulies, tension de pose, …	Diamètre nominale de la vis, Précontrainte de serrage,	Diamètre intérieur et extérieur, Largeur, Capacité de charge statique et dynamique

Tableau 3 : Exemple de formalisation de l'association « fonction technique » / « technologie » et modèle de dimensionnement.

Le tableau 3 présente l'association « fonction technique » et composant technologique « liaisons » associé pour les exemples qui seront présentés. Pour chacun de ces exemples nous avons :

- Identifié les données justes nécessaires au dimensionnement afin de respecter la notion de « juste besoin » évoquée précédemment.
- Formulé un problème d'optimisation avec des critères prédéfinis (souvent minimisation de la masse).
- Associé un algorithme d'optimisation adapté au problème.

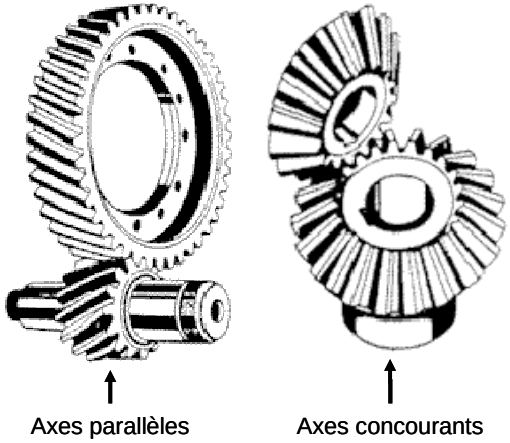
4.1.2.1 Transmission de puissance mécanique

C'est une fonction importante des systèmes mécaniques, qui a beaucoup évolué ces dernières années sous l'influence des actionneurs, dont les puissances massiques ont augmenté de manière significative. La tendance actuelle est de localiser les actionneurs là où une mise en mouvement est nécessaire. Elle est néanmoins indispensable pour adapter la vitesse de rotation de l'actionneur à celle requise par le mécanisme.

Les transmissions par engrenage offrent des caractéristiques très intéressantes de fiabilité et d'excellents rendements, elles sont cependant coûteuses à développer et à mettre en œuvre (lubrification, refroidissement, ..).

Le dimensionnement optimal de dentures d'engrenage à fait l'objet de beaucoup de travaux de recherche [Caroll 1989, Errichello 1991, Savage 1994, Daidié 1996, Marcelin 2001]. Dans ce domaine notre apport se situe au niveau de :

- La prise en compte d'un modèle normalisé ISO avancé prenant en compte le profil théorique de la denture pour calculer les concentrations de contraintes au pied de la denture [Henriot 1999, ISO 6336 2002].
- La prise en compte des déports de la denture dans l'optimisation, pour minimiser l'écart entre les vitesses de glissement spécifiques lors de l'engrènement, tout en minimisant la masse du mécanisme.



Données **en entrée**	Paramètres optimisés **en sortie**.
Puissance à transmettre	Nbre de dents pignon et roue
Rapport de réduction	Déport profils de denture roue et pignon
entraxe (optionnel) et angle entre les axes (cas concourants)	Largeur de denture
Matériaux pignon et roue	Angles d'hélice (denture hélicoïdale)
Géométrie outil de taillage	
Qualité de fabrication	
Condition de lubrification	
Durée de vie	
Coefficient de sécurité	

Figure 13 : Transmission par engrenage, illustration des cas de formulation générique du problème de dimensionnement optimal.

Nous avons formulé le problème d'optimisation pour deux situations différentes :

Le cas générique d'engrenage simple (roue + pignon) pour des axes parallèles ou concourants. Le tableau de la figure 13 précise les données qui sont fournies en entrées ainsi que les paramètres optimisés. Cette formulation générique qui convient pour traiter le dimensionnement d'un étage simple de réducteur donne un problème d'optimisation comportant 7 variables dont 4 sont discrètes et 12 fonctions contraintes inégalités très fortement non linéaires. Les critères de minimisation sont la masse de l'ensemble et l'écart entre les vitesses de glissement spécifique du pignon et de la roue. Ce problème d'optimisation se résout en quelques minutes (320 s sur un ordinateur portable mono processus à 2Ghz), et nécessite 7 150 000 évaluations du problème avec un algorithme de stratégies évolutionnaires.

Le cas particulier d'un réducteur à trois étages de machine outil (cisaille à tôles). La formulation de ce problème d'optimisation s'appuie sur la précédente. Le problème formulé est un peu moins générique mais illustre très bien les difficultés que l'on rencontre dans le dimensionnement optimal de composants. Dans ce cas nous avons cherché à définir, les caractéristiques de chaque étage (module des dents et nombre de dents), la position relative de chaque étage permettant de minimiser la masse de l'ensemble tout en respectant les conditions d'encombrement imposées par le carter. On obtient alors un problème de 23 variables dont 9 discrètes, 115 fonctions contraintes non linéaires. C'est à ce jour le problème le plus complexe que nous ayons traité. En effet pour ce cas, l'espace combinatoire est de 4.10^{17} combinaisons de problèmes de 23-9 = 14 variables continues ! Cet espace ne peut être exploré, donc la solution optimale demeure inconnue à ce jour. L'algorithme évolutionnaire trouve une solution meilleure que la solution initiale (issue du cas industriel) au bout de 2 110 800 évaluations[23] du

[23] Ce nombre d'évaluations peut être rapporté au nombre de combinaisons en estimant qu'une méthode d'optimisation performante en variables continues nécessiterait 100 évaluations pour résoudre le problème de 14

problème ce qui nécessite environ 20mn de calculs (ordinateur portable mono processeur à 2GHz) (Figure 15). Les configurations initiale et optimisée de la figure 14 montrent un gain en masse de 13.6%, ce qui est non négligeable, mais pas le plus important. En effet même si l'on compare ici le résultat avec la solution industrielle, l'algorithme d'optimisation, par construction, n'est pas initialisé avec une « bonne » solution, mais une population d'individus générés aléatoirement. On voit ici tout l'intérêt de la démarche dans un contexte de conception dans lequel par définition on n'a aucune idée de la solution, encore moins d'une solution optimisée.

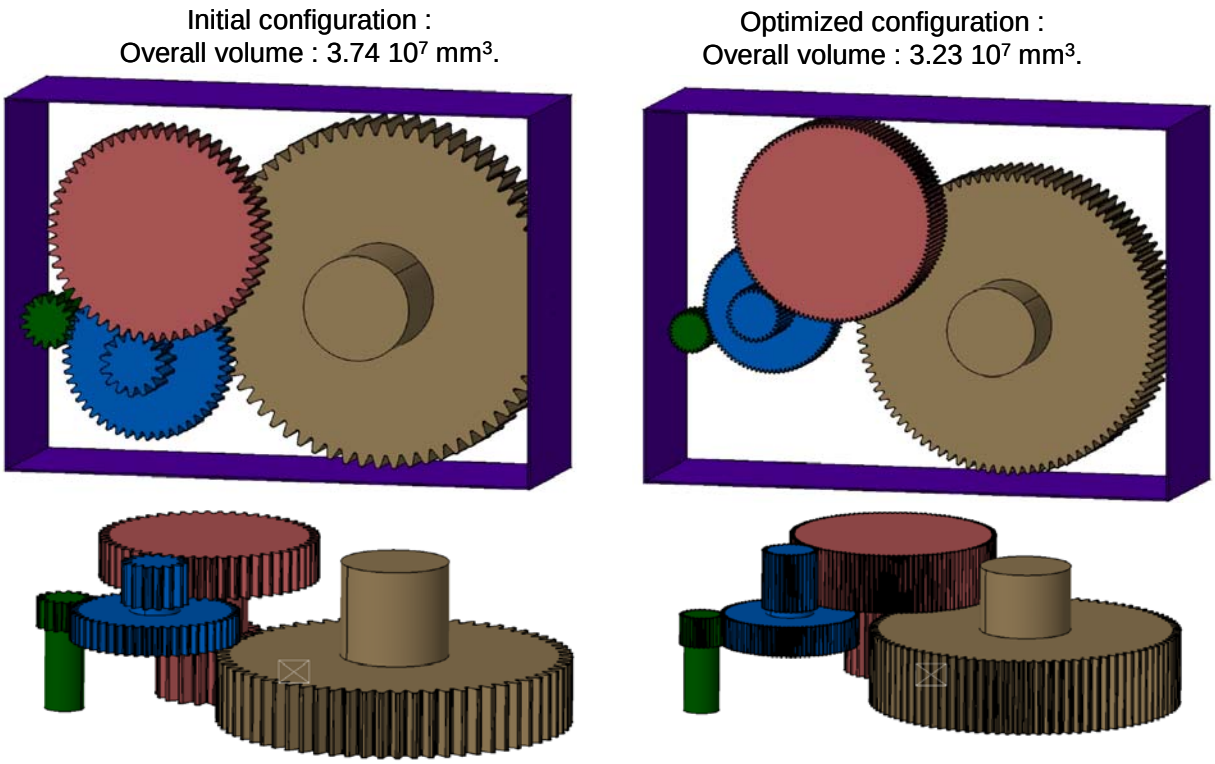


Figure 14 : Réducteur à trois étages : configuration initiale (solution industrielle) et optimisée.

Figure 15 : Evolution de la valeur moyennée sur la population de la fonction objectif pour le réducteur à trois étages.

variables, soit l'équivalent de 21 108 combinaisons donc 13 ordres de grandeurs de moins qu'une exploration complète de l'espace combinatoire ! On comprend ici tout l'intérêt des méthodes heuristiques.

4.1.2.2 Eléments de guidage en rotation

Fonction fondamentale de quasiment toutes les machines produisant de la puissance mécanique et de tous les mécanismes transmettant cette puissance, cette fonction est très fréquemment utilisée, en particulier dans son implémentation technologique sous forme de roulements à billes. Le problème du dimensionnement optimal de liaison pivot par roulements à billes n'a reçu que très peu d'attention dans la littérature[24], on peut à notre connaissance citer le travail d'Yves SILBERBERG sur un sujet connexe lié à l'usage des outils d'intelligence artificielle [Silberberg 1994] et celui de Xavier HERNOT [Hernot 1998] sur la définition d'éléments finis spécialisés pour le calcul d'arbres guidés par roulement à billes.

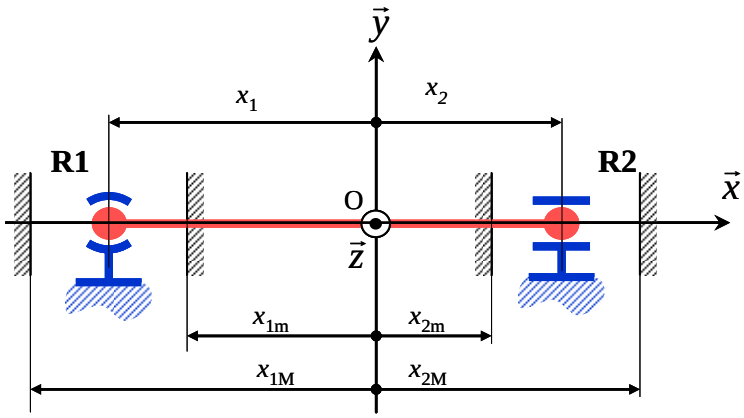
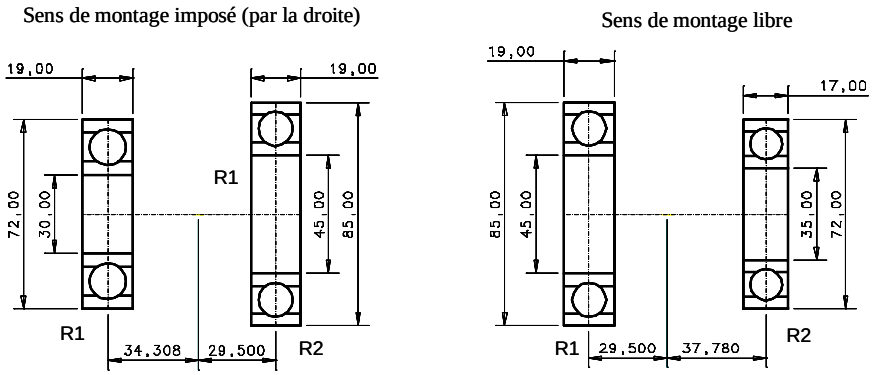


Figure 16 : Configuration générique d'une liaison pivot isostatique à deux roulements.

Le problème d'optimisation que nous avons défini s'appuie sur les modèles de dimensionnement classiques utilisés dans les bureaux d'études et enseignés dans tous les cours de technologie. Ce modèle repose sur une loi probabiliste d'évolution de la durée de vie en fonction de la charge supportée. Cette loi est tirée de campagnes d'essais expérimentaux. Nous avons étudié une configuration générique standard correspondant à un montage isostatique de liaison pivot à deux roulements, l'un d'eux servant d'arrêt axial (figure 16). On obtient un problème de 4 variables dont 2 discrètes, et 10 fonctions contraintes inégalités. Les critères de minimisation sont la masse des roulements et la longueur du montage. Dans cette formulation, le sens de montage peut être imposé par le concepteur, ou laissé libre. Ce problème se résout en quelques secondes et nécessite environ 150 000 évaluations du problème.

[24] A titre d'exemple une recherche sur http://www.engineeringvillage2.org avec le mot clé « ball bearing » renvoie 3966 références, et si l'on ajoute « optimisation » on en obtient 18 et finalement 5 avec le mot clé « design » qui ne traite pas de ce problème.



	Montage par la droite		Montage libre	
	R1	R2	R1	R2
Ref SNR	6306	6209	6209	6207
Durée de vie (h)	1800	2154	1891	1800
Fonction obj.[]	823.80		767.28	

Figure 17 : Résultats d'optimisation pour deux sens de montage différents.

4.1.2.3 Eléments de fixation par éléments filetés

L'apparente banalité de cet élément technologique cache une réalité très complexe, objet de beaucoup de travaux de recherche permettant de mieux comprendre et donc de maîtriser le dimensionnement de ces composants, dont les ruptures les plus dangereuses sont produites par les phénomènes de fatigue des matériaux. Il existe une abondante littérature sur le sujet, on en trouvera une synthèse dans les travaux de thèse de Jérôme MASSOL, Feras ALKATAN, Youssef FARES [Massol 1994, Alkatan 2005, Fares 2006]. Nous avons utilisé une modélisation dite en « poutre fléchie » permettant de rendre compte du comportement des assemblages soumis à des chargements dynamiques fortement excentrés par rapport à l'axe du boulon. Cette modélisation est due à Petar AGATONOVIC [Agatonovic 1985] puis a été reprise et améliorée par Jean GUILLOT [Guillot 1993], c'est cette dernière que nous avons utilisée. Ce modèle montre l'importance de la valeur de la précontrainte de serrage dans l'assemblage et l'importance des raideurs des pièces assemblées et du boulon dans la tenue en fatigue.

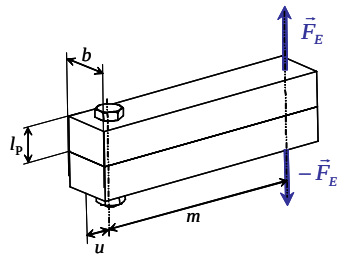
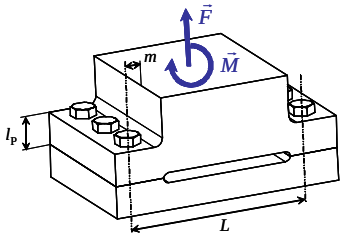
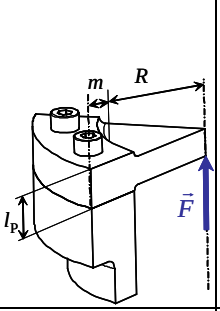
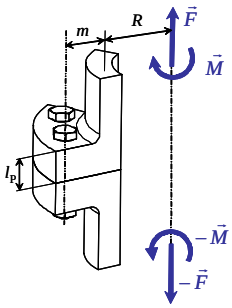
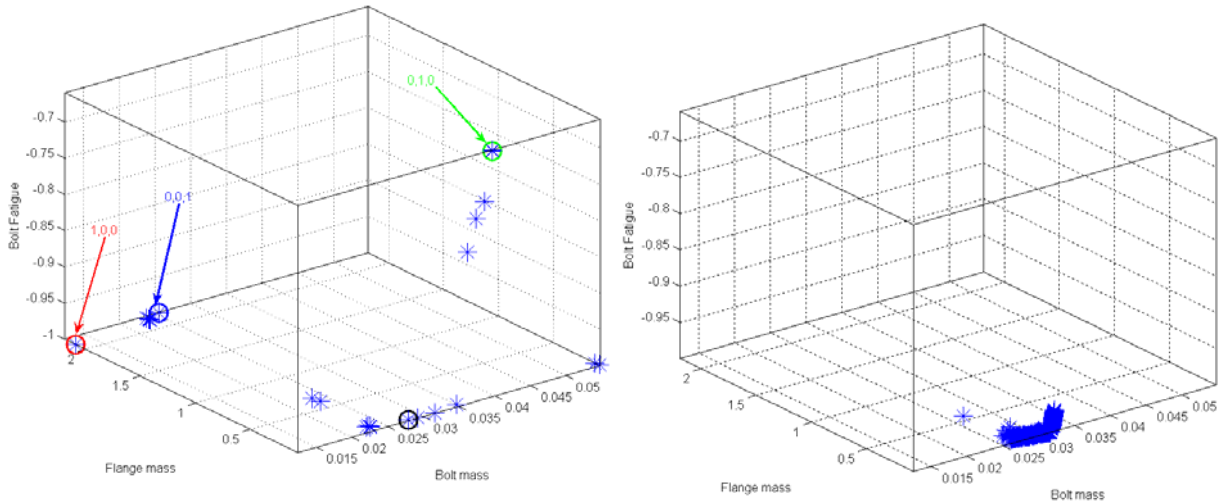
Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
			
	$F_E = \frac{1}{z}\left(\frac{M}{L} + F\right)$	$F_E = \frac{1}{z}F$	$F_E = \frac{1}{z}\left(\frac{2.M}{R} + F\right)$

Figure 18 : Les différentes configurations prises en compte dans la formulation du problème.

Le problème d'optimisation que nous avons formulé traite les cas présentés sur la figure 18, il se formule avec 6 variables dont 1 discrète et 9 fonctions contraintes inégalités. Nous avons choisi une formulation multicritère qui consiste à minimiser la masse du boulon et celle des pièces et à maximiser la contrainte de fatigue sans dépasser la limite imposée. Ce problème n'a pas pu être résolu efficacement avec un algorithme de stratégie évolutionnaire, nous avons utilisé un algorithme spécifique basé sur la méthode SQP disponible dans MATLAB™, qui fournit systématiquement une meilleure solution que les algorithmes stochastiques. Le calcul nécessite quelques dizaines de secondes et une solution optimale est obtenue après 6637 évaluations du problème.



Méthode des points pondérés + SQP

Méthode NSGA II

Figure 19 : Front de Pareto du problème de fixation par éléments filetés, comparaison des résultats de deux méthodes.

La connaissance du front Pareto est très intéressante pour le concepteur, c'est le moyen idéal pour faire le choix du meilleur compromis. Dans le cas de ce problème multicritère le front est une surface puisque le problème s'exprime avec trois critères de minimisation. On voit sur la figure 19 que ce front de Pareto reste difficile à caractériser et que les résultats obtenus avec deux techniques différentes sont très peu semblables.

Financements de ces travaux :	• Bourse de thèse MESR • Programme de recherche « CAPIQ » du pôle régional de recherche et de transfert de technologie « Technologie Organisationnelle et d'Accompagnement ».
Publications relatives à ces travaux	**Revues : 2** [RI6 2002] **Giraud-Moreau L. & Lafon P.** (2002) *Comparison of evolutionary algorithms for mechanical design components.* Journal of Engineering Optimization, 34(3), 307-322. [RI7 1999] **Lafon P. & Giraud L.** (1999) *Outils avancés de CAO d'éléments de mécanismes et stratégies évolutionnaires.* Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique, 14(2), 269-286. **Chapitres d'ouvrage : 2** [CO1 1999] **Giraud L. & Lafon P.** (1999) *Optimal design of mechanical components with genetic algorithm*, in: C. P. Batoz J.L., Cognet G.,Fortin C. (Ed.) Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME. 93-100. [CO2 1999] **Giraud L. & Lafon P.** (**1999**) *A hybrid evolution strategy for mixed discrete continuous constrained problems.,* Lecture notes en computer science. (vol. 1829), 123-135.

	Conférences internationales : 10 [CI14 2004] **Fauroux J.-C. & Lafon P.** (2004) *Optimization of a Multi-Stage Transmission Mechanism*, paper presented at the IFToMM, Tianjin, China, April 1-4. [CI16 2002] **Belloy P. & Lafon P.** (2002) *Justification de choix de conception : apport du dimensionnement optimal*, paper presented at the Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME, Clermont-Ferrand, France, may 16-19. [CI17 2001] **Eynard B. & Lafon P.** (2001) *Towards a mechanical systems modelling and optimal embodiment method*, paper presented at the International Conference on Engineering Design ICED, Glasgow, UK, August 21-23. [CI19 2000] **Eynard B., Belloy P. & Lafon P.** (2000) *Towards an integration of knowledge in mechanical engineering*, paper presented at the Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME, Montreal, Canada, May 16-19. [CI20 2000] **Lafon P. & Moreau-Giraud L.** (2000) *Coupling of evolution strategy and lagrangian augmented algorithm for optimal design of mechanical system*, paper presented at the Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME, Montreal, Canada, May 16-19. [CI21 1999] **Moreau-Giraud L. & Lafon P.** (1999) *Evolution strategies for optimal design of mechanical systems*, paper presented at the 3th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-3), Buffalo, USA, May 17-21. [CI22 1998] **Giraud L. & Lafon P.** (1998) *Optimization of mechanical design problems with genetic algorithms*, paper presented at the Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME, Compiègne, France, May 27-29. [CI23 1996] **Lafon P.** (1996) *Algorithme d'optimisation en variables mixtes pour la conception optimale des systèmes mécaniques*, paper presented at the Mechanics in Design, Toronto, CANADA, May 6-9. [CI24 1994] **Lafon P. & Guillot J.** (1994) *Algorithme d'optimisation en variables mixtes destiné aux problèmes de conception optimale*, paper presented at the 4th International Conference in Applied Mathematics and Mechanics, Cluj Napoca, ROUMANIE, June 7-12.
Encadrements :	**Thèse : 1 (encadrement à 100%)** **Giraud L.** (1999) *Optimisation des systèmes mécaniques: couplage de méthodes déterministes et évolutionnaires pour les problèmes en variables mixtes.* Doctorat : sciences mécaniques pour l'ingénieur, université de technologie de Troyes. **DEA : 5** **Ben Naceur I.**, *Modèles de dimensionnement de composants mécaniques et optimisation.* DEA Conception Mécanique et Ingénierie Simultanée de l'UTT, 09/2002. **Labdouci N.**, *Dimensionnement optimal des engrenages : formulation d'un problème d'optimisation à partir de la norme ISO.* DEA Conception Mécanique et Ingénierie Simultanée de l'UTT, 09/2003. **Limane D.**, *Dimensionnement optimal de liaisons par éléments filetés.* DEA Conception Mécanique et Ingénierie Simultanée de l'UTT, 09/2003. **Khoury I.**, *Dimensionnement optimal de liaisons par éléments filetés fortement excentrées.* DEA Energétique, Mécanique Mécatronique de l'Université Libanaise de Beyrouth, 10/2004. **Garsot N.**, *Optimisation des engrenages à axes concourants.* MASTER Système Mécanique et Matériaux de l'UTT, 09/2005.

4.2 Composants technologiques « structures » : formulation d'une expertise calcul comme support de synthèse de solution

Nous venons de présenter les résultats concernant le dimensionnement optimal de composants technologiques « liaisons ». Les résultats présentés dans cette partie concernent le dimensionnement des composants technologiques « structures » et ont été obtenus dans le cadre de la thèse de Zedijga ZIRMI. L'objectif est de développer un outil métier destiné aux experts calculs leur permettant d'exprimer les connaissances sous forme de contraintes métier liées aux calculs. Deux hypothèses fortes ont structurée ce travail :

- La nécessité de prendre en compte au plus tôt les contraintes métier liées aux calculs. Dans le cadre de l'application aux éléments de transmission de puissance mécanique définie au paragraphe 3.1, cette expertise sur les composants technologiques « structures » intervient après celle sur les composants technologiques « liaisons ».
- La nécessité de définir des contraintes métier liées aux calculs au plus tôt dans le processus de conception et au plus juste besoin, en fonction des données disponibles. L'intégration au plus tôt se traduit par l'absence de description géométrique précise du composant « structure ». Au plus juste besoin se traduira ici par un découpage chronologique de cette expertise de manière à faire évoluer les contraintes métier en fonction des données intégrées par les autres expertises. La figure 20 précise cette évolution et montre que les activités relatives à cette expertise s'étalent jusqu'à la définition complète de la géométrie et des matériaux des composants technologiques « structures ».

Au départ les données du produit disponibles sont :

- La position spatiale et les composantes de tous les torseurs d'efforts extérieurs à la structure.
- Les dimensions nominales des surfaces fonctionnelles issues des composants technologiques « liaison ».

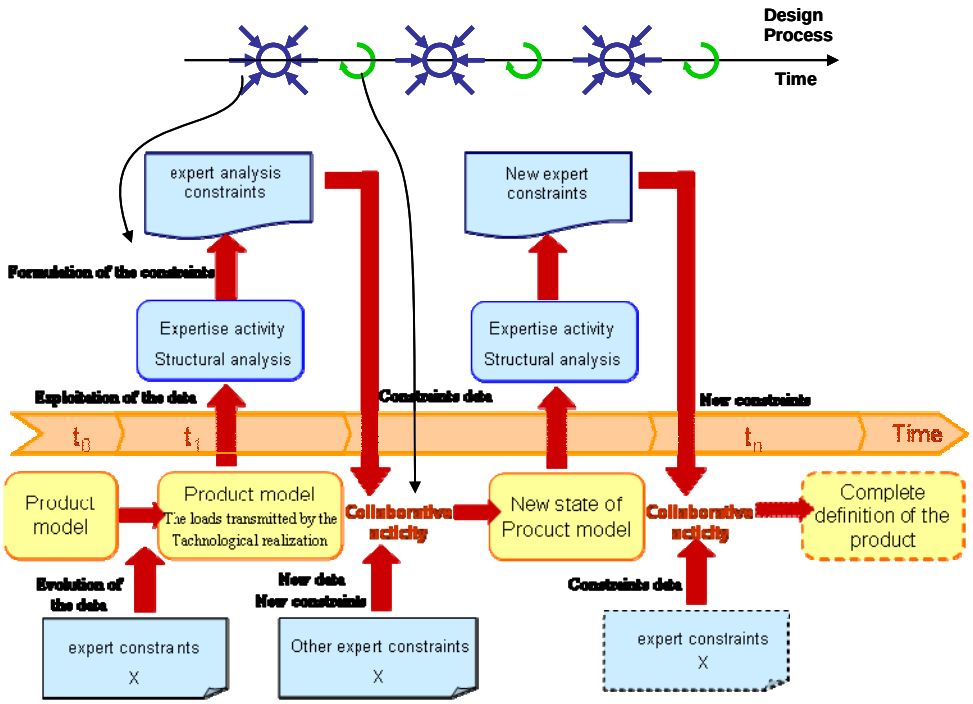


Figure 20 : Diagramme montrant la chronologie des activités de l'expertise calcul.

L'étude des modèles analytiques de calcul de structures (théorie des poutres, plaques et coques pour les cas « simples ») montre que ces modèles contiennent une description géométrique de la structure. Cette description est intimement liée aux hypothèses de modélisation, l'idée de base de ce travail est de considérer que cette description géométrique peut être utilisée pour définir le modèle de données qui sera manipulé par l'expertise. Nous avons choisi d'utiliser la théorie des poutres, car elle permet d'aller assez loin dans les calculs analytiques et elle concerne de nombreuses structures (arbre de machine, structure primaire aéronautique, châssis, …). Dans ce cas la description géométrique utilise la notion de ligne moyenne et de section droite pour modéliser la géométrie. On montre alors que cette description géométrique est très proche de la notion de « peaux et squelettes » introduite par Lionel ROUCOULES [Roucoules 1999]. Le squelette représentant la trajectoire d'un flux (d'énergie, de matière, ..), la peau représentant les surfaces fonctionnelles enveloppes ou transversales du flux. Cette notion est une des bases du modèle de données liées à l'expertise « choix des procédés de fabrications » développée dans les travaux de ROUCOULES [Roucoules 2007].

A partir d'un modèle de poutre la définition géométrique va se construire en :

- Choisissant les squelettes (les lignes moyennes) pour chaque tronçon de poutre.
- Faisant apparaître progressivement les paramètres de description des sections, définissant « la peau » de la géométrie.

La figure 21 présente, sur un exemple simple, les principes de bases. On notera l'évolution de la description de la section droite, d'abord caractérisée par son aire S et son moment d'inertie I puis lorsque la forme est fixée, par exemple suite à la prise en compte d'une autre expertise, cette section droite est caractérisée par son diamètre d. On notera aussi la forme générale des contraintes métier issues du calcul qui s'exprimeront par :

$$f(\alpha_i, \beta_j, \gamma_l, \ldots) \leq 0$$

Avec α_i paramètres géométriques, β_j paramètres matériaux et γ_l paramètres d'efforts.

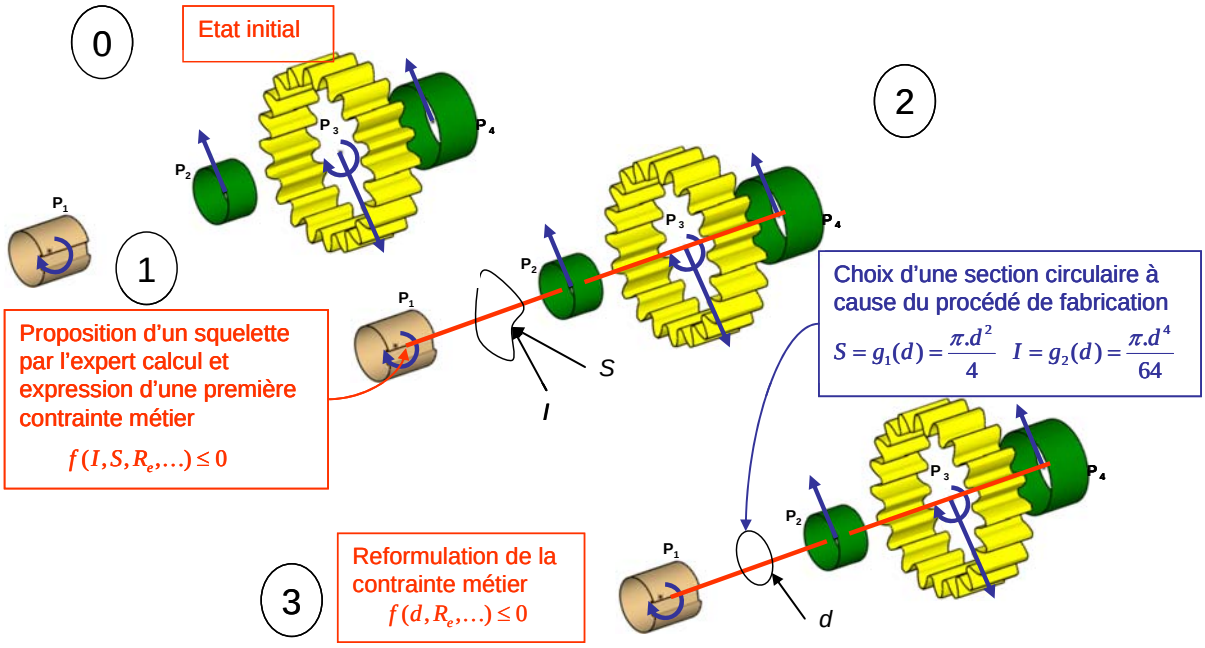


Figure 21 : Composant « structure » arbre de machine, exemple d'évolution de la définition géométrique.

Ces principes ont été formalisés dans une maquette informatique dont l'objectif est de :

- Recueillir les données nécessaires depuis « CoDeMo ».
- Permettre l'expression et l'évolution des contraintes métier avec un modèle de données adéquat.
- Assurer l'intégration des contraintes métier dans le modèle de données produit géré par « CoDeMo ».

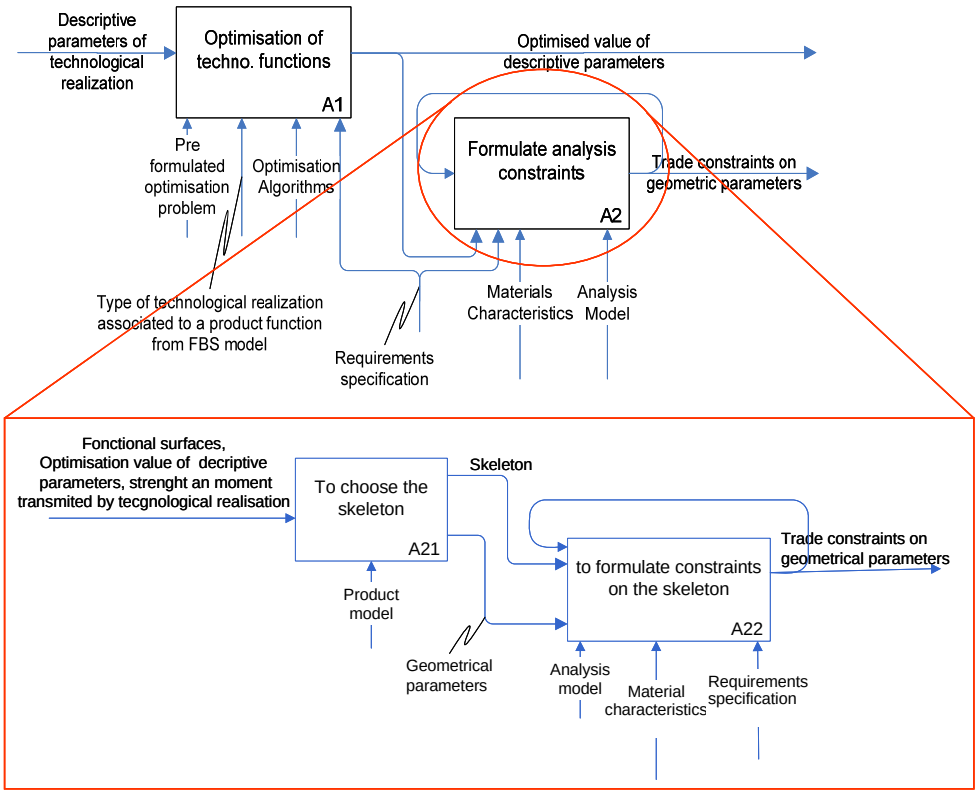


Figure 22 : Actigramme IDEF0 modélisant les tâches de l'expertise calcul des composants technologiques « structures ».

Afin de développer une maquette informatique l'actigramme IDEFØ de la figure 22 décrit plus précisément l'enchainement des tâches et les données manipulées. Le modèle de données de la figure 23 détaille, dans le formalisme UML, les différentes classes utilisées. Ce modèle met en évidence :

- Le découpage de la poutre en tronçon en fonction de l'état de description de la géométrie., et pour chaque tronçon une section dont les paramètres de description de type « attributs contraignables » peuvent évoluer.
- Le stockage des contraintes métier sous forme de chaîne de caractères. Ce point reste à développer, ces développements seront précisés dans les perspectives.

La partie « Modèle et contraintes métier » est spécifiée pour les calculs de résistance statique, mais les concepts développés restent valables pour des calculs de résistance dynamique (à la fatigue avec intégration des coefficients de concentration de contraintes mécaniques, ou d'analyse vibratoire avec l'expression des fréquences propres).

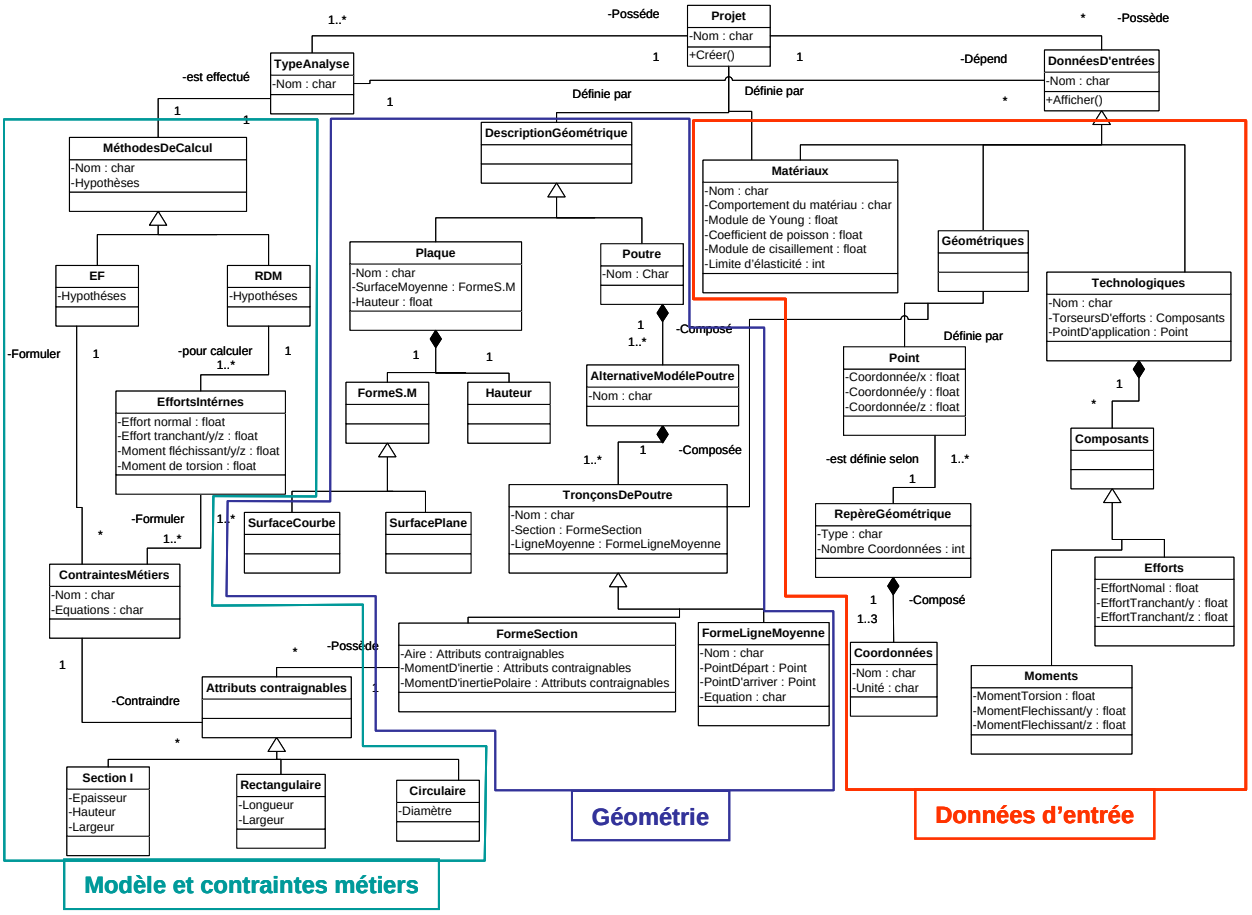


Figure 23 : Diagramme UML du modèle de données de l'expertise calcul.

La maquette de l'application que nous avons développée sera présentée dans la partie traitant de l'intégration des outils et méthodes dans le processus de conception.

Financements de ces travaux :	• Bourse de thèse du conseil régional de Champagne-Ardenne. • Programme de recherche « CAPIQ » du pôle régional de recherche et de transfert de technologie « Technologie Organisationnelle et d'Accompagnement ».
Publications relatives à ces travaux	**Conférences : 3 internationales + 1 nationale.** [CI1 2006] **Roucoules L., Lafon P., Skander A. & Krikeb Z.** (2006) *Knowledge intensive approach towards multiple product modelling and geometry*, paper presented at the 16th CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, July 16-19. [CI9 2006] **Krikeb Z., Lafon P. & Troussier N.** (2006) *Integration of the Structural Analysis in the Mechanical Product Design Process*, paper presented at the 16th CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, July 16-19. [CI13 2006] **Krikeb Z., Lafon P. & Troussier N.** (2006) *Integration of mechanical analysis knowledge in the embodiment design process*, paper presented at the The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises, Budapest, Hungary, 11-12 september. [CN1 2005] **Krikeb Z., Lafon P. & Troussier N.** (2005) *Méthode d'intégration des contraintes du calcul de structure dans le processus de conception de produit mécanique*, paper presented at the 17ième Congrés Français de Mécanique, Troyes, France, 29 aout - 2 septembre.

Encadrements :	**Thèse : 1 (encadrement à 50%)** **Zirmi-Krikeb Z.**, *Calculs d'avant projet : intégration dans le processus de conception et indicateur de choix de modélisation.* Thèse en codirection avec Nadège TROUSSIER de l'Université de Technologie de Compiègne.

4.3 Intégration du calcul vers l'émergence des solutions

Depuis l'apparition des premiers logiciels industriels de CAO dans les années 1970 [McMahon 1998] jusqu'à nos jours, la perception du rôle et de la structure des outils d'aide au développement de produit s'est évidemment profondément transformée. La perception initiale « d'une assistance automatique avec un logiciel intégrant toutes les fonctionnalités nécessaires » a évolué vers celle d'un environnement modulaire où l'échange de données entre les différents logiciels supportant une expertise donnée est indispensable. Le maquettage de logiciels permettant de valider des concepts nouveaux doit donc s'inscrire dans ce contexte.

Nous présentons ici les résultats relatifs à l'intégration des démarches et outils experts prototypés précédemment, et pour rester cohérents avec ce qui précède nous montrons cette intégration en commençant par les outils de dimensionnement optimal de composants technologiques « liaisons ».

4.3.1 Intégration du dimensionnement optimal de composants

Actuellement lorsque le concepteur souhaite dimensionner un composant de type liaison avec les dernières générations de logiciel de CAO il doit recourir à des outils externes tels que ceux que nous avons évoqués au paragraphe 1.3.2 ou dans le pire des cas manuellement. Une fois ce dimensionnement effectué il peut utiliser une base de données de modèles géométriques de composants paramétrés pour récupérer dans son espace de travail le modèle avec les bonnes valeurs des paramètres. Bien que les résultats présentés ici soient relatifs au domaine d'application défini dans le paragraphe 3.1, ce problème revêt un caractère générique puisque le composant technologique dépend du niveau de granularité considéré.

La figure 24 montre le synoptique d'un scénario d'utilisation typique de ces outils de dimensionnement optimal. Par rapport au processus de conception, on notera :

- Le mode d'usage asynchrone, nécessitant la formalisation d'un problème d'optimisation spécifique.
- Le mode d'usage synchrone lorsqu'il existe déjà un problème d'optimisation formulé pour le type de composant technologiques « liaisons » utilisé.

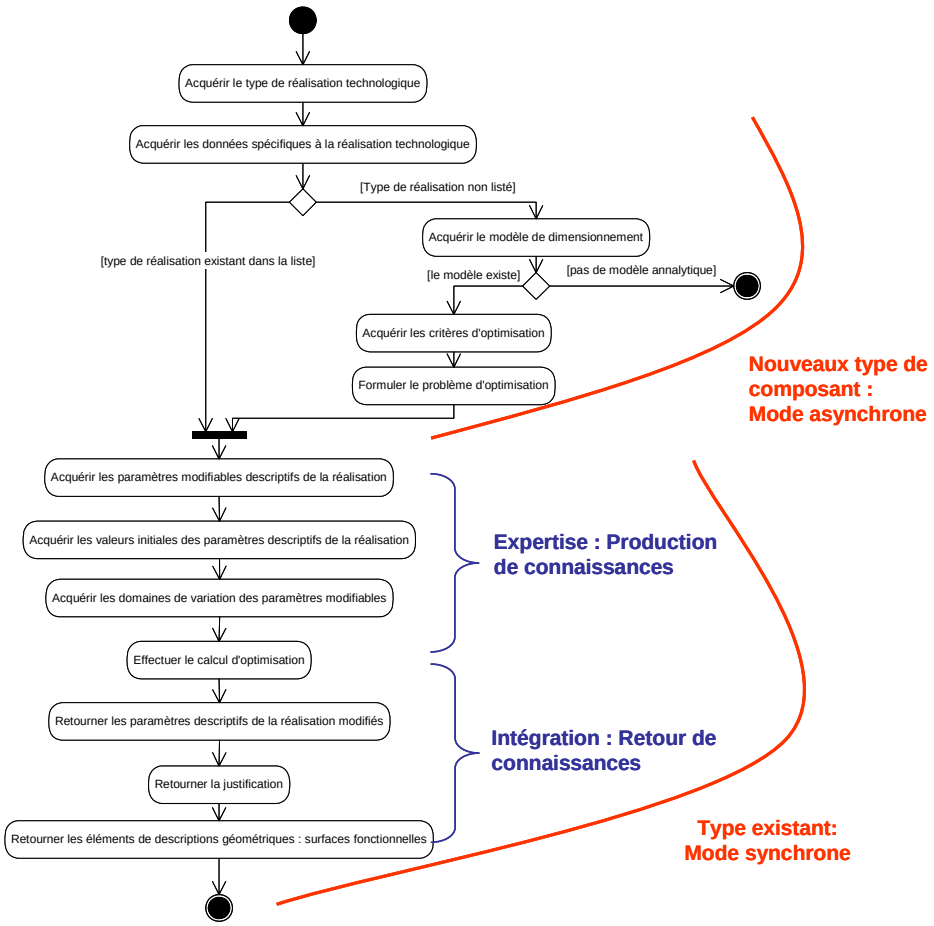


Figure 24 : Scénario d'utilisation typique des outils de dimensionnement optimal de composant technologique « liaisons ».

Les travaux réalisés dans ce cadre nous permettent de proposer plusieurs déclinaisons de cette intégration en fonction des contextes et des problématiques industrielles :

- Une intégration « bas niveau » entre un logiciel de CAO et les outils de dimensionnement optimal.
- Une intégration « haut niveau » permettant l'émergence et la collaboration autour de la géométrie du produit.

L'intégration « bas niveau » répond à des situations dans lesquelles la modélisation du produit est réduite à celle d'une maquette numérique classique reposant essentiellement sur la modélisation géométrique du produit.

On utilise ici les possibilités de paramétrage de tous les logiciels de CAO modernes, qui permettent de définir un modèle géométrique paramétré. Dans ce cas on associe à chaque composant technologique « liaison » un modèle géométrique paramétré et le programme de calcul d'optimisation approprié. Ce programme contient la définition générique du problème d'optimisation et l'algorithme d'optimisation adapté. La figure 25 montre un exemple de réalisation dans l'environnement du logiciel CATIA V5™ à l'aide d'une macro commande que nous avons développée.

Dans cette réalisation les paramètres « variables » qui seront optimisés et les paramètres « données » nécessaires aux calculs d'optimisation sont définis dans le modèle de produit. Cette particularité permet de conserver ces informations dans la maquette numérique du produit, ce qui les rend accessibles à certains systèmes de SGDT et/ou de PLM.

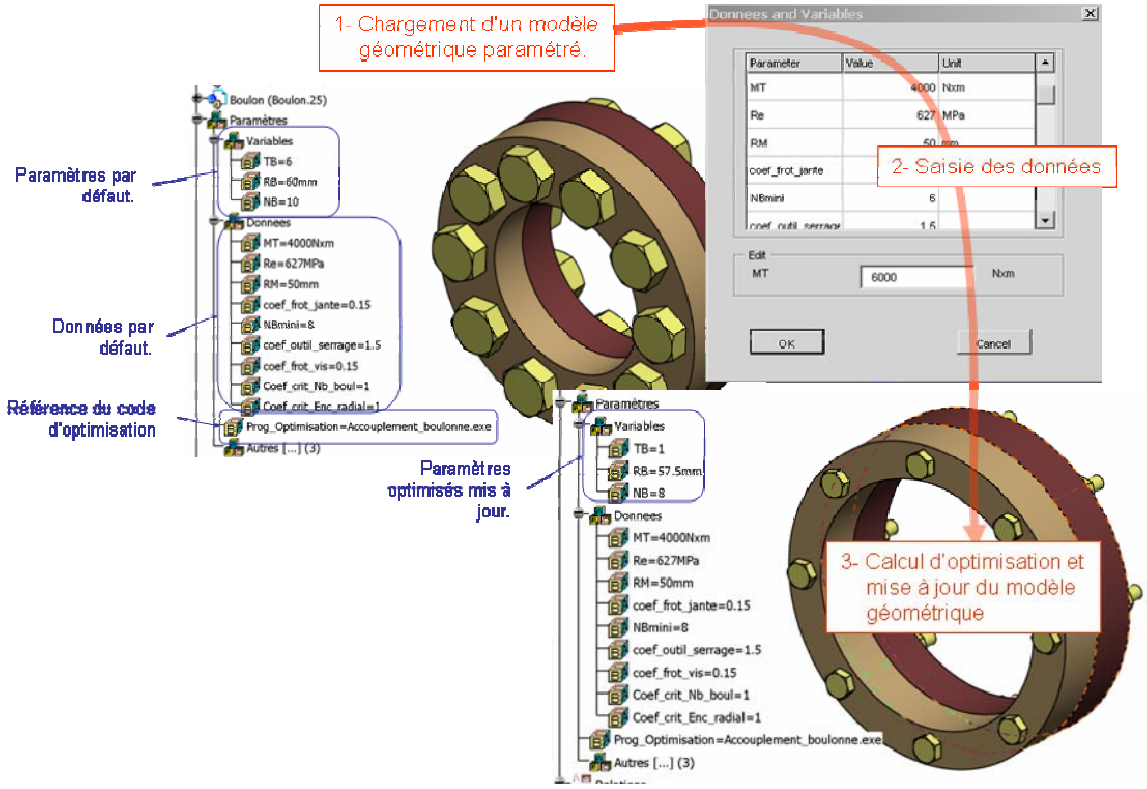


Figure 25 : Couplage direct CAO / optimisation de composants technologiques «liaison », illustration du synoptique du calcul.

La réalisation précédente présente l'inconvénient d'être dépendante d'un logiciel de CAO, ce qui pose le problème de la pérennité des solutions développées et de leur maintenance par rapport aux mises à jour successives de tous les logiciels industriels. Une variante de la réalisation précédente consiste à utiliser le format STEP pour générer le modèle géométrique mis à jour après le calcul d'optimisation. La figure 26 présente l'organisation de ce couplage.

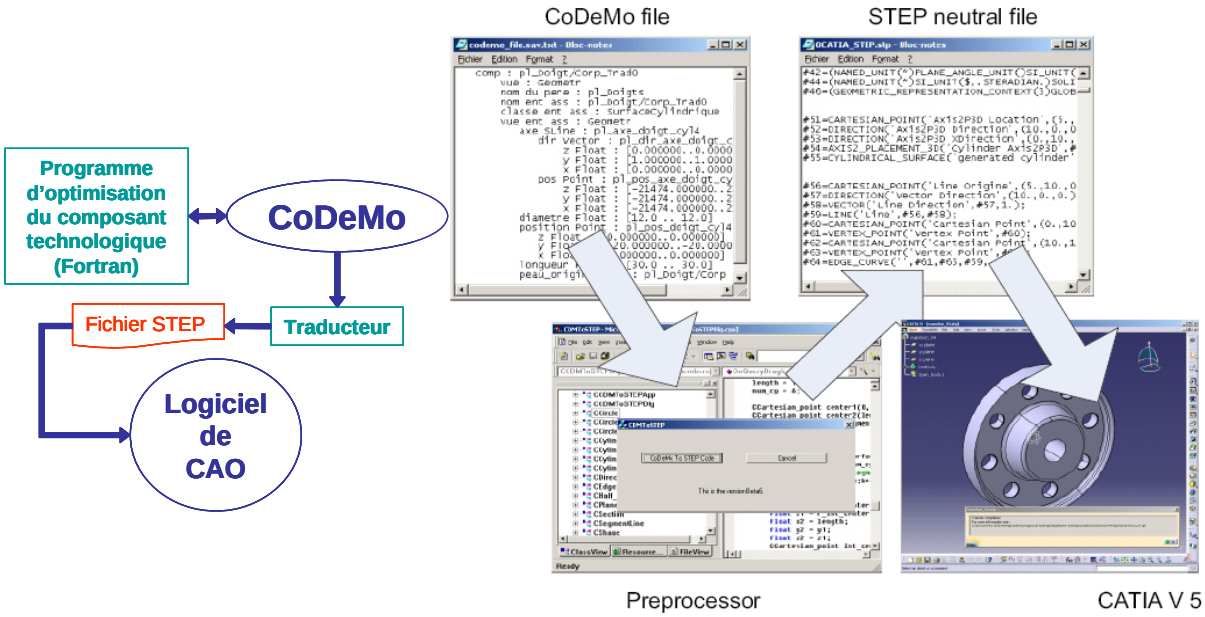


Figure 26 : Couplage via le format STEP entre CoDeMo et l'optimisation de composants technologiques « liaisons ».

Dans l'intégration « haut niveau » l'application « CoDeMo » joue un rôle central, car c'est elle qui assure la gestion du modèle de produit tel que nous l'avons présenté au paragraphe 1.1, en particulier l'aspect fondamental ici qu'est la multi représentation des données du produit.

La figure 27 présente la représentation des données associées à l'expertise optimisation des composants technologiques « liaisons » pour le même exemple que celui de la figure 25. On peut ainsi aisément prédéfinir cette modélisation en fonction de chaque composant technologique « liaison ». La vue « calcul d'optimisation » étant composée des paramètres à optimiser et des données nécessaires à l'optimisation. De la même manière que précédemment ces paramètres sont mis à jour après appel du programme d'optimisation associé au composant technologique considéré.

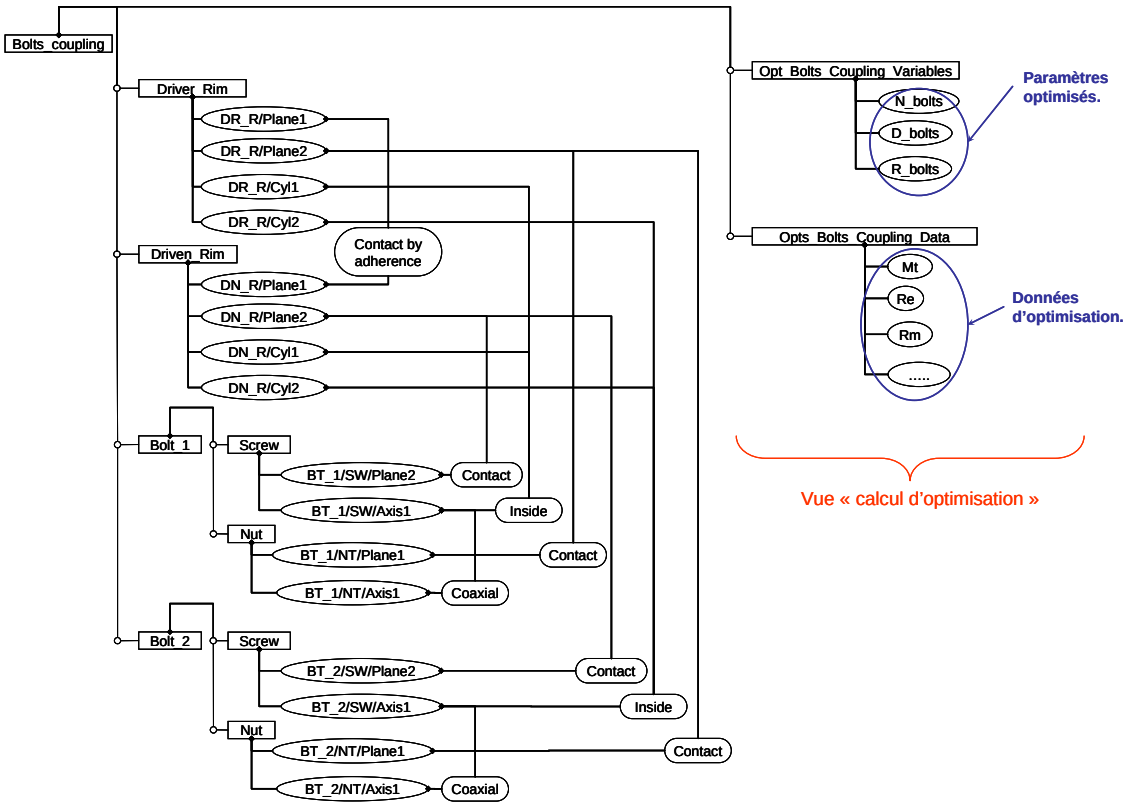


Figure 27 : Représentation multi-vues dans CoDeMo du modèle de produit associé à un composant technologique « liaison ».

La figure 28 présente la correspondance directe entre les éléments du modèle de produit et une représentation géométrique. On remarquera que la représentation géométrique n'est que partielle, puisqu'il s'agit ici de définir les surfaces fonctionnelles juste nécessaires à l'expertise optimisation.

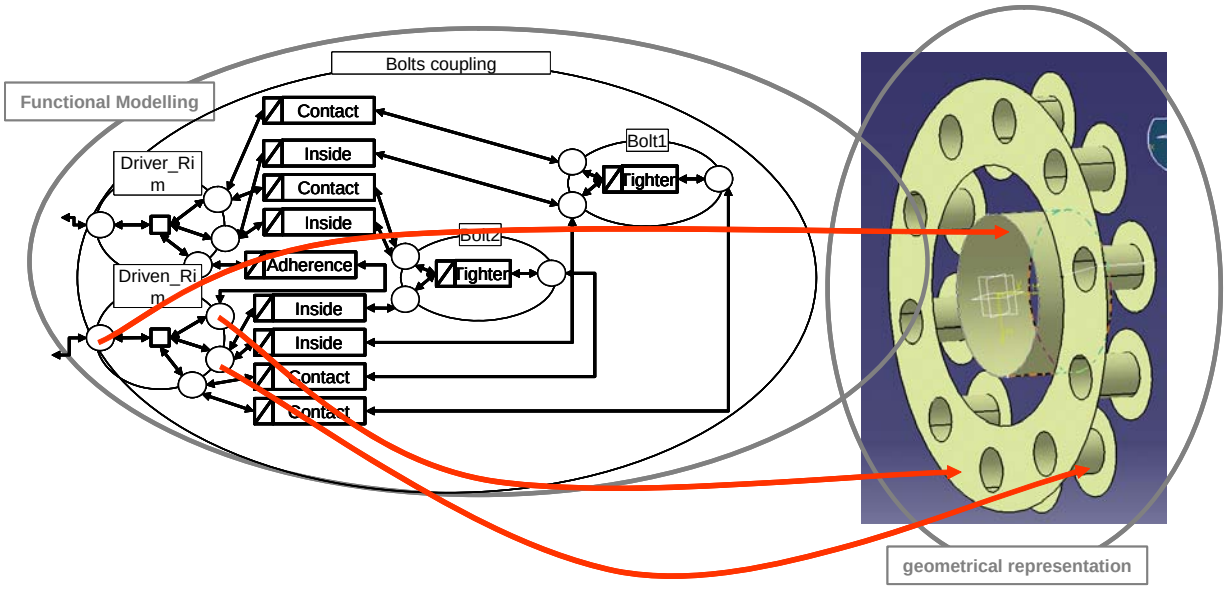


Figure 28 : Association entre une représentation géométrique du produit et la vue « fonctionnelle » dans CoDeMo.

On voit donc comment émerge une représentation géométrique du produit issue de l'expertise concernant le dimensionnement optimal de composant technologique « liaison ». En liaison avec les travaux développés pour Lionel ROUCOULES [Roucoules 2007], concernant l'intégration des procédés de fabrication, une autre représentation géométrique du produit émerge de l'expertise « choix des procédés de fabrication ». Cette représentation géométrique est issue des concepts de peaux et squelette, elle est présentée sur figure 29.

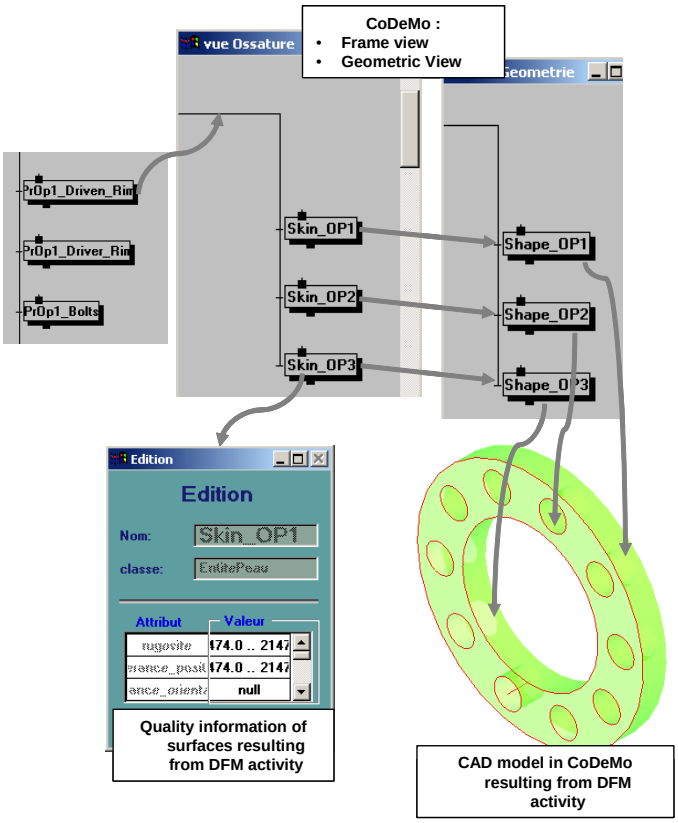


Figure 29 : Représentation géométrique du produit issue de l'expertise « choix des procédés de fabrication ».

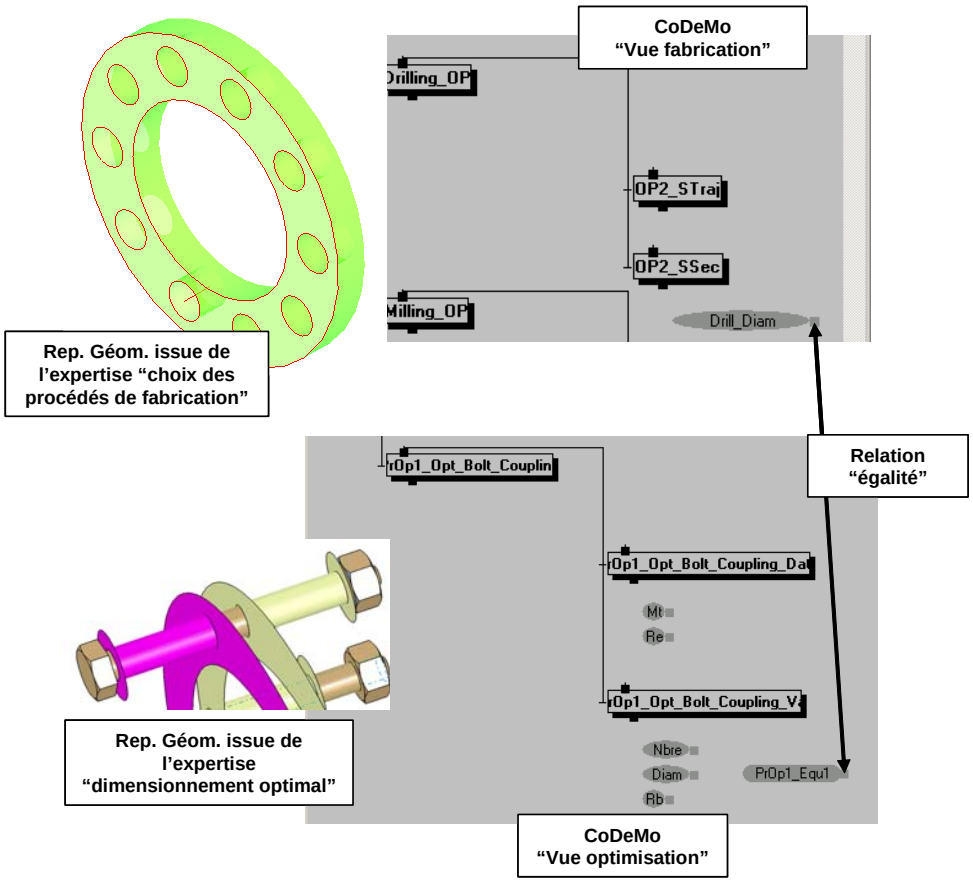


Figure 30 : Emergence de deux représentations géométriques du produit issues de deux expertises métier dans CoDeMo.

Conformément au processus de développement que nous avons présenté au paragraphe 1.1 sur la figure 2, après la phase d'intégration des connaissances produites par les différentes expertises métier, s'ensuit une prise de décision permettant de trouver un compromis conduisant dans ce cas à une représentation géométrique unique et cohérente. Les représentations géométriques produites par les expertises, bien qu'encore incomplètes à cette étape de la conception, fournissent donc un excellent support de prise de décision. La figure 30 illustre cette situation dans le cas de l'expertise relative au dimensionnement optimal de composant technologique. A coté des représentations géométriques « CoDeMo » intègre également des mécaniques de vérification de contraintes[25], permettant de vérifier automatiquement la cohérence des valeurs des paramètres.

Nous n'avons pas pour l'instant implémenté un algèbre spécifique opérant sur les représentations géométriques, permettant de faciliter l'analyse des différentes représentations pour montrer les incohérences ou les cohérences des différentes représentations. Nous développerons ces aspects dans les perspectives.

4.3.2 Intégration de l'expertise de dimensionnement de composants « structures »

L'expertise de dimensionnement de composants « structures » que nous avons formalisée et décrite dans le paragraphe 4.2 permet donc l'expression sous forme de relations inégalités les contraintes métier liées aux calculs de dimensionnement. L'interface de la maquette de cette application est

[25] A comprendre ici au sens de la programmation par contraintes, c'est-à-dire de relations (égalités, inégalités) entre des paramètres. CoDeMo utilise les librairies du fournisseur ILOG pour implémenter ces mécanismes.

présentée sur la figure 31. Cette maquette s'appuie sur des technologies informatiques classiques, elle utilise le modèle de données OCAF™ de la librairie open source « OpenCasCa.de™ [26]».

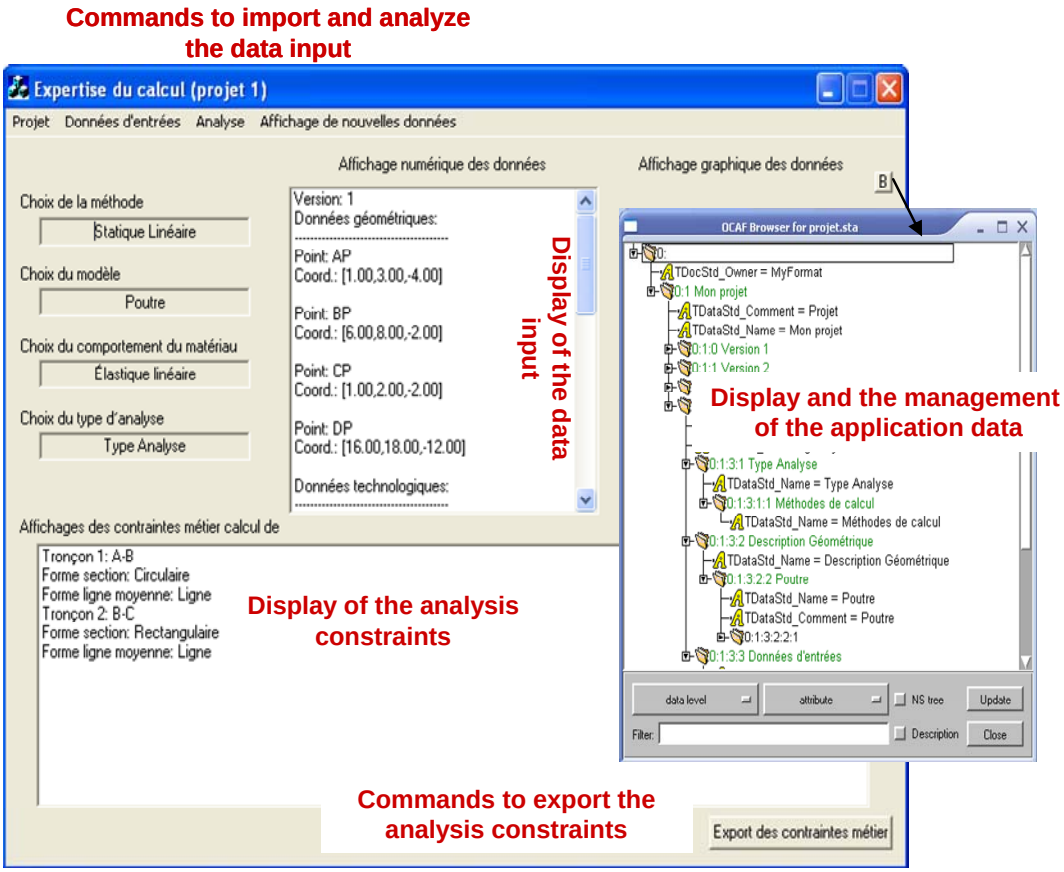


Figure 31 : Interface de la maquette de l'application supportant l'expertise dimensionnement de composants « structures ».

L'intégration de ces connaissances dans le modèle de produit passe par l'application « CoDeMo ». On utilise ici le principe de multi-représentation des données en définissant une vue spécifique à l'expertise « calculs » dans le modèle de données du produit. Dans cette vue, le composant « structure » est vu comme un ensemble de tronçons (définis comme des composants du modèle de données). Pour chaque tronçon les paramètres utilisés dans les expressions des contraintes métier sont définis comme des liens, chaque contrainte métier étant définie comme une relation (cf. figure 32).

[26] http://www.opencascade.org/

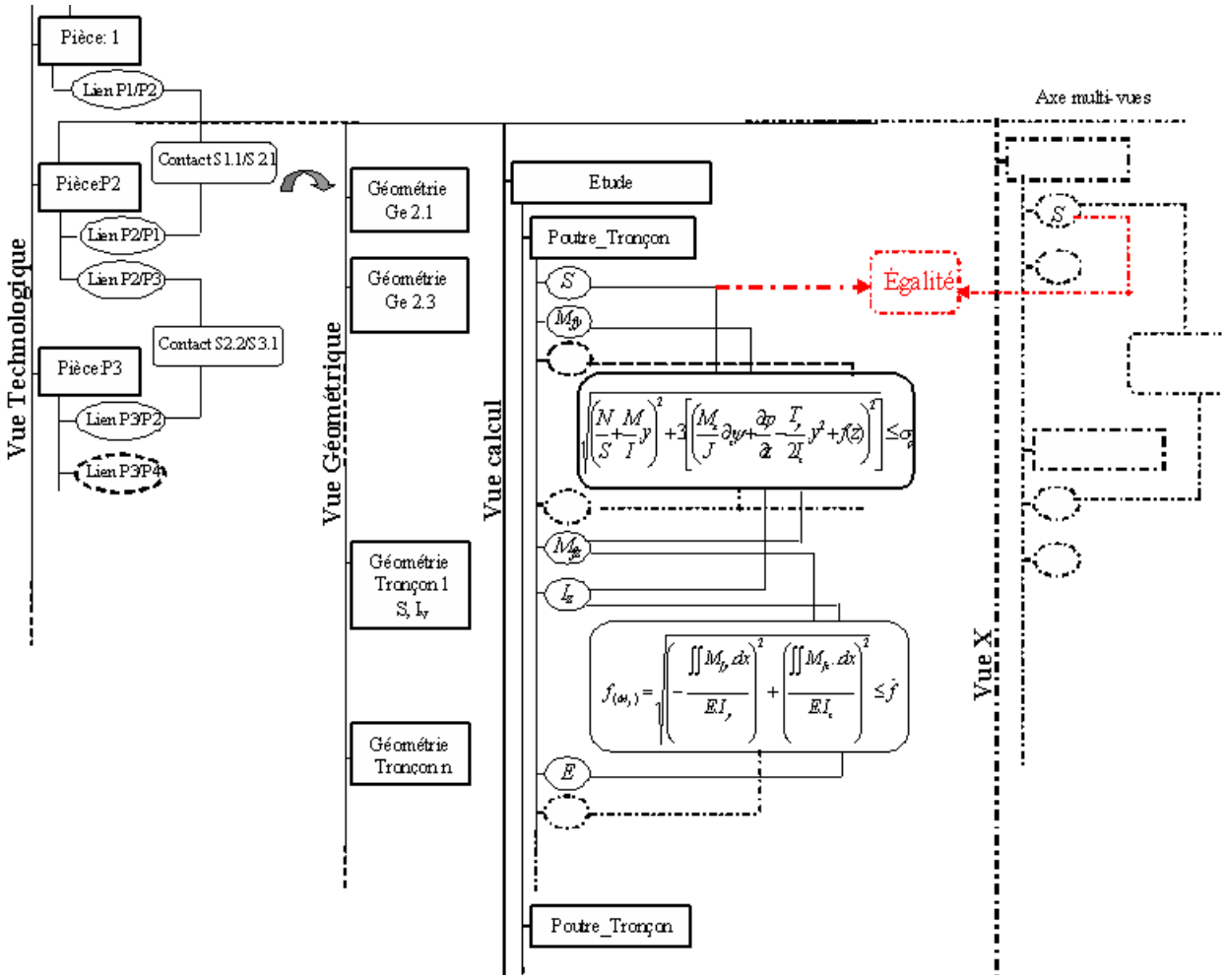


Figure 32 : Multi-vues et intégration des contraintes métier « calculs » dans le modèle de données du produit géré par « CoDeMo ».

L'étape précédente décrit l'intégration des contraintes métier dans le modèle de données du produit. Lors des étapes de collaboration décrites dans le paragraphe 1.1, il est nécessaire de définir des mécanismes de correspondance entre les différentes vues de façon à assurer la cohérence des informations. Les principes de ces mécanismes sont définis dans le travail de Lionel ROUCOULES [Roucoules 1999] et reposent sur le principe de traduction d'entités d'une vue vers une autre vue. Le logiciel « CoDeMo » intègre également le solveur de contraintes ILOG™ permettant de vérifier la cohérence des contraintes dans le modèle de produit et lorsque la résolution est possible, pour des expressions simples, de fournir les intervalles de valeurs admissibles pour chacun des paramètres.

L'expertise de dimensionnement de composants « structures » est considérée comme achevée lorsque :

- Le squelette est choisi pour chaque tronçon.
- Pour chaque tronçon de poutre, les paramètres de description de la section ont des valeurs définies par un intervalle.

Dans cette situation on est capable de générer une description géométrique par une opération de balayage des sections sur chaque tronçon. On obtient ainsi plusieurs surfaces fonctionnelles en fonction des intervalles de valeur admissible pour chaque paramètre. Finalement cela donne un problème de la même nature que celui que nous avons évoqué dans le paragraphe 4.3.1 à propos de l'intégration du dimensionnement des composants « liaisons ».

Financements de ces travaux :	• Bourse de post-doc (Song H.) du conseil régional de Champagne-Ardenne • Projet RNTL (2001-2005) IPPOP « Intégration Produit Processus Organisation pour l'amélioration de la Performance ».
Publications relatives à ces travaux	**Revues : 3 internationales + 1 nationale.** [RI1 2007] **Song H., Eynard B., Roucoules L., Lafon P. & Charles S.** (2007) *Beyond geometric CAD system: implementation ofSTEP translator for multiple-views product modeller*. International Journal for Product Lifecycle Management, 2(1), 1-17. [RI3 2006] **Song H., Roucoules L., Eynard B. & Lafon P.** (2006) *Interoperability between Cooperative Design Modeller and a CAD System: Software Integration versus Data Exchange*. International Journal for Manufacturing science & Production, 139-149. [RI5 2005] **Song H., Eynard B., Lafon P. & Roucoules L.** (2005) *Towards Integration of CAx Systems and a Multiple-View Product Modeller in Mechanical Design*. Acta Polytechnica, 45(3), 26-31. [RN1 2004] **Nowack P., Postansque R., Lafon P. & Eynard B**. (2004) *Implémentation KBE : étude de cas en conception mécanique*. Revue du document numérique, (8)107-121. **Conférences : 2 internationales + 1 nationale.** [CI6 2006] **Roucoules L., Lafon P., Skander A. & Krikeb Z.** (2006) *Knowledge intensive approach towards multiple product modelling and geometry*, paper presented at the 16th CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, July 16-19. [CI15 2004] **Song H., Eynard B., Roucoules L. & Lafon P.** (2004) *Integration framework for a CAx system and multiple-views product modeller in mechanical design*, paper presented at the 4th International Conference on Advanced Engineering Design, Glasgow, UK, September 5-8. [CN3 2003] **Postansque R., Nowack P., Eynard B. & Lafon P.** (2003) *Formulation de connaissances métier et intégration dans un modeleur CAO*, paper presented at the 2ème Colloque Coopération Innovation et Technologies, Troyes, France.
Encadrements :	**Projet de fin d'études : 1** **Ortega Mirapeix, M., Palencia Ledo C.,** *Collaboration au projet CODEMO*. Projet de fin d'études, Université de Valladolid, ETSII, juin 2006.

5 Conclusions et principaux apports

Nous avons tout d'abord défini une problématique assez large en partant des limitations des outils et des méthodes de conception actuels, en insistant sur l'influence et la prédominance du modèle géométrique dans le processus de conception. Nous avons identifié le défaut d'outils de calculs pour la synthèse de solutions se positionnant au plus tôt dans les processus de conception et donc nécessairement avant même la définition du modèle CAO des composants du produit. A cela s'ajoute le besoin de favoriser l'intégration des connaissances des différents experts afin de faire émerger la solution du produit et éviter ainsi les itérations coûteuses dans le développement du produit.

Les méthodes et les outils que nous avons développés n'ont pas la prétention d'apporter une réponse générale à cette vaste problématique. Sur le domaine d'application propre à la conception de système de transmission de puissance nous avons proposé :

- Des outils de synthèse dimensionnelle optimisée de composants technologiques « liaisons ». Nous insistons ici sur la synthèse car les solutions optimisées que nous obtenons ne nécessitent aucune initialisation particulière avec une « bonne solution ». Ces outils sont développés suivant une démarche que nous avons bien formalisée, ceci doit permettre d'étendre avec le minimum d'efforts le champ d'application à d'autres fonctions techniques de produit et d'autres mises en œuvre technologiques.
- Un outil de formalisation des contraintes métier liées au dimensionnement de structures s'appuyant sur une définition minimale des données ne nécessitant pas de définition géométrique préalable.
- Des spécifications permettant d'intégrer les informations produites par ces outils dans le modèle de données du produit, géré par l'application « CoDeMo ». Pour chacun de ces outils, la définition des données juste nécessaires permet leur mise en œuvre au plus tôt dans le processus de conception.

Notons toutefois que l'approche d'optimisation de composants technologiques telle que nous l'avons présentée, s'apparente étroitement au concept de modélisation par entité (« *feature based modeling* »), le composant et sa méthode d'optimisation associée étant assimilables à une entité. Il y a là une certaine généricité liée au niveau de granularité du composant technologique. L'une des grandes difficultés reste la formulation globale du problème d'optimisation pour des systèmes complexes, en admettant que l'on sache résoudre, même de manière approximative ce problème d'optimisation.

Nous pensons que l'optimisation globale d'un produit ne peut se concevoir sans la prise en compte de l'environnement du produit, c'est-à-dire les procédés d'obtention qui lui sont associés, et sans doute aussi le processus même de son développement. En l'absence d'une compréhension claire des interactions entre ces différentes dimensions (produit, procédés, processus) il est vain d'envisager à l'heure actuelle un tel objectif. Par contre nous venons de voir qu'une optimisation locale, avec un niveau de granularité assez fin, en interaction avec les autres expertises mises en œuvre au cours du processus de conception, constitue sans doute une approche plus réaliste. Cette dernière idée constitue à notre avis un apport scientifique essentiel de ces travaux.

Dans cette approche la question de l'optimalité globale de la solution qui émerge d'un tel processus reste posée et largement ouverte ….

6 Perspectives

Nous reprenons ici les perspectives propres à cette partie en les déclinant dans l'ordre que nous avons utilisé pour présenter nos travaux :

En ce qui concerne les outils de synthèse dimensionnelle optimisée dans le processus de conception les perspectives de ces travaux concernent :

- La définition d'algorithmes permettant de discriminer les cas de configuration où les données saisies par le concepteur conduisent à un ensemble de solution vide. Actuellement la seule possibilité est de lancer le calcul d'optimisation et de supposer qu'en cas d'échec, le problème n'admet pas de solution, ce qui est loin d'être satisfaisant.

- L'extension des applications à d'autres fonctions techniques et d'autres technologies doit se poursuivre afin de constituer une véritable bibliothèque associant : une fonction technique, une technologie et un couple « problème d'optimisation + algorithme de résolution appropriée ». Dans cet objectif un rapprochement avec les éditeurs de catalogues de modèles géométriques de composants mécaniques devra être entrepris.

Pour l'outil de formalisation des contraintes métier liées au dimensionnement de structures :

- La maquette de l'application doit être finalisée, il s'agira en particulier de préciser le modèle de données pour stocker plus efficacement l'expression des contraintes métier. Actuellement les calculs nécessaires à la simplification de l'expression des contraintes métier suite à la prise en compte de la définition d'une section par exemple, sont à réaliser manuellement. L'idée serait de pouvoir utiliser soit les solveurs de la programmation par contraintes, soit les solveurs de calculs formels pour simplifier ces expressions. Dans ce domaine les travaux de Pierre Alain YVARS [Yvars 2005] apportent des éléments de réponse.

En ce qui concerne l'intégration de ces outils :

- Les éléments de définition géométrique (surfaces fonctionnelles générées lors du dimensionnement des composants « liaisons » et « structures ») doivent être confrontés avec les définitions géométriques résultant d'autres expertises (cf. les travaux de Lionel ROUCOULES sur l'intégration du choix des procédés de fabrication [Roucoules 2007]). Il s'agira ici de définir une sorte d'algèbre de comparaison permettant de mettre en évidence les éléments de définition géométrique communs, ou au contraire disjoints. Ceci afin de faciliter la prise de décision et le consensus sur une définition géométrique commune tout en gardant la trace des choix effectués pour « rejouer » le scénario lors d'éventuels changements nécessitant des retours en arrière dans la processus de développement.

Chapitre 2 Optimisation des procédés de mise en forme

1 Contexte – état de l'art

1.1 Contexte industriel et économique

Le développement et la production de biens manufacturés se sont profondément modifiés au cours de ces dix dernières années. Les grands groupes industriels dans les secteurs de l'énergie et du transport doivent s'adapter sans cesse à un contexte de forte concurrence incluant les puissances économiques émergentes comme la Chine et l'Inde par exemple. La recherche d'une meilleure efficacité conduit ces groupes industriels à un recentrement sur leur cœur de métier. Un nombre croissant de fonctions et de composants d'un produit sont désormais entièrement sous-traités. Les contraintes de coût et de délai de développement nécessitent également de concevoir le produit et les moyens de production simultanément. Ces entreprises sous traitantes subissent ces transformations et doivent s'adapter. Ces phénomènes sont particulièrement marqués dans certains secteurs d'activité comme par exemple la mise en forme de pièces massives par forgeage ou estampage. En effet, la majeure partie des acteurs de l'industrie automobile et aéronautique sous-traite à l'heure actuelle ce type d'opérations. Autrefois rentables sur des pièces de formes simples et pour des grandes séries, les progrès réalisés ces dernières années, au niveau des matériaux et de la maîtrise des procédés de mise en forme, permettent de produire des pièces de formes plus complexes, pour des séries plus modestes à des coûts très compétitifs. Les techniques de production permettant d'obtenir des pièces simples sont maintenant bien maîtrisées par les entreprises sous-traitantes des récents pays européens, voire par les pays émergents, notamment ceux d'Asie. Les entreprises sous-traitantes, s'orientent naturellement vers la mise en forme de pièces complexes à fortes valeurs ajoutées. Afin d'être plus efficace, les entreprises ont segmenté le marché de la mise en forme pour se concentrer sur les spécificités liées à quelques types de composants et de matériaux.

La mise au point du procédé et donc de sa gamme (nombre de frappes, type de presse, etc..) est une tâche complexe, dans laquelle la définition de la géométrie de l'outillage occupe une place centrale. En effet, les donneurs d'ordres fournissent en général, soit la géométrie du composant final, soit parfois une ébauche de géométrie n'incluant pas les spécificités liées au processus de mise en forme (congés, angle de dépouille, etc …). La définition du nombre de frappes, et donc de la forme des différents outillages s'appuie sur des méthodologies empiriques nécessitant une grande expérience du métier de forgeron et nécessite très souvent, une procédure manuelle de type « d'essais – erreurs » longue et donc coûteuse.

Dans ce contexte la simulation des procédés de mise en forme, permettant de mieux préparer les gammes de production, joue un rôle fondamental.

1.2 Contexte scientifique – synthèse

1.2.1 Simulation numérique des procédés

La simulation numérique des procédés de mise en forme adresse de nombreuses disciplines scientifiques en partant des problèmes de caractérisation du comportement des matériaux jusqu'aux états limites, en passant par les problèmes de modélisation et d'identification de lois de comportement multi-physiques pertinentes, jusqu'aux problèmes de simulation numérique des grandes déformations.

En France, de nombreuses équipes de recherche ont investi ce champ de recherches avec des approches différentes pour des domaines applicatifs différents. Ainsi on trouve des travaux traitant de la simulation de l'hydroformage, de la mise en forme de tôles (pliage, emboutissage, découpe et poinçonnage), des opérations de première transformation de produits sidérurgiques (laminage, extrusion, ..) et de la mise en forme de pièce massive (forgeage, estampage).

L'équipe de Jean Claude GELIN [Gelin 2006] du laboratoire FEMTO/MEF de Besançon développe des logiciels de simulation destinés aux procédés d'hydroformage, d'emboutissage et à la mise en forme de pièces de petites tailles pour la fabrication de micro systèmes mécaniques. A l'ENSAM d'Angers l'équipe d'Alain POTIRON traite de la simulation numérique de procédés de pliage et découpage de tôles [Bahloul 2006, Mkaddem 2006] à haute limite d'élasticité (HLE). Le laboratoire Roberval de l'université de Technologie de Compiègne, traite également des problèmes d'emboutissage de tôles mais en abordant l'optimisation du procédé. Par ailleurs, à l'URCA[27], l'équipe de Modélisation Numérique du GMMS a développé des outils numériques pour la simulation du procédé d'emboutissage, et pour la conception et l'optimisation des procédés et des outillages basés sur une approche pseudo-inverse [Dong 2007, Guo 2003, Guo 2004].

L'équipe de Jean Loup CHENOT [Chenot 2006] du CEMEF est spécialisée dans la simulation des procédés de mise en forme par forgeage. En participant activement au projet SIMULFORGE[28], cette équipe a contribué au développement du logiciel FORGE™ largement utilisé par de nombreux industriels. Dans sa version actuelle cet outil permet de rendre compte d'un certain nombre de phénomènes rencontrés lors d'un procédé de mise en forme, comme :

- Le contact / frottement pièce / outillage.
- Les grandes déformations plastiques et viscoplastiques.
- Le comportement thermomécanique des pièces et des outillages.
- L'état de contrainte dans les outillages et dans la pièce.

La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement la mise en forme d'une pièce et ainsi de jouer sur certains paramètres (géométrique, rhéologiques) afin de parfaire la mise au point de la gamme [Mariage 2003]. Cependant les grandes déformations plastiques subies par le matériau engendrent des micros défauts (cavités, fissures), qui se développent et produisent des fissures macroscopiques rendant inutilisables la pièce forgée.

La modélisation de ces défauts macroscopiques et plus généralement de l'endommagement est l'objet des recherches d'une partie de l'ICD-LASMIS depuis plus d'une dizaine d'années. Plusieurs travaux de thèses [Hammi 2000, Lestriez 2003, Mariage 2004] conduits sur ce sujet ont permis de développer les outils de simulation permettant de rendre compte de l'effet de l'endommagement sur le comportement élasto-visco-plastique du matériau. Les effets thermiques ont été pris en compte, aussi bien ceux dus à la température des pièces que ceux induits par les grandes déformations [Lestriez 2003]. Le frottement entre les outils et les pièces est modélisé par des lois de frottement classiques (Tresca, Coulomb, Norton Hoff) déjà disponibles dans les codes généraux de calculs des structures.

L'ensemble de ces travaux est implémenté dans l'environnement du code de calculs ABAQUS™ au travers de routine utilisateurs permettant d'utiliser des lois de comportements spécifiques associées aux techniques adéquates de résolution numérique. Les grandes déformations des pièces et les forts

[27] Université de Reims Champagne Ardenne.
[28] Projet RNTL (2000-2005).

gradients des grandeurs mécaniques nécessitent des remaillages adaptatifs du domaine de calcul, ainsi que le transfert des champs mécaniques lors des opérations de remaillage (cf. figure 33).

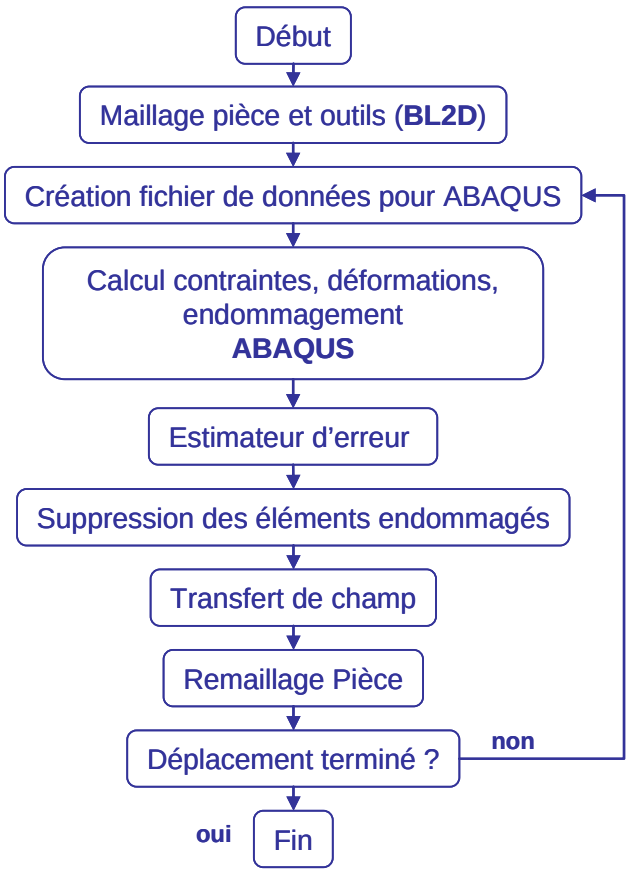


Figure 33 : Organigramme simplifié de l'outil de simulation des procédés de mise en forme développé au LASMIS.

La simulation des procédés de mise en forme et en particulier la mise en forme de pièces massives par forgeage ou estampage est aujourd'hui bien outillée. En effet on trouve :

- Des codes de calculs à vocation industrielle comme FORGE™, dans lesquels le nécessaire compromis, entre un temps de simulation acceptable et la prise en compte détaillée de l'ensemble des phénomènes, impose des approximations.
- Des outils de laboratoire mettant en œuvre des modèles de comportement beaucoup plus développés permettant d'expérimenter et de valider ces modèles. Les outils développés au LASMIS sont bien sûr dans cette catégorie, avec des résultats plus précis au détriment d'un temps de simulation non négligeable.

1.2.2 Définition d'outillages et approche métier

Les travaux sur la simulation du procédé que nous venons de présenter brièvement rendent compte de l'opération de transformation elle-même. Les outils de simulation utilisent comme entrée les caractéristiques du matériau, du procédé (vitesse des outillages, mode de lubrification, ..), la géométrie de la pièce brute avant transformation (lopin) et celle des outillages. Même s'ils fournissent une aide précieuse dans la préparation d'une gamme, la définition de la géométrie de l'outillage reste à la charge du forgeron. Cette opération dite « d'habillage » consiste à définir la géométrie de la pièce forgée (et donc d'une partie de l'outillage) à partir de la géométrie de la pièce finale (souvent usinée et qui sera

montée sur le produit). Cette modification a pour but de rendre compatible la géométrie de la pièce finale avec les contraintes du procédé (ajout de congés, de dépouilles, ..) [Boujut 1993].

Les travaux développés par le laboratoire G-SCOP[29] de Grenoble ont permis d'apporter des éléments de réponse à cette problématique. Ces travaux ont abouti au développement d'un outil « métier » d'habillage automatique de pièces forgées, le logiciel COPEST.

La position du plan de joint et des toiles[30], les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles, sont définies avec des abaques et des tableaux établis par André CHAMOUARD [Chamouard 1964, 1966, 1970] à partir de données expérimentales. Pour la détermination des rayons des congés d'arêtes et de raccordement, un modèle analytique basé sur la méthode des tranches, définissant la contrainte d'écrasement pour un lopin cylindrique à d'abord été introduit [Tichkiewitch 1989]. Une analogie a ensuite été établie, permettant de relier la valeur des rayons de congé à cette contrainte d'écrasement pour des configurations particulières comme l'écrasement, le rétreint et le filage. La section de la pièce à forger est décomposée pour identifier les parties écrasées, rétreintes et filées. Avec l'hypothèse d'un équilibre statique entre la pression de fermeture des outillages et la pression maximale fournie par la presse, les valeurs des rayons sont déterminées pour satisfaire cet équilibre [Boujut 1993].

1.2.3 Optimisation des procédés de mise en forme

Dès lors que les outils de simulation permettent d'obtenir virtuellement la pièce mise en forme, la tentation de l'optimisation est là, légitime, dans l'objectif de minimiser les coûts, les volumes de matières mise en œuvre, l'usure des outils ….

Dans le cas du forgeage, les travaux de Lionel FOURMENT du CEMEF sont certainement les plus significatifs. Au travers de plusieurs travaux de thèse [Balan 1996, Veilledent 1999, Do 2006] l'optimisation des préformes pour le cas des gammes multi passes est abordée. L'objectif étant de déterminer la forme de l'outillage de préforme permettant d'éviter les problèmes de repli de matière. Plusieurs algorithmes ont été utilisés, déterministes (BFGS) et heuristiques (stratégie évolutionnaire). Dans ces travaux la géométrie de l'outillage est décrite avec des courbes polynomiales (B-spline) dont la position des pôles est modifiée par la procédure d'optimisation.

Afin de limiter les temps de calculs, à cause du coût important d'une simulation du procédé, les techniques de méta-modélisation trouvent ici une très bonne application. Dans sa comparaison avec plusieurs techniques d'optimisation, Tien Tho DO [Do 2006] souligne leur efficacité.

2 Problématique et positionnement de nos travaux

Les éléments de synthèse que nous venons de présenter font clairement apparaître la complémentarité des outils de simulation numérique du procédé de mise en forme avec des outils d'habillage automatique comme COPEST. Ce dernier permet de proposer une première ébauche de l'outillage. Mais comme le souligne Alain JEANTET [Jeantet 1998], COPEST fournit une ébauche de l'habillage à partir des données expérimentales d'André CHAMOUARD [Chamouard 1964,1966, 1970] qui sont des valeurs moyennes obtenues à partir d'un grand nombre d'observations. Il est donc nécessaire d'ajuster la géométrie de l'habillage pour parfaire la gamme. On voit ici apparaitre l'utilité d'une procédure d'optimisation paramétrique de l'outillage prenant en compte les paramètres

[29] Laboratoire issu en 2006 d'un groupement de certaines équipes de 3S, GILCO, LAG et Leibniz-Imag, http://www.g-scop.inpg.fr

[30] Mince voile de matière marquant l'emplacement des parties de la pièce qui seront retirées par cisaillage après forgeage. (alésage par exemple).

technologiques (rayons de congés, surépaisseurs, …) de la géométrie. C'est dans cet objectif que se positionnent nos travaux. En utilisant les outils de simulation des procédés développés dans l'ICD-LASMIS, avec la particularité liée à la prise en compte de l'endommagement, nous souhaitons développer une procédure d'optimisation paramétrique de la géométrie des outillages.

Beaucoup de gammes de forgeage industrielles nécessitent l'utilisation d'une préforme, voire de plusieurs pour les pièces complexes. Ce problème reste aujourd'hui largement ouvert même si les tentatives d'optimisation de préformes que nous venons d'évoquer apportent quelques éléments de réponse. Pour cette problématique nous proposerons dans les perspectives de ce chapitre d'autres manières de prendre en compte ces préformes, dans le cadre d'un projet de recherche régional en cours de validation.

3 Propositions et résultats

Les propositions et résultats présentés ici s'inscrivent dans l'objectif d'aller vers une véritable optimisation de la géométrie de l'outillage et des paramètres du procédé en s'appuyant sur les outils de simulation développés dans notre laboratoire.

La figure 34 présente le synoptique de l'environnement en cours de développement dans le cadre des travaux de thèse d'Ibrahim KHOURY. Cette figure met bien en évidence le lien entre la géométrie de la pièce usinée (côté donneur d'ordre) et la géométrie de l'outillage (côté forgeron). Pour l'instant à défaut de procédure adéquate de transfert, les transcriptions des données entre le logiciel d'habillage COPEST et le logiciel de CAO (CATIA V5™) sont manuelles. L'analyse des données fournies par COPEST montre que cette transcription pourra être automatisée.

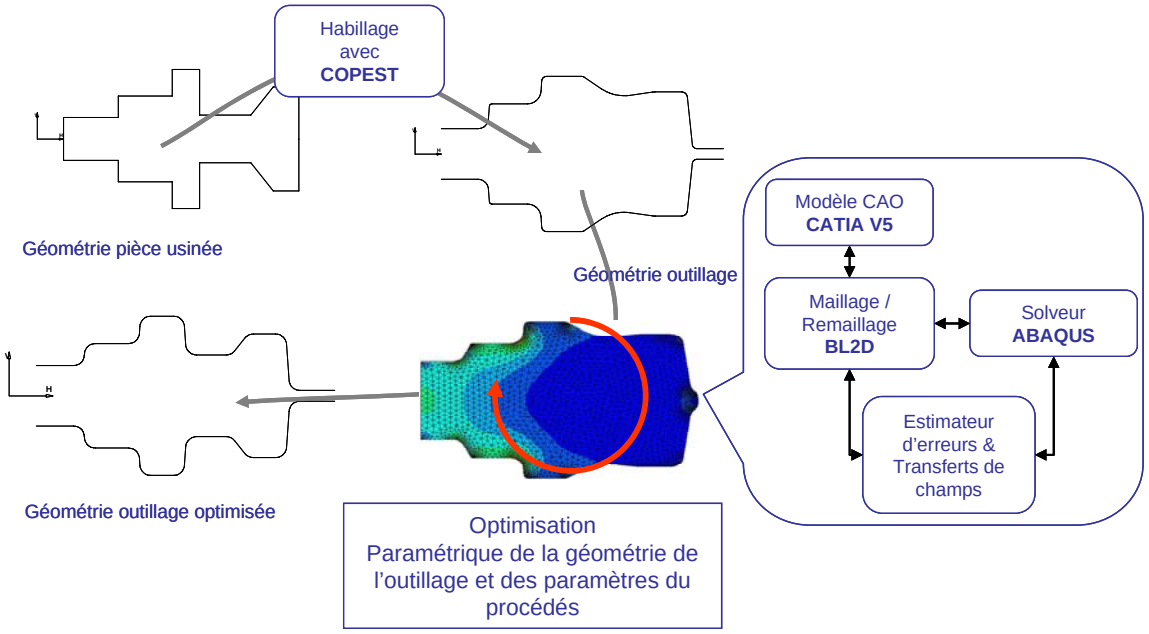


Figure 34 : Synoptique d'un environnement d'optimisation de la géométrie des outillages.

Le problème d'optimisation que nous envisageons consistera à minimiser l'énergie totale de déformation tout en respectant les contraintes liées à l'endommagement et à l'aspect final de la pièce forgée, c'est-à-dire :

- Que l'endommagement maximal dans la pièce reste inférieur à une limite fixée.

- Que cet endommagement ne soit pas situé dans le volume défini par la géométrie de la pièce usinée.
- Que le volume de la pièce usinée soit contenu dans le volume de la pièce forgée (pour éviter les problèmes de cavités).

Les variables du problème d'optimisation sont choisies parmi les paramètres géométriques définissant les dimensions de l'outillage, dont on trouvera un exemple sur la figure 35. On constatera le nombre important de paramètres pour des géométries d'outillages complexes, ce qui peut conduire à des problèmes d'optimisation avec beaucoup de variables.

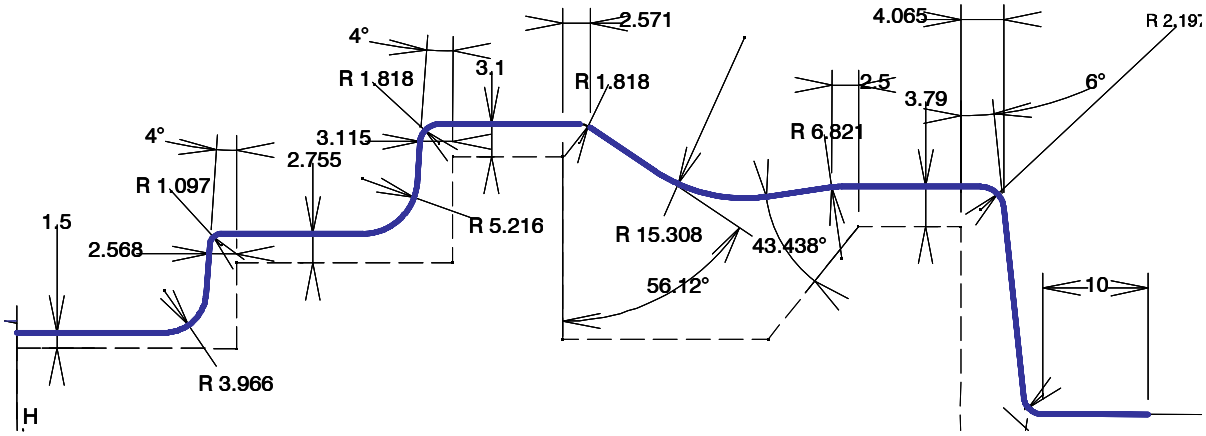


Figure 35 : Exemple de paramétrage d'un outillage dans le logiciel CATIA V5™.

Les travaux réalisés jusqu'à présent ne nous ont pas permis d'aller jusqu'à une réelle optimisation du procédé, mais dans cet objectif nous avons :

- Mis au point des outils d'interface entre le logiciel de maillage et le logiciel de CAO CATIA V5™ afin de gérer la géométrie paramétrée depuis le logiciel de CAO.
- Développé des outils d'analyse de la géométrie de la pièce forgée et des cartographies d'endommagement permettant de statuer sur les zones endommagées par rapport à la géométrie de la pièce usinée. L'objectif étant de détecter l'apparition de pièces défectueuses dans le processus d'optimisation.
- Utilisé des plans d'expériences pour analyser l'influence de certains paramètres géométriques sur l'énergie totale de déformation nécessaire et ainsi identifier ainsi les paramètres pertinents.

L'outil d'analyse de la pièce forgée utilise directement les maillages de la pièce à l'issue de la simulation et celui de la pièce usinée. La comparaison pour des maillages 2D est directe et permet de statuer sur la géométrie de la pièce forgée en vérifiant que le maillage de la pièce usinée est totalement inclus dans celui de la pièce forgée (cf. figure 36). De même la position et la valeur de l'endommagement sont vérifiées.

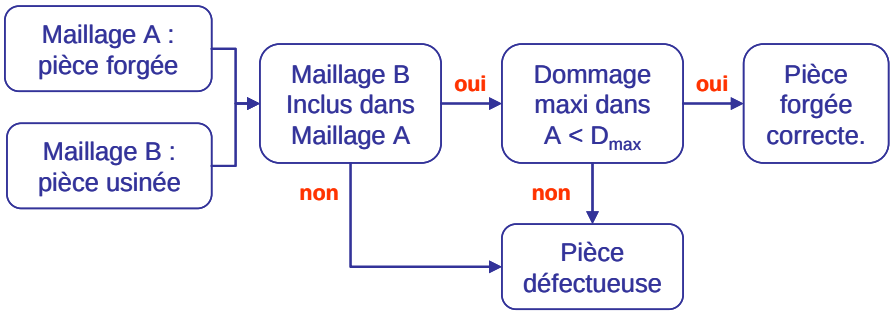


Figure 36 : Procédure de détection de pièce correcte à l'issue de la simulation du procédé.

Les plans d'expériences ont été utilisés pour identifier l'effet de certains paramètres géométriques. Afin d'obtenir des temps de calculs acceptables, les calculs ont été effectués, en parallèle, sur plusieurs stations de travail (jusqu'à 10 simulations simultanées). La figure 37 donne un aperçu global du mode de traitement de ces calculs.

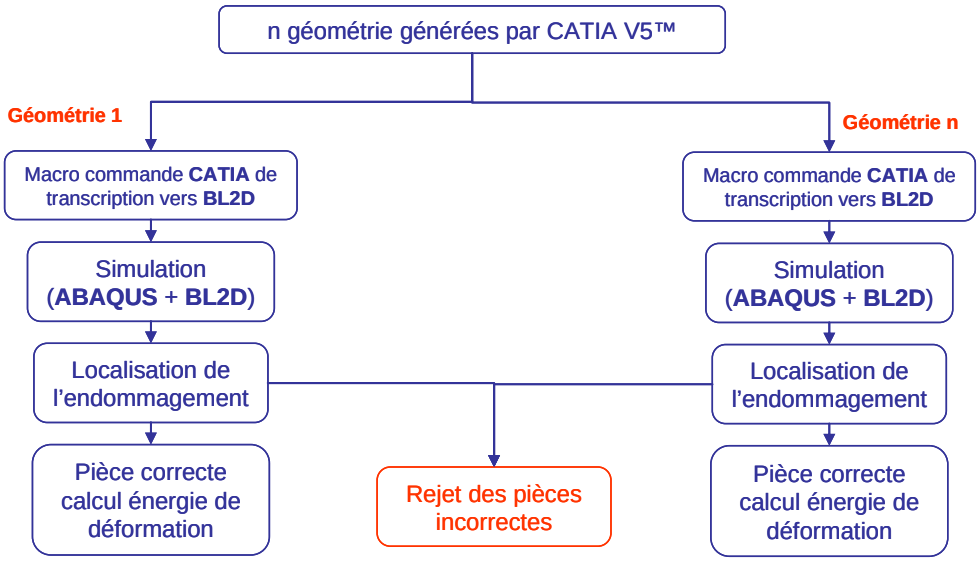


Figure 37 : Synoptique des calculs parallèles pour les plans d'expériences.

La figure 38 montre un exemple de résultat obtenu avec ces plans d'expériences. Elle montre en particulier l'influence de la variation de deux paramètres géométriques sur l'énergie de déformation totale (élastique et plastique) définie par :

$$E_T = \int_0^t \int_V \left(\sigma^c : \dot{\varepsilon}.dV\right).dt$$

σ^c : Tenseur des contraintes de Cauchy.

$\dot{\varepsilon}$: Taux de déformation total (élastique + plastique).

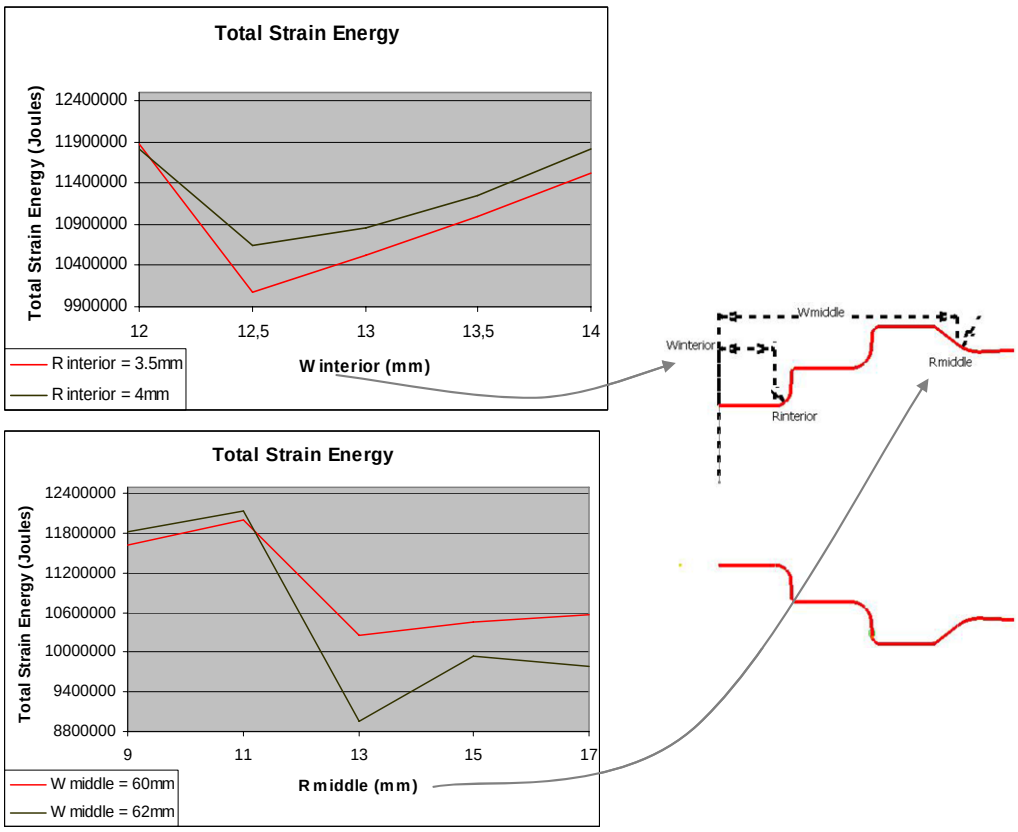


Figure 38 : Exemple de résultats tirés d'un plan d'expériences montrant l'influence de la variation de paramètres géométriques sur l'énergie totale de déformation.

4 Conclusions et principaux apports

Les résultats que nous avons présentés, nous ont permis de consolider les outils de simulation existants au LASMIS et d'y ajouter les éléments permettant d'aller vers une véritable optimisation du procédé. Notre approche comporte deux originalités :

- La prise en compte de l'endommagement dans la simulation du procédé permettant de mieux simuler les phénomènes de fissurations, au prix il est vrai d'un coût supérieur en temps de simulation. Il faut noter ici que dans le cas du forgeage, la prévision de la propagation de la fissure ne nous intéresse pas. Seul le niveau de dommage nous importe, de façon à détecter celui-ci et surtout à situer cet endommagement dans le volume de la pièce.
- La prise en compte d'une géométrie paramétrée avec des paramètres qui ont une signification technologique précise pour le forgeron (rayon de congés, angles de dépouilles, surépaisseurs). Ces paramètres sont aussi un des liens entre la géométrie de la pièce finale (usinée la plupart du temps) et celle de l'outillage. Ils constituent donc un élément important permettant d'assurer une certaine continuité entre les phases de définition de la géométrie de la pièce et celle de son outillage de mise en forme. Ces outils d'optimisation proposeront une solution « optimale » au sens d'un critère mathématique déterminé. Malgré la performance attendue, la solution proposée devra pouvoir être modifiée « manuellement » par le forgeron. Dans ce cas, la présence de ces paramètres, constitue un excellent point d'entrée pour lui. C'est un point important que souligne

Jean François BOUJUT [Boujut 1993] dans les expériences menées lors de l'introduction de COPEST™ chez des forgerons.

5 Perspectives

Les perspectives à court terme concernent l'optimisation paramétrique de la géométrie de l'outillage. Afin de limiter les coûts de calculs, nous utiliserons les techniques de surfaces de réponse pour construire une approximation de la fonction à minimiser. La recherche du minimum sera alors conduite sur cette approximation. Nous pourrons ici nous appuyer sur les travaux de thèse de Thien To DO [Do 2006]. Un nouvel outil logiciel, ModeFrontier™[31] est en cours d'acquisition. Cet outil va nous permettre de gérer efficacement les calculs d'optimisation. Il comporte également un module proposant les techniques classiques de méta-modélisation permettant de générer différentes surfaces de réponse. L'utilisation de ces surfaces de réponse se généralise dans les travaux de recherche sur l'optimisation des procédés où les coûts de simulation sont importants et où l'évaluation des sensibilités est problématique. Le projet européen d'action concertée « COST 526 – APOMAT[32] » a regroupé un certain nombre de travaux dans ce domaine, en particulier ceux du « Work Group 3 » qui traitent de l'optimisation du forgeage. Des conclusions encourageantes ont été tirées des expériences menées avec les techniques d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques couplés à des techniques de surfaces de réponse.

Les perspectives à plus long terme concernent la gestion et l'optimisation des préformes pour les pièces complexes qui s'obtiennent en plusieurs frappes. En partenariat avec l'équipe GMMS[33] de Ying Qiao GUO, nous allons proposer ici une approche différente de celle que nous avons présentée dans le contexte de ce chapitre. Nous souhaitons appliquer les méthodes de simulation « pseudo inverse » développées par le GMMS pour la simulation des procédés d'emboutissage de tôles au cas du forgeage. Cette approche « pseudo inverse » conserve l'avantage de la rapidité des approches inverses classiques et améliore la précision de l'estimation des contraintes. On pourra donc envisager une optimisation plus efficace des préformes. Ces travaux seront normalement conduits dans le cadre du projet de recherche « OPOMEF : Optimisation des Procédés et des Outillages de Mise en Forme » dont j'assumerai la responsabilité. Ce projet a été déposé en septembre 2007 dans le cadre des premiers appels à projet du Contrat de Plan Etat Région (2007-2013) en Champagne Ardenne. Ce projet implique 2 partenaires industriels et 2 partenaires universitaires (UTT / ICD-LASMIS et URCA / GMMS). A ce jour nous attendons les retours d'expertises, qui seront connus dans le courant d'octobre 2007.

[31] http://www.esteco.com.
[32] APOMAT : Automatic Process Optimization in Material Technology (2001-2005), http://www.cost526.de/.
[33] GMMS : Groupe Mécanique, Matériaux Structures, EA 2617, Université de Reims Champagne Ardenne.

Financements de ces travaux :	• Bourse de thèse du conseil régional de Champagne-Ardenne. • Projet européen VRL-KCiP + financement UTT via le conseil scientifique sur projet.
Publications relatives à ces travaux	**Revues : 1** [RI2 2006] **Khoury I., Giraud-Moreau L., Lafon P. & Labergere C.** (2006) *Towards an optimisation of forging processes using geometric parameters.* Journal of Materials Processing Technology, 177(1-3)**,** 224-227. **Conférences : 3 internationales + 1 nationale.** [CI1 2007] **Khoury I., Lafon P., Moreau-Giraud L. & Labergere C.** (2007) *Localisation of damage zones with respect the final part in forging process for different geometric parameters*, paper presented at the 10th ESAFORM Conference on metal forming, Zaragoza, Spain, 18-20 avril 2007. [CI5 2006] **Khoury I., Lafon P., Moreau-Giraud L. & Labergère C.** (2006) *Study of simulation of forming process toward an optimization procedure of the process*, paper presented at the Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble, 17-19 mai 2006. [CI8 2006] **Khoury I., Moreau-Giraud L., Pascal L. & Labergère C.** (2006) *Towards an optimisation of forging process using geometric parameters*, paper presented at the 11th International Conference on metal forming, Birmingham, UK, 11-13 septembre 2006. [CN1 2007] **klein Meyer J. S., Cabannes G., Khoury I., Lafon P., Troussier N., Gidel T. & Roucoules L.** (2007) *Optimisation et robustesse pour la prise de décision dans un contexte de conception intégrée et collaborative*, paper presented at the 18ième Conférence Française de Mécanique, Grenoble, France, 27-31 aout 2007.
Encadrement :	**Thèse : 1 (encadrement à 50%)** **Khoury I.**, *Optimisation et intégration dans le processus de conception des outils de simulation des procédés de mise en forme.* Thèse en codirection avec Laurence MOREAU, soutenance en février 2008.

Chapitre 3 Optimisation des structures et couplage fluide – structure

1 Contexte – état de l'art

Les contraintes d'aménagement du territoire, associées à la nécessité de développement économique des sites touristiques et industriels côtiers poussent les industriels à proposer des structures flottantes de plus en plus ambitieuses. Ces structures flottantes sont conçues soit pour protéger des aménagements portuaires, lorsque la configuration des fonds marins ne permet pas l'usage de structures fixes, soit pour étendre les surfaces utiles en bordures des côtes.

Les structures flottantes de protection des effets de la houle offrent de nombreux avantages par rapport aux structures fixes. Elles sont plus économiques à construire et facilement reconfigurables pour s'adapter aux évolutions des activités portuaires. Bien que d'un usage très ancien[34], leur utilisation s'est beaucoup intensifiée ces dernières années[35]. La difficulté d'établir des similitudes acceptables avec des maquettes à échelle réduite (1/100ième), pour concevoir au mieux ces structures de grande dimension, rend indispensable l'usage de modèle numérique permettant de prévoir les performances de ces structures [Bougis 1996].

Les structures de protection fixes réfléchissent une partie de l'énergie des vagues et absorbent l'autre partie de cette énergie de manière à abriter la zone située derrière elles des effets de la houle. Les structures flottantes ne peuvent pas (ou très peu) absorber l'énergie des vagues, elles réfléchissent une partie de cette énergie tandis que l'autre partie met en mouvement la structure créant ainsi des « anti-vagues » [Foosert 2006]. D'où leur capacité à atténuer la hauteur de la houle sans toutefois pouvoir l'annihiler.

Les concepts de modélisation pouvant s'appliquer à ces structures sont issus des modèles d'interaction fluide - structure développés pour l'étude des navires et des plateformes offshores. [Newman 1977]. Certains principes restent valables (comportement de structures rigides, oscillations harmoniques de petites amplitudes et fluide non visqueux en écoulement non rotationnel), mais il faut tenir compte des contraintes liées à l'environnement qui est de dimensions finies par rapport aux dimensions de ces structures flottantes et de leur forme simple (caisson rectangulaire) pour des raisons économiques.

Il existe de nombreux travaux de recherche visant à étudier le comportement des structures flottantes utilisées comme digue ou brise-lames on en trouvera une synthèse dans [El Chahal 2006]. Les phénomènes de diffraction de la houle (houle réfléchie par la structure), de radiation (houle créée par les oscillations de la structure) et les particularités induites par les dimensions finies du domaine, ont été abordés dans ces travaux. Des modèles analytiques et par éléments finis ont été développés. Des modèles de comportement dynamique de la structure (corps rigide, oscillations harmoniques de petite amplitude) ont été proposés. Afin de rendre compte des effets de l'eau lors des oscillations, ces modèles utilisent des « masses additionnelles » et des coefficients d'amortissement spécifiques.

L'optimisation des digues flottantes n'a pas encore été abordée dans la littérature. Quelques travaux se rapportent à l'optimisation des digues fixes [Ryu 2005, Castillo 2006] mais ne concernent

[34] Projet de protection du port du Havre par M. Thuillard-Froideville en 1884.
[35] Par exemple la digue semi flottante pour étendre la zone d'activité du port de Monaco mise en service en 2002.

pas l'optimisation de la forme et ou de topologie de ces structures et encore moins celle des structures flottantes.

2 Problématique et démarche

Le contexte que nous venons de présenter fait apparaître le manque de travaux dans le domaine de l'optimisation de la forme et de la topologie de digues flottantes. Compte tenu des collaborations que j'entretiens avec l'université Libanaise de Beyrouth, les besoins liés aux projets d'aménagement du port de Beyrouth constituaient un contexte d'application idéal pour développer des outils d'optimisation de digues flottantes.

C'est une problématique complexe, à caractère multidisciplinaire, mêlant des problèmes d'hydrodynamique, d'interaction fluide – structures, et dans une moindre mesure de mécanique des structures. Nous avons commencé par aborder le problème en étudiant les modèles de propagation d'ondes de surface que sont les vagues et la houle pour formuler un problème d'optimisation de structures avec des conditions limites issues de l'interaction fluide – structures indépendantes du temps. Dans cette étape nous avons pu proposer des formulations originales du problème d'optimisation de forme et de la topologie de digues flottantes.

Afin d'évaluer les performances d'une digue flottante nous avons ensuite élaboré un modèle de comportement dynamique. Ce nouveau modèle prend en compte :

- Les effets de diffraction – radiation de la houle.
- Le couplage fluide – structure grâce aux concepts de masses additionnelles et de coefficients d'amortissement spécifiques.
- Les conditions limites imposées par la géographie d'un port.

A partir de ce modèle dynamique, une étude paramétrique nous a permis de mettre en évidence le domaine d'utilisation de ces digues. Finalement, en utilisant ce modèle dynamique nous avons formulé un problème d'optimisation de forme nous permettant de déterminer les dimensions optimales de la digue en fonction des performances (coefficient d'atténuation de la houle) à atteindre.

3 Résultats

Cette partie présente les principaux résultats de ce travail, obtenus dans le cadre de la thèse de Ghassan EL CHAHAL.

3.1 Optimisation topologique et de forme avec un modèle de comportement statique

En utilisant un modèle classique de houle de Stockes non linéaire du second ordre nous avons déterminé l'expression analytique de la pression dynamique due à la houle. La figure 39 montre une répartition typique de cette pression et nous permet de conclure sur l'intérêt d'une digue flottante puisque le pic de pression est situé dans le tiers supérieur de la hauteur d'eau. On notera sur la figure la présence de lignes d'ancrages qui maintiennent en place la digue. Nous avons ensuite formulé plusieurs problèmes d'optimisation de forme et de topologie de la digue en utilisant cette pression issue des effets dynamiques et la pression hydrostatique comme chargement statique sur la structure de la digue.

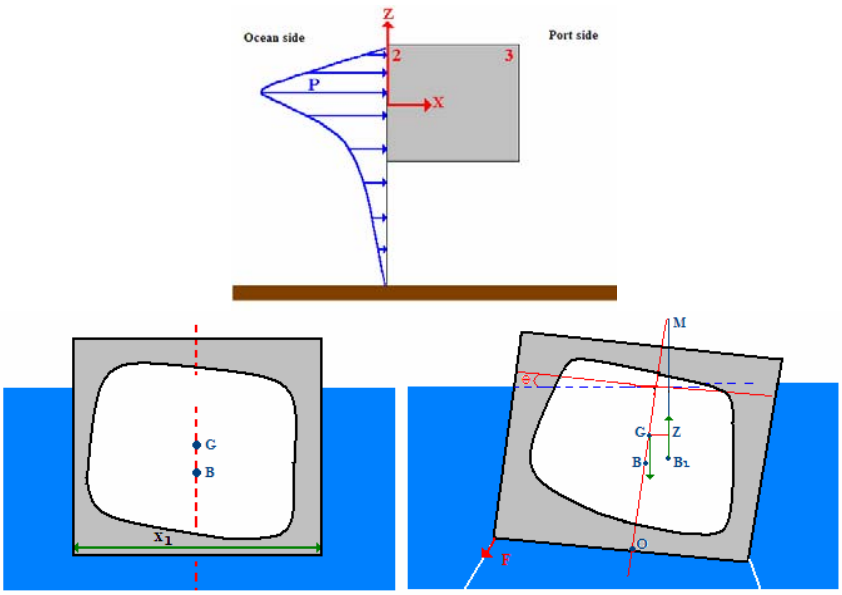


Figure 39 : Allure de la répartition de la pression dynamique due à la houle et ancrage d'une digue flottante.

Pour le cas de l'optimisation de topologie nous avons proposé d'utiliser un maillage relativement grossier pour décrire la distribution de matériau dans la digue. Chaque élément de ce maillage est associé à une variable binaire déterminant la densité de matériau affectée à chaque élément. Le problème d'optimisation se formule alors de la manière suivante :

- Minimiser le poids de la digue

Sous les contraintes :

- Assurer la flottaison
- Assurer la condition de stabilité statique (position du centre de poussée par rapport au centre de gravité)
- Assurer la résistance statique du matériau de la digue.
- Assurer le non basculement sous l'effet de la pression due à la houle.

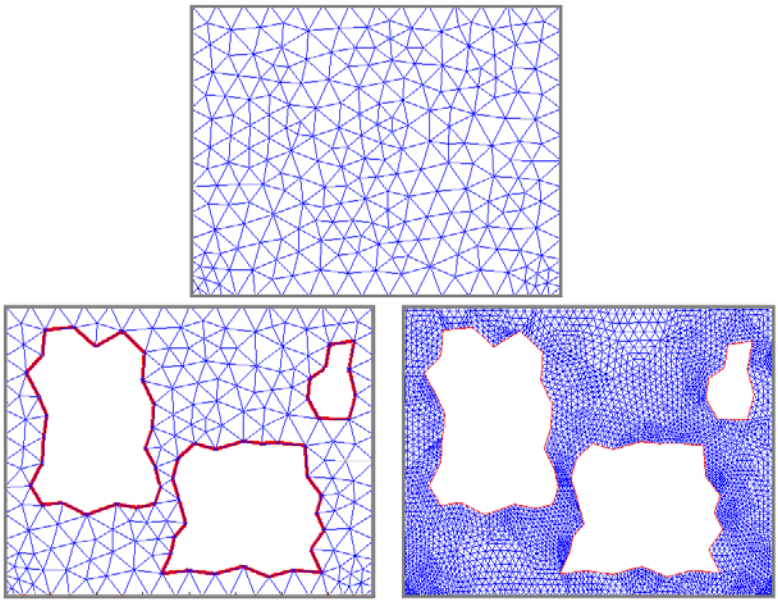


Figure 40 : Optimisation topologique : principe du double maillage.

Ce problème d'optimisation non linéaire en nombre entier, avec 4 fonctions contraintes et comportant autant de variables que d'éléments de maillage (quelques centaines) est résolu efficacement avec un algorithme génétique. On notera sur la figure 40 l'utilisation d'un second maillage, plus fin, pour le calcul du champ des contraintes mécaniques dans le matériau. La figure 41 présente un exemple de résultats.

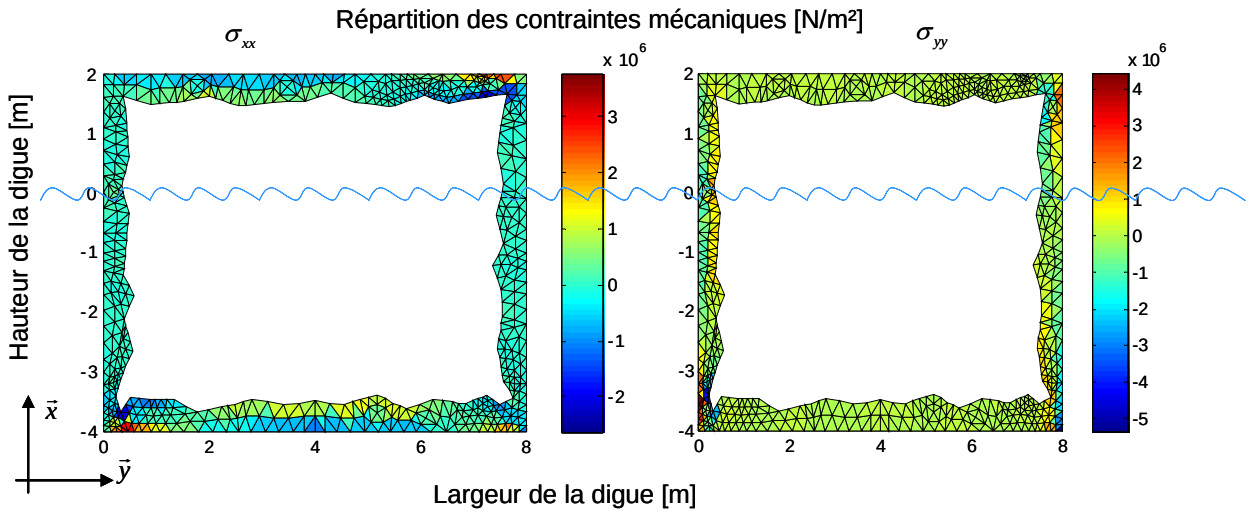


Figure 41 : Exemple de topologie optimale, maillage pour le calcul des contraintes mécaniques et répartition des contraintes.

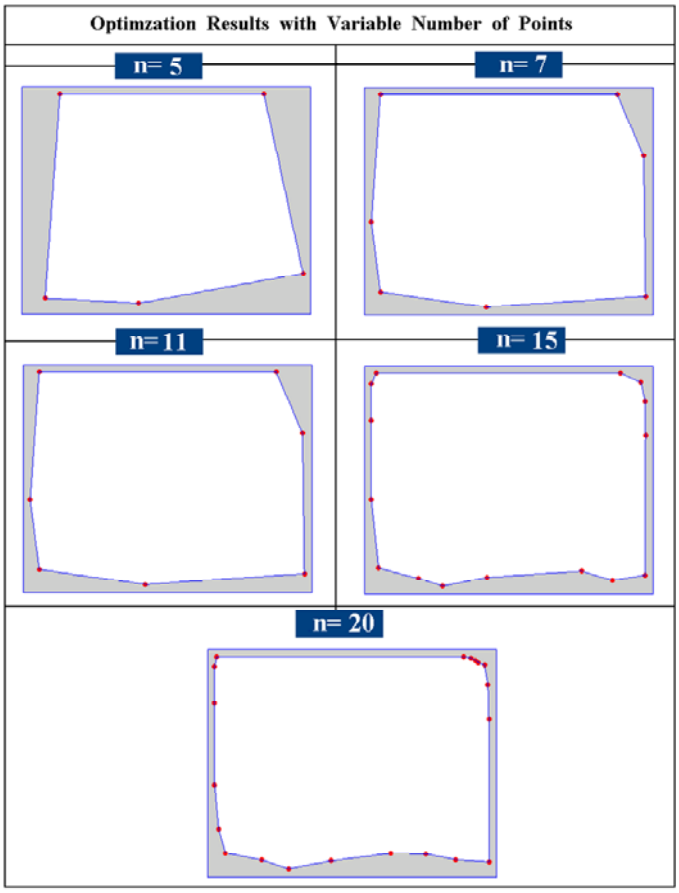
Le problème d'optimisation de forme est traité à partir d'une description particulière de la géométrie de la digue, utilisant un polygone dont le nombre de cotés est variable. Le problème d'optimisation se formule de la même manière que précédemment, sauf pour les variables d'optimisation en nombre plus restreint, puisqu'il s'agit des coordonnées (x, y) des sommets du polygone. Les contraintes mécaniques dans le matériau sont calculées par éléments finis comme précédemment. La figure 42 montre l'évolution de la solution optimale obtenue par un algorithme déterministe de type « SQP » lorsque le nombre de sommets du polygone augmente.

3.2 Formulation d'un modèle de comportement dynamique

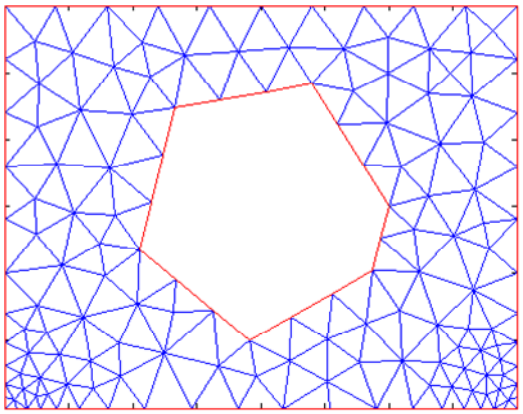
Seule une modélisation du comportement dynamique de la digue permet d'évaluer la performance de la digue, c'est-à-dire le coefficient d'atténuation de la houle (rapport entre la hauteur de la houle coté port et la hauteur de la houle coté mer). Le modèle que nous avons développé est original car il prendre en compte :

- Les effets de diffraction (houle réfléchie par la digue) et de radiation (houle créée par les mouvements de digue).
- Des conditions limites traduisant les limites du domaine fluide (profondeur et limite du port).
- Les effets de l'eau sur le mouvement d'oscillation de la digue au travers des coefficients de masse et de frottement additionnels calculés à partir des efforts hydrodynamiques du potentiel de radiation du champ de vitesse.
- L'équation du mouvement de la digue est formulée après linéarisation autour de la position d'équilibre sous l'hypothèse d'oscillations de petites amplitudes. Le champ du

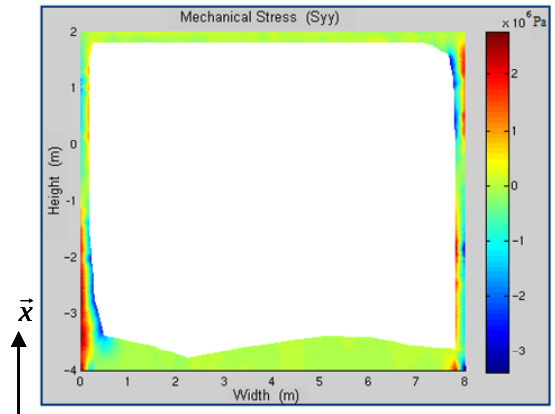
potentiel de vitesse est déterminé numériquement par éléments finis en s'appuyant sur le maillage du domaine fluide présenté sur la figure 43.



Evolution du nombre de points de description



Configuration initiale et maillage



Contraintes mécaniques σ_{yy}

Figure 42 : Optimisation de forme avec description évolutive de la géométrie.

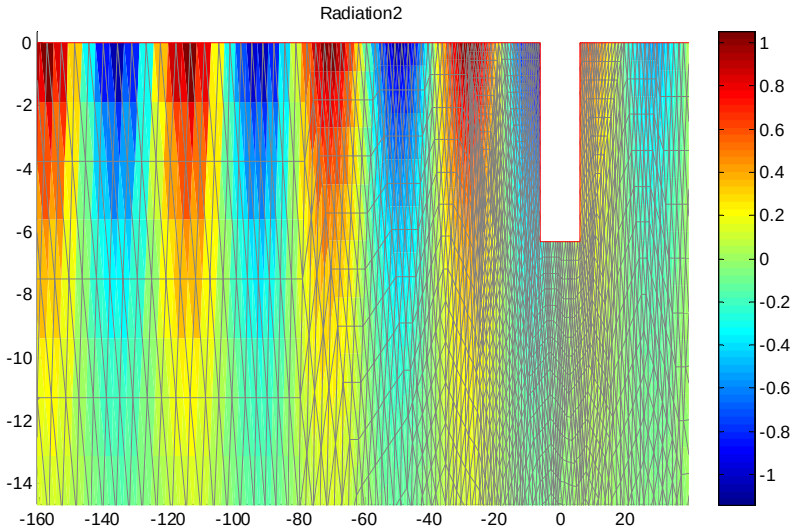


Figure 43 : Maillage (triangle linéaire) du domaine fluide pour le modèle dynamique

La figure 44 présente le synoptique de résolution du modèle pour déterminer le paramètre indicateur de la performance de la digue, le coefficient d'atténuation de la houle. Cette figure met en évidence les paramètres d'entrée suivant :

- Les paramètres structuraux définissant la masse et la forme de la digue ainsi que ceux des lignes d'ancrages
- Les paramètres relatifs à la houle à atténuer.

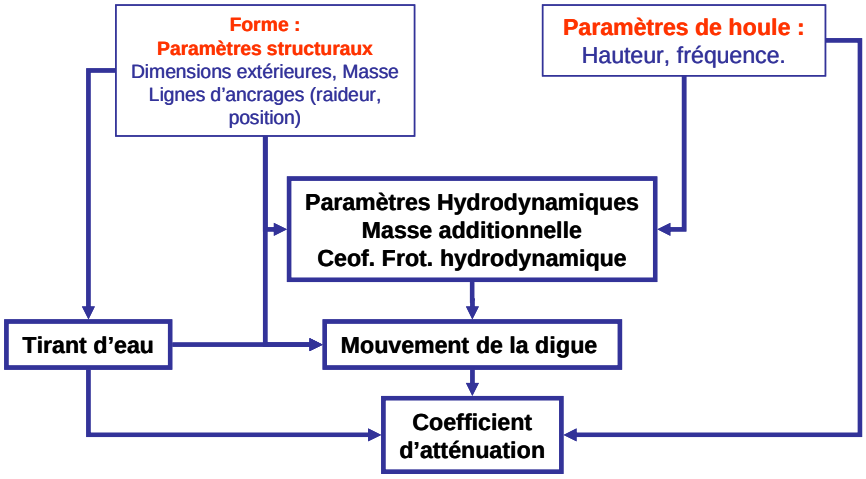


Figure 44 : Synoptique du calcul du coefficient d'atténuation.

A partir de ce modèle de comportement dynamique, une étude paramétrique nous a permis de déterminer l'influence des paramètres d'entrée du modèle sur le coefficient d'atténuation. Les conclusions essentielles que nous en tirons sont :

- Pour une géométrie donnée il existe, pour les lignes d'ancrage, un intervalle de valeur d'angle (10° - 20°) qui produit un pic de résonnance et donc une très mauvaise valeur du coefficient d'atténuation. En effet dans cette situation la digue n'attenue pas la hauteur des vagues mais l'amplifie par effet de résonnance.
- La largeur de la digue joue un rôle important, il existe une plage de valeurs permettant d'obtenir les meilleures performances d'atténuation.

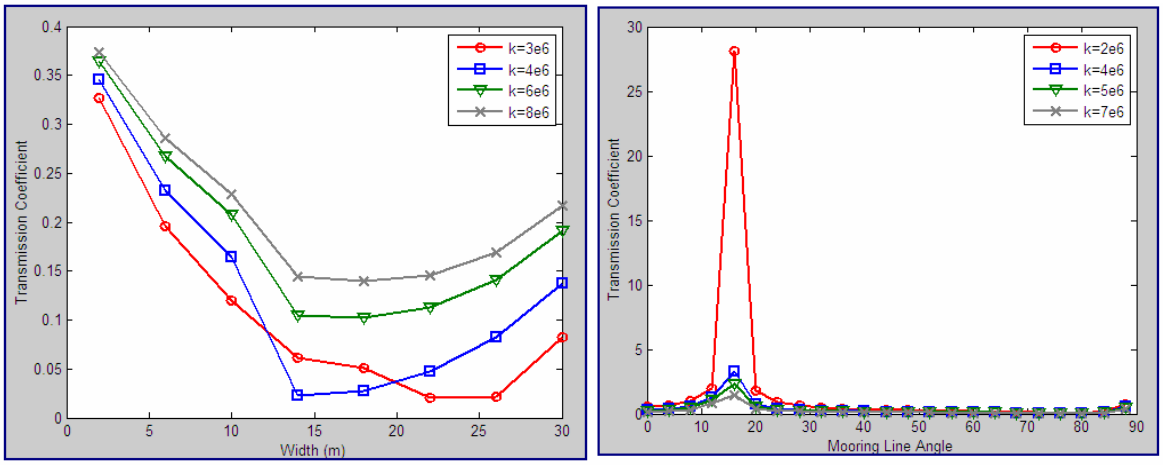


Figure 45 : Etude paramétrique, influence de la largeur de la digue et de l'angle des lignes d'ancrage sur le coefficient d'atténuation.

3.3 Optimisation avec un modèle de comportement dynamique

Les résultats de l'analyse paramétrique montrent l'intérêt d'une optimisation de forme de la digue avec ce modèle de comportement dynamique. Dans cette première approche nous avons envisagé une optimisation de forme s'appuyant sur une description géométrique simple définie par la figure 46. Par conséquent le problème d'optimisation s'écrira avec les 6 variables $x = \{x_1, \ldots, x_6\}^T$ de la figure 46. Pour chaque « évaluation » du problème deux analyses éléments finis sont requises, l'une pour déterminer le potentiel de vitesse dans le fluide et l'autre pour déterminer les contraintes mécaniques dans la structure de la digue.

Le problème d'optimisation que nous avons formulé consiste à :

- Minimiser la masse de la digue sous les contraintes suivantes :

Sous les fonctions contraintes :

- Condition de flottaison de la digue.
- Condition d'équilibre (position du centre de poussée par rapport au centre de gravité).
- Limite sur la hauteur maximale de la houle côté port.
- Limite sur les contraintes maximales du matériau de la digue.

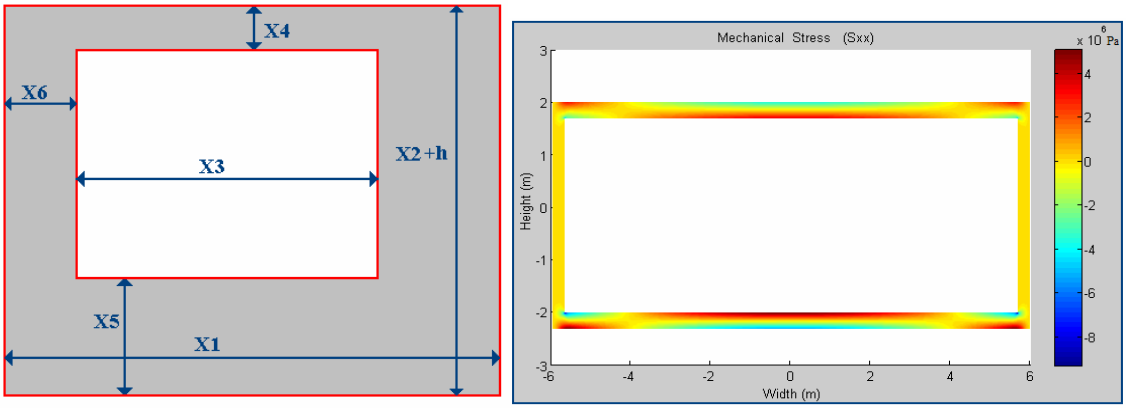


Figure 46 : Optimisation de forme à partir du modèle de comportement dynamique : description géométrique et solution optimale (pour le béton et une hauteur de houle de 2m).

Comme nous l'avons vu dans l'étude paramétrique la largeur de la digue joue un rôle important, plus celle-ci est importante meilleur sera le coefficient d'atténuation. Pour des hauteurs de houle importantes (> 2m), l'obtention d'un bon coefficient d'atténuation (<0.1) nécessite des largeurs importantes. Dans ce cas de figure le problème d'optimisation n'admet pas de solution car la limite de résistance du matériau est atteinte avant que la limite sur la hauteur maximale de la houle ne soit satisfaite. Il faut alors envisager un autre matériau pour la digue, comme par exemple les matériaux composites époxy / fibre de verre qui offrent une meilleure résistance mécanique que le béton, mais sont plus onéreux.

4 Conclusions et principaux apports

A partir d'un modèle de houle de Stockes nous avons établi l'expression analytique de la pression dynamique. Nous avons ensuite utilisé cette pression dynamique comme condition limite dans un problème d'optimisation de forme et de topologie. Deux idées originales ont été proposées pour mettre en œuvre cette optimisation, l'une basée sur un double maillage avec un maillage plus grossier servant à l'optimisation, tandis qu'un second maillage plus fin est utilisé pour le calcul des contraintes

mécaniques. La seconde idée utilise une description géométrique avec un polygone dont le nombre de côtés varie et augmente au fur et à mesure des calculs d'optimisation.

Bien qu'intéressant, les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants car un modèle de comportement statique ne permet pas de traduire le phénomène d'atténuation de la houle. Seul un modèle dynamique est capable d'en rendre compte. Le modèle dynamique que nous avons proposé représente une avancée car c'est le premier qui prend en compte les effets de diffraction, dans un domaine fluide de dimension finie et des effets de l'eau sur le mouvement de la digue. Ce modèle est résolu par éléments finis en utilisant la boîte à outil « PDE Tools » de MATLAB™. Nous avons ensuite conduit une étude paramétrique pour identifier l'opportunité d'optimiser la géométrie. Le modèle dynamique que nous avons développé constitue sans doute l'apport scientifique le plus significatif de ce travail.

5 Perspectives

A court terme les perspectives de ce travail concernent :

- L'optimisation de forme et/ou de topologie avec le modèle dynamique. Cette optimisation pourra s'envisager dans un premier temps dans le cas d'un modèle bidimensionnel. Il faudra toutefois considérer un modèle tridimensionnel afin de rendre compte plus précisément de l'interaction avec le port. Ces modèles devront limiter la forme de la digue au cas des formes parallélépipédiques car cela simplifie grandement les calculs du potentiel de vitesse (pas d'interaction due aux formes complexes, des vagues diffractés entre elles).
- L'optimisation du positionnement de la digue dans l'espace du port. En utilisant le modèle dynamique que nous avons développé nous avons fait quelques essais qui montrent qu'il serait intéressant de rechercher le meilleur emplacement de la digue compte tenu d'une géométrie du port.

Financements de ces travaux :	• Financement de l'APEC (Arabian Petroleum Company) + bourse CNOUS.
Publications relatives à ces travaux	**Revues : 1** [RI4 2006] **El Chahal G., Lafon P. & Younes R.** (2006) *Shape and Material Optimization of a 2D Vertical Floating Breakwater.* WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS, 1(5)**,** 355-362. **Conférences : 5 internationales.** [CI3 2007] **El Chahal G., Lafon P. & Younes R.** (2007) *Modelling and Optimizing Floating Breakwaters Using Density Distribution*, paper presented at the ISOPE, Lisbon, Portugal. [CI4 2007] **El Chahal G., Younes R. & Lafon P.** (2007) *Numerical modelling of floating breakwater and shape optimization using a nonlinear programming method*, paper presented at the ASME 26th International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, San Diego, USA. [CI7 2006] **El Chahal G., Lafon P. & Younes R.** (2006) *Modelling the induced wave pressure on breakwater*, paper presented at the 17th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, Montreal, Canada, May 24-26. [CI10 2006] **El Chahal G., Younes R. & Lafon P.** (2006) *Wave interaction with fixed and floating vertical breakwater based on analytical modelling*, paper presented at

		the ASME Joint U.S.-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, Miami USA, July 17-20.
	[CI11 2006]	**El Chahal G., Lafon P. & Younes R.** (2006) *Analytical modelling and Shape optimization of a floating brakewater*, paper presented at the 4th IASME / WSEAS Int. Conf. on FLUID MECHANICS and AERODYNAMICS, Elounda, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, August 21-23.
Encadrement :	**Thèse : 1 (encadrement à 50%)**	**El Chahal G.**, *Optimisation d'une frontière pour les problèmes d'écoulement - application à la modélisation d'un brise-lame.* Thèse en codirection avec Rafic YOUNES de l'université Libanaise de Beyrouth, soutenance prévue en décembre 2007.
Articles soumis :		**El Chahal G., Younes R. & Lafon P.**, *Comparing different methods for topology and shape optimization of floating breakwaters.*, soumis en avril 2007 à Structural Engineering Optimization, actuellement en révision. **El Chahal G., Younes R. & Lafon P.**, *Parametrical Analysis of a Moored Floating Breakwater with a Partial Reflective Sidewall.*, soumis en juillet 2007 à Ocean Engineering (http://ees.elsevier.com/oe/). **El Chahal G., Younes R. & Lafon P.**, *Multidisciplinary Optimization of a Moored Rectangular Floating Breakwater.* , soumis en juillet 2007 à Applied Ocean Research (http://ees.elsevier.com/apor/).

Conclusions

J'ai présenté dans ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches l'ensemble des travaux de recherche conduits à l'université de technologie de Troyes. Articulés autour du thème central des méthodes de dimensionnement et de l'optimisation en mécanique, mes travaux se déclinent dans trois domaines d'application.

Le premier d'entre eux concerne la spécification de méthodes et d'outils pour la conception intégrée. De cette problématique complexe, à caractère multidisciplinaire, j'ai pu proposer, en me limitant au cas des systèmes de transmission de puissance, des démarches et des outils opérationnels. Je tiens à souligner que, certaines démarches (formulation d'un problème d'optimisation à partir d'un modèle de dimensionnement, principe des composants technologiques) revêtent un caractère générique et peuvent s'appliquer à d'autres situations que celle des systèmes de transmission de puissance. Ces démarches et ces outils donnent des résultats mais n'ont pas été encore validés de manière globale, dans un contexte industriel. Il s'agit d'une difficulté intrinsèque à ce domaine de recherche, à la frontière des disciplines du génie mécanique, du génie informatique, avec des implications organisationnelles et sociologiques, dont une partie des résultats prend la forme de propositions. En effet les hypothèses de notre travail (i.e. le modèle de processus de développement, les schémas collaboratifs), bien que tirées d'un contexte industriel, simplifient nécessairement une réalité très complexe. Cette validation ne peut être réalisée qu'en étroite collaboration avec un partenaire industriel prêt à investir des ressources humaines et du temps pour transplanter ces démarches et ces outils dans son contexte. Ce serait là une expérience très riche d'enseignements.

L'application à l'optimisation des procédés de mise en forme présentée dans le second chapitre de cette synthèse, nous a permis de consolider les outils de simulation existant et de proposer des outils de plans d'expériences pour quantifier l'influence des paramètres géométriques de l'outillage. Ces travaux constituent une première approche de cette problématique, ils vont se poursuivre dans le cadre du projet « OPOMEF » en cours de validation. Je souhaite pouvoir renforcer la synergie déjà existante entre l'ICD-LASMIS et le GMMS, synergie initiée lors du précédent Contrat de Projet Etat-Région. La spécificité du tissu industriel régional, qui concentre 30% des activités de mise en forme du marché national représente une réelle opportunité qu'il faudra savoir exploiter pour mieux valoriser les futurs résultats de ces travaux.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté l'application relative à l'optimisation de structure avec un couplage fluide – structure. Ces travaux m'ont permis de découvrir le domaine d'application (les structures de protection des effets de la houle) et la modélisation de la houle. J'en tire une expérience très positive, qui confirme que dans le domaine de l'optimisation, l'aspect de plus important reste la formulation du problème d'optimisation et que finalement, les réflexes développés sur les applications aux systèmes mécaniques se transposent assez bien à d'autres domaines.

Perspectives et projets de recherche

Les perspectives relatives aux domaines d'application que nous avons présentées ont été développées dans chacun des trois chapitres de cette synthèse. Elles ne seront pas reprises ici. Je souhaite évoquer dans ce paragraphe les perspectives relatives aux travaux déjà initiés où qui seront développés en liaison avec des projets déposés ou des travaux de thèse en cours dans le laboratoire.

Nous avons, dans le premier chapitre de cette synthèse, présenté la démarche de formulation d'un problème d'optimisation à partir d'un modèle de dimensionnement de composant technologique « liaison ». Cette démarche est générale, elle n'est pas liée à un domaine d'application. Une partie des travaux de Lionel ROUCOULES [Roucoules 2007], notamment ceux réalisés dans le cadre de la thèse Jean-Sébastien KLEIN MEYER [Klein Meyer 2007] consiste à formaliser le passage des fonctions techniques d'un produit aux premiers éléments de technologies en utilisant les principes physiques choisis par le concepteur. Ces principes physiques s'appuient sur les lois élémentaires de la physique. La formulation de ces lois fait apparaitre des paramètres (efforts, vitesses, intensités de courant électrique, module d'élasticité de matériaux, …) et des relations entre ces paramètres. Le modèle « FPPT : Fonction Principe Physique Technologie » proposé, permet alors d'obtenir une première évaluation du comportement du produit, à condition que les valeurs de ces paramètres soient fixées. Les travaux réalisés jusqu'à présent permettent d'établir des cartographies montrant l'évolution d'un paramètre en fonction de deux autres paramètres, choisis par le concepteur. La démarche de formulation d'optimisation que nous avons proposée trouve ici une application directe permettant d'obtenir une solution (ensemble de valeurs des paramètres) moyennant le choix d'un critère d'optimisation. Ces travaux s'insèrent dans un projet de « Plan Pluri Formation » entre l'équipe ODIC de l'UTC et l'ICD-LASMIS. Déposé en 2006 auprès du ministère de la recherche en même temps que les contrats quadriennaux des établissements concernés, ce projet s'intitule « Robustesse Projet-Process-Produit ». Dans ce projet, les aspects relatifs au comportement du produit comportent une dimension supplémentaire, celle de l'évaluation de la robustesse des performances du produit en regard des variabilités inévitables des paramètres qui décrivent ce produit. La performance du produit pouvant être quantifiée avec les modèles de comportement proposés plus haut ou à partir de méta-modélisations (surfaces de réponse) issues d'expérimentation ou d'analyses plus complexes (éléments finis). L'optimisation multidisciplinaire devrait fournir ici des réponses aux problèmes liés à l'évaluation de cette robustesse.

Concernant l'optimisation des procédés de mise en forme que nous avons évoquée dans le second chapitre de notre synthèse, le projet européen PRO-ENG apportera une dimension supplémentaire à ces travaux. Ce projet financé par OSEO-ANVAR, a été déposé en octobre 2007 suite aux appels à projet européen du réseau ERA-NET MANUNET. Il concerne l'optimisation des procédés d'obtention de roues dentées de forte capacité, forgées à chaud. Dans ce projet les outils de simulation des procédés de mise en forme seront associés à des démarches expérimentales permettant de mieux caractériser l'état de la microstructure du matériau ainsi que les contraintes résiduelles introduites par le procédé. L'objectif étant de mieux contrôler les défauts dus aux déformations des dentures obtenues à la fin du processus. L'ICD-LASMIS présente un savoir faire certain dans l'ingénierie de précontraintes, c'est un aspect important qui a beaucoup d'influence sur la durée de vie. Il sera donc pertinent de le prendre en compte dans la formulation du problème d'optimisation.

Bibliographie

Bibliographie

[AFAV 1989] **AFAV** (1989) *Association Française pour l'Analyse de la Valeur. Exprimer le besoin, applications de la démarche fonctionnelle,* (AFNOR).

[Agatonovic 1985] **Agatonovic P.** (1985) *Beam model of bolted flanged connections.* Engineering Computations (Swansea, Wales), 2(1)**,** 21-29.

[Alkatan 2005] **Alkatan F.** (2005) *Modélisation des raideurs des assemblages par éléments filetés précontraints.* Thèse doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Allaire 2007] **Allaire G.** (2007) *Conception optimale de structures,* (Springer).

[Altshuller 1979] **Altshuller G. S.** (1979) *Creativity as an exact science. The theory of the solution of inventive problems,* (Gordon and Breach Science Publishers).

[Arabshahi 1991] **Arabshahi S., Barton D. C. & Shaw N. K.** (1991) *Towards integrated design and analysis.* Finite Elements in Analysis and Design, 9(4)**,** 271-293.

[Armstrong 1996] **Armstrong C. G., Donaghy R. J. & Bridgett S. J.** (1996) *Derivation of Appropriate Idealisations in Finite Element Modelling*, paper presented at the The Third International Conference on Computational Structures Technology, Budapest, 21-23 august.

[Artobolevski 1976] **Artobolevski I.** (1976) *Les mécanismes dans la technique moderne, vol 1,2,3,4,* (Moscou).

[Aublin 1998] **Aublin M.** (1998) *Systèmes mécaniques : théorie et dimensionnement,* (Paris, Dunod).

[Bäck 1996] **Bäck T.** (1996) *Evolutionary algorithm in theory and practice,* (New York, Oxford University Press).

[Bahloul 2006] **Bahloul R., Mkaddem A., Dal Santo P. & Potiron A.** (2006) *Sheet metal bending optimisation using response surface method, numerical simulation and design of experiments.* International Journal of Mechanical Sciences, 48(9)**,** 991-1003.

[Balan 1996] **Balan T.** (1996) *Optimisation de forme des outils de forgeage par methode inverse.* Thèse de doctorat : sciences appliquées, Ecole nationale supérieure des mines.

[Barichard 2003] **Barichard V.** (2003) *Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs.* Thèse doctorat : informatique, Université d'Angers.

[Batoz 1995] **Batoz J., L.** (1995) *Modélisation des structures par éléments finis,* (Hérmes).

[Benamara 1999] **Benamara A.** (1999) *Contribution à l'intégration du calcul dans un processus de conception fonctionnelle.* Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes, Université de Valenciennes.

[Bertsekas 2003] **Bertsekas D. P., Ozdaglar A. E. & Nedic A.** (2003) *Convex analysis and optimization,* (Belmont (Masson) : Athena Scientific).

[Bougis 1996] **Bougis j.** (1996) *Modélisation numérique du comportement d'atténuateurs de houles flottants sur un site côtier*, paper presented at the Génie civil - Génie Côtier, IVème journées nationales, Dinard (France).

[Boujut 1993] **Boujut J.-F.** (1993) *Un exemple d'intégration des fonctions métier dans les systèmes de CAO : la conception de pièces forgées tridimensionnelles.* Thèse de doctorat : mécanique, Institut national polytechnique de Grenoble.

[Broyden 1970] **Broyden C. G.** (1970) *The convergence of a class of double-rank minimization algorithms parts I and II.* J. Inst. Maths Applics**,** 76-90, 222-231.

[Carroll 1989] **Carroll R. K. & Johnson G. E.** (1989) *Dimensionless solution to the optimal design of spur gear sets.* Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 111(2)**,** 290-296.

[Castillo 2006] **Castillo C., Minguez R., Castillo E. & Losada M. A.** (2006) *An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters.* Coastal Engineering, 53(1)**,** 1-25.

[Cavallucci 1999] **Cavallucci D.** (1999) *Contribution à la conception de nouveaux systèmes mécaniques par intégration méthodologique.* Thèse de doctorat : sciences et techniques, Université de Strasbourg I.

[Chamouard 1964] **Chamouard A.** (1964) *Estampage et forge : Tome 1, Statique appliquée aux déformations à chaud,* (Paris, Dunod).

[Chamouard 1966] **Chamouard A.** (1966) *Estampage et forge : Tome 2, Dynamique appliquée aux déformations à chaud par forgeage, filage et matricage,* (Paris, Dunod).

[Chamouard 1970] **Chamouard A.** (1970) *Estampage et forge : Tome 3, Technologie générale et forge,* (Paris, Compagnie Française d'édition).

[Charles 2005] **Charles S.** (2005) *Gestion Intégrée des données CAO et EF : Contribution à la liaison entre conception mécanique et calcul de structures.* Thèse de doctorat : conception mécanique et ingénierie simultanée, Université de Technologie de Troyes.

[Chenot 2006] **Chenot J. L. & Massoni E.** (2006) *Finite element modelling and control of new metal forming processes.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(11 SPEC. ISS.)**,** 1194-1200.

[Constant 1996] **Constant D.** (1996) *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques.* Thèse de doctorat : sciences appliquées, Université Joseph Fourrier, Grenoble.

[Daidié 1996] **Daidié A.** (1996) *Réalisation d'un logiciel de conception automatique appliqué à la détermination des engrenages cylindriques : interfaçage avec un logiciel industriel de C.A.O.* Thèse de doctorat : génie mécanique, Institut des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Das 1998] **Das I. & Dennis J. E.** (1998) *Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems.* SIAM Journal on Optimization, 8(3)**,** 631-657.

[Deb 2002] **Deb K., Pratap A., Agarwal S. & Meyarivan T.** (2002) *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.* IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182-197.

[Deneux 2002] **Deneux D.** (2002) *Méthodes et modèles pour la conception concourante.* Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

[Do 2006] **Do T.-T.** (2006) *Optimisation de forme en forgeage 3D.* Thèse de doctorat : mécanique numérique, Ecole nationale supérieure des mines.

[Donaghy 2000] **Donaghy R. J., Armstrong C. G. & Price M. A.** (2000) *Dimensional reduction of surface models for analysis.* Engineering with Computers, 16(1), 24-35.

[Dong 2007] **Dong M., Debray K., Guo Y. Q. & Shan J. L.** (2007) *Design and optimization of addendum surfaces in sheet metal forming process.* International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 8(4), 211-222.

[Dubbel 1994] **Dubbel H., Beitz W. & Küttner K.-H.** (1994) *Handbook of Mechanical Engineering,* (Springer-Verlag).

[Dupinet 1991] **Dupinet E.** (1991) *Contribution à l'étude d'un système informatique d'aide à la conception de produits mécaniques.* Thèse de doctorat : sciences appliquées, Ecole centrale de Paris.

[El Chahal 2006] **El Chahal G., Lafon P. & Younes R.** (2006) *Shape and Material Optimization of a 2D Vertical Floating Breakwater.* WSEAS TRANSACTIONS on FLUID MECHANICS, 1(5), 355-362.

[Errichello 1991] **Errichello R.** (1991) *Rational procedure for designing minimum-weight gears.* Gear Technology, 8(6), 10-14.

[Eschenauer 2001] **Eschenauer H. A. & Olhoff N.** (2001) *Topology optimization of continuum structures: A review.* Applied Mechanics Reviews, 54(4), 331-389.

[Eynard 2005] **Eynard B.** (2005) *Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée.* Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne.

[Fares 2006] **Fares Y.** (2006) *Dimensionnement en fatigue des assemblages boulonnés à l'aide de critères de fatigue multiaxiale.* Thèse doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Fauroux 1999] **Fauroux J.-C.** (1999) *Conception optimale de structures cinématiques tridimensionnelles. Application aux mécanismes de transmission en rotation.* Thèse de doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Fine 2001] **Fine L.** (2001) *Processus et méthodes d'adaptation et d'idéalisation de modèles dédiés à l'analyse de structures mécaniques.* Thèse de doctorat : mécanique et énergétique, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Fonseca(a) 1998] **Fonseca C. M. & Fleming P. J.** (1998) *Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms - Part I: A unified formulation.* IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans., 28(1)**,** 26-37.

[Fonseca(b) 1998] **Fonseca C. M. & Fleming P. J.** (1998) *Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms - Part II: Application example.* IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans., 28(1)**,** 38-47.

[Foosert 2006] **Foosert M. W.** (2006) *Floating Breakwater : A Theoretical study of a dynamic wave attenuating system.* Master thesis, Delft University of Technology.

[Gelin 2006] **Gelin J. C., Labergère C. & Thibaud S.** (2006) *Modelling and process control for the hydroforming of metallic liners used for hydrogen storage.* Journal of Materials Processing Technology, 177(1-3)**,** 697-700.

[George 1991] **George P., Louis** (1991) *Génération Automatique de maillage. Applications aux méthodes d'éléments finis.,* (Elsevier-Masson).

[George 2001] **George P., Louis** (2001) *Maillage et adaptation* (Paris, Hermes).

[Gill 2005] **Gill P. E., Murray W. & Saunders M. A.** (2005) *SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization.* SIAM Review, 47(1)**,** 99-131.

[Girard 2005] **Girard P.** (2005) *La conception : satisfaction des spécifications vs conduite des activités humaines*, paper presented at the 17ième Congrés Français de Mécanique, Troyes, 29 août - 2 septembre.

[Giraud Moreau 1999] **Giraud Moreau L.** (1999) *Optimisation des systèmes mécaniques : couplage de méthodes déterministes et évolutionnaires pour les problèmes en variables mixtes.* Thèse de doctorat : sciences mécaniques pour l'ingénieur, Université de technologie de Troyes.

[Glover 1986] **Glover F.** (1986) *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence.* Computers and Operations Research, 13(5)**,** 533-549.

[Goldberg 1989] **Goldberg D. E.** (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.*

[Gondran 1995] **Gondran M. & Minoux M.** (1995) *Graphes et algorithmes,* (Eyrolles).

[Guillot 1987] **Guillot J.** (1987) *Méthodologie de définition des ensembles mécaniques en conception assistée par ordinateur : recherche des solutions optimales.* Doctorat d'état : sciences appliquées, Université Paul Sabatier, Toulouse 3.

[Guillot 1993] **Guillot J.** (1993) *Assemblages par éléments filetés : Modélisation et calcul.* Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, BM(5563)**,** 1-10.

[Guo 2004] **Guo Y. Q., Li Y. M., Bogard F. & Debray K.** (2004) *An efficient pseudo-inverse approach for damage modeling in the sheet forming process.* Journal of Materials Processing Technology, 151(1-3 SPEC. ISS.)**,** 88-97.

[Guo 2003] **Guo Y. Q., Naceur H., Debray K. & Bogard F.** (2003) *Initial solution estimation to speed up inverse approach in stamping modeling.* Engineering Computations (Swansea, Wales), 20(7-8)**,** 810-834.

[Hammi 2000] **Hammi Y.** (2000) *Simulation numérique de l'endommagement dans les procédés de mise en forme* Thèse de doctorat : sciences mécaniques pour l'ingénieur Université de technologie de Troyes.

[Helary 2000] **Helary O.** (2000) *Conception intégrée : prédimensionnement en environnement imprécis.* Thèse doctorat : sciences et techniques, Ecole Central de Nantes.

[Henriot 1999] **Henriot G.** (1999) *Engrenages, conception, Fabrication, Contrôle.,* (7ième edn) (Dunod).

[Hernot 1998] **Hernot X.** (1998) *Modélisation des arbres et des paliers à roulements en vue de l'optimisation de l'ensemble arbre-paliers.* Thèse de doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Hernot 1995] **Hernot X., Daidie A., Silberberg Y. & Guillot J.** (1995) *Conception integree de mecanismes; Integrated design of mechanisms.* Rev int CFAO inform graph, 10(1-2)**,** 57-70.

[Holland 1975] **Holland J. H.** (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems,* (Ann. Arbor : the University of Michigan Press).

[Hsu 1997] **Hsu Y. L. & Wilde D. J.** (1997) *Notes on monotonicity principles.* Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 119(2)**,** 327-330.

[Huband 2006] **Huband S., Hingston P., Barone L. & While L.** (2006) *A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit.* IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 10(5)**,** 477-506.

[ISO 6336 2002] **ISO_6336** (2002) *Calcul de la capacité de charge des engrenages cylindriques à dentures droite et hélicoïdale : Partie 1,2,3 et 5*Norme Française. AFNOR 2002), 277.

[Jeantet 1998] **Jeantet A. & Boujut J.-F.** (1998) *Dynamique et évolution des métiers dans la conception*, in: M. Tollenaere (Ed.) Conception de produits mécaniques : méthodes,modèles et outils. Paris, Hermès), 141-162.

[Kim 2006] **Kim I. Y. & De Weck O. L.** (2006) *Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: A new method for Pareto front generation.* Structural and Multidisciplinary Optimization, 31(2)**,** 105-116.

[Kirkpatrick 1983] **Kirkpatrick S., Gelatt C. D. & Vecchi M. P.** (1983) *Optimization by simulated annealing.* Science, 220(4598)**,** 671-680.

[Klein Meyer 2007] **Klein Meyer J. S., Roucoules L., De Grave A. & Chaput J.** (2007) *Case study of a MEMS switch supported by a FBS and DFM framework*, paper presented at the 17th CIRP Design Conference, Berlin, 2007.

[Krause 2006] **Krause F.-L. & Kind C.** (2006) *Simulation approaches to optimise the management of product development processes*, paper presented at the Virtual Design and Automation (VIDA), ?

[Labrousse 2004] **Labrousse M.** (2004) *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise.* Thèse doctorat : génie mécanique, École centrale de Nantes.

[Lafon 1994] **Lafon P.** (1994) *Conception optimale de systèmes mécaniques : optimisation en variables mixtes.* Thèse de doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Lestriez 2003] **Lestriez P.** (2003) *Modélisation numérique du couplage thermo-mécanique-endommagement en transformations finies.* Thèse de doctorat : systèmes mécaniques et matériaux, Université de technologie de Troyes.

[Liu 2007] **Liu H., Huang T., Mei J., Zhao X., Chetwynd D. G., Li M. & Hu S. J.** (2007) *Kinematic design of a 5-DOF hybrid robot with large workspace/limb-stroke ratio.* Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 129(5), 530-537.

[Lu 2006] **Lu K. J. & Kota S.** (2006) *Topology and dimensional synthesis of compliant mechanisms using discrete optimization.* Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 128(5), 1080-1091.

[Marcelin 2001] **Marcelin J. L.** (2001) *Genetic optimisation of gears.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17(12), 910-915.

[Mariage 2003] **Mariage J.-F.** (2003) *Simulation numérique de l'endommagement ductile en formage de pièces massives.* Université de Technologie de Troyes.

[Martin 2007] **Martin P. J., Russell K. & Sodhi R. S.** (2007) *On mechanism design optimization for motion generation.* Mechanism and Machine Theory, 42(10), 1251-1263.

[Masclet 2002] **Masclet C.** (2002) *Vers une assistance à la synthèse de dispositifs technologiques assurant une liaison mécanique.* Thèse de doctorat : génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[Massol 1994] **Massol J.** (1994) *Etude des assemblages boulonnés à chargement faiblement excentré soumis à des sollicitations de fatigue.* Thèse de doctorat : Génie mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[McMahon 1998] **McMahon C. & Browne J.** (1998) *CAD/CAM: principles, practice, and manufacturing management,* (Addison-Wesley Publishing Company).

[Minoux 1983] **Minoux M.** (1983) *Programmation mathématique : Théorie et algorithmes. ,* (Paris, Dunod).

[Mkaddem 2006] **Mkaddem A., Bahloul R., Dal Santo P. & Potiron A.** (2006) *Experimental characterisation in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique.* Journal of Materials Processing Technology, 180(1-3), 1-8.

[Moon 2003] **Moon F. C.** (2003) *Franz Reuleaux: Contributions to 19th century kinematics and theory of machines.* Applied Mechanics Reviews, 56(2), 261-284.

[Nadeau 2004] **Nadeau J. P., Pailhes J. & Olivares P.** (2004) *MAL'IN Logiciel de conduite d'études, Méthodes d'Aide à L'INnovation.*

[Newman 1997] **Newman J. N.** (1997) *Marine hydrodynamics,* (Cambridge, The MIT Press).

[NF EN 1325-1 1996] **NF_EN_1325-1** (1996) *Vocabulaire du Management de la Valeur, de l'Analyse de la Valeur et de l'Analyse Fonctionnelle.*

[Noel 2003] **Noël F.** (2003) *Outils dédiées à la Conception de Produits Mécaniques dans un contexte de Liaison Conception-Simulation.* Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph Fourrier.

[Papalambros 1980] **Papalambros P. & Wilde D. J.** (1980) *Regional monotonicity in optimum design.* Journal of mechanical design, 102(3), 497-500.

[Papalambros 1995] **Papalambros P. Y.** (1995) *Optimal design of mechanical engineering systems.* Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 117(B), 55-62.

[Papalambros 2002] **Papalambros P. Y.** (2002) *The optimization paradigm in engineering design: Promises and challenges.* CAD Computer Aided Design, 34(12), 939-951.

[Pourroy 1998] **Pourroy F., Remondini L., Yannou B., Vasiliu A. & Clozel P.** (1998) *Modèles de comportement*, in: M. Tollenaere (Ed.) Conception de produits mécaniques : méthodes,modèles et outils. Paris, Hermès), 347-412.

[Radkowksi 2007] **Radkowksi R., Frank U. & Gausemeier J.** (2007) *Using Evolutionnary Algorithms to Support the Design of Self-optimizing Mechatronic Systems*, paper presented at the 17th CIRP Design Conference, Berlin, 2007.

[Rockafellar 1996] **Rockafellar T. R.** (1996) *Convex Analysis,* (Princeton).

[Roucoules 1999] **Roucoules L.** (1999) *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée.* Thèse de doctorat : sciences appliquées, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Roucoules 2007] **Roucoules L.** (2007) *Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit.* Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Troyes.

[Roucoules 2006] **Roucoules L., Lafon P., Skander A. & Krikeb Z.** (2006) *Knowledge intensive approach towards multiple product modelling and geometry*, paper presented at the 16th CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, July 16-19.

[Roucoules 2000] **Roucoules L. & Tichkiewitch S.** (2000) *CoDE: A cooperative design environment - a new generation of CAD systems.* Concurrent Engineering Research and Applications, 8(4), 263-280.

[Ryu 2005] **Ryu Y. S., Park K. B., Kim. T.B. & Na W. B.** (2005) *Optimum Design of Composite Breakwater with Metropolis GA*, paper presented at the 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, May 30th - June 3th.

[Saanouni 2006] **Saanouni K.** (2006) *Virtual metal forming including the ductile damage occurrence. Actual state of the art and main perspectives.* Journal of Materials Processing Technology, 177(1-3), 19-25.

[Savage 1994] **Savage M., Lattime S. B., Kimmel J. A. & Coe H. H.** (1994) *Optimal design of compact spur gear reductions.* Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 116(3), 690-696.

[Silberberg 1994] **Silberberg Y.** (1994) *Réalisation d'un système intelligent d'aide à la conception de mécanismes.* Thèse de doctorat : sciences appliquées., Institut Français de Mécanique Avancées.

[Sohlenius 1992] **Sohlenius G.** (1992) *Concurrent engineering.* CIRP annals, 41(2)**,** 645-655.

[Thoma 1975] **Thoma J.** (1975) *Introduction to Bondgraphs and their Application,* (Oxford, Pergamon Press).

[Tichkiewitch 1989] **Tichkiewitch S.** (1989) *Optimisation de structures avec contraintes technologiques : un exemple : la C.A.O. de pièces estampées.* Thèse d'habilitation : mécanique, Université Pierre et Marie Curie.

[Tichkiewitch 1996] **Tichkiewitch S.** (1996) *Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model*, paper presented at the American Society of Mechanical Engineers, Petroleum Division (Publication) PD, Montpellier, Fr.

[Tichkiewitch 1997] **Tichkiewitch S. & Véron M.** (1997) *Methodology and product model for integrated design using a multiview system.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, 46(1)**,** 81-X17.

[Tollenaere 1998] **Tollenaere M.** (1998) *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils.,* (Paris, Hermès).

[Troussier 1999] **Troussier N.** (1999) *Contribution à l'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits techniques : proposition méthodologique pour l'utilisation et réutilisation.* Thèse de doctorat : sciences appliquées., Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Umeda 1990] **Umeda Y., Tomiyama T. & Yoshikawa H.** (1990) *Function, Behavior and Structure*, paper presented at the Applications of Artificial Intelligence in Engineering V, Boston, USA, July 17-20.

[Vieilledent 1996] **Vieilledent D.** (1996) *Optimisation des outils en forgeage à chaud par simulation éléments finis et méthode inverse. Applications à des problèmes industriels.* Thèse Doctorat : Sciences Appliquées, Ecole nationale supérieure des mines.

[Wilde 1975] **Wilde D.** (1975) *Monotonicity and dominance in optimal hydraulic cylinder design.* J Eng Ind Trans ASME, 97 Ser B(4)**,** 1390-1394.

[Yannou 2001] **Yannou B.** (2001) *Préconception de produits.* Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Yannou 1998] **Yannou B. & Vasiliu A.** (1998) *Typologie des approches de synthèse dimensionnelle de système mécaniques. Application aux générateurs de trajectoire*, in: M. Tollenaere (Ed.) Conception de produits mécaniques : méthodes,modèles et outils. Paris, Hermès), 348-364.

[Yvars 2005] **Yvars P., Alain** (2005) *Eléments pour une ingénierie supervisée par les contraintes*, paper presented at the 17ième Congrés Français de Mécanique, Troyes, France, 29 aout - 2 septembre.

[Zienkiewicz 2006] **Zienkiewicz O. C. & Taylor R. L.** (2006) *The finite element method,* (6 edn) (Elsevier, Butterworth-Heinemann).

[Zitzler 2000] **Zitzler E., Deb K. & Thiele L.** (2000) *Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results*. Evolutionary Computation, 8(2), 173-195.