HAL
open science

Modèles et méthodes pour une conception hautement productive orientée vers la fabrication : application à l'ingénierie routinière de pièces plastiques

Luis Cécilio Toussaint

To cite this version:

Luis Cécilio Toussaint. Modèles et méthodes pour une conception hautement productive orientée vers la fabrication : application à l'ingénierie routinière de pièces plastiques. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2010. Français. NNT : 2010BELF0143 . tel-00607485

HAL Id: tel-00607485

https://theses.hal.science/tel-00607485v1

Submitted on 8 Jul 2011

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.

N° d'ordre : 143 Année 2010

THESE DE DOCTORAT

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard-UTBM

École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques – SPIM

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR
SPECIALITE : MECANIQUE

Modèles et méthodes pour une conception hautement productive orientée vers la fabrication : application à l'ingénierie routinière de pièces plastiques

présentée et soutenue publiquement par

Luis TOUSSAINT

le 2 décembre 2010 devant le jury d'examen :

Président	Prof. Jean RENAUD	Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg
Rapporteurs	Prof. Daniel BRISSAUD	Institut National Polytechnique de Grenoble
	Prof. Michel ALDANONDO	École de Mines d'Albi Carmaux
Examinateurs	Dr. Dimitris KIRITSIS	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Directeur de thèse	Prof. Samuel GOMES	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Co-encadrants	Dr. Nadhir LEBAAL	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
	Dr. Samuel DENIAUD	

Préparée au Laboratoire Mécatronique, Modèles, Méthodes et Métiers - M3M-E.A.3318
Rue du Château - 90010 BELFORT Cedex

"I may not have gone where I intended to go, but I think I have ended up where I needed to be."

Douglas Adams

REMERCIEMENTS

La rédaction d'une mémoire de thèse est une activité qui invite à la réflexion et au travail solitaire, cependant, je ne serais jamais arrivé là sans le soutien d'un certain nombre de personnes.

Je tiens d'abord à remercier les rapporteurs de ma thèse, à savoir Monsieur Daniel BRISSAUD et Monsieur Michel ALDANONDO, pour avoir accepté de rapporter mes travaux de recherche, ainsi que tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir évaluer les travaux de ma thèse.

J'exprime toute ma gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur Samuel GOMES, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour son support et pour son soutien quand les solutions demeuraient inaccessibles. Je remercie également mes co-encadrants de thèse, Monsieur Nadhir LEBAAL et Monsieur Samuel DENIAUD, qui ont su me guider au long de ces années de travail.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur François COTTET et Monsieur Eric GROSS, qui se sont succédés au Bureau d'Études de l'entreprise Mark IV, et qui m'ont aidé à ancrer mes travaux solidement sur le réel et le pratique. Je tiens à remercier aussi toutes les personnes chez Mark IV avec lesquelles j'ai pu travailler, Christophe, Thomas, David, Alex, Jean-Philippe, mais aussi Sylvain, Steve, Max, je ne peux pas tous vous nommer mais sachez que vous m'avez aidé infiniment, avec votre travail, votre humeur et votre disponibilité.

Je n'oublierai pas toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont permis l'aboutissement de ma thèse, principalement Fred, Pascal, Davy, Christophe, Samuel, Béatrice, Émilie, Nadhir, votre soutien moral, votre bonne humeur, ont fait que ces travaux, et surtout ces très difficiles derniers mois, passent facilement.

Finalmente agradezco a aquellos que me siguieron más de cerca. Primeramente le agradezco a mis padres, su infinita confianza en mi hizo que esto fuera posible. Beto, tu presencia, a veces fácil y a veces difícil, le ha dado tono a este trabajo y aunque a gritos, no has dejado de apoyarme, creo que sin ello no hubiera podido. Carlos, te gané, con mucha dificultad llegué a esto antes que tu, y eso me hace creer que tu lo harás también, y seguirá la competencia.

Finalmente, pero no sin menos importancia, Maaret, todo este trabajo hubiera sido en vano si no te hubiera tenido a mi lado. Me hiciste encontrar lo dulce en tantos tragos amargos. Muchas gracias por toda tu paciencia, por todo tu amor y por todo tu apoyo.

Luis

A mes parents,

A mon frère

A mi vida

SOMMAIRE

Remerciements iii

Sommaire v

Liste d'acronymes vii

Introduction générale 1

Chapitre 1. Contexte et Problématique : utilisation des connaissances Produit/Process dans un Bureau d'études 5

1. Enjeux globaux 7
2. Contexte industriel spécifique Mark IV 11
3. Contexte scientifique 15
4. Le Projet de recherche CoDeKF 19
5. Problématique, objectifs et originalités des travaux de recherche 22
6. Conclusion 24

Chapitre 2. État de l'art 25

1. Introduction 27
2. Les concepts d'ingénierie 27
3. Conception pour la fabrication 31
4. Gestion du Cycle de vie des Produits 42
5. Représentation et exploitation des connaissances en conception et développement de produits 47
6. Mise en application de démarches de KBE et optimisation lors de la conception et développement de produits 54
7. Conclusion : besoin d'une méthodologie adaptative 61

Chapitre 3. Modèles et méthodes pour une conception à base de connaissances orientée vers la fabrication : la méthodologie FaBK (design for Fabrication Based on Knowledge) 63

1. Introduction 65
2. Principes de la méthodologie 69
3. Capitalisation et connaissances dans FaBK 76
4. Conception avancée de produits 91
5. L'importance de la rétroaction 95
6. Conclusion 96

Chapitre 4. Vers la définition de modèles robustes en phases préliminaires de conception 99

1. Introduction 101

2. Conception des modèles génériques robustes et vérifiés à l'aide d'applications de KBE 102

3. Optimisation des modèles génériques 136

4. Conclusion 156

Chapitre 5. Expérimentations en milieu industriel globales de la méthodologie FaBK 159

1. Introduction 161

2. Application au développement d'un produit 162

3. Application de la « vérification de la loi d'évolution » 170

4. Application de développement et contrôle d'un cordon de soudure 175

5. Résultats généraux des expérimentations 179

6. Conclusion 183

Apports de la thèse, conclusion générale et perspectives 185

1. Conclusion générale 187

2. Perspectives de recherche 189

Liste des figures 191

Liste des tableaux 195

Références bibliographiques 197

1. Valorisation des travaux de thèse 197

2. Références externes 198

LISTE D'ACRONYMES

ACSP	**A**telier **C**oopératif de **S**uivi de **P**rojet
AI	Intelligence Artificielle (***A**rtificial **I**ntelligence*)
BP	**B**oîtier **P**apillon (ou Volet Doseur pour les moteurs diesel)
CAO	**C**onception **A**ssistée par **O**rdinateur (de l'anglais **CAD**)
CBR	Raisonnement à partir de cas (***C**ase **B**ased **R**easoning*)
CdC	**C**ahier **d**es **C**harges
CE	**C**oncurrent **E**ngineering
CFAO	**C**onception et **F**abrication **A**ssistées par **O**rdinateur (de l'anglais **CAM**)
CIFRE	**C**onventions **I**ndustrielles de **F**ormation par la **RE**cherche
CoDeKF	***C**ollaborative **D**esign and **K**nowledge **F**actory*
CORE	Programme de **CO**nception par le **R**etour d'**E**xpérience
CSG	***C**onstructive **S**olid **G**eometry*
CYGMA	**CY**cle de vie et **G**estion des **M**étiers et **A**pplications
DFX	***D**esign **F**or **X***
DFM	***D**esign **f**or **M**anufacturing*
DFA	***D**esign **f**or **A**ssembly*
DFE	***D**esign **f**or **E**nvironment*
DFQ	***D**esign **f**or **Q**uality*
DFR	***D**esign **f**or **R**ecyclability*
DFMA	***D**esign **f**or **M**anufacture and **A**ssembly*
DRAMA	***D**esign **RA**tionale **Ma**nagement*
DYPKM	***DY**namic **P**rocess for **K**nowledge **M**anagement*
FaBK	*Design for **Fa**brication **B**ased on **K**nowledge* **(**Conception orientée vers la fabrication basée sur des connaissances)
IHM	**I**nterface **H**ome-**M**achine
KM	***K**nowledge **M**anagement*
KBE	***K**nowledge **B**ased **E**ngineering*
MASK	**M**éthode d'**A**cquisition et de **S**tructuration des **C**onnaissances
MKSM	***M**ethodology for **K**nowledge **S**ystem **M**anagement*
OEM	***O**riginal **E**quipment **M**anufacturer*
OMG	***O**bject **M**anagement **G**roup*
PLM	***P**roduct **L**ifecycle **M**anagement*
PDM	***P**roduct **D**ata **M**anagement*
QOC	***Q**uestions, **O**ptions and **C**riteria*
RFQ	***R**equest **F**or **Q**uotation*
RAS	**R**etour **A**ir **S**uralimenté
R&D	**R**echerche et **D**éveloppement
SE	**S**ystèmes **E**xperts *(**E**xpert **S**ystems)*
SGDT	**S**ystème de **G**estion des **D**onnées **T**echniques
SVD	***S**ingular **V**alue **D**ecomposition* (Décomposition en Valeurs Singulières)
SysML	***Sys**tem **M**odeling **L**anguage*
UML	***U**nified **M**odeling **L**anguage*
XAO	**X A**ssisté par **O**rdinateur (de l'anglais ***C**omputer **A**ssisted **X*** **– CAx)**

INTRODUCTION GENERALE

La concurrence actuelle demande aux entreprises une réduction de leurs coûts et un renouvellement rapide de leurs produits en vue d'améliorer leur productivité. Les stratégies de Recherche et Développement (R&D) au sein des entreprises s'orientent aujourd'hui vers l'amélioration de la productivité du processus de conception et de développement des produits mécaniques. L'implication des différents acteurs métiers, dans toutes les phases de développement, devient critique pour maintenir les facteurs de compétitivité. Ce constat est en cohérence avec la récente stratégie de gestion du cycle de vie des produits (***P****roduct* ***L****ifecycle* ***M****anagement* – **PLM**), qui propose une gestion intégrée de l'ensemble des informations et des processus liés au produit, sur la totalité de son cycle de vie, dans un contexte d'entreprise étendue, allant de la phase d'expression du besoin jusqu'au retrait en fin de vie de celui-ci [Stark, 2004 ; CIMdata, 2009].

Dans le contexte d'entreprise étendue actuel, les entreprises doivent faire face à des problèmes d'organisation liés aux contraintes des acteurs métier délocalisés [Jagdev et Browne, 1998], ainsi qu'aux réseaux d'expertise métier associés. D'autres difficultés émergent également au niveau de l'intégration constante des évolutions des technologies de fabrication.

Des approches, qualifiées d'« ingénierie intégrée » et « concourante » (*concurrent engineering*), ont émergées [Prasad *et al.*, 1993 ; Tichkiewitch, 1994] au carrefour des approches de conception routinière [Culverhouse, 1995] et conception innovante [Deneux, 2002]. Ceci a permis l'intégration des contraintes des métiers situés en aval, au plus tôt dans les processus de conception et de développement. Dans ce contexte, les approches de Conception pour l'X (***D****esign* ***F****or* ***X*** – **DFX**) [Baxter *et al.*, 2008] ont su prouver leur efficacité en diminuant les temps de cycle et en améliorant la productivité en ingénierie.

Des mesures pour améliorer l'efficacité et la réactivité existent déjà au niveau de l'industrialisation et de la fabrication des produits telles que la conception pour l'assemblage, la conception pour la fabrication ou encore la conception pour la qualité. Durant plusieurs décennies, l'automatisation des systèmes de production (fabrication / assemblage) a été un objectif majeur pour conduire à la production de masse [Bourdet et Villeneuve, 1990]. Aujourd'hui, cette stratégie touche ses limites et a conduit à des systèmes rigides, en raison de la perpétuelle demande de produits personnalisés (*engineering-to-order* et *mass customization*). Cette demande en réactivité croissante, causée par la variabilité des produits [Agard, 2002], a donné lieu à l'évolution des systèmes de production vers des systèmes dits « Agiles » (*Agile Manufacturing*). Ce changement a apporté un degré d'automatisation de la production plus faible, mais a l'avantage de répondre de manière plus efficace aux évolutions des produits et à la variabilité de la demande [Kerbrat *et al.*, 2010].

Cette agilité, obtenue au sein du département de production, est maintenant une préoccupation courante au sein du processus de conception et de développement. En effet, pour répondre aux appels d'offres (***R****equest* ***f****or* ***Q****uotation* – **RFQ**), avec des délais

de plus en plus courts, les entreprises de l'industrie manufacturière en général et du secteur automobile en particulier se doivent d'être plus réactives dans la phase de pré-développement. Cette agilité nécessite d'intégrer, de manière cohérente et flexible, les métiers couvrant le cycle de vie des produits, dès les phases amont du processus de conception et de développement, où 70% des coûts de production sont déterminés. Il est donc essentiel de prendre en compte les contraintes de fabrication dès les premières étapes du processus de conception, d'identifier les paramètres influençant les performances du produit et son coût, puis de les évaluer de façon à obtenir un produit globalement optimal.

Nos travaux de recherche se sont déroulés dans le cadre d'une bourse CIFRE (**C**onventions **I**ndustrielles de **F**ormation par la **RE**cherche) en partenariat avec l'entreprise Mark IV **S**ystèmes **M**oteurs (**SM**). D'une part, au sein du bureau d'études de la société Mark IV SM, avec François Cottet comme responsable hiérarchique, fournisseur rang 1 des systèmes d'asservissement d'air et de fluides pour l'industrie automobile. D'autre part, au sein du laboratoire Mécatronique, Méthodes, Modèles et Métiers (M3M, E.A. 3318) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) et plus particulièrement au sein de l'équipe **INCIS** (**I**ngénierie **N**umérique avancée pour la **C**onception **I**ntégrée de **S**ystèmes mécaniques) animée par Samuel Gomes. Cette équipe travaille depuis plusieurs années sur des thématiques de recherche dans le domaine de la conception hautement productive de systèmes mécaniques, alliant la gestion des informations liées au cycle de vie des produits, intégrant une ingénierie à base de connaissances et modélisation géométrique paramétrée et réglée [Gomes *et al.*, 2005 ; Monticolo *et al.*, 2008 ; Demoly, 2010]. Ces travaux de recherche ont comme objectif l'amélioration des processus routiniers de conception, par l'intégration des métiers tout au long du cycle de vie des produits. Ceux-ci ont conduit au développement de méthodes et d'outils (outil PLM, baptisée **ACSP** (**A**telier **C**oopératif de **S**uivi de **P**rojet), outil KROSSROADS, outil PEGASUS, etc.), pour expérimenter les différents concepts scientifiques proposés.

Ce mémoire présente la synthèse de nos travaux de recherche, qui portent sur la conception intégrée du couple produit-process. Notre travail propose une méthodologie, expérimentée sur plusieurs cas d'application permettant la définition, la propagation et la mise en œuvre des connaissances associées au processus de fabrication, dès les phases amont du processus de conception et de développement des produits. L'objectif est de fournir, aux acteurs métier impliqués, des applications métier expertes s'interfaçant avec les modeleurs géométriques paramétriques, afin d'identifier les données du produit et du process pertinentes (données optimales, respectant le savoir-faire, les contraintes techniques, etc.), et de garantir le maintien des facteurs de compétitivité de l'entreprise. Le domaine d'application de ce travail de recherche reste étroitement lié aux contraintes industrielles du secteur automobile et de l'entreprise Mark IV SM. Cependant, la méthodologie proposée est formulée de manière générique afin de rester adaptable à d'autres domaines. Trois cas industriels concrets ont été choisis pour expérimenter et valider la démarche proposée :

- la conception d'un conduit d'air du type **R**etour **A**ir **S**uralimenté (**RAS**), avec une application de la totalité de la méthodologie ;

- la vérification d'une règle métier capitalisée et formalisée, à savoir la loi d'évolution de la surface de passage d'air, et son impact sur la modélisation d'un conduit d'air. Ceci afin d'illustrer notre utilisation des règles métier sous forme des vérifications ;
- la conception et la vérification d'un cordon de soudure pour un répartiteur d'air, en guise d'application d'une partie de la méthodologie à un domaine d'application différent.

Dès lors, ce manuscrit de thèse est divisé en cinq chapitres décrits par le schéma synoptique ci-dessous (Fig. 1), avec notre contribution scientifique exprimée à travers les chapitres 3, 4 et 5.

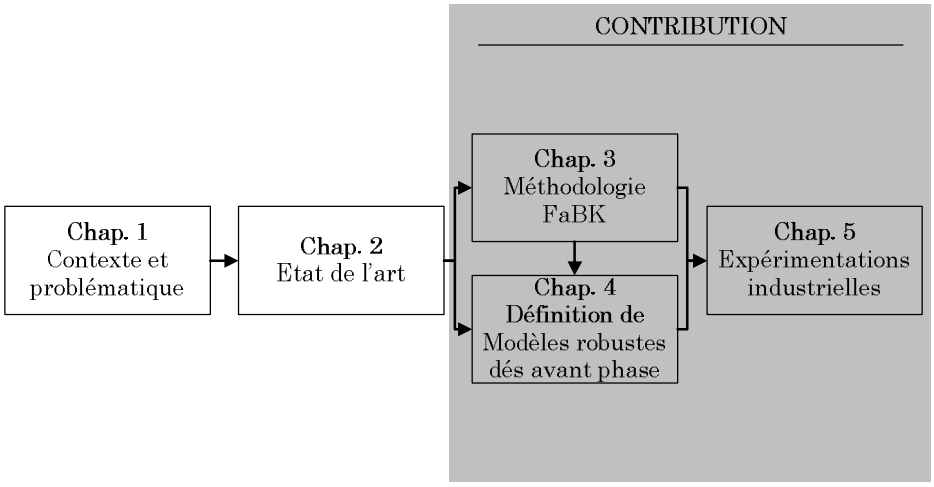


Fig. 1. Schéma synoptique de l'organisation de la thèse.

- **Chapitre 1 – Contexte et Problématique : utilisation des connaissances Produit/Process dans un Bureau d'études.** Ce chapitre fait état des enjeux industriels et du contexte scientifique, décrivant le périmètre et la problématique générale de nos travaux de thèse.
- **Chapitre 2 – État de l'art.** Ce chapitre présente les travaux de la litérature relatifs à la problématique proposée. Cette synthèse de l'état de l'art est axée sur les thèmes de la conception pour la fabrication, l'optimisation dans le processus de conception et de développement de produits et l'interaction avec les différents acteurs métier.
- **Chapitre 3 – Modèles et méthodes pour une conception à base de connaissances orientée vers la fabrication : la méthodologie FaBK.** Dans ce chapitre, nous introduisons notre méthodologie de conception guidée baptisée ***Fa****brication* ***B****ased on* ***K****nowledge* (conception orientée vers la fabrication basée sur des connaissances – **FaBK**). Nous exposons, de manière détaillée, le modèle proposé, ainsi que les différentes activités de cette démarche méthodologique, permettant l'utilisation des connaissances issues du couple produit-process et leur évolution dès les phases préliminaires du processus de conception et de développement du produit.
- **Chapitre 4 – Vers la définition de modèles robustes en phases de conception préliminaires.** Nous décrivons, dans ce chapitre, les méthodes pour la génération des modèles robustes qui serviront aux concepteurs lors du processus de conception et de développement des produits. Elles porteront sur les différentes manières d'utiliser les connaissances du couple produit-process,

afin de définir le produit puis de l'optimiser pour obtenir le meilleur résultat avant d'engager l'activité de modélisation du produit par le concepteur.

- **Chapitre 5 – Expérimentations en milieu industriel globales de la méthodologie FaBK.** Il s'agit ici de présenter la démarche FabK à travers son application à la définition de nouveaux produits. À partir d'un cahier des charges fonctionnel, l'utilisateur peut définir et optimiser un premier modèle générique du produit respectant des règles qualifiées de « fonctionnelles », car permettant d'obtenir le meilleur compromis entre les exigences fonctionnelles et les contraintes issues du métier de fabrication. Nous décrivons également la vérification et la validation du modèle géométrique par le concepteur à partir des connaissances capitalisées. Chaque étape du processus de conception et de développement est illustrée par des applications industrielles.
- Enfin le manuscrit se termine par une synthèse de notre contribution pour l'utilisation des connaissances produit-process en conception préliminaire, et évoque les perspectives pouvant être considérées à la suite de ces travaux de recherche. Ces perspectives concernent l'application de notre démarche méthodologique à d'autres couples produit-process, le développement d'approches de conception et d'optimisation plus détailles des procédés de fabrication étudies ou encore le développement d'un modèle et d'un outil informatique couplé à un système PLM.

CHAPITRE 1.

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE : UTILISATION DES CONNAISSANCES PRODUIT/PROCESS DANS UN BUREAU D'ETUDES

"Always design a thing considering it in its next larger context - a chair in a room, a room in a house, a house in an environment, an environment in a city plan."

Eliel Saarinen.

CONTENU DU CHAPITRE

1. Enjeux globaux 7

2. Contexte industriel spécifique Mark IV 11

2.1. Phase1 : répertorier et capitaliser les connaissances métier existantes dans l'entreprise 14

2.2. Phase 2 : adapter le concept de conception pour la fabrication (DFM) 14

2.3. Phase 3 : développer et déployer des méthodes d'optimisation multicritères couplées à la CAO 4D 15

3. Contexte scientifique 15

4. Le Projet de recherche CoDeKF 19

5. Problématique, objectifs et originalités des travaux de recherche 22

5.1. Problématique générale 23

5.2. Plan d'action à poursuivre 24

6. Conclusion 24

1. Enjeux globaux

La compétitivité industrielle mondiale actuelle, due en partie à la montée de la concurrence des pays à bas coût et à l'évolution des technologies de l'information et de la communication associées à l'échange et la diffusion des données–informations–connaissances intégrées au sein du cycle de vie des produits, soulève de nouveaux challenges. L'organisation de la « *Design Chain*[1] » de l'entreprise industrielle se voit dans l'obligation de s'adapter à une collaboration de plus en plus difficile avec les différents acteurs-métier – souvent répartis sur plusieurs continents en une entreprise étendue [Willaert *et al.*, 1998].

En effet, pour maintenir leurs avantages concurrentiels, les entreprises doivent mettre en place des approches d'ingénierie intégrée et de gestion du cycle de vie des produits (PLM), en particulier en phase de début de cycle de vie des produits [Demoly, Yan*, et al.*, 2010]. De plus, la complexité et la personnalisation de masse, associées au développement de nouveaux produits, sont des facteurs soulignant la nécessité d'intervenir en début de cycle de vie du produit, à savoir, au niveau du processus de conception et de développement et d'industrialisation des produits, ceci afin d'anticiper les problèmes, détectés traditionnellement dans les phases situées en aval du cycle de vie du produit. Les méthodes existantes de conception à base de connaissances du couple produit–process interviennent pour la plupart qu'en phase de conception détaillée, avec le risque d'engendrer des coûts supplémentaires pour une modification quelconque [Ferrer *et al.*, 2009]. Dans ce contexte, il est important de remettre en cause les pratiques industrielles actuellement mises en place au sein du processus de conception et de développement des produits, avec une sensibilisation à la capitalisation et à la réutilisation des connaissances liées à l'ensemble des phases du cycle de vie des produits.

Actuellement, le processus de conception est souvent rationalisé [Kulak *et al.*, 2010], souvent contraint par des délais réduits, au détriment de la constitution d'un véritable capital de connaissances, d'un échange de savoir-faire, et d'un partage du patrimoine informationnel et technique de l'entreprise. Cependant, les acteurs industriels ont des difficultés à allouer une partie de leur temps à pérenniser leur savoir-faire, favorisant plutôt une démarche centrée uniquement sur le produit en cours, plus pratique et rapide, même si souvent, cette démarche demeure moins efficace. En tenant compte de ces difficultés, nous constatons que la gestion du cycle de vie des connaissances en industrie est ainsi complexe et difficilement maitrisable en environnement industriel [Eynard *et al.*, 2005], [Gomes et Serrafero, 2004].

Aujourd'hui, l'industrie automobile tend au perfectionnement continu de ses méthodes de conception, en se focalisant sur l'amélioration de la compétitivité de ses équipes et méthodes d'ingénierie. Les méthodes actuelles, telles que le modèle en cascade [Royce, 1970], le classique cycle en V [Forsberg et Mooz, 1991], ou même le modèle itératif [Whitten *et al.*, 2004], ont une tendance à s'appliquer de façon non formalisée et empirique, due aux contraintes imposées par les donneurs d'ordre, dans le contexte d'une

[1] Chaîne de la Conception en charge de la conception simultanée des « 6P » : Plant / Product / Part / Process / Prototype / Price.

entreprise sous-traitante de rang 2 ou plus. Les bureaux d'études se trouvent ainsi dans l'obligation de faire constamment évoluer leur RFQ (Request For Quotation) [Tang et Qian, 2008] pour mieux répondre au client, ce qui implique un processus de conception et de développement coûteux en temps, intégrant encore beaucoup de mécanismes de type « essai-erreur » [Barton *et al.*, 1996]. Sur la base de ces difficultés, les entreprises font émerger des besoins pour la mise en place d'approches de conception intégrée associées au couple produit-process, ceci afin d'améliorer l'efficacité et la réactivité en ingénierie, et ceci tout en respectant les temps impartis.

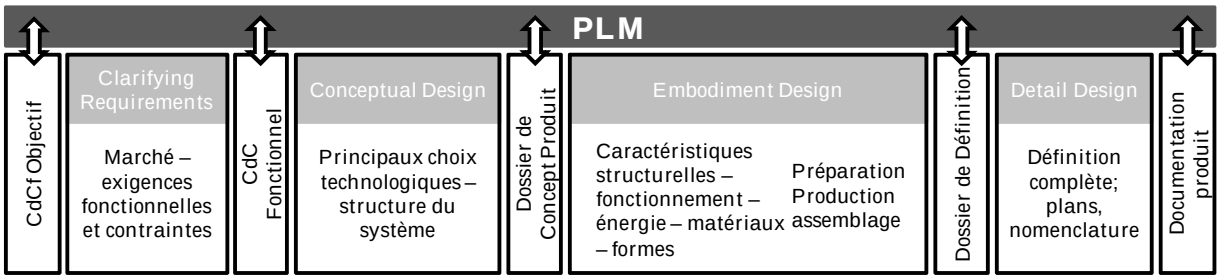


Fig. 2. Processus de conception lié au PLM [Pahl et Beitz, 1996 ; Scaravetti, 2004].

Le processus de conception et de développement d'un produit, comme représenté sur la figure 2, débute par une phase « d'étude de faisabilité », où les besoins d'ordre fonctionnel et technique sont définis, puis une phase de « conception préliminaire », où les concepts sont définis, approuvés et validés pour, ensuite, passer par une dernière phase de « conception détaillée », où le produit sera défini géométriquement et la phase d'industrialisation / production sera enclenchée. Pour le bon déroulement d'un tel processus, une capitalisation des **données, informations** [Gomes et Sagot, 2002], **connaissances** et **expériences** acquises sur les projets antérieurs [Grundstein, 2000 ; Serrafero *et al.*, 2006] est essentielle. Malheureusement, ces connaissances sont actuellement détenues par un nombre limité d'acteurs ou d'experts au sein de l'entreprise, et ne sont pas capitalisées et formalisées pour une utilisation future, ce qui peut engendrer une inefficacité, c'est-à-dire une perte de temps et de qualité engendrant des retards pour les projets industriels à venir. De ce fait, à l'ère de l'économie de la connaissance, l'application d'une démarche d'ingénierie à base de connaissances, s'appuyant sur le retour d'expérience issu de projets passés (réussis et échoués), devient essentielle pour améliorer de manière significative la productivité lors des phases d'ingénierie du couple produit-process.

Dans le contexte du **PLM**[2], de nouveaux processus métiers, méthodes et outils logiciels émergent et tentent de s'intégrer au sein des entreprises menant des projets de grande échelle [Fall *et al.*, 2003]. Ainsi, au delà des concepts de **CFAO** (**C**onception et **F**abrication **A**ssistées par **O**rdinateur) [Gardan, 1991] qui ont fait l'objet de travaux de recherche abondants et reconnus par la communauté, ces nouvelles démarches

[2] Gestion du cycle de vie des produits, approche pour appliquer des solutions supportant la conception collaborative, la gestion, la dissémination et l'utilisation des informations à travers l'entreprise étendue. Ceci en impliquant les acteurs métier, les processus, les systèmes et les informations CIMdata Incorporated (2009). "PLM Market Growth in 2008 'A Mid-Year Look in 2009-Weathering the Storm'", White Paper, August..

concernent, les systèmes PLM [Liu et Xu, 2001] intégrant des concepts émergeants, tels que le **KM** (***K****nowledge* ***M****anagement*), le **KBE** (***K****nowledge-****B****ased* ***E****ngineering*), voire la CAO 4D (CAO 3D semi-automatisée, car pilotée par des variables et règles expertes) [Koo et Fischer, 1998 ; Pinfold et Chapman, 2001 ; Serrafero *et al.*, 2007].

Sur la base des nombreux travaux de recherche, passés et en cours conduits par la communauté scientifique dans le domaine de l'intégration produit-process [Etienne, 2007 ; Yoshimura, 2007], les difficultés rencontrées pour assimiler les connaissances spécifiques au produit et à ses procédés de fabrication se situent principalement dans les phases amont du processus de conception et de développement des produits, et portent sur :

- le manque d'intégration, au sein du processus de conception et de développement des produits des données, des informations et des connaissances issues du processus de fabrication ;
- le manque de gestion et de traçabilité des paramètres et des règles de conception à travers les différents projets ;
- la difficulté pour chaque partie prenante de partager les informations et les connaissances qu'elles génèrent ;
- le manque, lors du développement de nouveaux produits, d'une réutilisation de l'historique des modifications liées au couple produit-process.

Sur la base de ces premiers constats, la mise en place d'approches d'ingénierie intégrée ou concourante [Kulak *et al.*, 2010] mettant en œuvre des méthodes et des outils de gestion de l'information technique, et de capitalisation / réutilisation des connaissances de manière automatique ou semi-automatique [Gardan et Gardan, 2003] peut être considérée comme une solution pour améliorer la qualité des livrables, leur coordination et l'intégration à grande échelle des savoir-faire industriels. Ce besoin d'améliorer l'efficacité au sein du processus de conception et de développement des produits a été soulevé par Rezayat, où 80% des activités de fabrication sont réalisées par des sous-traitants et fournisseurs tiers [Rezayat, 2000]. La conception intégrée du couple produit-process est une préoccupation majeure pour le secteur automobile, avec comme objectif final, de développer un produit qui soit conforme aux connaissances de l'entreprise en terme de fabrication. Cette problématique a été traité au cours des deux dernières décennies [Bourdet et Villeneuve, 1990] par le développement de systèmes experts spécifiques [Shipulski, 2007], visant à capitaliser et à mettre à disposition des connaissances de fabrication [Barton *et al.*, 1996]. Bien que ces démarches aient obtenu des résultats significatifs au niveau industriel, les entreprises mettent en évidence des difficultés pour intégrer cette vision dans leur processus de conception et de développement. Les raisons principales de ce manque d'intégration sont :

- la réactivité nécessaire pour développer ses produits, ce qui empêche les entreprises d'allouer une partie de leur temps à capitaliser et réutiliser des connaissances issues des métiers situés en aval du processus de conception et de développement ;
- la difficulté à formaliser de manière exhaustive et cohérente le savoir-faire métier nécessaire pour garantir un produit conforme aux attentes du client tout au long de son cycle de vie [Chong et Choi, 2005] ;

- la variété des connaissances issues des processus de fabrication et leur complexité pour les prendre en compte, au bon moment, lors du processus de conception [Elgh, 2008].

Dès lors, ces difficultés d'intégration des connaissances au sein du processus de conception et de développement engendrent :

- la non prise en compte des contraintes des métiers de fabrication, lors du développement des produits en avant-phase [Baba et Nobeoka, 1998] ;
- des négligences de la part des concepteurs pour intégrer des caractéristiques plus ou moins essentielles des produits, dues aux contraintes de temps [Molcho *et al.*, 2008] ;
- des interventions plus fréquentes des experts et pour des détails moins essentiels lors de chaque conception d'un nouveau produit [Boujut *et al.*, 1997].

Cette démarche de conception et de développement apporte une vision restreinte et intermittente, pour intégrer les données produit/process dans les processus de conception, et se voit accentuée par les approches de modélisation du produit dites « ascendantes » (*bottom-up*), couramment mises en œuvre par les systèmes **CAO** (**C**onception **A**sistée par **O**rdinateur), les méthodes de fabrication étant choisies une fois les composants modélisés [Fu, 2008]. Dans le contexte de la conception routinière (*routine design*), des approches existent pour faciliter l'usage des informations issues du processus de fabrication, tels que l'utilisation des éléments génériques (*templates*) et des squelettes paramétrés de conception, faisant tous les deux partie des approches de modélisation géométrique variationnelles (*variational approach* [Deneux, 2002]). Ces pratiques facilitent la réutilisation de composants ou d'éléments de construction issus des projets déjà traités, mais demandent l'intervention d'un expert pour manipuler la quantité parfois importante de paramètres fonctionnels, et surtout géométriques, liant la fabrication avec la conception initiale d'un produit. Cependant, nous pouvons constater que ce type d'approche mène souvent vers des applications d'usage fermé et restreint (effet boîte noire), où le concepteur n'a pas forcément une entière compréhension des connaissances requises ou utilisées. Ainsi, la modélisation géométrique dirigée par les données et les informations issues de la CAO appliquant des méthodes dites de conception orientée vers la fabrication (***D**esign **f**or **M**anufacturing* – **DFM**) peux être conduite par une approche descendante (*top-down*), ou les détails du modèle géométrique sont dirigés par le procédé de fabrication.

Par conséquent, l'intérêt actuel des entreprises, plus particulièrement dans le secteur automobile, est orienté vers l'intégration, au sein du processus de conception des produits, des informations et des connaissances issues du monde de la fabrication. De plus, cette intégration doit se réaliser au cours des phases préliminaires, en garantissant une réactivité et une flexibilité, tant pour les concepteurs que pour les experts, sur les connaissances à utiliser et sur leur impact sur le projet en cours [Kimura *et al.*, 2004 ; Molcho *et al.*, 2008]. Ceci doit s'intégrer dans une approche de conception descendante [Aleixos *et al.*, 2004], afin de garantir le lien entre les informations fonctionnelles, mais aussi techniques, et les composants, gage de cohérence entre le domaine de la conception et celui de la fabrication.

De plus en plus de plateformes **PLM** viennent se mettre en place, au sein des entreprises, en s'harmonisant avec les fonctionnalités des systèmes **CAO** pour la gestion des informations process, complémentaires aux informations liées au produit, car ces plateformes offrent une solution viable pour des tentatives de renouement des métiers et de diffusion des informations produit-process [CIMdata, 2003 ; CIMdata, 2005 ; CIMdata, 2007]. En outre, l'adoption générale des récentes technologies informatiques de type Service Web (*Web Services*) renforce la possibilité de créer des liens « souples » et « réactifs » entre les différentes applications métier [von Krogh *et al.*, 2001], tout en tenant compte des processus et des contextes d'origine et d'application dans lesquels les données, les informations et les connaissances seront caractérisées et mises en service [Danesi *et al.*, 2008].

Pour conclure sur cette introduction relative aux enjeux dans lesquels s'inscrivent ces travaux, ainsi que sur les problématiques soulevées par cette recherche, ils doivent être traitées à la fois de façon technique et managériale, du fait de la complexité des produits et des processus de fabrication intégrant des métiers variés [Molcho *et al.*, 2008]. Ces enjeux se situent aussi bien au niveau des différents acteurs métier impliqués dans le processus de conception et de développement des produits mécaniques, souvent répartis sur plusieurs sites, qu'au niveau des plateformes d'ingénierie dédiées à la gestion des informations et données techniques, qui facilitent le partage d'informations et des données tout au long du cycle de vie d'un produit [Baxter *et al.*, 2008].

2. Contexte industriel spécifique Mark IV

MARK IV Industries est un groupe leader sur le plan industriel et automobile pour la conception, le développement et la fabrication de systèmes et de composants dans le domaine des moteurs, des moto-propulseurs et de la transmission des fluides. Le siège social du groupe est situé à New York.

Mark IV AIC, filiale du groupe Mark IV LLC, est un équipementier de rang 1, spécialisé dans la **conception et la réalisation de pièces plastiques de haute technicité**, destinées aux systèmes d'air et de refroidissement des moteurs à combustion interne. La division est pilotée depuis son siège français situé à Orbey, où se situent également son centre de Recherche et Développement européen, ses services administratifs et sa principale usine européenne (Fig. 3). Essentiellement actif en Europe et en Amérique du Nord, l'entreprise Mark IV est maintenant présente en Roumanie et en Inde, ainsi qu'en Chine, au Mexique et au Brésil. L'élargissement du panel de clients se fait aujourd'hui en s'appuyant sur trois centres de R&D (France, USA et Inde), et sur des innovations produit (répartiteurs, pompe à eau, module de refroidissement, boîtiers de sortie d'eau…), ce qui aura ainsi permis d'atteindre un chiffre d'affaires de 320M$ sur l'année 2009. Plus de 1000 collaborateurs de part le monde sont fédérés autour d'une même ambition : «Être un acteur de la réduction des émissions de CO_2 », et du slogan suivant : « les Hommes sont le cœur de notre développement ».

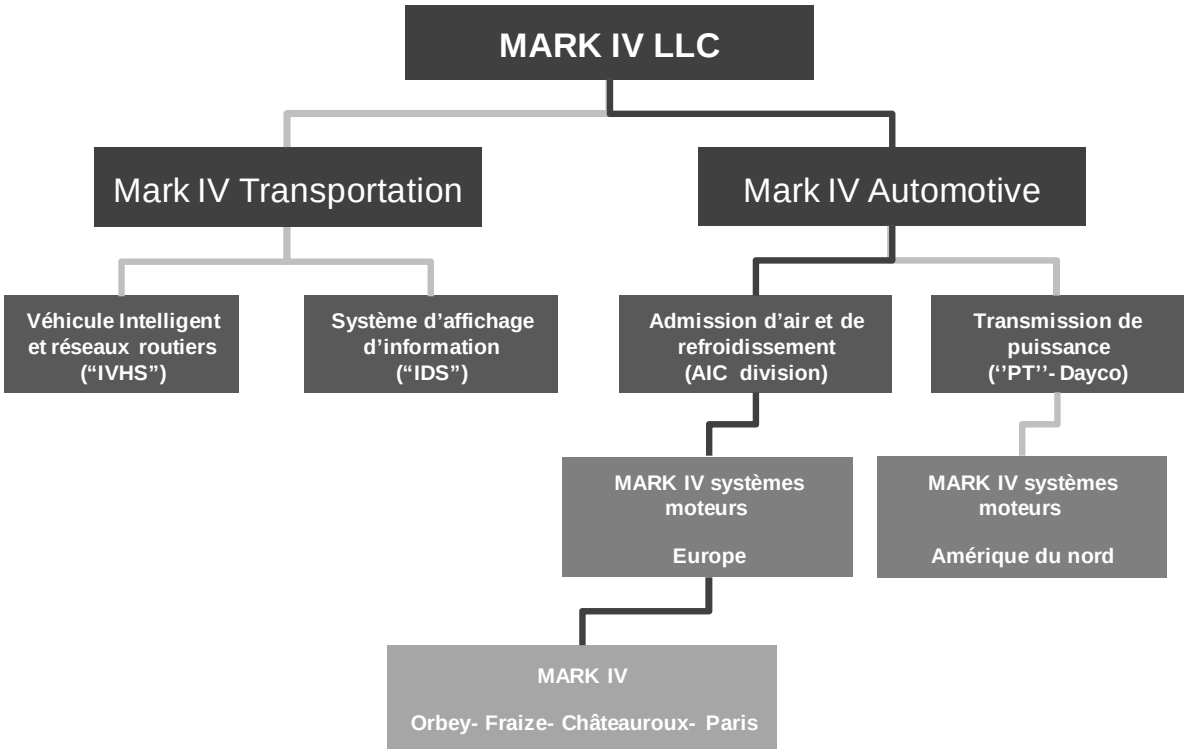


Fig. 3. Branches d'activités de MARK IV.

Afin de brièvement illustrer la gamme des produits plastiques produits par Mark IV, la figure 4 présente une vue éclatée des différents composants fabriqués par l'entreprise autour d'un moteur.

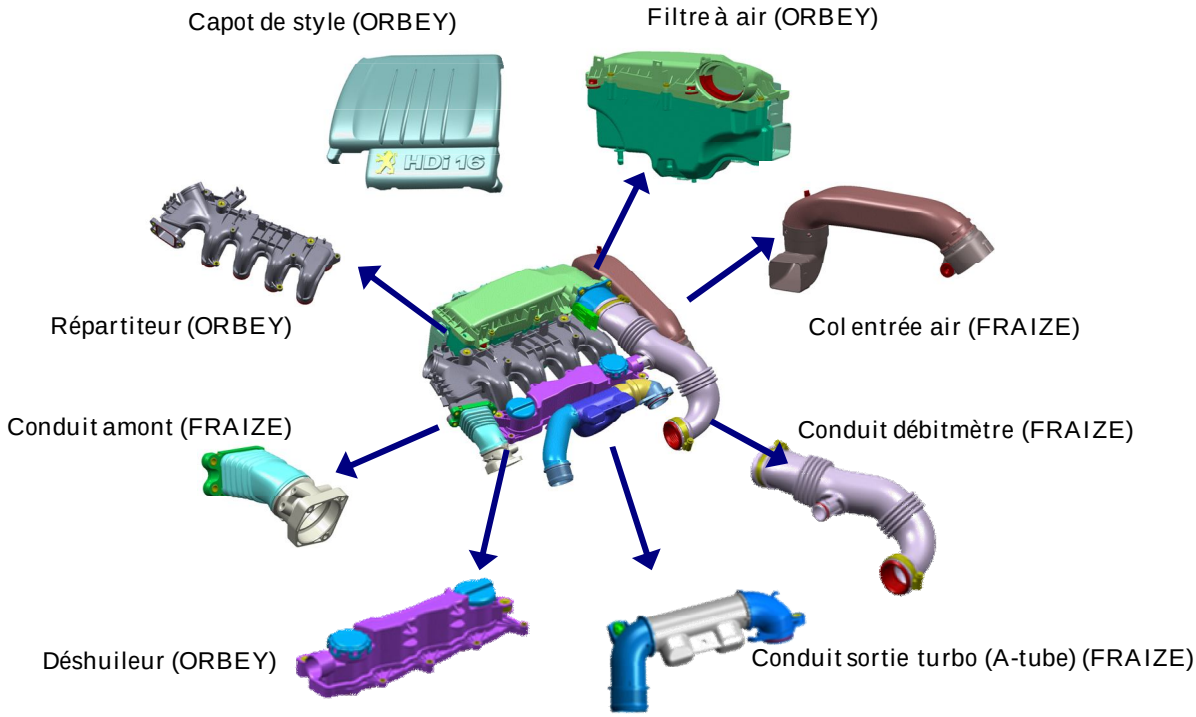


Fig. 4. Exemple de pièces pour la fonction admission d'air du moteur DV.

Sur les trois sites de production en France, le site d'Orbey réalise des activités autour de la fabrication par injection soudage de thermoplastiques pour des produits tels que :

- des **répartiteurs** et collecteurs **d'admission** ;
- des conduits d'admission d'air et de refroidissement ;
- des boîtes de dégazage et réservoirs d'expansion.

Ce site a été fondé en 1959 et emploie environ 405 personnes. Le site de Fraize, à son tour, se spécialise dans la fabrication par extrusion soufflage ou injection soudage de thermoplastiques tels que :

- des **conduits d'air** « autour du turbo » ;
- des A-tubes (conduit d'air avec artifice acoustique), résonateurs et correcteurs acoustiques sur conduits d'air ;
- des conduits d'eau ;
- des réservoirs techniques (liquide de frein, pompe d'assistance).

Le site de Fraize a été fondé en 1991 et emploie aujourd'hui 200 personnes. Le dernier site européen, le site de Chateauroux, est spécialisé dans la fabrication par injection de matériaux composites thermodurcissables tels que :

- des boîtiers de sortie d'eau et des collecteurs ;
- des pompes à eau ;
- des galets et des accessoires pour transmission.

Ce dernier site existe depuis 1947 et emploie 145 personnes. Les trois sites suivent la direction du département de R&D situé à Orbey, ce qui correspond parfaitement à l'une des problématiques soulevées dans cette recherche, la distribution géographique des acteurs métier ainsi que la maitrise de différents moyens de fabrication et de développement de produits. Mark IV compte parmi ses clients les principaux constructeurs automobiles européens et mondiaux.

Dans le cadre de notre travail de recherche, l'entreprise Mark IV Systèmes Moteurs a débuté un programme baptisé **CORE** (Programme de **CO**nception par le **R**etour d'**E**xpérience), avec pour objectif d'améliorer la gestion de ses projets, et d'améliorer la qualité de la conception de produits et de réduire les temps de développement. Ce programme CORE a pour objet la création d'un système de gestion de connaissances couplé à un outil de modélisation géométrique paramétré (outil CAO CATIA V5), permettant de gérer les différents produits et pièces modélisées, tout en automatisant certaines étapes routinières du processus de conception et en respectant les contraintes process existantes.

La méthode de conception utilisée actuellement dans l'entreprise consiste à capitaliser les différents retours d'expériences et à les synthétiser sous forme de « fiches de préconisation ». Ces fiches nécessitent une actualisation permanente car, avec chaque produit développé, de nouvelles expertises sont réalisées. Néanmoins, ces fiches de préconisation, sous forme papier, ne sont pas consultées de manière systématique. D'où notre proposition d'automatiser ces « expertises » à l'aide d'outils numériques, plus facilement exploitables.

Le principal objectif de cette recherche vis-à-vis de l'entreprise est de formaliser et de finaliser le programme avec l'aide des différents membres du bureau d'études, en réalisant les différentes phases suivantes :

- **Phase 1 :** répertorier et capitaliser les connaissances métier existantes dans l'entreprise ;
- **Phase 2 :** déployer le concept de conception pour la fabrication (**DFM**) ;
- **Phase 3 :** développer et déployer des méthodes d'optimisation multicritères couplées à la **CAO 4D**.

Ces différentes phases sont détailles dans la section suivante.

2.1. Phase1 : répertorier et capitaliser les connaissances métier existantes dans l'entreprise

Cette étape consiste à capitaliser les diverses connaissances et expertises présentes dans l'entreprise après plusieurs années d'expérience. Elle se déroule de manière progressive, passant par l'analyse et la classification des concepts et produits couramment utilisés au sein du bureau d'études, la programmation des règles de construction pour leur éventuelle exploitation grâce aux outils CAO ou de KBE, puis l'évolution vers une application systématique des connaissances métier pour une conception effective et efficace, assurée par les connaissances (aux sens de l'assurance qualité), dès la phase de RFQ.

L'intégration des règles métiers de l'entreprise, dans la création semi-automatique des modèles CAO, ou du moins de leur architecture, permettra de diminuer fortement les temps de conception et de réponse aux consultations. Ce système permettra de travailler sur un plus grand nombre de projets, dédiés à la conception routinière de produits, sans perdre du temps, en reconcevant intégralement chaque produit.

2.2. Phase 2 : adapter le concept de conception pour la fabrication (DFM)

Les entreprises doivent faire collaborer des experts issus de plusieurs domaines pour vérifier la fabricabilité des composants du produit, dès l'étape de conception. Cependant, l'indisponibilité des experts rend souvent cette approche inefficace et entraîne des délais et des surcoûts. La capitalisation et la réutilisation des règles métier sur les contraintes de fabrication, sur les coûts et sur les choix et la résistance des matériaux, peuvent améliorer l'efficience des concepteurs, en incluant un concept de **DFM** (***D****esign* ***F****or* ***M****anufacturing*) dans leur façon de travailler. L'intégration d'un outil de vérification des règles expert DFM ouvert et souple d'utilisation permettrait l'exploitation de l'expérience des experts, avec la possibilité d'une mise à jour continue et une adaptation selon les spécificités de chaque cas. Comme résultat supplémentaire, le concepteur pourra récupérer l'ensemble des données et contraintes de fabrication liées à son concept, pour les transmettre au fournisseur avec un minimum de délai et de nombre de consultations.

Une démarche de gestion des connaissances (***K****nowledge* ***M****anagement* – **KM**) [Blondel *et al.*, 2006] envisage de donner une cohérence, et de mettre à disposition des concepteurs l'ensemble des connaissances produites en interne par l'entreprise Mark IV SM, en

particulier les connaissances liées à un des ses procédés de fabrication plus fortement développé : l'extrusion soufflage. Une multitude d'informations et de connaissances est détenue par quelques experts métier sur ce procédé de fabrication, mais existent sous une forme dispersée et parcellaire. Une mise en forme, puis un couplage avec un outil PLM / CAO de ces informations et connaissances métier signifieraient un gain considérable en efficacité et en qualité puis un meilleur respect des règles métier, se traduisant par des produits mieux conçus et ceci dans des délais plus courts.

2.3. Phase 3 : développer et déployer des méthodes d'optimisation multicritères couplées à la CAO 4D

Les travaux de recherche proposés dans cette phase se positionnent dans un contexte scientifique, où l'objectif final est de générer semi-automatiquement des modèles robustes et optimisés de produits, respectant l'ensemble des connaissances métier, formalisées à partir de mémoires projet et de savoirs experts. Ces connaissances ainsi identifiées, permettront de proposer différents jeux de paramètres optimaux (fonctionnels, géométriques, physiques, etc.), respectant l'ensemble des règles expertes métier, en particulier grâce, à un interfaçage avec des outils d'optimisation multi-objectifs appliquant les méthodes d'optimisation déterministes ou méta-heuristiques [Gomes *et al.*, 2005 ; Sid *et al.*, 2005]. Ces jeux de paramètres optimaux pourront ensuite être retranscrits dans un modèle CAO paramétré, permettant la génération semi-automatique de plusieurs géométries candidates optimales, respectant l'ensemble des connaissances métier du domaine.

Ces trois phases de développement présentées précédemment structurent le contexte d'application de nos travaux de recherche au sein du Bureau d'Études de la société Mark IV SM. Le but ultime de cette intervention étant d'aider l'entreprise à formaliser leur capital de savoir-faire produit-process et de revaloriser l'intervention des concepteurs, les transformant de simples opérateurs manipulant un outil de génération de géométrie, en véritables preneurs de décisions, en leur fournissant des informations et connaissances pouvant influencer l'adéquation du produit routinier conçu, vis-à-vis de son cahier des charges fonctionnel et de fabrication.

3. Contexte scientifique

Aujourd'hui, des stratégies de gestion du cycle de vie des produits, orientées vers la gestion intégrée de l'ensemble des informations et des processus métier liés aux produits, émergent afin d'améliorer la compétitivité des entreprises. Cette stratégie vise à accompagner et guider le développement de produits, en contexte d'entreprise étendue, allant de l'établissement de l'offre jusqu'à la fin de vie de ceux-ci [Stark, 2004 ; CIMdata, 2009]. De ce fait, nous pouvons considérer la définition d'un système PLM comme [Ameri et Dutta, 2005] :

> « une solution de gestion des informations qui soutient les process à travers l'ensemble du cycle de vie du produit au sein de l'entreprise étendue. »

Les informations relatives aux produits étant disséminées dans des documents aux formats et emplacements divers, la stratégie de PLM vise à maintenir une cohérence entre les différents acteurs et étapes intervenant lors du développement d'un produit (Fig. 5), tenant compte des méthodologies associées aux outils de **XAO** (Outil **X A**ssisté par **O**rdinateur), tels que la CAO ou la **FAO** (**F**abrication **A**ssistée par **O**rdinateur) et les systèmes de gestion des données techniques comme le **PDM** (***P**roduct **D**ata **M**anagement*) ou le **EDM** (***E**ngineering **D**ata **M**anagement*) dans une unique chaîne numérique [Stark, 2004], où tous les acteurs métier de l'entreprise ont un rôle à jouer [Danesi *et al.*, 2008].

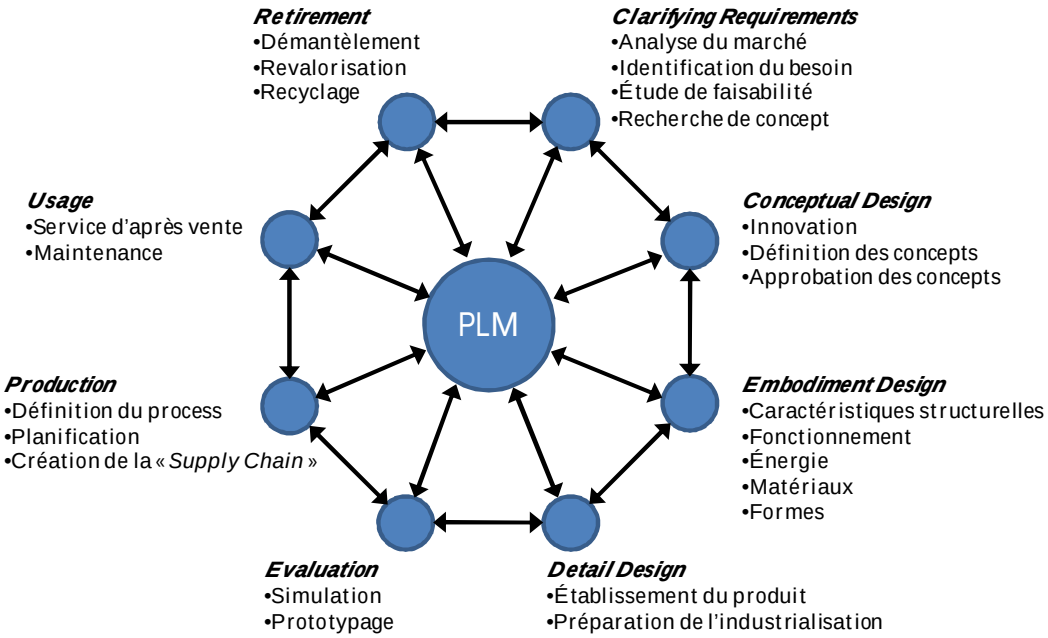


Fig. 5. Cycle de vie du produit et activités associées (adaptée de [Bissay, 2010])

Ce besoin d'un système de gestion des informations peut se justifier par le manque de maturité en capitalisation des connaissances sur les différentes étapes du cycle de vie du produit et le manque de maturité en ce qui concerne le couplage de ces connaissances avec la CAO [Lee *et al.*, 2008]. Ces tendances ouvrent des perspectives intéressantes pour améliorer le développement des produits, principalement en phase de conception préliminaire (avant la phase d'*embodiment design [Pahl et Beitz, 1996]*), en améliorant le taux de capitalisation et de réutilisation des informations pertinentes depuis un système PLM.

De ce fait, les étapes du processus d'ingénierie considèrent l'ensemble du cycle de vie du produit sont intimement liées et des contraintes mutuelles émergent. Les itérations entre les étapes d'ingénierie sont inévitables, et doivent être gérées efficacement afin de garantir des produits cohérents et validés à travers leur cycle de vie [Liu et Xu, 2001 ; Stark, 2004].

Les travaux de recherche actuels, centrés autour du domaine du PLM, sont ciblés sur la gestion et l'utilisation des informations dans les phases de *conceptual design* et de *embodiment design* [Tang et Qian, 2008]. Cette dernière décennie a vu de nombreux travaux de recherche, dans le domaine du PLM, autour :

- des outils et méthodologies d'échange d'informations [Ducellier, 2008 ; Jianjun *et al.*, 2008] ;
- des interactions avec les utilisateurs et les systèmes de CAO [Penoyer *et al.*, 2000 ; Qiu *et al.*, 2007 ; Komoto et Tomiyama, 2008] ;
- de l'intégration des connaissances associées au process dans le cycle de vie des produits [CIMdata, 2006 ; Gardan *et al.*, 2006 ; Curran *et al.*, 2007 ; Gholamian et Ghomi, 2007].

Ceci afin de décrire le concept, les fonctionnalités, le rôle, les futurs développements et technologies, et l'application industrielle de la stratégie PLM.

En ce qui nous concerne, nous avons fait le choix de travailler en visant l'intégration de notre contribution de recherche au sein d'un système du type PLM. Nos intentions sont de préparer une méthodologie, ses indicateurs et l'identification de ses différents acteurs, pour un rapprochement d'entreprise étendue. Les problématiques que nous considérons par la suite, et les recherches que nous réalisons, ont le but en perspective de se lier à une plateforme **PDM/PLM**.

Les problématiques de conception intégrée et la gestion et utilisation des informations produit-process dans les phases amont du processus de conception des produits, sont au cœur de notre démarche scientifique. L'implication directe des métiers lors des activités de conception et de développement des produits est un sujet courant pour des travaux de notre communauté scientifique (groupement AIP PRIMECA, GDR MACS, etc.), souvent axés autour de l'Ingénierie Concourante (***C****oncurrent* ***E****ngineering* – **CE**) et de la Conception pour l'X. Parmi les différentes méthodologies de DFX, la Conception pour la Fabrication, et la Conception pour l'Assemblage (***D****esign* ***F****or* ***A****ssembly* – **DFA**) sont les plus importantes du fait de leur impact direct sur le coût et la maitrise de la conception [Baxter, 1999].

L'application des contraintes, issues des processus de fabrication dans le développement d'un produit se fait aujourd'hui pendant les phases de conception détaillée, et engendre une évaluation de la conformité du produit avec les règles préétablies. Dès lors, toute déviation peut provoquer une modification du produit en question. Plusieurs méthodologies de « conception pour la fabrication » (DFM) existent. Elles sont plus ou moins utilisées – selon le process en question, le nombre des paramètres à vérifier et la complexité du produit analysé – pour évaluer la conformité d'un produit avec la méthode de fabrication choisie [Boothroyd, 1994 ; Zhang et Daguang, 1995 ; Swift et Brown, 2001].

Cependant, malgré les bénéfices significatifs possibles avec l'utilisation de ces méthodologies, le processus de conception et de développement est toujours susceptible d'améliorations. D'une part, ces méthodologies ne peuvent être mises en œuvre qu'une fois le développement du produit bien engagé et, d'autre part, les outils nécessaires pour les mettre en place ne sont pas d'utilisation transparente pour les différents acteurs métier impliqués. Par conséquent, les modifications du produit soulevées par ces méthodologies ne sont pas toujours prises en compte par le concepteur, en raison des temps d'ingénierie impartis, où elles engendrent un coût supplémentaire imputé au projet. Il existe donc une opportunité d'agir plus tôt dans le cycle de vie du produit, lors

de l'étape amont de *conceptual design* (Fig. 5), afin de garantir un produit respectant les contraintes fonctionnelles et de fabrication lors d'une démarche d'ingénierie concourante [Molcho *et al.*, 2008] et proactive[3] [Kimura *et al.*, 2004].

Un des buts principaux de l'ingénierie concourante est de construire des systèmes de **CAO intelligents**, en mettant à disposition des utilisateurs, les informations liés aux contraintes de fabrication pertinente [Gupta *et al.*, 1997]. Dans un système de CAO intelligent, une démarche de conception pour la fabrication s'obtient en effectuant des analyses de fabricabilité semi-automatiques – une approche qui évalue les problèmes de fabrication potentiels et guide le concepteur vers une solution optimisée. Il est attendu de ce système qu'il diminue l'obligation de suivre des guides métier au format papier ou de faire des appels aux experts, permettant donc aux concepteurs, de se focaliser sur les aspects créatifs et innovants du processus de conception. En outre, tenant compte de l'évolution des connaissances, des méthodes et outils dans une entreprise, les **bases de connaissances** couplées aux systèmes de CAO intelligents peuvent être actualisées automatiquement, avec un minimum d'interférence avec les activités de conception en cours.

En faisant un état des lieux de la situation en entreprise, nous avons pu remarquer que les démarches de vérification de fabricabilité traditionnelle ne se font qu'une fois la définition géométrique du produit bien avancée, et ceci par le biais d'interventions d'experts. Toute modification entraîne des délais supplémentaires engendrés par la modification des modèles CAO ou, dans le pire des cas, des dépenses pour modifier des outillages déjà réalisés. En conséquence, suite à l'observation des pratiques industrielles, nous constatons :

- une application tardive des connaissances de fabrication et son impact sur les choix même de conception ;
- un frein au développement et à l'amélioration du produit dû à la non exploitation des informations et des connaissances issues des métiers de la fabrication ;
- des boucles de rétroaction générées par l'intervention des experts à chaque demande de vérification ;
- l'importance de considérer les contraintes liées à la fabrication, le plus tôt possible et tout au long du processus de conception et de développement du produit ;
- un vaste cadre d'application d'une telle démarche et la nécessité de cibler les éléments clés aux différents acteurs métier.

Au vu de ces constats, nous considérons que **la prise en compte des problématiques et des connaissances liées à la fabrication** est nécessaire tout au long du processus de conception et de développement du produit. La dynamique actuelle des connaissances industrielles, en contexte PLM, révèle un besoin de modèles et de méthodologies pour supporter l'ingénierie intégrée et concourante du couple produit-process, et donc pour le

[3] Le terme proactif est originalement proposé par le Dr. Viktor Frankl, dans un contexte de neuropsychiatrie, et est désormais utilisé pour désigner le fait d'agir sur des faits ou des processus à venir, avant qu'ils ne causent problèmes. Source : Wikipedia.

maintien des facteurs de compétitivité [Eynard *et al.*, 2005]. A ce jour, l'éventail des méthodes existantes, dans le cadre du DFX, est appelé à s'intégrer dans la gestion du cycle de vie des produits, faisant partie des challenges actuels du PLM, surtout dans les phases préliminaires du processus de conception et de développement du produit [Curran *et al.*, 2007 ; Danesi *et al.*, 2008].

Dans ce contexte étendu, l'importance de **la relation entre les acteurs métiers et les informations liées aux produits et à ses procédés de fabrication** est mise en valeur. Cette relation suscite l'intérêt des chercheurs, d'une part par l'impact que cela peut avoir sur la conception et le développement des produits, et d'autre part pour les utilisateurs eux-mêmes. En « avançant » des pratiques couramment appliquées à la fin du processus de conception, vers les phases préliminaires, l'approche DFM transforme les analyses de fabrication en force de proposition pour les produits. De plus, les acteurs métiers – surtout les concepteurs – gagneront en souplesse et en réactivité, car ils pourront s'appuyer sur leurs propres outils de travail pour les guider, sans devoir attendre une validation périodique de la part d'un expert.

4. Le Projet de recherche CoDeKF

S'appuyant sur les différentes problématiques industrielles et scientifiques rencontrées, notre équipe de recherche a proposé la création d'un projet de recherche et de transfert de technologie, nommé **CoDeKF**[4] (***Co****llaborative* ***De****sign and* ***K****nowledge* ***F****actory*), qui a vu le jour en 2006. Labellisé par le Pôle de Compétitivité Véhicule du Futur[5], ce projet a facilité la mise en place des présents travaux de recherche avec pour objectif de fournir des modèles, des méthodes et des outils permettant de réduire les temps de développement des produits et de systèmes mécaniques, tout en améliorant la productivité en conception routinière. Quatre axes de recherche, spécifiques au projet, ont été identifiés et mis en œuvre pour atteindre ces objectifs :

1. Analyser les pratiques de conception existantes dans les collectifs d'ingénierie, développer des modèles de structuration des données de conception et des connaissances industrielles qui y sont associées, et les appliquer à l'intégration des métiers en conception collaborative ;
2. Développer des **méthodologies** et des **outils numériques** d'aide à la conception collaborative et à la gestion des connaissances industrielles sur l'ensemble du cycle de vie du produit, tout en les intégrant dans une perspective globale de développement du système d'information d'entreprise ou du cluster d'entreprises [Gomes et Sagot, 2002 ; Monticolo *et al.*, 2008 ; Demoly, Monticolo*, et al.*, 2010];
3. Élaborer des méthodologies de déploiement et d'accompagnement des démarches proposées, dans les entreprises, en tenant compte des freins psychosociologiques classiques liés à la conduite du changement[Demoly, Monticolo*, et al.*, 2010 ; Toussaint, Lebaal, Schlegel*, et al.*, 2010] ;
4. **Évaluer les performances** en élaborant des indicateurs, méthodologies et outils, permettant de mesurer les gains de productivité des collectifs d'ingénierie, dans

[4] http://www.codekf.org/
[5] http://www.vehiculedufutur.com/

un cadre de conception routinière tout d'abord, puis dans un cadre de conception innovante de produits de qualité.

Construire une plateforme PLM qualifiée d'apprenante a été la finalité du projet CoDeKF, avec comme but de pouvoir concevoir de manière « hautement productive » (c'est-à-dire avec une augmentation de production supérieure ou égale à 100%) des produits mécaniques fondés sur des règles métier capitalisées par le retour d'expérience. Ce projet de recherche et de transfert de technologie regroupe :

- 6 partenaires industriels : MARK IV SM, TDC Knowllence, INEVA, INCAT, FAURECIA, ZURFLUH-FELLER ;
- 4 partenaires académiques : UTBM, UTT, INSA Strasbourg, École Centrale Lyon ;
- 1 industriel pilote : TDC Knowllence (éditeur de logiciels dédiés à la conception).

La méthodologie globale du projet de recherche CoDeKF peut être décrite comme un ensemble de modèles, tels que le modèle **M**ulti-**D**omaines et **M**ulti-**V**ues (**MD-MV**) [Gomes et Sagot, 2002], représenté par la figure 6, et de processus mis en œuvre et déployé dans des réels projets d'ingénierie à travers une plateforme PLM [Gomes, 2008], permettant :

- la génération d'un squelette structuré, base pour la définition de la géométrie du produit, à partir de la gestion des informations liées au cycle de vie des projets, des produits et des process ;
- l'application d'une ingénierie à base de connaissances pour capitaliser et réutiliser des connaissances et générer des géométries répondant aux contraintes des métiers au cours du cycle de vie des produits [Monticolo *et al.*, 2008].

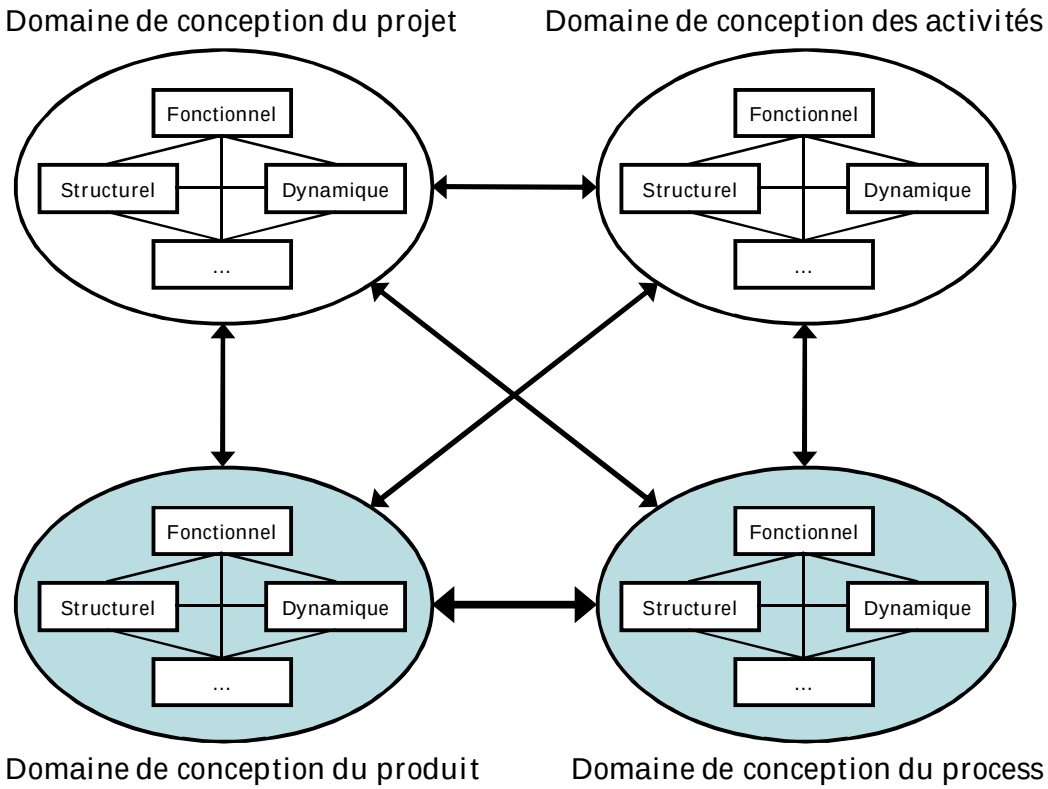


Fig. 6. Modèle Multi-Domaines, Multi-Vues [Gomes et Sagot, 2002].

Cette figure illustre les flux d'informations et des connaissances entre les différents domaines intervenant lors du processus de conception et de développement d'un produit ou d'un système mécanique. L'objectif principal de cette méthodologie est de réduire les temps dédiés aux activités routinières de conception, en interagissant avec les différents outils participant à la chaîne numérique PLM, par exemple les outils de gestion des données techniques, les outils de gestion des connaissances**,** les outils d'ingénierie à base de connaissances, les outils d'optimisation et les outils de **CAO** (Fig. 7).

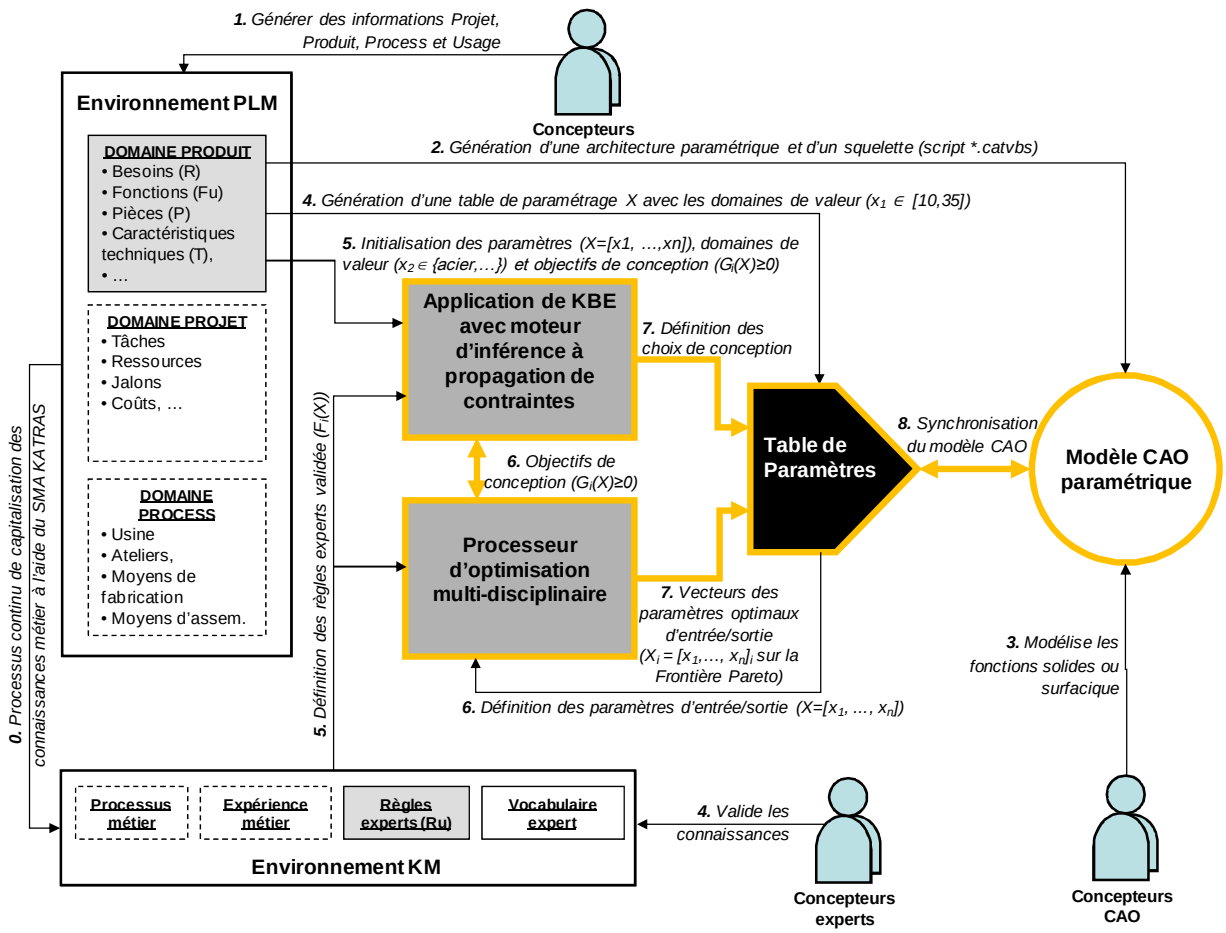


Fig. 7. Méthodologie générale du projet CoDeKF [Gomes, 2008] et cadre de recherche.

Cette figure montre le cadre général de la méthodologie du projet CoDeKF. Elle décrive les flux des connaissances et des informations liées à un produit, commençant par le traitement des informations projet, produit, process et usage. Ces informations sont insérés dans, et évalués par, un environnement PLM, qui les distribue aux activités de KBE et d'optimisation, afin de générer des paramètres optimaux. Ces paramètres optimaux sont ensuite insérés dans des modèles CAO paramétriques, afin d'être manipulés par les concepteurs CAO.

Notre contribution dans le cadre du projet CoDeKF se situe, plus spécifiquement, au niveau de **l'interaction entre les connaissances traitées** par le système et les **concepteurs**, via des modèles CAO robustes, et plus particulièrement au niveau du couple produit-process, pour la génération des modèles de produit, suivant les contraintes et les informations process.

5. Problématique, objectifs et originalités des travaux de recherche

Au cours des sections précédentes, nous avons mis en perspective les enjeux industriels et scientifiques associés aux domaines de l'ingénierie du produit et du processus de fabrication qui constitue le contexte de notre travail de recherche. Les sections suivantes nous serviront, d'une part, à décrire la problématique de recherche qui émerge de ces attentes, et d'autre part à exposer les objectifs à atteindre pour y répondre.

5.1. Problématique générale

Pour faire face aux constats remarqués précédemment, nous allons concentrer nos efforts sur l'amélioration des facteurs de compétitivité en ingénierie, en prenant en compte des problématiques de fabrication et conception robuste, dès les phases préliminaires du processus de conception et de développement de produits. Pour ce faire nous interviendrons à deux niveaux :

- lors de la définition d'un premier concept de produit, intégrant ses contraintes fonctionnelles et de fabrication ;
- lors de l'interaction du concepteur avec le modèle du produit, afin de vérifier si ses propositions sont toujours respectueuses des règles expertes de existantes, puis de les valider.

Le fait de s'impliquer lors de ces phases soulève un besoin en efficacité et en flexibilité, dans le processus de conception et de développement des produits. Ceci nous amène à faire le point sur des questions d'intégration et de gestion des informations techniques, dans le contexte du PLM. À ce jour, beaucoup de travaux portent sur l'introduction des **questions de fabrication** dans le domaine du PLM, cependant leur approche est différente. Les approches actuelles dans ce domaine portent sur l'intégration en conception des exigences métier mais d'une façon bridée (effet boîte noire, où les éléments sont figés d'avantage) [Zhao et Shah, 2005 ; Wognum et Trappey, 2008]. Dans les approches de conception pour la fabrication, les aspects d'interaction du concepteur et de gestion des informations et des connaissances font partie des challenges à surmonter pour développer des futures plateformes d'ingénierie.

Ajoutons que, bien qu'ayant obtenu des gains conséquents au niveau industriel, les approches de DFM rencontrent encore des difficultés en ingénierie, telles que :

- la prise en compte des facteurs de DFM qu'en phase de conception détaillée ;
- les contraintes importantes à prendre en compte spécialement pour des produits complexes ;
- les revendications issues des évaluations, ayant un grand impact sur la géométrie du produit évalué ;
- ou encore la difficulté à faire évoluer les règles et connaissances critiques.

C'est pour cette raison que nos travaux de recherche se recentrent sur une problématique de « **conception pour la fabrication en avant phase, en contexte PLM** », cherchant à répondre à deux questions primordiales :

Comment proposer un premier modèle optimisé du produit, respectant les règles fonctionnelles et de fabrication, lors des phases préliminaires du processus de conception et de développement **?**

Comment guider le concepteur dans son interaction avec le modèle du produit, pour toujours garantir un respect des informations produit-process **?**

5.2. Plan d'action à poursuivre

Les travaux présentés de cette thèse peuvent donc se synthétiser de la manière suivante : une proposition de conception et de traitement des informations du couple produit-process intégrant, dès les phases préliminaires du cycle de vie, les problématiques de fabrication et fonctionnelles du produit ; en lien direct avec les enjeux industriel et scientifique décrits précédemment.

Pour atteindre cet objectif directeur, la démarche se décline en trois étapes principales :

La première consiste à **proposer une méthodologie** s'appuyant sur le modèle proposée par Gomes [Gomes, 2008], qui permettra la définition, la propagation et la mise en action des informations produit-process entre les acteurs métiers impliqués.

La deuxième étape consiste à **formaliser les connaissances et informations** produit-process sur des modèles CAO paramétrés génériques, pour ensuite les optimiser avec des algorithmes multicritères. Ces mécanismes permettront de prendre en compte des informations des processus en aval, lors des phases préliminaires du processus de conception et de développement de produits.

La troisième et dernière phase est la **vérification**, tout au long du processus de conception et de développement, de l'adéquation du produit vis-à-vis de ses contraintes, d'une part par la vérification du modèle au cours du développement, et d'autre part par une vérification finale avant de le déclarer prêt pour l'industrialisation.

6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire, d'une manière générale, les enjeux industriels et scientifiques donnant un contexte à notre problématique de recherche. Ces enjeux soulèvent la nécessite de travaux de recherche dans les domaines de traitement des informations et des connaissances métier, de la conception aidée par ordinateur ou encore de l'ingénierie routinière.

Nous constatons aussi la nécessité des entreprises de faire intervenir plus des connaissances, plus tôt dans le cycle de vie des produits développés. Même s'ils existent déjà des méthodologies qui pourraient aider les entreprises, tenant compte des informations et des connaissances détenues sur leurs produits, nous observons que celles-ci ne sont pas toujours adoptées par les entreprises.

Cette nécessité nous a servi de guide pour établir une recherche bibliographique sur les divers domaines abordés. Le deuxième chapitre nous servira à présenter un état de l'art des travaux scientifiques portant sur les grands axes de notre problématique. Plusieurs axes seront traités : la gestion du cycle de vie des produits, l'ingénierie intégrée, la conception orientée pour la fabrication, et la gestion des connaissances en conception. Ceci afin de mieux nous placer pour proposer une méthodologie de conception et développement des produits, basée sur des connaissances du couple produit-process.

CHAPITRE 2.
ÉTAT DE L'ART

"Next o'er his books his eyes began to roll,
In pleasing memory of all he stole;
How here he sipp'd, how there he plunder'd snug,
And suck'd all o'er like an industrius bug."

Alexander Pope.

CONTENU DU CHAPITRE

1. Introduction 27

2. Les concepts d'ingénierie 27

2.1. L'ingénierie intégrée 27

2.2. Conception pour l'X 29

3. Conception pour la fabrication 31

3.1. Objectifs de l'approche de DFM 31

3.2. Deux différentes types d'approches DFM : l'approche directe et l'approche indirecte 32

3.3. L'interaction utilisateur / système 39

3.4. La mesure de la fabricabilité 39

3.5. Conception à partir d'une fabrication 40

3.6. Conclusion sur la gestion des liens entre produit et processus de fabrication 41

3.7. Bilan et positionnement 41

4. Gestion du Cycle de vie des Produits 42

4.1. *Product Lifecycle Management* 42

4.2. Utilisation des informations produit-process 43

4.3. La gestion des connaissances en ingénierie 44

4.4. Bilan et positionnement 47

5. Représentation et exploitation des connaissances en conception et développement de produits 47

5.1. Approche d'ingénierie à base de connaissances (KBE) à l'aide de Systèmes experts 48

5.2. Approche de KBE par raisonnement à partir de cas 49

5.3. Approche de KBE par technologie de groupe 50

5.4. Approche de KBE par propagation de contraintes 51

5.5. Conclusions sur les approches de représentation et de capitalisation des connaissances 52

5.6. Bilan et positionnement 53

6. Mise en application de démarches de KBE et optimisation lors de la conception et développement de produits 54

6.1. Les applications informatiques de KBE 54

6.2. Optimisation en conception.....58

6.3. Bilan et positionnement 61

7. Conclusion : besoin d'une méthodologie adaptative.....61

1. Introduction

Ce chapitre présente un état de l'art sur la conception orientée pour la fabrication et sur la gestion des connaissances en lien avec la problématique exposée dans le chapitre précédent. Pour ce faire, le chapitre est structuré de la manière suivante : la section 2 fait un état des lieux des concepts d'ingénierie, spécialement ceux de l'ingénierie intégrée et de la **Conception pour l'X** ; la section 3 se rapporte aux travaux de recherche dans le domaine de la **conception pour la fabrication** ; la section 4 met en évidence les concepts de **gestion des données techniques** ; la section 5 détaille la **représentation et l'exploitation des connaissances** au sein du processus de conception et de développement, liées à la démarche de DFM ; enfin, la dernière section (6) décrit les dernières avancées portant sur le couplage entre gestion des connaissances et développement de produits, en interprétant les concepts de **KBE** et d'**optimisation géométrique** dans le processus de conception et de développement des produits. Cet état de l'art permet de définir le périmètre de notre contribution de recherche, et de traduire un référentiel scientifique pour positionner nos travaux.

2. Les concepts d'ingénierie

Les temps de développement et de fabrication des produits sont des indicateurs de la capacité des entreprises et marquent l'évolution actuelle du marché. Ainsi, pour améliorer leur compétitivité, les entreprises doivent réduire ces temps, sans pour autant pénaliser la qualité du produit. Cette nécessité d'agir est remarquée au niveau de l'ingénierie et voit l'introduction des notions de concourance, d'intégration, de collaboration [Lu *et al.*, 2007] au sein du processus de conception et de développement des produits.

Dans les sections suivantes nous décrivons brièvement la typologie des méthodes de conception, pour ensuite présenter les concepts d'ingénierie intégrée et de la conception pour X. La conception de produits a été un sujet de recherche qui a fait l'objet de travaux intensifs au cours des 40 dernières années [Hubka et Eder, 1988 ; Hauschild *et al.*, 2005 ; Li et Qiu, 2006]. Aujourd'hui, l'ensemble de la communauté lié à ce domaine reconnait une typologie, mettant en avant deux classes de résolution de problèmes d'ingénierie [Deneux, 2002] :

- la **conception routinière**, intégrant la conception routinière et la reconception. L'intérêt étant de reconcevoir un produit dont le concept est déjà connu, généralement à partir d'un nouveau cahier des charges, et pour lequel nous connaissons déjà des nombreux produits concurrents et expériences passées ;
- la **conception initiale**, intégrant la conception innovante et la conception créative. L'idée est de concevoir et d'inventer un nouveau produit ou process, sans référence préalable ni expérience passée réussie.

2.1. L'ingénierie intégrée

Une vision nouvelle du processus de conception et de développement de produits est apparue à la fin des années 1980, sous différentes appellations telles que ingénierie

intégrée [Tichkiewitch, 1994], **simultanée** [Bocquet, 1998], **concourante** (***C****oncurrent* ***E****ngineering* – **CE**) [Sohlenius, 1992], voire **collaborative** [Li *et al.*, 2005], dans un souci d'efficacité, et pour faire face à l'enchainement séquentiel des activités du processus d'ingénierie des produits. Cette vision du processus d'ingénierie, initialement développée pendant la seconde guerre mondiale [Ziemke et Spann, 1993], est encore un sujet d'actualité (Fig. 8). Au cours de cette section, nous allons utiliser le terme d' « ingénierie intégrée » pour désigner les problématiques liées aux facteurs de compétitivité, mais également aux préoccupations et contraintes issues des métiers en aval du processus de conception et de développement [Prasad *et al.*, 1993].

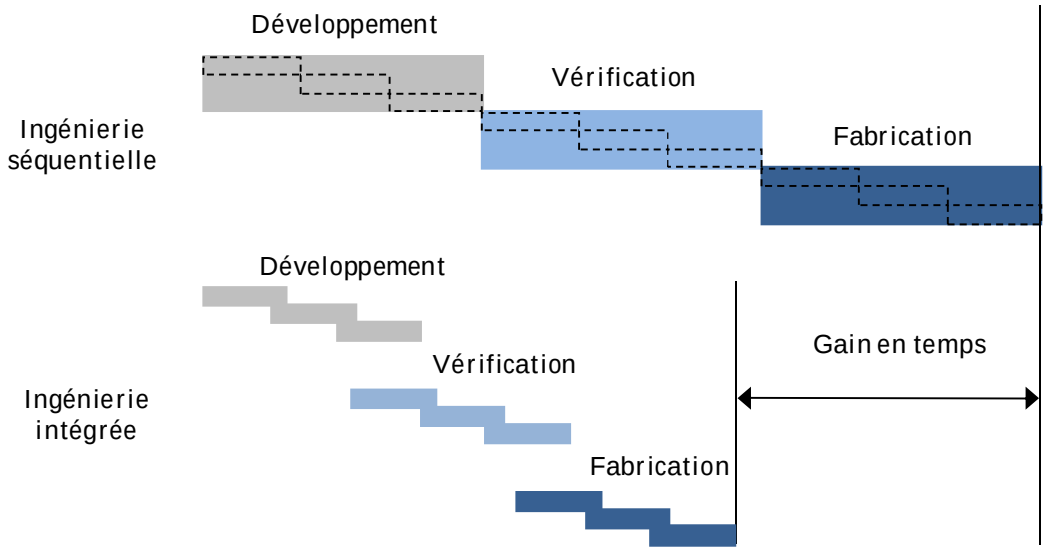


Fig. 8. De l'ingénierie séquentielle à l'ingénierie intégrée (adapté de [Scaravetti, 2004]).

Sur un processus d'ingénierie séquentielle, les différentes tâches ne commencent que si la précédente est déjà complétée, comme nous pouvons l'observer sur la figure 8. En ingénierie intégrée, les différentes tâches se recouvrent, si possible, ce qui se traduit par un gain de temps pouvant être dédié à d'autres activités du processus de conception et de développement de produits.

2.1.1. Définitions

Une des définitions de l'ingénierie intégrée, qui souligne l'importance des activités en aval du processus de conception et de développement, est celle de [Abdalla, 1999] :

> « ***C****oncurrent* ***E****ngineering* (**CE**) is the consideration of the factors associated with the life cycle of the product during the design phase. These factors include product functionality, manufacturing, assembly, testing, maintenance, reliability, cost and quality. »

Cette description est complétée par d'autres auteurs soulignant la parallélisation des activités au sein du processus de conception et de développement [Sohlenius, 1992] et l'interaction des acteurs métier [Tichkiewitch, 1994]. Ce défi d'intégration de l'ensemble des métiers, dès que possible, ainsi que des contraintes liées au cycle de vie d'un produit dans sa phase de développement, est toujours d'actualité, et fait partie intégrante des démarches de gestion de cycle de vie des produits.

2.1.2. Objectifs

Le déroulement traditionnel des processus industriels basés sur une culture taylorienne du travail a souvent été pensé de façon séquentielle, et a engendré des situations couramment appelées « *over-the-wall* ». Cela signifie qu'un mur peut se trouver érigé entre les différents acteurs et services de l'entreprise, notamment entre le bureau d'études et les services situés en aval (Fig. 9) [Boothroyd, 1994].

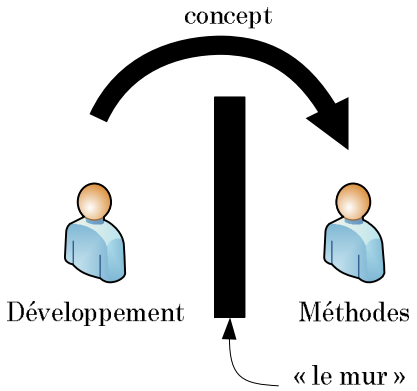


Fig. 9. Séparation entre le service dédié au développement des produits et les services associés aux activités situées en aval (adapté de [Boothroyd, 1994]).

L'ingénierie intégrée et de CE donne des éléments de réponse à ces problèmes, en proposant un nouveau cadre pour le processus de conception et de développement des produits. Parmi les objectifs de l'ingénierie intégrée, nous trouvons l'**amélioration de la qualité** [Yeh, 1992], la **minimisation des coûts** [Grewal, 2005], la **réduction des temps de développement** [Riou et Mascle, 2009] ou encore l'**amélioration de la flexibilité, productivité, efficacité et robustesse** [Lin, 2005 ; Ozturk, 2006]. Pour parvenir à ces objectifs, les approches de CE se sont orientées vers le travail entre équipes multifonctionnelles et pluridisciplinaires [Abdalla, 1999], afin de faciliter la compréhension des phases du cycle de vie du produit.

Sapuan *et al.* incluent un deuxième objectif à celui du travail en équipe [Sapuan *et al.*, 2006], qui est la mise en œuvre de :

- méthodologies telles que la conception pour l'X ;
- systèmes d'information (CAO, GDT, etc.) pour opérer et implémenter cette nouvelle vision ;
- nouvelles approches organisationnelles en mode collaboratif projet, intégrant plusieurs métiers.

2.2. Conception pour l'X

Le concept de conception pour l'X a émergé à la fin des années 1950 avec comme objectif de mieux considérer les décisions prises en amont, au sein du processus de conception et de développement sur les métiers situés en aval [Peck, 1973 ; Deng et Yu, 2006]. En effet, l'approche de DFX est un ensemble de méthodologies visant à améliorer les produits par l'intégration d'objectifs et de préoccupations variés lors de la conception [Huang et Mak, 1997 ; Kuo *et al.*, 2001].

Plus précisément, les approches de DFX sont une multitude de méthodes de conception, où le « X » représente un point de vue lié aux phases du cycle de vie du produit, tels que la fabrication (DFM), l'assemblage (DFA), le recyclage (***D**esign **F**or **R**ecyclability* – **DFR**), etc., mais également aux facteurs de compétitivité voire aux métiers intervenants dans le processus de conception et de développement des produits (***D**esign **F**or **E**nvironment* (**DFE**), ***D**esign **F**or **Q**uality* (**DFQ**), ***D**esign **F**or **C**ost* (**DFC**), etc.) (Tab. 1).

Tab. 1. Récapitulatif des approches de DFX, leurs objectifs et leurs supports

Type d'approche	Objectif	Support / Critère
Design for Manufacture / Assembly (DFM / DFA)	Réduire les coûts de production	Guide de conception, recommandations de fabrication-assemblage / coûts, temps, contraintes fabrication - assemblage
Design for Disassembly (DFD)	Réduire les temps/coûts	Vérification de désassemblage / coûts/temps de désassemblage
Design for Recyclability (DFR)	Augmenter le nombre de composants recyclés	Guide de conception / taux de recyclabilité
Design for Environment (DFE)	Réduire l'impact environnemental	Guide de conception (procédé, matériaux, etc.) / impact environnemental à travers l'analyse du cycle de vie
Design for Quality (DFQ)	Mieux répondre aux expectatives du client	Guides, analyses du marché, connaissance intime des produits / priorités des exigences géométriques en fonction des exigences client, indicateurs 6σ
Design for Cost (DFC)	Réduire les coûts	Guides produit-process-matériaux / coûts estimés

Chaque approche de DFX vise à guider le concepteur dans le développement de son produit, par l'utilisation d'informations, de connaissances, d'analyses et de recommandations, lui permettant ainsi d'avoir conscience de l'impact de la caractéristique ou du métier X [Kuo *et al.*, 2001]. De ce fait, la tendance pour les approches de DFX consiste à [Holt et Barnes, 2009] :

- **intégrer les différentes approches et contraintes propres à chaque métier X ou phase du cycle de vie dès que possible**, idéalement dès les phases amont du développement du produit. Des travaux de recherche et des démarches se centrent actuellement sur l'implication des connaissances produit-process dès la conception initiale ;
- **renforcer le processus de conception et de développement des produits** par la prise en compte de nouvelles contraintes telles que les chaînes d'approvisionnement, les propriétés effectives du produit ou les nouvelles méthodes en entreprise étendue ;
- **considérer les approches comme un ensemble**. En effet, les démarches étant parfois singulières lors de leur considération, il existe un besoin de gérer les compromis en conception [Huang *et al.*, 2000]. La méthode hybride de **DFMA** (***D**esign **F**or **M**anufacture and **A**ssembly*) proposée par [Boothroyd, 1994] va dans le sens de cette problématique car el propose de trouver le juste milieu entre les besoins (parfois opposés) de fabrication et d'assemblage.

Nous allons détailler, dans la section suivante, les travaux de recherche associés au domaine de la conception pour la fabrication.

3. Conception pour la fabrication

Parmi les approches de DFX concernant les phases du cycle de vie du produit, l'approche de conception pour la fabrication, avec l'approche de conception pour l'assemblage, est une des composantes qui suscite le plus d'intérêt auprès des chercheurs et des industriels depuis près de trente ans. Les retours, éventuellement nombreux, sur la conception (si celle-ci n'est pas compatible avec les possibilités de fabrication), en plus de l'évolution des marchés et la diminution de la taille des séries, ont poussé vers la prise en compte des contraintes, informations, connaissances et procédures de fabrication le plus tôt possible pour obtenir une définition de pièce définitive rapidement. La section suivante décrit, d'une manière générale, les objectifs et les principes de l'approche de conception pour la fabrication, ainsi que les travaux de recherche associés.

3.1. Objectifs de l'approche de DFM

Le concept de DFM existe depuis plus de deux cents ans, mais c'est pendant la période de la Seconde Guerre Mondiale que ses efforts ont commencé à être identifiés [Ziemke et Spann, 1993]. Les approches traditionnelles vont de la construction des équipes inter-départements au développement de guides de DFM pour les concepteurs. Plus récemment, avec l'apparition des systèmes CAO/FAO [Ohsuga, 1989] plus sophistiqués, des intégrations plus efficaces, des approches DFM au sein des systèmes CAO, ont pu être réalisées [Teti et Kumara, 1997]. Ceci demande l'**intégration d'indicateurs de fabrication directement dans les systèmes CAO**, afin d'analyser la fabricabilité du produit lors de sa phase de définition géométrique [Harhalakis *et al.*, 1993 ; Shanker et Jansson, 1993 ; Boothroyd, 1994 ; Molcho *et al.*, 2008]. L'objectif principal de l'approche DFM est de considérer les exigences fonctionnelles et techniques du produit avec ses contraintes de fabrication, afin d'identifier et anticiper les problèmes de fabrication pendant le processus de conception et de développement du produit, réduisant ainsi le délai de mise en œuvre tout en améliorant la qualité du produit [Gupta et Nau, 1995].

Le lien qui existe entre le produit et son processus de fabrication associé a fait l'objet d'études approfondies pour différents procédés de fabrication. Ce lien existe entre l'ensemble de données concernant la définition du produit et la définition du processus de fabrication.

Il faut remarquer que, traditionnellement, le processus de fabrication est défini à partir des choix faits au cours de la phase de définition géométrique du produit. La réciproque est également vraie dans la mesure où la définition du produit peut être faite à partir des choix faits sur les procédés et processus de fabrication. Cet aspect a été identifié par Coyne *et al.*, qui ont proposé un modèle de conception intégrée, basé sur une boucle **analyse-synthèse** [Coyne *et al.*, 1990]. L'**analyse** constitue le choix des procédés, **synthétisés** au moment d'intégrer les contraintes des procédés au cours du processus de conception et de développement du produit. De même, Ishii *et al.* identifient ces notions d'intégration comme étant, d'une part, la définition des données produit (géométriques,

etc.), compatibles avec les procédés de fabrication choisis, et d'autre part, le choix des procédés de fabrication à partir des exigences fonctionnelles et géométriques associées au produit [Ishii *et al.*, 1990]. Ce premier point, plus communément appelé DFM, peut être décomposé en plusieurs activités comme représentées sur la figure 10.

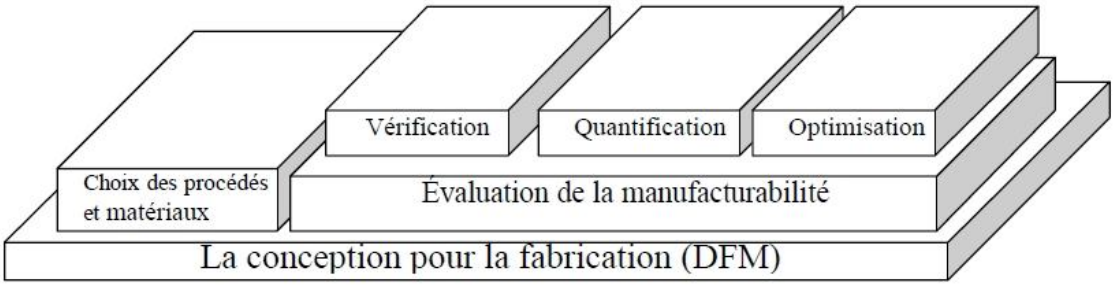


Fig. 10. La conception pour la fabrication [Vliet *et al.*, 1999].

Le principe de **moindre engagement** décrit assez bien le choix des procédés et le concept de DFM [Roucoules *et al.*, 2006]. Tout acteur du processus de conception et de développement doit apporter les informations dont il dispose sur le problème dès qu'il le peut, mais seulement s'il est capable de les justifier. Ceci permet de prendre en compte, le plus tôt possible, les contraintes qui apparaîtront dans la résolution du problème tout en responsabilisant l'acteur sur la réalité de ces contraintes à l'instant t donné.

En nous appuyant sur divers travaux de recherche [Bakerjian, 1992 ; Shanker et Jansson, 1993 ; Gupta et Nau, 1995 ; Das *et al.*, 1996 ; Kuo *et al.*, 2001 ; Wang *et al.*, 2007], nous allons classer les différentes approches DFM selon trois aspects : le type d'approche, l'interaction entre le concepteur et le système, et la mesure de la fabricabilité.

3.2. Deux différentes types d'approches DFM : l'approche directe et l'approche indirecte

Nous pouvons distinguer deux types d'approche : l'approche directe et l'approche indirecte.

3.2.1. L'approche DFM directe

En ce qui concerne l'approche directe, des règles et des algorithmes sont appliqués pour identifier les paramètres de conception qui pourraient générer des portions de pièces difficilement fabricables. Pour cela, des définitions géométriques précises sont nécessaires afin d'étudier les produits. Ces guides et règles prennent plusieurs noms, tels que « fiches de préconisations », « guides de conception » ou « cartes de savoir-faire métier » comme identifiés par [Sabourin *et al.*, 2002].

3.2.1.1. L'approche d'Ashby

Ashby *et al.* proposent une approche pour la sélection des procédés et des matériaux à utiliser [Ashby *et al.*, 2004]. Ils suggèrent de sélectionner les procédés de fabrication en filtrant tous les procédés possibles et en éliminant ceux qui ne sont pas compatibles avec la géométrie et avec le matériau préalablement définis. Les résultats sont ensuite classés par rapport aux critères de coût puis finalement par l'expérience des experts et la

disponibilité des ressources de production. L'approche souligne le lien très étroit entre le procédé de fabrication et le matériau, ce qui rend la première phase difficile car pour choisir le procédé il faut connaitre le matériau et vice-versa. Un résumé de l'approche est décrit par la figure 11. Cette figure décrit succinctement les différentes étapes pour la sélection des matériaux et des process, proposées par Ashby *et al.*, de façon séquentielle, à partir de la totalité des matériaux et procédés de fabrication disponibles.

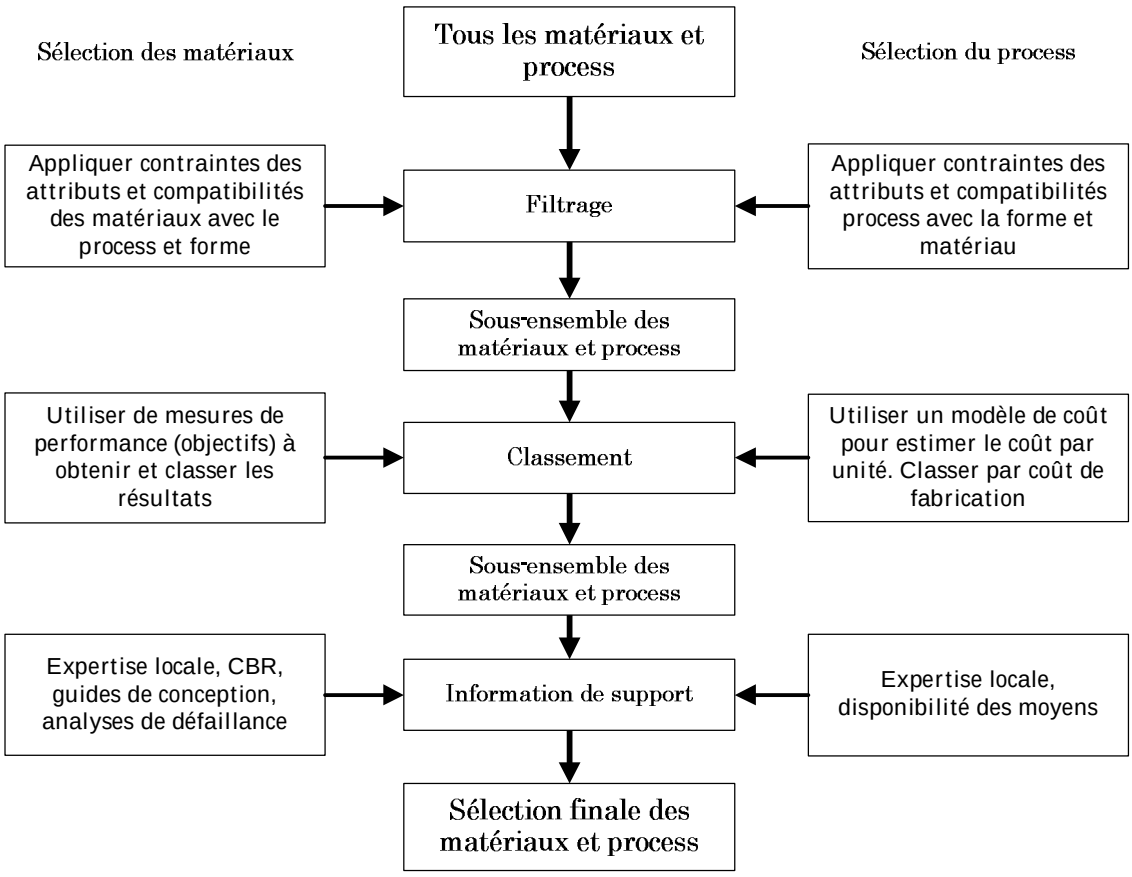


Fig. 11. Sélection des procédés et des matériaux, adapté de [Ashby *et al.*, 2004]

L'outil informatique baptisé ***C**ambridge **E**ngineering **S**elector* (***CES** Selector*) a été développé pour supporter l'approche d'Ashby *et al*. Cet outil permet de sélectionner les matériaux et procédés de fabrication utilisables pour un produit donné. Le choix se base sur le triplet fonction-objectif-contrainte : d'après la fonction choisie pour le produit, des objectifs sont définis et des contraintes sont imposées. Le principe de fonctionnement de cette application repose sur une base de données des caractéristiques des matériaux et des procédés de fabrication, le concepteur étant responsable de la décision finale.

L'avantage de cette application repose sur la **possibilité d'avoir un processus de conception accéléré** (un accès immédiat à des informations complètes et détaillées) ainsi qu'un accès direct à toute donnée interne sur les procédés, matériaux et fournisseurs. L'inconvénient de l'approche subsiste en la nécessité de connaissance du couple procédé/matériau.

3.2.1.2. Computer Aided Process Planning (CAPP)

Des approches directes existent, avec une démarche plus algorithmique, plus communément appelées ***C**omputer **A**ided **P**rocess **P**lanning* (**CAPP**). Généralement, ces approches interviennent sur des pièces figées, dont la géométrie ne sera plus remise en question [Grabowik *et al.*, 2005]. Deux types d'approche CAPP existent : l'approche générative et l'approche par variante [Marri *et al.*, 1998 ; Bernard, 2003].

L'approche par variante est la première approche qui a été utilisée pour informatiser la conception du processus de fabrication [Marri *et al.*, 1998]. Elle repose sur l'idée que pour des **pièces similaires**, nous pouvons choisir des **processus de fabrication similaires**. Il est donc possible de retrouver des produits similaires et d'adapter leur processus de fabrication aux produits en cours de traitement (principe du raisonnement à partir de cas). Différents principes pour retrouver et grouper les produits similaires existent (voir section 2.5.2 à la page 49).

L'approche générative quant à elle, est une évolution de l'approche par variante. Son but est de générer le processus de fabrication en appliquant un savoir-faire de génération de gamme sur la description du produit (un modèle CAO dans la plupart des cas). Des bases de données de fabrication, une logique de décision et des algorithmes sont les principaux composants de l'approche. En outre, des approches mixtes existent aussi, combinant les avantages des deux approches.

Plusieurs systèmes ont été développés, dans divers domaines tels que l'usinage ([Yeol Lee et Kim, 1998 ; Waiyagan et Bohez, 2009] et dans le projet USIQUICK [Derigent, 2005]), l'assemblage [Nof *et al.*, 1993 ; Ciurana *et al.*, 2008], l'injection plastique [Lim *et al.*, 1994 ; Chen et Liu, 1999], le moulage des pièces plastiques et métalliques [Kadidal et Bidanda, 1993 ; Fu *et al.*, 2002] ou la tôlerie [Gao *et al.*, 2000 ; Duflou *et al.*, 2005]. Il est intéressant de noter que la plupart des travaux et des systèmes existants portent sur les domaines de la fabrication métallique, et surtout sur le domaine de l'usinage.

3.2.2. L'approche DFM indirecte

L'approche indirecte, quant à elle, repose sur l'idée de définir une gamme de fabrication, puis d'en modifier une ou plusieurs parties dans le but de réduire le coût ou le temps de fabrication [Gupta et Nau, 1995]. L'approche en elle-même est plus facile à mettre en œuvre que l'approche directe, mais elle comporte un désagrément majeur : l'obligation de proposer une gamme de fabrication initiale, ce qui fait de celle-ci une démarche difficilement envisageable lorsqu'on s'intéresse aux phases initiales du processus de conception et de développement. L'approche de Gupta ou celle de Boothroyd [Boothroyd, 1994 ; Gupta et Galloway, 2003], se comptent parmi les approches dites indirectes.

3.2.2.1. *Operations Hexagon*, l'approche de Gupta

L'approche d'*Operations Hexagon* propose des couples matériau / procédé en utilisant un algorithme de sélection puis des filtrages détaillés. Elle se décompose en trois phases [Gupta et Galloway, 2003] :

- l'algorithme identifie des couples matériau-procédé en parcourant une base de matériaux et en les sélectionnant par rapport aux exigences économiques et géométriques du produit. Pour chaque matériau sélectionné, le processus est

réalisé sur une base de procédés, en sélectionnant ceux qui sont compatibles avec le matériau et les exigences. Le résultat est un ensemble de couples matériau / procédé compatibles répondant aux exigences ;

- des processus de fabrication possibles sont construits à partir des couples identifiés lors de la phase précédente ;
- finalement un filtrage par rapport aux contraintes est possible. Celui-ci peut se faire avec des outils d'estimation de coût tels que SEER-DFM[6], le concepteur étant responsable du choix définitif.

Le modèle d'information utilisé par l'approche de Gupta, pour la gestion des données des procédés et matériaux, est visible sur la figure 12.

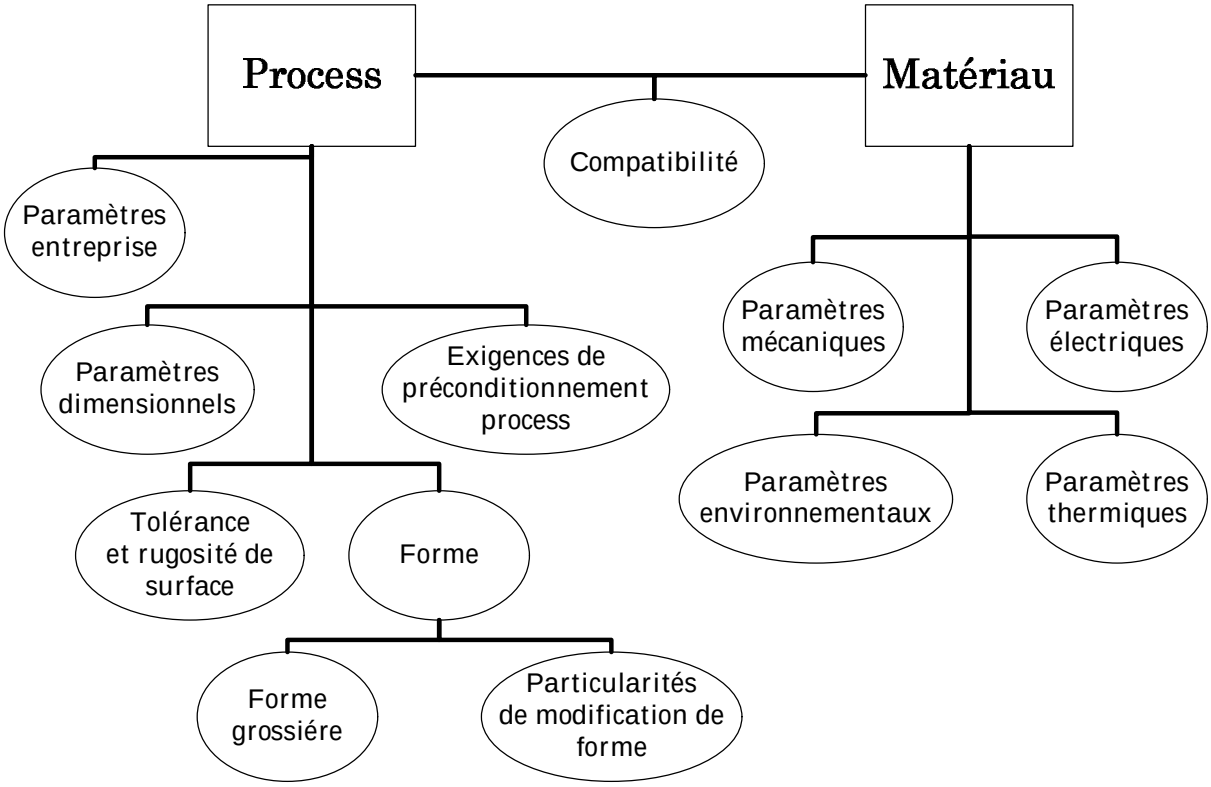


Fig. 12. Modèle d'information Procédés et Matériaux [Gupta et Galloway, 2003].

De ce modèle nous pouvons déduire l'importance que l'approche d'*Operations Hexagon* porte sur le couple procédé-matériau. Chacun de ces éléments comporte des contraintes spécifiques liés, telles que les paramètres mécaniques ou les tolérances admises, qui aident à faire la sélection finale du matériau et du procédé de fabrication associé.

3.2.2.2. L'approche de Boothroyd et Dewhurst

L'approche de Boothroyd et Dewhurst [Dewhurst et Boothroyd, 1988] reste relativement proche de celle de Gupta, dans le sens où les choix se font par des couples procédé de fabrication / matériau. La sélection se fait en évaluant les capacités des procédés de fabrication à réaliser les attributs géométriques spécifiés, ainsi que les contraintes des matériaux. Le tableau 2 propose un exemple des données liées aux procédés de moulage.

[6] http://www.galorath.com

Tab. 2. Procédés et leurs capacités à réaliser des attributs donnés, d'après [Boothroyd et Radovanovic, 1989].

Process	Part size	Tolerances	Surface finish	Shapes produced competitively
Sand casting	W : 0,2lb-450Ton Min wall : 0,125in	Gen: ±0,02(1in), ±0,1(24in) Across parting line add ±0,03(50in^2), ±0,04(200in^2)	500-1000 micro-inches	Large parts with walls and internal passages of complex geom. requiring good vibration damping characteristics
Investment casting	W : 1oz-110lb Major dim : to 50in Min wall: 0,025 (ferrous), 0,06 (nonferrous)	Gen: ±0,002(1in), ±0,004(6in)	63-25 micro-inches	Small intricate parts requiring good finish, good dim. control, and high strength
Die casting	Min wall (in) : 0,025 (Zn) Min hole dia(in): 0,04 (Zn) Max w (lb): 35 (Zn)	Gen: ±0,002(1in), ±0,005(6in)(Zn) Across parting line add ±0,004	32-85 micro-inches	Similar to injection molding
Injection molding (thermo-plastics)	Envelope : 0,01in^3-80ft^3 Wall : 0,03-0,25in	Gen: ±0,003(1in), ±0,008(6in) Hole dia: ±0,001, ±0,002 Flatness: ±0,002in/in +5% tol. per cavity	8-25 micro-inches	Small to medium sized parts with intricate details and good surface finish
Structural foam molding	W : 25-50lb Wall : 0,09-2in	Approx same as injection molding	Poor: paint generally required	Large, somewhat intricate parts, requiring high stiffness and/or thermal or acoustical insulating props.

Ce tableau permet de voir l'intérêt que l'approche porte sur les capacités des procédés de fabrication. Les exigences du produit et de son matériau associé sont comparées aux plages réalisables par chaque procédé étudié. Le choix final est, comme pour la méthode de Gupta, basé sur l'élimination des couples non admissibles, ainsi que sur une considération d'autres critères, notamment le coût.

Boothroyd et Dewhurst ont aussi développé une méthode hybride entre DFM et DFA, appelée DFMA [Boothroyd, 1994], comprenant un outil informatique permettant de : réduire la complexité du produit et l'estimation du coût d'assemblage (DFA), estimer le coût du concept, et aider aux choix des procédés et des matériaux utilisés (DFM).

3.2.2.3. Approche par *task-based process selection*

L'approche de Lovatt par *Task-Based Process Selection,* se base sur la sélection des procédés par fonctions de fabrication [Lovatt et Shercliff, 1998] telles que l'emboutissage d'une tôle, découpage des excédents, pliage des rebords, etc. L'idée est de déterminer pour chaque fonction quel procédé de fabrication utiliser. La sélection finale repose sur la combinaison des attributs du produit, des matériaux et du procédé à utiliser, garantissant la satisfaction des exigences géométriques.

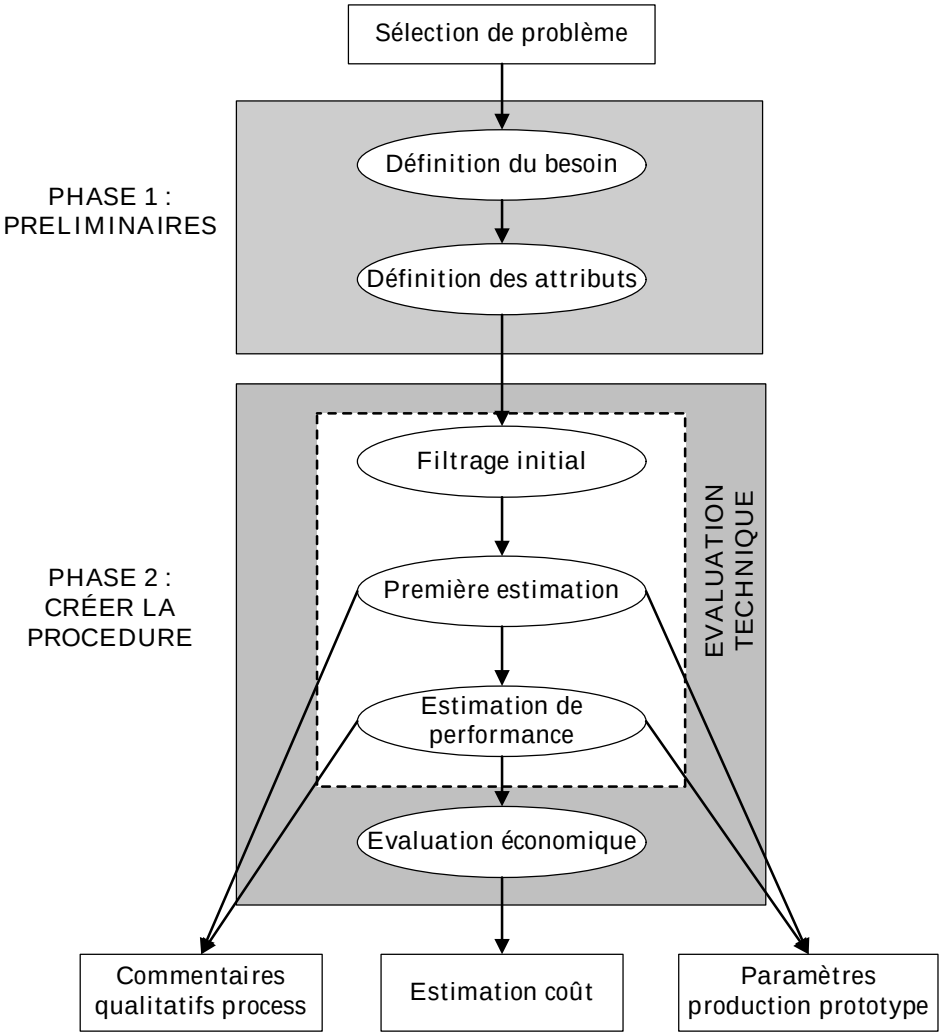


Fig. 13. Approche de Lovatt [Shercliff et Lovatt, 2001].

La méthode, décrite via la figure 13 précédente, se fait pour chaque fonction de fabrication et peut être décomposée en deux phases distinctes :

- Phase 1 : la fonction a préalablement été définie, la première étape consiste à définir ses exigences et les résultats attendus. La deuxième consiste à définir les attributs de la fonction relatifs au processus de fabrication, au matériau et au produit (ex : le type de processus, le type de matériau, la forme du produit, etc.).
- Phase 2 : cette phase est décomposée en quatre étapes (trois purement techniques et une économique) pour évaluer les possibilités de fabrication :
  - un filtrage initial pour éliminer les procédés inutilisables par des critères d'incompatibilité avec le matériau ou la taille du produit ;
  - une évaluation primaire basée sur des critères de production, les critères techniques ayant déjà été validés ;
  - une évaluation des performances pour classer les procédés probables ;
  - une dernière évaluation économique afin de trouver la possibilité la plus rentable.

L'approche de Lovatt se distingue de celle d'Ashby *et al.* par sa **séquentialité**. Cette séquentialité permet la considération de détails plus fins par procédé de fabrication, due à la réduction systématique du nombre de possibilités de fabrication à choisir.

3.2.2.4. Approche par *design compatibility analysis*

L'approche d'Ishii *et al.* présente la particularité de procéder à trois types de sélection de procédés, au cours de trois instants au sein du processus de conception et de développement du produit [Ishii *et al.*, 1990] :

- fonctionnelle : sélection dépendante de la fonction du produit, réalisée lors de la définition fonctionnelle et lors de la recherche conceptuelle ;
- préliminaire : sélection effectuée lors de la phase de conception préliminaire, au moment où les choix de géométrie, des matériaux ou même de l'échelle de production ne sont pas encore validés ;
- par fonction de fabrication : sélection lors de la phase de conception détaillée, elle détermine le dernier choix des procédés de fabrication.

L'objectif de l'approche d'Ishii *et al.* est de sélectionner les procédés à utiliser à partir d'une adéquation entre les données de conception et celles de fabrication lors de deux étapes :

- lors de la première étape, les facteurs importants affectant la sélection des procédés de fabrication sont identifiés (Fig. 14) ;
- la seconde étape consiste à développer des schémas de représentation pour les connaissances utilisées lors de la sélection des procédés de fabrication. La sélection passe du choix qualitatif des connaissances de compatibilité entre le développement et la fabrication, au choix quantitatif comme l'échelle de production ou le coût.

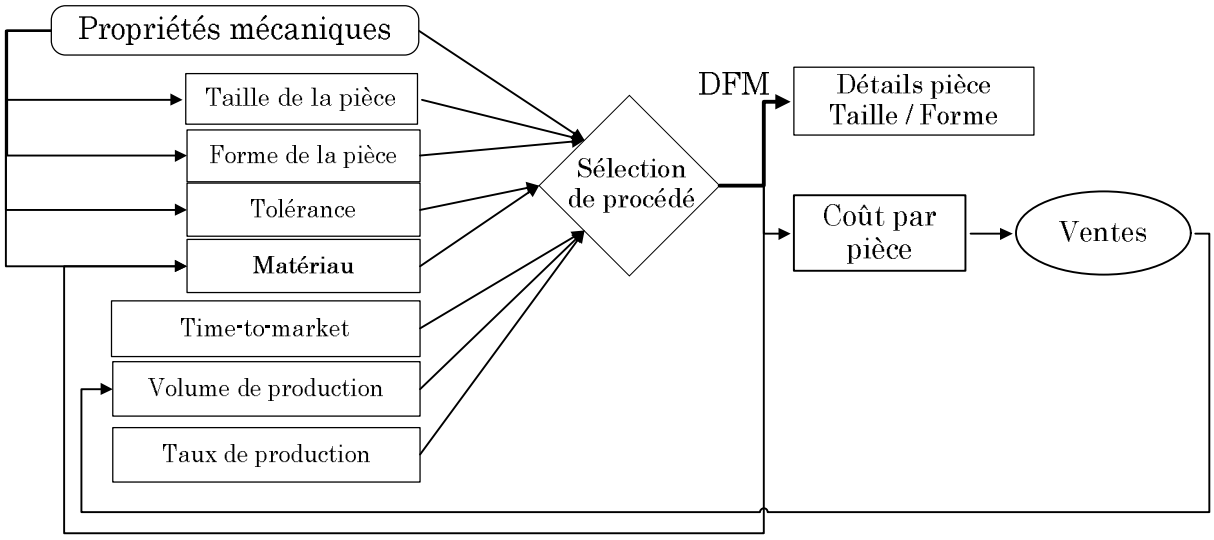


Fig. 14. Sélection des procédés [Ishii *et al.*, 1990].

L'approche peut être implémentée dans un **système expert** (voir section 2.5.1 à la page 48), pour aider le concepteur à distinguer les solutions les plus pertinentes selon la compatibilité des données associées au produit et aux procédés de fabrication, satisfaisant au mieux les exigences du produit [Yu *et al.*, 1993].

3.3. L'interaction utilisateur / système

Cette caractéristique détaille l'interaction entre le concepteur et le système, elle se compose des informations qui font partie des données d'entrée, renseignées par l'utilisateur et les données de sortie, fournies en retour.

3.3.1. Données d'entrée

En ce qui concerne les données d'entrée, dans certains cas, le concepteur doit fournir une représentation par entités de son produit, basée sur une base de données d'entités. Selon le système, il y a la possibilité de fournir un modèle numérique du produit et, si besoin, le système génère la représentation par entités. Dû aux ambiguïtés ou aux défauts toujours présents sur les formats d'échange « neutres » (STEP, IGES, etc.), des systèmes ont été développés directement dans le logiciel de CAO en question, afin d'assurer une parfaite compatibilité [Gardan *et al.*, 2006 ; Culler et Burd, 2007 ; Komoto et Tomiyama, 2008]. D'autres travaux, moins nombreux, utilisent comme données d'entrée des représentations par graphes des composants du produit [Mukherjee et Liu, 1997] ou pour des approches de DFA comme dans [Demoly, Yan*, et al.*, 2010].

3.3.2. Données de sortie

Parmi les informations fournies par le système, la plupart d'entre elles donnent une **évaluation de la fabricabilité** en fonction de la mesure effectuée et, dans la majorité des cas, d'analyses globales du produit. Dans le cas des systèmes qui décomposent le produit en entités, les valeurs de fabricabilité sont renvoyées indépendamment pour chaque zone analysée, c'est-à-dire des analyses locales. Certains auteurs ([Sun *et al.*, 2001] et [Waiyagan et Bohez, 2009]) proposent, dans la voie des analyses par zone, des représentations par cartographie de distribution des valeurs pour l'analyse de surfaces complexes et de l'usinage 5 axes. Quelques systèmes vont jusqu'à fournir des suggestions de modification pour les produits, en proposant des nouvelles valeurs de paramètres de conception, afin d'améliorer la fabricabilité [Das *et al.*, 1996].

3.4. La mesure de la fabricabilité

La fabricabilité d'un produit peut se mesurer à plusieurs échelles. Nous pouvons les retrouver combinées entre elles dans les approches méthodologiques de DFM :

- mesure binaire : l'échelle de mesure la plus simple, il s'agit de discriminer les produits selon leur facilité technico-économique à être fabriqués. La mesure peut se faire à partir de règles de non-validité, qui sont souvent des limites géométriques, dimensionnelles, de qualité, etc. appliquées aux différentes entités du produit analysé [Sánchez *et al.*, 1997 ; Molcho *et al.*, 2008] ;
- mesure qualitative : cette mesure consiste à associer des adjectifs de type : « facile », « moyennement facile », « difficile » [Shah et Mantyla, 1995], pour caractériser la fabricabilité. Ils ont la difficulté d'être difficilement comparables entre produits et procédés et souvent complexes à interpréter ;
- mesure quantitative : ce type d'échelle permet d'évaluer un développement en calculant une valeur numérique de fabricabilité. En utilisant une échelle numérique commune [Ong *et al.*, 2003], la comparaison entre produits et procédés devient possible ;

- mesure directe : il s'agit d'associer à un développement une évaluation du temps ou du coût de fabrication. Ces mesures sont plus simples à appliquer et plus employées car elles fournissent une valeur de difficulté facilement compréhensible. Le problème réside dans l'écart entre les temps réels et ceux fournis par un modèle. Plusieurs travaux de recherche tentent de donner des éléments de réponse à cette question [Maropoulos *et al.*, 2000 ; Schützer *et al.*, 2006 ; Mouton *et al.*, 2010].

3.5. Conception à partir d'une fabrication

Les approches décrites jusqu'à maintenant sont focalisées sur le choix des procédés de fabrication à partir d'une conception de produit définie, rentable et fabricable. L'approche DFM peut traiter aussi l'imposition de contraintes, issues des processus de fabrication, que le concepteur devra respecter au cours du processus de conception et de développement du produit. En réalité, peu de travaux ont été menés dans cette direction, et l'approche privilégiée est d'utiliser des outils de choix de procédés avec une démarche par itération en deux étapes (proposition / vérification) :

- proposition d'une solution viable pour la conception d'un produit ;
- vérification de sa fabricabilité, divisée en trois phases [Skander, 2006] :

1. **Vérification** : connaître les intentions de conception et les capacités de fabrication ; accepter les propositions compatibles avec les solutions déjà prouvées, même si leur fabrication est complexe ; rejeter les propositions demandant des modifications très coûteuses ;
2. **Quantification** (utilisation d'indicateurs) : dans la littérature, le coût (le plus utilisé comme indicateur [Boothroyd, 1994]), le temps et la qualité, sont les paramètres à quantifier ;
3. **Optimisation :** réalisée à trois niveaux : humain (compétence), moyens (machines, outils et logiciels) et produit (conception) [Arimoto et al., 1993].

L'approche de conception sous contraintes correspond d'avantage à l'idée de conception pour la fabrication. Feng et Kusiak ont proposé d'intégrer les contraintes de fabrication (pour l'usinage dans leur cas) dès la conception, grâce à des algorithmes de propagation de contraintes [Feng et Kusiak, 1995]. Dans leur approche, deux bases de données stockant, d'une part, les contraintes (la raideur du matériau, les températures de transition du matériau, par exemple), et d'autre part, les entités géométriques (soit abouties telles qu'un axe ou un engrainage ou par des solides primitives tels que des cylindres, des parallélépipèdes, etc.), permettent au moteur d'inférences de déterminer, dès la définition d'un produit, si celui-ci est fabricable ou non (Fig. 15).

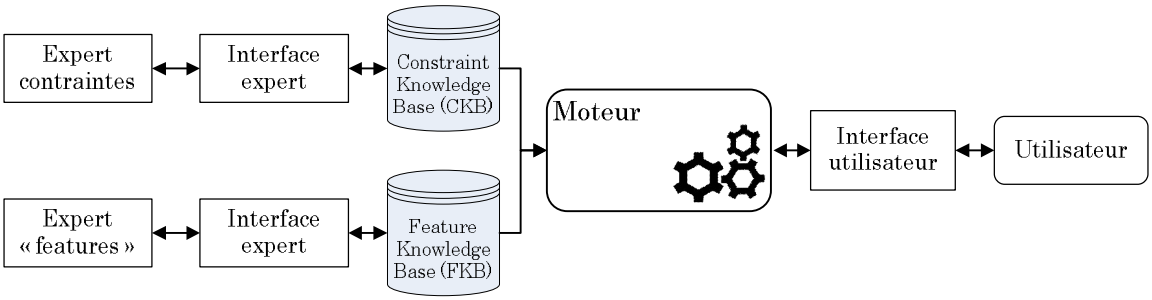


Fig. 15. Système de conception sous contrainte [Feng et Kusiak, 1995].

Plus récemment, [Kumar *et al.*, 2006] ont proposé un système d'évaluation de fabricabilité à base de connaissances pour des pièces embouties. Les règles intégrant la base de connaissances fournissent des conseils de fabricabilité par rapport au procédé de fabrication. Ceci permet au concepteur de les utiliser au cours du processus de conception et de développement, ainsi que d'enrichir ou de modifier la base selon les ressources de fabrication qu'il possède.

3.6. Conclusion sur la gestion des liens entre produit et processus de fabrication

Le lien qui existe entre les produits et leurs processus de fabrication peut-être décomposé en deux parties : le **choix de procédés** de fabrication à partir de la définition du produit et la **conception pour la fabrication**. Plusieurs approches ont été répertoriées par rapport à ces deux domaines, même si les approches de type « choix de procédés » sont bien plus nombreuses et développées. Les approches de type CAPP sont proches de celles de choix de procédés mas bien plus restreintes, étant donné qu'elles partent d'une conception de produit figée et visent à obtenir une unique solution pour le processus de fabrication. Concernant les approches de conception pour la fabrication, elles se résument principalement en une démarche basée sur deux étapes, proposition et vérification, utilisant parfois les outils dédiés au choix des procédés de fabrication.

3.7. Bilan et positionnement

Dans cette section consacrée aux concepts d'ingénierie et à la conception pour la fabrication, nous avons énoncé et décrit les plusieurs travaux de recherche existants. La majorité des approches identifiées apporte une évaluation sur le choix des procédés de fabrication admissibles à partir de la définition du produit. Chaque produit est analysé selon des critères liés à sa fabricabilité, aux matériaux choisis et à son coût opératoire. Le degré d'automatisation de ces approches peut être considéré comme semi-génératif, car s'appuyant sur des règles et des connaissances capitalisées lors de projets passés. Dès lors, partant d'une définition détaillée du produit, l'implication de ces approches peut soulever une dimension réactive puisqu'elles engendrent souvent des modifications du produit. Des tentatives d'intégration [Skander, 2006] et d'**automatisation au sein des environnements CAO** ont fait l'objet de nombreux travaux pour exploiter et extraire les données géométriques associées aux produits, afin de les vérifier et les valider selon le point de vue fabrication. Malgré l'obtention de gains significatifs dans le secteur industriel, nous pouvons constater que les approches existantes de DFM mettent en évidence :

- l'importance du lien produit-process pour le bon déroulement du processus de conception et de développement du produit ;
- le besoin d'intervenir dès les phases amont du processus de conception et de développement du produit.

Au regard de ces constatations, peu de travaux de recherche (voir section 2.3.5 à la page 40) ont porté sur la conception d'un produit à partir des informations du processus de fabrication, étant donné les domaines de recherche à parcourir. De ce fait, il y a

l'opportunité d'obtenir des gains en efficacité et en flexibilité, en développant des aides aux concepteurs, basées sur des connaissances du couple produit-process [Feng et Kusiak, 1995 ; Tomiyama *et al.*, 2009]. C'est la raison pour laquelle, nous pensons que l'approche DFM doit s'inscrire dans :

- une démarche plus **proactive et intégrée** au processus de conception et de développement des produits ;
- un **contexte plus large** de la gestion des informations techniques et de la gestion de cycle de vie des produits.

En conclusion, le passage d'une approche réactive à une approche intégrée et proactive, dans le contexte du PLM, fait partie des enjeux actuels dans ce domaine, afin de permettre aux concepteurs de concevoir des produits robustes, tout en étant soucieux de leurs contraintes de fabrication.

4. Gestion du Cycle de vie des Produits

4.1. *Product Lifecycle Management*

Nous avons déjà présenté notre notion d'intégration avec les systèmes et plateformes de PLM lors du chapitre précédent. Nous comptons nous intégrer, en perspective, à ce type de systèmes afin d'apporter notre contribution à l'entreprise étendue. Il existe aujourd'hui des particularités des systèmes PDM/PLM qui impactent d'une façon immédiate nos travaux. Cela concerne :

- le nombre d'informations et de contextes traités lors d'une démarche de type PLM ;
- l'émergence de différents standards d'échange pour le partage des informations et des connaissances métier, ce qui complexifie l'échange entre acteurs métier et services ;
- l'utilisation des informations et des connaissances produit-process détenues, à savoir comment se servir des informations lors du développement d'un produit ;
- la gestion des informations et des connaissances en ingénierie, comment faire parvenir les bonnes informations, au bon moment, et à la bonne personne.

En effet, un point important à considérer est que la gestion du cycle de vie des produits traite une grande quantité d'informations et de contextes qu'il faut analyser et échanger parmi la diversité de systèmes de XAO [Rachuri *et al.*, 2008], comme présenté sur la figure 16. L'émergence de nouveaux standards d'échange couplés à la variété et la complexité des informations du couple produit-process sont un obstacle majeur pour les travaux de recherche dans le domaine du PLM [Gielingh, 2008].

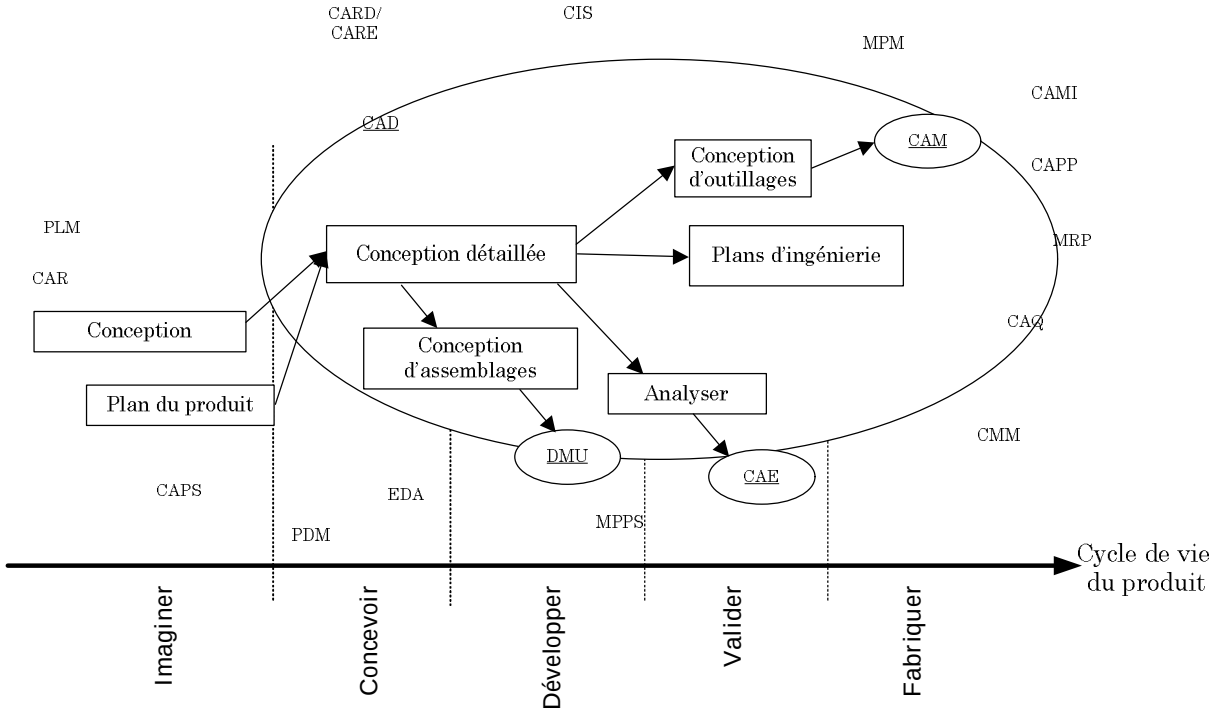


Fig. 16. Interactions des différents outils XAO au regard du cycle de vie du produit, adapté de [Rachuri *et al.*, 2008].

À partir de cette constatation, nous pouvons énoncer des besoins en intégration et en cohérence parmi la quantité de données gérées dans ces systèmes [Gielingh, 2008]. Cette préoccupation fait l'objet de travaux de recherche portant sur des questions d'échange de données [Gomes et Sagot, 2002 ; Eynard *et al.*, 2005], de déploiement / implémentation [Eynard *et al.*, 2004], de capitalisation / réutilisation des connaissances [Ducellier, 2008 ; Gomes, 2008] et de gestion des processus métiers [Monticolo *et al.*, 2008 ; Demoly, Yan, *et al.*, 2010], et ceci à différents niveaux de l'entreprise.

À l'égard du domaine considéré, nous allons nous focaliser, dans les sous-sections suivantes, sur les approches de gestion des informations du couple produit-process et des règles expertes, en cohérence avec notre problématique de conception orientée fabrication.

4.2. Utilisation des informations produit-process

Dans cette section, nous nous intéressons aux travaux qui ont été conduits dans le domaine de la gestion et la mise en application des connaissances en ingénierie. Considérées comme une composante essentielle de la stratégie PLM, les problématiques de gestion du patrimoine informationnel du produit à travers son cycle de vie font partie des enjeux scientifiques et industriels toujours en vigueur [Yan *et al.*, 2008].

Plus particulièrement, les questions de gestion et de mise en application des informations du couple produit-process demandent d'avoir la main mise sur les **interactions entre les acteurs métier impliqués**, tels que le concepteur, l'expert métier (produit ou process) et le responsable d'études (ou le chef de projet) (Fig. 17 ci-après).

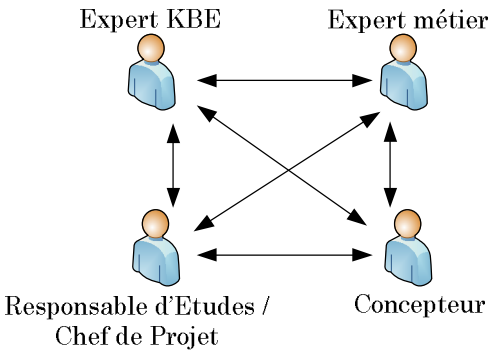


Fig. 17. Interaction entre les parties prenantes impliquées dans la gestion des informations produit-process.

L'interaction entre les différents acteurs métier et les informations produit-process est importante car elle donne contexte aux informations produit-process [Ermine, 2000]. Nous décrivons dans la section suivante, l'état actuel des approches de gestion des données-informations associées au produit et au processus de fabrication.

4.3. La gestion des connaissances en ingénierie

4.3.1. Des savoir-faire aux connaissances

Grundstein décrit la connaissance selon trois postulats [Grundstein, 2007] :

1. Il existe deux catégories de connaissances, d'une part les éléments tangibles, les connaissances formalisées sur des supports physiques ou encapsulées dans les systèmes de gestion, de production et les produits ; et d'autre part les éléments intangibles, les connaissances incarnées par les personnes, les connaissances de l'historique, de l'environnement ;
2. La connaissance n'est pas un objet, elle résulte de la rencontre d'une donnée avec un sujet, et s'inscrit au travers du système d'interprétation de l'individu dans sa mémoire ;
3. La connaissance est reliée à l'action. Du point de vue de l'entreprise, la connaissance est créée par l'action et est essentielle à son déroulement. Elle est finalisée par l'action ;

Nous pouvons préciser, à la manière de [Brown et Duguid, 1991] et [Nonaka et Takeuchi, 1995], les deux types de connaissances esquissées au niveau du troisième postulat :

- les savoirs **explicites**, objectifs et pouvant être exprimés de façon non ambigüe par des mots, des chiffres et des spécifications. Ils peuvent être transférés par des méthodes formelles et systématiques sous forme de règles ou de procédures ;
- les savoirs **tacites**, subjectifs, contextuels et intimement liés à l'expérience de chaque personne. Ils ne peuvent pas être formalisés, documentés ou communiqués facilement aux autres. Il s'agit des intuitions, des compétences personnelles ou des méthodes empiriques.

En accord avec von Krogh, le fait de formaliser ces savoirs ne constitue pas une connaissance, celle-ci est le résultat d'une interaction entre : l'information (un savoir formalisé en l'occurrence), un système d'interprétation (par exemple un être humain, un système expert ou un programme informatique) et un domaine d'application donné (le

contexte et domaine de validité de la connaissance). La gestion de ces trois éléments et leurs interactions correspondent donc à la gestion des connaissances [von Krogh *et al.*, 2001]. Ainsi, la formalisation du savoir ne peut être dissociée d'un système d'interprétation ainsi que de son domaine d'application.

4.3.2. Les approches de gestion des connaissances métier

Les connaissances doivent être regroupées et organisées afin d'être réutilisées. Plusieurs travaux dans le domaine de la gestion des connaissances proposent des approches pour regrouper et modéliser les connaissances métier. Nous allons présenter trois approches proposées dans la littérature. Ces approches concernent la gestion des connaissances lors des projets d'ingénierie et sont expliquées dans les travaux de Dieng-Kuntz *et al.* et de Zaclad et Grundstein [Dieng-Kuntz *et al.*, 2001 ; Zaclad et Grundstein, 2001]. Il s'agit en particulier de :

- l'approche ascendante / descendante ;
- l'approche décisionnelle ;
- l'approche organisationnelle.

4.3.2.1. L'approche ascendante / descendante

Dans les approches ascendantes et descendantes, la modélisation des connaissances est au centre de la démarche de gestion des connaissances. Pour l'approche ascendante l'idée n'est pas de structurer les informations en s'appuyant sur des hypothèses relatives aux activités coopératives des acteurs, mais bien d'identifier la structure des concepts et ses raisonnements [Zaclad et Grundstein, 2001]. En effet, les informations relatives au domaine (livrables, rapports, courriels, etc.) sont considérées pour en extraire les connaissances. Nous pouvons noter les travaux de [Matta *et al.*, 2000] et [Djiaz *et al.*, 2006] qui s'inscrivent dans le cadre de cette approche de gestion des connaissances dite ascendante.

En ce qui concerne l'approche descendante ou « approche dirigée par les modèles », celle-ci se focalise sur la définition du modèle de l'expertise, afin de filtrer les connaissances acquises, et de guider efficacement le processus d'acquisition. Le système interagit ensuite avec les détenteurs de connaissances pour en extraire les informations dont ils ont besoin. Nous pouvons considérer les travaux utilisant les experts comme source de connaissances telles que **MKSM** (***M****ethodology for* ***K****nowledge* ***S****ystem* ***M****anagement*) [Ermine, 2000], **MASK** (**M**éthode d'**A**cquisition et de **S**tructuration des **C**onnaissances) [Ermine, 2002], **CYGMA** (**CY**cle de vie et **G**estion des **M**étiers et **A**pplications) [Serrafero, 2002], etc.

4.3.2.2. L'approche décisionnelle

Concernant l'approche décisionnelle, nombreux travaux se sont orientés vers la capitalisation et la réutilisation des connaissances en conception, afin de faciliter la prise de décision dans les projets. L'essentiel de ces contributions intègre une représentation des processus décisionnels et s'appuie sur les modèles de logique de conception [Dieng-Kuntz *et al.*, 2001]. Les modèles les plus connus que nous pouvons citer sont le **QOC** (***Q****uestions,* ***O****ptions and* ***C****riteria*) [Buckingham Shum *et al.*, 1997], **DYPKM** (***DY****namic*

P**rocess for **K**nowledge **M**anagement*) [Bekhti, 2003], et **DRAMA** (D**esign **RA**tionale **MA**nagement*) [Brice et Johns, 1999].

4.3.2.3. L'approche organisationnelle

Avec l'introduction de l'entreprise apprenante, Nonaka et Takeuchi prennent en compte les savoir-faire dans l'entreprise, et mettent en évidence leur transmission et leur évolution au sein des organisations [Nonaka et Takeuchi, 1995]. Cette approche « organisationnelle » considère le caractère social de la gestion des connaissances dont le but est de permettre aux différents acteurs métier de partager et transmettre leurs connaissances, plutôt que d'uniquement les formaliser et les modéliser [Currie, 2003].

Ces approches se focalisent principalement sur les **processus de conception routiniers**, et conduisent à repenser l'organisation des entreprises. Nous nous intéressons à cette approche car elle considère non seulement l'aspect de gestion des connaissances mais également l'interaction humaine entre les experts et le reste des acteurs métier. Nous allons détailler cette approche dans la section suivante.

Nature de l'approche

Chaque personne d'une entreprise détient ses propres connaissances et savoir-faire. L'entreprise peut ainsi regrouper une somme de connaissances individuelles formant une mémoire collective avec l'ensemble des documents et rapports utiles à son bon fonctionnement. Cette mémoire sert d'**indexation et de représentation explicite**, composée des données et connaissances issues des activités collectives de l'entreprise, incluant les expériences et les résolutions de problèmes [Prasad *et al.*, 1993].

Un des objectifs de la mémoire organisationnelle est de décrire comment les connaissances utilisées dans le passé peuvent être réutilisées lors des activités courantes, aidant ainsi une entreprise à agir plus efficacement [Lehner *et al.*, 1998]. D'autre part, dans un contexte d'entreprise étendue, les mémoires sont consultées par des acteurs métier rattachés à des services différents, ayant des niveaux de responsabilité différents et travaillant parfois dans des lieux éloignés. Ces acteurs métier composent des communautés qui construisent et maintiennent ces mémoires organisationnelles [Steels, 1993].

Construction de mémoires organisationnelles

De nombreux auteurs décrivent le processus de construction d'une mémoire organisationnelle comme un cycle en cinq étapes : analyser les expériences quotidiennes (échecs et succès), pérenniser ces expériences, les stocker, les rendre accessibles et les distribuer [Van Heijst *et al.*, 1996]. Grundstein décrit ces cinq étapes d'une manière plus approfondie [Grundstein, 2000] :

- '**repérer**' les connaissances cruciales, c'est-à-dire les savoirs (connaissances explicites) et les savoir-faire (connaissances tacites) nécessaires pour le développement d'un projet ;
- '**préserver**' les connaissances en les formalisant et les archivant ;
- '**valoriser**' les connaissances, en les mettant au service des acteurs métier pour qu'ils puissent les exploiter ;

- '**actualiser'** les connaissances, les évaluer, les mettre à jour et les enrichir ;
- '**manager'** les connaissances afin de faciliter le passage des informations entre les autres étapes.

Dieng-Kuntz *et al.* élargissent ce concept pour prendre en compte les sources d'informations hétérogènes et distribuées, en ajoutant une étape initiale de détection des besoins, afin de déterminer un mode d'exploitation de la mémoire utile et adapté à l'environnement de travail des utilisateurs [Dieng-Kuntz *et al.*, 2001]. Nous allons suivre cette approche de gestion des connaissances métier pour développer nos travaux de recherche.

La méthode CYGMA, développé jadis par la société KADE-TECH [Serrafero *et al.*, 2006], est une méthode de création des mémoires organisationnelles (bréviaires des connaissances) qui consiste en trois étapes : la réalisation des entretiens avec les experts métier, la réalisation d'une recherche documentaire et la formalisation des connaissances dans un bréviaire métier (ou livre / recueil de connaissances métier), puis la validation des résultats avec les experts. Elle a été conçue pour décrire des règles de conception industrielle et les programmer à l'aide de langages tels que la programmation par contraintes ou la programmation logique. La **simplicité** des étapes de CYGMA et la facilité de leur adoption par une entreprise sont les raisons du choix de cette méthode pour la suite de nos travaux.

4.4. Bilan et positionnement

Cette section aborde le contexte de nos travaux de recherche à travers la nécessité de gérer les connaissances métier des acteurs, pour améliorer la productivité des équipes d'ingénierie en conception routinière, et faciliter l'innovation par la collaboration entre les métiers. Cette réflexion nous a conduit à considérer les travaux existants dans la littérature en lien avec la gestion des connaissances métier, et plus particulièrement sur la description des approches fondées sur le développement de mémoires organisationnelles.

À partir de ces descriptions, nous nous proposons traiter, dans la section suivante, les travaux de recherche existants et les différentes méthodologies de traitement et de réutilisation des informations et des connaissances lors des projets d'ingénierie.

5. Représentation et exploitation des connaissances en conception et développement de produits

Le lien existant entre un produit et ses processus de fabrication appartient au domaine de la formalisation de la connaissance. En effet, les experts se servent de leurs connaissances pour concevoir un produit dans le respect des contraintes imposées par le client, mais aussi par la fabrication ou bien pour déterminer le choix des procédés. L'objectif des sections suivantes est de présenter différentes natures de connaissances et d'aborder la possibilité de les exploiter dans le cadre de l'intégration produit-process en conception et développement de produits.

C'est avec l'arrivée de l'informatique au cours du 20ème siècle que l'idée de rendre les connaissances métier expertes accessibles à un plus grand nombre de concepteurs grâce à un ordinateur, afin de fournir une aide à la décision, a été proposée. Ceci nécessite le développement de formalisations particulières et de systèmes d'interprétation capables d'exploiter ces formalisations. Nous allons aborder quelques possibilités, qui nous paraissent pertinentes et applicables dans le cadre de notre recherche, car répondant à ce besoin.

5.1. Approche d'ingénierie à base de connaissances (KBE) à l'aide de Systèmes experts

Les **S**ystèmes **E**xperts (**SE**) sont des programmes capables d'explorer des expertises dans un domaine particulier. Ces expertises rassemblent les connaissances directement liées au domaine et les capacités de raisonnement acquises par les spécialistes au cours de leur activité (leurs stratégies) [Turban et Aronson, 2000]. Les premiers systèmes experts sont apparus au milieu des années 1960, donnant naissance à la branche applicative de l'Intelligence Artificielle (de l'anglais ***A**rtificial **I**ntelligence* – **AI**), et sont généralement destinés à l'aide à la décision et au diagnostic. Les SE se composent traditionnellement d'une base de connaissances liée à un moteur d'inférence (Fig. 18) [Laudon, 2002]. La base de connaissances peut être constituée d'une base de faits, d'une base de règles ou d'un mélange des deux.

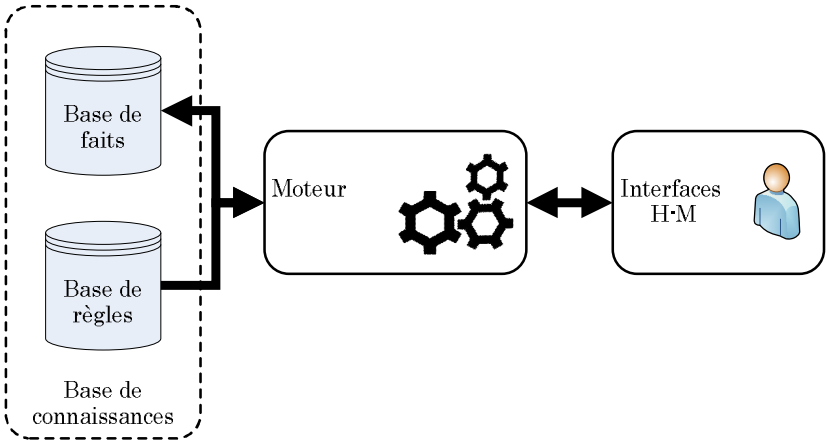


Fig. 18. Architecture d'un système expert (inspiré de [Laudon, 2002]).

La base de faits est la mémoire de travail du SE, recueillant les faits initiaux ainsi que ceux déduits par le moteur d'inférence. La base de règles contient des règles pouvant être utilisées au cours du traitement [Ameri et Dutta, 2005], sous la forme décrite ci-dessous :

SI #conditions **ALORS** #conclusions

Où les #conditions précisent les causes du déclenchement de la règle et les #conclusions son résultat. Nous parlons aussi d'une inférence, c'est-à-dire la modification de l'état des connaissances actuelles sur le problème en cours de résolution. C'est le moteur d'inférence qui réalise concrètement le raisonnement sous trois modes de fonctionnement : le raisonnement avant, la conclusion est cherchée à partir des prémisses connues (en partant des faits initiaux puis en utilisant les faits déduits),

jusqu'à ce que le fait à déduire soit connu ; le raisonnement arrière, la conclusion étant connue, le moteur applique toutes les règles afin d'obtenir la liste de faits à prouver (mécanisme récursif qui remonte jusqu'aux faits initiaux connus) ; et le raisonnement mixte, combinant des algorithmes avant et arrière.

C'est le domaine d'application du SE qui conditionne le choix du mode de fonctionnement : à un nombre élevé de conclusions et peu de faits, le raisonnement avant est privilégié. En revanche, à un nombre de faits abondant et des conclusions peu nombreuses, le raisonnement arrière sera préféré.

Cependant, la mise en place et utilisation des SE n'est pas sans difficulté [Andy Liou et Wu, 1996]. Les principaux inconvénients que nous constatons par rapport à cette approche sont :

- la difficulté à **formaliser**, **visualiser** et **comprendre** les connaissances sous la forme de règles ;
- **l'opacité** du traitement effectué : même si le processus de raisonnement est consultable, sa lecture s'avère difficile pour le non-initié ;
- la **réticence** de l'expert à l'origine des règles à partager sa connaissance ;
- la **maintenance** complexe du système afin que l'ensemble des règles reste cohérent.

5.2. Approche de KBE par raisonnement à partir de cas

Le principe de résolution de problèmes par raisonnement à partir de cas (de l'anglais ***C****ase-****B****ased* ***R****easoning* – **CBR**) est le processus humain de l'analogie [Yvars, 2001]. Autrement dit, les expériences passées, groupées dans une base de cas, sont réutilisées pour résoudre les problèmes actuels. Une fois choisi et validé, le nouveau cas ainsi que sa solution validée sont ajoutés à la base de cas. La figure 19 présente les différentes étapes d'un modèle de raisonnement à partir de cas.

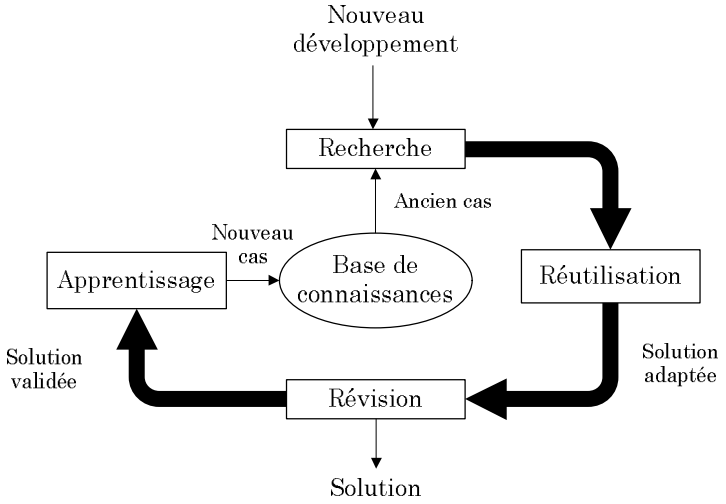


Fig. 19. Étapes d'une démarche de raisonnement à partir de cas, adapté d'[Yvars et Saucier, 1997].

Le tableau 3 décrit quelques travaux de recherche associés à l'approche de CBR. L'application des systèmes de CBR existe dans divers domaines, tels que la médecine, le

diagnostic, l'estimation des coûts, entre autres. Plus généralement, les systèmes de CBR sont utiles dans n'importe quel domaine dès que la réutilisation d'expériences passées est essentielle.

Tab. 3. Raisonnement à partir de cas et applications.

CBR / Applications	Auteurs
Conception de processus de fabrication	[Pankakoski *et al.*, 1991], [Takahashi *et al.*, 1995], [Jiang *et al.*, 2006], [Lau *et al.*, 2003], [Gholamian et Ghomi, 2007]
Gestion des connaissances	[Cunningham et Bonzano, 1999], [Noh *et al.*, 2000], [Watson, 2003], [Richter, 2009], [Auffret, 2001]
Traitement des connaissances	[García Lorenzo et Bello Pérez, 1996], [Gardan et Gardan, 2003], [Richter, 2009]
Diagnostic de défaillances	[Jarmulak *et al.*, 2001], [Yang *et al.*, 2004]
Développement de produits	[Shelesh-Nezhad et Siores, 1997], [Avramenko *et al.*, 2005], [Jung *et al.*, 2009], [Janthong *et al.*, 2010]
E-learning	[Fu et Shen, 2004]

Ils existent deux principales difficultés quant à l'approche par CBR :

- **l'initialisation** de la base de cas. Cette étape est primordiale et, sans un nombre suffisant de cas couvrant un domaine relativement large, l'approche ne peut pas donner des résultats intéressants ;
- l'étape d'**adaptation**. Cette étape constitue l'apport essentiel de l'approche. Malheureusement elle n'a pas été suffisamment développée dans les applications du CBR (la création de règles d'adaptation n'est pas évidente).

5.3. Approche de KBE par technologie de groupe

La technologie de groupe est une approche très répandue dans le milieu industriel, elle consiste à regrouper des produits par similarités de forme (*shape oriented*) ou des caractéristiques de fabrication (*process oriented*) ou les deux [Heragu, 2008]. Son principe général est très similaire à celui du CBR : à des problèmes similaires, solutions similaires.

L'approche prévoit deux étapes [Mutel et Clément, 1988] : l'étape préparatoire et l'étape productive.

- L'étape **préparatoire** consiste à construire des groupes de produits. L'émergence de technologies informatiques a permis la mise en place de méthodes de codification permettant de créer, indexer et retrouver rapidement les familles de produits [Mosier *et al.*, 1997 ; Kim et Chhajed, 2000 ; Deciu *et al.*, 2005 ; Williams *et al.*, 2007 ; Jans *et al.*, 2008].
- L'étape **productive** voit la recherche de la famille du produit souhaitée pour lui affecter les opérations envisagées. Plusieurs méthodes et algorithmes (génétiques, diffuses et autres) ont été étudiés pour aider à cette recherche et classification [Iyer *et al.*, 2005 ; Ip et Regli, 2006 ; ElMaraghy *et al.*, 2009].

Deux problématiques se présentent concernant l'approche par technologie de groupe : *clustering* et *classification*, par quel critère regrouper des produits ensemble sans que la

famille devienne trop large (à cause d'un critère trop peu discriminant) et par quel critère les maintenir séparés sans risquer une prolifération de familles (faute de critères trop précis). Plusieurs méthodes algorithmiques tentent de résoudre ce problème [Fixson, 2007 ; Jans *et al.*, 2008].

La principale différence entre la technologie de groupe et le CBR est la **généralisation** : le CBR traite des cas réels, avec des problèmes et des solutions concrets, alors que la technologie de groupe constitue des familles en généralisant des conséquences ou des solutions associées. La technologie de groupe couvre son domaine par cette généralisation, tandis que pour le CBR, il est couvert grâce à la phase d'adaptation. Une différence corollaire est le nombre de cas, la technologie de groupe doit pondérer le nombre de familles et de produits par famille, ce qui n'est pas le cas pour le CBR.

5.4. Approche de KBE par propagation de contraintes

L'approche par propagation de contraintes a ses origines au début des années 1970 avec une application pour l'interprétation 3D des lignes d'un graphique en 2D ombré [Waltz, 1972]. Un problème de satisfaction de contraintes se constitue de : un ensemble défini de variables, de domaines pour chaque variable (des valeurs discrètes ou continues) et d'un ensemble défini de contraintes. Pour arriver à un résultat, une solution est d'affecter toutes les variables en satisfaisant toutes les contraintes du problème [Apt, 1999].

Pour des domaines de variables discrets, la méthode plus directe consiste à énumérer toutes les combinaisons possibles dans un arbre d'énumération (Fig. 20) et de les vérifier pour chaque contrainte. La figure 20 illustre une représentation sous forme d'arbre des possibilités combinatoires pour un problème donné. Chaque branche représente une valeur pour une des variables du problème et ses diverses combinaisons.

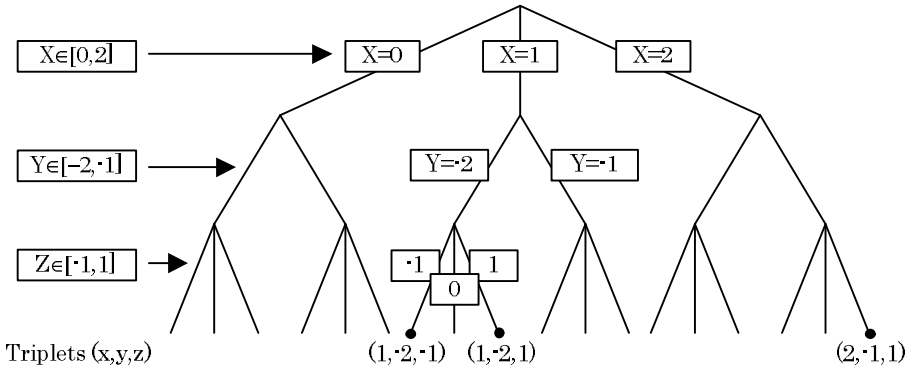


Fig. 20. Arbre d'énumération, d'après [Yannou, 1998].

Cette méthode risque de devenir inapplicable pour des problèmes de taille réelle en raison de l'explosion de combinaisons des possibilités. Un recours pour réduire les domaines de définition des variables consiste à « élaguer » les branches ne satisfaisant pas les contraintes lors de la construction de l'arbre d'énumération. Les branches non applicables ne sont pas poursuivies, ce qui peut réduire considérablement le temps de calcul. Des algorithmes sont souvent utilisés quand il s'agit de domaines des variables continus [Gholamian et Ghomi, 2007], afin de borner les solutions possibles.

Plusieurs approches utilisent la propagation de contraintes, pour le développement de produits [Roucoules et Tichkiewitch, 2000 ; Nahm et Ishikawa, 2004 ; Aldanondo et Vareilles, 2008 ; Farenzena et Fusiello, 2009] et pour d'autres domaines, tels que l'ordonnancement [Hindi et Fleszar, 2004 ; Levner *et al.*, 2010], l'allocation de ressources [Sourd et Rogerie, 2005] ou encore la résolution des problèmes de conception avec contraintes [Aldanondo *et al.*, 2006]. Certains outils, tels que KADViser, existent dans le commerce et utilisent des techniques de propagation de contraintes. Ils constituent des outils d'aide au développement par propagation de contraintes, dès la phase de conception conceptuelle.

La limite de cette approche se trouve au niveau de **l'expression des connaissances**, qui doit se faire sous forme de contraintes / règles. On retrouve les mêmes difficultés que dans les SE envers la maintenance et la capitalisation des connaissances. Cependant, l'approche est plus intuitive que celle des systèmes experts, car les solutions sous forme d'arbre sont plus faciles à suivre (en se qui concerne les domaines de variables discrètes).

5.5. Conclusions sur les approches de représentation et de capitalisation des connaissances

Le tableau 4 présente les diverses approches dédiées à la gestion des connaissances présentées précédemment, afin de les comparer.

Tab. 4. Synthèse des différentes approches de gestion de connaissances.

	Formalisation	Système d'interprétation	Limitations
Système Expert	Règles	Algorithmes avant, arrière, mixte	Opacité du raisonnement, des règles, maintenance difficile
Raisonnement à partir de cas	Cas ; Couple Problème / Solution	Recherche par analogie, adaptation	Initialisation de la base de cas ; règles d'adaptation
Technologie de groupe	Familles de produits / actions	Classification en famille, recherche, actions	Définition des familles ; *clustering ; classification*
Propagation des contraintes	Variables ; domaines des variables ; contraintes	Algorithmes de propagation de contraintes	Méthode complexe ; formalisation des connaissances difficile

Nous pouvons constater quelques aspects communs aux différentes approches :

- sur la capitalisation des connaissances : cette partie du travail n'est jamais simple, car elle nécessite **l'intervention détaillée des experts métier**. Ces experts ne sont pas souvent enclins à partager leurs savoir-faire, surtout s'ils seront gérés par un système, à priori, semi-opaque (le cas pour un système à base de règles) ;
- sur la **maintenance** : la garantie de cohérence des connaissances est généralement assurée par un spécialiste. Les systèmes ne sont pas pérennes et nécessitent une mise à jour régulière.

Enfin, même si des exemples d'outils ou des méthodes spécifiques existent pour quelques unes des approches décrites, comme c'est le cas du JESS[7] ou du GNU Prolog[8], pour les systèmes experts ; du ID2 [Legardeur *et al.*, 2003], CoDE [Roucoules et Tichkiewitch, 2000] ou EKAMD [Su *et al.*, 1997], pour la propagation de contraintes ; ou du RACER [Ting *et al.*] ou ACCELERE [Herbeaux et Mille, 1999], pour le CBR ; les outils sont en général développés sur mesure. Les approches sont souvent utilisées de façon mixte, les adaptant aux méthodes de travail des entreprises.

5.6. Bilan et positionnement

Au cours de ces dix dernières années, CIMdata[9] a présenté plusieurs publications soulignant le besoin d'élargir la gestion des données-informations-connaissances du produit à travers son cycle de vie. Cette gestion doit être inscrite dans la stratégie PLM pour délivrer un produit [Gao *et al.*, 2003]. Ceci implique différentes réflexions autour des problématiques d'**intégration** et de **réutilisation** dans la gestion du patrimoine informationnel lié au cycle de vie des produits. Les méthodologies d'intégration des connaissances au développement des produits [Deng et Yu, 2006] sont un bon exemple. Certains enjeux scientifiques peuvent être identifiés dans ce contexte :

- le rapprochement des informations et connaissances issues de divers niveaux de prise de décision des concepteurs ;
- l'enrichissement du modèle produit, via l'intégration des connaissances des processus en aval du cycle de vie du produit [Venkatachalam, 1994 ; Rachuri *et al.*, 2008] ;
- le besoin en gestion des informations issues de la fabrication, et leur liaison avec la modélisation des produits en avant phase [Ferrer *et al.*, 2009].

Les théories et méthodologies de DFM, malgré le fait qu'elles soient enseignées et qu'elles fassent l'objet de travaux de recherche, ne sont souvent pas appliquées dans les milieux industriels. La division toujours existante entre, d'une part la capitalisation et la formalisation des connaissances, et d'autre part leur mise en application, fait que les entreprises les appliquent peu, ou pas, pour améliorer leurs produits [Tomiyama *et al.*, 2009]. Afin de favoriser l'adoption des méthodologies de DFM, l'intérêt actuel est de s'appuyer sur celles suffisamment ouvertes et simples à mettre en œuvre.

Des méthodes et des outils existent pour l'intégration du savoir-faire de fabrication dans le processus de conception et de développement des produits, que ce soit par des SE, du CBR, par la technologie de groupe ou par la propagation des contraintes [Shu-Hsien, 2005]. Cependant, ces approches partent souvent de la définition d'un produit fini, et ne considèrent pas ou peu la dimension proactive de la démarche. Une approche mixte, intégrant des aspects des SE ainsi que du CBR, reste une solution viable pour intégrer les connaissances et savoir-faire de fabrication au moment de la conception initiale d'un produit.

---

[7] http://herzberg.ca.sandia.gov/jess
[8] http://www.gprolog.org
[9] http://www.cimdata.com/

6. Mise en application de démarches de KBE et optimisation lors de la conception et développement de produits

Une fois les connaissances et savoir-faire d'une entreprise capitalisées et stockées, la démarche suivante consiste à les appliquer lors du processus de conception et de développement du couple produit-process. Historiquement les premières recherches ont porté sur des systèmes experts couplés à des logiciels CAO [Gardan, 1991]. Sont apparus ensuite les systèmes à base de connaissances et systèmes de CBR [Sugiono, 1992]. Ces approches ont souvent rencontré des problèmes en ce qui concerne les temps de développement et des difficultés à faire évoluer et maintenir les logiciels. Des applications comme les approches par contraintes [Yvars, 2001] sont apparues, proposant des capacités de résolution de problème très robustes.

Swift décrit plusieurs règles de DFM standards [Swift, 2003], reprises par Ferrer *et al.* [Ferrer *et al.*, 2009], dont les approches de KBE doivent tenir compte au moment de développer des applications et des outils, pour mieux aider les concepteurs et bien répondre aux problématiques de DFM lors du développement des produits (Tab. 5).

Tab. 5. Règles et objectifs du DFM selon [Swift, 2003].

	Règles de DFM
1	Identifier les caractéristiques critiques (tolérances, états de surface)
2	Identifier les facteurs impactant la fabrication des caractéristiques critiques
3	Estimer les coûts de fabrication
4	Minimiser le coût des composants
5	Établir les tolérances maximales par caractéristique
6	Déterminer la capacité process pour chaque caractéristique au plus tôt
7	Éviter les tolérances serrées
8	Développer les produits pour être facilement contrôlable
9	Minimiser le nombre de surfaces à usiner
10	Minimiser le nombre de réorientations pendant la fabrication
11	Utiliser les procédés de fabrication standards si possible
12	Utiliser des congés/filetages généreux sur des produits moulés, ou usinés
13	Éviter des procédés secondaires
14	Développer les produits pour une mise-au-point facile avec des outils standards
15	Utiliser les caractéristiques spéciales des procédés (inserts moulés, couleurs)
16	Bien détailler les définitions numériques pour fabrication et être conforme aux standards de cotation

Le problème majeur étant la **bonne formulation de la stratégie** de résolution à partir des connaissances du domaine étudié, les applications de KBE, couplées à des algorithmes d'optimisation, ont pour but d'être utilisées pour la résolution de problèmes récurrents, connus et bien spécifiés. Dans la section suivante nous ferons un état des lieux des approches de KBE ainsi que de l'utilisation de l'optimisation pour le développement de produits.

6.1. Les applications informatiques de KBE

L'une des techniques d'IA la plus opérationnelle pour la gestion des connaissances lors du développement de produits est l'utilisation d'une application logicielle de type KBE

[Chapman et Pinfold, 2001]. À la différence des traditionnels outils CAO, une application KBE permet l'acquisition des intentions se situant en amont de la conception en représentant les « **pourquoi** » et « **comment** » d'un modèle, en plus de la description du « quoi » [Hew *et al.*, 2001]. C'est également une approche avec des applications prometteuses, non seulement dans la recherche mais aussi dans le milieu industriel [Coppens, 2002 ; Silva et Chang, 2002 ; Mulet et Vidal, 2006 ; Noor, 2007]. Elle permet de réduire le temps dédié à la conception routinière pour le redistribuer vers la conception innovante (Fig. 21). Cependant, le développement des applications KBE constitue un réel investissement pour les entreprises. Elles doivent rester suffisamment simples ou modulaires pour permettre leur maintenance et leur évolutivité. Enfin, visant à être utilisées par des experts et des non-experts à la fois, les applications KBE doivent être graphiquement simples avec des liaisons avec les outils de CAO [Noor, 2007].

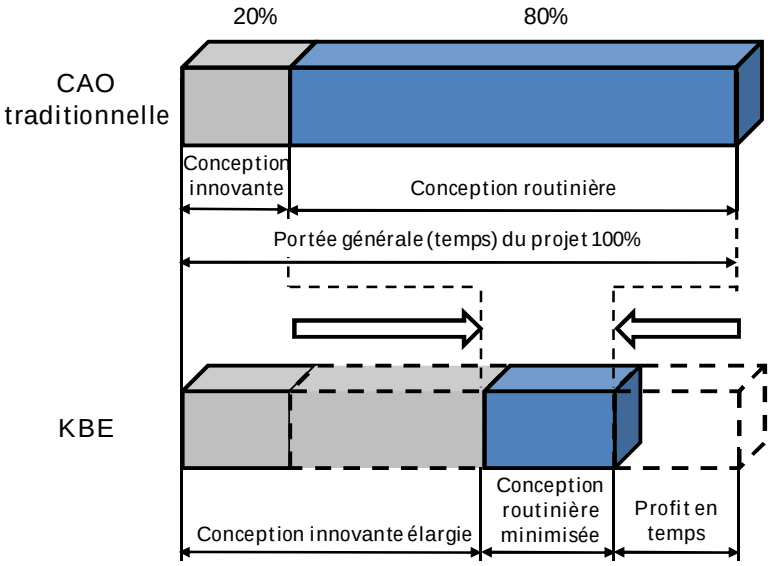


Fig. 21. Impact du KBE sur les tâches principales de développement CAO d'un produit [Skarka, 2007].

Hew *et al*. jugent la fonctionnalité des applications de KBE sur trois aspects différents [Hew *et al.*, 2001] : **représentation** des connaissances (modélisations faites à l'aide de la programmation orientée objet ou en langage naturel, par exemple) ; **mécanisme de raisonnement** (recherche, sélection, application et évaluation de règles de production, à l'aide de mécanismes de CBR ou des systèmes experts) ; et **interface** (le lien entre le programmeur, l'expert et l'utilisateur final, construits autour et en lien avec les logiciels de CAO). Les avantages du lien avec la CAO sont de trois ordres, il permet la création de modèles 3D, leur analyse à l'aide d'outils experts, et la modification et réutilisation de ces modèles géométriques, dorénavant paramétriques.

Toutes les démarches de KBE ont des étapes communes pour leur construction :

- l'identification des différents éléments de l'énoncé mathématique du problème à résoudre. Une fois que les choix technologiques et la configuration du mécanisme sont spécifiés, il est possible de décrire le mécanisme par un certain nombre de paramètres ;

- la construction de l'interface et des modèles 3D à partir des paramètres établis dans l'étape précédente ainsi que sur les règles et connaissances retenues par l'entreprise ;
- l'interaction avec les concepteurs pour le développement des nouveaux produits, avec toujours la possibilité d'une mise à jour des connaissances stockées dans les modèles et sur l'interface.

Plusieurs exemples d'applications de KBE existent dans la littérature, pour le développement des produits complexes sur la base l' approche « Axiomatic Design » [Suh, 1999] et du CBR [Janthong *et al.*, 2010], des catalogues de fixations à l'aide des connaissances capitalisées avec MOKA et CommonKADS [Callot *et al.*, 1998], couplées avec CATIA V5 [Hunter Alarcón *et al.*, 2010], des méthodologies d'Innovation Assistée par Ordinateur (de l'anglais ***C****omputer-****A****ided* ***I****nnovation – **CAI***) pour la résolution des conflits de conception [Cugini *et al.*, 2009] ou le développement des outils d'aide aux concepteurs pour les tâches d'ingénierie routinière par la numérisation et le raisonnement lancé sur des règles de conception [Kulon *et al.*, 2006].

Cependant, les démarches de conception par KBE nécessitent une base solide de gestion des connaissances et sont souvent couplées avec des algorithmes d'optimisation pour adapter les règles expertes de conception et offrir à l'utilisateur le meilleur choix de valeurs des paramètres pour chaque produit à développer. Dans une section suivante (cf. Section 2.6.2 à la page 58), nous allons décrire des travaux dans la littérature ayant intégré l'utilisation des techniques d'optimisation dans la conception et le développement de nouveaux produits.

6.1.1. Outils de gestion KBE

[Candlot, 2006] propose quatre piliers pour l'intégration des connaissances lors du processus de conception et de développement des produits. Les réseaux de concepts, les corpus de documents, les listes des spécifications et les outils de gestion forment ces quatre piliers et sont tous nécessaires pour le développement et la mise en application des méthodologies de conception de produits basées sur les connaissances expertes. Dans cette partie, nous nous intéressons plus particulièrement aux outils de gestion situés au carrefour des autres piliers.

Ces outils permettent à la fois l'édition des documents, la clarification des réseaux de concepts et l'expression des spécifications. Ils sont également sources d'expertise de part leur structure propre. En tant qu'outils d'assistance, ils contiennent une partie de la **culture de l'entreprise**. Par exemple, un outil de CAO implique une conception guidée par la géométrie [Aziz et Chassapis, 2002 ; Fuxin, 2005] alors que d'autres approches préconisent, par exemple, une conception guidée par les spécificités des métiers [Lou, 2004 ; Candlot, 2006]. Enfin, l'application fournie devient à son tour un élément de cet assortiment d'outils.

Ils existent sur le marché plusieurs outils et logiciels pour la gestion du KBE. Ils se divisent facilement en deux catégories, les uns qui s'associent aux logiciels de CAO, tels que ICAD, Rulestream ou KADViser, tout en restant indépendants, les autres qui sont développés pour fonctionner au sein des logiciels de CAO, tels que *Knowledge Fusion* pour NX ou **KWA/KWE** (***K****no****w****ledge* ***A****dvisor/****K****no****w****ledge* ***E****xpert*) pour CATIA V5. Nous

allons décrire certains des outils KBE disponibles sur le marché, en commençant par **ICAD** (***I**ntelligent **C**omputer **A**ided **D**esign*), sorti au début des années 80. Il s'agit du premier logiciel CAO orienté KBE. Il est constitué de deux interfaces, une première qui gère les géométries, et une seconde qui gère le langage de programmation: **I**CAD ***D**esign **L**anguage* (**IDL**), une déclinaison de **LISP** (***L**ist **P**rocessing **L**anguage*). INTENT! est la première adaptation d'ICAD dans un logiciel de CAO déjà établi, AUTOCAD, qui suit des évolutions jusqu'à devenir un logiciel et un langage différenciable d'ICAD.

Les outils associés aux logiciels CAO existants, tels que *Knowledge Fusion* ou KWA/KWE, profitent pleinement des avantages d'un lien direct avec la géométrie à traiter. Le concepteur ou l'expert n'est pas obligé de développer des passerelles complexes entre les logiciels. Néanmoins, les utilisateurs doivent apprendre à programmer dans des langages plus ou moins complexes (INTENT! et connecteurs **ODBC** (***O**pen **D**ata**b**ase **C**onnectivity*) pour l'outil de CAO NX et des variantes de **VBA** (**V**isual **B**asic for **A**pplications) pour l'outil de CAO CATIA V5), ainsi que connaitre profondément les modèles CAO traités par ces outils.

Les logiciels indépendants, tels que RuleStream, PythonCC ou KADViser, font la gestion des paramètres et règles qui donnent forme et fonction au produit par eux-mêmes. Les résultats sont ensuite exportés vers le logiciel CAO (à travers des tables, fichiers texte, fichiers XML, etc.) et couplés aux modèles CAO paramétriques des produits développés. Chacun des logiciels indépendants a des préférences pour un langage de programmation, et utilisent assez souvent des langages de haut niveau comme PYTHON ou LISP. Dans nos travaux, nous avons préféré KADViser, pour sa programmation en « langage naturel » et sa possibilité de découpler l'élément KBE du logiciel de CAO, afin de ne pas être restreint à un seul modeleur géométrique (CATIA V5, NX ou autre).

6.1.2. KADViser comme outil de gestion KBE

Nous avons fait le choix d'intégrer un outil de gestion de KBE dans nos travaux de recherche, le progiciel KADViser. L'intérêt principal de l'outil est de raisonner dans des domaines de valeur flous afin de résoudre des problèmes de conception routinière sous-contrainte aboutissant à des objets non totalement définis car imprécis au début du processus de conception, laissant ainsi la possibilité au concepteur de retenir des choix de conception. Deux mécanismes de convergence existent :

1. le choix direct interactif des valeurs numériques restant imprécises (ex : la largeur de la dent de soudure choisie par 6mm, sachant qu'elle doit être comprise entre 4 et 6,5mm) ;
2. la spécification interactive d'une nouvelle règle métier, qualifiée d'« innovante », reliant entre eux plusieurs paramètres imprécis (ex : la largeur de la petite dent vaut 85% de celle de la grande dent) pour faire converger indirectement, par propagation de contraintes, l'ensemble des paramètres restant à définir.

De plus, KADViser permet à ses utilisateurs de générer soit des fichiers bureautiques (traitements de textes, tableurs, etc.), soit des données CAO, l'inverse est aussi vrai puisqu'il est aussi possible de récupérer des informations contenues dans des éléments géométriques.

KADViser utilise des langages de type **XDL** (***X*** ***D****escription* ***L****anguage*). L'interface de travail regroupe les différents fichiers nécessaires dans une seule interface, et automatise certaines des entrées pour faire gagner du temps aux développeurs.

Cette interface de travail permet de gérer les différents types de fichiers suivants :

- CDL : qui gère les classes d'objets, et donc la structure des données ;
- GDL : pour la description d'objets géométriques ;
- RDL : est destiné à recevoir les règles métiers, comme les formules ;
- ODL : permet la description des objets ;
- MDL : gère les menus de l'application ;
- ADL : gère les différentes activités. Dans un cas typique, elle gère les sections de l'interface pour l'utilisateur final ;
- TCL : permet de décrire les Interfaces Homme Machine (IHM) de l'application, de manière avancée.

6.2. Optimisation en conception

À chaque fois qu'un produit est développé, le concepteur tente de trouver la meilleure solution possible et a parfois recours à des techniques d'optimisation. Les différentes techniques d'optimisation permettent l'approximation mathématique d'une fonction objectif donnée (par exemple le meilleur nombre de spires pour un ressort, afin qu'il rebondit 260% sa taille) vers une réponse optimale. La concurrence accrue pousse les entreprises vers l'automatisation du processus d'optimisation afin de proposer des produits plus performants, à moindre coût et en un temps de développement réduit.

Les problèmes d'optimisation peuvent être divisés en cinq catégories schématiques [Roy *et al.*, 2008]. Chacune de ces catégories favorise une interprétation du problème d'optimisation différente, pour mieux le résoudre, selon :

- ses variables de conception [Schütz et Schwefel, 2000 ; Tiwari, 2001] ;
- l'existence de contraintes dans le problème d'optimisation [Coello, 2002 ; Landa Becerra et Coello, 2007] ;
- leurs fonctions objectif (qualitatives, quantitatives, analytiques, etc.) [Shkvar, 2001 ; Zaeh *et al.*, 2004 ; Lebaal, 2007] ;
- le domaine du problème (singulier, multiple et interdépendant) [Tomiyama *et al.*, 2007] ;
- l'environnement d'optimisation (suffisance de connaissances, implication des concepteurs, variables inconnues, etc.) [Beyer et Sendhoff, 2007].

Pour chaque interprétation du problème d'optimisation, nous pouvons choisir une méthode de résolution algorithmique qui représente mieux le problème en question. La figure 22, à la page suivante, représente un schéma synthétisant les techniques algorithmiques existantes utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation.

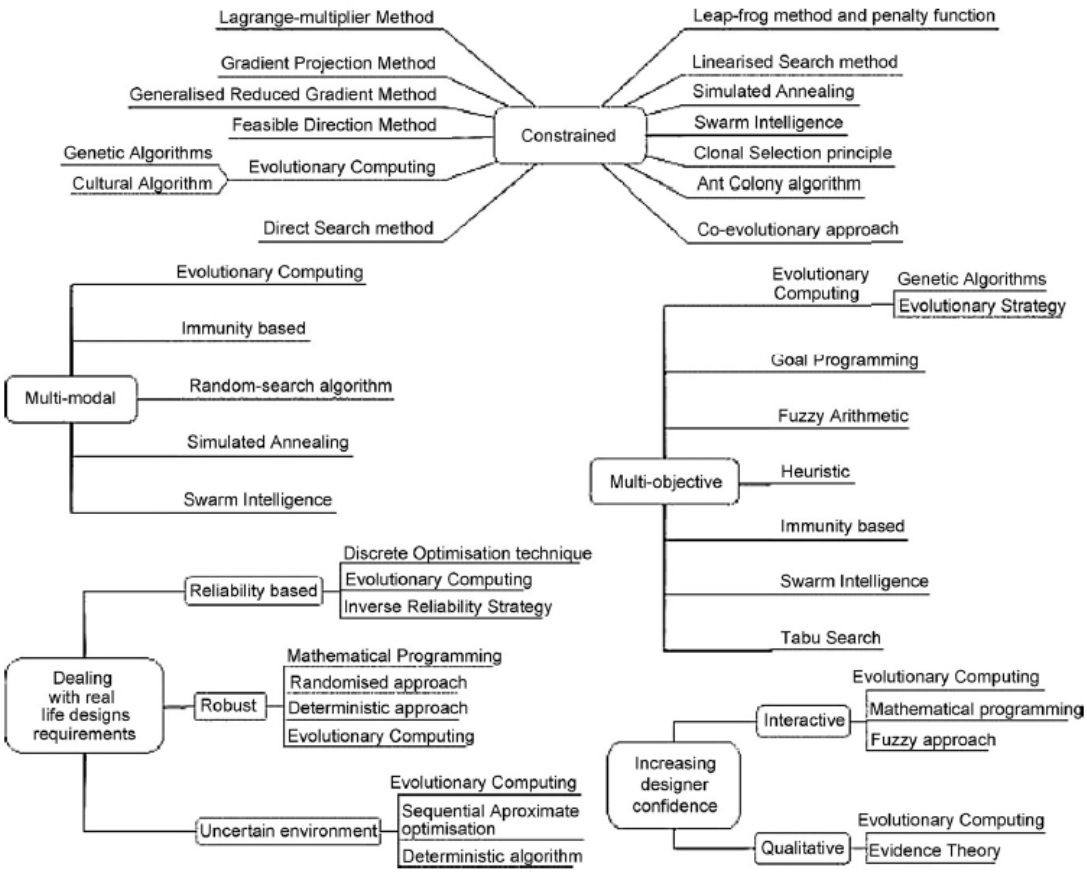


Fig. 22. Techniques majeures de résolution algorithmique de problèmes d'optimisation [Roy *et al.*, 2008].

Le développement d'un modèle d'optimisation dépend de la nature des variables et contraintes du projet en cours. Le modèle suppose que certains aspects de la conception sont constants, appelés paramètres de conception. Les paramètres de conception sont souvent utilisés pour réduire le nombre total de choix (ou champ de conception). Le modèle peut être aussi de nature quantitative ou qualitative. Un modèle quantitatif peut être simulé, analytique ou empirique, les modèles qualitatifs en revanche, sont généralement basés sur des connaissances. Considérant ces trois aspects, l'optimisation d'un problème de conception et de développement peut être représentée mathématiquement de la façon suivante :

$$(P):\begin{cases} Min\ ou\ Max\ \ F_i(X), i=1,....,\ n,\ et\ \ x=\langle X_1,\ \ X_2,\ \ ...\ \ X_n\rangle \\ \qquad\qquad Sachant\ que \\ \qquad\qquad g_j(X)\le 0 \quad j=1,....,\ m \\ \qquad\qquad h_k(X)=0 \quad k=1,....,\ p \\ \qquad\qquad avec \qquad X^u \le X \le X^v \end{cases} \tag{2.1}$$

où F_i est la (ou les) fonction(s) objectif(s), X est le vecteur des variables (paramètres de conception), g_j les limitations d'inégalités, h_k les limitations d'égalités et X^u et X^v sont les vecteurs limitations (bornes) inférieure et supérieure du domaine de recherche. $F_i(X), i=1,....,\ n,$ sont les fonctions objectifs du problème de développement. Minimiser $F(X)$ est équivalent à maximiser $-F(X)$.

La solution d'un problème d'optimisation *(P)* est alors donnée par un ensemble de paramètres *X* pour lesquels la fonction objectif *F* présente une valeur minimale, en respectant les limitations d'égalité, d'inégalité et de domaine.

Il faut noter que plusieurs fonctions objectif peuvent représenter différentes mesures de performance pour une même conception, telles que poids, coût ou qualité [Deb, 2001]. Pour améliorer la vitesse de convergence et éviter les difficultés numériques, il est souhaitable d'homogénéiser les quantités utilisées par l'algorithme d'optimisation (fonction objectif, limitations et variables de conception) en les rendant adimensionnelles et normalisées.

Selon les caractéristiques du problème d'optimisation, nous pouvons appliquer différentes méthodes de résolution pour localiser l'optimum. Cependant, beaucoup de méthodes ne sont valables que pour certains types de problèmes.

Ainsi, il est important de bien connaître les **caractéristiques du problème** posé, afin d'identifier la technique d'optimisation appropriée pour sa résolution. Différentes typologies de méthodes d'optimisation subsistent :

- optimisation avec ou sans contrainte ;
- optimisation locale ou globale ;
- optimisation stochastique ou déterministe ;
- optimisation continue ou discrète.

La distinction la plus importante est celle entre les problèmes avec contraintes (au sens de limitations) et ceux sans contraintes. Du point de vue mathématique, deux méthodes sont utilisées, les méthodes stochastiques et les méthodes déterministes.

Nous allons examiner et utiliser dans un premier temps des méthodes qui nécessitent la connaissance des dérivées (d'ordre 1 ou 2) des fonctions et des contraintes, on les appelle aussi méthodes déterministes en commençant par les algorithmes classiques de minimisation sans contrainte (***B****royden,* ***F****letcher,* ***G****oldfarb,* ***S****hanno* – **BFGS**), certaines de ces techniques servant de base aux algorithmes de minimisation du problème avec contraintes (***S****equential* ***Q****uadratic* ***P****rogramming* **– SQP**). Nous utiliserons ensuite les méthodes pour lesquelles aucun calcul de dérivée n'est nécessaire (méthodes stochastiques).

Les premières méthodes se servent des propriétés mathématiques des fonctions à optimiser, telles que la continuité et la dérivabilité en tout point du domaine des solutions. La solution optimale est localisée itérativement, en calculant une direction de descente privilégiée. Nous les classons en deux groupes, selon le problème d'optimisation à résoudre : méthodes sans contraintes (Gradient, Gradient Conjugué, Newton Raphson, Quasi-Newton, BFGS, MBFGS, DFP, etc.) et méthodes avec contraintes (primales, duales, pénalité et combinées). Le principe de base de ces méthodes consiste à transformer le problème d'optimisation initial avec contraintes en une suite de problèmes d'optimisation équivalents sans contraintes. Les méthodes combinées et en particulier celles de type SQP [Boggs et Tolle, 1995], sont considérées comme les plus robustes et les plus efficaces pour la résolution des problèmes de programmation mathématique avec fonction objectif et contraintes fortement non linéaires.

Les méthodes non-déterministes ou stochastiques font appel à des tirages d'un nombre aléatoire de jeux de variables pour lesquelles les fonctions objectif et limitations sont évaluées. L'approche de l'optimum est guidée par un raisonnement, qui conduit la recherche vers des sous-espaces susceptibles de contenir une bonne solution.

En général ces méthodes localisent la région où se trouve l'optimum mais elles ont des difficultés à l'identifier avec précision. En revanche, elles offrent l'avantage de se passer du calcul du gradient, du Hessien et de son inverse, ce qui peut être intéressant lorsque la fonction n'est pas différentiable ou lorsque le calcul des dérivées représente un coût important. Le nombre d'évaluations des fonctions constitue une des faiblesses de ces méthodes.

6.3. Bilan et positionnement

Dans cette section consacrée à l'application des connaissances lors des travaux de conception et de développement de produits, nous avons énoncé et décrit les divers travaux de recherche existants autour de notre domaine de recherche à savoir des applications informatiques KBE et des techniques d'optimisation existantes. Les approches d'optimisation des paramètres et variables de conception peuvent se faire indépendamment, mais nous avons vu que, liés à une application de KBE, les résultats d'une telle démarche d'optimisation peuvent être mieux adaptés, utilisés et exploités [Cugini *et al.*, 2009 ; Hunter Alarcón *et al.*, 2010].

Malgré les bénéfices avérés de l'utilisation de ce type d'approches, la sélection de techniques d'optimisation reste encore disparate, l'application d'une ou autre restant relativement liée aux paramètres individuels de chaque projet [Roy *et al.*, 2008]. Le choix du type des applications de KBE reste aussi vaste et non-standardisé, dû aux contraintes de chaque entreprise et leur processus de conception et de développement de produits [Shu-Hsien, 2005]. Le couplage entre techniques d'optimisation et approches KBE reste donc un sujet d'actualité dans le domaine du développement de produits et de l'approche DFM, c'est dans cet axe que nous avons décidé d'orienter notre travail de recherche.

7. Conclusion : besoin d'une méthodologie adaptative

Nous avons fait état des divers travaux de recherche portant sur les thèmes de la conception pour la fabrication, de la gestion des connaissances liées aux approches de DFM et leur mise en jeu à l'aide d'applications de KBE et de techniques d'optimisation. Nous constatons l'abondance de travaux concernant la nécessité d'une mise en évidence des connaissances de fabrication lors du processus de conception et de développement de produits [Kuo *et al.*, 2001] et l'importance de les mettre en jeu dès que possible dans le développement d'un nouveau produit [Kumar *et al.*, 2006].

Cependant, malgré l'existence de ces travaux de recherche, nous pouvons souligner la difficulté encore existante à retrouver les bonnes informations à capitaliser et à trouver la bonne méthodologie pour les réutiliser lors du développement d'un produit en contexte de conception routinière [Tomiyama *et al.*, 2009]. Les concepteurs ne doivent pas rester à l'écart de telles démarches car ce sont eux les principaux intéressés, en lien direct avec les experts métier [Riou et Mascle, 2009].

Dans ce contexte, la figure 23 présente une cartographie générale des approches de conception pour la fabrication utilisées en début de cycle de vie du produit selon leur niveau de granularité, et permet de situer la méthodologie que nous nous proposons d'introduire dans les prochains chapitres.

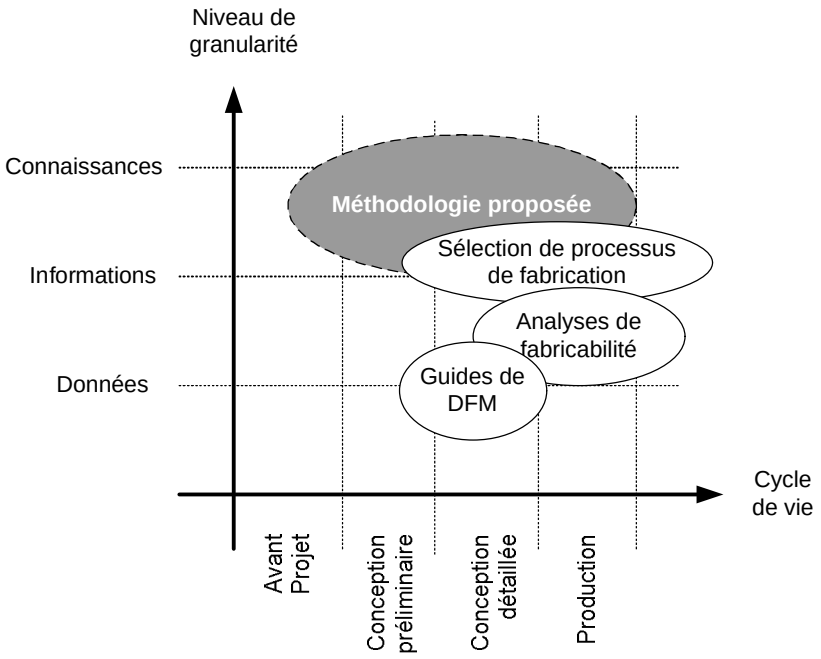


Fig. 23. Cartographie des approches DFM selon le cycle de vie et les niveaux de granularité [Toussaint, Lebaal et Gomes, 2010].

À partir de ces enjeux, il est important de rappeler la forte valeur ajoutée d'une approche de conception orientée pour la fabrication pour :

- **aider les concepteurs** à développer leurs produits de la meilleure façon possible, tenant compte de toutes les règles métier en jeu ;
- mettre en exergue et **gérer les connaissances** liées à la fabrication, leur capitalisation, leur utilisation et leur mise à jour, tout au long du cycle de développement de produits ;
- faire intervenir des **techniques d'optimisation** afin d'améliorer la qualité et la justesse des produits développés à l'aide de l'approche ;
- **développer des outils** spécifiques liés aux activités de l'entreprise Mark IV, mais avec un fondement suffisamment générique pour pouvoir être implantées ailleurs, mettant le travail des experts directement aux mains des concepteurs CAO.

Nous proposons d'introduire, dans le chapitre suivant, la démarche méthodologique qui fait le centre de notre proposition scientifique. Nous continuerons, lors des chapitres subséquents, avec la description de l'intégration des connaissances lors du processus de conception et de développement de produits à travers l'usage des démarches de KBE et d'optimisation.

CHAPITRE 3.

MODELES ET METHODES POUR UNE CONCEPTION A BASE DE CONNAISSANCES ORIENTEE VERS LA FABRICATION : LA METHODOLOGIE FABK (DESIGN FOR FABRICATION BASED ON KNOWLEDGE)

"There is no problem so complicated that you can't find a very simple answer to it if you look at it right... Or put it another way, 'The future of computer power is pure simplicity."

Douglas Adams.

CONTENU DU CHAPITRE

1. Introduction 65

2. Principes de la méthodologie 69

2.1. Objectif de la méthodologie 69

2.2. Définition des parties prenantes impliquées et de leur rôle 71

2.3. Définition des responsabilités des acteurs métier 71

2.4. Cadre global de la méthodologie : capitalisation et conception 74

3. Capitalisation et connaissances dans FaBK 76

3.1. Démarche globale 78

3.2. Première phase : capitalisation des connaissances 79

3.3. Seconde phase : mise en forme des connaissances formalisées 84

3.4. Structure de la base des connaissances 90

3.5. Conclusion 90

4. Conception avancée de produits 91

4.1. Démarche globale 91

4.2. Génération de concept de modèle CAO optimisé 93

4.3. Vérification de la solution 94

5. L'importance de la rétroaction 95

6. Conclusion 96

1. Introduction

À partir de la problématique de recherche et du périmètre définis et décrits dans les chapitres précédents, nous proposons d'introduire, dans ce chapitre, notre contribution scientifique dans le domaine de l'ingénierie du couple produit-process, afin d'obtenir un produit se prêtant aux problématiques de conception pour la fabrication. La prise en compte et l'intégration, très tôt au sein du processus de conception et de développement des produits, des informations issues des métiers situés en aval tel que l'ingénierie du processus de fabrication, reste une question d'actualité s'inscrivant dans la problématique de gestion du cycle de vie des produits. Nous rappelons, ici, nos objectifs visant à :

- définir un modèle permettant la définition, la propagation, la traçabilité, et l'évolution des informations produit-process entre les acteurs métiers impliqués ;
- définir une méthodologie permettant de prendre en compte les problématiques de fabrication, dès les phases préliminaires du processus de conception et de développement des produits ;
- permettre aux concepteurs de se servir des informations produit-process pour faciliter leurs activités routinières lors de la conception et du développement des produits.

En conséquence, ce chapitre est organisé en trois parties distinctes dont l'articulation est représentée sur la Fig. 24 à la page suivante. La première partie (cf. Principes de la Méthodologie FaBK) concerne la définition d'une méthodologie baptisée **FaBK** (*design for **Fa**brication **B**ased on **K**nowledge*), en tant que vision extrapolée dans un autre domaine du modèle **MU**lti-**V**ues **O**rienté **A**ssemblage (**MUVOA**) proposé par [Demoly, Monticolo, *et al.*, 2010], lui-même créé à partir du modèle **M**ulti-**D**omaines et **M**ulti-**V**ues (**MD-MV**) de [Gomes et Sagot, 2002]. Ces derniers donnent un cadre que nous élargissons pour traiter les principales phases du processus d'ingénierie, telles que la définition, le traitement, la vérification, la validation, la propagation, et le retour d'expérience des informations du couple produit-process, dès les phases amont du processus de conception et de développement des produits.

Dans la deuxième partie (cf. Capitalisation et gestion des connaissances dans FaBK), nous détaillons la phase de capitalisation des connaissances, déclinant diverses méthodes pour le faire. Nous traitons également de la formalisation de ces connaissances, qui sont partagées tout au long de la méthodologie.

La troisième partie (cf. Conception avancée de produits) apporte une vision plus détaillée des activités de développement de produits via la méthodologie FaBK. Nous abordons l'impact et l'utilisation des connaissances lors du développement des produits, ainsi que l'importance de la boucle de rétroaction, afin que la méthodologie puisse mieux s'adapter à l'évolution des produits et des procédés de fabrication associés.

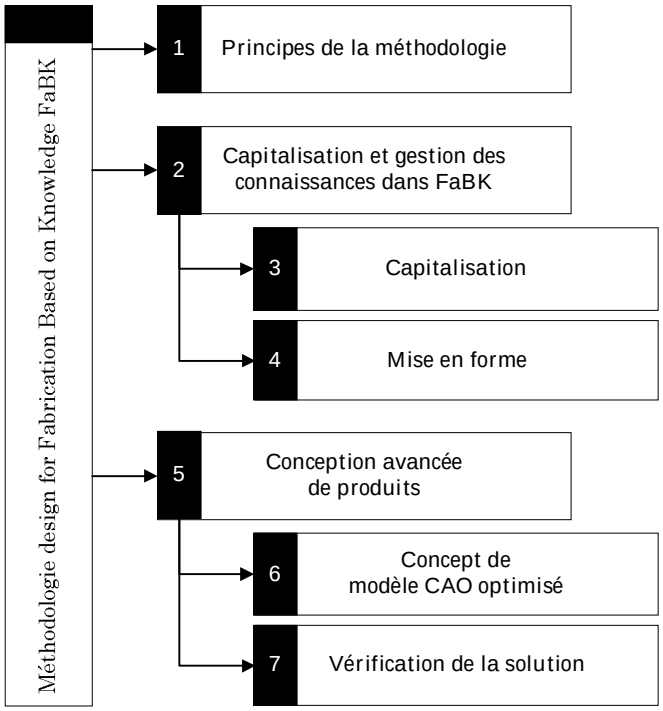


Fig. 24. Représentation synoptique de l'organisation du chapitre 3.

Afin de présenter la méthodologie FaBK, nous avons choisi d'utiliser deux formalismes de modélisation : SADT et SysML. Le choix du premier formalisme est très simple, les diagrammes SADT-IDEF0 sont souvent utilisés pour la construction des mémoires organisationnelles (mémoire projet [Eynard, 2005]) de type bréviaire de connaissances, selon la méthode CYGMA, que nous avons utilisée [Matta *et al.*, 2000 ; Serrafero *et al.*, 2006].

Le choix du second formalisme, à savoir SysML, repose sur la possibilité de construire des diagrammes d'activités enrichis, qui n'est actuellement pas offerte par les diagrammes SADT-IDEF0, et la possibilité de compléter dans le futur la méthodologie proposée, à façon de perspective de travail, jusqu'à pouvoir faire un système d'aide à la création automatique de tous les éléments qui y transitent. Une dernière raison, pour valider notre choix du langage de modélisation SysML, repose sur la facilité de réutilisation des diagrammes ainsi que la facilité d'implémentation de systèmes, en visant toujours de futurs développements de la méthodologie [Willard, 2007].

Le formalisme SysML s'articule autour de neuf types de diagrammes, chacun d'eux étant dédié à la représentation des concepts particuliers d'un système. Ces types de diagrammes sont répartis par l'**OMG**[10] (***O****bject* ***M****anagement* ***G****roup*) en trois grands groupes [Roques, 2009] :

- • quatre diagrammes comportementaux :

[10] L'OMG est un groupement d'industriels dont l'objectif est de standardiser autour des technologies objet, afin de garantir l'interopérabilité des développements. L'OMG comprend actuellement plus de 800 membres, dont les principaux acteurs de l'industrie informatique (Sun, IBM, etc.), mais aussi les plus grandes entreprises utilisatrices dans tous les secteurs d'activité. https://www.omg.org

1. diagramme d'activité (montre l'enchainement des actions et décisions au sein d'une activité complexe) ;
2. diagramme de séquence (montre la séquence verticale des messages passés entre blocs au sein d'une interaction) ;
3. diagramme d'états (montre les différents états et transitions possibles des blocs dynamiques) ;
4. diagramme de cas d'utilisation (montre les interactions fonctionnelles entre les acteurs et le système à l'étude) ;

- un diagramme transverse : le diagramme d'exigences (montre les exigences du système et leurs relations) ;
- quatre diagrammes structurels :

1. diagramme de définition de blocs (montre les briques de base statiques : blocs, compositions, associations, attributs, opérations, généralisations, etc.) ;
2. diagramme de bloc interne (montre l'organisation interne d'un élément statique complexe) ;
3. diagramme paramétrique (représente les contraintes du système, les équations qui le régissent) ;
4. diagramme de packages (montre l'organisation logique du modèle et les relations entre packages).

Nous avons fait usage majoritairement des diagrammes de cas d'utilisation, de définition de blocs, de packages, et d'activités pour définir notre approche méthodologique. Les figures 25, 26, 27 et 28 illustrent les types d'objets et les éléments qui conforment les diagrammes d'utilisation, de blocs, de packages, et d'activités respectivement, que nous présenterons par la suite pour décrire notre approche. Nous pouvons observer les nodes et les flux pour les trois types de diagrammes utilisés.

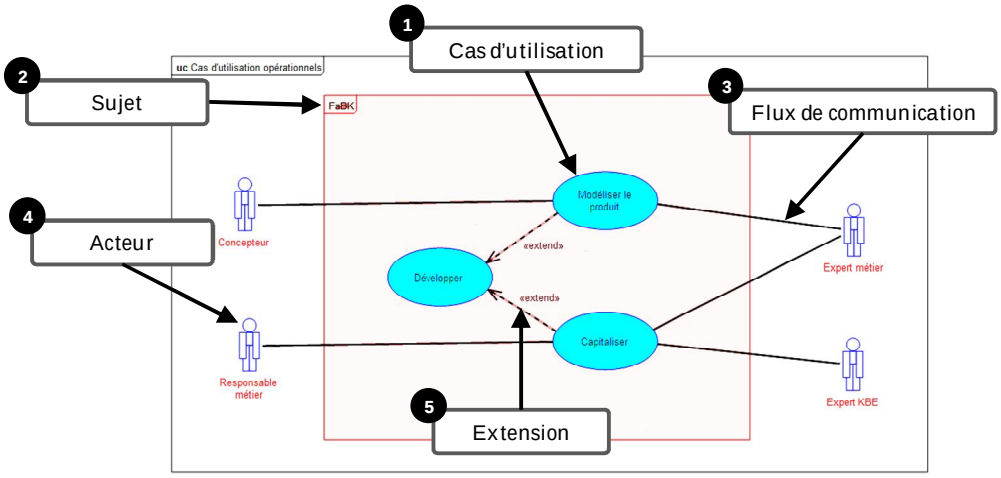


Fig. 25. Légende pour diagramme SysML de cas d'utilisation.

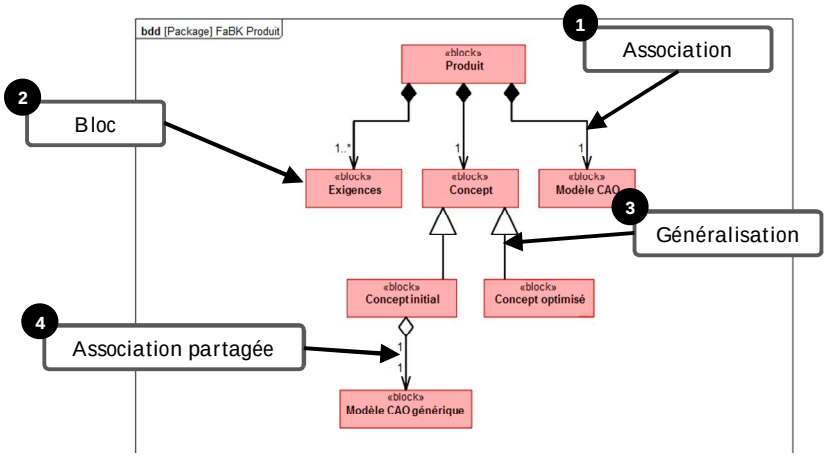


Fig. 26. Légende pour diagramme SysML de définition de blocs.

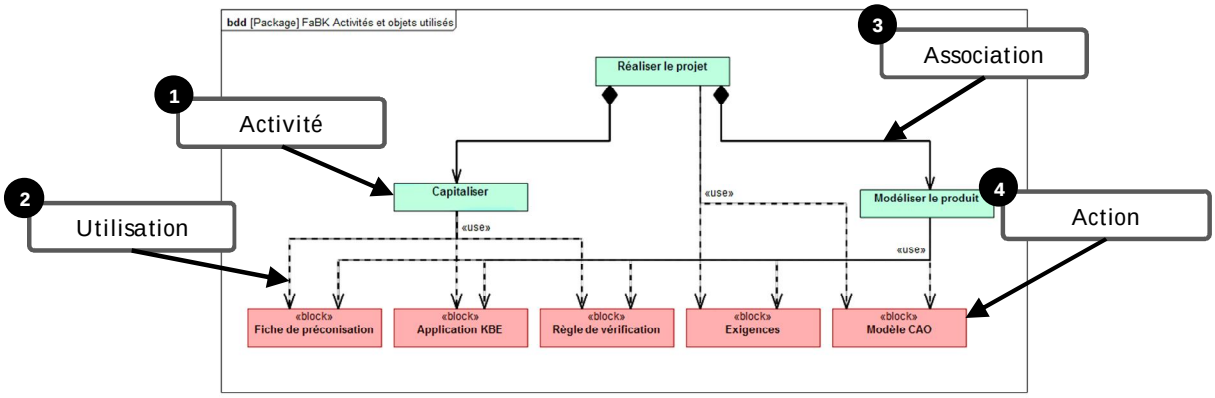


Fig. 27; Légende pour diagramme SysML de packages.

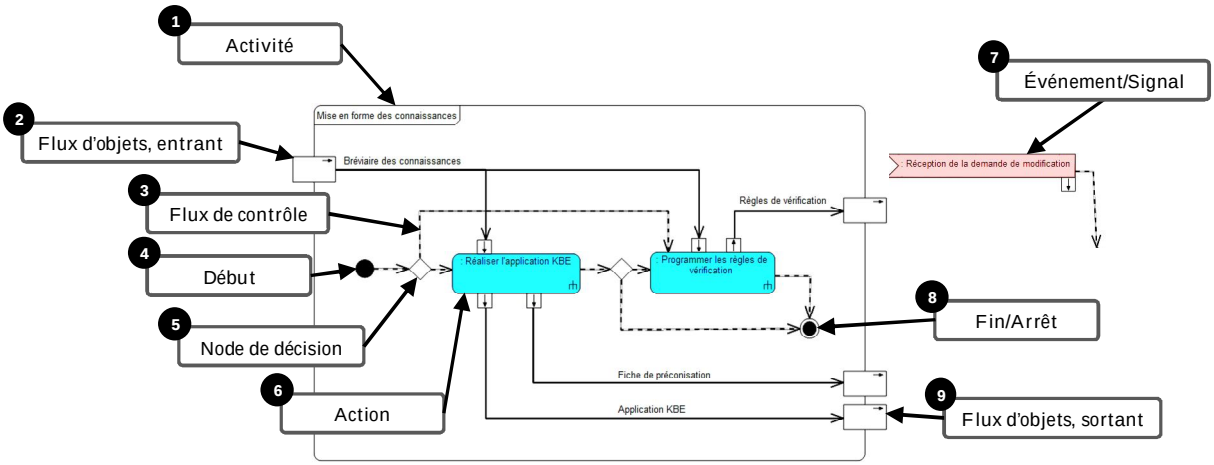


Fig. 28. Légende pour diagramme SysML d'activités.

Ces légendes permettront une meilleure analyse de la forme et du fonctionnement des diagrammes que nous présenterons par la suite pour décrire notre approche.

Enfin, nous concluons ce chapitre sur la nécessité de considérer les informations issues des procédés de fabrication et des critères fonctionnels et de forme du produit, afin d'apporter une meilleure compréhension de l'impact des activités de fabrication en aval,

au sein du processus de conception et de développement des produits. De plus, nous soulignons le besoin d'implémenter les mécanismes de la méthodologie FaBK proposé dans un outil s'intégrant aux systèmes PLM existants, afin de permettre la gestion des informations du couple produit-process.

2. Principes de la méthodologie

2.1. Objectif de la méthodologie

La méthodologie FaBK a pour but de faciliter la prise en compte, dès les premières phases du processus de conception et de développement des produits, des contraintes liées au domaine de la fabrication. Dans le cadre des ces travaux, le domaine de fabrication qui a été choisi est celui de la mise en forme de pièces plastiques, plus particulièrement celui de l'extrusion-soufflage. Néanmoins, nous avons essayé de l'élargir pour prendre en compte d'autres procédés de fabrication ou d'assemblage de pièces plastiques, tels que la soudure, afin de consolider la démarche. FaBK fournit avant tout une aide à la définition du produit en fonction des informations du couple produit-process existantes. En aucun cas, elle n'oblige l'utilisateur à choisir une solution particulière plus qu'une autre.

Il s'agit d'une démarche de **conception intégrée**, au sens où elle privilégie la considération des règles et paramètres existants entre la pièce et son processus de fabrication. L'idée est d'aider le concepteur à mieux développer son produit, ainsi qu'à évaluer ses choix de conception avec les règles métier capitalisées, au fur et à mesure du déroulement du processus de conception et de développement.

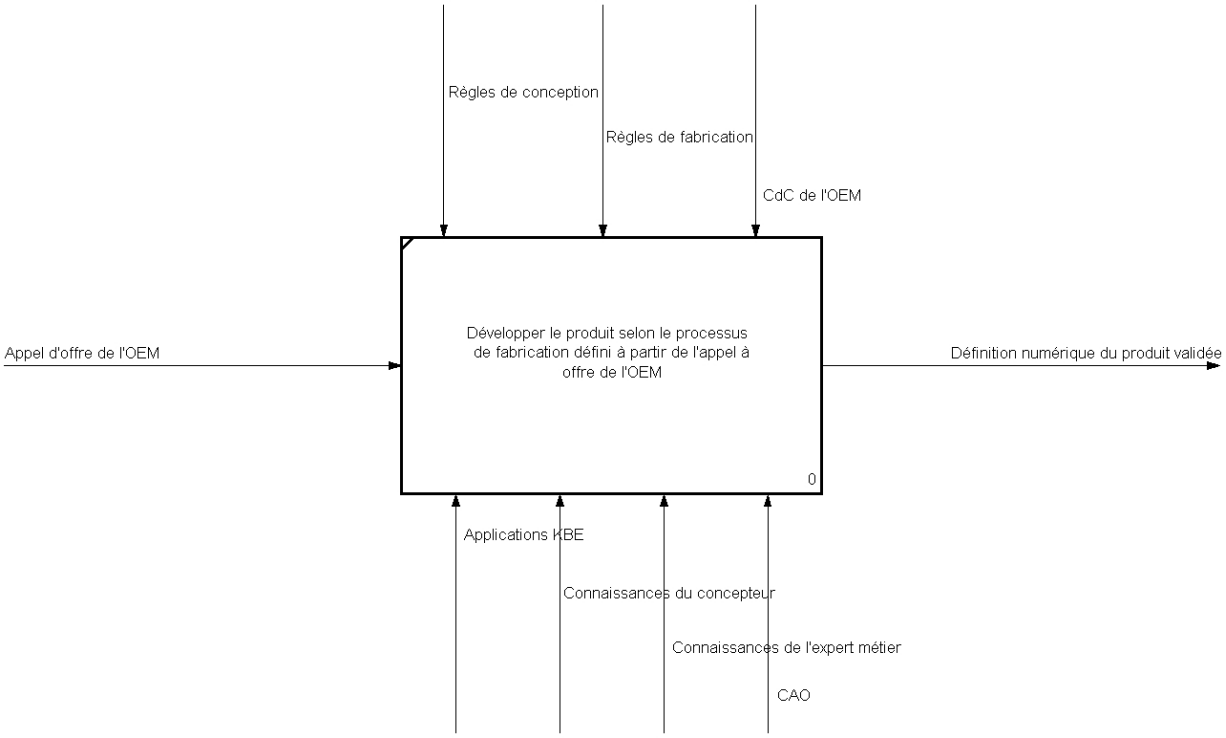


Fig. 29. Diagramme IDEF-0 niveau A-0 d'un processus de conception intégrée

La figure 29 précédente présente, sous la forme d'un diagramme SADT, la vue globale d'un processus de conception intégrée : l'activité A-0 consiste en la définition du produit à partir de l'appel d'offre de l'OEM (***O**riginal **E**quipment **M**anufacturer*). Ceci se fait dans le respect des règles de conception / fabrication (par exemple : règle d'orientation par gravité d'un conduit d'air ou bien fabricabilité de la définition de produit proposé), et conformément aux exigences fournies par l'OEM. En support de cette activité viennent les connaissances du concepteur, de l'expert métier, ainsi que des outils d'exploitation des connaissances (applications KBE) et de CAO.

Nous décrivons ainsi, à la figure 30, les **cas d'utilisation** de la méthodologie FaBK pour la capitalisation des connaissances, en parallèle de l'activité principale d'ingénierie du BE de l'entreprise. Sur le diagramme, nous pouvons observer l'activité de développement, qui s'appuie sur :

- la **modélisation** du produit, activité développée par les concepteurs et validée par les experts métier ;
- la **capitalisation**, qui regroupe les activités de l'expert KBE, ainsi que les validations de la part des experts métier et des responsables (études et du BE).

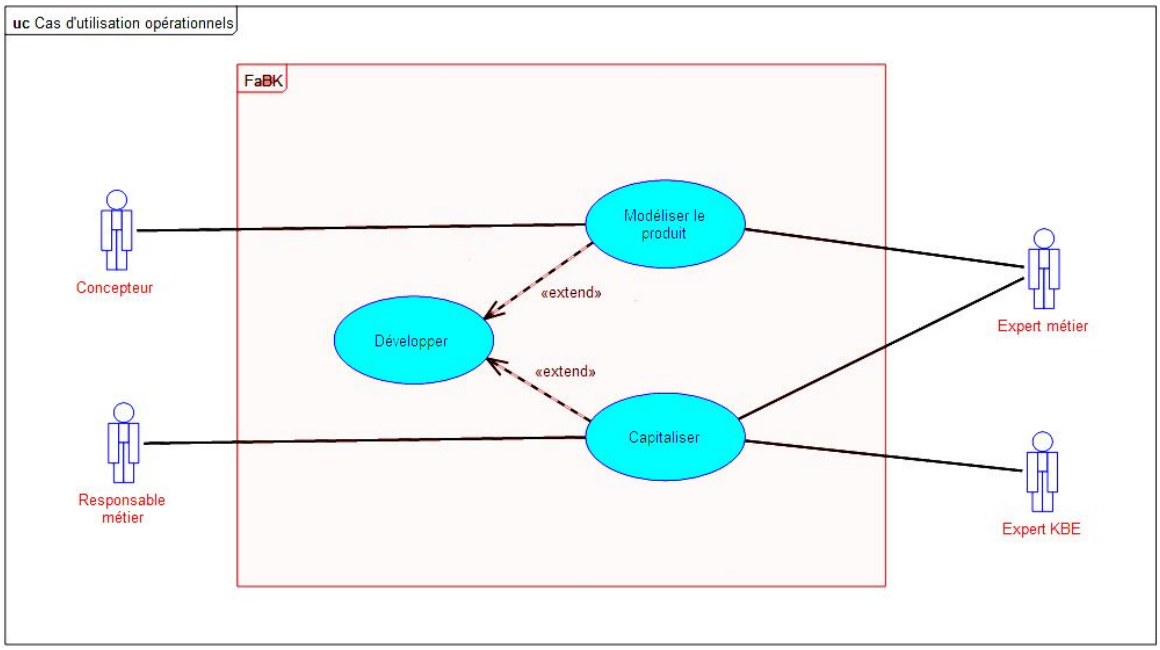


Fig. 30. Cas d'utilisation SysML de la méthodologie FaBK.

L'activité courante du BE étant de développer des produits conformes aux demandes de l'OEM, nous proposons l'élargissement de cette activité, par l'utilisation des connaissances capitalisées sur les projets déjà traités et l'actualisation en permanence de ces règles. Nous introduisons l'activité de l'expert KBE qui s'appuie sur les savoir-faire des experts métier et sur la validation des produits par ces mêmes experts ainsi que par les responsables (du BE et d'études).

2.2. Définition des parties prenantes impliquées et de leur rôle

Afin de mieux orienter les phases préliminaires du processus de conception et de développement des produits vers les questions de fabrication, nous avons identifié quatre rôles métier associés à quatre parties prenantes, tels que :

- le responsable métier (nommé aussi responsable produit, études, voire BE) : il a pour objectif de choisir les solutions technologiques en cohérence avec les fonctions techniques et les exigences fonctionnelles issues du cahier des charges, de gérer la structure produit et ses différentes configurations, et de spécifier le contexte de conception / modélisation pour le(s) concepteur(s) ;
- le concepteur : il a pour objectif de spécifier et définir la géométrie du produit selon les exigences géométriques issues des exigences fonctionnelles, ainsi que de prendre en compte les contraintes issues des métiers situés en aval du processus de conception et de développement ;
- l'expert métier (également appelé ingénieur process ou expert process) : il a pour objectif de définir, valider et garantir les informations et connaissances relatives aux technologies de fabrication courantes, amenant des spécifications et des contraintes sur les géométries de définition du produit ;
- l'expert KBE : il a pour objectif d'analyser et capitaliser les produits développés, ainsi que les différents savoir-faire utilisés, afin d'aider à construire non seulement des bases de connaissances (bréviaires ou mémoires de connaissances), mais aussi les différentes interfaces et applications KBE pour les mettre en œuvre.

2.3. Définition des responsabilités des acteurs métier

Afin de permettre de cartographier les informations à gérer dans les domaines du « produit » et du « processus de fabrication », nous avons listé les règles standards provenant des approches DFM listées par [Swift, 2003] (cf. *2.6* à la page 54). Le tableau 6 ci-après énonce seize règles DFM impliquant les quatre parties prenantes identifiées précédemment. De ce fait, ce tableau nous permet de cartographier les responsabilités des quatre acteurs identifiés. Cette première identification nous amène à définir, pour chaque partie prenante :

- les rôles et objectifs ;
- les responsabilités ;
- les entités manipulées.

Tab. 6. Identification des responsabilités des acteurs métiers via les règles DFM.

	Règles de DFM	Responsable produit	Concepteur	Expert métier	Expert KBE
1	Identifier les caractéristiques critiques (tolérances, états de surface)	X		X	
2	Identifier les facteurs impactant la fabrication des caractéristiques critiques	X		X	
3	Estimer les coûts de fabrication	X		X	
4	Minimiser le coût des composants	X	X		
5	Établir les tolérances maximales par caractéristique	X	X		
6	Déterminer la capacité process pour chaque caractéristique au plus tôt	X		X	
7	Éviter les tolérances serrées		X		
8	Développer les produits de façon à ce qu'ils soient facilement contrôlables		X		X
9	Minimiser le nombre de surfaces à usiner		X		X
10	Minimiser le nombre de réorientations pendant la fabrication	X	X		
11	Utiliser les procédés de fabrication standard si possible	X		X	
12	Utiliser des congés/filetages généreux sur des produits moulés, ou usinés		X		X
13	Éviter des procédés secondaires	X	X		
14	Développer les produits pour une mise au point facile avec des outils standards		X		X
15	Utiliser les caractéristiques spéciales des procédés (inserts moulés, couleurs)		X	X	X
16	Bien détailler les définitions numériques pour la fabrication et être conforme aux standards de cotation		X		X

Nous pouvons alors y associer les différentes entités à manipuler respectivement par chaque acteur métier. Nous proposons ici d'extrapoler le modèle MUVOA [Demoly, 2010], modèle plus détaillé du modèle MD-MV [Gomes et Sagot, 2002], à notre problématique de conception orientée fabrication. Dès lors, nous procédons à une décomposition en domaines et points de vue. Ainsi, chaque domaine correspond à une phase du cycle de vie du produit, et chaque point de vue (profil métier) décrit les conventions et les règles pour interagir avec le produit, afin de mieux répondre aux responsabilités des parties prenantes.

Le tableau 7, à la page suivante, définit les interactions de chaque acteur métier et le développement des produits, afin d'intégrer les règles de DFM. Ces interactions décrivent les rôles, les objectifs, les entités manipulées et les processus métiers. De ce fait, chacune de ces interactions sert à décrire les activités des parties prenantes dans le cadre de la méthodologie FaBK.

Tab. 7. Interactions des acteurs métier identifiées.

Acteurs métier	Responsable produit	Concepteur	Expert métier	Expert KBE
Rôle / Objectif	Définir le produit selon le cahier des charges	Concevoir et définir la géométrie du produit	Définir les technologies de fabrication et leur impact sur le produit	Capitaliser les connaissances de l'entreprise et fournir des aides au développement de produits
Responsabilités	Comment formaliser le CdC pour un produit selon les besoins de l'OEM ? Comment repérer les informations et connaissances utiles pour les produits futurs ?	Comment réaliser un produit répondant aux besoins des différents métiers et disciplines ?	Comment garantir les conditions pour une technologie de fabrication ?	Comment formaliser les connaissances retenues par l'entreprise pour le développement de produits ? Comment développer des applications d'aide aux concepteurs pour le développement de produits à partir des règles métier ?
Entités manipulées / Concepts	Exigences fonctionnelles, Composants, Nomenclatures, Normes, etc.	Composants, Pièces, Caractéristiques géométriques, etc.	Technologies de fabrication, Outillages, Capabilités, Coûts, Contraintes, etc.	Règles de fabrication, Pièces, Caractéristiques géométriques, Capabilités, etc.
Processus / Méthode	Prendre en compte les exigences fonctionnelles et géométriques, et les informations issues du CdC Établir la définition du produit, support à la conception / modélisation / gestion des informations associées Valider les connaissances aptes à être capitalisées	Modéliser la géométrie du produit en s'appuyant sur les exigences géométriques et fonctionnelles, et les caractéristiques majeures de fabrication	Prendre en compte les capabilités machines Valider les choix des définitions numériques de produits	Prendre en compte les capabilités des processus de fabrication Prendre en compte les contraintes géométriques et fonctionnelles des produits Définir les interactions entre les concepteurs et les règles métier capitalisées

2.4. Cadre global de la méthodologie : capitalisation et conception

La figure 31 à la page suivante traduit le cadre applicatif global de la méthodologie proposée [Toussaint, Gomes*, et al.*, 2008]. Cette figure permet de représenter de manière synthétique la démarche FaBK (nous proposerons des représentations plus formelles par la suite). De gauche à droite, la méthodologie décrit les interactions des différents acteurs métier pour garantir le développement d'un nouveau produit qui suit les différentes règles métier et les cahiers des charges de l'OEM.

Le contexte général, pour l'application de cette méthodologie, repose sur l'éventuelle utilisation d'un outil d'ingénierie collaborative de type PLM [Toussaint, Bluntzer*, et al.*, 2008]. Nous avons choisi l'ACSP pour ses fonctionnalités dédiées à la coopération synchrones et asynchrones entre les différents acteurs métier [Gomes *et al.*, 1999], et celles dédiées à la gestion des données, informations et connaissances.

La méthodologie commence par une phase d'entrée des informations, où l'expert KBE introduit les connaissances, les règles métier et les moyens pour les exploiter. Les responsables produit renseignent dans la base PLM les informations produit-process pour le produit à développer, issues du cahier de charges de l'OEM. Ensuite, les informations entrées dans la base PLM sont utilisées pour initier un nouveau produit. Elles sont utilisées à la fois pour débuter le concept du nouveau produit par le biais des applications KBE par propagation de contraintes [Toussaint, Gomes*, et al.*, 2008] et pour satisfaire les exigences par des boucles d'optimisation [Toussaint, Lebaal, Schlegel*, et al.*, 2010], afin d'établir un concept optimisé respectant les règles et contraintes issues du processus de fabrication, identifiées par les acteurs métier.

De ce fait, ce concept optimisé est fourni au concepteur, qui vient le compléter avec tous les éléments qui ne sont pas formalisables sous forme de connaissances explicites. Pendant et après son interaction avec le modèle du produit, le concepteur fait usage des différentes applications de vérification par script. Ces applications ont été développées pour contrôler la qualité du travail du concepteur, et pour vérifier l'adéquation du produit modélisé avec les différentes règles métier produit-process en jeu [Toussaint, Gomes et Sagot, 2009 ; Toussaint, Demoly*, et al.*, 2010]. À tout moment lors des vérifications, le concept (ou les règles métier) peut être remis en question et conduire à revenir sur les étapes précédentes.

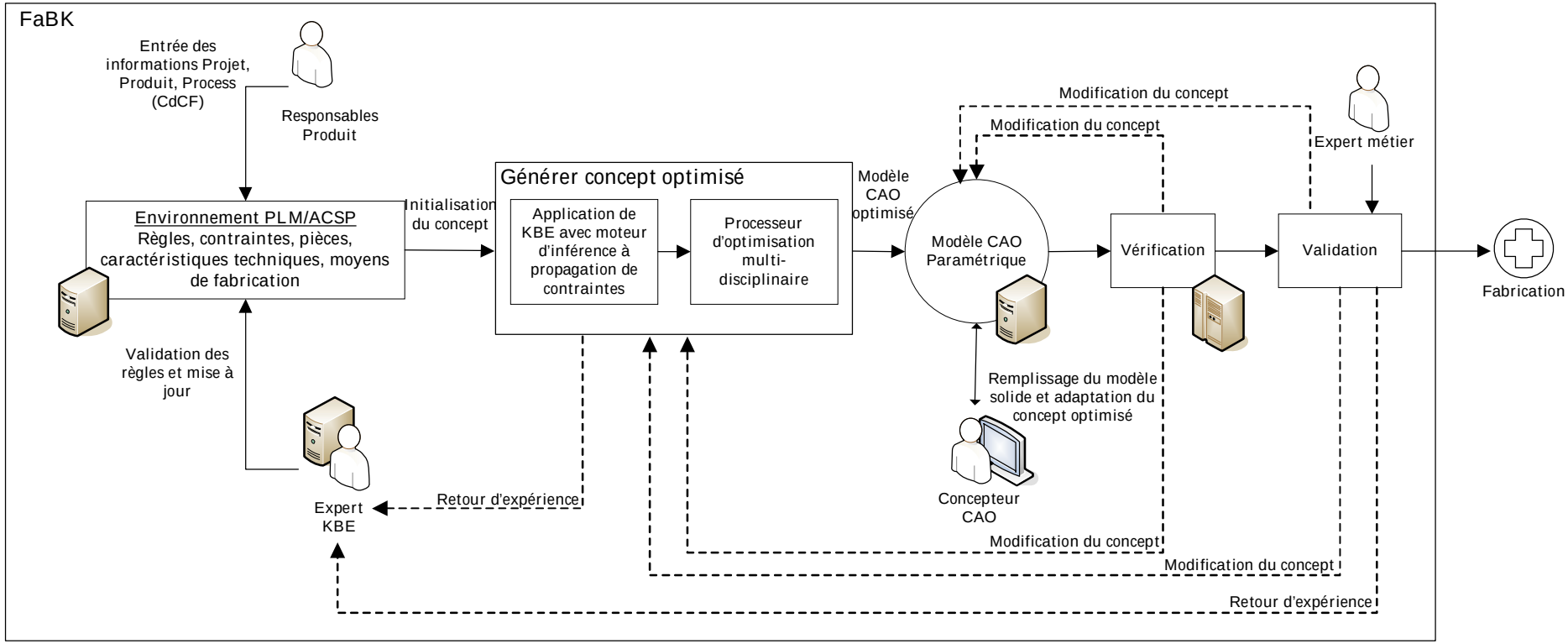


Fig. 31. Cadre global de la méthodologie FaBK.

Enfin, les vérifications par méthode de script réalisées sous VBA au sein de l'environnement CAO conduisent à la validation par les experts métier [Toussaint, 2008]. C'est lors de cette dernière activité que le modèle CAO est qualifié et validé avant de passer aux étapes suivantes de son cycle de vie (calculs, prototypage, essais physiques ou fabrication). Les retours d'expérience, issus de cette phase ou de la phase antérieure, servent à compléter et faire évoluer les bases de règles et applications KBE développés.

Par conséquent, la méthodologie se divise en deux étapes : la capitalisation des connaissances et la modélisation du produit (Fig. 32). Les exigences de l'OEM initient l'activité de modélisation, qui se sert des éléments fournis par l'activité de capitalisation (fiches de préconisation, modèles CAO génériques et règles de vérification) pour réaliser un nouveau modèle CAO du produit.

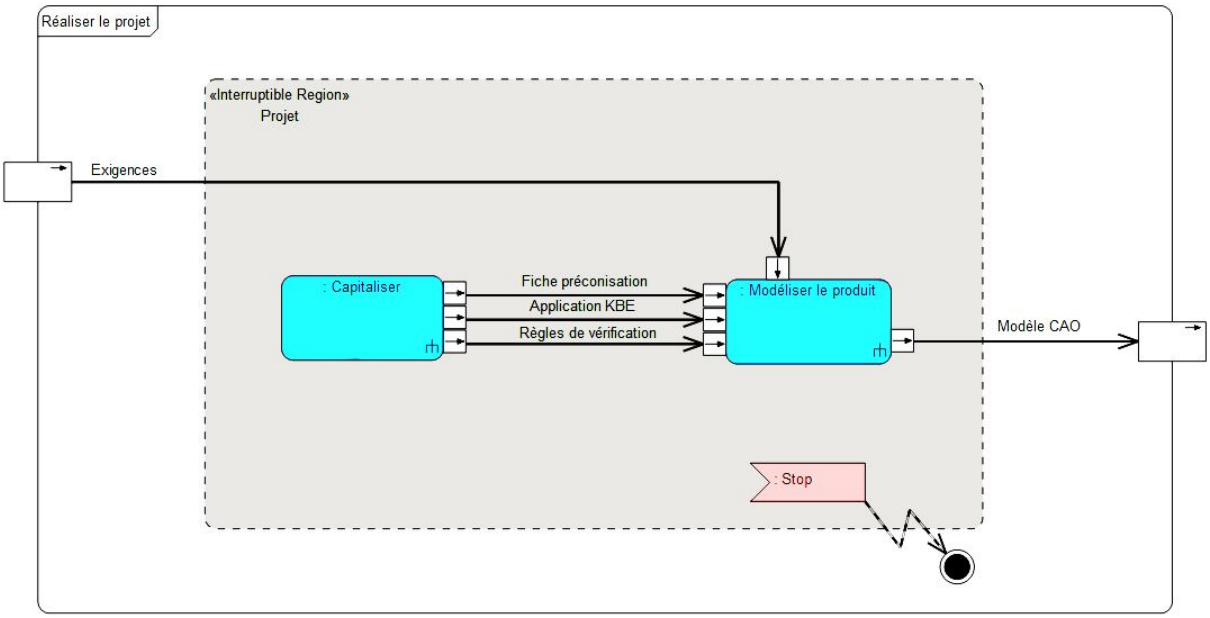


Fig. 32. Diagramme d'activités SysML de FaBK.

Nous présentons, dans les sections suivantes, les particularités de chaque phase de la méthodologie. Nous décrivons la façon dont nous avons procédé pour capitaliser et exploiter les connaissances de l'entreprise, ainsi que les différentes démarches pour construire une méthodologie apte à être utilisée couramment par l'entreprise. Ceci permet de garantir la conception de produits fidèles aux règles produit-process, dans un moindre délai, par la réduction des boucles routinières.

3. Capitalisation et connaissances dans FaBK

La formalisation des connaissances en vue de leur capitalisation répond à quatre principaux objectifs :

- **l'accessibilité** aux connaissances, afin de pouvoir retrouver facilement celles dont on a besoin ;
- la **transmission** des connaissances ;
- **l'exploitation** des connaissances, et plus particulièrement l'exploitation automatique ;

- la **création** de nouvelles connaissances.

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2, les systèmes d'aide à la conception ne peuvent pas exister sans une formalisation des connaissances. Ainsi, nous allons présenter la démarche de formalisation des connaissances que nous avons retenue dans nos travaux de recherche. Cette formalisation est nécessaire pour le bon déroulement de la méthodologie et pour les outils développés qui assistent les tâches suivantes :

- la génération des concepts génériques respectant les règles métier ;
- le traitement des concepts pour générer un concept optimisé ;
- la vérification de la cohérence des concepts avec les règles métier ;
- la détermination des contraintes sur les produits, dues aux choix effectués sur le processus de fabrication ;
- la déduction des ressources de fabrication possibles pour les solutions sélectionnées (par exemple les machines disponibles pour un procédé de fabrication particulier).

Le but de la formalisation est de permettre une capitalisation et une exploitation des connaissances, concernant le lien entre les paramètres du produit et ceux liés aux processus de fabrication associés. Le résultat de la formalisation est donc constitué des connaissances permettant de vérifier ou de construire des produits selon ces deux ensembles d'informations (données du produit et données du processus de fabrication).

Avant de présenter la démarche de formalisation des connaissances, nous proposons de définir les **blocs structurels fondamentaux** (Fig. 33). Le premier dénote l'existence d'une base de données, composée de plusieurs produits issus de l'historique métier, pouvant servir à repérer de nouvelles connaissances à capitaliser et exploiter, et des produits en cours de développement qui serviront, eux aussi, à construire de nouvelles connaissances utiles pour des développements futurs. Le second est constitué d'une base de données des connaissances, intégrant les savoir-faire métier capitalisés à l'aide de la méthodologie. Cette base de données sert non seulement à alimenter la méthodologie lors de son utilisation courante, mais aussi à construire les applications KBE, les scripts de vérifications, ou encore les fiches de préconisations.

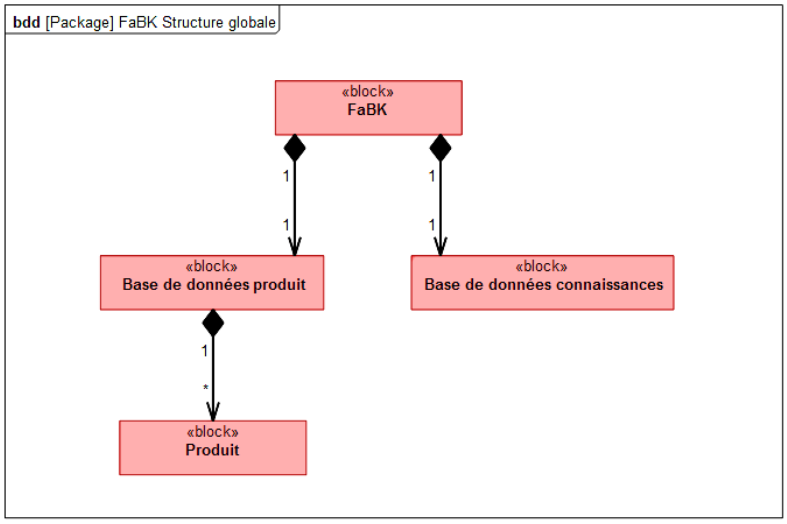


Fig. 33. Diagramme de définition de blocs SysML de la méthodologie FaBK.

Dans les sections suivantes, nous présentons les démarches de capitalisation et d'exploitation des connaissances que nous avons utilisées dans ces travaux de recherche. Comme nous l'avons déjà évoquée, nous avons utilisé la méthode CYGMA [Fouet, 1997 ; Serrafero *et al.*, 2006] pour établir des bréviaires des connaissances, qui servent de support à la base de connaissances, ainsi que plusieurs méthodes pour transformer les connaissances en applications KBE et en scripts VBA intégrés directement au sein des environnements CAO.

3.1. Démarche globale

Nous commençons par le **cas normal d'utilisation** de la démarche, qui décrit les étapes de traitement des connaissances pour la construction d'éléments d'aide aux concepteurs, ainsi que pour leur modification éventuelle. D'une manière générale, l'approche comporte deux activités qui s'enchaînent : la capitalisation puis l'exploitation des connaissances (Fig. 34). Chacune de ces activités se décompose en sous-activités plus détaillées.

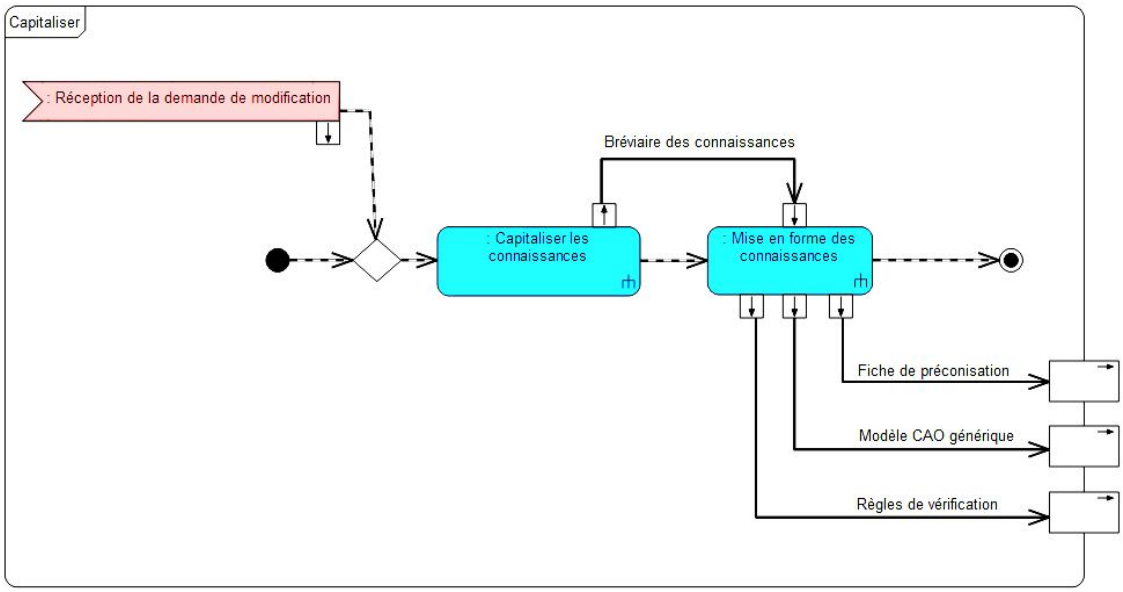


Fig. 34. Diagramme d'activités SysML de la démarche globale de capitalisation des connaissances.

L'activité de capitalisation débute par une analyse des documents. Elle est suivie d'une phase d'essais afin de valider les connaissances capitalisées avant de les transformer en éléments exploitables. Chacune de ces activités se décompose en sous-activités plus détaillées (cf. *Section* 3.2 à la page 79).

Notons d'ores et déjà la présence d'une **demande de modification** lors de l'activité de capitalisation. Cette demande est issue de l'utilisation et du retour d'expérience de la méthodologie, et sera détaillée ultérieurement.

L'activité d'exploitation, quant à elle, se décompose en deux activités : la réalisation des applications KBE et le codage des scripts de vérification (cf. *Sections* 3.3.1 *et* 3.3.2 respectivement à la page 85 et à la page 89).

Nous proposons maintenant de décrire plus en détail la composition et les spécificités de chacune de ces activités et éléments décrits.

3.2. Première phase : capitalisation des connaissances

La phase de capitalisation des connaissances est aussi importante que celle d'exploitation. Il s'agit de coder les expertises métier, sous la forme de règles, dans la base de connaissances. Pour ces travaux de recherche, nous avons formalisé les connaissances extraites principalement des experts métier (à travers des questionnaires et des entretiens individuels), mais également des guides de conception et des processus de fabrication, des cahiers des charges relatifs à d'anciens produits, et même des rapports de calcul et d'essais des produits développés précédemment.

L'activité de capitalisation des connaissances se décompose en trois étapes : l'analyse des documents, les essais, et l'élaboration du bréviaire des connaissances. L'analyse des documents est le cœur de l'activité de capitalisation (Fig. 35), que nous réalisons par une démarche de mémoire organisationnelle reposant sur la méthodologie CYGMA, déclinant la méthode et l'adaptant à notre contexte industriel. L'activité d'essais sert à valider les connaissances acquises lors de l'activité précédente. L'élaboration du bréviaire des connaissances métier formalise les règles, paramètres, et autres éléments.

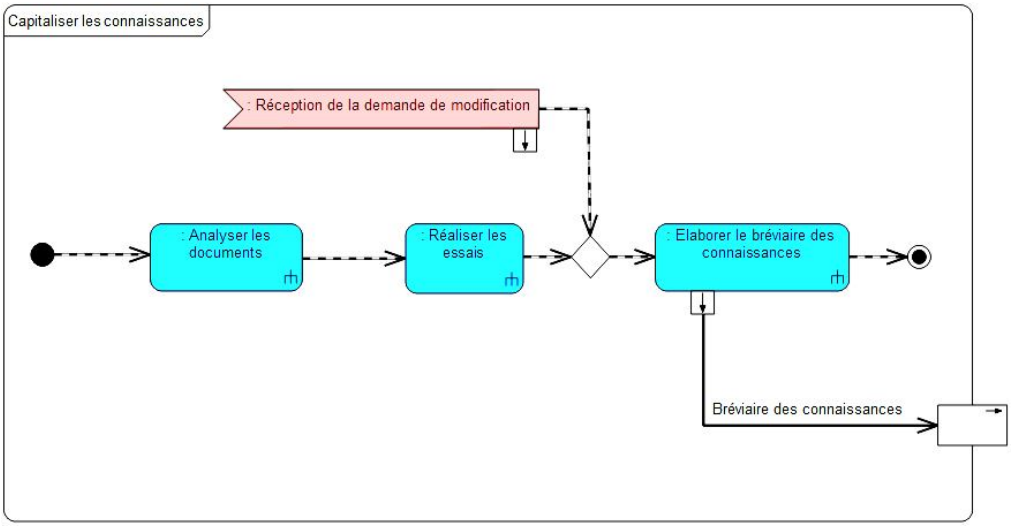


Fig. 35. Diagramme d'activités SysML de l'activité de capitalisation des connaissances.

L'élaboration du bréviaire des connaissances (ou *knowledge broker*) se décompose en quatre activités : le renseignement du glossaire métier contenant le vocabulaire métier, la réalisation du processus métier, l'identification des expériences métier, et la formalisation de l'expertise métier. Ces activités sont conformes à la méthode CYGMA [Fouet, 1997 ; Serrafero *et al.*, 2006], et seront décrites ultérieurement.

Dans un bréviaire formalisé par la méthode CYGMA, les connaissances sont structurées en quatre documents : le glossaire métier, le livret sémantique, le cahier de règles et le manuel opératoire. La figure 36, à la page suivante, illustre les étapes suivies pour construire les bréviaires métier utilisés.

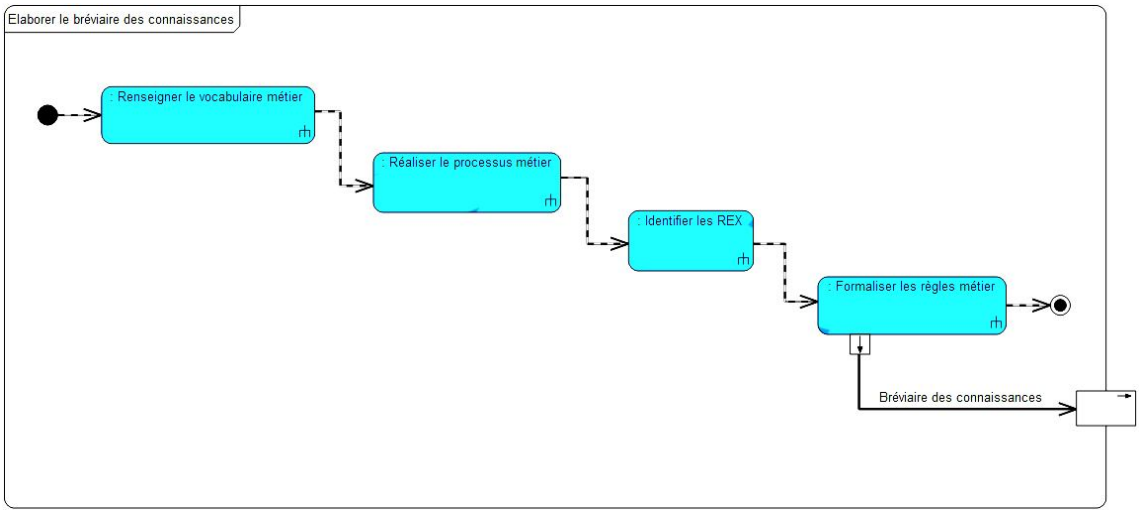
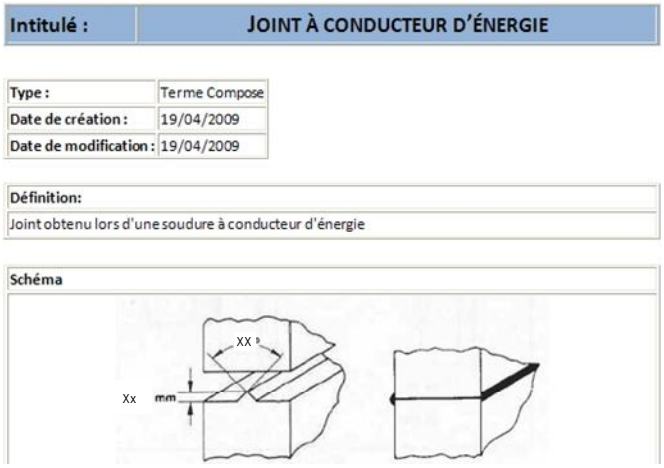


Fig. 36. Diagramme d'activités SysML du développement d'un bréviaire des connaissances métier.

La figure précédente illustre la linéarité de la construction des bréviaires métier. Chacune de ces étapes sert à repérer et consolider les connaissances détenues par l'entreprise et les formaliser sous une forme exploitable par la suite.

3.2.1. Glossaire métier

Dans le glossaire sont définies les connaissances singulières (recueils de cas particuliers définissant les limites du domaine) et les connaissances terminologiques (sous forme de listes de termes utilisés) (Fig. 37).



Intitulé :	JOINT À CONDUCTEUR D'ÉNERGIE

Type :	Terme Compose
Date de création :	19/04/2009
Date de modification :	19/04/2009

Définition:
Joint obtenu lors d'une soudure à conducteur d'énergie

Schéma

Fig. 37. Terme métier extrait du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique.

Chaque élément du vocabulaire métier est décrit dans le glossaire par sa définition, et peut contenir sa traduction, sa source et ses références.

3.2.2. Livret sémantique

Le livret sémantique sert à contenir les connaissances structurelles, décrites sous forme de connaissances ontologiques, connaissances factuelles, connaissances *faits initiaux*, et connaissances *buts initiaux*. Le livret est décrit sous forme d'arbre, mettant en évidence les opérateurs logiques qui existent entre les différentes classes d'objets. En nous appuyant sur la méthode Knova-Sigma, évolution plus récente de la méthode CYGMA,

de [Serrafero *et al.*, 2006], nous avons décrit le livret sémantique sous forme de réseaux sémantiques (Fig. 38).

Cette figure décrit la relation entre les différents éléments trouvés dans le glossaire à l'aide des :

- arcs d'agrégation, appelés aussi « liens **isa** (IS A) ». L'image choisie n'est pas suffisamment globale pour le contenir mais nous pouvons parler d'une soudure qui est (ISA) une méthode d'assemblage de pièces plastiques;
- arcs de composition, appelés aussi « liens **asa** (HAS A) ». Sur l'image une dent de soudure a (ASA) un trottoir de soudure ;
- arcs d'instanciation, appelés aussi « liens **iko** (IS A KIND OF) ». Sur l'image un cordon de soudure transversal est un type de (IKO) cordon de soudure.

Ces réseaux permettent une identification plus rapide et intuitive des relations entre les différents éléments. Ils aident aussi à repérer les éléments, et les rôles qu'ils vont jouer, lors de la mise en place de règles métier.

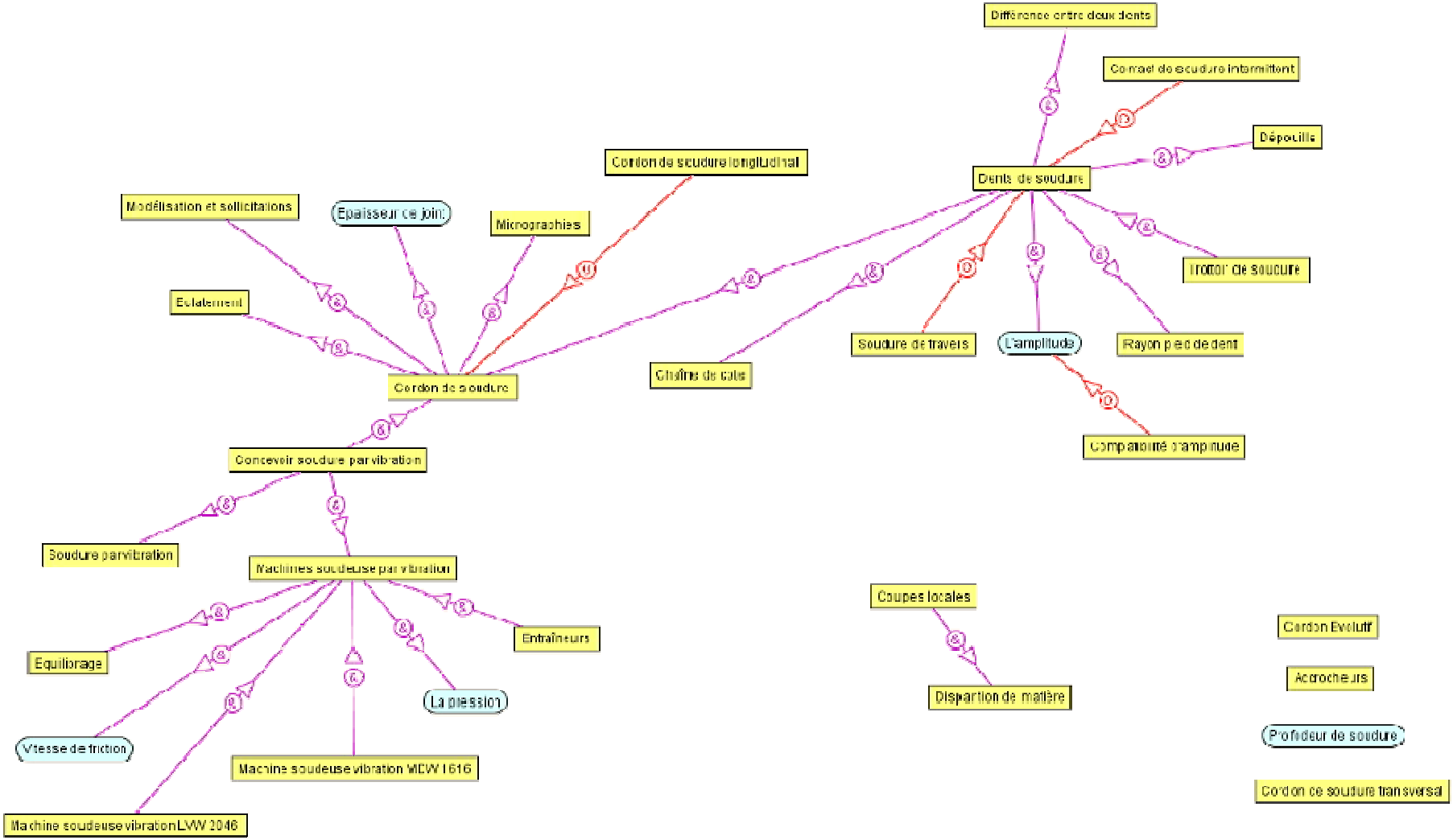


Fig. 38. Réseau sémantique des termes du processus de soudure par vibration.

3.2.3. Cahier de règles

Le cahier de règles comporte des connaissances comportementales définies par des :

- connaissances d'intégrité : contraintes associées (à des propriétés d'une classe d'objets ou à plusieurs classes d'objets) ;
- connaissances existentielles : règles détectant l'existence d'un objet métier ;
- connaissances synthétiques : connaissances sous la forme de règles de production permettant de décrire des faits synthétiques.

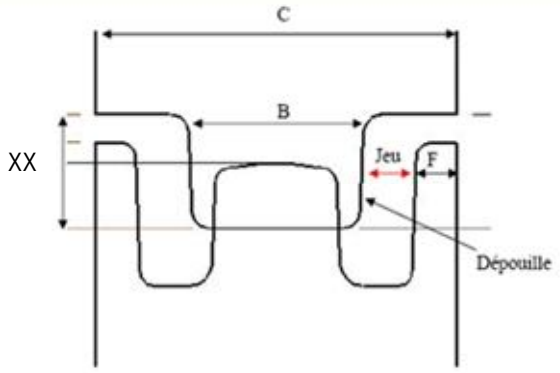
Intitulé :	COMPATIBILITÉ D'AMPLITUDE

Type :	Terme Compose
Date de création :	18/04/2009
Date de modification :	16/04/2009

Définition:

Pour être compatible avec l'amplitude, il ne faut pas que lors de l'oscillation, la grande dent ne vienne taper dans les caches bavures. C'est pourquoi le jeu entre les caches bavures et la grande dent (jeu de vibration) doit être supérieur à l'amplitude de XxxX mm d'intervalle de tolérance. Donc, même avec les tolérances de xxxXXXXxxxxXXXXxxxxXXXXxxxx) le cordon est compatible avec l'amplitude, car toutes les valeurs sont supérieures à Xmm.

Schéma :



Ainsi

Jeu de vibration = XXXxxxxXXXXxxxxXXXXxxxx mm

Fig. 39. Règle métier extraite du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique.

Il s'agit de règles textuelles en **langage naturel**. Chaque règle est décrite par son objectif, sa description et des commentaires permettant de l'illustrer (Fig. 39).

3.2.4. Manuel opératoire

Le manuel opératoire rassemble les connaissances stratégiques, qui permettent l'utilisation efficace des connaissances structurelles et comportementales, et les connaissances opératoires, représentées sous la forme d'enchaînement d'activités décrivant le processus de résolution de problème. Les modèles SADT sont régulièrement utilisés pour représenter ces phases dans la méthode CYGMA (Fig. 40) [Fouet, 1997].

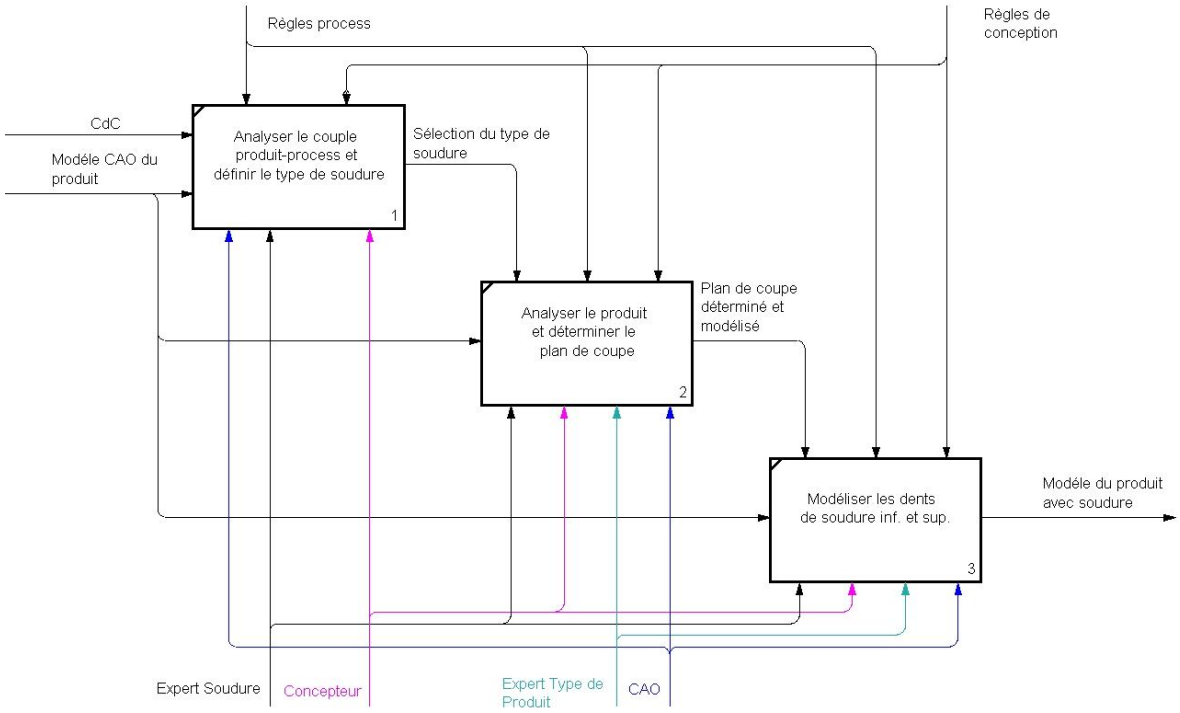


Fig. 40. Diagramme SADT extrait du manuel opératoire du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique.

Les connaissances de l'entreprise étant formalisées sous forme d'un bréviaire de connaissances, nous proposons de décrire les étapes pour l'exploitation des connaissances capitalisées, afin d'aider les concepteurs lors du processus de conception et de développement des produits.

3.3. Seconde phase : mise en forme des connaissances formalisées

La phase de **mise en forme** des connaissances formalisés (Fig. 41) se décompose en deux activités : la création des applications KBE et la création des scripts de vérification.

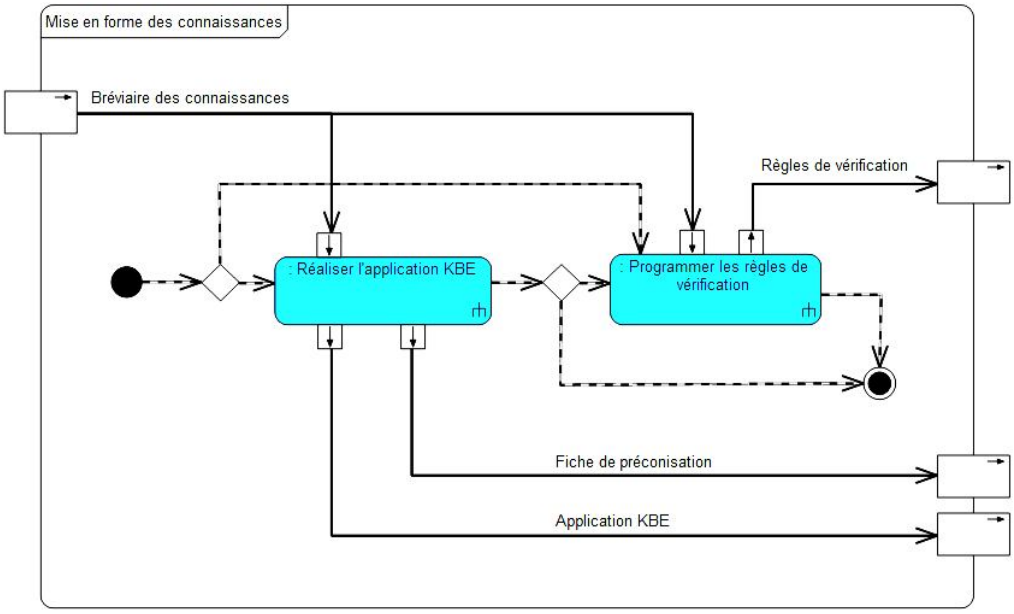


Fig. 41. Diagramme d'activités SysML de l'activité de mise en forme des connaissances.

La première activité consiste à créer des applications KBE, afin que le concepteur puisse interagir avec les connaissances formalisées, et à formaliser des modèles CAO génériques qui formeront chaque nouveau produit réalisé avec la méthodologie FaBK. La seconde activité consiste à créer des scripts de vérification pour identifier des discordances entre les produits développés et les savoir-faire métier.

Sur la figure nous pouvons identifier les flux d'entré dans chaque activité, à savoir le bréviaire des connaissances qui est nécessaire pour le démarrage de chacune des activités. Nous identifions aussi les flux de sortie sous la forme de fiches de préconisation et d'applications informatiques KBE, pour l'activité de réalisation d'applications KBE, et des règles de vérification, pour l'activité de programmation des règles.

La réalisation des applications KBE et des scripts de vérification sont des activités complémentaires, mais elles ne sont pas indispensables dans toute nouvelle exploitation des connaissances. D'une part un modèle CAO générique peut exister sans un script de vérification, d'autre part une vérification par script peut réaliser des actions pour lesquelles il n'existe pas de modèle générique.

Les bases de connaissances permettent la collaboration entre les acteurs métier par l'utilisation de règles qui encodent des connaissances de conception, des procédés de fabrication, des matériaux et autres aspects de la fabrication des produits. Parmi les travaux de recherche existants sur l'utilisation du KBE, peu d'entre-eux portent sur les méthodologies de développement de systèmes de KBE [Candlot, 2006 ; Skarka, 2007]. La plupart se concentrent sur les systèmes à base de connaissances (de l'anglais ***K**nowledge **B**ased **S**ystem* – **KBS**). Le projet **MOKA** (***M**ethodology and tools **O**riented to **K**nowledge based **E**ngineering*) [Callot *et al.*, 1998 ; Skarka, 2007] vise à développer un standard international pour une méthodologie de KBE.

Les applications KBE servent de base aux concepteurs pour initier le travail de conception et de développement des produits. Elles sont constituées d'interfaces homme-machine (généralement développées avec un outil de gestion, KADViser dans notre cas), et des modèles CAO génériques. Ces derniers sont, à leur tour, construits à partir de paramètres et de relations entre eux, issus de la base de données des connaissances.

Les règles de vérification contiennent des paramètres et des relations, qui sont utilisés pour évaluer l'adéquation des produits développés avec les règles métier, à l'aide de scripts réalisés sous VBA. Avec les applications KBE, les règles de vérification aident les concepteurs à réaliser leurs produits suivant les savoir-faire capitalisés relatifs au couple produit-process.

Dans les sections suivantes, nous présentons notre approche pour transformer les connaissances formalisées en éléments de conception : les applications KBE, les modèles CAO génériques paramétrés et gérés par des règles, et les scripts de vérification.

3.3.1. Développement des applications KBE

L'intérêt des applications KBE est de réduire le temps dédié aux tâches routinières de développement, afin de gagner du temps qui devrait être dédié à l'innovation. Nous avons concentré nos efforts sur la création d'éléments géométriques « intelligents », ainsi

qu'au déploiement des applications KBE, pour intégrer les savoir-faire métier au sein du processus de conception et de développement des produits.

Dans les deux sections suivantes, nous présentons la création des modèles CAO génériques, comportant des règles et des connaissances métier, et la création des applications KBE, au cœur de l'interaction entre les modèles génériques, les connaissances du couple produit-process et les concepteurs. Ces développements sont réalisées en déclinant les méthodologies proposées par **MOKA**, en cohérence à la méthodologie **CYGMA [Fouet, 1997 ; Serrafero *et al.*, 2006],** pour développer des applications baptisées **AMI** (**A**pplications **M**étier **I**ndustrielles). Celles-ci sont tout simplement des applications KBE développées sous KADViser, avec une orientation généralement industrielle.

3.3.1.1. Modèles CAO génériques

Les modèles CAO génériques sont des modèles CAO de produits développés couramment, que nous traitons afin de les rendre paramétriques et indépendants, dans le but qu'ils deviennent réutilisables par le concepteur. Ils font partie des blocs structurels de la base de connaissances de la méthodologie FaBK. Nous les avons qualifiés de génériques car ils évoluent selon le contexte de conception et les paramètres utilisés.

Le bloc structurel des modèles CAO génériques comme l'illustre le diagramme de définition de blocs SysML à la Fig. 42 est composé d'entités structurelles (la représentation géométrique), comme les pièces, les assemblages, les surfaces et les éléments caractéristiques, et les entités fonctionnelles (la fonction et l'utilisation) de l'élément.

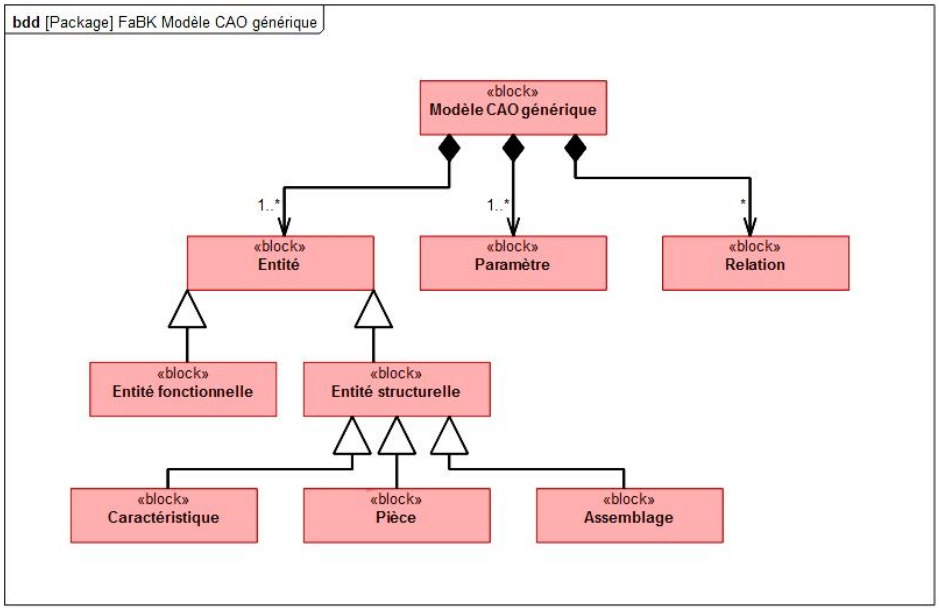


Fig. 42. Diagramme de définition de blocs SysML du modèle CAO générique.

Ce modèle est aussi composé de connaissances du couple produit-process (règles, contraintes et paramètres), d'illustrations (utiles pour l'application KBE), et d'informations sur les activités, tel que le procédé de fabrication associé. Sous CATIA V5,

nous pouvons retrouver la plupart de ces concepts dans l'arbre de construction du modèle géométrique (Fig. 43).

Fig. 43. Arbre de construction type sous CATIA V5.

Une fois créés, les modèles génériques sont soit rangés et assemblés de façon à être utilisés par les applications KBE, soit transformés en modèles géométriques dits « intelligents » (nommés **copie optimisée** ou *powercopy* dans CATIA V5). Les modèles géométriques intelligents sont des éléments géométriques paramétrés et indépendants de leur contexte, pouvant être réutilisés dans des situations très variées car le concepteur est responsable de la création des éléments de contexte nécessaires. Il est également possible d'écrire des relations entre les paramètres qui ont été précédemment définis. Ces relations permettent de spécifier des contraintes sur les paramètres. Ici, une relation est considérée comme une « entité de construction ». Elle fait partie de l'arbre de construction de la pièce et peut être activée ou désactivée [Nowak *et al.*, 2004]. Les règles offrent ainsi une autre possibilité d'intégration des connaissances dans le modèle CAO.

Suite à la création des modèles génériques, nous décrivons les applications KBE créées pour aider les concepteurs à développer des nouveaux produits complexes, composés de plusieurs modèles génériques et règles métier à respecter.

3.3.1.2. Les outils de gestion

Les outils de gestion pour les applications KBE permettent l'interaction entre les concepteurs, les connaissances et les produits qu'ils développent. Ils sont source d'expertise de part leur structure et contiennent non seulement les règles, mais aussi une bonne partie de la culture et la façon de travailler de l'entreprise [Candlot, 2006].

Plusieurs logiciels et progiciels[11] existent sur le marché pour développer et gérer les applications KBE. Parmi les progiciels existants, nous avons fait le choix de travailler avec KADViser, développé par la société Nimtoth [Nimtoth, 2008]. Trois raisons conduisent au choix de cet outil : ses mécanismes de convergence et de démarche par

[11] Un progiciel, mot-valise, contraction de produit et logiciel, est un logiciel applicatif commercial « prêt-à-porter », standardisé et générique, prévu pour répondre à des besoins ordinaires. Ce terme s'oppose aux « logiciels sur mesure » développés pour répondre à des besoins spécifiques. Source : Wikipedia.

propagation de contraintes [Apt, 1999], sa facilité pour définir les Interfaces Homme Machine (IHM) adaptables aux attentes de l'utilisateur final, et sa capacité à traiter un grand nombre de fichiers. L'outil KADViser présente aussi des points faibles, tels que la nécessite d'utiliser un langage de programmation spécifique, ainsi que son incapacité toujours existante d'interfacer directement avec les modeleurs géométriques. Nous contournons ce dernier point faible en utilisant des fichiers d'échange car, même si la société Nimtoth travaille toujours pour les améliorer, les passerelles de communication avec les outils CAO sont toujours un point bloquant.

Dans un cas typique de développement d'une application KBE avec KADViser, les étapes s'enchaînent successivement pour construire l'application. L'interface est construite à partir du bréviaire des connaissances, et de manière plus détaillée, à partir des fiches de préconisation de l'entreprise (synthèses des bréviaires orientées pour les concepteurs). Les informations capitalisées sont utilisées pour définir les classes, les objets du logiciel, les règles métier, les menus et les IHM. La figure 44 présente un diagramme SADT de construction d'une application KADViser, tel que nous l'avons appliqué dans nos travaux de recherche.

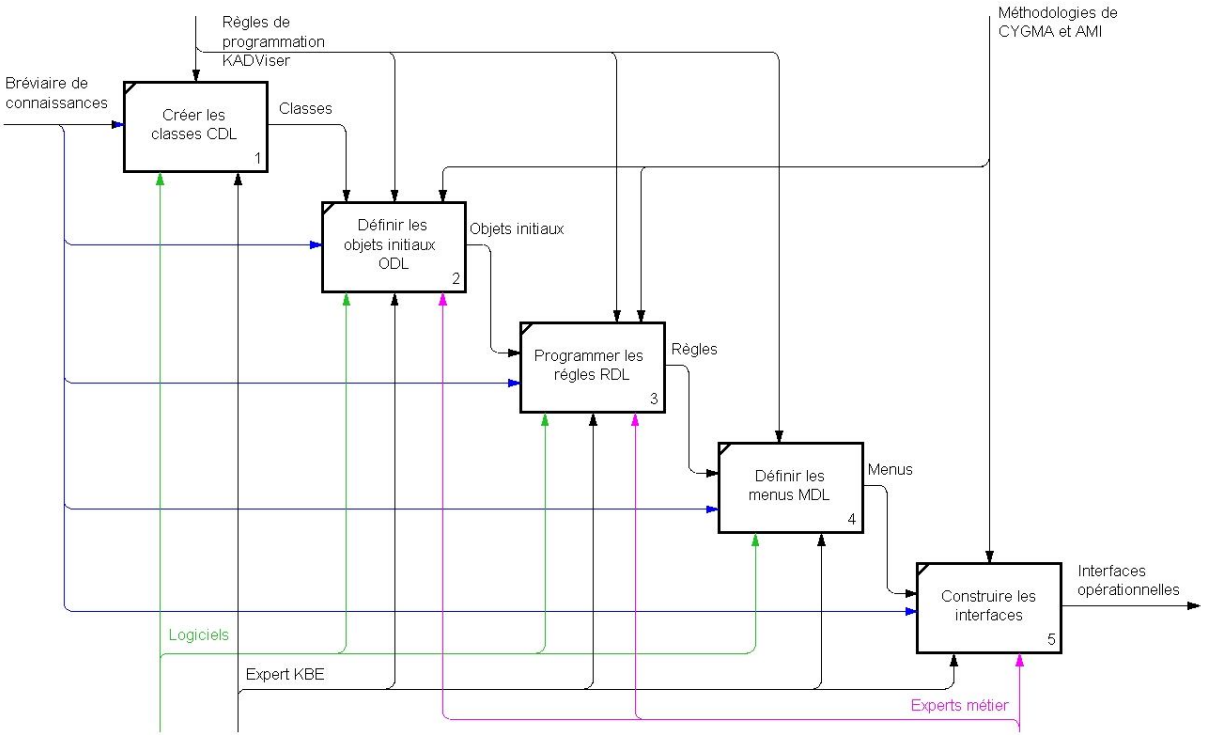


Fig. 44. Diagramme SADT de la construction d'une IHM KADViser.

Comme nous l'observons sur l'image précédente, les IHM KADViser sont construites en cinq étapes : la création des classes d'objets CDL, la définition des objets initiaux ODL, la programmation des règles métier dans le RDL, la définition des menus MDL et la construction des interfaces. Chacune de ces étapes est réalisée avec les informations formalisées sur le bréviaire des connaissances. A la fin nous obtenons une interface opérationnelle qui fait intervenir les informations et les connaissances métier détenues par l'entreprise.

3.3.2. Scripts

Les scripts constituent le dernier bloc que nous proposons dans la base de connaissances FaBK. Ce sont des programmes qui permettent d'interagir avec les produits développés par les concepteurs, et vérifier le respect des règles métier établies. Cette interaction peut se réaliser à l'aide des modules propres à CATIA V5, tel que le *Knowledge Advisor*, ou par des scripts codés en Visual Basic.

Le langage Visual Basic permet l'intégration de connaissances dans le modèle de la pièce et la réalisation d'interfaces homme-machine, permettant une prise en main plus simple et conviviale de l'utilisateur. Celui-ci gagne du temps en réalisant des tâches qui, normalement, prendraient du temps à être réalisées, car trop fastidieuses et répétitives. La figure 45 montre la capacité de personnalisation des outils KBE, et des scripts dans CATIA V5 par rapport à leur facilité d'implémentation. La différence avec un outil KBE du type KADViser est l'absence de moteur d'inférence par propagation de contraintes.

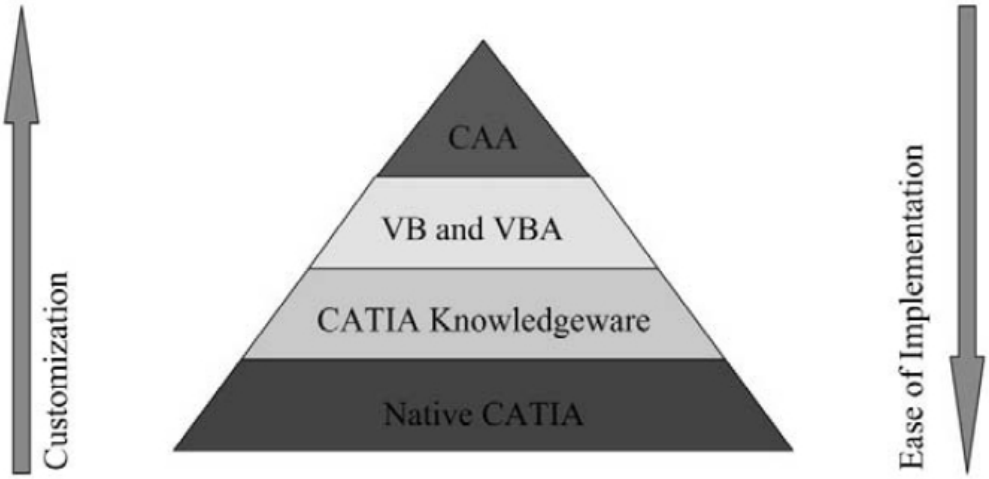


Fig. 45. Possibilité de configuration de CATIA V5 [Nowak *et al.*, 2004].

De la même manière que les modèles génériques ou les outils de gestion, les scripts suivent la formalisation des connaissances, transformant les règles identifiées en morceaux de code pouvant être lancés par les concepteurs à tout moment au cours du développement de produits. L'intérêt des scripts réside dans leur **vitesse à réaliser des tâches répétitives** (Fig. 46), ainsi que dans la possibilité de réaliser des vérifications complexes, sans risque d'erreur, à tout moment.

```
    Aa11 = B11 * uu1 + B12 * uu2 + B13 * uu3 'intermediate storage
    Aa12 = B12 * uu1 + B22 * uu2 + B23 * uu3 'intermediate storage
    Aa13 = B13 * uu1 + B23 * uu2 + B33 * uu3 'intermediate storage
    Aadet = Sqr(Aa11 * Aa11 + Aa12 * Aa12 + Aa13 * Aa13) 'magnitude of A

If Abs(uu1) < 0.00001 Then
    uu1 = uu1 * 1000000
    uu2 = uu2 * 1000000
    uu3 = uu3 * 1000000
End If

If Abs(vv1) < 0.00001 Then
    vv1 = vv1 * 1000000
    vv2 = vv2 * 1000000
    vv3 = vv3 * 1000000
End If
```

Fig. 46. Calculs matriciels automatiques par script.

Cette figure est un extrait d'un script de calcul des valeurs propres d'un nuage de points sous CATIA V5. Les variables définies (*Aa11, Aa12,* etc.) sont les différents composants de la matrice *A* analysée, avant d'être utilisées pour calculer la déterminante de la matrice. Les variables suivantes (*uu* et *vv*) sont les colonnes des matrices *U* et *V* du calcul des valeurs propres, multipliées fois 1000000 par un souci de congruence des unités avec le modeleur géométrique. Comme nous pouvons l'observer, celui-ci est un calcul qui prendrait un temps considérable à le faire manuellement (surtout quand la quantité d'élément à analyser est de taille considérable), mais il est presque instantanée et sans risque d'erreurs quand il est fait par script [Toussaint, Gomes, Monticolo*, et al.*, 2009].

3.4. Structure de la base des connaissances

Les connaissances capitalisées et mises en forme lors de l'étape de capitalisation sont réunies pour construire la base de connaissances de FaBK (Fig. 47). Deux composants de cette base servent aux différentes activités de la méthodologie, les applications KBE et les règles de vérification.

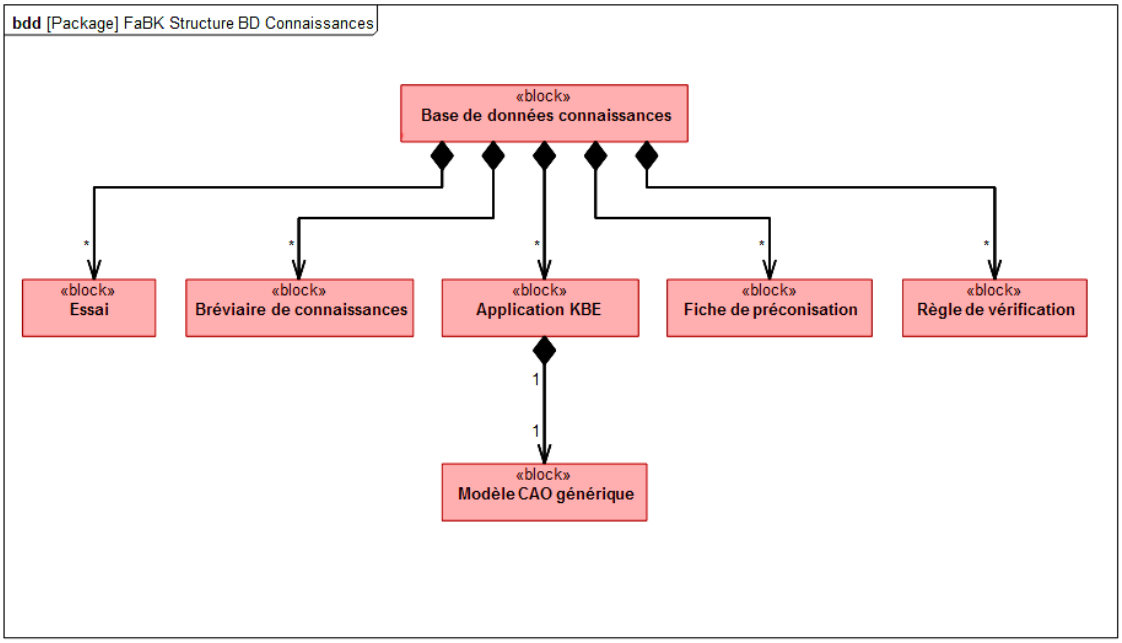


Fig. 47. Diagramme de définition de blocs SysML de la base de connaissances FaBK.

Cette base de connaissances contient également des **fiches de préconisation**. Il s'agit de synthèses des connaissances capitalisées du couple produit-process, servant de guide aux concepteurs pour développer des produits. Le bréviaire de connaissances est essentiel pour distribuer les paramètres et règles au bon endroit et au bon moment. Des campagnes d'essais sont nécessaires pour garantir la fiabilité, ainsi que la bonne performance et le bon usage des divers éléments de la base de connaissances.

3.5. Conclusion

Comme nous venons de le présenter, la démarche de capitalisation et de formalisation des connaissances de la méthodologie FaBK vise à guider les acteurs métier de

l'entreprise dans la transformation de leurs savoir-faire en outils d'aide au développement de produits. La démarche est fondée sur la déclinaison de différentes méthodologies, telles que MOKA, CYGMA et AMI, afin de faciliter la prise en main par les membres du bureau d'études. Son principal atout est que le travail de capitalisation n'est pas réalisé qu'une seule fois et une bonne fois pour toutes. Il est réalisé (ou simplement réajusté si nécessaire) à chaque fois qu'un nouveau produit est développé et lorsque le développement d'un produit soulève une modification des règles métier.

Dans la section suivante, nous présentons, l'application systématique de la méthodologie FaBK afin de pouvoir expliquer les interactions de chaque acteur métier avec les différents éléments créés lors du processus de conception et de développement du produit.

4. Conception avancée de produits

Une fois que les connaissances sont stockées et transformées sous forme d'éléments exploitables, nous pouvons procéder à la description du déploiement de la méthodologie au sein d'un bureau d'études. Dans cette section, nous allons décrire les différentes démarches d'utilisation de FaBK, afin de garantir le développement de produits conformes aux règles et savoir-faire générés par l'entreprise.

Au cours des sections suivantes, nous présentons les activités propres à la modélisation du produit, tâche importante du travail d'un bureau d'études. Ces activités forment la dernière partie de la méthodologie FaBK où interagissent le concepteur et les acteurs métier, avec comme résultat un modèle produit prêt pour les activités de développement situées en aval, telles que les activités de calcul, d'essais, de prototypage, voire de fabrication en série.

4.1. Démarche globale

Une fois l'étape de capitalisation et de formalisation des connaissances terminée, nous procédons à la modélisation du produit (Fig. 48). Dans ce diagramme d'activités enrichi, nous pouvons observer en entrées les trois éléments issus de l'activité de capitalisation : les fiches de préconisation, les modèles CAO génériques et les règles de vérification. De plus, nous pouvons également observer en entrée les exigences, issues du CdC. Ici, le modèle CAO du produit est le résultat final de l'activité. Il résulte de l'interaction de ces quatre entrées au sein de l'activité de modélisation.

L'activité de modélisation du produit se déroule en plusieurs étapes, qui vont de l'analyse des exigences contenues dans le cahier des charges jusqu'à la validation du produit modélisé, avant son passage aux phases situées en aval du processus de conception et de développement du produit [Toussaint, Gomes*, et al.*, 2008]. La modélisation du produit comprend les activités de génération du concept optimisé, de définition de la solution, laquelle passe ensuite par les activités de vérification et de validation par des experts des différents services.

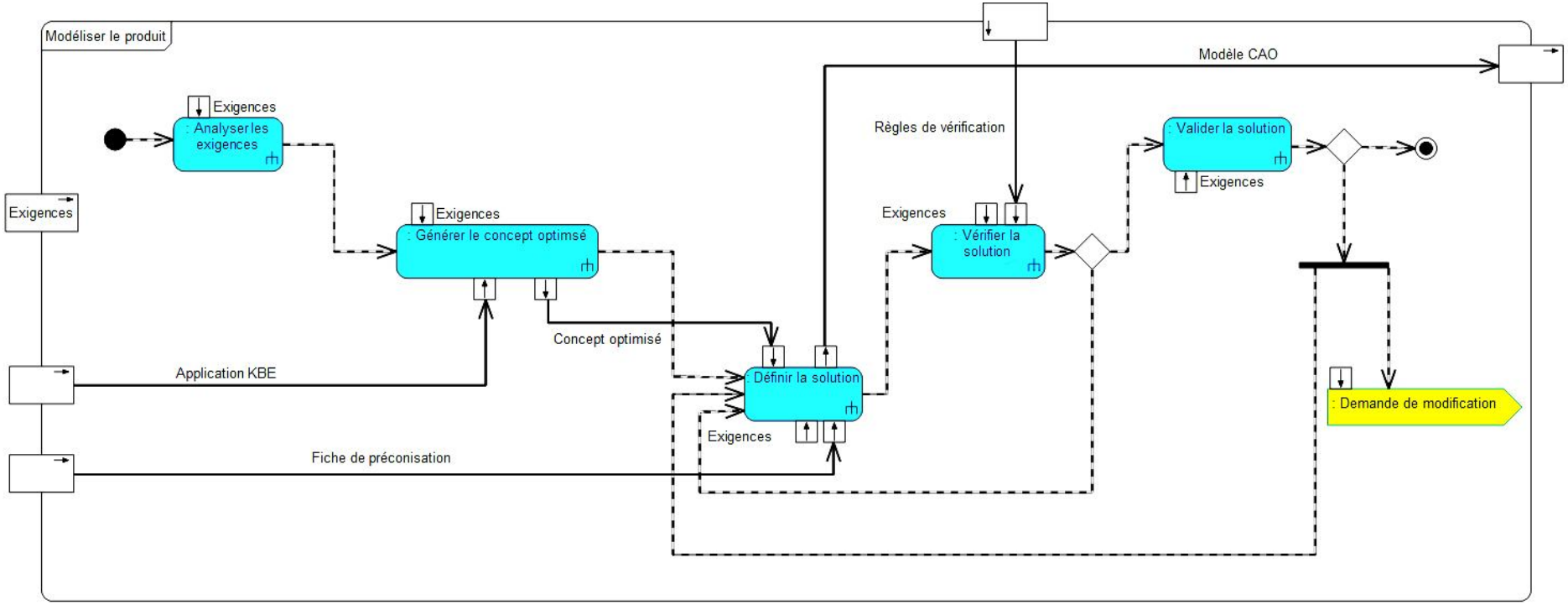


Fig. 48. Diagramme d'activités de la démarche globale de modélisation du produit.

La modélisation géométrique est une des activités principales du développement d'un produit. Le bloc structurel du produit se trouve au cœur de l'activité globale de la méthodologie (Fig. 49). Il se compose de trois éléments : les **exigences** (exprimées par le CdC du produit à développer), le **concept** (qui peut être un concept initial généré à partir des modèles CAO génériques, issus de la base de données des connaissances, ou un modèle optimisé), et le **modèle CAO** (résultat final de la méthodologie).

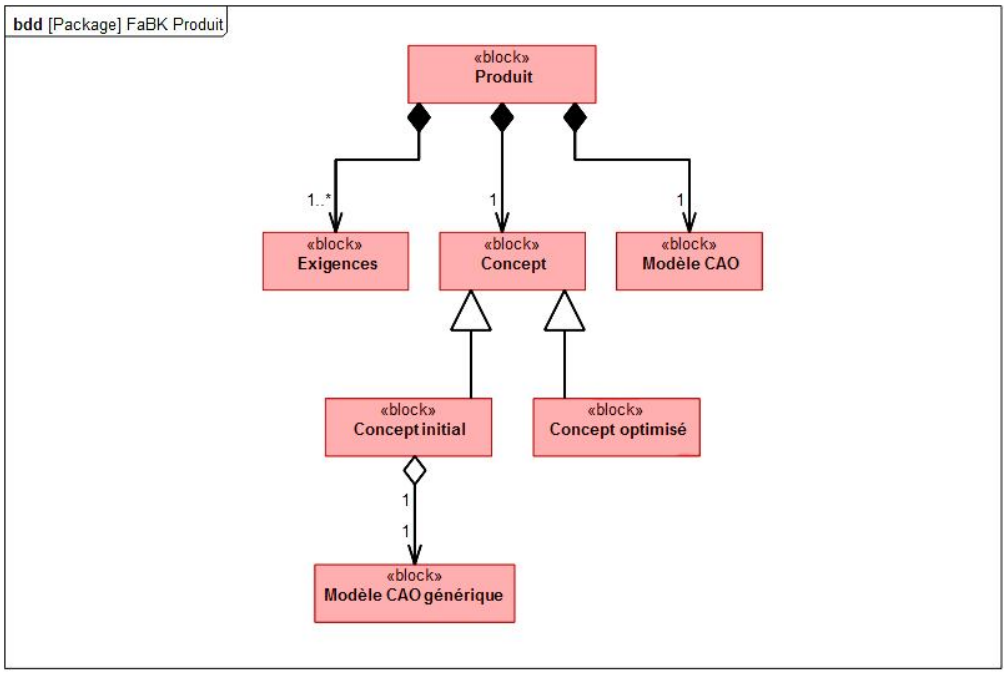


Fig. 49. Diagramme de définition de blocs SysML du produit.

Il convient maintenant de présenter les deux activités clés de l'activité de modélisation : la génération du concept optimisé et la vérification du produit. Ces deux activités sont cruciales pour aider les concepteurs à réaliser leurs activités de développement de produits selon la méthodologie FaBK.

4.2. Génération de concept de modèle CAO optimisé

La première activité de la génération du concept optimisé est la génération d'un concept initial. Cette activité se déroule à travers de l'interaction des exigences et des applications KBE développées, afin d'obtenir un premier modèle CAO générique paramétré, répondant au cahier des charges, mais pas forcément fidèle à toutes les demandes de l'OEM (Fig. 50 à la page suivante). À l'aide d'algorithmes d'optimisation (BFGS, SQP, SIMPLEX, etc.), nous avons développé des boucles d'optimisation qui permettent de faire correspondre le mieux possible le modèle générique aux exigences du CdC, avant même que le travail de CAO du concepteur ne soit entamé. Dans le chapitre suivant (cf. *section 4.3.2* à la page 140) nous expliquerons de manière plus détaillée le couplage d'un algorithme d'optimisation avec le processus de conception et de développement du produit.

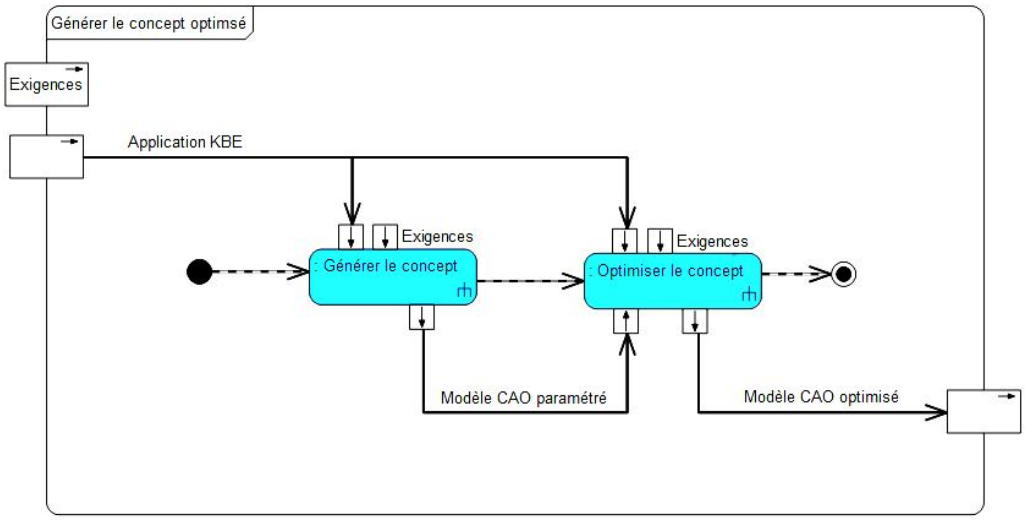


Fig. 50. Diagramme d'activités SysML de la génération du concept optimisé.

L'optimisation intervient suite à la génération du concept initial. Traditionnellement, le concepteur procède à une approche d'optimisation « manuelle » en effectuant par une démarche de type « essai-erreur ». Cependant, un nombre important de variables et d'interactions entre-elles peut empêcher une telle démarche optimisation. Nous avons défini plusieurs critères, contraintes et fonctions objectifs pour améliorer la qualité des produits en satisfaisant aux procédés de fabrication choisis. L'activité d'optimisation dès les premières phases de conception permet la génération d'une architecture produit optimale et permet au concepteur de recevoir un modèle d'architecture du produit le mieux adapté aux besoins de l'OEM, avant de commencer les phases de modélisation géométrique détaillées.

4.3. Vérification de la solution

La vérification et la validation sont les activités utilisées pour confirmer qu'un produit, un service ou un système, satisfait aux spécifications de l'OEM [Toussaint, 2008]. D'une manière générale, une vérification est le processus de contrôle de la qualité utilisé pour évaluer si un produit, service ou système, est conforme avec les réglementations, spécifications, ou conditions imposées au début de son développement [Plant et Gamble, 2003]. La validation, quant à elle, est le processus d'assurance de qualité qui, preuve à l'appui, fournit une garantie que le produit, service ou système, satisfasse aux exigences du cahier des charges [Babuska et Oden, 2004].

Dans ce cadre, nous proposons de vérifier la concordance des modèles de produits développés avec les règles et savoir-faire métiers en utilisant des scripts de vérification de ces règles. Ces vérifications sont faites en permanence par les concepteurs au cours du développement, ainsi qu'après chaque étape de conception fonctionnelle (par exemple la fin du développement d'un cordon de soudure sur un produit). Ces scripts sont dédiés à la fois à la vérification et à l'aide à la décision d'un expert ou du concepteur proprement dit, et même dans certains cas, à la validation des décisions prises lors des activités de modélisation géométrique du produit.

Sur la figure 48 précédente, présentée à la page 92, nous avons précisé qu'un retour était possible lors de la vérification ou de la validation, qui provoque alors une modification de

la solution. Ces retours sont issus de **défauts de concordance importants** entre le modèle produit développé et les règles métier préalablement établies. L'intérêt de la méthodologie proposée est son ouverture, les choix de conception ne sont pas rigides. Si le concepteur décide que cette déviation par rapport aux règles métier est acceptable, il peut continuer son développement sans devoir modifier sa solution. Les vérifications par script permettent de faire intervenir les connaissances capitalisées qui ne sont pas exploitables sous forme de modèles CAO paramétriques. De ce fait, les modèles géométriques des produits développés par les concepteurs pourront respecter tous les savoir-faire métier, capitalisés.

5. L'importance de la rétroaction

La modélisation géométrique des produits et la capitalisation des connaissances sont des activités qui se réalisent en continu et en parallèle (voir Fig. 32 à la page 76). Nous pouvons observer sur les figures 35 à la page 79 et 48 à la page 92 des demandes de modification, respectivement entrantes et sortantes. Ces demandes sont la deuxième caractéristique de la méthodologie, le premier étant son ouverture afin de s'adapter au travail d'un bureau d'études, sa capacité à évoluer avec le temps et le déroulement du projet. Après chaque développement d'un produit, les règles capitalisées sont **remises en question**, par les scripts et par les différents experts métier impliqués au moment de chaque vérification et validation (Fig. 51).

S'il se trouve qu'une règle n'est plus conforme au savoir faire de l'entreprise, au regard des moyens de fabrication disponibles ou des règles de conception en vigueur, une demande de modification issue de la validation active l'activité de capitalisation des connaissances. Ainsi, si un nouveau moyen de fabrication avec des capacités différentes de celles déjà identifiées est adopté, le système peut évoluer pour tenir compte de ces nouvelles données.

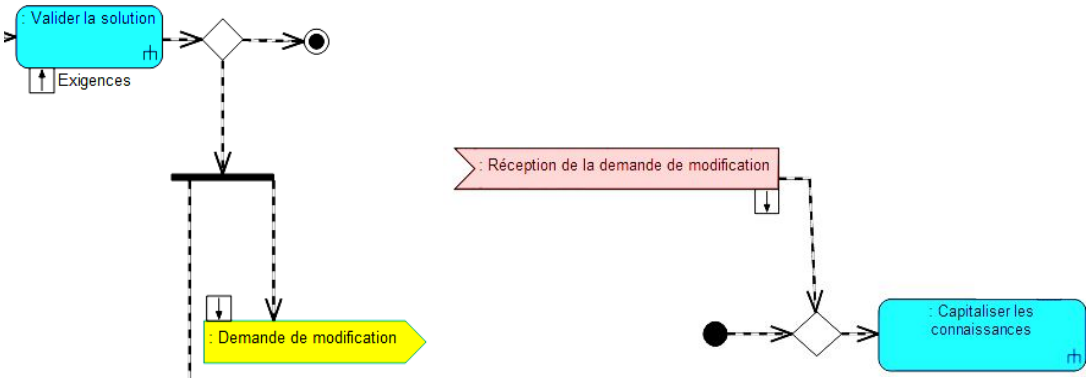


Fig. 51. Détail de retour (à gauche issu d'une validation, à droite impactant la capitalisation des connaissances) extrait du modèle global à la page ###.

Les connaissances sur le couple produit-process n'étant pas absolues car dynamiques et en évolution permanente, le processus de conception et de développement des produits génère toujours des retours d'expérience, même sur des procédés de fabrication utilisés depuis plusieurs années. De la même manière que pour un nouveau moyen de fabrication, un procédé connu peut soulever le besoin d'une modification des règles établies. L'interaction des experts, pour une validation finale des produits, permet

d'identifier ces modifications et de relancer alors une nouvelle capitalisation, voire une modification des modèles génériques et/ou des scripts de vérifications déjà existants.

6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la partie théorique de notre contribution scientifique dans le domaine de la conception orientée fabrication et de la définition d'un support pour l'aide à la décision au sein du processus de conception et de développement de produits.

Dès lors, nous avons décrit la méthodologie **FaBK** (*Design for **F**abrication **B**ased on **K**nowledge*), dans l'objectif de l'implanter dans un bureau d'études pour garantir le développement de produits respectant des règles du couple produit-process capitalisées [Toussaint, Gomes*, et al.*, 2008 ; Toussaint, Gomes et Sagot, 2009 ; Toussaint, Demoly*, et al.*, 2010 ; Toussaint, Lebaal, Schlegel*, et al.*, 2010].

La méthodologie FaBK comporte plusieurs éléments qui sont utilisés lors des activités de conception et de développement de produits afin d'aider les concepteurs à mieux réaliser leur travail. Sur les deux activités globales identifiées : la capitalisation et la modélisation des produits, nous observons cinq objets (« block ») qui transitent pour réaliser et faciliter le travail : les exigences, les fiches de préconisation, les applications KBE, les règles de vérification et les modèles CAO (Fig. 52).

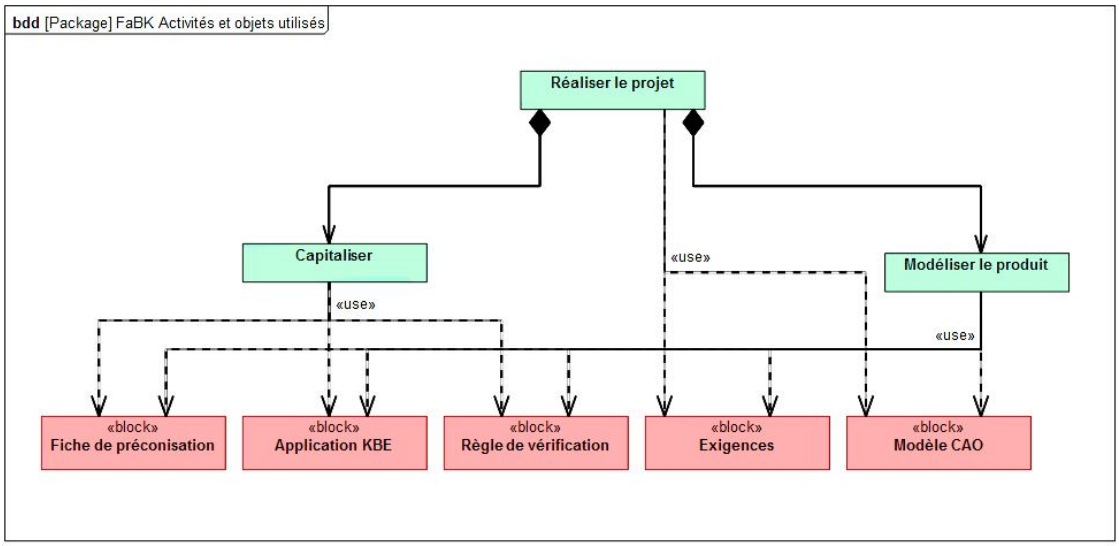


Fig. 52. Diagramme de définition de blocs SysML des objets utilisés par les activités principales de la méthodologie FaBK.

Nous pouvons conclure ce chapitre sur l'importance de mettre en œuvre une véritable ingénierie à base de connaissances liées au couple produit-process afin d'apporter une **aide aux concepteurs** au sein du processus de conception et de développement de produits. Cette aide doit être efficace et intuitive afin de s'intégrer de façon transparente aux activités de conception déjà existantes. En effet, les outils lourds d'utilisation ou trop en marge des activités courantes du BE courent le risque d'être mis à l'écart par les concepteurs. De la même manière, cette aide doit être évolutive pour garantir une pertinence et un intérêt lors de chaque nouveau produit développé et de chaque moyen de fabrication adopté.

De plus, nous soulignons le besoin de développer et d'implémenter la méthodologie FaBK proposée, sous la forme d'outils informatiques. De ce fait, nous pourrons appliquer chacune des actions proposées à des cas industriels, c'est-à-dire à des projets et produits développés couramment dans le bureau d'études de l'entreprise Mark IV. Nous proposons d'introduire, dans le chapitre suivant, plusieurs outils informatiques développés parmi tous ceux élaborés au sein de l'entreprise au cours de 3 années de thèse, pour illustrer la mise en application de la méthodologie FaBK et des différentes approches associées.

CHAPITRE 4.

VERS LA DEFINITION DE MODELES ROBUSTES EN PHASES PRELIMINAIRES DE CONCEPTION

"There is nothing so useless as doing efficiently that which should not be done at all."

Peter F. Drucker

CONTENU DU CHAPITRE

1. Introduction 101

2. Conception des modèles génériques robustes et vérifiés à l'aide d'applications de KBE 102

2.1. Applications KBE pour la construction de conduits d'air 103

2.2. Script d'extraction de fibre 110

2.3. Applications KBE pour la génération automatique d'outillages d'extrusion-soufflage 114

2.4. Script d'analyse des sections : loi d'évolution des tubulures 121

2.5. Applications KBE pour la soudure plastique 126

2.6. Script de vérification de cordon de soudure 133

3. Optimisation des modèles génériques 136

3.1. Optimisation des composants d'un conduit : le cas des soufflets 136

3.2. Algorithmes d'optimisation des soufflets 141

4. Conclusion 156

1. Introduction

Dans la continuité du chapitre précédent, nous proposons d'introduire la seconde partie de notre contribution, en mettant l'accent de manière plus détaillée, sur les modèles et méthodes développés pour faire usage des connaissances capitalisées lors du processus de conception et de développement de produits mécaniques. Le chapitre précédent nous a permis de présenter et de décrire la méthodologie globale baptisée FaBK, visant à capitaliser les connaissances détenues par une entreprise, et de les mettre à disposition des concepteurs lors du processus de conception et de développement de produits. Suivant cette méthodologie nous pouvons extraire les connaissances du couple produit-process détenues par une entreprise et les transformer en outils afin d'être exploités directement par les concepteurs. Grâce aux activités de retour d'expérience il est également possible de surveiller l'évolution de ces connaissances, de les mettre à jour en cas de nécessité, en concertation avec les experts métier, et de les reutiliser pour s'assurer de la bonne conception des produits. Dans de ce contexte, nous présentons trois moyens d'exploiter les connaissances capitalisées : les applications KBE, les algorithmes d'optimisation et les scripts de vérification.

Par conséquent, ce chapitre, dont la finalité est d'expérimenter les concepts proposés à travers différents cas d'application industriels, est décomposé en trois parties dont l'articulation, au regard de la méthodologie FaBK, est représentée sur la figure 53, ci-dessous.

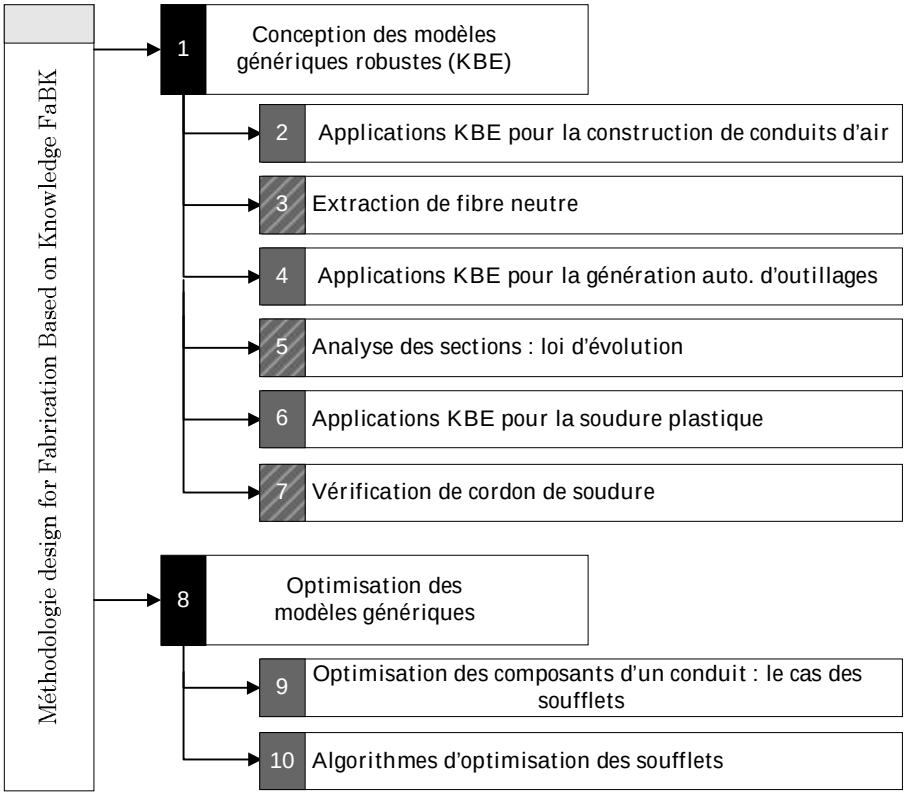


Fig. 53. Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre.

Il s'agit dans le cadre de ce quatrième chapitre de ce manuscrit de thèse, d'expérimenter partiellement la méthodologie de conception hautement productive orientée vers la

fabrication : application à l'ingénierie routinière de pièces plastiques, en l'appliquant sur plusieurs cas partiels d'application différents, composants de la démarche. Le chapitre cinq, quant à lui, présentera une approche globale de notre approche méthodologique sur des cas d'application industriels réels.

La première partie (cf. *Conception des modèles génériques robustes*) propose une introduction sur l'application des outils de KBE chez Mark IV SM et sur leurs bénéfices au sein du processus de conception et de développement des produits. Nous abordons également dans cette section les outils de gestion et d'aide à la conception des applications KBE. Cette partie présente ensuite différents cas (cf. *Parties 2, 4, et 6 à la Fig. 53, page 100*). Chacun d'eux sert à décrire comment les connaissances capitalisées avec la méthodologie FaBK sont valorisées et mises à disposition des concepteurs, pour réaliser leurs activités au sein des phases de conception et de développement de produits. a la suite de chaque cas nous présentons les approches de vérification et de validation des produits par script. Chaque partie correspond à un des trois cas d'application différents : l'extraction de la fibre neutre pour les conduits d'air, la vérification des lois d'évolution des objets tubulaires, et la vérification du respect des règles métier sur les cordons de soudure (cf. *Parties 3, 5 et 7* respectivement de la Fig. 53, page 100). Chacune de ces approches traite d'une façon différente le problème de vérification et de validation des produits, à partir des règles de fabrication, des exigences de l'OEM ou des expériences passées de l'entreprise.

La deuxième partie (cf. *Optimisation des modèles génériques*) propose une introduction à l'usage de l'optimisation lors du développement de produits. Nous décrivons ensuite la mise en place d'une approche d'optimisation pour un des sous-éléments d'un produit développé par l'entreprise, à savoir les conduits d'air RAS/BP, ainsi que les algorithmes d'optimisation utilisés pour l'effectuer (cf. *Parties 9, 10)*.

Enfin, nous concluons ce chapitre sur la nécessité de développer et d'implémenter les approches proposées, développées dans le cadre méthodologique FaBK, sur des actions courantes des concepteurs, afin de prouver leur validité et leur robustesse au cours des étapes de conception et de développement de produits.

2. Conception des modèles génériques robustes et vérifiés à l'aide d'applications de KBE

Nous avons établi, dans le cadre de notre méthodologie FaBK, que les règles et paramètres du couple produit-process sont intégrés, dans les produits développés, de deux façons :

- par des modèles KBE « génériques », qui donnent aux concepteurs une première construction de leurs produits, paramétrée et conforme aux savoir-faire métier ;
- par des scripts de vérification et de validation semi-automatiques. Ces scripts englobent les règles métier complexes, qui ne peuvent pas nécessairement s'inscrire dans des modèles ou encore, qu'il faut contrôler dans le modèle définitif.

Les applications informatiques KBE

Le *Knowledge Based Engineering* (KBE) est une méthode pour construire des modèles géométriques des produits contenant l'expérience métier des activités d'ingénierie et d'évaluation, sous forme de règles couplées à des paramètres géométriques. Sandberg définit le KBE de la manière suivante: "*The techniques to capture and re-use product and process knowledge in an integrated way*" [Sandberg, 2003].

Afin d'illustrer l'interaction des méthodes de KBE avec nos travaux de recherche, nous avons développé des applications métier pour la conception et le développement de produits utilisant des connaissances (règles, contraintes, etc.), pour permettre aux concepteurs de les appliquer d'une manière simple et intuitive. Nous avons utilisé le progiciel KADViser ainsi que les outils de *KnowledgeWare* du modeleur CATIA V5 pour faire ces applications [Toussaint, Bluntzer*, et al.*, 2008 ; Toussaint, Lebaal, Schlegel*, et al.*, 2010].

Les scripts

Les scripts font partie des premiers travaux d'IA réalisés dans les années 1980. Il s'agit d'une méthode pour représenter les connaissances procédurales [Schank et Albeson, 1977]. Ils servent à décrire des séquences d'événements, de manière systématique et structurée. Le concept des scripts a été repris par les logiciels de développement et progiciels. Ils sont distincts du codage central d'une application et sont créés pour que l'utilisateur puisse coder ses activités suivant un langage proche du langage naturel [Scaffidi *et al.*, 2010]. Leur objectif est de permettre aux utilisateurs d'automatiser un certain nombre de leurs activités, sans en être empêchés par le codage.

Pour nos travaux de recherche, nous avons développé une base de scripts en utilisant des connaissances (règles, contraintes, etc.), pour permettre aux concepteurs de les appliquer d'une manière simple et intuitive. Ils sont établis de façon modulaire, composés d'une succession de tâches (divisées elles aussi en sous-tâches), qui font appel aux connaissances pour traiter divers sujets [Toussaint, Gomes et Sagot, 2009]. Nous avons utilisé le langage ***V****isual* ***B****asic for* ***A****pplications (***VBA***)***, dans sa déclinaison adaptée pour CATIA V5. Il est possible d'utiliser ce même langage pour d'autres modeleurs tels que NX.

2.1. Applications KBE pour la construction de conduits d'air

Les conduits d'air de type **RAS/BP** (**B**oitier **P**apillon) servent à relier l'échangeur thermique d'un véhicule au doseur. Ces conduits se situent en zone d'air froid (température maximale de 130°C) et en surpression (pression maximale de 2 bars relatifs) (Fig. 54 à la page suivante). Ils font partie du circuit d'alimentation d'air d'un véhicule, et aident à améliorer les performances et réduire la consommation du moteur thermique.

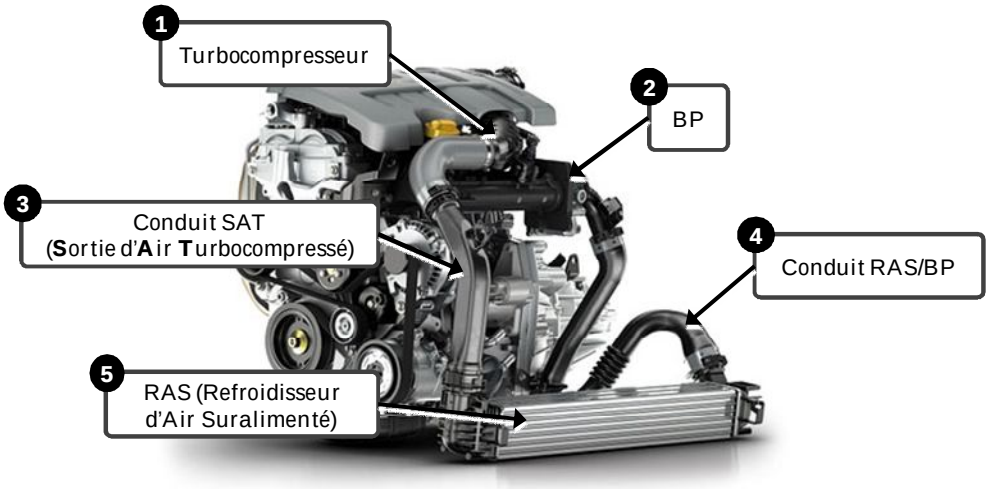


Fig. 54. Conduit RAS/BP dans son environnement moteur.

Ces conduits d'air se composent de plusieurs éléments pour répondre à différentes fonctions : les **soufflets** qui assurent la flexibilité, les **embouts** qui relient les conduits avec d'autres éléments du véhicule, ou encore des **zones de soudure** pour fixer des capteurs. Nous pouvons observer une vue éclatée d'un conduit avec ses éléments sur la figure 55 ci-dessous.

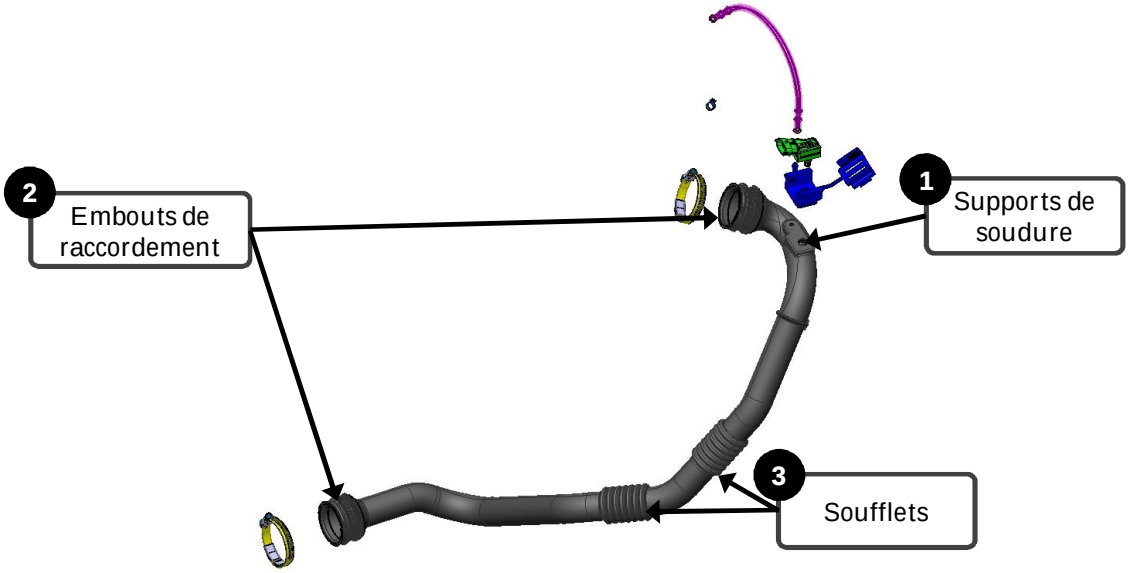


Fig. 55. Conduit RAS/BP brut avec éléments supplémentaires.

Les conduits RAS sont fabriqués par un procédé d'extrusion soufflage. L'extrusion et le soufflage d'une pièce thermoplastique sont deux opérations qui sont réalisées successivement sur une machine qui gère la séquence des deux tâches. Concrètement, le thermoplastique est acheminé sous forme de granules jusqu'à la machine. Le thermoplastique est ensuite fondu pour pouvoir être extrudé. Un tube, appelé paraison, descend alors dans le moule. Une fois le moule fermé, de l'air est soufflé et la matière thermoplastique vient épouser les formes du moule sous l'effet de la pression. Une fois la pièce suffisamment refroidie, le moule est ouvert et celle-ci est libérée.

Suivant les démarches présentées dans le chapitre 3, les connaissances liées au produit et au procédé de fabrication des conduits d'air sont capitalisées. Elles serviront, par la

suite, à construire différentes applications KBE pour faciliter les tâches de conception, d'optimisation, de vérification et de validation des nouveaux produits.

La démarche de conception d'une application KBE pour une conception « hautement productive » des conduits d'air commence par la génération d'une géométrie intelligente [Silva et Chang, 2002], qui repose sur des règles et des connaissances. L'objectif fixé pour cette géométrie est de :

- fournir une modélisation du conduit entier en une seule partie, c'est-à-dire que le concepteur ne soit pas obligé de travailler avec plusieurs morceaux pour les assembler par la suite ;
- rendre le produit final adaptable et utilisable dans le but de « rendre la main » à l'utilisateur, à savoir améliorer l'acceptation du nouveau concept et rendre le travail du concepteur plus intéressant et moins répétitif [Yechiam, 2006].

2.1.1. Construction du conduit d'air RAS/BP

La construction des éléments CAO se fait en plusieurs étapes :

- la gestion du corps du conduit en fonction des coordonnées des points des rayons de cintrage, des diamètres et épaisseur du conduit, renseignés par le concepteur ;
- la sélection et l'ajout des éléments (supports de soudure, soufflets) sur le conduit ;
- la sélection et l'ajout des embouts de fixation ;
- la mise en place des règles et des paramètres pour le pilotage, du modèle CAO paramétrique ainsi créé.

L'objectif recherché, afin de rendre le produit final ouvert et souple de modification, est d'obtenir une fibre neutre, pilotée par l'application KADViser. Sur cette fibre neutre, nous viendrons ensuite placer les divers éléments, tels que les supports de soudure, les embouts et les soufflets. Tout d'abord, nous générons 20 points sous CATIA V5, définis par leurs coordonnées par rapport à une origine définie par l'OEM. Ensuite ces points sont reliés par des segments. Ces segments sont finalement reliés, par des segments, de cette manière, nous obtenons une construction en chaîne de la fibre neutre du conduit (Fig. 56).

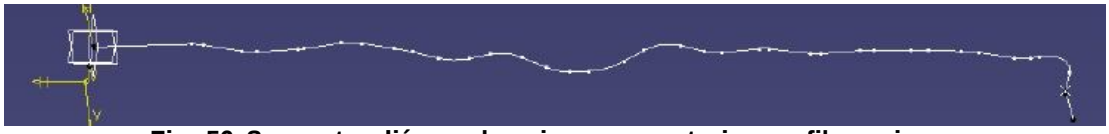


Fig. 56. Segments reliés par des coins pour construire une fibre unique.

La construction en chaîne va permettre de conserver un seul objet en temps que **fibre neutre**, quelle qu'en soit sa configuration. C'est-à-dire qu'avec 5 points ou 20 points, nous pourrons toujours référencer d'autres éléments à la fibre neutre sans aucune perte de référence. Un script a été développé pour extraire cette même fibre à partir d'un élément solide fourni par l'OEM (géométriquement mort, c'est-à-dire sans historique de construction) (à voir sur la section 4.2.2 à la page 109).

L'étape suivante consiste en la réalisation du corps du conduit. Celui-ci est réalisé par une opération d'extrusion suivant une courbe guide. Comme le corps s'appuie sur la fibre neutre, il peut suivre sans problème, n'importe quelle évolution des configurations (Fig. 57).

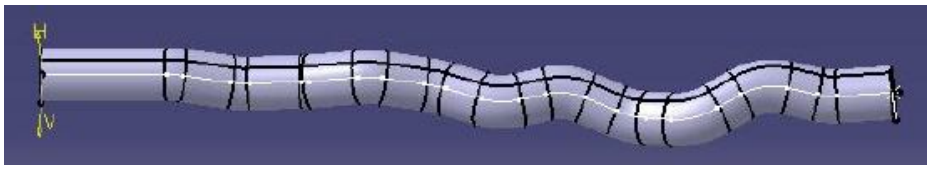


Fig. 57. Modélisation du corps du conduit par opération de nervure.

2.1.2. Ajout des éléments

L'intérêt de cette modélisation, s'appuyant sur la fibre neutre, en adoptant des principes de modélisation géométrique par squelette, est que le concepteur peut s'y référencer comme à un seul objet sous CATIA V5, peu importe le nombre de points activés, l'objet fibre neutre restera le même. Le concepteur peut alors positionner les éléments supplémentaires souhaités à l'aide d'un point de la fibre neutre. Un exemple simple de cette démarche est l'ajout d'un support de soudure de type rond. Cet élément est basé sur un point sur la fibre (pour la position), un plan normal à celle-ci (pour l'orientation), et une esquisse qui lui donne forme (Fig. 58). Les éléments géométriques sont construits en s'appuyant sur les points et la fibre neutre. **Le concepteur peut donc tout modifier** en changeant le point d'origine de l'élément ou ses paramètres.

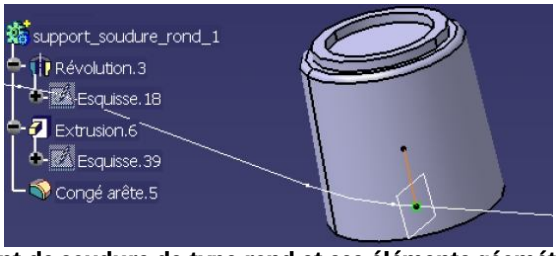


Fig. 58. Élément de soudure de type rond et ses éléments géométriques de base.

Il est possible au concepteur d'insérer d'autres éléments, tels que les soufflets et les supports de soudure carrés. À la fin de l'insertion, ils sont tous reliés au corps du conduit par des opérations booléennes. Le concepteur obtient finalement un objet unique et modifiable, car utilisant l'historique de construction de l'arbre **CSG** (***C****onstructive* ***S****olid* ***G****eometry* [Olsen *et al.*, 2009]) avec des éléments insérés et pilotés automatiquement par des instructions de l'outil de KBE KADViser, et des éléments de base géométriques, utiles pour modifier le produit, pour chacun des éléments insérés.

2.1.3. Gestion des embouts de raccordement

Les embouts de raccordement ne peuvent pas être ajoutés directement au corps du conduit, bien que réalisés à base de modèles intelligents. Leur positionnement et leur orientation posent des problèmes, d'autant plus lorsqu'il s'agit de faire varier les configurations. Le choix a donc été fait d'ajouter les embouts au reste du conduit sous un produit que le concepteur pourra ensuite reprendre et modifier (Fig. 59 à la page 106). Les modèles géométriques des embouts sont organisés en fonction de leur côté de fixation

(côté RAS ou côté BP du conduit d'air), et chaque type d'embout existant est intégré dans le modèle. L'embout à utiliser sera par la suite activé ou désactivé via des règles.

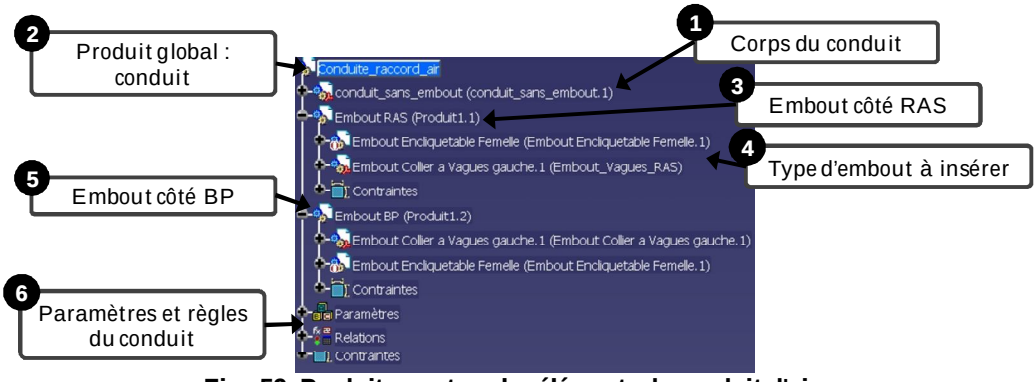


Fig. 59. Produit avec tous les éléments du conduit d'air.

2.1.4. Pilotage

Afin de piloter les différentes configurations de chaque élément du conduit, des groupements de paramètres sont insérés dans l'arbre de produit. Ces paramètres gèrent non seulement les caractéristiques géométriques, mais aussi les opérations booléennes et l'activité de chaque élément. La figure 60 illustre les paramètres des embouts de raccordement.

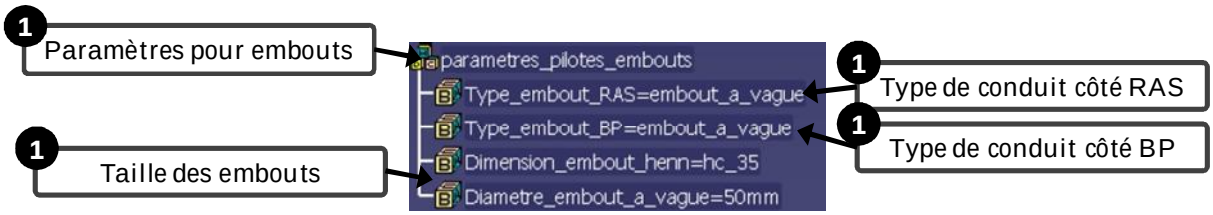


Fig. 60. Paramètres pour le pilotage des embouts de raccordement.

Ces paramètres sont gérés par des règles logiques de type « **Si – Alors** ». Elles font le lien entre les paramètres de type binaire (existe, n'existe pas) et ceux de type alphanumérique (embout_a_vague, embout_henn, etc.), et les caractéristiques géométriques du modèle CAO. Il existe une règle de cette sorte pour chaque extrémité du conduit (BP et RAS). Nous avons vu auparavant que chaque extrémité du conduit est gérée par un produit contenant les deux types d'embouts. Ces règles servent donc à gérer cette situation, en désactivant ou activant la présence d'un des deux embouts possibles, à chaque extrémité. Il existe aussi des règles et tableaux à double entrée pour les dimensions des éléments et pour leurs positions et orientations dans l'espace.

2.1.5. Modélisation du conduit

L'outil de gestion et d'ingénierie à base de connaissances, ainsi que son interface utilisateur, sont développés à l'aide du progiciel KADViser. Comme remarqué par [Hew *et al.*, 2001], l'interface est l'une des caractéristiques essentielles d'une application KBE. Cette caractéristique permet non seulement à l'utilisateur d'interagir et s'approprier des connaissances, mais elle permet aussi aux experts de corriger et mettre à jour la base de connaissances. La figure 61, ci-après, illustre une capture d'écran de la fenêtre principale de l'application.

Fig. 61. Fenêtre principale de l'interface utilisateur.

La première étape à effectuer par le concepteur est la déclaration du parcours de la fibre neutre du conduit. Ceci peut se faire manuellement, si l'OEM fournit un tableau de points (avec coordonnées X, Y et Z) comme illustré par la Fig. 62, ou sous forme automatique par script (voir section 4.2.2 à la page 109), si l'OEM fournit un fichier CAO disposant ou non d'un historique de construction, et ébauchant la forme de conduit souhaitée.

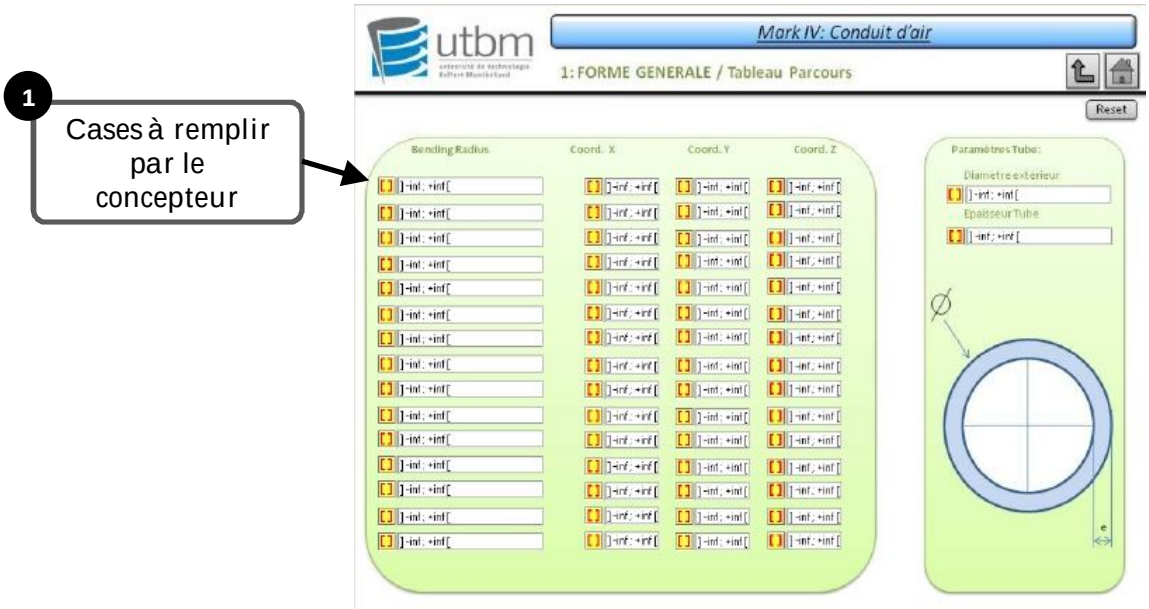


Fig. 62. Interface de définition « manuelle » de fibre neutre d'un conduit d'air.

L'utilisateur peut aussi compléter les informations nécessaires pour construire son conduit et ses éléments supplémentaires selon son cahier de charges OEM et interne. Sur l'image précédente nous pouvons observer les différentes cases que le concepteur doit remplir pour compléter son produit. En complétant cette étape il aura, sous KADViser, toutes les informations nécessaires pour construire un nouveau conduit, avec

des données sur le process, les géométries, etc. Toutes ces informations pourront être exportées sous forme d'un fichier d'échange.

La dernière étape consiste à récupérer le fichier d'échange sortant de KADViser avec tous les paramètres du conduit, et le faire traiter par CATIA V5, ceci dans le but d'impacter le fichier CAO paramétré avec les choix issus du cahier des charges formulé par l'OEM et du savoir-faire de l'entreprise, pour finir par l'exportation d'un modèle CAO spécifique au projet traité par le concepteur (partie inférieure de la figure Fig. 61, à la page 107).

L'un des principaux objectifs de l'application KBE est de lier la conception géométrique d'un conduit d'air avec les paramètres issus du cahier de charges de l'OEM. Un lien a été développé entre KADViser et le modeleur géométrique, ici dans notre cas CATIA V5, pour effectivement permettre de fermer la boucle descendante / ascendante des connaissances, allant du cahier des charges jusqu'au produit et vice-versa. Ce lien se fait par le biais d'un un fichier d'échange (tableau issu d'un tableur du commerce dans notre cas) qui est repris comme une table de configuration paramétrique par l'outil CAO CATIA V5 pour alimenter les paramètres du produit (Fig. 63). Le fichier d'échange ne sert pas exclusivement à faire le lien entre l'outil de gestion et CATIA V5, mais aussi comme **justificatif des choix pris** au moment de la conception du produit, servant ainsi de carte d'identité du produit conçu, car reprenant l'ensemble des paramètres clé pilotant sa géométrie (approche *key characteristic* [Zheng *et al.*, 2008]).

PRODUCT

CdC Client/CAO (optionnel)	Liste_de_points	
	Diametre_exterieur (mm)	40
	Epaisseur_tube (mm)	1.5
	Choix_parcours (optionnel)	
Choix des Embouts	Choix (choix embout ras)	Embout Henn
	Choix2 (choix embout bp)	Embout collier a vague
Paramètres Embouts RAS/BP	Type_embout_henn (reference henn)	hc_35
	Diametre_interieur (emb. collier à vague) (mm)	35
Paramètres Soufflet	Angle_de_flanc (deg)	10
	Epaisseur (mm)	2
	Hauteur_de_spire (mm)	12
	Nombre_de_spires	10
	Pas_de_spires (mm)	2
	Rayon_de_pied (mm)	4
	Rayon_de_tete (mm)	4
Choix Appendices à Souder	Choix_appendices_a_souder_ras	Soudure Rond
	Choix_appendices_a_souder_bp	Soudure Carree
Paramètres Soudure Rond	Diametre (mm)	25
	Angle_de_depouille (deg)	2
	Hauteur (mm)	15
	Hauteur_barette (mm)	5
	Diametre_ext_barette (mm)	17
Paramètres Soudure Carrée	Nombre_barette	25
	Aa (largeur barette) (mm)	2
	Bb (espacement entre les barettes) (mm)	2
	Cc (hauteur de plot) (mm)	2.5
	Dd (hauteur de barette) (mm)	4
	Ee (angle de depouille) (deg)	2
	Ff (largeur plot) (mm)	25

PROCESS

CdC Client Process	Diametre_filiere	20
	Distance_tete_de_moule	56
	Poids	89
	Poids_piece	12
Machines/Procedes	Choix_de_machine	ta_500
	Type_de_procedes	soufflage
	Force_de_fermeture	500kN

Fig. 63. Fichier d'échange de type tableur faisant le lien entre l'outil de gestion KADViser et le modeleur géométrique CATIA V5.

Une fois le modèle ouvert dans l'outil CAO et les paramètres mis à jour, le concepteur a la **liberté de modifier** et d'adapter plus finement le modèle à ses besoins. Il peut modifier la position des éléments spécifiques tels que les supports capteur, en faisant glisser leur point origine sur la fibre neutre, ou leur orientation (Fig. 64 à la page suivante).

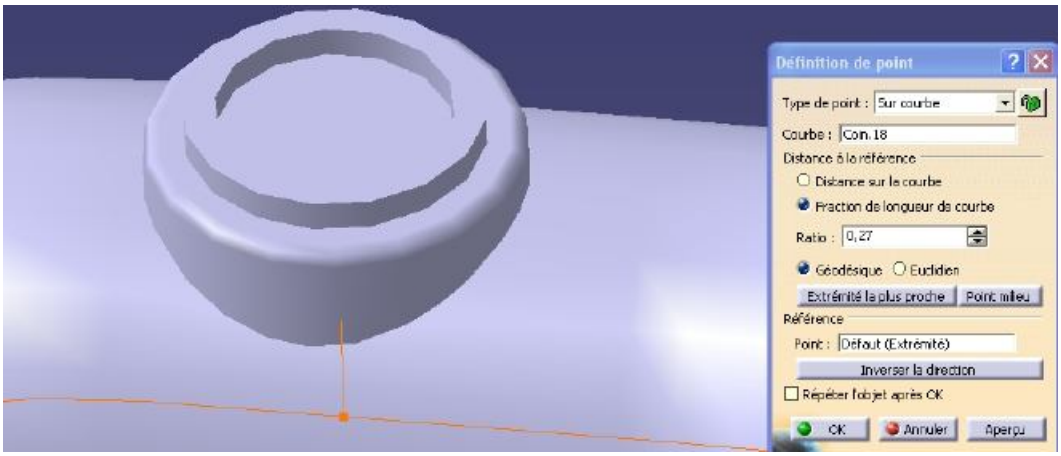


Fig. 64. Mise en place et orientation de support de soudure rond.

La figure 65 montre un exemple d'un modèle CAO final établi à partir de l'application KBE de création de conduits d'air.

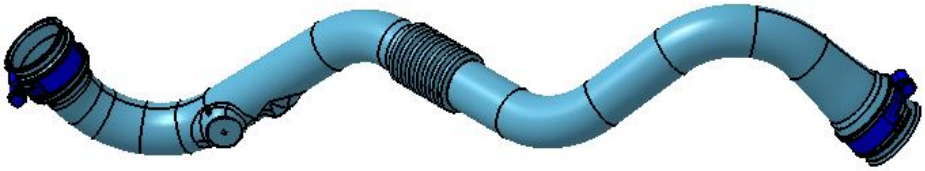


Fig. 65. Conduit généré et modifiable par le concepteur.

2.2. Script d'extraction de fibre

La première application par script que nous présentons sert de vérification des données process sur des produits, ainsi que de génératrice des éléments pour les applications KBE de génération de conduits et de leurs outillages. Le script d'extraction de fibre neutre fait une discrétisation d'un corps de conduit par un sectionnement du corps, puis par une détermination du centre de gravité de chaque section. Il est construit pour suivre fidèlement le vrai centre d'un conduit et trouver les points qui constituent cette fibre tous les 2 millimètres. La figure 66, ci-après, décrit le fonctionnement du script pour trouver ces points. À la fin de son cycle, le script rend le conduit traité avec une vraie fibre neutre discrétisée, laquelle est ensuite évaluée par des critères de fabrication.

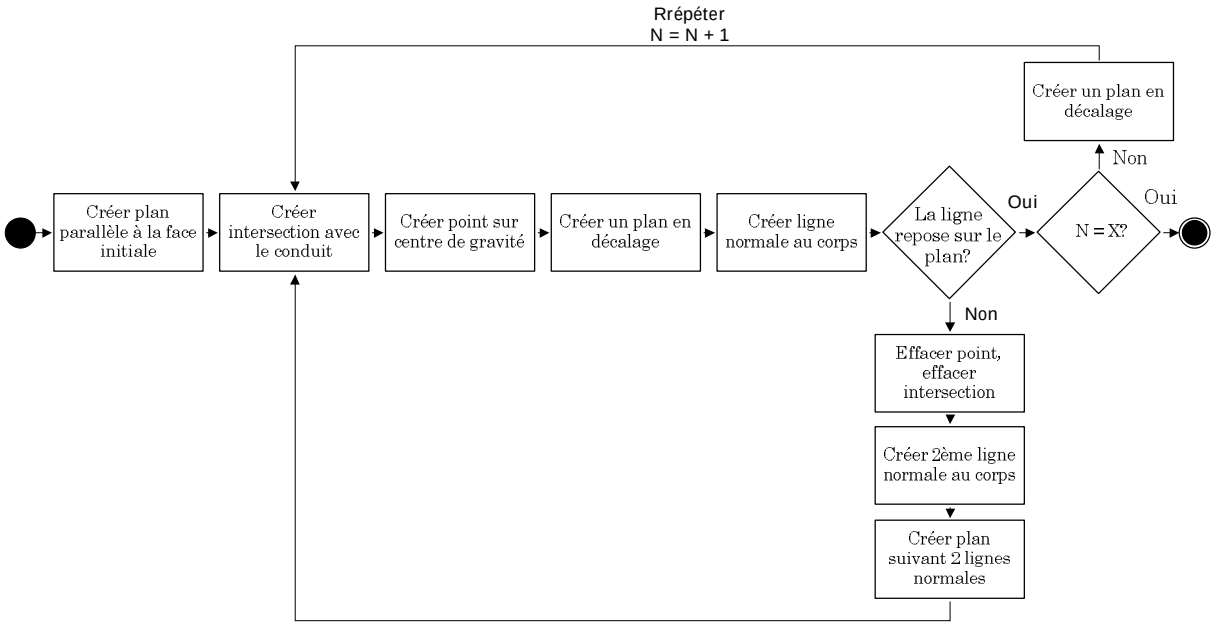


Fig. 66. Discrétisation de la fibre neutre d'un conduit d'air.

La vérification obtient plus d'éléments que les points de la fibre neutre. Le script détermine, en plus de la fibre, un plan et un axe ajustés par décomposition en valeur singulières. Le plan donne le meilleur emplacement pour le joint du moule, l'endroit demandant le moindre écartement de tous les points sur le conduit. La décomposition en valeurs singulières (***S****ingular* ***V****alue* ***D****ecomposition* – **SVD**) suppose M une matrice $m \times n$ dont les coefficients appartiennent au corps K, où K = R ou K = C (R et C étant des constantes). Alors il existe une factorisation de la forme :

$$M = U\Sigma V^*$$

avec U une matrice unitaire $m \times m$ sur K, Σ une matrice $m \times n$ diagonale avec des valeurs positifs ou nuls, et V^* est la matrice adjointe à V, matrice unitaire $m \times n$ sur K [Eberly, 2008].

- La matrice V contient un ensemble de vecteurs de base orthonormés pour M, dits « d'entrée » ou « d'analyse » ;
- La matrice U contient un ensemble de vecteurs de base orthonormés pour M, dits « de sortie » ;
- La matrice Σ contient les valeurs singulières de la matrice M.

Les vecteurs U_1 et U_2, premiers vecteurs de la matrice de sortie U, sont respectivement le vecteur de l'axe avec la distance plus petite par moindres carrés, et le vecteur orthogonal, qui permet de construire le plan ajusté à la fibre neutre.

Nous pouvons donner un exemple simplifié de la démarche de SVD, pour deux points $p_1 = [3, 1, 1]$ et $p_2 = [-1, 3, 1]$ en *x, y* et *z* respectivement. Ces points rendent la matrice *A* suivante *:*

$$M = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Pour trouver U, nous commençons par MM^T :

$$MM^T = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 & 1 \\ 1 & 11 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Ensuite, pour trouver les valeurs et vecteurs propres de MMT, nous calculons $A\vec{v} = \lambda\vec{v}$ pour MM^T:

$$\begin{bmatrix} 11 & 1 \\ 1 & 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Ce qui donne deux équations, lesquelles nous pouvons factoriser pour obtenir :

$$(11 - \lambda)x_1 + x_2 = 0 \tag{4.4}$$

$$x_1 + (11 - \lambda)x_2 = 0$$

Ces équations nous pouvons les résoudre en fixant le déterminant du coefficient de la matrice à 0 :

$$\begin{bmatrix} (11-\lambda) & 1 \\ 1 & (11-\lambda) \end{bmatrix} = 0 \tag{4.5}$$

La résolution de cette matrice donne les valeurs propres $\lambda = 10$ et $\lambda = 12$. Si nous réinjectons ces valeurs propres dans les équations (4.4) nous obtenons les valeurs $x_1 = 1$ et $x_2 = -1$ pour la première équation et $x_1 = 1$ et $x_2 = 1$ pour la seconde. Nous dévons finalement convertir la matrice des vecteurs propres en matrice orthogonale, à l'aide d'un processus d'orthonormalisation Gram-Schmidt :

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{v}_1}{|\vec{v}_1|} = \frac{[1,1]}{\sqrt{1^2+1^2}} = \frac{[1,1]}{\sqrt{2}} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right] \tag{4.6}$$

$$\vec{\omega}_2 = \vec{v}_2 - \vec{u}_1 \cdot \vec{v}_2 * \vec{u}_1 = [1, -1] \tag{4.7}$$

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{\omega}_2}{|\vec{\omega}_2|} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}}\right] \tag{4.8}$$

a partir des valeurs obtenus par les équations (4.6) et (4.8) nous pouvons reconstituer la matrice U :

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Avec ces deux vecteurs nous pouvons obtenir l'axe de gravité, le faisant passer par le centroide de tous les points, et l'axe orthonormal pour établir le plan de fermeture du moule pour le conduit analysé. Le script automatise cette résolution pour la matrice U de tous les points et établit l'axe et le plan (Fig. 67 à la page suivante) et établit automatiquement l'axe et le plan.

```
'Now find an eigenvector corresponding to the smallest eigenvalue of A
u1 = B11
u2 = B12
u3 = B13
uu1 = B11
uu2 = B12
uu3 = B13
vv1 = B22
vv2 = B23
vv3 = B33

For k = 1 To 10
    A11 = B11 * u1 + B12 * u2 + B13 * u3 'intermediate storage
    A12 = B12 * u1 + B22 * u2 + B23 * u3 'intermediate storage
    A13 = B13 * u1 + B23 * u2 + B33 * u3 'intermediate storage
    Adet = Sqr(A11 * A11 + A12 * A12 + A13 * A13) 'magnitude of A
    u1 = A11 / Adet
    u2 = A12 / Adet
    u3 = A13 / Adet
Next k

    Aa11 = B11 * uu1 + B12 * uu2 + B13 * uu3 'intermediate storage
    Aa12 = B12 * uu1 + B22 * uu2 + B23 * uu3 'intermediate storage
```

Fig. 67. Détail du script pour déterminer l'axe de gravité et le plan ajusté.

L'axe suit la loi de gravitation des conduits fabriqués par le procédé d'extrusion soufflage. Cette loi indique qu'un conduit ne peut pas se fabriquer s'il comporte des virages sur sa fibre qui la font remonter, c'est-à-dire qu'avec un angle sur la fibre de plus d'un certain angle par rapport à la verticale, un conduit ne peut pas être fabriqué[12]. Un recours de fabrication, pour faire face aux produits qui défient cette règle, est de les décomposer en sous-éléments et les réorienter pour leur fabrication. Ensuite, les sous-éléments sont détachés, réorientés correctement et joints par un procédé de soudure. Le script calcule le meilleur endroit pour la découpe, le propose au concepteur et le réalise, pour créer un nouveau modèle d'un conduit capable d'être fabriqué par extrusion soufflage (Fig. 68).

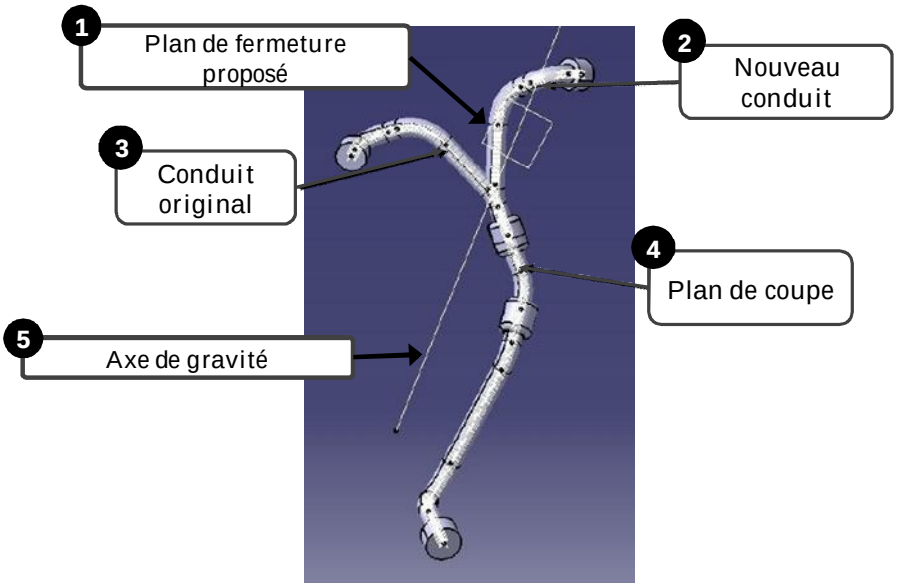


Fig. 68. Conduit coupé et transformé par rotation.

Cette application par script sert à illustrer non seulement son utilisation pour faire une vérification des règles métier sur un produit, mais aussi le respect de la loi de gravité

[12] Celle-ci fait partie des règles imposées par l'entreprise. En réalité, il est possible de fabriquer un conduit comportant des angles plus importants. Néanmoins, la règle est gardée pour un simple choix technique et économique, il est plus coûteux de fabriquer un produit qui ne respecte pas la gravité.

pour un conduit. Elle se couple aussi avec les différentes applications KBE existantes, permettant de développer des produits robustes, qui respectent les savoir-faire métier de l'entreprise (la création d'un conduit et le développement de son outillage). Le script est suffisamment modulaire pour aider les concepteurs à développer leurs produits par eux-mêmes. Couplé à d'autres éléments développés, il permet une réduction significative du temps dédié au développement de produits.

2.3. Applications KBE pour la génération automatique d'outillages d'extrusion-soufflage

Entrant plus dans le détail des connaissances métier et de fabrication des conduits, nous avons développé une application KBE, liée à celle du conduit, pour déterminer les outillages. Le procédé de fabrication d'extrusion soufflage comporte plusieurs connaissances métier, souvent tacites et non capitalisées d'une forme facilement utilisable [Grundstein, 2007]. Nous avons conduit plusieurs entretiens avec les experts métier pour formaliser un certain nombre de ces connaissances, et les transcrire sous forme de règles [Serrafero *et al.*, 2006]. Par la suite, nous énoncerons quelques règles métier qui permettront de construire ces applications, extraites des CdC de l'entreprise et de l'OEM.

2.3.1. Les règles métier

Afin d'illustrer nos propos nous présentons des exemples de règles métier, que nous avons rendu imprécises afin de préserver la confidentialité du savoir faire de l'entreprise Mark IV.

1. La paraison
   - **Règle métier 1 :** respect de l'écoulement de la paraison par gravité.
   - Le procédé de fabrication par extrusion soufflage exige un écoulement par gravité (Fig. 69). En cas de non respect de cette règle, la géométrie du conduit à développer devra être modifiée. Si l'angle créé entre la fibre neutre du conduit et l'axe vertical du moule vaut plus d'un certain angle donné de X°, nous considérerons que la règle 1 n'est pas respectée.

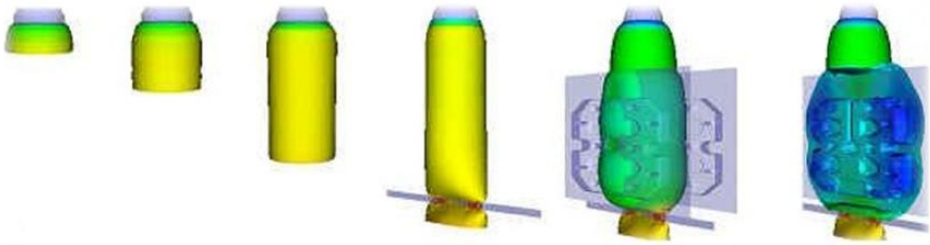


Fig. 69. Écoulement de la paraison en extrusion soufflage.

2. Le démoulage
   - **Règle métier 2 :** respecter le démoulage. Les éléments de type soufflet et supports de soudure doivent comporter des dépouilles cohérentes pour ce démoulage.
3. Les éléments supplémentaires

- **Règle métier 3 :** positionner les soufflets et les supports de soudure à une certaine valeur minimale des embouts de raccordement.
- **Règle métier 4 :** les soufflets doivent être positionnés sur certaines parties spécifiques du conduit.

4. Les bulles

- **Règle métier 6 :** deux déflecteurs facilitent le passage de la paraison sur la bulle du haut. La fonction de soufflage du procédé de fabrication exige une « bulle » pour que le corps reste creux et puisse être injecté d'air. Les bulles servent aussi comme point d'injection d'air et séparent les chutes du process de fabrication (formes créés que pour le processus de fabrication) du produit fini.
- **Règle métier 7 :** le diamètre de la bulle du bas doit avoir certaines caractéristiques vis-à-vis de la pièce, afin de limiter la perte de charge au niveau de l'aspiration.

5. Sortie d'air (Fig. 70)

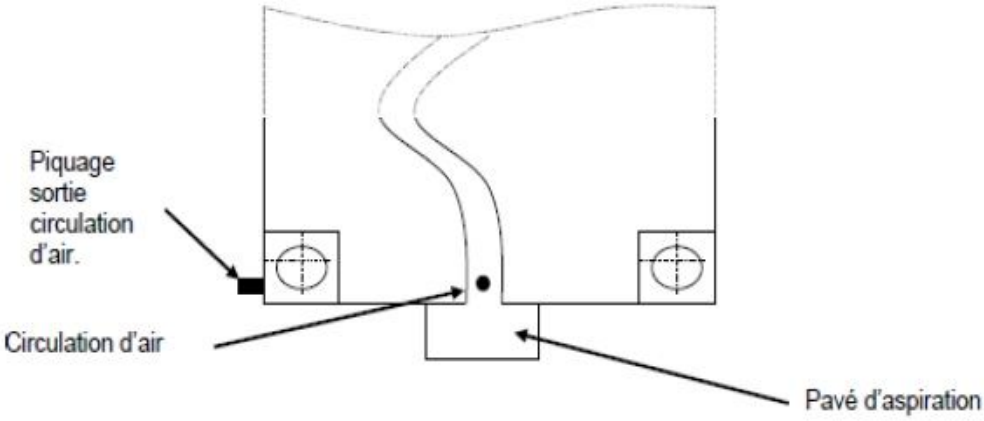


Fig. 70. Sortie d'air.

- **Règle métier 8 :** dans la bulle du bas, la sortie d'air doit être d'une certaine forme.
- **Règle métier 9 :** la sortie d'air se termine par un piquage spécifique et par un bouchon.
- **Règle métier 10 :** diamètre de passage pour la circulation d'air dans le moule : X mm.

En plus de celles-ci, plusieurs autres connaissances ont été capitalisées sous forme de « bréviaires de connaissances » [Serrafero *et al.*, 2006], afin de pouvoir les réutiliser lors du développement de nouvelles applications KBE ou de nouveaux produits. En cas d'introduction de nouvelles règles ou d'évolution des règles existantes, le bréviaire doit être mis à jour ainsi que l'application KBE associée. Ainsi les nouveaux produits développés tiendront compte de ces modifications. Il est cependant vrai qu'il serait intéressant de proposer de mettre en œuvre des outils de KCM [Badin *et al.*, 2009], permettant de mettre à jour de manière semi-automatique à la fois les bréviaires et les applications KBE, dés l'identification de l'évolution d'une règle ou d'un paramètre. C'est

l'objet de la thèse de J. Badin mais également des projets ADN et IngéProd des pôles de compétitivité Véhicule du Futur[13] et I-trans[14].

2.3.2. Le conduit

Cette nouvelle application KBE est exécutée en aval de l'application de conception d'un conduit d'air. Elle consiste à modéliser un outillage pour un produit qui est déjà développé par le concepteur, et en attente d'envoi au mouliste pour faire des devis de moule. Habituellement, un mouliste fait la modélisation par lui-même. Mais faire une ébauche avant de l'envoyer permet de prévoir des difficultés et de les traiter sans attendre un retour. La figure 71 montre un exemple de conduit à fabriquer.

Fig. 71. Conduit à fabriquer.

En effet, le conduit doit être conforme aux règles métiers établies précédemment. Elles seront vérifiées une à une, entraînant des éventuelles modifications de la fibre neutre, ou encore des conditions d'emplacement des éléments du conduit.

Une vérification par script, développée pour cette activité d'ingénierie particulière (voir section 2.2 à la page 109), vérifie le respect de la règle d'**écoulement par gravité**. Selon cette règle, l'angle entre l'axe de la gravité, l'axe vertical, et l'angle créé par la fibre neutre doit être inférieur à un certain angle. La vérification nous donne l'allure de la fibre neutre, et la position (si nécessaire) de l'axe de la gravité par rapport au conduit (Fig. 72). Le script vérifie la conformité du conduit et, le cas échéant, propose une position de plan de coupe de la pièce. Cela implique que plus un conduit est compliqué, plus il demandera des coupes successives, donc des passages par la vérification, avant d'être tout à fait conforme aux règles métier. La multiplication de ces coupes induira l'altération de la forme du conduit dû à chaque sous-élément du conduit ainsi généré, et

[13] http://www.vehiculedufutur.com/
[14] http://www.i-trans.org/

nécessitera par la suite des opérations de coupe et de soudage des différents sous éléments obtenus, permettant au final de reconstituer le conduit complet. D'où l'intérêt de trouver un axe de gravité optimal permettant de définir un plan de fermeture du moule tout en minimisant la complexité de ceci donc tout en minimisant les coûts.

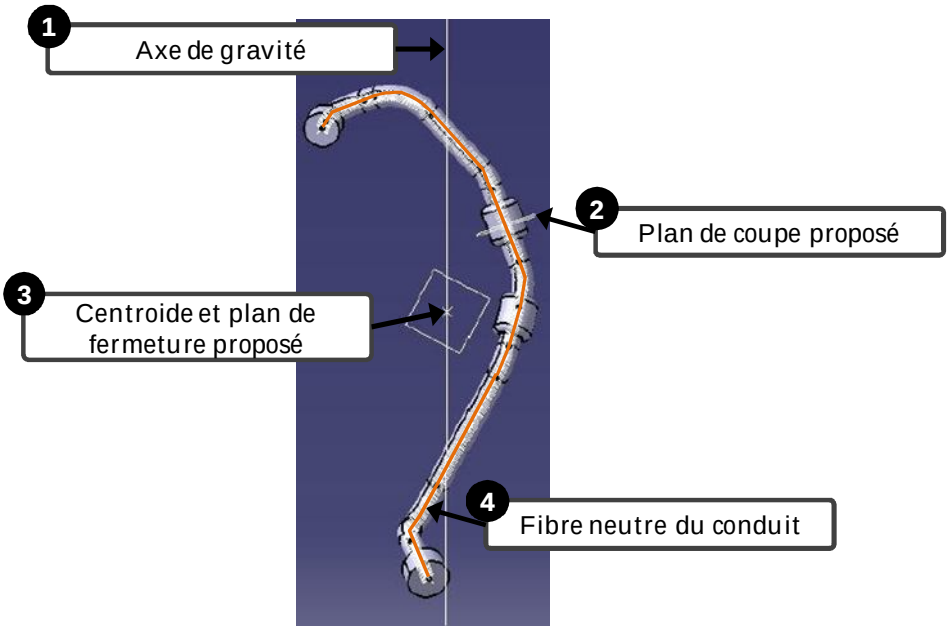


Fig. 72. La vérification identifie la fibre neutre, l'axe de gravité, et propose les éventuels plans de coupe.

Le but de l'application proposée est de réaliser un outil d'aide à la conception de moules, à partir des modules de conception du produit. De cette manière, le conduit optimisé et adapté par la vérification mentionnée ci-dessus, ainsi que les paramètres et leurs valeurs instanciées dans KADViser, servent de base pour l'extraction de la fibre neutre et la géométrie entière de l'empreinte du moule.

L'élaboration de cette empreinte est effectuée en plusieurs étapes :

1. récupération de la fibre neutre et du conduit (à partir de la définition de la solution du conduit détaillée précédemment) ;
2. importation des paramètres de surface du conduit ;
3. génération de l'empreinte à retirer du moule.

   Plusieurs méthodes ont été explorées, les objectifs étant multiples dans certains cas. Ceux-ci étaient essentiellement liés à la question de pouvoir, autant que possible, gérer l'outillage avec la moindre quantité de paramètres possible, et de garantir une continuité de la nomenclature produit dans le projet de développement. De plus, il nous a paru évident que les éléments ajoutés doivent rester assujettis aux paramètres de pilotage, car leur position sur la géométrie de la fibre neutre doit rester inchangée.

1. Récupération de la fibre neutre et du conduit

Tenant compte de la modularité des applications KBE, la création d'outillages peut se déclencher suite à la définition du modèle CAO par le concepteur, ou se faire sur un conduit qui n'a pas été développé par FaBK. Dans le premier cas, le concepteur a déjà sa

fibre neutre et son conduit, prêts pour être traités. Dans le second cas, il se sert du script d'extraction de fibre pour préparer les éléments qui lui sont nécessaires pour faire son outillage.

2. Importation des paramètres de surface du conduit

Comme mentionné auparavant, un certain nombre de paramètres du conduit doivent garder leur influence sur celui-ci tout au long de l'application, même après la coupe pour la conformité à l'axe de gravité. Le seul paramètre portant sur le conduit, à proprement parlé, est le diamètre extérieur (avec des paramètres process comme le delta de contraction matière), la raison étant que l'opération de retrait de l'empreinte du moule requiert un volume plein. En ce qui concerne les éléments ajoutés (soufflets, supports de soudure), le concepteur doit vérifier soigneusement qu'ils respectent le sens de démoulage établi par la vérification, et il doit dépouiller correctement les éléments.

Chaque élément est créé dans une entité géométrique à part qui, le moment voulu, est ajouté ou retiré du volume tubulaire par opération booléenne. Une fois tous les éléments réalisés, le conduit répond aux règles du moule. L'empreinte est retirée par opération booléenne et le travail peut commencer sur la modélisation de le châssis du moule, à l'interface avec la presse à extruder-souffler.

3. Génération de l'empreinte à retirer du moule

Une fois que tous les éléments du conduit ont été analysés, que les dépouilles de chacun d'entre eux ont été établies, le conduit peut servir pour générer l'empreinte du moule.

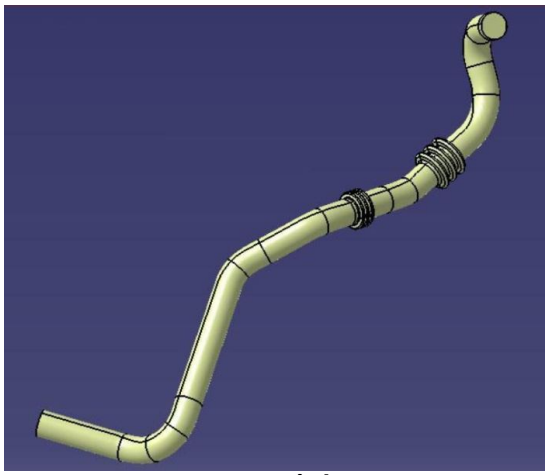


Fig. 73. Le corps du conduit est prêt à servir de base d'empreinte

Dorénavant il ne reste plus qu'à l'extraire, de manière semi-automatique, du moule d'extrusion soufflage paramétrique et modulaire, ainsi obtenu comme le montre la figure Fig. 73 précédente.

2.3.3. Le moule d'extrusion soufflage

Le recueil des connaissances explicites de l'entreprise relatives aux moules d'extrusion soufflage nous a permis de modéliser un moule entièrement paramétrique et de le lier aux paramètres obtenus dans l'outil de gestion KADViser. Pour ce faire, il a fallu définir la géométrie des pavés modulaires, leur nombre et leurs variantes. Ensuite, nous avons créé les parties du moule et ses systèmes de guidage et ses découpes.

2.3.3.1. Moule à fonctionnalité modulaire

La fonction de modularité du moule peut être introduite au moule de différentes manières. Son utilité est principalement d'ordre économique et temporel. Le choix d'un bloc de l'empreinte, fractionnée de façon uniforme sous forme de pavés rectangulaires, a été retenu pour la création de cette nouvelle application KBE (Fig. 74) dédiée à la conception de l'outillage d'extrusion soufflage du conduit d'air.

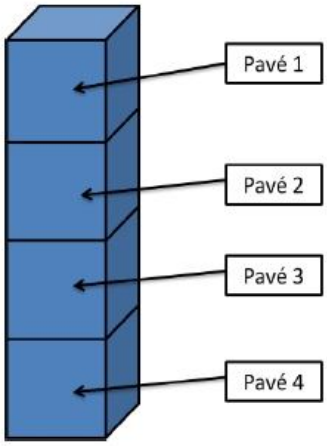


Fig. 74. Pavés du bloc contenant l'empreinte.

Cette configuration de pavés présente l'avantage de garantir une homogénéité de régulation du refroidissement du moule d'un pavé à l'autre et une température très homogène des pavés. Son seul inconvénient par rapport à d'autres configurations est que l'inclusion de petits pavés le long de l'empreinte pose un problème de grippage lors de l'insertion car les pavés sont de même matériau. Le problème est mineur car il trouve sa solution dans la rectification des surfaces en contact. La garantie sur l'homogénéité de la température est importante car la différence de température des pavés influence la qualité dimensionnelle finale du produit. Avec les matériaux traités, un retrait existe, du fait de la différence de température des pavés, pouvant créer une discontinuité au niveau de la géométrie du conduit final.

2.3.3.2. Organisation des pavés modulaires

L'étape suivante consiste à définir le découpage du conduit généré, afin de former les pavés modulaires. La figure 75, ci-après, détaille la décomposition d'un conduit en pavés.

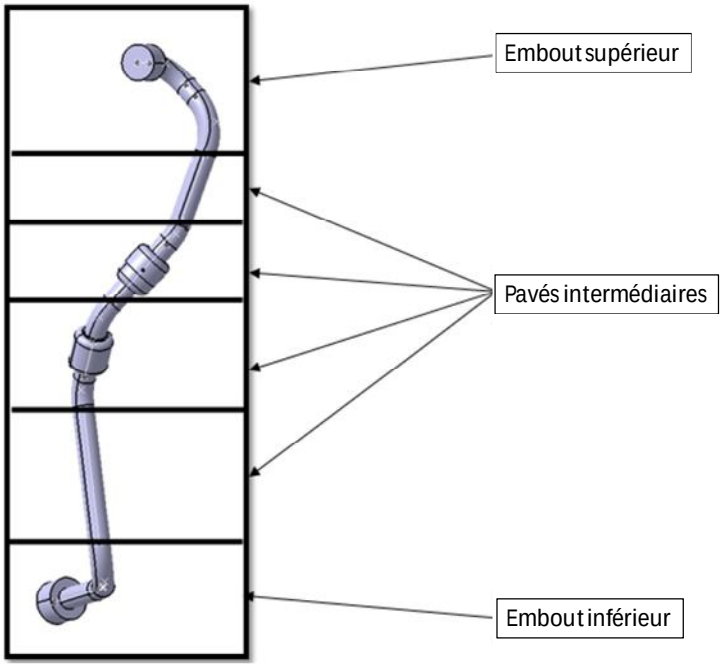


Fig. 75. Découpage du conduit en pavés modulaires.

Le découpage du conduit est effectué en prenant en compte tous les emplacements possibles des soufflets et supports de soudure. Nous rappelons que ces éléments doivent se positionner sur les portions rectilignes du conduit selon les règles métiers. Nous obtenons donc des pavés modulaires et des pavés supérieurs et inférieurs qui accueillent l'empreinte des embouts de raccordement.

2.3.4. Utilisation

Les liens créés entre KADViser, le tableau de paramètres et CATIA V5 permettent, comme expliqué précédemment, de piloter la géométrie du conduit à partir de l'interface KADViser. Avec le conduit généré et manipulé par le concepteur, il est possible de créer une ébauche de moule d'extrusion soufflage (Fig. 76). Cette ébauche n'est pas suffisamment détaillée pour pouvoir ensuite usiner un moule. Cependant, elle permet d'apercevoir d'**éventuelles difficultés** avec un nouveau produit à développer.

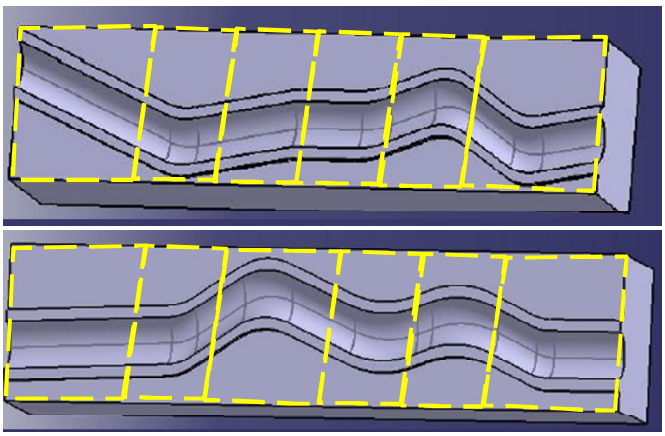


Fig. 76. Empreintes pilotées par KADViser.

2.4. Script d'analyse des sections : loi d'évolution des tubulures

Le deuxième script de vérification que nous allons décrire est celui de l'analyse de sections de tubulures. Quand un produit avec des tubulures, tel qu'un conduit d'air (fabriqué par injection ou par extrusion soufflage), un répartiteur d'air, ou autre produit tubulaire est développé, l'OEM établit certains paramètres fonctionnels à respecter pour les parties tubulaires. Les tubulures doivent avoir une longueur déterminée, une aire de passage d'une taille précise, ainsi qu'un « diamètre équivalent » (le diamètre que la section pourrait avoir si elle était parfaitement ronde). Leur fonction étant de transmettre l'air, le non respect d'un de ces paramètres peut induire la perte de charge de l'air qui circule à l'intérieur, et des performances dégradées.

Habituellement, les concepteurs devaient faire les analyses de leurs produits manuellement, une activité très répétitive qui pouvait prendre jusqu'à **12 heures de travail**, et qui devait se reproduire à chaque modification des tubulures. Suivant notre méthodologie FaBK, nous avons suivi le travail des concepteurs pour extraire leur façon de travailler et nous l'avons reproduit pour leur économiser cette activité.

La figure 77 montre la fenêtre initiale de notre application développée par script. Elle travaille en découpant progressivement une tubulure et en récupérant les différentes mesures de chaque section générée (c'est-à-dire l'aire, le périmètre, le diamètre équivalent, etc.). Ces mesures sont ensuite enregistrées dans un fichier texte que le concepteur pourra récupérer pour le traiter (avec un tableur du commerce par exemple).

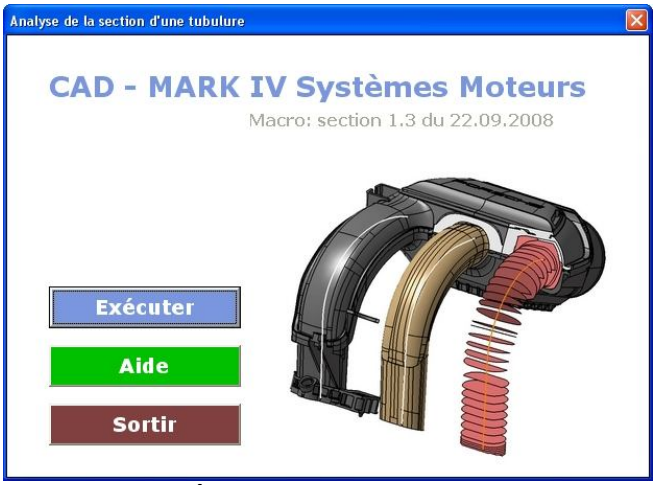


Fig. 77. Fenêtre initiale de l'analyse de sections.

En quelques centaines de lignes de code, nous avons reproduit les actions des concepteurs sous forme d'une boucle [Toussaint, Gomes, *et al.*, 2008]. L'application extrait la fibre neutre du produit à analyser, la mesure, extrapole le nombre de sections qu'elle devra réaliser, et procède à les créer une à une. Le codage est fait par des règles de type :

« nombre_coupes » = « longueur_fibre » / « pas_sections »
« section_1 » = intersection(« plan_1 » et « corps_de_pièce »)
« Aire_1 » = Aire(« section_1 »)

Ce codage reproduit les actions que le concepteur devrait réaliser pour faire l'analyse, d'une façon automatique et à une répétition plus rapide, sans risque d'erreur. La figure 78 montre une section du codage du script en langage VBA.

```
'// Selection le plus prés de, intersections et points
    Set iRefe = oPart.CreateReferenceFromObject(iHybridShapeIntersection)
    Set iReff = oPart.CreateReferenceFromObject(ihybridshapepointoncurve)
    Set iHybridShapeNear = oHybridShapeFactory.AddNewNear(iRefe, iReff)
    oHybridBody.AppendHybridShape iHybridShapeNear
    oPart.InWorkObject = iHybridShapeNear
    oPart.Update
'// Remplissages, formes le plus prés de
    Set irefg = oPart.CreateReferenceFromObject(iHybridShapeNear)
    Set iHybridShapeFill = oHybridShapeFactory.AddNewFill()
    iHybridShapeFill.AddBound irefg
    iHybridShapeFill.Continuity = 0
    oHybridBody.AppendHybridShape iHybridShapeFill
    oPart.InWorkObject = iHybridShapeFill

    On Error GoTo out
'// compteur pour la distance entre points
a = a + dist

'// Mesure
Open ofichier & ".txt" For Append As #1
    selection.Add iHybridShapeFill
    Set iReference = selection.Item(1).Reference
    Set iMeasure = spabench.GetMeasurable(iReference)
    iReponse = iMeasure.Area
    iReponse2 = iMeasure.Perimeter
    iDiamEq = ((iReponse * 4) / 3.1416) ^ (1 / 2)
    Print #1, iNum & " Aire :  " & iReponse & "   mm^2. Diamétre Equivalent :   " & iDiamEq & "   Perim :   " & iReponse2
    Close #1
selection.Clear
Next
End
```

Fig. 78. Exemple du code du script de loi d'évolution.

Le script illustre les variables utilisées, telles que les diamètres, les aires ou encore les périmètres, ainsi que le traitement des produits analysés. Ce traitement peut être son découpage, la mesure des objets d'intérêt ou encore l'enregistrement des données de sortie sur un fichier d'échange.

2.4.1. Utilisation

Pour utiliser l'application, le concepteur appuie sur « Exécuter », elle commence par lui demander de donner un pas pour les sections (généralement fourni par l'OEM). Cette distance est en millimètres et permet à l'application de calculer le nombre de sections à réaliser selon la longueur de la fibre neutre qui sera sélectionnée par la suite (Fig. 79).

Fig. 79. Distance entre coupes.

Ensuite, l'application demande à l'utilisateur de donner un nom pour le fichier de type texte qui contiendra les mesures. Le concepteur n'aura qu'à naviguer vers l'endroit où il veut le sauvegarder, puis cliquer sur « Enregistrer ». L'application passe ensuite sur la sélection des différentes géométries d'entrée nécessaires pour faire ses analyses. La première consiste à sélectionner la fibre neutre qui donnera le parcours à suivre. La fibre peut être une ligne, une spline, une courbe, ou n'importe quel autre élément surfacique linéaire (Fig. 80 à la page suivante).

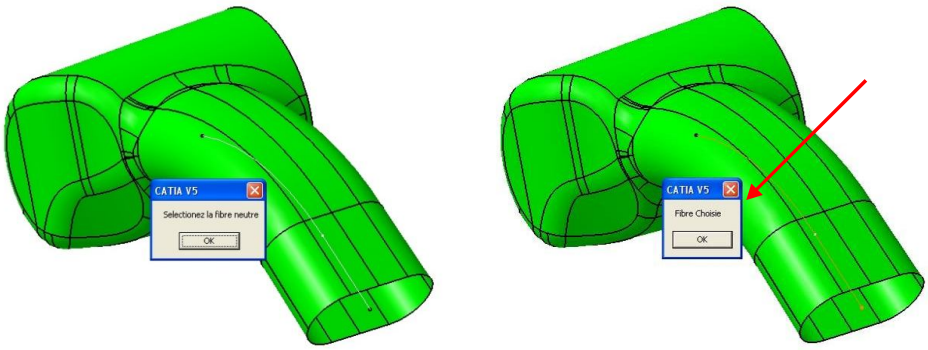


Fig. 80. Sélection de fibre neutre.

Après avoir sélectionné la fibre, l'application propose de choisir le corps de pièce qui sera sectionné et mesuré par la suite. Avec la fibre et le corps sélectionnés, l'application fait une première analyse et place un point sur chaque extrémité de la fibre neutre. Le concepteur devra choisir par la suite l'un des deux points pour établir son point de départ. Le point à sélectionner est censé être le point dans la partie où l'air entre dans la tubulure. Cette sélection permet d'établir le sens du flux d'air sur la tubulure, utile pour les calculs numériques de validation du produit fini (à l'aide des outils Mecaflux, Moldflow, etc.). Ensuite le concepteur n'a qu'à attendre la fin de l'analyse pour pouvoir récupérer son fichier texte avec les mesures, et le traiter. Il pourra aussi observer les différentes sections créées et les reprendre pour monter son dossier de vérification (Fig. 81).

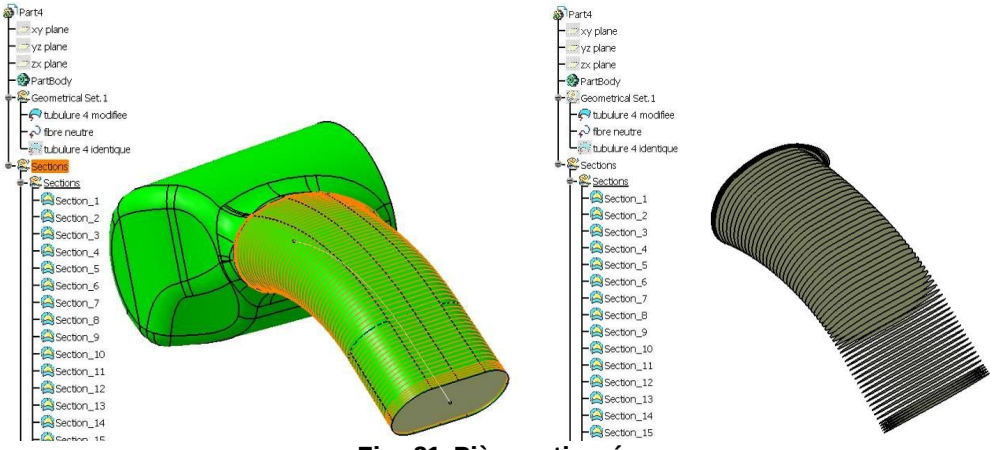


Fig. 81. Pièce sectionnée.

Le dossier de vérification est une démarche qualité établie pour garantir la pérennisation des analyses de vérification et de validation. Elle permet le **partage des informations** par tous les acteurs métier impliqués dans le projet. En cas de litige, elle sert comme preuve de la validité du produit. Le stockage des vérifications permet aussi de faire **évoluer les règles métier**, suite à un retour négatif de la part d'un expert métier ou d'une analyse par calculs numériques du produit.

2.4.2. Analyse des informations

À la fin de la vérification le concepteur obtient, en plus d'un modèle des actions réalisées, une table qu'il pourra exploiter par la suite pour analyser son produit en détail (Fig. 82 ci-après).

Fichier Edition Format Affichage ?

Coupe	Long. sur fibre	Aire	Diametre Equivalent	Perimetre
1	0	1896,98	49,14574553	167,49240716
2	0,2	1879,33	48,91657877	166,36037693
3	0,4	1863,22	48,70646607	165,36402185
4	0,6	1848,31	48,51119335	164,46422052
5	0,8	1834,37	48,3279108	163,63830857
6	1	1821,31	48,15556554	162,87363891
7	2	1765,73	47,41510312	159,69632386
8	3	1721,74	46,82074676	157,22583313
9	4	1686,02	46,332519	155,22442744
10	5	1656,74	45,92844381	153,57314252
11	6	1632,4	45,58981654	152,19151292
12	7	1611,65	45,29913591	151,02947865
13	8	1593,58	45,04447057	150,04826252
14	9	1577,71	44,81961696	149,21609644
15	10	1563,69	44,62003236	148,50856139
16	11	1551,25	44,4421897	147,90535903
17	12	1540,16	44,28304452	147,38811901
18	13	1530,23	44,14005882	146,94056187
19	14	1521,27	44,01064181	146,54736386
20	15	1513,07	43,89186773	146,19146152
21	16	1505,36	43,7798972	145,85360327
22	17	1497,79	43,66968054	145,52026561
23	18	1490,34	43,56093876	145,19057461
24	19	1483,01	43,45368295	144,86460879
25	20	1475,8	43,34792413	144,54244942
26	21	1468,71	43,24367328	144,22418034
27	22	1461,74	43,14094134	143,90988764

Fig. 82. Fichier texte avec les résultats d'une analyse.

Le fichier texte ainsi créé par l'application est déjà formaté pour pouvoir être exploité. Une fois dans un logiciel de traitement (de type tableur par exemple), le concepteur peut faire des graphiques de l'aire de passage en fonction de la longueur sur la fibre, baptisés loi d'évolution, afin de pouvoir observer l'évolution de passage de la tubulure (Fig. 83).

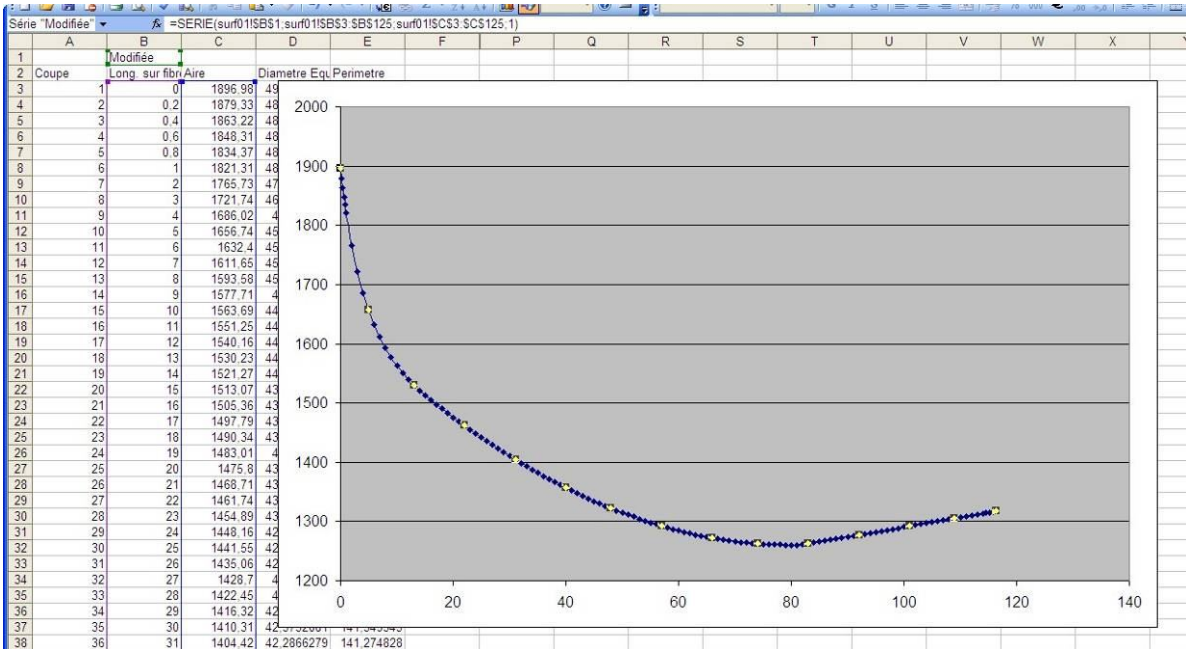
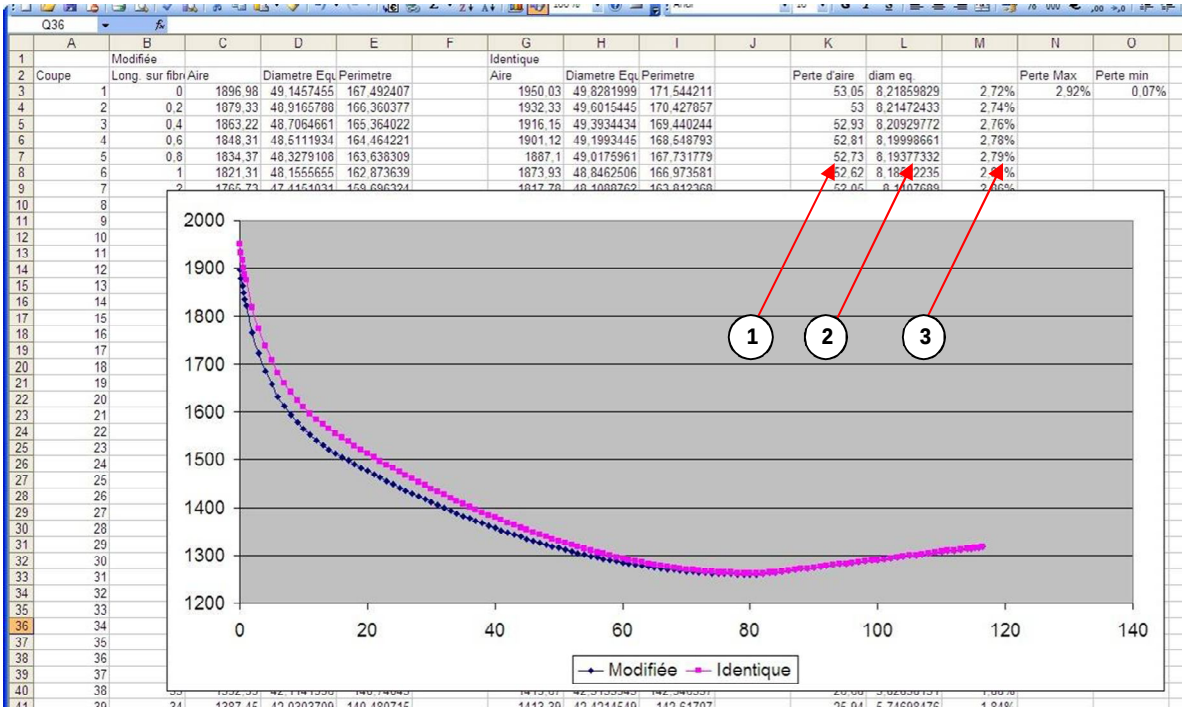


Fig. 83. Tableau et graphique de surface de passage.

L'intérêt de cette analyse est d'observer une évolution assez régulière, sans pics ni chutes trop importants pouvant déclencher des pertes de charge (des effets de tourbillon à l'intérieur des tubulures, ou un empêchement de l'écoulement, par exemple). La forme idéale du graphique est une ligne droite, régulière, et quasi horizontale. Plus le concepteur s'approchera de cette forme, meilleur sera l'écoulement d'air. Celle-ci est une règle basique de l'écoulement laminaire des fluides. Moins il y a de turbulences, plus l'écoulement du fluide est prédictible, maîtrisable et performant.

Il peut aussi comparer la courbe de l'aire de passage entre deux analyses, afin d'observer leurs différences l'une par rapport à l'autre (Fig. 84). Ceci est un travail régulier, car

chaque modification de la forme de la tubulure nécessite une vérification. Les vérifications successives permettent d'observer **l'amélioration ou la dégradation des performances** du produit analysé.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Modifiée					Identique								
2	Coupe	Long. sur fibr	Aire	Diametre Equ	Perimetre		Aire	Diametre Equ	Perimetre		Perte d'aire	diam eq.		Perte Max	Perte min
3	1	0	1896,98	49,1457455	167,492407		1950,03	49,8281999	171,544211		53,05	8,21859829	2,72%	2,92%	0,07%
4	2	0,2	1879,33	48,9165788	166,360377		1932,33	49,6015445	170,427857		53	8,21472433	2,74%		
5	3	0,4	1863,22	48,7064661	165,364022		1916,15	49,3934434	169,440244		52,93	8,20929772	2,76%		
6	4	0,6	1848,31	48,5111934	164,464221		1901,12	49,1993445	168,548793		52,81	8,19998661	2,78%		
7	5	0,8	1834,37	48,3279108	163,638309		1887,1	49,0175961	167,731779		52,73	8,19377332	2,79%		
8	6	1	1821,31	48,1555655	162,873639		1873,93	48,8462506	166,973581		52,62	8,18[illegible]2235	2,[illegible]%		
9	7		[illegible]	[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]		
10	8														
11	9														
12	10														
13	11														
14	12														
15	13														
16	14														
17	15														
18	16														
19	17														
20	18														
21	19														
22	20														
23	21														
24	22														
25	23														
26	24														
27	25														
28	26														
29	27														
30	28														
31	29														
32	30														
33	31														
34	32														
35	33														
36	34														
37	35														
38	36														
39	37														
40	38														
41	39														

Fig. 84. Tableau et graphique comparatif des deux analyses.

Pour calculer la perte d'aire de passage, il faut considère une formule du type :

$$PerteAire = Aire_1 - Aire_2 \tag{4.10}$$

De la même manière, le concepteur peut calculer le diamètre équivalent de cette différence avec la formule suivante :

$$DiamEq = 2 * \sqrt{\frac{PerteAire}{\pi}} \tag{4.11}$$

Finalement, il est possible de calculer le pourcentage d'aire que cette perte représente par la formule suivante :

$$Perte = \frac{PerteAire}{Aire_1} * 100 \tag{4.12}$$

La perte est l'aire de passage équivalente en millimètres carrés entre une version du produit analysé et une autre. Ce sont seulement quelques exemples d'analyses possibles avec les données fournies par l'application, analyses qui pourront être ensuite intégrées dans le dossier de vérification des produits. La capitalisation du savoir-faire des concepteurs, pour analyser leurs produits, permet d'accélérer leur travail, en mettant à leur disposition des outils permettant de faire leurs activités fastidieuses et routinières plus rapidement. Une vérification de tubulure peut signifier un, voire deux ou trois, calculs d'écoulement en moins. Ces calculs étant lourds et lents, ils sont mieux appliqués quand la géométrie des produits est la plus proche de l'idéal possible.

2.5. Applications KBE pour la soudure plastique

Le procédé de soudage par vibration linéaire a pour ainsi dire évolué avec le développement du secteur automobile, pour lequel la quantité d'éléments en matière plastique n'a cessé d'augmenter au fil des années, même pour des pièces de grandes tailles. C'est parce qu'il permet l'assemblage de matériaux complexes ainsi que le soudage en série de pièces de tailles importantes que le procédé de soudage par vibration fait l'objet d'une demande croissante au niveau international.

Ils existent plusieurs types de soudure pour les pièces en matériau plastique : la soudure par vibration, par lame chauffante (ou miroir), par ultrasons, par laser, etc. Le soudage par vibration est particulièrement adapté aux plastiques renforcés et aux thermoplastiques ayant une masse de remplissage importante. L'entreprise MARK IV se sert de plusieurs types de soudure pour réaliser ses produits. Nous avons décidé d'appliquer la méthodologie FaBK au procédé de soudure, et de créer des éléments KBE capables d'aider les concepteurs à mieux réaliser leur travail quotidien.

Dans un premier temps, une application a été développée comme un **outil de vérification par script** pour la soudure par vibration (section 4.2.6 à la page 132). Nous l'avons ensuite élargie pour créer une application KBE, sous KADViser selon les caractéristiques du produit développé par le concepteur, comprenant tous les types de soudure utilisés chez Mark IV. L'application permet de choisir et paramétrer correctement la géométrie pour la soudure d'un produit (mise en évidence sur la figure 85).

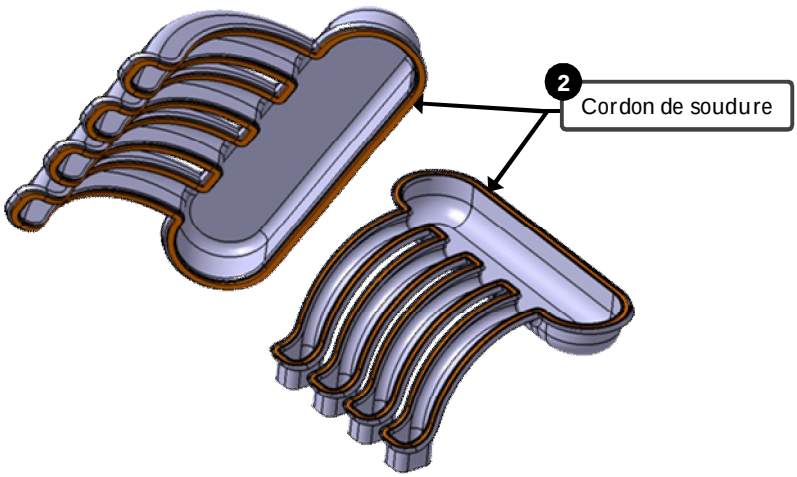


Fig. 85. Répartiteur d'air soudé par vibration.

L'application KBE que nous avons développée en appliquant notre démarche méthodologique permet d'abord de choisir le type de soudure (vibration, miroir, ultrasons) à partir de ses dimensions selon des connaissances capitalisées à partir des savoir-faire experts, et par l'analyse de la documentation et des connaissances explicites retenues par l'entreprise. Le choix de machines se fait en fonction de la taille du produit. Nous avons travaillé avec le moteur d'inférence de KADViser, en ajoutant des règles de type :

si "element_Definir_la_soudure_Machine" = 'S11' alors
"element_Caracteristiques_pieces_Longueur" <= 480.0 et
"element_Caracteristiques_pieces_Profondeur" <= 720.0 et
"element_Caracteristiques_pieces_Hauteur" <= 700.0 ;

Où S11 est la variable du type machine de soudure, définie pour l'interface de l'application KBE. Une fois le raisonnement effectué, KADViser définit de manière automatique les différentes solutions. Ainsi, lorsqu'une valeur de longueur de pièce est supérieure à 480 mm, la machine S11 n'apparaît plus dans la liste de sélection des machines. Une fois les règles programmées dans l'outil KADViser, le lien avec la géométrie se fait par le biais d'un fichier d'échange, servant simultanément de table de paramétrage dans un modèle CAO paramétrique sous CATIA V5.

La création de l'application KBE pour la soudure suit les mêmes étapes que celle pour les conduits d'air : d'abord une phase de **capitalisation des connaissances** auprès des experts de l'entreprise [Grundstein, 2007], suivie de la **construction d'un bréviaire** de connaissances pour les formaliser [Serrafero *et al.*, 2006]. L'étape suivante consiste à **développer des modèles KBE** sous CATIA V5, et de les **lier à des applications métier (AMI) KADViser** pouvant piloter leurs paramètres, simplifiant la tâche des concepteurs. Ce modèle comporte aussi une fonction de vérification et de validation, qui sera présentée dans le chapitre suivant, afin d'assurer au concepteur que son travail de développement de produit est conforme aux règles métier, connues et validées au sein de l'entreprise Mark IV SM.

Dans la mesure où les étapes de ce modèle sont assez similaires à celles que nous avons déjà présentées dans les sections antérieures, nous allons plutôt décrire les différences de ce modèle KBE, conçu pour être intégré dans un produit en cours de développement. Nous décrivons d'abord l'application KADViser, ensuite nous analysons les tableaux de paramétrage extraits des fichiers d'échange pour piloter les modèles géométriques. Enfin, nous discuterons de l'utilité du modèle paramétrique dans la conception routinière des produits en matériau plastique à souder.

2.5.1. Gestion de l'application KBE

En suivant les mêmes démarches que pour les applications de conception et d'extrusion soufflage du conduit d'air, l'application KADViser de soudure que nous avons élaborée comporte plusieurs fenêtres de sélection où le concepteur peut renseigner les caractéristiques du produit qu'il souhaite (Fig. 86).

Fig. 86. Page initiale de l'application KADViser.

Le premier choix discriminant pour le type de soudure est sur la fenêtre de « Caractéristiques pièces » (Fig. 87). Ici le concepteur peut rentrer les dimensions de son produit ainsi que le matériau envisagé et le plan de coupe de la pièce. Le plan de coupe est l'interface entre les différentes portions du produit qui seront soudées, établies selon la démoulabilité de chaque portion. Des préconisations sur la facilité de soudage selon chaque procédé sont présentées au concepteur pour l'aider dans ses décisions.

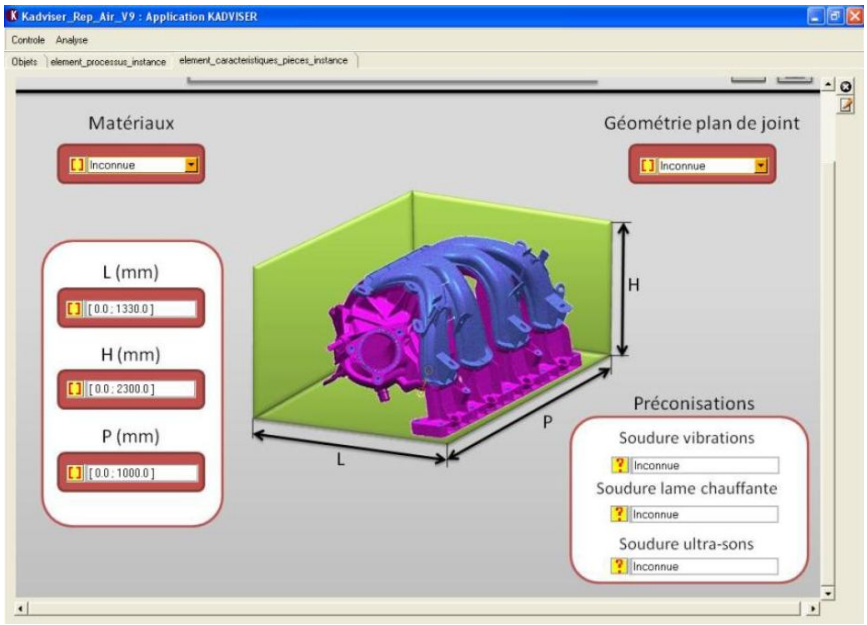


Fig. 87. Caractéristiques du produit.

Ensuite, le concepteur doit faire un choix de procédé de soudure à utiliser. L'application est faite d'une manière ouverte, le choix n'est pas figé et le concepteur peut choisir un procédé qui ne serait pas le plus recommandé pour le matériau en question, mais d'autres raisons de décision existent qui doivent être respectées. Les machines capables

de faire chaque type de soudure sont aussi présentes (déterminées par la taille du produit en question), pour limiter ainsi le nombre de choix à prendre par le concepteur.

Le type de soudure ayant été sélectionné, les différents paramètres existants pour le type choisi sont présentés au concepteur, pour l'aider à faire son choix final. Ces valeurs sont issues de l'expérience de l'entreprise, capitalisées à l'aide de plans et d'entretiens avec les experts. Ainsi, le concepteur peut présélectionner les différentes valeurs pour son cordon de soudure, tout en restant capable de les entrer lui-même, si le produit à développer a des besoins spécifiques (Fig. 88).

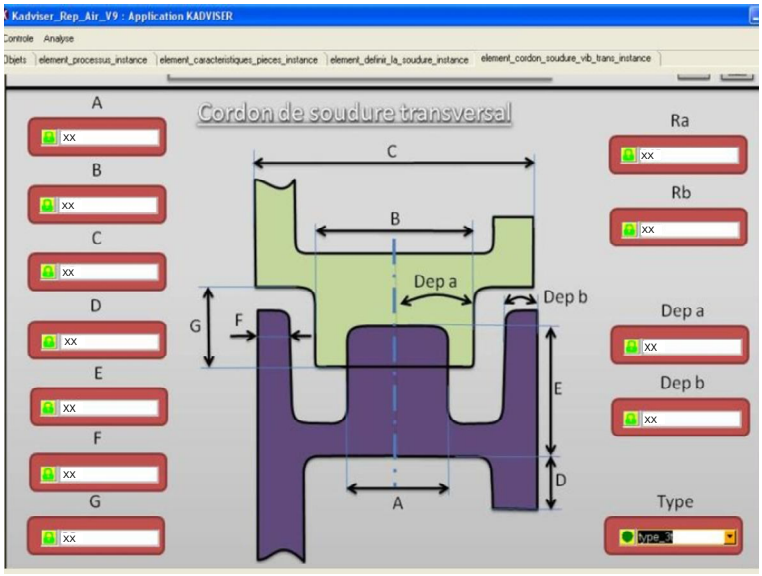


Fig. 88. Cordon de soudure transversal.

Les valeurs sont ensuite exportées via un fichier d'échange de type table de paramètres sous un tableur pour leur couplage final avec le modeleur CAO CATIA V5 (Fig. 89).

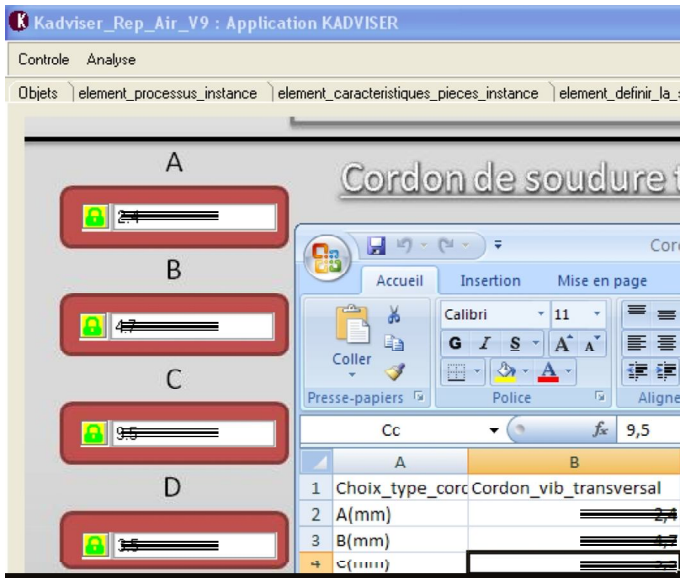


Fig. 89. Valeurs exportées via un fichier d'échange (mis en forme dans un tableur).

Celles-ci sont formatées pour que le modeleur géométrique puisse les récupérer automatiquement sous forme de des tables de paramétrage, et au cas où le concepteur

ait besoin de modifier son modèle manuellement, les informations puissent être remontées et analysées en détail. Ce dernier aspect sert à pérenniser les connaissances et rend leur mise à jour possible, conformément à ce qui a été proposé dans notre méthodologie globale.

2.5.2. Définition de la solution à l'aide des applications KBE de cordon de soudure

Les paramètres du produit à développer étant renseignés, et le choix sur le type de soudure étant fait, il est maintenant question de développer un modèle géométrique paramétrique qui puisse exploiter ces informations. Ce modèle est conçu de manière à pouvoir paramétrer au mieux le couple produit-process ciblé selon les besoins du projet [Chapman et Pinfold, 2001]. Il doit respecter non seulement les règles de fabrication pour le processus de soudure, mais également les règles de conception établies par l'entreprise [Kulon *et al.*, 2006].

Il a été question d'étudier la conception des modèles de cordons de soudure existants au sein de l'entreprise, afin de comprendre la méthodologie qui a été mise en œuvre pour les concevoir ainsi que les connaissances associées, et de créer un nouveau modèle générique et adaptatif comprenant tous les types de cordons de soudure. Plus précisément, nous avons mis en évidence qu'il existait 4 types différents de cordon de soudure pour le soudage par lames chauffantes, 2 cordons pour le soudage par ultrasons et 2 types de cordons de soudure pour le soudage par vibrations.

Un modèle CATIA V5 a donc été créé afin d'accueillir des paramètres venant de KADviser. Ce modèle comprend les différentes parties d'un cordon de soudure. Il est conçu pour suivre un profil et une surface, choisis sur la pièce à souder, c'est-à-dire qu'il est de forme adaptable à chaque projet (Fig. 90). La figure 90 illustre également les caractéristiques géométriques de chaque partie du cordon de soudure développé.

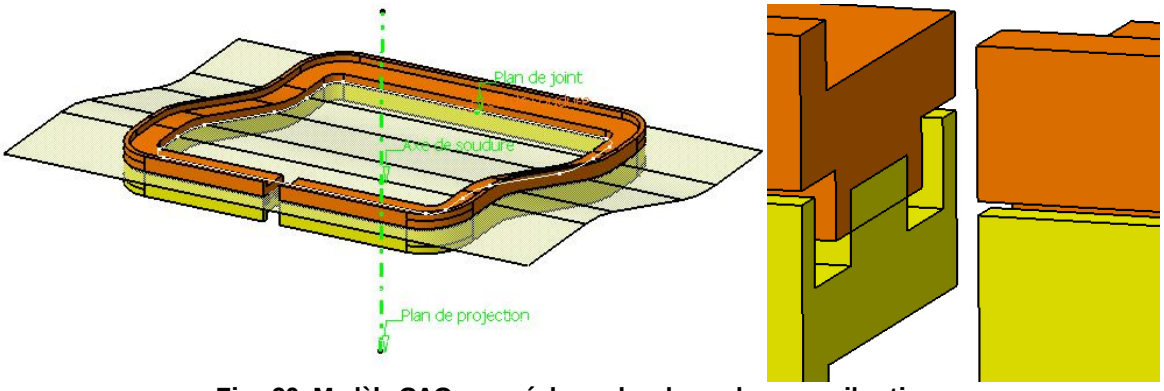


Fig. 90. Modèle CAO avancé du cordon de soudure par vibration.

La modélisation de ce cordon n'est pas faite par simples extrusions rectangulaires suivant un profil donné comme par exemple une extrusion suivant un profil. Elle est développée pour correspondre aux méthodes de conception établies par l'entreprise. Ce choix rend la géométrie du modèle plus complexe, mais **respecte la façon de travailler des concepteurs**, et permet l'acceptation des outils de travail auprès de ces derniers [Yechiam, 2006].

Le principe de conception retenu est de créer, en premier lieu, un plan de joint suivant une surface donnée (le plan de coupe du produit), et de dessiner un profil (correspondant au profil de la pièce à souder). À partir de là, pour concevoir nos différents types de cordons de soudure suivant le processus de soudage souhaité, nous utilisons des extrusions en impactant les paramètres de chaque partie de la soudure au profil.

Chaque décalage entre les profils correspondra donc à une distance paramétrable et soumise à des formules. Ces formules proviennent des connaissances sur le procédé de fabrication capitalisées, et sont établies sous forme de :

« *Largeur_B* » = K * « *Largeur_C* » ou encore « *Hauteur_Plateau* » = « *Epaisseur_pièce* » - Lmm.

Où K et L sont des constantes spécifiés par les connaissances métier des experts. De cette manière, nous avons donc les cotes en largeur des cordons de soudures. Pour créer les cotes en hauteur, nous suivons les connaissances capitalisées des principes de conception, pour créer des surfaces parallèles et décalées par rapport au plan de joint (Fig. 91). Là également, chaque décalage représente ainsi les différentes cotes recherchées, paramétrées et reliées à des formules.

Ensuite, des opérations géométriques simples relient les profils des cordons avec les surfaces décalées pour construire chaque élément de la soudure. Des opérations booléennes intègrent le tout ensemble.

Tous les types de cordon de soudure sont modélisés ainsi. Des paramètres communs ont été établis pour chaque type de cordon. En effet, tous les cordons de soudure réalisés sont présents dans le même modèle CAO avancé. De cette manière, nous avons créé un jeu de 5 à 6 paramètres généraux (ex : A, B, C...), représentant une cote particulière pour chaque cordon de soudure (Fig. 91). Ces paramètres restent liées aux connaissances capitalisées par la méthodologie FaBK, et si besoin peuvent être mis à jour rapidement par l'expert KBE.

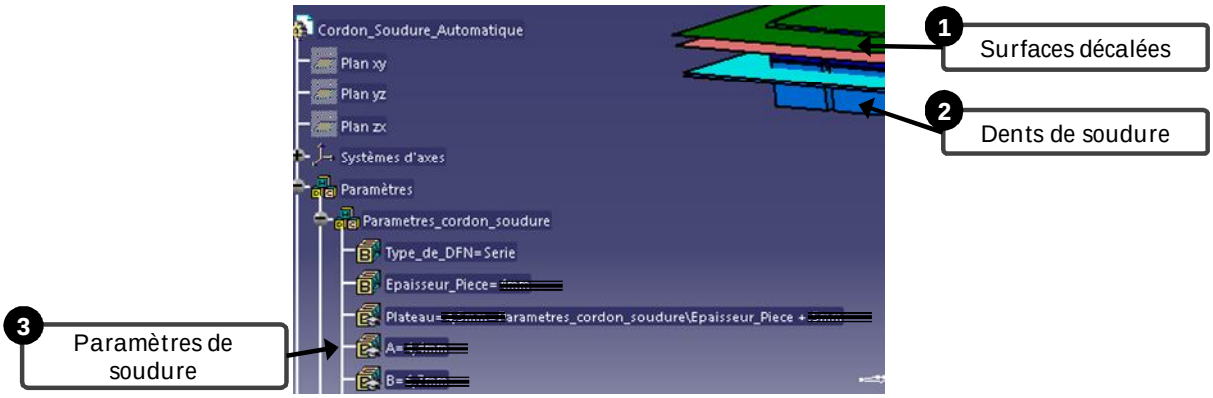


Fig. 91. Paramètres des cordons de soudure.

Afin de faciliter le travail des concepteurs, nous avons également créé un paramètre de type « Chaîne » à plusieurs valeurs, permettant la sélection du type de cordon parmi l'ensemble des choix possibles (Fig. 92). Ceci permet au concepteur de changer le type de soudure qu'il utilise, sans être obligé de recommencer la génération de son concept.

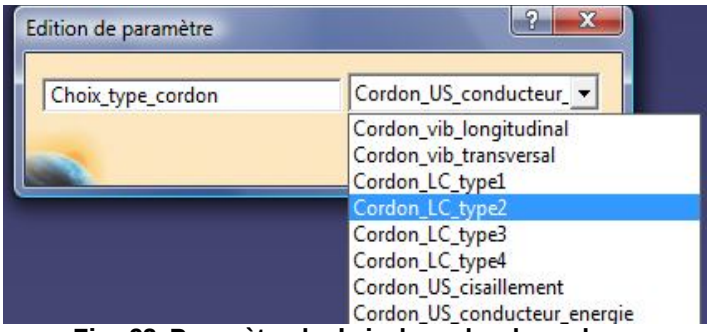


Fig. 92. Paramètre de choix de cordon de soudure.

Pour la suite, il ne reste plus qu'à établir des règles d'activation ou de désactivation de nos géométries, en fonction du choix de type de soudure, afin que ne soit modélisée à l'écran uniquement la géométrie souhaitée. Quelques dizaines de lignes de script ont été établies afin d'avoir les règles adéquates (Fig. 93).

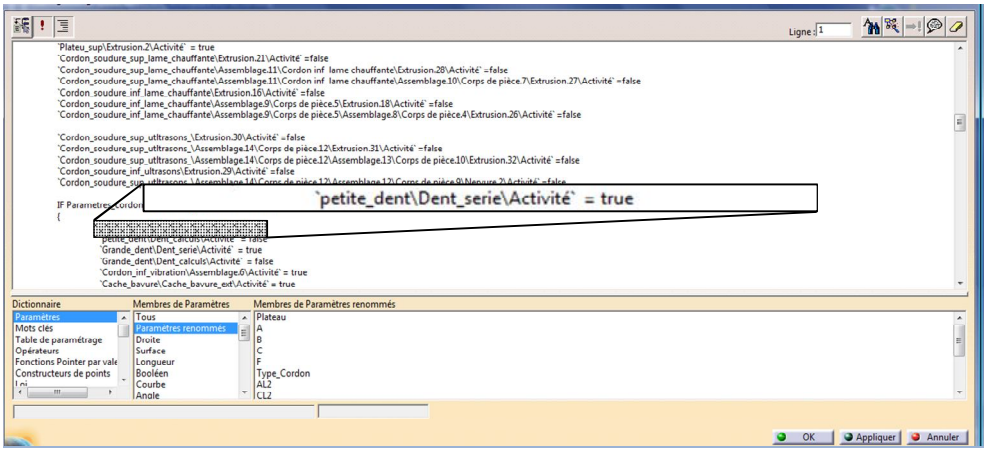


Fig. 93. Règles pour le choix du type de cordon de soudure.

Cette activité nous donne un **modèle CAO avancé complètement modélisé et paramétré**, afin d'être piloté par les données issues de l'application KADViser. Dès lors, en complétant les tâches nécessaires sur l'outil KADViser, un fichier d'échange paramétrant le type de soudure est créé, ce qui implique que le concepteur obtient la soudure la plus appropriée pour modéliser son produit (Figs. 94 et 95).

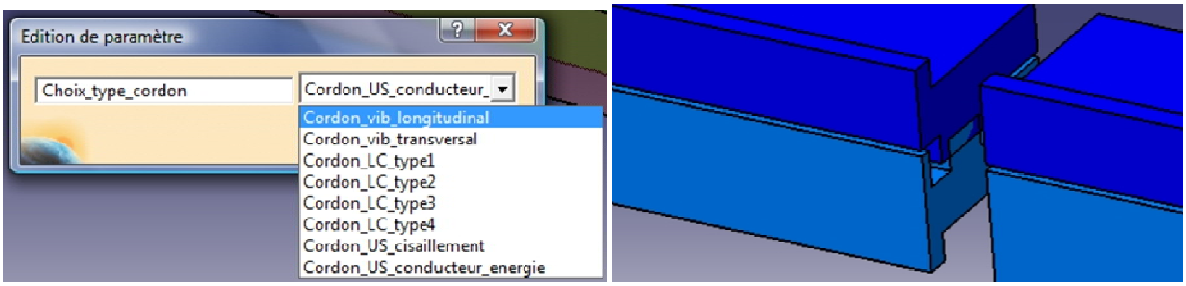


Fig. 94. Cordon de soudure de type vibration longitudinale choisi par le concepteur.

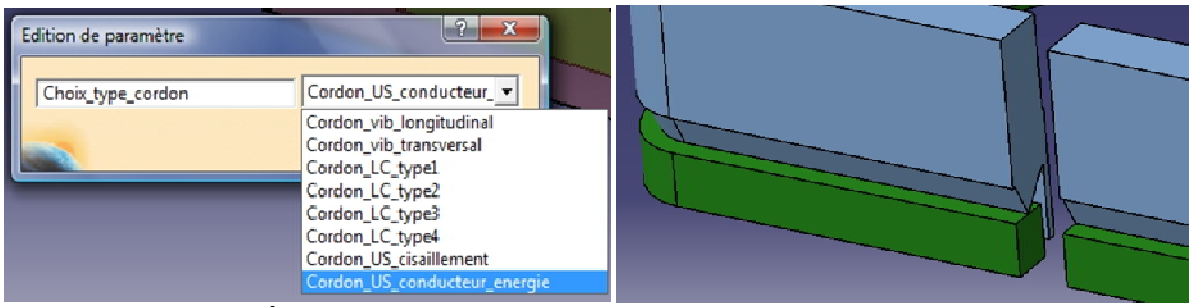


Fig. 95. Même profil que sur la figure 95, avec un type de soudure par ultrasons.

Il ne reste au concepteur plus qu'à préparer son produit, insérer le modèle déjà paramétré, et le modifier à son gré pour l'adapter aux exigences de son projet de développement.

2.6. Script de vérification de cordon de soudure

La troisième et dernière vérification par script que nous présenterons comporte un plus grand nombre de règles métier, la soudure étant une des activités proches du cœur du métier de l'entreprise. Ce script de vérification, couplé avec l'application KBE pour le développement à base de connaissances métier de cordons de soudure, permet aux concepteurs de créer la structure de soudure d'un nouveau produit, la modifier pour l'adapter parfaitement au produit, et vérifier sa concordance avec toutes les règles métier connues au sein de l'entreprise Mark IV. Le script est codé en transformant tous les savoir-faire métier concernant la soudure en règles de vérification et de mesure, suivant les connaissances capitalisées du procédé de fabrication.

Les différentes cotes des dents de soudure ont été répertoriées en plages, selon l'encombrement et le volume disponible sur les produits en développement. Des règles du type *Si Xmm < C < Ymm alors A = Zmm,* sont la base de la construction des cordons de soudure, ainsi que de leur vérification.

La fenêtre principale de l'application par script (Fig. 97) permet l'accès à des guides d'utilisation, en plus de permettre aux concepteurs de vérifier leur produit. Le script permet non seulement d'analyser la géométrie des dents et intersections de soudure, mais aussi de faire une analyse visuelle rapide de la tolérance de la pièce par rapport au sens de vibration. À la fin de son cycle, le script présente un tableau dans un plan avec toutes les informations vérifiées, ainsi que des éléments visuels sur chaque endroit où le cordon de soudure est analysé.

Fig. 96. Vérification de cordon de soudure

Lors du lancement de l'application, le concepteur peut choisir le mode de vérification et renseigner les données supplémentaires nécessaires pour la faire (Fig. 98). Il se doit de renseigner l'orientation de son produit, le type d'analyse et le type de données initiales qu'il possède.

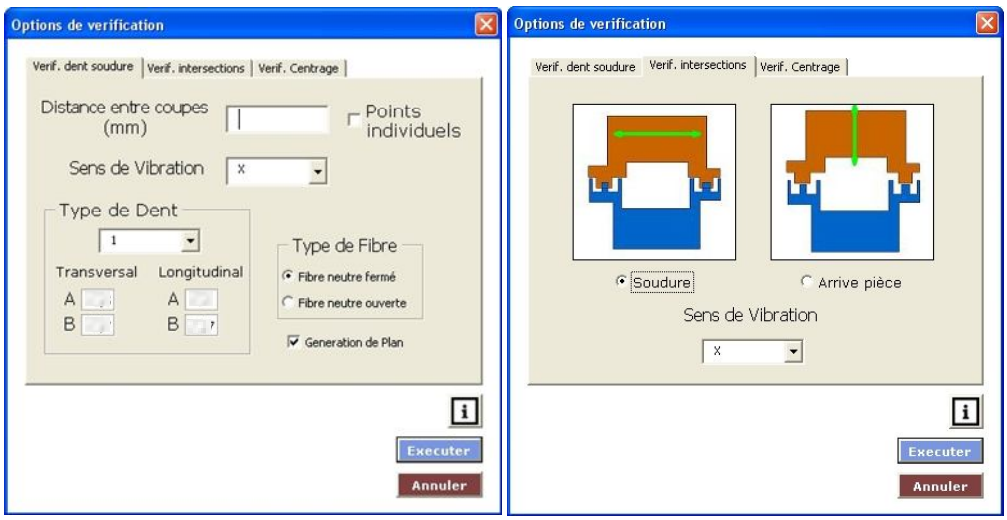


Fig. 97. Options d'analyse pour le cordon de soudure.

Selon le type de vérification choisi par le concepteur, soit l'application discrétise le profil de soudure du produit (sélectionné par le concepteur) et contrôle les cotes données par les règles métier à chaque point (Fig. 99), soit elle fait des analyses globales, comme l'analyse d'intersections gênantes pour le procédé de soudure. Pour la première analyse, le script crée des géométries lui permettant de mesurer correctement les différents éléments impliqués dans la soudure. Ces géométries sont des découpes des produits analysés de façon à isoler les détails nécessitant d'une analyse.

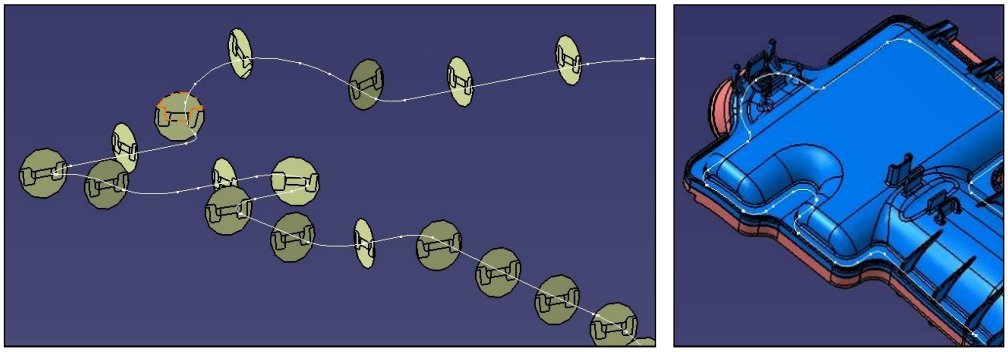


Fig. 98. Vérification des cordons de soudure.

D'autres analyses de vérification, telle que la vérification des intersections, font des simulations du procédé de soudure pour identifier des conflits dans la géométrie du produit. Ces conflits sont ensuite mis en évidence et répertoriés pour l'analyse finale par le concepteur (Fig. 100). Sur la figure nous pouvons constater une interférence entre les pièces analysées, ce qui pourrait susciter des problèmes lors du processus de soudage. Étant donné que le procédé de soudure est dynamique lors de son déroulement, la moindre intersection pourrait empêcher ou même déformer significativement le produit.

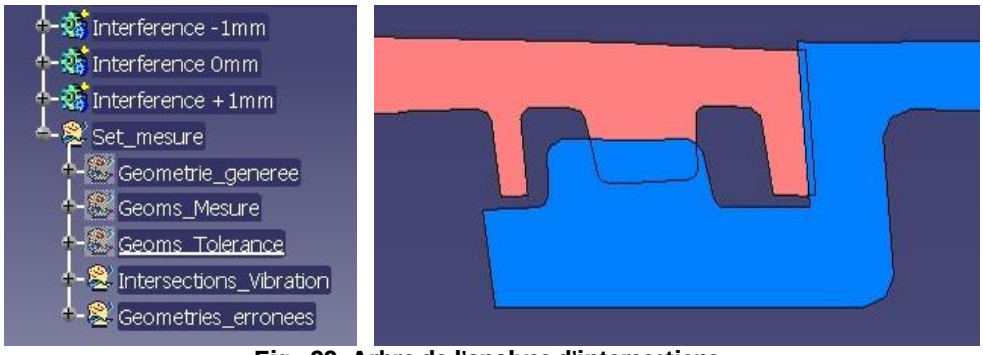


Fig. 99. Arbre de l'analyse d'intersections.

Suite à ces analyses de vérification, le concepteur obtient des indicateurs visuels (Figs. 99 et 100) des analyses, ainsi qu'un plan avec un tableau qui regroupe toutes les informations de la vérification. Les informations présentes sur le tableau sont créées et organisées de façon à ce que le concepteur puisse en tirer un maximum de conclusions sur son projet. Ce plan permet au concepteur d'analyser les résultats de son analyse et de corriger son produit si besoin. Il pourra valider son produit si aucune des données ne sort des plages permises par les règles métier, et si la vérification ne soulève pas des remarques.

Les vérifications sont aussi essentielles car elles permettent de faire évoluer les règles métier, lors de l'introduction d'une nouvelle technologie process, ou d'une situation qui pourrait changer les connaissances du process ou des produits existants. Par exemple, un produit avec une configuration géométrique particulière pourrait ne pas soulever des remarques de la part de la vérification, mais le faire au moment d'être entre les mains de l'expert métier. Ceci, après approbation de la part des experts métier, peut engendrer une modification des règles de vérification, pour des cas similaires ou pour tous les produits futurs en développement, ainsi qu'une possible modification des éléments intégrés dans l'application KBE (cf. *Chapitre 3, Section 5* à la page 95).

3. Optimisation des modèles génériques

La section précédente nous a permis de présenter la création des modèles CAO avancés, car comprenant les paramètres et règles métier d'une entreprise. Cependant, les applications KBE ne peuvent pas donner une solution routinière adaptée à toute situation, il reste à la charge du concepteur l'ajustement et la modification de son concept pour trouver la meilleure configuration des paramètres [Tiwari, 2001]. Si les problèmes d'adaptation peuvent être décrits par des formules mathématiques, les algorithmes d'optimisation représentent une manière viable pour déterminer le meilleur compromis entre les paramètres géométriques, fonctionnels et ceux liés à la fabrication [Roy *et al.*, 2008]. Se servir des optimisations pour améliorer un produit nécessite, néanmoins, une profonde maîtrise des connaissances liées, et des démarches d'adaptation du problème pour un traitement effectif [Shu-Hsien, 2005].

Dans la partie suivante, nous présentons la construction d'une démarche d'optimisation pour améliorer le choix de configurations paramétriques d'un des éléments des conduits d'air : les soufflets. D'abord, nous abordons les travaux d'adaptation et de valorisation des connaissances, pour ensuite présenter les algorithmes d'optimisation utilisés pour traiter ce sujet.

3.1. Optimisation des composants d'un conduit : le cas des soufflets

Comme nous l'avons décrit brièvement dans la section précédente, les soufflets sont un élément des conduits d'air qui garantissent une de ses fonctions principales, à savoir solidariser le lien entre le refroidisseur et le moteur d'un véhicule tout en permettant de s'adapter aux mouvements relatifs du moteur par rapport au châssis lors des phases d'accélération/décélération, en conduite normale. Les soufflets sont généralement placés sur les conduits de ce type pour éviter l'utilisation de matériaux élastomères, plus coûteux en fabrication et en mise en place.

Les soufflets représentent un choix technique pour favoriser la création de conduits mono-pièce, mono-matière et mono-procédé de fabrication (plutôt que de les réaliser en plusieurs morceaux), ce qui facilite plusieurs activités en aval, telles que la fabrication ou le montage du produit final. Leur fonction principale est de garantir le débattement entre la position en accélération (***F**ull **B**ack **P**osition* – **FBP**), et la position en freinage (***F**ull **F**ront **P**osition* – **FFP**) du moteur. L'inclusion des soufflets dans un conduit lui permet de se déformer élastiquement, pour rattraper les débattements du moteur sans risque de détérioration du conduit et de fatigue. La figure 101 montre un conduit avec deux zones de soufflets.

Fig. 100. Soufflets sur un conduit d'air RAS / BP

Le placement et la configuration des soufflets sont des points critiques pour garantir leur fonctionnalité. La configuration correcte des paramètres géométriques, ainsi que le nombre de spires dans un soufflet ont une influence directe sur la facilité de mise en œuvre du procédé de fabrication, ainsi que sur la fonction de « flexibilité » du conduit. Nous avons couplé l'application KBE des conduits présenté précédemment avec un algorithme d'optimisation pour répondre à cette problématique et ainsi fournir une véritable aide à la décision pour le concepteur.

3.1.1. Expérimentation et détermination des paramètres influents

Nous pouvons observer un diagramme SADT du déroulement de la construction de la démarche d'optimisation sur la figure 102. Le bréviaire des connaissances créé dans l'activité de capitalisation des connaissances a servi comme cadre, pour établir quels paramètres auraient une influence sur la fonction de flexibilité des conduits.

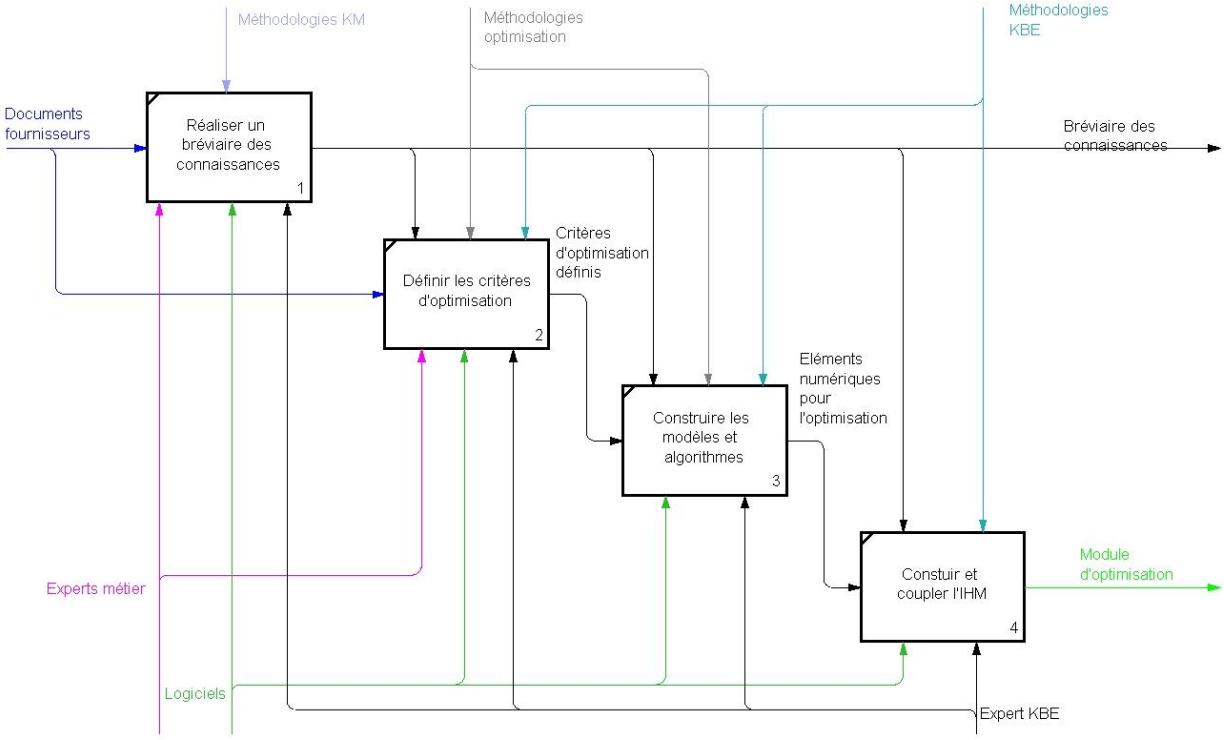


Fig. 101. Diagramme SADT pour une démarche d'optimisation sous FaBK.

Le bréviaire des connaissances a permis de trouver les différents paramètres qui ont une influence sur les fonctionnalités des conduits d'air. Ces paramètres sont les mêmes que ceux que nous retrouvons dans les applications KBE, ainsi que dans les IHM KADViser, et maintenant sur les démarches d'optimisation que nous proposons. Ils sont issus des différentes expériences menées au fil des projets par l'entreprise (Fig. 103). Il s'agit par exemple des paramètres suivants :

- hauteur de spire ;
- rayon de tête ;
- rayon de pied ;
- angle de flanc ;
- longueur de pas.

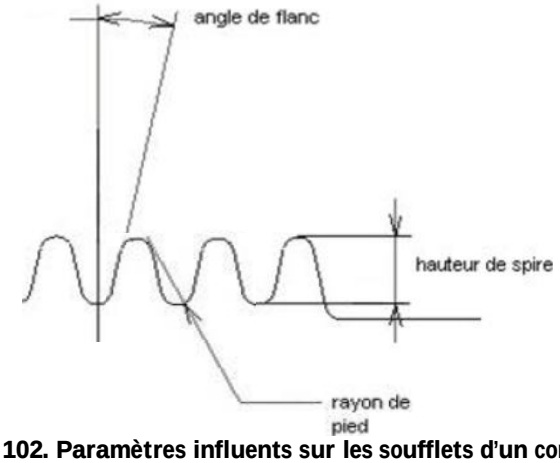


Fig. 102. Paramètres influents sur les soufflets d'un conduit.

La figure 104 fait une synthèse, sous forme de diagramme UML, des paramètres influents des conduits, ainsi que des fonctions qu'ils remplissent. Cette même démarche a été réalisée pour le reste des produits et concepts traités par cette recherche.

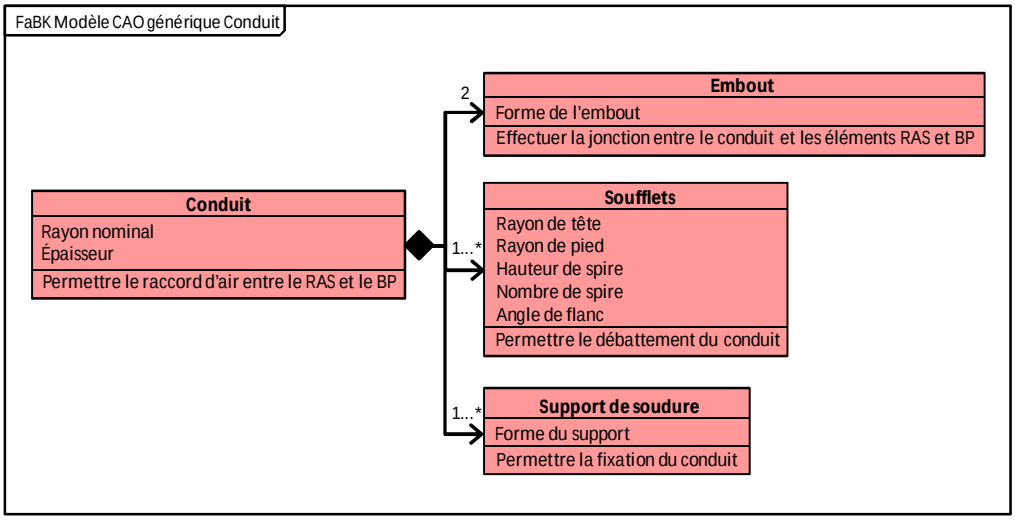


Fig. 103. Diagramme UML des paramètres d'un conduit d'air.

Une fois les paramètres déterminés, nous avons réalisé divers tests expérimentaux pour déterminer l'influence des paramètres géométriques sur la fonction de flexibilité des soufflets. Nous avons aussi utilisé ces tests pour trouver une règle mathématique

décrivant ce phénomène, et pour valider nos modèles numériques, afin de pouvoir établir notre approche d'optimisation. Ces tests ont servi à déterminer l'angle de courbure et la flèche, obtenus en fonction du nombre de spires du soufflet et de la force appliquée. La figure 105 décrit le mode opératoire de ces tests. Il faut remarquer que les tests se sont déroulés sur des portions de conduit, afin d'isoler l'élément soufflet et ne pas polluer les résultats avec d'autres influences, comme la longueur totale du conduit ou sa forme.

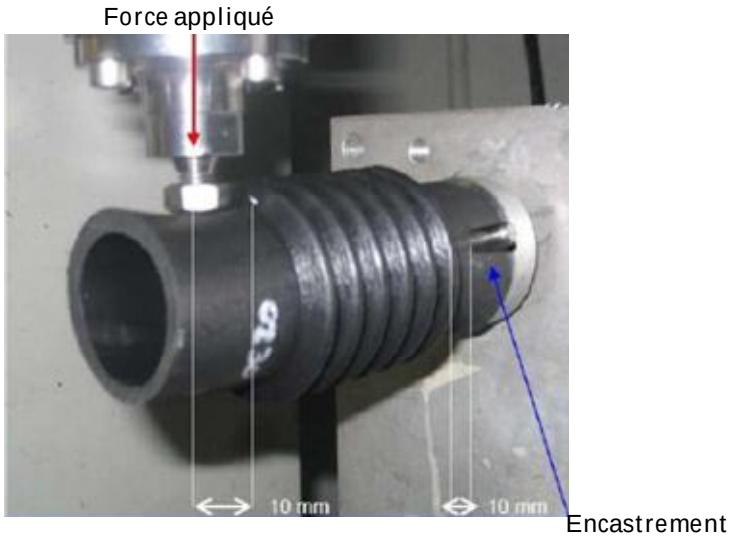


Fig. 104. Photo du test expérimental sur soufflet.

Pour faire ces tests nous avons choisi un certain nombre de conduits, avec des caractéristiques représentatives au niveau des matières utilisées, ainsi que des configurations géométriques pour trouver nos lois mathématiques et les optimiser.

Les résultats des tests ont permis d'obtenir une loi de comportement pour les soufflets sous l'application d'une force (Fig. 106 ci-après).

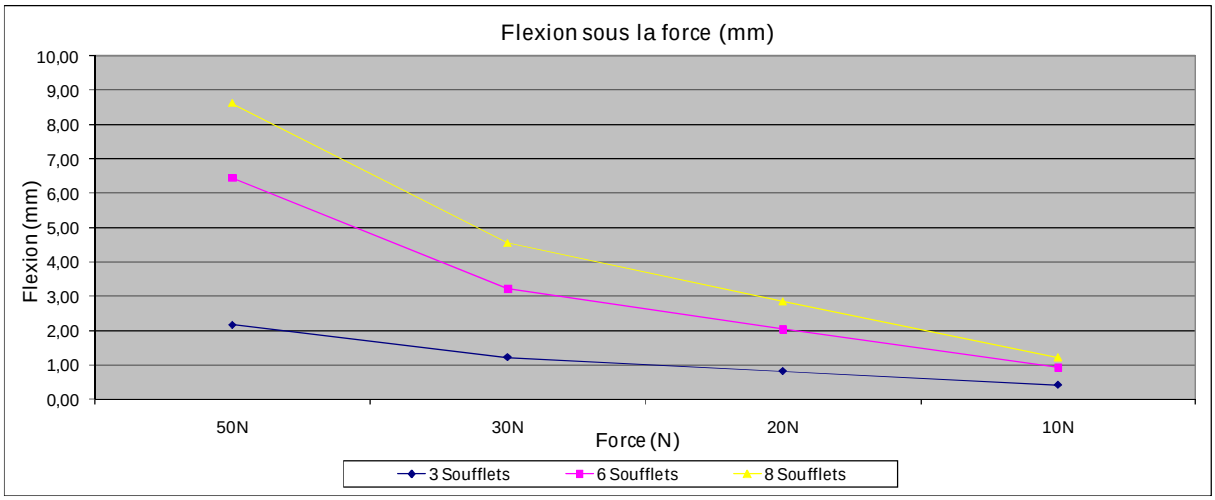


Fig. 105. Résultats de la flexion sous l'application d'une force.

Nous avons observé une bonne reproductibilité de la mesure, malgré une légère différence entre deux conduits testés. Ceci est très probablement dû à la répartition de la matière, un paramètre process très difficilement maîtrisable.

3.1.2. Tests numériques de validation

Une fois les tests expérimentaux réalisés, nous avons reproduit les résultats avec des simulations numériques. L'objectif de cette deuxième expérience est de confirmer les résultats obtenus, et de pouvoir valider les relations entre les paramètres et les règles d'optimisation. Un des fournisseurs de matière, préconise la **relation directe et linéaire entre la force appliquée sur un soufflet et sa déformation** (Fig. 107), et nous voulions ajouter à ceci l'effet de la variation du nombre de spires d'un soufflet.

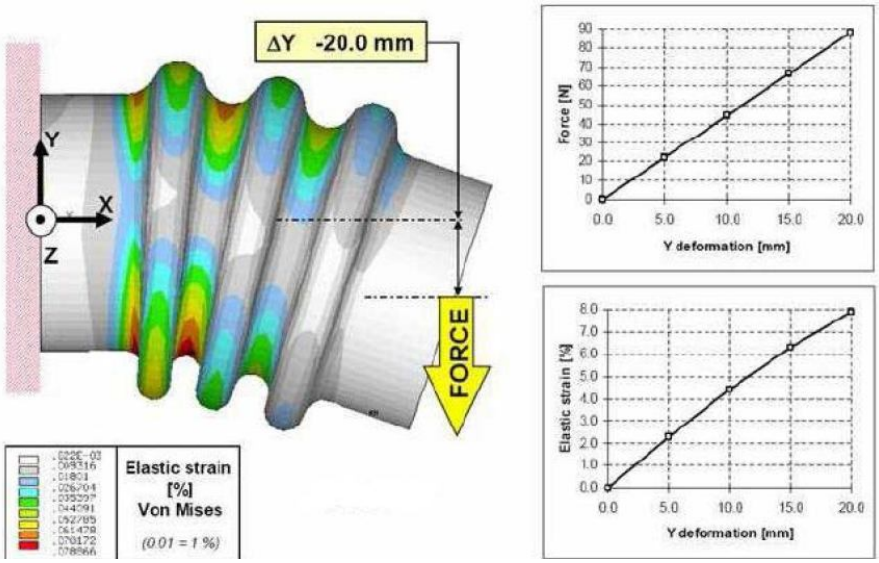


Fig. 106. Loi linéaire de relation entre la déformation et la force appliquée, obtenu avec le logiciel ANSYS.

Pour réaliser cette expérimentation numérique afin d'effectuer un éventuel recalage de modèle au regard des résultats réels obtenus sur banc d'essai nous avons, dans un premier temps, modélisé un soufflet paramétré dans CATIA V5, en fonction des paramètres influents trouvés. Nous avons groupé et baptisé ces paramètres comme des « sets des paramètres soufflet ». Ensuite nous avons créé une table de paramétrage pour reprendre le même plan d'expérience réalisé sur notre banc d'essai. Ensuite, le modèle paramétré a été utilisé dans le module « Analyse et Simulation », plus précisément dans l'atelier « *Generative Structural Analysis* » de CATIA V5, permettant le calcul de la flèche du soufflet selon une force appliquée (Fig. 108).

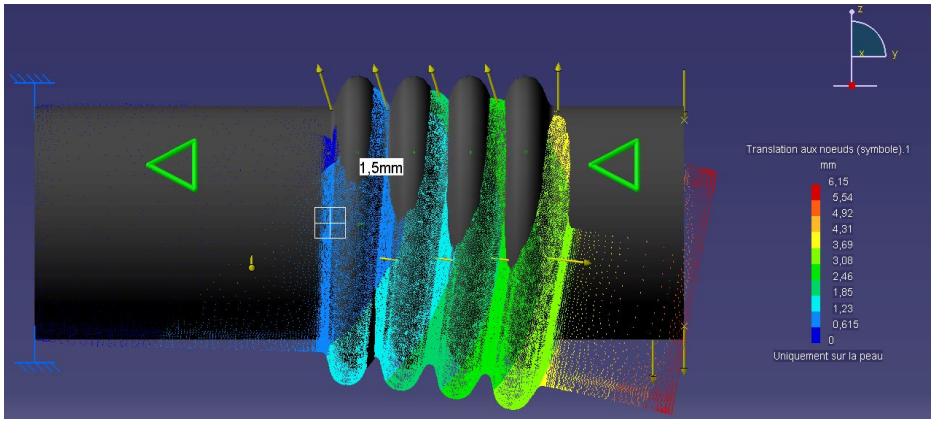


Fig. 107. Modèle numérique des soufflets en flexion : le déplacement élastique en flexion de la pièce soumise à un effort, est mis en évidence.

Pour respecter au mieux les conditions expérimentales, nous avons procédé, dans CATIA V5, à une analyse linéaire respectant un maillage global du soufflet à 3mm (taille de chaque élément). Pour avoir des résultats précis, nous avons créé un maillage local, se voulant plus petit, appliqué à la région des spires, de longueur 1mm. Nous avons créé un corps rigide, correspondant à la surface cylindrique extérieure sur laquelle vient s'appliquer la force verticale de valeur variable. Ce corps rigide a pour but de ne pas déformer l'extrémité cylindrique du tube (Fig. 109).

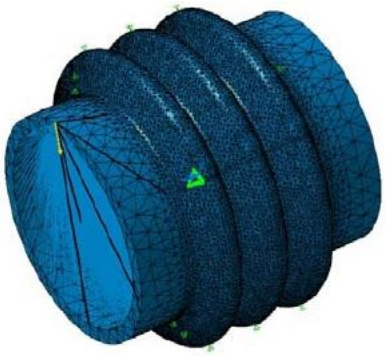


Fig. 108. Soufflet maillé pour les tests théoriques.

Les conditions aux limites, pour ce test numérique, sont les suivantes : encastrement d'un côté (aucun mouvement permis). Il a une distance de 10 mm entre « l'encastrement et la première spire » et entre « la dernière spire et l'extrémité du soufflet ». Il subit une force verticale (de différentes valeurs) à son extrémité. Nous avons, pour finir, appliqué une force verticale à l'extrémité du conduit en faisant varier sa valeur : 10N, 20N, et 30N. Les contraintes (de Von Mises) associées à chaque test, et les déplacements obtenus par rapport à la position initiale du soufflet ont été mesurés pour chaque cas, avec un indice d'erreur en pourcentage.

Les résultats du plan d'expérience numérique que nous avons obtenus concordent avec les résultats expérimentaux avec des taux d'erreur inférieurs à 10%. Cette concordance valide à priori les règles que nous utiliserons pour l'optimisation en liant les paramètres par des formules mathématiques.

3.2. Algorithmes d'optimisation des soufflets

Nous avons formulé notre problème d'optimisation dans le but de trouver la meilleure configuration de paramètres pour les soufflets, afin de minimiser le coût de développement, et de respecter le débattement imposé par l'OEM [Toussaint, Lebaal, Schlegel*, et al.*, 2010]. Pour mieux décrire le débattement (la fonction objectif), nous avons développé un algorithme sous l'outil de modélisation mathématique **MATLAB**, lequel permet de simuler le débattement utilisant un lien sphérique à chaque position des soufflets.

3.2.1. Contraintes et paramètres

À partir de la création de la fibre neutre, définie dans les applications KBE, nous prenons les emplacements établis pour les soufflets, et nous imposons un lien sphérique à chaque soufflet. Ces liens sphériques comportent 6 variables d'optimisation, correspondant aux angles fonctionnels (2 angles par soufflet), ainsi que leurs positions

sur la fibre neutre (Fig. 110). Les variables d'optimisation sont contraintes par des bornes supérieures et inférieures des variables de conception, correspondant aux données expérimentales obtenues précédemment. $x^u = -20°$ et $x^v = 20°$ sont, respectivement, la valeur minimale et maximale des angles de débattement. Ces valeurs limites sont issues des expérimentations, et représentent les angles (minimum et maximum) selon lesquels les soufflets peuvent se déformer. À partir de la discrétisation des types de soufflet selon leurs angles (issue des expérimentations), nous pouvons déterminer le meilleur soufflet à prendre à partir de l'angle requis. Nous avons établi une autre application, avec l'algorithme d'optimisation par la méthode SIMPLEX, pour déterminer aussi les positions optimales des soufflets.

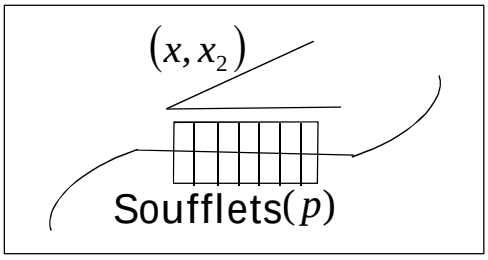


Fig. 109. Angles des soufflets, x et x2.

Le choix d'algorithme d'optimisation est lié au type de fonction objectif. Dans notre application, nous essayons de minimiser une fonction non-linéaire avec des valeurs réelles, et des contraintes de borne. Ensuite, des variations géométriques fortes pourraient provoquer une forte non-linéarité de la fonction objectif, mais comme nous n'avons pas une instabilité numérique significative [Lebaal *et al.*, 2009], notre fonction objectif est différentiable. Nous avons utilisé plusieurs algorithmes d'optimisation pour les comparer, du point de vue du temps CPU, de la solution optimale, et du nombre de fonctions d'évaluation.

Pour le problème d'optimisation que nous avons établi, notre objectif est d'égaliser numériquement le débattement imposé par l'OEM par des calculs, et ensuite de déterminer les paramètres géométriques qui peuvent garantir ce débattement. Nous avons formulé un problème d'optimisation (P), afin de trouver le meilleur angle de flexion pour les soufflets, garantissant le débattement entre les positions FFP et FBP inhérents aux mouvements du moteur. Le problème d'optimisation (P) est le suivant :

$$(P)\begin{cases} Min \quad J(X) \\ Sachant\ que \\ g(X) \leq 0 \\ Avec:\ X^u \leq X \leq X^v \end{cases} \tag{4.13}$$

où $J(X)$ est la fonction objectif, $g(X)$ est une fonction contrainte que nous pouvons imposer, X représente le vecteur des variables de conception (les angles fonctionnels des soufflets). X^u et X^v sont les limites inférieures et supérieures des variables.

La normalisation des variables joue un rôle très important non seulement sur la convergence d'un algorithme d'optimisation mais aussi sur la qualité de la solution optimale. En général il s'agit d'une transformation linéaire des variables originales en un nouveau jeu de variables appelées variables transformées. Ainsi, nous utilisons des

variables centrées réduites, X_i^c. Centrées pour indiquer le changement d'origine du domaine et réduites pour signaler la modification de l'unité

$$X_i^c = \frac{X_i^r - \overline{X}_i}{P_i} \quad \text{avec} \quad \overline{X}_i = \frac{X_i^v + X_i^u}{2} \quad p_i = \frac{X_i^v - X_i^u}{2} \tag{4.14}$$

Où X_i^r est la variable courante mesurée en unités habituelles. Nous aurons donc : $X_i^c \in [-1,1]$.

3.2.2. Utilisation de l'algorithme (application numérique)

Nous avons développé une interface d'optimisation liée à notre problématique, avec plusieurs algorithmes pour résoudre les fonctions objectifs, tels que : BFGS, Simplex, SQP, etc. [Lebaal, 2007]. Les différentes applications permettent de montrer la robustesse des différents algorithmes pour trouver la solution optimale, ceci pour les différents types de fonction (différentiable ou non).

La figure 111 montre la fenêtre principale de l'interface développée sous MATLAB. Les différents algorithmes établis se trouvent à droite et, en cliquant sur l'un, l'interface prend la fibre neutre établie et discrétisée précédemment, impose les points FFP et FBP et déforme le conduit pour arriver à ces points. Ensuite, elle détermine les angles nécessaires pour arriver à ces positions, et les présente à l'utilisateur, avec des informations sur le nombre d'itérations et le nombre de solutions trouvées, dans la fenêtre de commentaires.

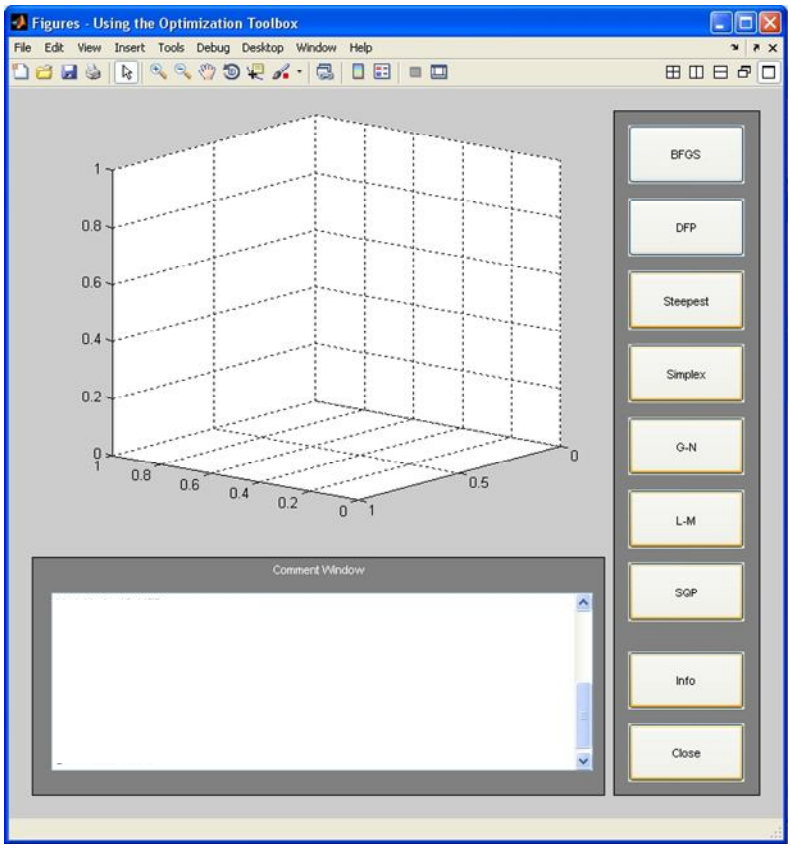


Fig. 110. Interface d'optimisation sous MATLAB.

Pour expliquer l'usage de l'interface et son fonctionnement, nous avons adopté trois démarches pour l'optimisation géométrique du conduit d'air.

Dans la première, nous nous proposons de résoudre un problème d'optimisation non linéaire sans contraintes. Pour résoudre ce problème d'optimisation, un algorithme BFGS a été utilisé. Dans la deuxième démarche, un nouveau problème d'optimisation est formulé, qui consiste à résoudre un problème d'optimisation non linéaire sous contraintes non linéaires. Pour résoudre ce problème d'optimisation un algorithme de type SQP est utilisé. Pour ces deux algorithmes à gradient quatre variables qui représentent les angles de débattement ont été choisis.

La dernière application consiste à utiliser un algorithme stochastique pour résoudre des fonctions non différentiables. Pour cette dernière application, l'algorithme Simplex a été utilisé, car nous souhaitons optimiser les paramètres géométriques des soufflets, notamment la position de chaque soufflet dans le conduit d'air. Cette dernière peut rendre la fonction objectif non différentiable car la position est obtenue par une discrétisation de la fibre neutre. Pour résoudre ce problème d'optimisation, six variables ont été choisies et trois fonctions objectif à minimiser ont été définies.

3.2.2.1. Première application, algorithme BFGS

La première démarche, consiste à déterminer la géométrie des soufflets (angle de débattement), permettant de respecter le débattement imposé par l'OEM. L'objectif est de minimiser la différence entre le débattement imposé et le débattement calculé numériquement sous MATLAB. Nous avons choisi cet algorithme en premier, car la fonction objectif est différentiable. En conséquence, un algorithme de type gradient est recommandé pour ce type de problème.

Pour respecter le débattement imposé par l'OEM, nous devons formuler une fonction de coût appropriée. Nous définissons 2 problèmes d'optimisation ($P1_{BFGS}$ et $P2_{BFGS}$), car le débattement est défini par 2 positions (FFP et FBP), et car l'OEM impose le respect des coordonnées géométriques de chacune de ces positions. La manière la plus simple de procéder est de définir les deux fonctions objectifs par la déviation standard de la position calculée numériquement, et celle imposée pour les positions en accélération et en freinage.

$$(P1_{BFGS})\begin{cases} Min \;\; J_1(X) \\ Avec: -1 \le X^c \le 1 \end{cases} \& \;\; (P2_{BFGS})\begin{cases} Min \;\; J_2(X) \\ Avec: -1 \le X^c \le 1 \end{cases} \tag{4.14}$$

Avec :

$$J_1(X) = \left| \sqrt{\left(x_{imp}^{FFP} - x_{cal}\right)^2 + \left(y_{imp}^{FFP} - y_{cal}\right)^2 + \left(z_{imp}^{FFP} - z_{cal}\right)^2} \right| \tag{4.15}$$

$$J_2(X) = \left| \sqrt{\left(x_{imp}^{FBP} - x_{cal}\right)^2 + \left(y_{imp}^{FBP} - y_{cal}\right)^2 + \left(z_{imp}^{FBP} - z_{cal}\right)^2} \right| \tag{4.16}$$

$$X^c = \begin{cases} \alpha^c{}_1 \\ \beta^c{}_1 \\ \alpha^c{}_2 \\ \beta^c{}_2 \end{cases} \tag{4.17}$$

où J_1 et J_2 représentent respectivement les deux fonctions objectif pour FFP et FBP, x, y, z sont les coordonnées imposées (imp) et calculées (cal) des positions FFP et FBP et X_i^c est une vecteur des variables centrées réduites, ces variables représentes les angles de chaque soufflet. Finalement α_i^c et β_i^c sont les angles de mouvement du conduit pour atteindre les positions imposées par le débattement.

Résultats d'optimisation

Nous pouvons observer l'historique de convergence de l'algorithme BFGS lors du processus d'optimisation, pour les fonctions objectifs (J_1 et J_2) sur la figure 112.

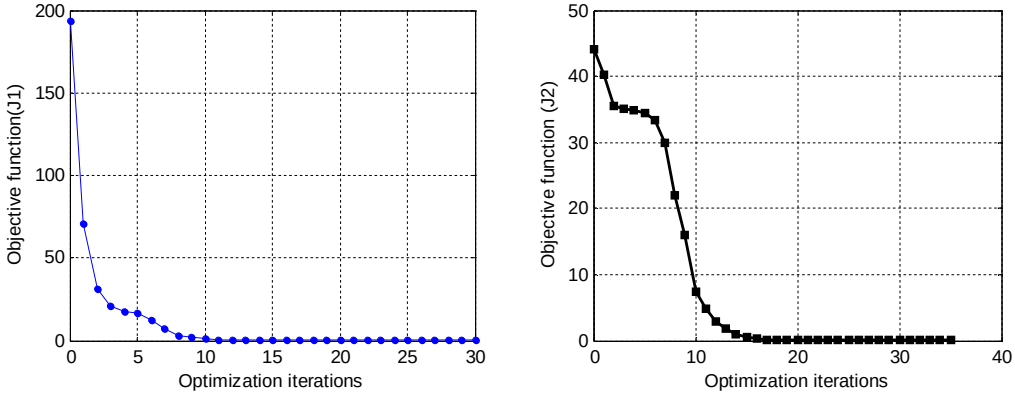


Fig. 111. Itérations BFGS.

Nous observons qu'après 10 itérations, la fonction converge rapidement vers 0. Nous pouvons observer pour la première fonction objectif que 90% de la réduction est réalisé à partir de la deuxième itération. La fonction J_2 subit une diminution progressive jusqu'à la convergence totale à partir de l'itération 15 et la simulation s'arrête. Le tableau 8 illustre les résultats que nous pouvons obtenir avec cette démarche d'optimisation.

Tab. 8. Résumé des résultats d'optimisation, BFGS.

	BFGS	
	P_1	P_2
α_1 (x1)	-12,24°	9,47°
$\alpha^c{}_1$	-0,612	0,4735
α_2 (x2)	-10,71°	8,27°
$\alpha^c{}_2$	-0,5355	0,4135
β_1 (x1)	13,28°	-8,26°
$\beta^c{}_1$	0,664	-0,413
β_2 (x2)	15,13°	-11,49°
$\beta^c{}_2$	0,7565	-0,5745
Objectif (J)	4,881e-005	6,267e-005
Moyenne des angles Y_i	0,646	0,494
Différence entre les angles max	0,0925	0,101
Itérations	30	36
Débattement max		
L_{cl}	44,06mm	

La figure 113, ci-après, montre respectivement le conduit dans ses positions FFP et FBP, avec la fibre neutre obtenue par l'optimisation.

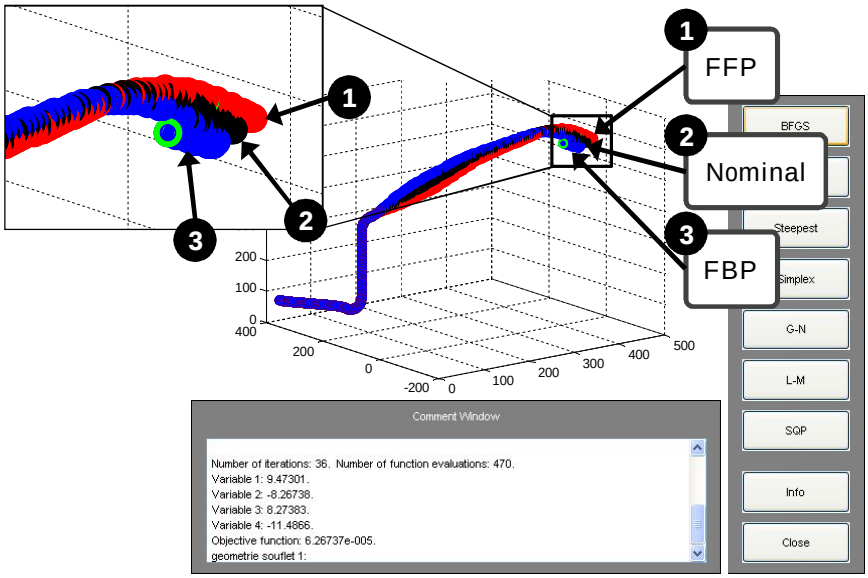


Fig. 112. Module en BFGS de l'interface MATLAB.

3.2.2.2. Deuxième application, algorithme SQP

Dans cette application nous souhaitons déterminer la géométrie des soufflets (angle de débattement), permettant de minimiser, à la fois l'écart entre la position calculée numériquement et celle imposée par l'OEM (J), et les angles de débattement (X), ce qui implique un nombre de spires plus faible tout en évitant que la différence entre les angles de chaque soufflet soit supérieure à une valeur imposée ε.Cette condition est traduite par une fonction contrainte (*g*) : nous pouvons aussi imposer une contrainte plus sévère sur la différence des deux angles de débattement en modifiant ε. Soit :

$$(P1_{SQP})\begin{cases} Min \quad f_1(X) \\ Sachant\ que \\ g_1(X) \leq 0 \\ Avec : -1 \leq X^c \leq 1 \end{cases} \qquad (P2_{SQP})\begin{cases} Min \quad f_2(X) \\ Sachant\ que \\ g_2(X) \leq 0 \\ Avec : -1 \leq X^c \leq 1 \end{cases} \tag{4.18}$$

où f et g sont respectivement la fonction objectif, et la contrainte. X_i^c est un vecteur des variables centrées réduites, Avec :

$$f_i = J_i + Y_i\ ,\ i = 1,\ 2 \tag{4.19}$$

$$Y_i = \frac{\max(X_i^{c\,1soufflet}) + \max(X_i^{c\,2\ soufflet})}{2}, \quad i = 1,\ 2 \quad et \quad X^c = \begin{cases} \alpha^c{}_1 \\ \beta^c{}_1 \\ \alpha^c{}_2 \\ \beta^c{}_2 \end{cases} \tag{4.20}$$

La fonction objectif représente la somme de deux fonctions à minimiser. Elle est définie de façon à minimiser en même temps l'angle max de chacun des deux soufflets et la fonction J définie précédemment. La fonction contrainte est choisie de façon à rester négative, si la différence entre les angles de chaque soufflet est inférieure à une valeur imposée ε, sinon elle sera positive.

$$g_i = \frac{\max(X_i^{c\,1soufflet}) - \max(X_i^{c\,2\ soufflet})}{Y_i} - \varepsilon, \quad i = 1,\ 2 \tag{4.21}$$

Résultats d'optimisation

Sur la figure 114 nous pouvons observer l'historique de convergence des fonctions objectif et contraintes durant les itérations d'optimisation, pour les deux problèmes d'optimisation P1 et P2. En contraste avec l'application BFGS précédente, l'algorithme SQP utilise des contraintes qui forcent la fonction objectif à se recalculer afin de garantir que la contrainte est inférieure ou égale à 0 et que la fonction objectif soit minimisée. Cet algorithme minimise à la fois, le débattement calculé par rapport à celui imposé et les angles trouvés, pour obtenir l'angle le plus petit possible. La contrainte garantit une homogénéité entre les angles (valeur centrée réduite), c'est-à-dire que la différence des angles max entre le soufflet 1 et le 2 sur la moyenne des deux ne doit pas dépasser $\varepsilon = 0.1$,

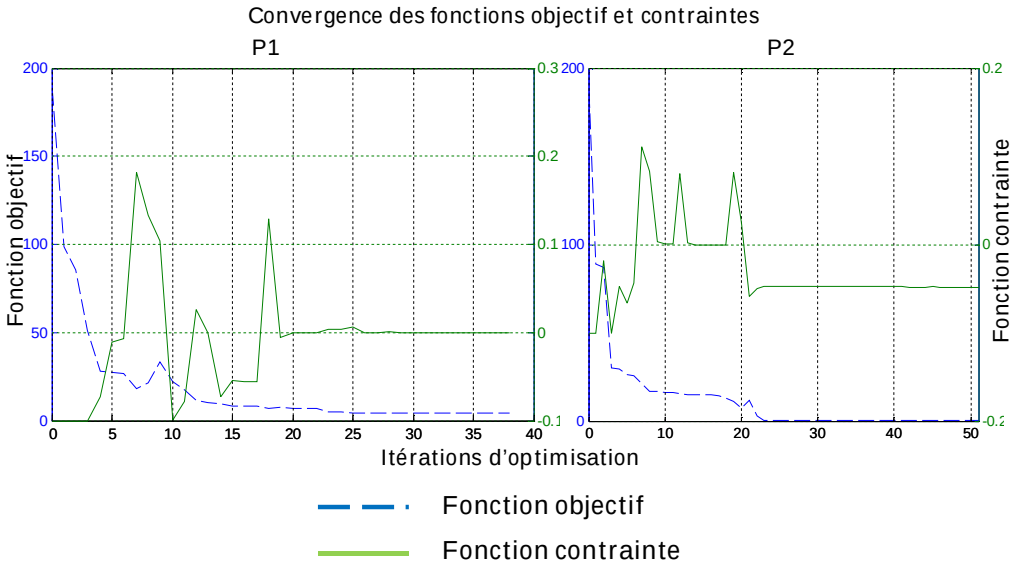


Fig. 113. Convergence des fonctions objectif et contrainte SQP.

La fonction objectif diminue drastiquement après les premières itérations, comme avec l'algorithme BFGS, mais elle remonte plusieurs fois afin de respecter la contrainte imposé. Ce n'est qu'à partir de la 30ème itération que la contrainte se stabilise et la fonction objectif approche la valeur la plus faible. Le tableau 9, à la page suivante, résume les résultats de l'optimisation avec SQP.

Tab. 9. Résumé des résultats d'optimisation, SQP.

	SQP	
	P_1	P_2
α_1 (x1)	-10,23°	9,47°
$\alpha^c{}_1$	-0,5115	0,4735
α_2 (x2)	-11,30°	9,11°
$\alpha^c{}_2$	-0,565	0,4555
β_1 (x1)	-7,39°	-8,98°
$\beta^c{}_1$	-0,3695	-0,449
β_2 (x2)	11,30°	-9,59°
$\beta^c{}_2$	0,565	-0,4795
Fonction objectif	4,2002	0,4678
J	3.635	0.00655
Moyenne des angles Y_i	0.565	0.46125
g	0	-0.048
Itérations	37	50
Débattement max		
L_{cl}	44,06mm	

Cet algorithme est plus robuste, même si sa fonction objectif n'est pas aussi proche de 0 que l'algorithme BFGS. Ceci est dû à la somme des deux fonctions qui force la fonction objectif à trouver le minimum des angles, ce qui veut dire que l'angle obtenu est le plus petit qui peut répondre au débattement imposé ainsi qu'à la contrainte qui garantit

aussi une homogénéité des angles. Les soufflets 1 et 2 seront donc équivalents en forme et en fonction. La figure 115 illustre les résultats de l'optimisation avec l'algorithme SQP.

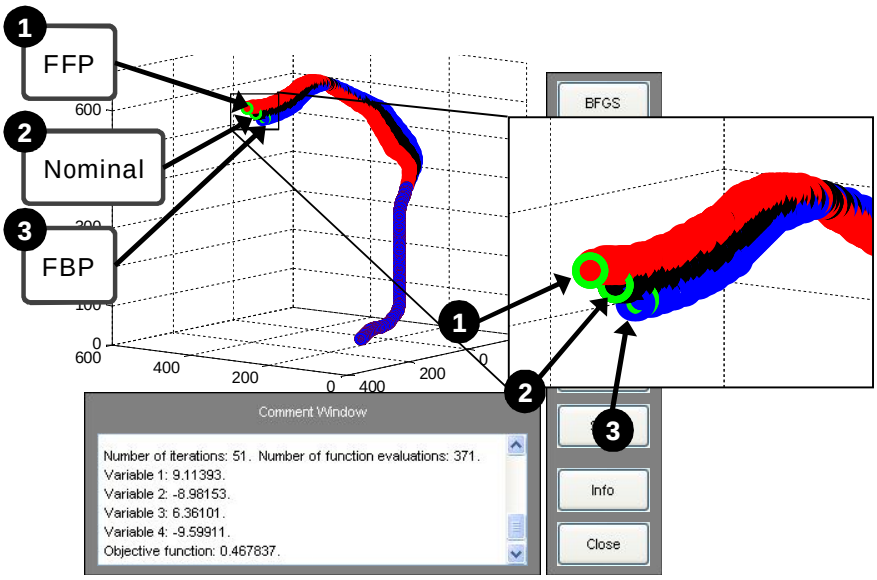


Fig. 114. Module en SQP de l'interface MATLAB.

3.2.2.3. Troisième application, algorithme SIMPLEX

Dans cette dernière application nous souhaitons optimiser à la fois le nombre de spires qui correspond aux angles de débattement ($\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2,$) et la position de chacun des soufflets dans le conduit (p_1, p_2).

Étant donné que la fibre neutre est obtenue par une discrétisation, une variation de la position du soufflet dans le conduit peut ne pas perturber la fonction objectif. Ceci rend la fonction non différentiable, et l'utilisation des algorithmes à gradient n'est plus adéquate dans ce problème défini. Cependant, les algorithmes stochastiques (Simplex) sont plus adaptés pour résoudre ce type de problèmes.

La résolution de ce problème d'optimisation permet de minimiser à la fois l'écart entre la position calculée numériquement, et celle imposée par l'OEM (*J*), elle permet aussi de calculer les angles de débattement (*X*) et la différence entres le maximum des angles de chaque soufflet. Ce problème d'optimisation ressemble au problème résolu précédemment en utilisant l'algorithme SQP, avec la différence qu'ici nous ne cherchons pas à respecter une contrainte, on le traite comme une fonction objectif.

Afin de trouver une seule position optimale pour chacun des soufflets, deux problèmes d'optimisation ont été définis. Dans le premier ($P1_{SIMPLEX}$), six variables d'optimisation sont choisies (angles de débattement et positions). Cependant, dans le second problème d'optimisation, les valeurs optimales des positions des soufflets sont injectées comme paramètres d'entrée. Nous avons procédé de cette façon pour éviter de trouver 2 positions différentes et des angles qui ne seraient pas comparables entre eux. Ceci donne quatre variables d'optimisation (angles de débattement X) pour le deuxième problème.

$$(P1_{SIMPLEX})\begin{cases} Min \quad F_1(X) \\ Avec: \ -1 \le \hat{X}^c \le 1 \end{cases} \& \quad (P2_{SIMPLEX})\begin{cases} Min \quad F_2(X) \\ Avec: -1 \le X^c \le 1 \end{cases} \tag{4.22}$$

$$\hat{X}^c = \begin{cases} \alpha^c{}_1 \\ \beta^c{}_1 \\ \alpha^c{}_2 \\ \beta^c{}_2 \\ p^c{}_1 \\ p^c{}_2 \end{cases}$$

$$F_i = J_1 + Y_i + \frac{\max(X^{c}{}_i^{1soufflet}) - \max(X^{c}{}_i^{2\ soufflet})}{Y_i} \tag{4.23}$$

Résultats d'optimisation

Nous pouvons déjà observer que l'algorithme SIMPLEX nécessite plus d'itérations pour minimiser la fonction objectif que le BFGS ou le SQP. La convergence vers 0 est semblable à celle de BFGS, car nous n'avons pas des contraintes (Fig. 112 à la page 145). À partir de l'itération 20 la fonction se réduit de moitié, et elle diminue régulièrement pour converger aux alentours de 116 itérations. Comme pour l'algorithme SQP, les fonctions objectif de cet algorithme garantissent les angles les plus petits, ainsi qu'une homogénéité des angles pour que les soufflets soient proches l'un de l'autre.

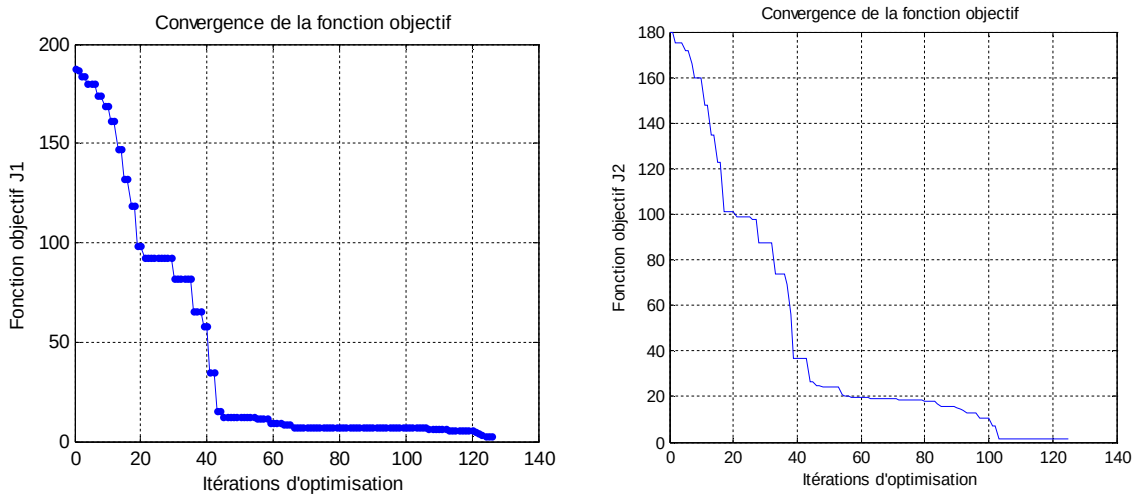


Fig. 115. Itérations d'optimisation SIMPLEX.

Nous pouvons observer les résultats des optimisations par SIMPLEX dans le tableau 10. Les angles sont proches, mais étant donné qu'il s'agit d'une fonction à minimiser et non pas d'une contrainte, ils sont moins proches qu'avec SQP. Les positions des soufflets (normalisées de 0 à 1) nous indiquent que la meilleure position pour les deux est à l'extrémité de la plage de positionnement donné par l'OEM (sur une portion droite du conduit).

Tab. 10. Résumé des résultats d'optimisation, SIMPLEX.

	SIMPLEX	
	P_1	P_2
α_1 (x1)	-11,50°	8,55°
α^c_1	-0,575	0,4275
α_2 (x2)	15,44°	-9,62°
α^c_2	0,772	-0,481
β_1 (x1)	-8,37°	4,97°
β^c_1	-0,4185	0,2485
β_2 (x2)	13,49°	-8,38°
β^c_2	0,6745	-0,419
p^c_1	0,99	,99
p^c_2	1	1
Fonction objectif	2,3020	1,18
Moyenne des angles Y_i	0,72325	0,45
Différence entre les angles max	0,0975	0,0535
J	1,48125	0,6765
Itérations	125	123
Débattement max		
L_{cl}	44,06mm	

Même s'il nécessite plus d'itérations que SQP, cet algorithme permet le positionnement des soufflets sur le conduit (Fig. 117 ci-après). Les positions des soufflets (p_1 et p_2) se trouvent sur des plages admissibles pour les soufflets (A et B), identifiées lors des règles métier capitalisées.

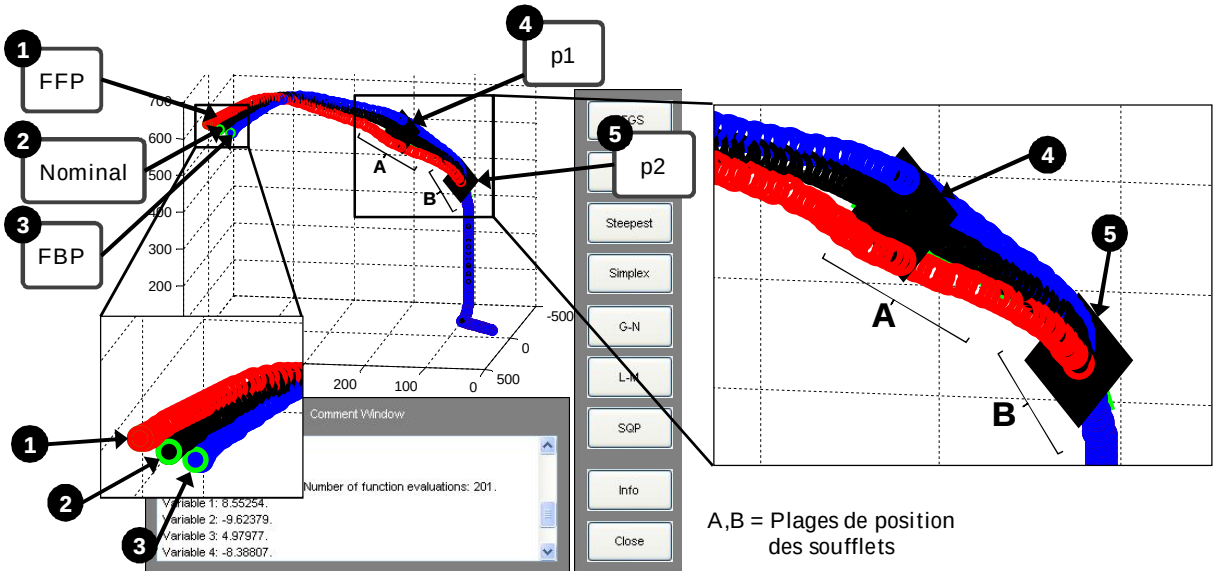


Fig. 116. Module en SIMPLEX de l'interface MATLAB.

Ceci valide notre choix d'algorithmes, que nous pourrons appliquer à tous les conduits qui seront traités par la méthodologie FaBK.

3.2.2.4. Conclusion des algorithmes

Nous avons testé 3 algorithmes différents pour optimiser le développement des conduits d'air, deux aux gradients (sans et sous contrainte) et un stochastique. Nous avons procédé ainsi pour tenir compte de toutes les contraintes qui pourraient arriver lors de la conception des soufflets d'un conduit, en faisant des optimisations mono et multi-objectifs. Pour ce faire, nous avons développé une interface qui permet aux concepteurs d'appliquer l'un ou l'autre des algorithmes et de pouvoir comparer les résultats, afin de mieux répondre à chaque problème d'optimisation.

Le premier algorithme testé, BFGS, est un algorithme simple d'utilisation, dont la fonction objectif converge rapidement vers une solution très minimisée. Malheureusement il ne tient compte que des angles des soufflets, ce qui peut s'avérer insuffisant dans certains cas.

Le deuxième algorithme, SQP, est lui très robuste et sa solution est plus complète : il permet de trouver des angles faibles et proches l'un de l'autre, ce qui réduit la complexité du produit et sa fabrication. Ces deux algorithmes, même s'ils donnent des résultats acceptables, ne sont pas utilisables dans toutes les situations, car il leur faut des fonctions différentiables.

Le troisième algorithme, SIMPLEX, est quant à lui moins efficace car sa solution est moins précise. En revanche, il permet de résoudre tout type de fonction, différentiable ou non. Cette caractéristique nous invite à le garder et à éventuellement l'utiliser lors du développement d'autres produits, avec des fonctions non différentiables.

En perspective, cette démarche d'optimisation pourra être appliquée pour l'optimisation et la simulation d'autres produits, voire d'autres procédés de fabrication, sachant que l'interface développée est suffisamment ouverte pour le faire.

3.2.3. Approche de KBE couplé à la démarche d'optimisation

Pour mieux exploiter les résultats issus de l'optimisation, nous avons développé en parallèle deux interfaces d'exploitation des résultats issus de notre démarche d'optimisation, l'une sur KADViser et l'autre directement par codage VBA sous environnement du modeleur géométrique CATIA V5 (Fig. 118).

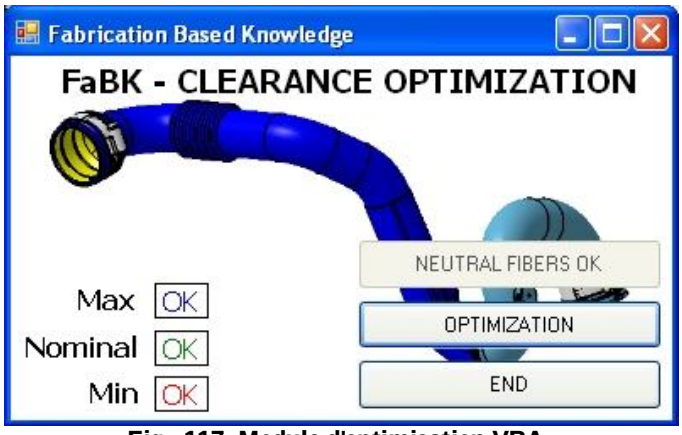


Fig. 117. Module d'optimisation VBA.

L'application développée sous VBA accepte les valeurs établies par l'algorithme et les associe aux « sets géométriques d'optimisation » (voir la page 153). Le concepteur n'a qu'à importer chacun des résultats de l'optimisation et l'affecter sur un modèle géométrique avancé de conduit. Les positions FFP et FBP sont également générées, afin de donner au concepteur une référence visuelle pour valider ses résultats avec les spécifications de l'OEM (Fig. 119).

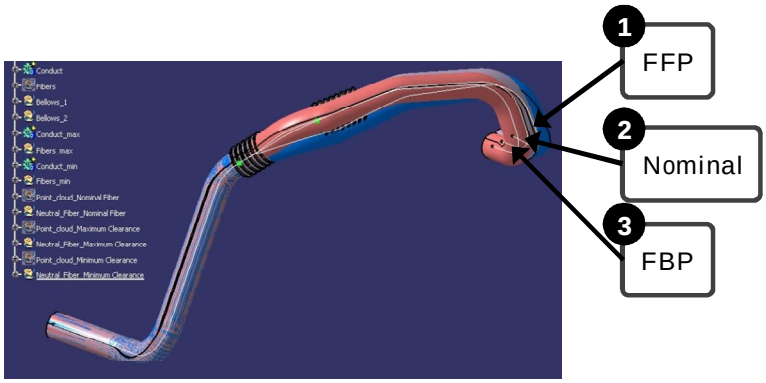


Fig. 118. Conduit généré par le module VBA d'optimisation avec les résultats d'optimisation MATLAB.

L'application KADViser vise, quant à elle, à relier les applications développées précédemment avec les algorithmes d'optimisation pour la configuration des soufflets. La figure 120 montre le déroulement d'un cycle d'optimisation couplé avec KADViser. Le concepteur se sert des informations venant de la part de l'OEM, ainsi que des connaissances entreprise, pour réaliser l'optimisation et trouver le « set des paramètres soufflet » le plus adapté au produit qu'il développe. Ces informations sont ensuite introduites dans le module KADViser pour le conduit en cours, et tous les paramètres sont envoyés vers CATIA V5 pour construire le modèle géométrique du nouveau conduit.

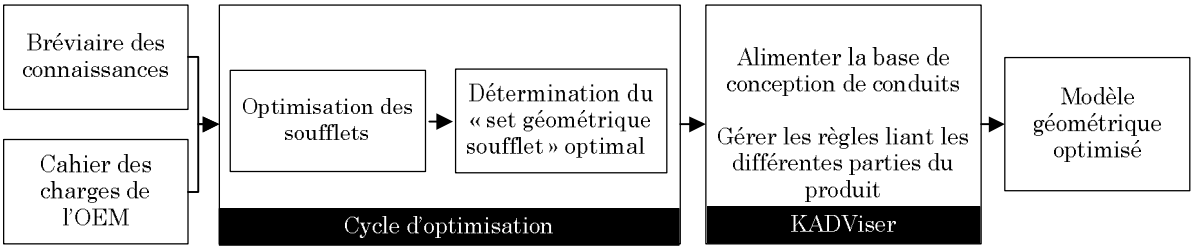


Fig. 119. Cycle d'optimisation avec l'IHM KADViser.

Nous avons fait le choix de lier directement les résultats des boucles d'optimisation effectués avec les données issues des expérimentations empiriques et numériques, ceci afin que les recommandations sur le type de soufflet à utiliser soient basées sur des choix réels, avec des géométries ayant déjà été réalisées et validées par les différents acteurs métier. Pour réaliser ce choix, nous avons développé des tables de paramétrage contenant les différents « sets des paramètres soufflet » ainsi que les résultats issus des expérimentations. Quand le concepteur fait l'optimisation de son conduit, les angles trouvés sont comparés avec la base. Ensuite le « set » qui se rapproche le plus (avec un facteur de sécurité) est choisi, et ses paramètres géométriques sont établis (Tab. 11 à la page suivante).

Tab. 11. Paramètres géométriques renvoyés vers l'IHM KADViser.

Set final existant (le plus proche de l'optimisé)	Valeurs insérées dans CATIA
hauteur_de_tête	6
rayon_de_tête	2
rayon_de_pied	0,5
Angle_de_flanc	26,1
épaisseur_	2,5
nombre_de_spires	6
Débattement_final	2,2
position_soufflet_1	35
position_soufflet_2	250

Le fichier d'échange permet :

1. de répertorier les sets géométriques de soufflets existants (avec des variations selon le nombre de spires et selon leur géométrie) ;
2. de répertorier le set géométrique optimisé à comparer ;
3. de répertorier les écarts en débattement, entre chaque set existant et le set optimisé ;
4. de définir le set existant ayant le plus petit écart de débattement positif avec le set optimisé (règle de base qui interdit de choisir une solution avec un angle inférieur à celui nécessaire) ;
5. de sélectionner le set existant optimal, et de l'exporter vers KADViser et CATIA V5.

Des règles simples sont utilisées pour comparer les résultats de l'optimisation avec les valeurs réelles recueillies par l'expérimentation. Ces règles sont de type :

« Écartement » = 1 – (« Écartement_set » / « Écartement_optimal »)
« Écartement_Optimal » = Min(« Écartement_Réel ») Si « Écartement_Réel » > 0

À l'aide de ces règles, l'application KADViser, couplée avec la table de paramétrage ainsi constituée, peut déterminer quel « set des paramètres soufflet » permet un débattement égal ou plus grand que celui déterminé par optimisation, et pourra déterminer les paramètres géométriques nécessaires pour chaque soufflet. Une fenêtre est dédiée aux actions d'optimisation de soufflets sur l'application KADViser, ce qui permet au concepteur de se concentrer sur les actions en cours pour détailler son produit (Fig. 121).

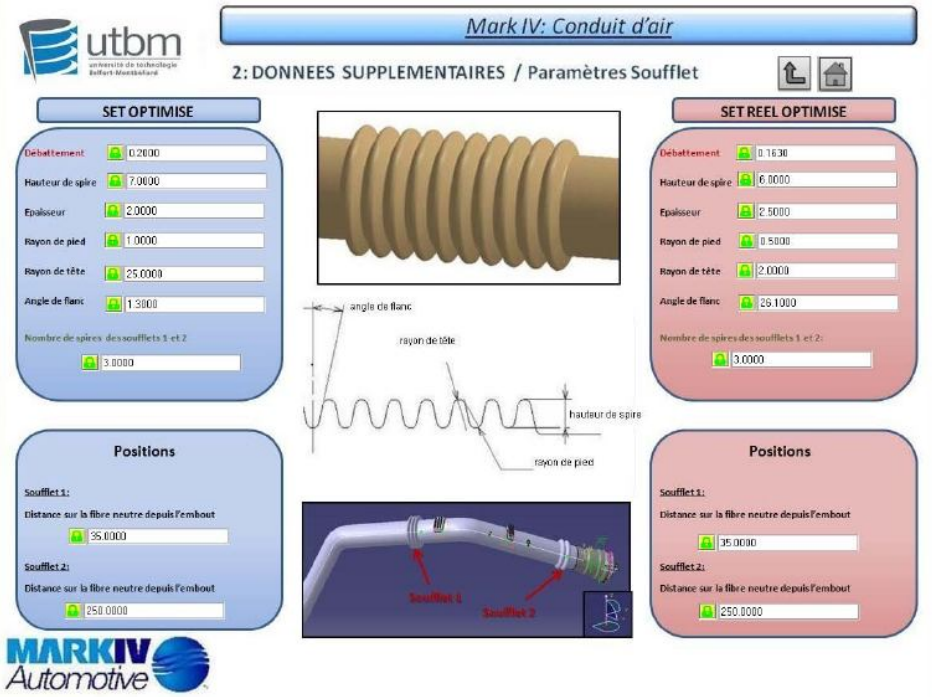


Fig. 120. Fenêtre de l'IHM KADViser dédiée à l'optimisation des soufflets.

Nous pouvons constater l'apparence des informations issues de l'optimisation, ainsi que celles du « réel optimisé ». Ceci permet au concepteur de lier les informations avec leur fonction et, en cas d'une modification nécessaire, il pourra le faire sans être obligé de se renseigner sur comment les modèles sont construits.

L'utilisation des fichiers d'échange paramétrés permet aux concepteurs, au moment du développement d'un nouveau conduit (Fig. 122), de commencer leur travail avec des modèles préconçus respectant les règles et connaissances validées au sein de l'entreprise Mark IV car ayant été mis à l'épreuve sur plusieurs conceptions existantes, les produits étant disponibles sur le marché. Ils permettent aussi, en cas de modification du produit dit « générique », due à des impositions des clients (externes ou internes), que les informations soient remontées, et leur impact sur le produit proprement analysé.

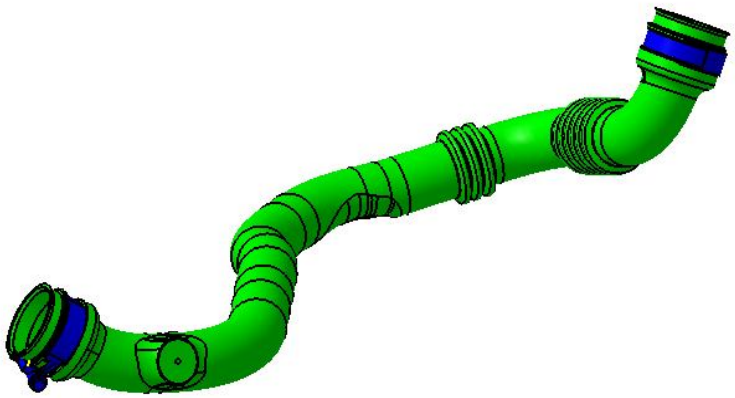


Fig. 121. Nouveau produit avec soufflets optimisés.

La figure 122 illustre un conduit d'air RAS/BP issu de la méthodologie FaBK. Cet exemple de conduit comporte deux zones de soufflets, ainsi que des embouts de raccordement avec son environnement et un support de soudure de type rond.

4. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la mise en œuvre et le codage des connaissances capitalisées par notre contribution scientifique dans le domaine de la mise en application des connaissances métier, lors du développement de produits. Dès lors, nous avons proposé et décrit les outils de gestion des connaissances appliquées. Quatre approches ont été décrites de manière détaillée :

- l'approche de génération de conduits d'air par extrusion soufflage, afin de présenter la valorisation et la mise à disposition des connaissances sous forme KBE auprès des concepteurs, pour le développement d'un nouveau produit ;
- l'approche de KBE pour la conception d'un outillage d'extrusion soufflage, qui exploite les informations du couple produit-process, pour générer une ébauche de moule à partir d'un produit développé par l'approche de génération de conduits ;
- l'approche d'éléments de soudure pour un produit complexe qui permet de construire un élément fonctionnel entièrement paramétrique, répondant au cahier des charges, que le concepteur peut greffer sur son produit ;
- l'approche d'éléments simples qui exploite les connaissances du couple produit-process liées aux sous-éléments fonctionnels simples d'un produit, afin d'accélérer les temps de conception, et augmenter la robustesse des produits développés.

Nous avons aussi montré les vérifications par script développées pour mettre en action la méthodologie FaBK. Dès lors, nous avons proposé et décrit quatre approches, une d'optimisation et trois de vérification et validation, pour la mise en application des connaissances ne pouvant pas s'intégrer dans une application KBE :

- l'approche d'optimisation des sous-éléments des conduits d'air, les soufflets, afin de présenter le couplage des algorithmes d'optimisation avec les applications KBE et les scripts ;
- l'approche de vérification de la loi d'évolution des produits tubulaires, afin de présenter une vérification basée sur des règles métier ;
- l'approche de vérification des cordons de soudure, de manière à donner un appui pour la validation par les experts d'un sous-élément d'un produit, défini par le concepteur ;
- l'approche d'extraction de fibre neutre d'un conduit, de façon à montrer la collaboration entre les applications KBE et les vérifications par script pour la définition de la solution d'un produit.

Nous concluons ce chapitre sur les différentes possibilités offertes pour appliquer notre méthodologie FaBK dans le développement courant des produits. Après avoir présenté d'une manière détaillée les divers outils nécessaires pour la mise en application de la méthodologie, nous proposons, lors du prochain chapitre, de décrire le processus de conception et de développement « hautement productif » des produits à l'aide de nos

différentes contributions. De ce fait, nous pourrons appliquer les connaissances retenues et capitalisées pour les couples produit-process et nous assurer de leur robustesse, ainsi que du respect des règles établies par l'entreprise lors des phases de développement des produits de l'entreprise Mark IV.

CHAPITRE 5.

EXPERIMENTATIONS EN MILIEU INDUSTRIEL GLOBALES DE LA METHODOLOGIE FABK

"In design you must always have one foot in the known and one foot in the unknown"

Stephan Copeland

CONTENU DU CHAPITRE

1. Introduction 161

2. Application au développement d'un produit 162

2.1. Problématique 162

2.2. Protocole expérimental 164

2.3. Résultats obtenus et discussions 170

3. Application de la « vérification de la loi d'évolution » 170

3.1. Problématique 171

3.2. Protocole expérimental 172

3.3. Résultats obtenus et discussions 174

4. Application de développement et contrôle d'un cordon de soudure 175

4.1. Problématique 176

4.2. Protocole expérimental 177

4.3. Résultats obtenus et discussions 178

5. Résultats généraux des expérimentations 179

5.1. Utilisation de toutes les applications KBE chez Mark IV SM 180

5.2. Utilisation de tous les scripts de vérification chez Mark IV SM 181

6. Conclusion 183

1. Introduction

Sur la base de la méthodologie FaBK expérimentée et mise au point sur des applicatifs génériques présentés précédemment, ce dernier chapitre a pour objectif de présenter l'applicabilité de nos résultats de recherche sur des cas d'applications concrets. La logique de structuration du chapitre est étroitement liée à la description du développement des applications apparue dans le chapitre précédent.

De ce fait, ce chapitre est organisé en trois parties, liées à trois mises en application industrielles au sein de l'entreprise Mark IV :

- la conception d'un conduit d'air du type RAS/BP, en suivant maintenant la totalité de la méthodologie élaborée, de l'analyse des exigences au développement « hautement productif » du modèle CAO et son outillage en respectant les règles et contraintes liées au procédé de fabrication (cf. *Section 2*) ;
- l'utilisation d'un script de vérification pour la loi d'évolution d'un conduit d'air (cf. *Section 3*) ;
- la conception et la vérification d'un cordon de soudure d'un répartiteur d'air, ainsi que la demande de modification de la règle de vérification (cf. *Section 4*) ;

Nous avons volontairement introduit deux types d'exemples, l'un qui suit la démarche totale de la méthodologie et les deux autres qui ne font qu'illustrer, du mieux possible, les possibilités d'application et d'ouverture de la méthodologie FaBK. Ainsi, pour chacune de ces applications, nous synthétisons dans le tableau 12 :

- le cas d'étude ;
- la problématique à traiter ;
- les outils utilisés ;
- les résultats obtenus.

Tab. 12. Description des expérimentations industrielles réalisées dans le cadre de ce travail de recherche.

N°	Cas d'étude	Problématique à traiter	Outils utilisés	Résultats
1	Conduit d'air RAS/BP	Réaliser le développement d'un conduit d'air avec son outillage, à partir du CdC, avec la méthodologie FaBK.	Module développé pour KADViser, MATLAB, CATIA V5, VBA	Modèle CAO du conduit d'air RAS/BP et de son outillage simplifié.
2	Conduit d'air	Réaliser l'analyse et la vérification de la loi d'évolution de la surface de passage à l'intérieur du conduit d'air, en fonction des exigences fournies par l'OEM.	CATIA V5, VBA	Modèle CAO du conduit d'air vérifié et amélioré, avec des tables illustrant les contrôles réalisés.
3	Répartiteur d'air	Construire, en phase de conception amont, un cordon de soudure pour un répartiteur d'air, et puis le contrôler pour les phases de prototypage et série en accord avec les exigences de fabrication,	Module développé pour KADviser, CATIA V5, VBA	Modèle CAO du répartiteur d'air avec son cordon de soudure développé, ainsi que des tables de vérification de la conformité des éléments vis-à-vis des règles métier.

Ce cinquième et dernier chapitre du manuscrit de thèse a pour but de montrer la validité de la méthodologie dans un contexte industriel. L'utilisation récurrente de la méthodologie ainsi que de chacun des éléments qui la constituent nous permet d'évaluer l'impact sur la productivité des équipes d'ingénierie, ainsi que sur l'assurance que les produits développés grâce à cette démarche sont conformes aux règles métier en vigueur dans l'entreprise Mark IV.

2. Application au développement d'un produit

2.1. Problématique

Le cas concret que nous allons utiliser pour présenter la méthodologie FaBK, est un conduit d'air du type RAS, baptisé « X61 – K9K 812 », qui transporte l'air de l'échangeur vers le doseur d'un véhicule (Fig. 123). Ce conduit fait partie de la famille de produits du circuit de refroidissement du véhicule, couramment développés par l'entreprise Mark IV.

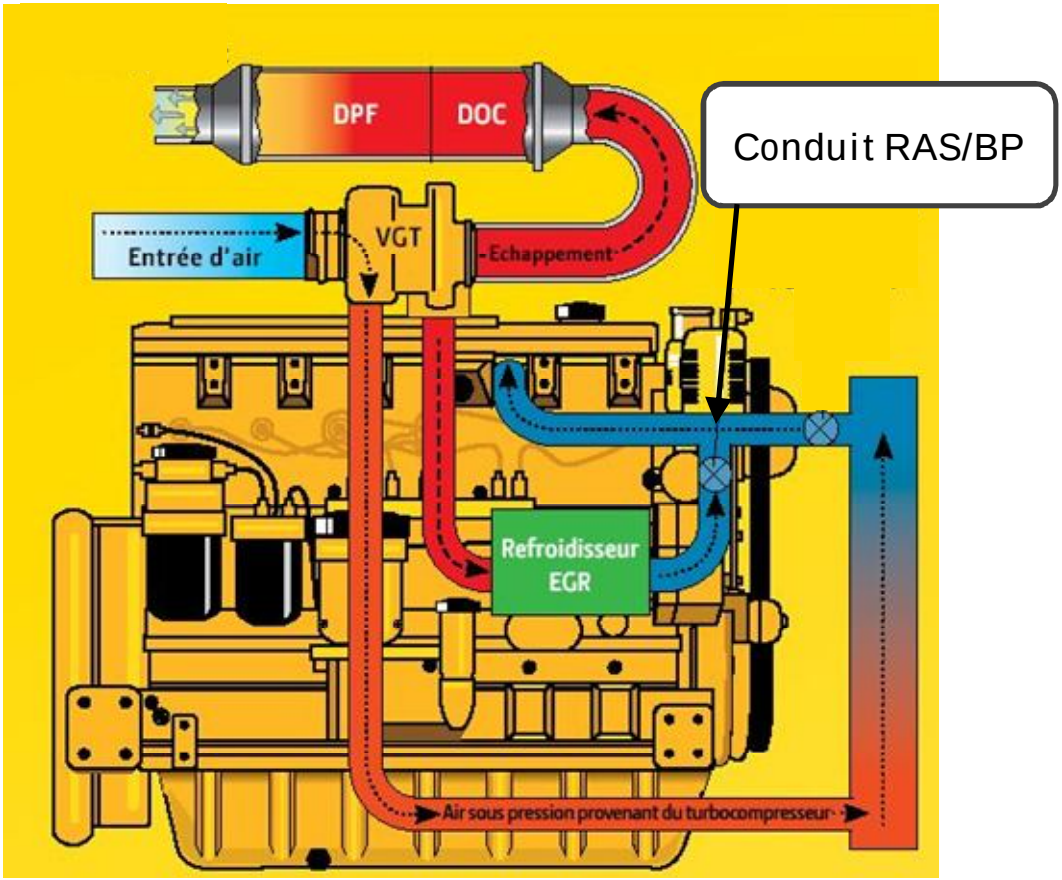


Fig. 122. Conduit situé dans le circuit d'air d'un véhicule.

Comme nous l'avons présenté lors du chapitre 4, les conduits d'air du type RAS/BP sont fabriqués par le procédé d'extrusion soufflage. Ce procédé permet la fabrication des produits creux de géométrie variable en une seule pièce, qu'il est impossible de réaliser avec un procédé comme l'injection. La figure 124 illustre la séquence d'étapes pour la fabrication par extrusion soufflage du type aspiration 2D d'un conduit d'air.

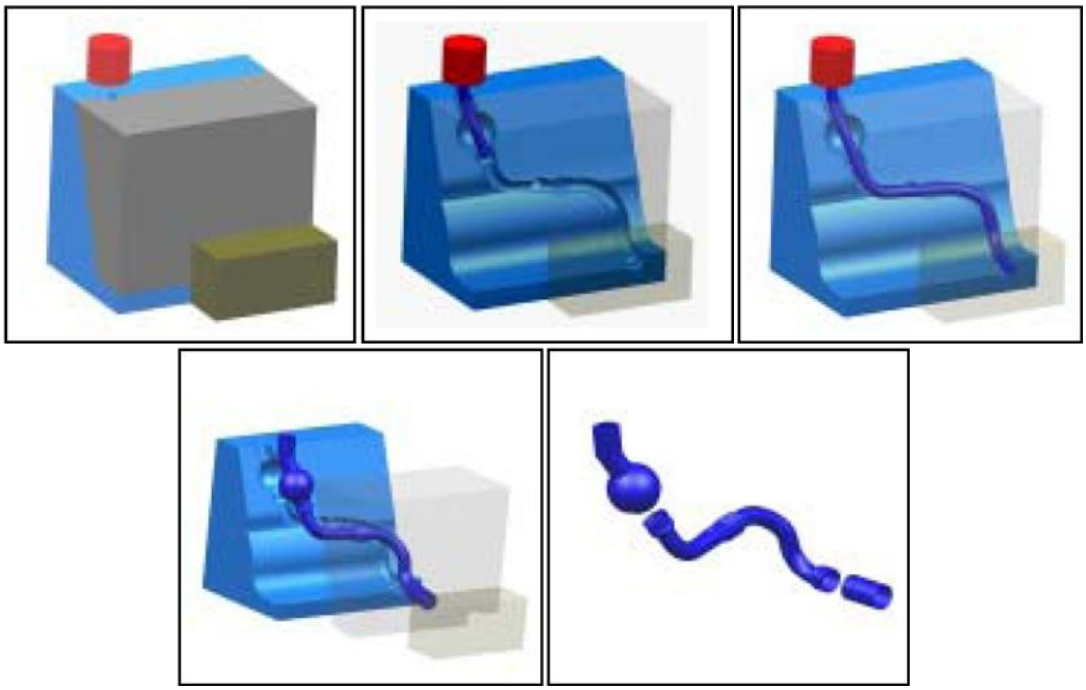


Fig. 123. Procédé d'extrusion soufflage 2D Aspi.

Le développement d'un nouveau conduit commence par la réception des documents de la part de l'OEM, tels que le CdC et des modèles CAO basiques sous forme de solides simplifies sans aucun historique de construction. Ces documents décrivent les exigences à remplir par le produit développé et certaines contraintes de forme. Des schémas sont inclus, qui décrivent tous les éléments que le conduit devra comporter pour bien remplir sa fonction (Fig. 125), tels que les raccordements, le diamètre nominal, ou encore les zones de soufflets.

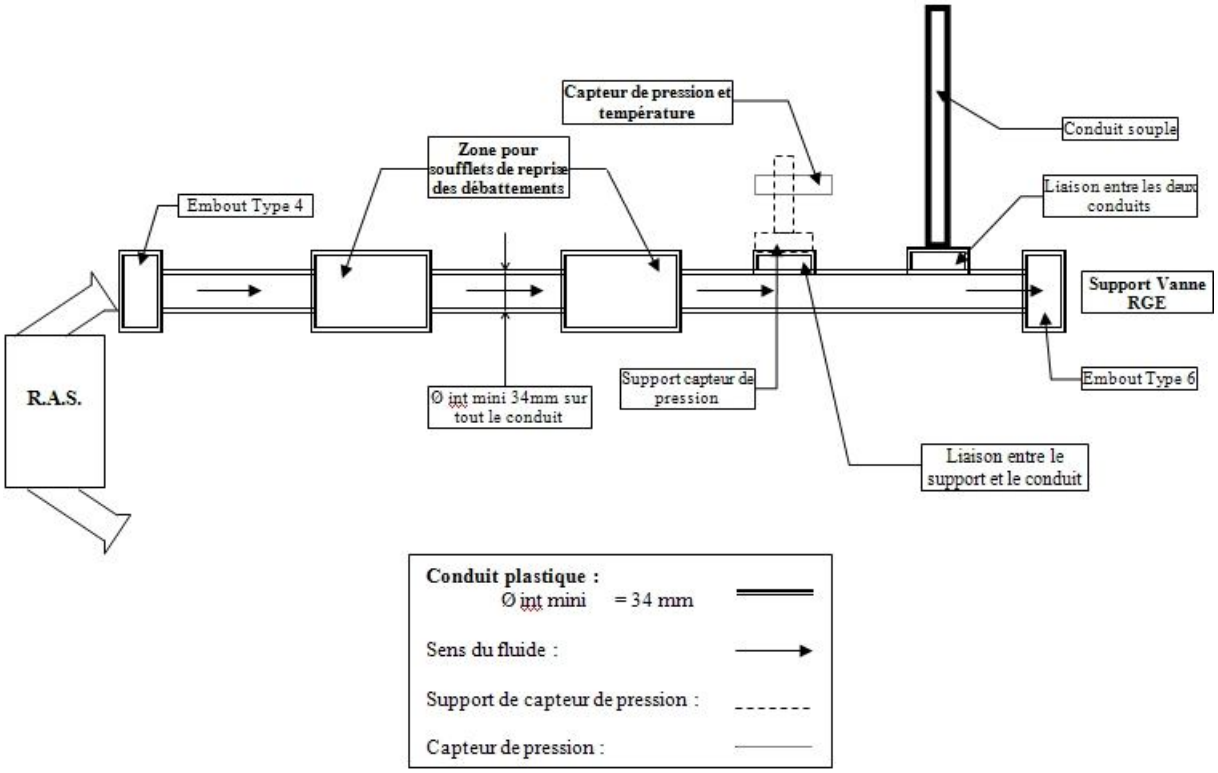


Fig. 124. Synoptique du conduit issu du CdC.

Chaque élément fonctionnel du conduit est décrit dans le CdC afin que le nouveau produit proposé réponde à tous les besoins du véhicule. Les modèles CAO simplifiés et dépourvus d'historique de modification fournis avec les exigences servent à situer le nouveau conduit par rapport à son environnement, et donnent un premier avis aux concepteurs sur comment commencer le développement (Fig. 126). Sur la figure nous pouvons noter les embouts de raccordement, les zones spécifiques pour les soufflets, ou encore les emplacements des capteurs et sondes.

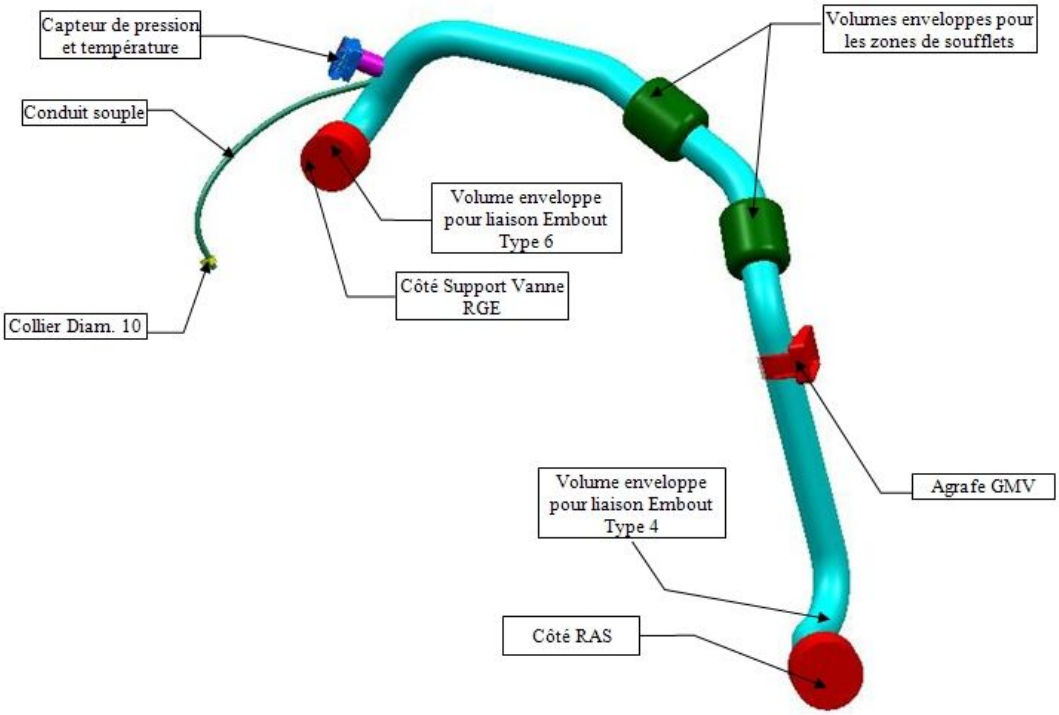


Fig. 125. Vue de la numérisation fonctionnelle.

Le bureau d'études de l'entreprise est contraint de développer un conduit fabricable à l'aide des moyens disponibles, dans un délai de temps très réduit (pouvant aller de 2 jours pour une réponse à la demande d'offre, jusqu'à deux, voire trois semaines pour un développement en série). De plus, les conduits d'air étant les produits avec le moins de complexité technique parmi tous ceux développés par l'entreprise, les temps de réponse suite à consultation (RFQ) doivent être diminués pour rester compétitifs face à la concurrence. Nous présentons, lors des sections suivantes, la démarche suivie pour développer ce conduit selon la méthodologie FaBK, dédiée à la conception avancée de produits.

2.2. Protocole expérimental

La première phase de la démarche consiste en l'analyse des documents fournis par l'OEM. Cette analyse permet de synthétiser les données détaillant les exigences fonctionnelles et géométriques du conduit à développer. Une fois que les acteurs métier responsables ont analysé les exigences, ils utilisent les paramètres recueillis pour démarrer la génération du concept de modèle CAO paramétré (Fig. 127).

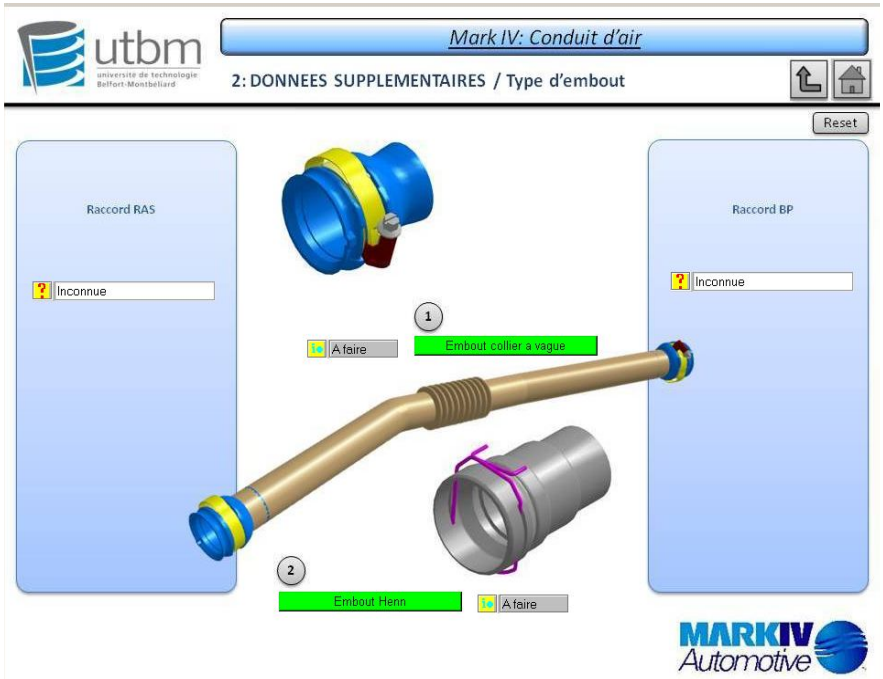


Fig. 126. Initialisation du modèle CAO.

La fibre neutre du conduit, son parcours donné, peut être extraite à partir des modèles CAO préliminaires de l'OEM. Une application KBE réalisée en VBA a été développée à ce propos. Elle analyse la géométrie du conduit et génère une fibre neutre apte à être reprise par les autres applications KBE, ainsi que par les concepteurs (Fig. 128).

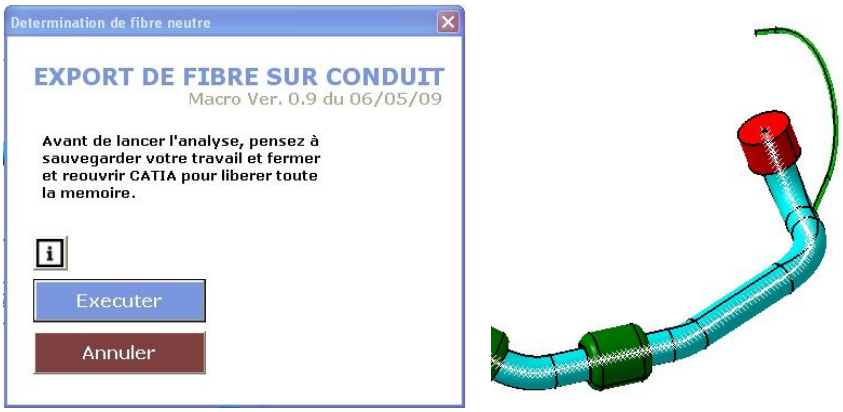


Fig. 127. Extraction de la fibre neutre du conduit.

Une fois que le modèle CAO paramétré du conduit est initialisé, ce dernier est optimisé selon les exigences de l'OEM ainsi que celles internes à l'entreprise. Pour les conduits soufflés, nous avons fait le choix d'optimiser les soufflets, éléments fonctionnels critiques pour le bon fonctionnement du produit. Pour ce conduit, deux zones de soufflets sont à établir, avec une flèche de débattement imposée à respecter. En utilisant le module d'optimisation développé à cet effet, nous nous apercevons que l'algorithme BFGS est le mieux adapté pour notre fonction objectif. Nous pouvons observer sur le tableau 13 un historique de la convergence de l'algorithme lors du processus d'optimisation, pour les fonctions objectifs (J_1 et J_2, pour chacune des positions avant et arrière du débattement).

Tab. 13. Itérations sur convergeant vers 0 avec BFGS.

BFGS					
Itération	J_1	J_2	Itération	J_1	J_2
1	193,991	44,0619	19	0,0132765	0,125377
2	70,6264	40,2027	20	0,00809803	0,0657592
3	31,3168	35,481	21	0,00438403	0,0378795
4	20,9375	34,9968	22	0,00243004	0,0231421
5	17,287	34,7887	23	0,00148619	0,0137858
6	16,5466	34,5106	24	0,000921544	0,00825104
7	12,6317	33,2837	25	0,000555993	0,00445277
8	7,28338	30,0027	26	0,000311855	0,00263807
9	2,98848	21,8941	27	0,000181649	0,00161385
10	1,73986	15,9233	28	0,000178322	0,000947654
11	1,01979	7,42503	29	7,1908e-005	0,000548009
12	0,545869	4,87194	30	6,15485e-005	0,000305545
13	0,292263	2,81168	31	4,88144e-005	0,000187385
14	0,186999	1,90315	32		0,000161301
15	0,118748	1,00296	33		0,000160178
16	0,0669474	0,556147	34		0,000110312
17	0,0356434	0,329875	35		7,89125e-005
18	0,0208356	0,195604	36		6,26737e-005

Nous observons qu'après 10 itérations, la fonction converge rapidement vers 0. De plus, à l'itération 31, la fonction tombe en dessous de la limite de 10^{-8}, et la simulation s'arrête avec une réduction de 99,99% de la valeur initiale de la fonction objectif (193mm dans ce cas). La fonction J_2 subit le même traitement et arrive rapidement à la limite d'arrêt de la simulation. L'algorithme d'optimisation et la fonction objectif choisis prouvent leur capacité à atteindre un résultat optimal avec une convergence très rapide (Fig. 129).

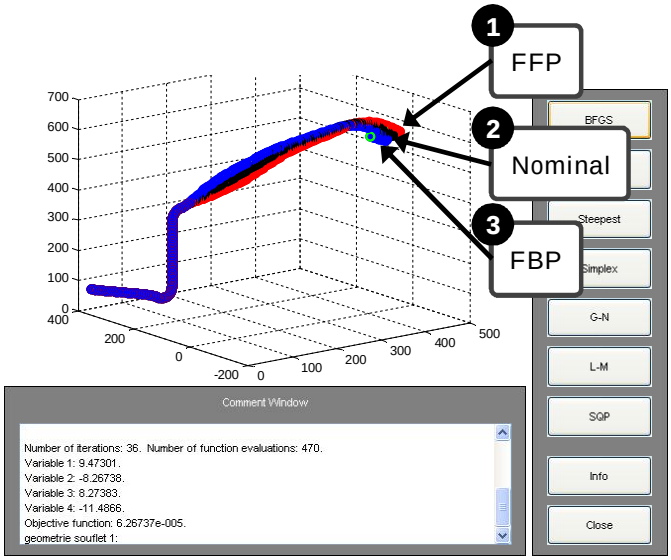


Fig. 128. Résultats de simulation par algorithme BFGS.

Ces résultats permettent de déterminer les paramètres des soufflets les mieux adaptés aux exigences de l'OEM, tout en respectant les contraintes de fabrication de l'entreprise, ainsi que les caractéristiques propres au conduit développé et à son choix de matériau.

Le Tableau 14 résume les résultats des calculs des angles optimisés, ainsi que la configuration des soufflets à utiliser pour le modèle CAO optimisé.

Tab. 14. Résumé des résultats d'optimisation.

	BFGS	
	J_1	J_2
α_1 (x1)	-12,24°	9,47°
α_2 (x2)	-10,71°	8,27°
θ_1 (x1)	13,28°	-8,26°
θ_2 (x2)	15,13°	-11,49°
# de Soufflets		
Position 1	6, géométrie standard	
Position 2	7, géométrie standard	

Ensuite, le produit passe à l'activité de définition de la solution. C'est à ce moment là que le concepteur commence à travailler le modèle CAO optimisé résultant des activités précédentes. Pour des soucis de montage — une des exigences du produit — le concepteur doit se décider entre deux types d'embouts de raccordement (Fig. 130). Il a le choix de prendre l'un ou l'autre. Le modèle CAO lui permet de le faire et de les orienter de la façon qui convient le mieux à ses contraintes d'environnement.

Fig. 129. Choix des embouts pour répondre à une exigence en effort de montage.

Pendant ce temps, et une fois qu'il aura fini son travail de définition de la solution, le concepteur fait appel à plusieurs vérifications pour être sûr de la conformité de sa solution au savoir-faire de l'entreprise. Ces vérifications, comme nous l'avons présenté précédemment, aident le concepteur à garantir que les choix de conception qu'il aura retenus lors de la définition de la solution ne contredisent ni les règles métier capitalisées, ni les exigences particulières à ce produit. Nous présentons en guise d'exemple la vérification du diamètre nominal et équivalent du conduit. Le concepteur peut l'activer à tout moment pour être sûr que, s'il a dû évider ou modifier la forme de sa solution, celle-ci respecte toujours la règle (Fig. 131). Le conduit ainsi analysé a été coupé, afin d'aider à la visualisation des sections.

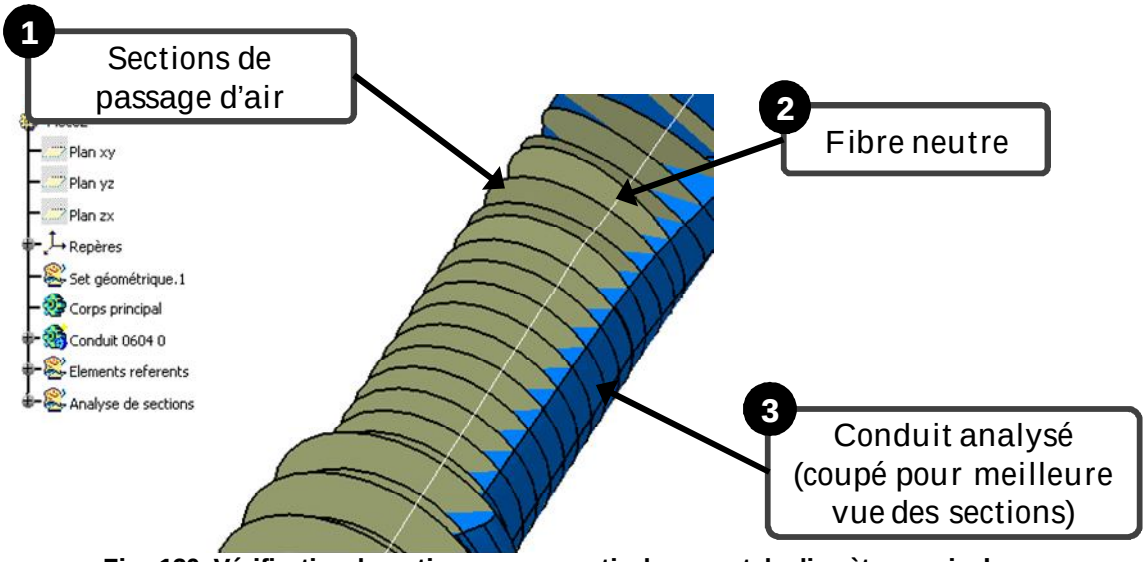


Fig. 130. Vérification de sections pour garantie du respect du diamètre nominal.

Contenus aussi dans le concept optimisé pour les conduits, nous retrouvons des indicateurs pour l'outillage. À partir des exigences et des règles métier capitalisées, le choix d'une machine du parc disponible dans l'entreprise peut être réalisé. Des paramètres tels que le poids des pièces, leur matériau, ou encore leur configuration, servent à délimiter le choix d'une machine ou d'une autre. Les outils KBE développés recensent ces informations, et offrent au concepteur des indicateurs visuels sur les choix de machines à effectuer (Fig. 132).

Fig. 131. Fenêtre de choix de machines dans l'outil KBE KADViser.

En plus du choix de procédé de fabrication et de machine, les outils KBE développés permettent de faire une simulation d'outillage. Le modèle CAO du moule généré est inutile pour faire fabriquer des outillages, car les géométries deviennent trop complexes et lourdes à maitriser pour les concepteurs. Cependant, il est suffisamment détaillé pour analyser les détails de fabrication, les possibles contraintes à soulever et d'autres difficultés qui peuvent être rencontrées. Pour ce faire, le conduit est préparé par le script

d'extraction de la fibre neutre, qui vérifie la possibilité d'écoulement par gravité du conduit, et propose des aménagements dans le cas contraire. Si le conduit n'est pas fabricable, il trouve un endroit pour le couper et le mettre en forme (technique utilisée couramment par l'entreprise) (Fig. 133).

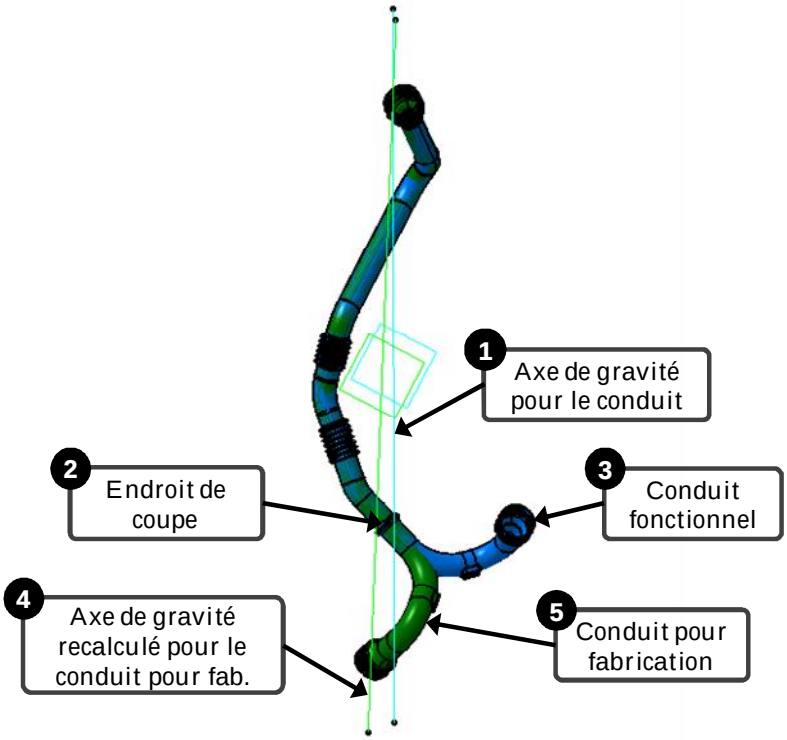


Fig. 132. Conduit traité pour l'outillage, découpé et transformé.

Ce conduit validé pour la fabrication sert ensuite à réaliser l'empreinte d'un modèle de moule de soufflage, à l'aide d'une application KBE de l'outillage. Ce moule permettra aux experts de **compléter leurs analyses et leurs validations** (Fig. 134).

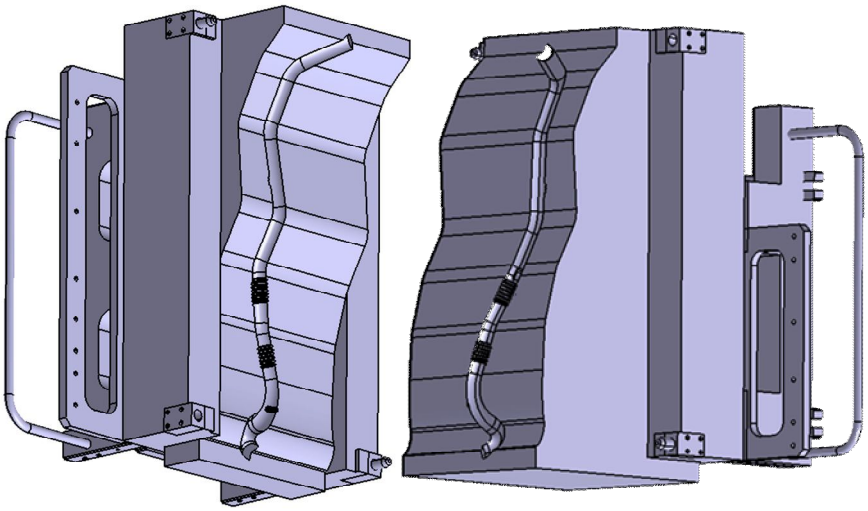


Fig. 133. Outillage KBE pour conduit soufflé.

Quand le concepteur finit son travail de définition de la solution et que toutes les vérifications sont correctes, c'est le moment où l'expert métier intervient pour faire une

validation de la solution retenue. Son avis est crucial car de lui dépend l'avancement du modèle CAO et du projet. Si tout est conforme aux règles et exigences, le projet sort du périmètre de la méthodologie et passe aux mains des services en aval. Au cas où des améliorations sur les connaissances retenues ont été remarquées, ou des détails sont à prendre en compte, ces informations reviennent vers l'expert KBE pour relancer l'activité de capitalisation et formaliser ces nouveaux éléments.

2.3. Résultats obtenus et discussions

Pour un service de développement de produits, tel qu'un bureau d'études, la réussite est obtenue quand le produit développé passe aux services suivants, **sans erreurs ou détails contrariants**, éventuellement allant jusqu'à sa fabrication et mise en service. En fonction du produit, le temps disponible pour le développer peut être plus ou moins réduit. Pour un conduit du type RAS/BP, le temps pour une réponse à un appel d'offre est généralement de deux jours, allant jusqu'à quinze jours pour un développement en série.

Nous avons suivi les concepteurs de l'entreprise lors de leur travail habituel de développement de produits pour constater le temps nécessaire pour faire ce type de produits. Un concepteur avec de l'expérience peut développer un concept basique en **14 heures**, et un concept prêt pour sa validation finale et sa mise en série en une centaine d'heures. Il faut remarquer qu'un conduit répondant à un appel d'offre est très basique, et ne répond pas fidèlement à toutes les contraintes ni aux exigences.

Le développement proposé par FaBK, pour un conduit d'air de type RAS/BP se réalise en **7 à 8 heures**. Ceci tenant compte des modifications amenées par le concepteur pour répondre à toutes les contraintes n'existant pas sur le modèle CAO générique, ni sur le modèle optimisé. Nous pouvons déjà observer un gain de **50%** par rapport au développement traditionnel d'un conduit, en réponse à un appel d'offre, et un gain de plus de **85%** par rapport au développement d'un conduit pour la fabrication en série. Nous devons nous focaliser plus sur les gains d'un produit en série, car FaBK est conçue pour développer des produits répondant à toutes les exigences, dans un délai de temps réduit, et du premier coup.

Deux gains supplémentaires existent grâce à l'utilisation de notre méthodologie : la possibilité de modifier les règles métier dans le cas d'un nouveau développement, et le fait qu'un concepteur moins expérimenté puisse faire une grande partie du développement. La définition de la solution nécessite du travail, et c'est cette partie qui demande le plus de temps. Mais n'ayant pas à développer la totalité du produit, un concepteur moins expérimenté peut vite apprendre à concevoir le produit, avec moins de risque d'erreurs.

3. Application de la « vérification de la loi d'évolution »

Comme nous avons déjà présenté les capacités de la méthodologie pour traiter le développement d'un produit dans sa totalité, nous traiterons plus en détail dans cette section d'autres éléments de la démarche de conception avancée : les scripts de vérification. Ils aident les concepteurs à vérifier la justesse de leur travail en CAO et permettent le développement de produits conformes aux règles métier capitalisées par

FaBK. Nous proposons donc de présenter la démarche d'une vérification de la loi d'évolution d'un conduit d'air.

3.1. Problématique

Le conduit d'air d'entrée du turbocompresseur est un autre élément du circuit d'air d'un véhicule (Fig. 135). Il communique l'air frais venant du filtre (plus précisément du débitmètre à la sortie du filtre) avec le turbocompresseur, qui envoie à son tour l'air sous pression vers le RAS. Le développement de ce type de conduit, comme tous les produits de l'entreprise, par la réception d'un CdC venant de l'OEM et des modèles CAO basiques donnant la forme et l'encombrement globaux du conduit à développer.

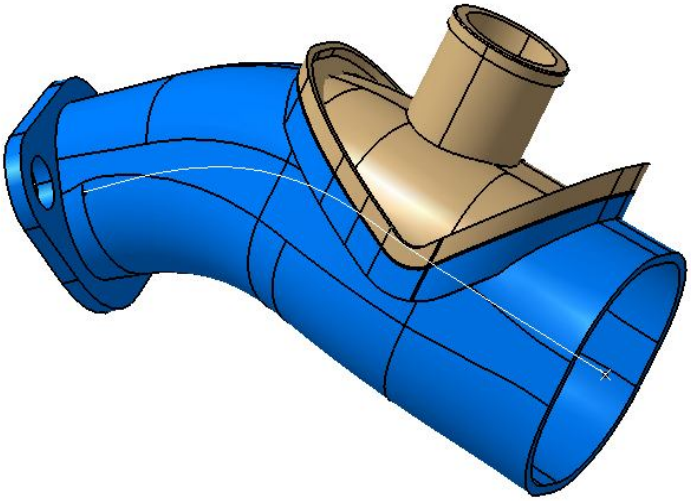


Fig. 134. Conduit d'admission du turbocompresseur à analyser.

D'autres éléments sont aussi ajoutés au conduit : l'injection des gaz de recyclage de la combustion, tels que les gaz **EGR** (***E****xhaust* ***G****as Ci****r****culation*), ou les gaz *blow-by*. La circulation des gaz et de l'air à l'intérieur du conduit impose une contrainte de volume et de surface de passage aux concepteurs. Une des exigences du CdC est la section équivalente du conduit (une section du volume intérieur du conduit, normale à sa fibre neutre). Cette exigence garantit un meilleur écoulement des gaz à l'intérieur du conduit, et la diminution de la perte de charge (Fig. 136). Dues à sa forme et à ses proximités avec d'autres éléments de son environnement, les conduits de ce type sont toujours modifiés par les concepteurs. Ces modifications risquent de modifier l'aire de section équivalente, et peuvent donc générer des pertes de charge non-souhaitées.

Directs: * Inside diameter: * Length: * Particularities of the duct: * Internal surface state:	See §4.3 Maximising of the equivalent section in order to reduce pressure loss. The system shall not provoke excessive pressure loss. Objective of equivalent section: see §4.3 Wind tunnel measurement in accordance with test procedure n°39-06-205 Calculation of equivalent section in accordance with specifications 34-04-825 Permeability calculation made by the supplier in accordance with procedure to be validated by Renault	GFE	Supplier	F1	

Fig. 135. Exigences issues du CdC du conduit d'air.

Nous allons présenter, dans les sections suivantes, la démarche à suivre par les concepteurs pour satisfaire cette exigence. Nous décrivons le travail en continu réalisé par les concepteurs, la modification des modèles CAO, et leur vérification par script pour améliorer leur concept.

3.2. Protocole expérimental

L'exigence de section équivalente de la part de l'OEM se présente souvent sous forme d'un graphique avec une pente (ou dans certains cas une courbe évolutive), décrivant la surface de passage d'air souhaité pour le produit (Fig. 137). Dans le cas du conduit entrée turbo K9K, la première demande (demande de consultation RSA, Fig. 135) donnait une évolution linéaire ascendante. Celle-ci a évolué pour une courbe plus représentative de la forme du conduit (DT volume augmenté RSA, Fig. 135) lors d'une révision du projet.

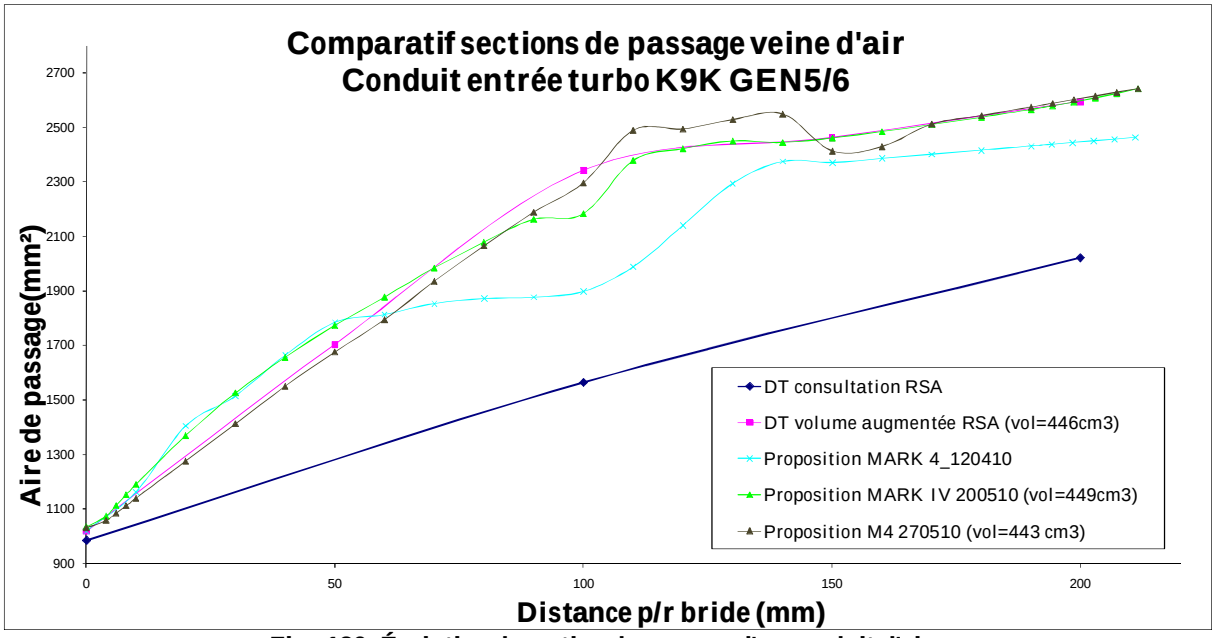


Fig. 136. Évolution de section de passage d'un conduit d'air.

Chacune des autres lignes sur cette figure représente les propositions du concepteur, en aménageant la forme du modèle CAO, pour mieux répondre à l'exigence de l'OEM. Ce graphique est réalisé en faisant des sections de l'enveloppe du conduit à intervalles réguliers sur la fibre neutre, et en mesurant leur surface. La figure 138 montre le conduit avec sa fibre neutre selon le flux d'air. Ce flux doit être le moins gêné possible par les modifications de la forme globale, afin de réduire les pertes de charge.

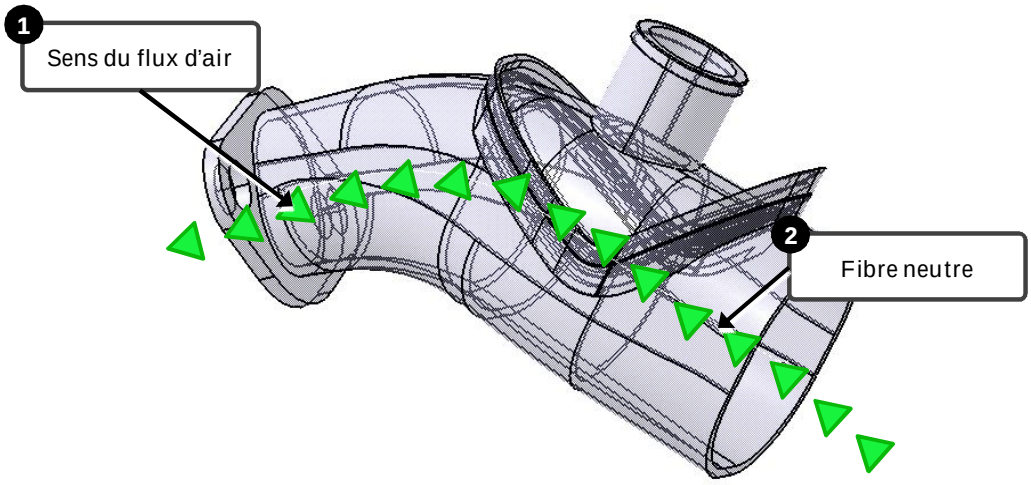


Fig. 137. Conduit avec son flux d'air.

La démarche pour effectuer ces améliorations et vérifications du conduit à l'aide du script de vérification de la loi d'évolution est décrite dans le chapitre précédent. Ce script réalise une série de sections du conduit en question et récupère les informations sur la surface de passage, le périmètre, et le diamètre équivalent de chaque section. À l'aide de ces informations, le concepteur peut non seulement analyser l'évolution de ses sections de passage, mais aussi trouver l'endroit où il doit travailler pour les améliorer (Fig. 139).

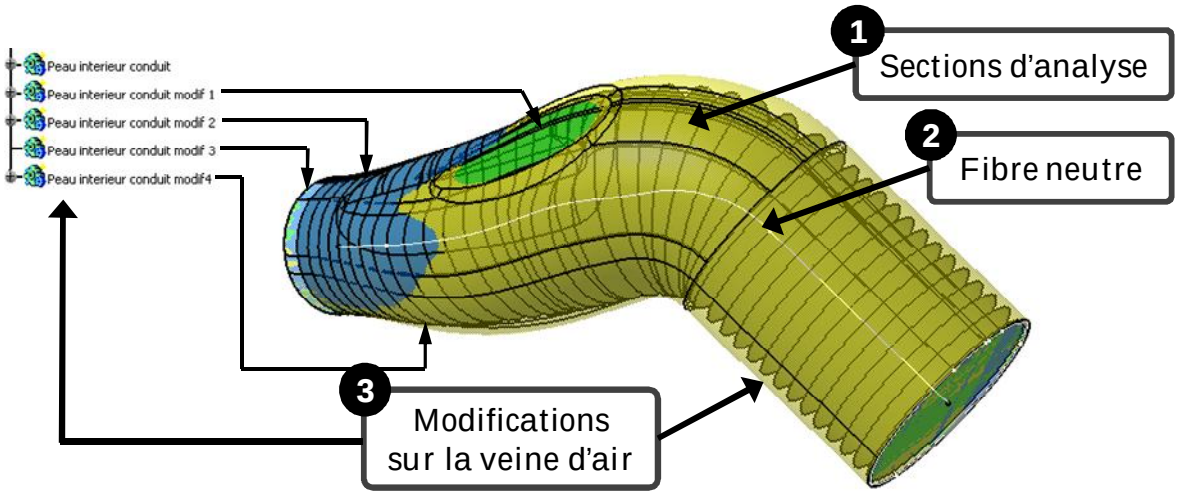


Fig. 138. Suivi des modifications et vérifications sur la veine d'air du conduit.

Analyse par analyse, le concepteur peut approcher sa solution le plus possible des attentes de l'OEM, sans vraiment interrompre son travail de développement. Les scripts sont établis de façon à permettre au concepteur de passer de l'activité de définition de la solution à celle de vérification, et revenir, vers la définition, **sans perte de temps ni rupture du rythme de travail**. Comme la validation n'est réalisée qu'à partir du moment où le produit répond aux exigences, le concepteur peut améliorer sa solution sans attendre l'intervention des experts.

Une fois que le concepteur a réalisé toutes les modifications nécessaires pour faire converger sa solution vers les exigences de l'OEM, il fait appel aux experts métier pour valider son travail. Les experts réalisent alors la dernière activité de la méthodologie, la validation, et décident si le modèle réalisé est suffisant pour sortir du périmètre de la

méthodologie et aller vers les services en aval. Sur la figure 146, la dernière proposition de l'entreprise à fait l'objet de discussions avec l'OEM et a été jugée apte. La solution a été reprise par des calculs d'écoulement. Les résultats n'ont pas montré de problèmes de perte de charge et le produit a été finalement validé (Fig. 140).

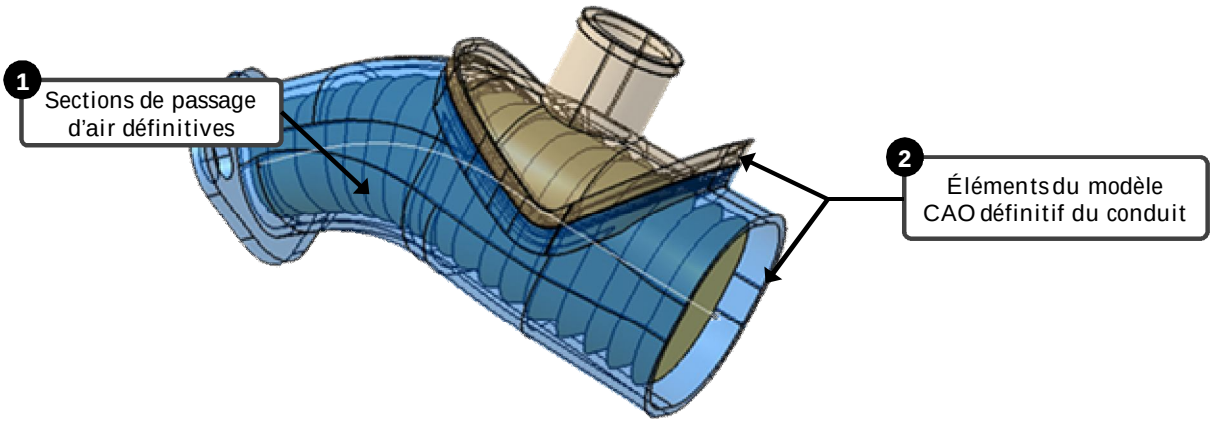


Fig. 139. Modèle CAO définitif et sa dernière vérification de sections.

3.3. Résultats obtenus et discussions

L'un des intérêts principaux des vérifications dans FaBK est de pouvoir les réaliser en continu, parallèlement au travail de définition de la solution. Les vérifications étant automatisées sous forme de scripts, un autre intérêt est que les résultats sont quasiment immédiats. Le concepteur peut ainsi les interpréter et résoudre les éventuels problèmes immédiatement après la vérification. Sans l'existence de ces automatisations, la vérification intervient en phase finale, elle est réalisée une fois que le concept est plus ou moins figé. Dans ce cas, toute modification complique le développement et entraîne des retards. Avec les scripts inclus dans FaBK, la vérification devient source d'amélioration continue, le concepteur peut le réaliser autant de fois qu'il le considère nécessaire pour définir sa solution. La figure 141 fait un état des lieux du nombre de vérifications réalisées avant d'arriver à une loi d'évolution de sections qui satisfaisait les exigences. Le concepteur a dû réaliser **37 vérifications, donc 36 modifications**, avant de trouver la bonne architecture produit qui donne l'évolution souhaitée ainsi que le volume du conduit nécessaire.

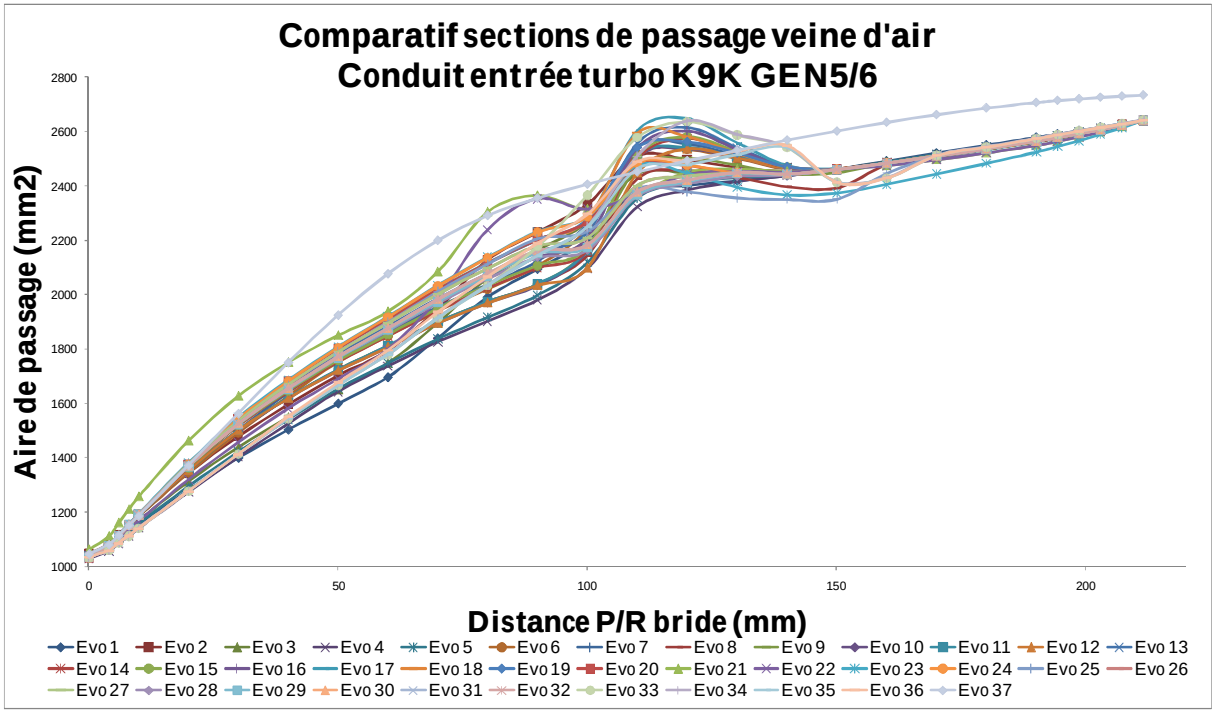


Fig. 140. Nombre de vérifications pour un le conduit d'air entrée turbocompresseur K9K.

De la même façon que pour les autres éléments de la méthodologie, nous avons analysé le travail des concepteurs pour réaliser ce type de modifications. Nous constatons que pour une vérification de sections, plus le produit analysé est complexe, plus cela nécessite de temps pour la faire. Cette vérification se réalise sur tous les produits qui comportent des sections tubulaires (conduits d'air, tubulures de répartiteur d'air, coudes, etc.). Les paramètres de longueur de la section tubulaire et de nombre de sections à réaliser augmentent le temps nécessaire pour faire les analyses. En moyenne, un concepteur expérimenté peut réaliser une vérification d'un produit comme le conduit d'entrée turbo K9K en 3 heures, tandis qu'un produit complexe et de grande taille (un répartiteur d'air à plusieurs tubulures) peut prendre jusqu'à **10 heures**. En revanche, une vérification automatique par script ne prend plus que quelques secondes, quelle que soit la géométrie du produit vérifié, c'est-à-dire entre 0,14% et 0,04% du temps nécessaire pour le faire traditionnellement.

Dit autrement, la réalisation traditionnelle des 37 vérifications du conduit d'entrée turbo K9K auraient pris **111 heures**, dans le cas le plus optimiste. Réellement, il y aurait eu moins de vérifications, et la réponse aux exigences du client moins précise. La démarche FaBK prouve sa valeur ajoutée dans ce cas précis, non pas en économisant des heures de développement, mais en permettant une réponse aux exigences plus détaillée, et donc de meilleure qualité.

4. Application de développement et contrôle d'un cordon de soudure

De la même manière que la section précédente, nous présentons ici un dernier élément de conception avancée des produits : les applications KBE. Elles donnent aux concepteurs des modèles CAO préconstruits, intégrant déjà les savoir-faire de l'entreprise, afin de les aider à développer leurs produits plus rapidement. Nous

proposons donc de présenter la démarche de développement et de contrôle d'un cordon de soudure.

4.1. Problématique

La dernière expérimentation industrielle que nous allons présenter est le développement et la vérification d'un cordon de soudure pour un répartiteur d'air (Fig. 142). Pour cette expérimentation nous avons utilisé un exemple de répartiteur d'air , un répartiteur d'air pour un moteur 4 cylindres. Les répartiteurs d'air étant des produits très complexes, leur fabrication en une seule pièce est impossible, ils sont donc fabriqués en deux, trois, voire quatre pièces et assemblés par la suite. Le processus d'assemblage le plus couramment utilisé pour ce type de produits est la soudure, plus précisément la soudure par vibration.

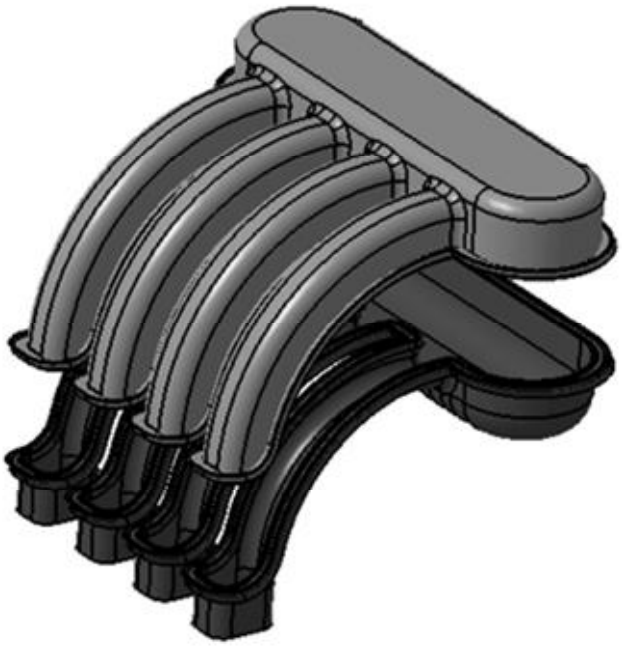


Fig. 141. Répartiteur d'air à développer en deux parties, partie supérieure et partie inférieure.

Traditionnellement, une soudure est développée **manuellement**. Les concepteurs analysent la pièce, décident comment découper le répartiteur (à l'aide d'un expert métier), tracent les profils de bordure de leur cordon de soudure, génèrent toutes les géométries, et ensuite font quelques coupes visuelles pour analyser leur solution et estimer si elle répond bien aux exigences de l'OEM ainsi qu'à celles des experts métier.

Dans les sections suivantes, nous proposons de présenter l'application KBE développée pour la génération de cordons de soudure, ainsi que le script de vérification pour déterminer si, une fois que le concepteur aura modifié le modèle CAO produit par l'application KBE et définit sa solution, le cordon de soudure respecte toujours les règles de fabrication établies en fonction des géométries des dents de soudure.

4.2. Protocole expérimental

Le développement d'un produit par le biais d'une application commence par l'initialisation du concept (une fois que la phase d'analyse des exigences est complétée). Comme nous avons déjà présenté le développement d'un conduit d'air avec l'outil de gestion KADViser, nous allons plutôt nous concentrer pour les cordons de soudure sur les modèles CAO paramétriques qui sont utilisés pour la partie de modélisation et définition de la solution. Les modèles CAO paramétriques des cordons de soudure sont des modèles « avancés », démunis de leur contexte et préparés pour accepter le contexte que le concepteur leur donnera. Dans CATIA V5, nous pouvons les trouver dans des bibliothèques des éléments KBE (Fig. 143).

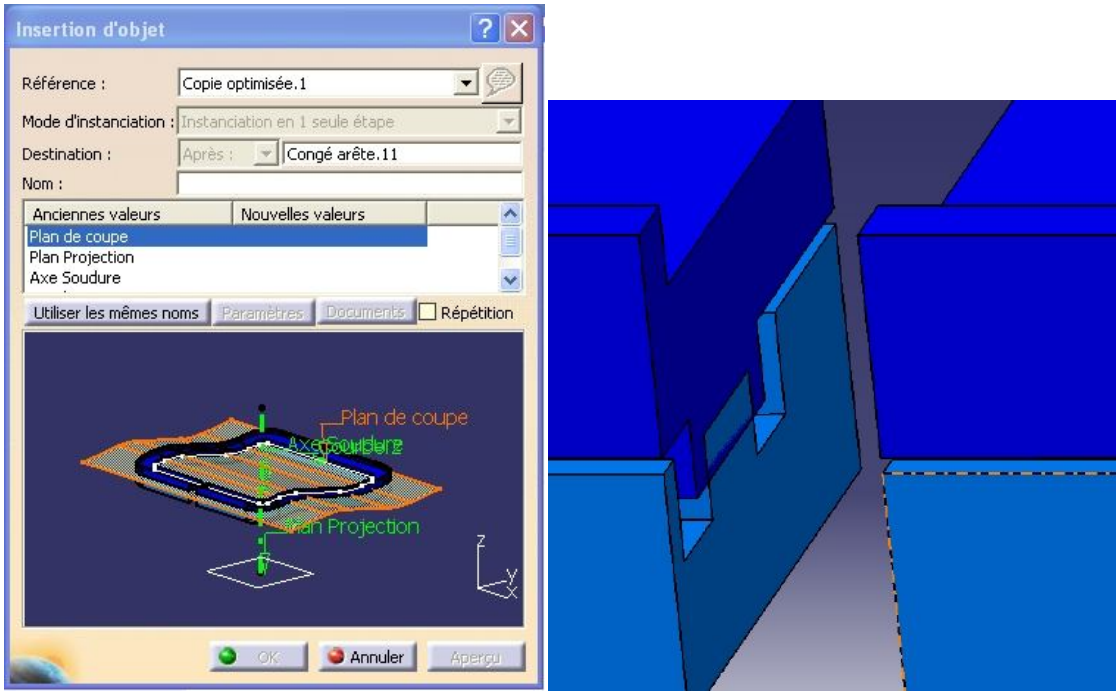


Fig. 142. Modèle « intelligent » du cordon de soudure et image de détail du cordon.

Ces éléments reçoivent leurs paramètres à partir des renseignements fournis par l'outil de KBE KADViser, et sont ensuite utilisés par les concepteurs pour construire la soudure suivant les profils spécifiques aux produits en développement. Une fois que le modèle géométriquement avancé est correctement appliqué au produit en cours, le concepteur le reprend pour définir sa solution en détail. Pour ce-faire, le concepteur adapte tous les aménagements demandés par les exigences, tels que des passages de visseuses, des évidements ou des décalages de plans de joint (Fig. 144). Comme ces aménagements sont spécifiques à chaque produit développé, ils ne peuvent pas être inclus dans les modèles CAO avancés, mais ils sont prévus et leur intégration n'est pas extrêmement compliquée.

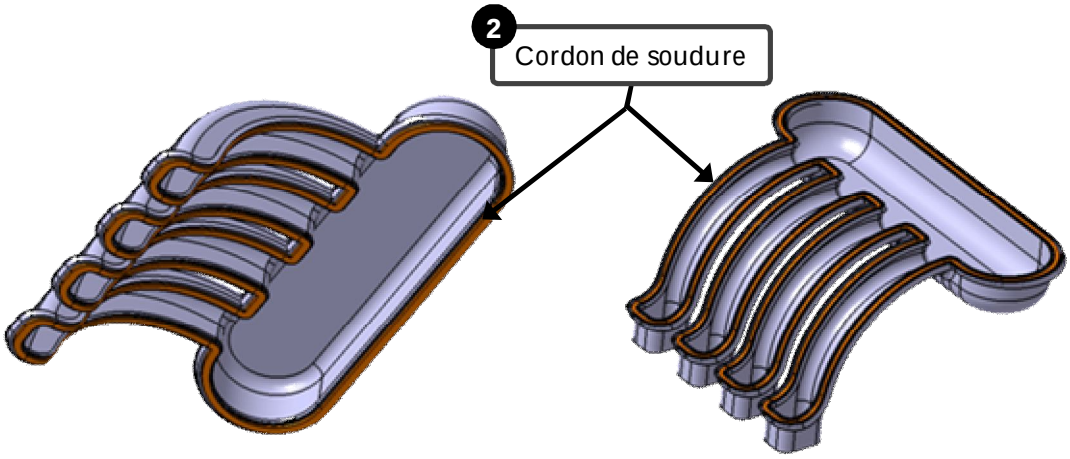


Fig. 143. Répartiteur d'air et cordon de soudure analysés.

Une fois que le concepteur a fini ses aménagements du produit, il peut faire appel à la **vérification automatique** de son cordon de soudure. Comme nous l'avons présenté lors du chapitre précédent, cette vérification demande au concepteur d'établir les éléments à vérifier. Puis, il vérifie pas à pas le cordon de soudure de toute la pièce et relève les paramètres importants à observer (Fig. 143). Dans un premier temps, ces vérifications serviront au concepteur pour constater des déviations par rapport aux règles métier lors des aménagements de la géométrie du répartiteur. Dans un second temps, les vérifications servent aux experts métier pour valider la conformité du cordon de soudure développé avec les savoir-faire détenus. Un dernier bénéfice corollaire, mais pas pour autant moins important, est que les tableaux générés par la vérification sont systématiquement stockés avec les modèles CAO du répartiteur. Ceci est important car ils deviennent un historique du développement du projet, selon les phases du cycle de vie. L'idée en perspective est de pouvoir les ranger dans un système de PLM capable de faire des comparaisons de produits, à partir des paramètres se trouvant dans les vérifications.

Les résultats des analyses présentés aux concepteurs concernent les contraintes géométriques à respecter : la hauteur des dents de soudure, les volumes, etc. Ces informations restent confidentielles car issues d'un des cœurs du métier de l'entreprise. Une fois que les experts ont validé l'adéquation des cordons de soudure aux règles métier, le produit peut passer aux étapes suivantes de son développement, c'est-à-dire les calculs, le prototypage, ou même le développement de son outillage de fabrication (d'injection ainsi que de soudure).

4.3. Résultats obtenus et discussions

De la même façon que pour les autres éléments de développement avancé des produits proposés par la méthodologie, l'utilisation des applications KBE induit un gain de temps considérable par rapport aux méthodes de développement traditionnels. Nous observons un gain d'approximativement **90%** du temps de développement d'une solution. Ce gain est moins élevé que pour d'autres outils car la mise en forme par le concepteur est plus importante. Un détail important, surtout sur la partie de vérification, est que le gain de temps ne se traduit pas nécessairement comme moins de temps dédié au produit. La vérification d'un cordon de soudure de façon traditionnelle étant extrêmement coûteuse

en temps, cette vérification ne se réalisait que rarement et sous une demande spécifique. À l'aide des outils développés, la vérification est devenue systématique, tous les produits développés sont vérifiés sans faute. Ceci fournit une garantie que le travail est réalisé par le bureau d'études, et que les produits sont réalisés de manière conforme aux règles métier établies.

Un autre élément utile et important de l'utilisation de la méthodologie est que nous avons prévu l'éventuelle modification des règles, non seulement issue des experts, mais aussi lors du développement courant des projets (cf. *Chapitre 3, Section 5*, à la page 95). Lors de la validation par les experts du répartiteur d'air, ceux-ci ont constaté un détail à risque qui pourrait empêcher le bon déroulement de la fabrication des dents de soudure inclinés sur une longue portée (Fig. 145). Celle-ci ne faisant pas partie des règles de vérification initiales, la vérification n'a soulevé aucun avertissement lors de son analyse. Néanmoins, les experts ont constaté qu'une soudure avec cette configuration inclinée pourrait engendrer des risques de glissement lors du processus de mise en forme.

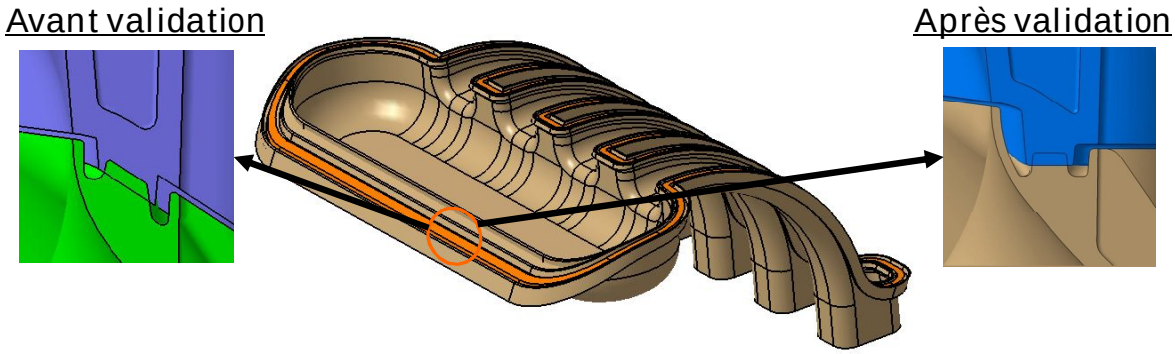


Fig. 144. Zones de soudure vérifiés mais portant un risque (à gauche) et après validation et modification (à droite).

Les experts ont donc lancé une **demande de modification** des règles métier. Une nouvelle capitalisation des connaissances sur le processus s'est ainsi activée. Après des discussions avec les acteurs métier responsables, une nouvelle règle a été établie et les scripts de vérification ont été modifiés pour en tenir compte. Les applications KBE n'ont pas été modifiées car, en principe, l'existence d'une inclinaison dans les cordons de soudure ne pose pas de problèmes de fabrication, sauf sur une longue portée de soudure. Le répartiteur d'air a été modifié pour répondre à cette nouvelle règle, manuellement cette fois-ci. Dorénavant, les nouveaux produits analysés devront la respecter.

5. Résultats généraux des expérimentations

Nous avons présenté, lors de cette section, l'utilisation des applications KBE et des scripts de vérification proposés par la méthodologie FaBK pour le développement avancé de produits. Le principal gain généré par l'utilisation de la méthodologie est un gain d'au moins **90%** du temps de développement. Ce gain se traduit plus concrètement par des produits répondant mieux aux exigences et plus robustes, car ils respectent les savoir-faire en jeu.

Précédemment, nous n'avons présenté que l'expérimentation avec une partie des outils développés pour la méthodologie FaBK : des outils KBE, d'optimisation ou de

vérification. Les bénéfices qu'ils proposent sont d'ores et déjà évidents, mais nous ne pouvons pas laisser de côté les autres applications mises à disposition. Nous proposons de faire un point sur la globalité des gains générés par les divers éléments de la méthodologie lors de la section suivante.

5.1. Utilisation de toutes les applications KBE chez Mark IV SM

Il est possible de mesurer **l'impact des outils et applications** KBE par le nombre de fois dont les concepteurs s'en servent. Une des tâches réalisées, durant le processus de conception et de développement des applications, a été d'analyser le travail des concepteurs pour mesurer le temps dédié au développement des produits [Bashir et Thomson, 2001]. Une fois les applications lancées, ce même suivi a été réalisé pour estimer le gain de temps obtenu. La figure 146 montre le nombre d'utilisations pour les applications les plus exploitées par les concepteurs.

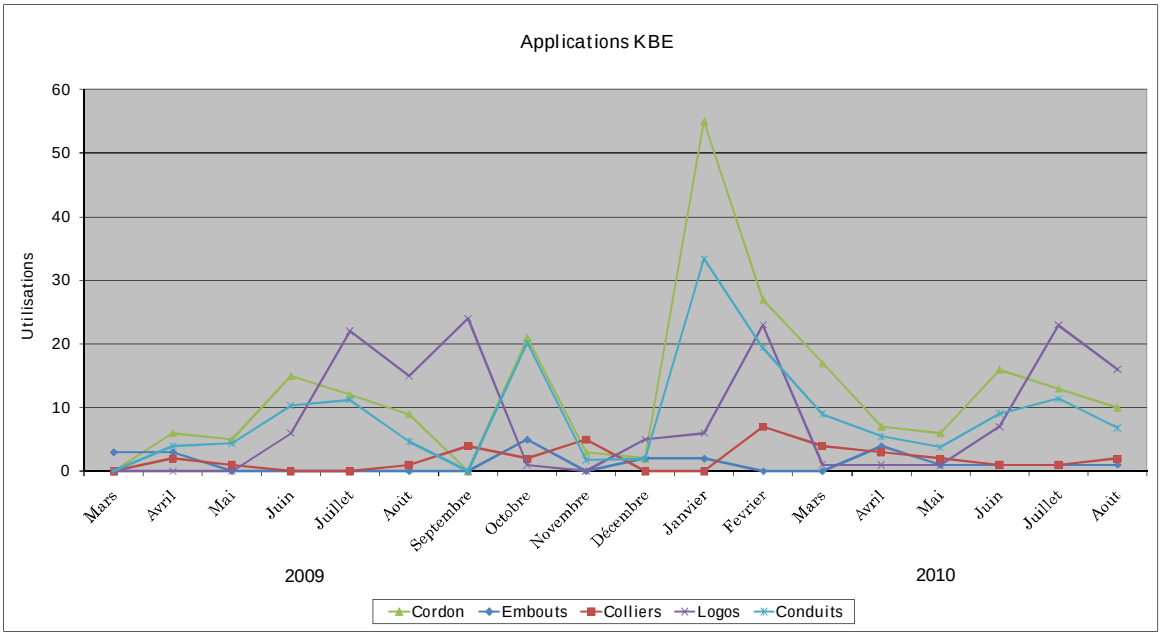


Fig. 145. Nombre d'utilisations par application KBE

Pour utiliser les applications KBE développées, nous avons pu constater que les concepteurs, dûment formés sur leur utilisation, prenaient approximativement 10% du temps traditionnellement dédié à réaliser ces activités. Par exemple, développer un nouveau cordon de soudure avec l'application KBE pour un produit prend **1 heure** en moyenne, au lieu de **10 heures** par conception traditionnelle. Ceci représente un gain considérable en efficience[15] pour les concepteurs. Le tableau 15 illustre le nombre d'heures gagnées sur la phase de développement de produits, comparées avec le nombre d'heures dépensées réellement, en travaillant avec les outils KBE.

[15] L'efficience est la qualité d'un rendement permettant de réaliser un objectif avec le minimum de moyens (temps, matériels, humains, etc.) engagés. Source : Wikipedia.

Tab. 15. Heures économisées, par rapport à la conception traditionnelle des produits.

Application KBE	Nombre d'heures dédiées en conception avancée	Nombre d'heures dédiées en conception traditionnelle
Soudure	1h	10h
Embouts	0,5h	4h
Colliers	0,25h	1,5h
Logos	0,25h	3h
Conduits	3h	15h

La figure 147 permet d'évaluer l'impact que ces heures de développement économisées peuvent représenter. Sur le mois de janvier 2010, nous pouvons observer un nombre d'utilisations des outils KBE équivalent à **1075** heures. Ceci ne signifie pas que l'entreprise peut se dispenser de **8 personnes** (au taux de 35 heures par semaine), mais que les produits développés ont reçu d'autant plus d'attention lors de leur développement. En effet, les concepteurs auront dédié moins de 200 heures sur les activités pour lesquelles nous avons développé des outils « hautement productifs », sur le mois de janvier, au lieu de 1075 à le faire de manière traditionnelle. L'intérêt d'introduire ces outils n'est pas d'économiser, mais de mieux investir le temps dédié à la conception de nouveaux produits.

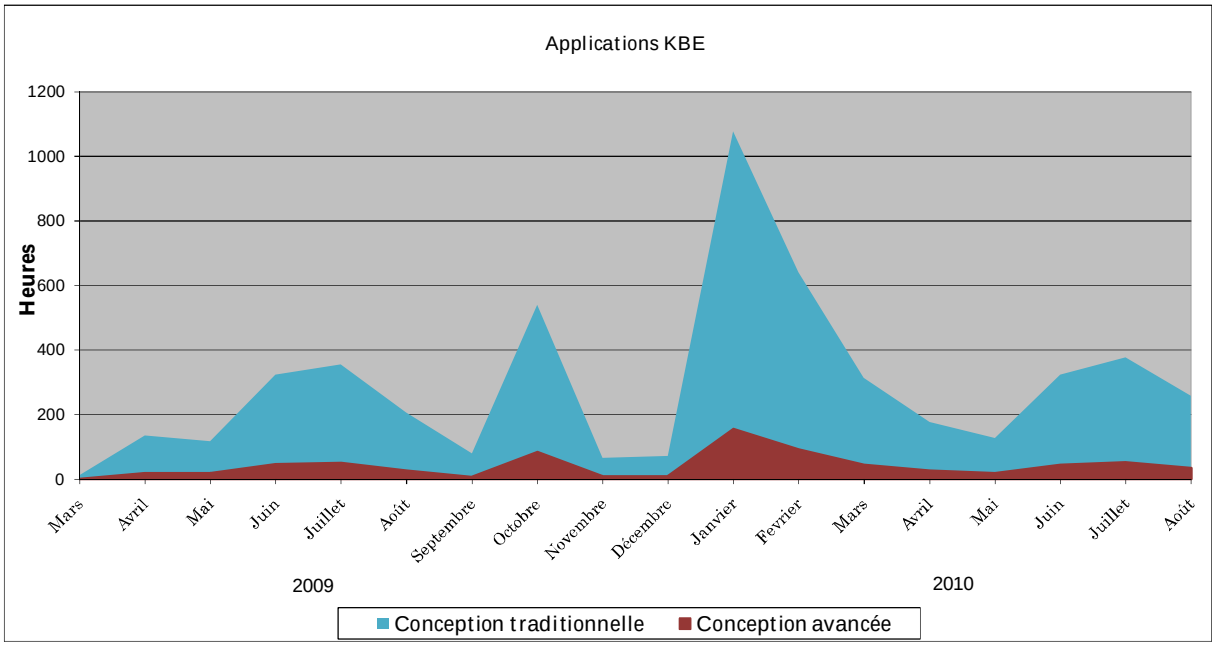


Fig. 146. Addition d'heures gagnées avec l'utilisation des outils KBE.

Chiffres réels obtenus au sein du BE grâce à l'analyse des indicateurs (logs) que nous avons mis en place derrière chaque application KBE FaBK transmise aux concepteurs. À chaque utilisation, le fichier de suivi du taux d'utilisation est incrémenté et sauvegardé.

5.2. Utilisation de tous les scripts de vérification chez Mark IV SM

De la même façon que pour les applications KBE, les concepteurs ont été suivis pour estimer leur temps de travail et le comparer avec le temps pris par les applications par script. Nous avons développé plus d'applications que celles que nous avons décrites précédemment : des applications pour respecter les rayons de congé, selon le client, du

modèle géométrique (les calculs, les bureaux de méthodes, les moulistes, etc.), des applications pour faire des mises en place pour tests de débattement, entre autres. La figure 148 illustre le nombre d'utilisations de chaque script développé.

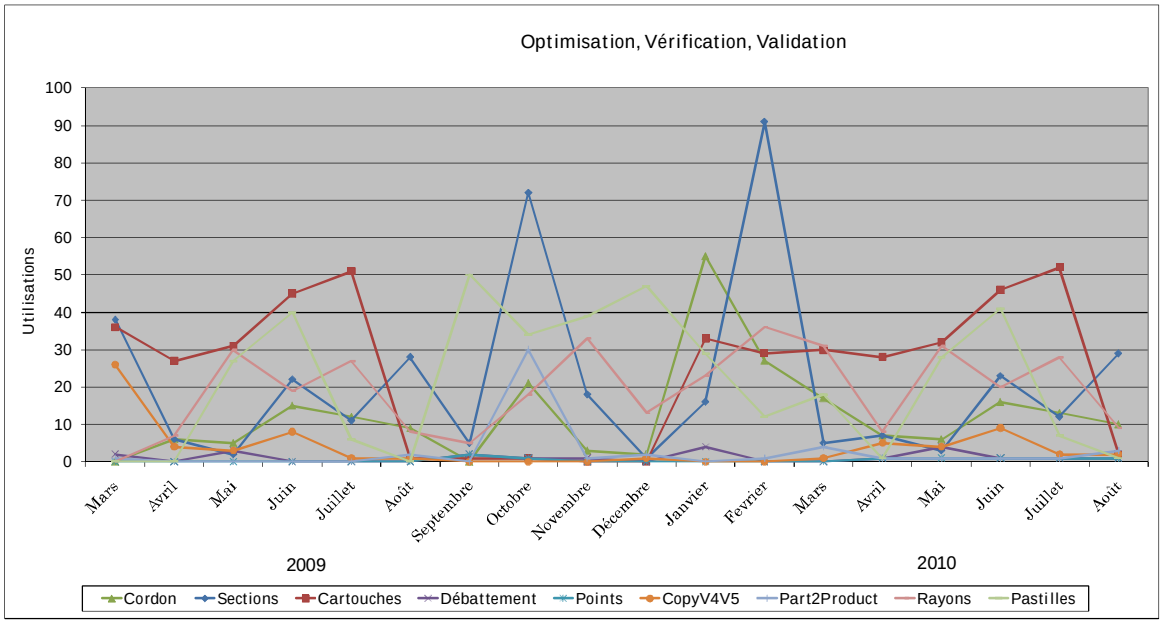


Fig. 147. Nombre d'utilisations par script.

Aussi, comme précédemment, nous avons calculé le nombre d'heures dédiées par les concepteurs, et nous les avons comparées avec le temps pris par les scripts de vérification. Le tableau 16 met en évidence un comparatif entre les heures qu'un concepteur passe par utilisation d'un des scripts, contre les heures qu'il aurait passé à le faire de façon traditionnelle.

Tab. 16. Heures économisées, par rapport à une vérification traditionnelle.

Script	Nombre d'heures dédiées en conception avancée	Nombre d'heures dédiées en conception traditionnelle
Soudure	1	10h
Sections	0,1	3h
Cartouche	0,1	4h
Débattement	1	6h
Points	0,1	3h
CopyV4V5	0,01	0,5h
Part2Product	0,01	1h
Rayons	0,25	1,5h
Pastilles	0,3	9h

La figure 149, à la page suivante, montre un graphique comparant le cumulatif des heures passées réellement par les concepteurs (en utilisant des scripts) et le cumulatif des heures qu'ils auraient passé à faire les mêmes manipulations de manière traditionnelle. Sur le tableau nous pouvons observer une remarquable économie de temps. Globalement, sur les mois étudiés, les concepteurs auront dédié 531 heures au travail avec les scripts, au lieu de 9357 heures qu'ils auraient dédié, s'ils avaient travaillé en conception traditionnelle.

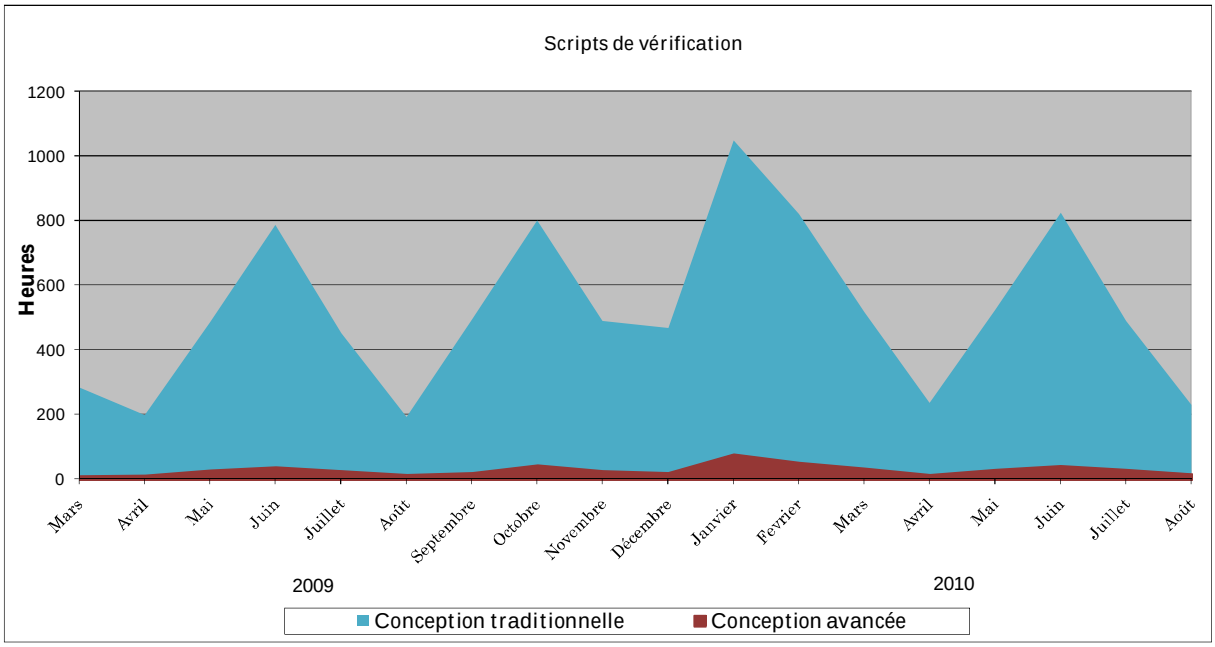


Fig. 148. Addition d'heures gagnées avec l'utilisation des vérifications par script.

De la même manière que pour les applications KBE, les vérifications par script on été fournies des indicateurs pour garder une trace de leur utilisation. Nous avons analysé ces fichiers de log pour construire les figures d'utilisation des scripts.

6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons appliqué notre contribution scientifique, à savoir la méthodologie FaBK, les divers outils ainsi que les applications développés pour le mettre en service, à trois cas spécifiques de l'entreprise. Ces trois expérimentations nous ont permis d'évaluer la validité de nos propositions face au travail continu du bureau d'études. Nous avons à la fois étudié l'impact de nos outils et applications proposés sur le développement des produits fait par l'entreprise, mais aussi présenté l'ouverture de FaBK dans le cas de nouvelles informations et de règles qui remettent en cause les savoir-faire capitalisés.

L'analyse avec du recul de l'application de la méthodologie, ainsi que de ses divers outils et applications, nous a donné aussi des voies de développement futur. L'impact des outils sur le développement de produits courant, dans le cadre de l'ingénierie routinière, laisse prévoir leur application sur d'autres familles de produits, sur d'autres procédés de fabrication et avec d'autres acteurs métier, ceci afin d'élargir son champ d'action vers une vision d'entreprise étendue. Nous présenterons certaines de ces perspectives de développement futur dans la conclusion générale.

APPORTS DE LA THESE, CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

"It is not enough to prove something, one also has to seduce or elevate people to it. That is why the man of knowledge should learn how to speak his wisdom and often in such a way that it sounds like folly!"

Nietzsche

CONTENU DU CHAPITRE

1. **Conclusion générale 187**
2. **Perspectives de recherche 189**

L'objectif de ce dernier chapitre est de faire la synthèse de notre contribution scientifique, et d'apporter des perspectives de recherche, permettant de concrétiser et valider nos propositions, et enfin, d'élargir les domaines et champs d'action abordés dans ce mémoire. De ce fait, la première partie apporte une conclusion générale sur l'ensemble des propositions développées dans nos travaux de recherche. La seconde partie décrit, quant à elle, les perspectives de travaux donnant suite à nos propositions.

1. Conclusion générale

Nous avons réalisé nos travaux de recherche dans le cadre du projet de recherche et de transfert de technologie baptisé **CoDeKF**. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés aux domaines de la capitalisation des connaissances, la conception pour la fabrication et de l'ingénierie à base de connaissances. Bien que les questions d'intégration du couple produit-process aient fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment dans le domaine de la fabricabilité [Maropoulos *et al.*, 2000 ; Ong *et al.*, 2003 ; Molcho *et al.*, 2008 ; Demoly, 2010], nous nous sommes focalisés sur les informations liant les procédés de fabrication et le processus de conception et de développement des produits. En effet, les problématiques de fabrication du produit nécessitent d'être considérées le plus tôt possible dans le processus de conception et de développement des produits, car elles ont un impact non négligeable sur le travail des concepteurs et le respect des exigences du client (interne ou externe).

C'est pour cette raison que nos travaux de recherche ont consisté à proposer une approche de conception intégrant les problématiques de fabrication du produit dès les phases amont du processus de conception et de développement, en lien avec les données techniques du couple produit-process.

Dès lors, le premier chapitre a présenté les enjeux globaux et les contextes industriel et scientifique qui ont permis d'établir le périmètre et la problématique de nos travaux de recherche. C'est à travers la définition du contexte et des enjeux que nous avons pu définir nos orientations de recherche.

Le deuxième chapitre a présenté une étude bibliographique des travaux existants au regard de la problématique posée. Nous avons abordé les domaines de la conception intégrée, de la conception pour la fabrication, de la gestion des connaissances et de l'ingénierie à base de connaissances du couple produit-process. Cet état de l'art nous a permis de nous placer, de manière précise, parmi les travaux majeurs dans les domaines concernés. Il en a résulté des besoins en une méthodologie de développement de produits intégrée, cohérente et ouverte, capable de lier les informations sur divers aspects du produit et du processus de fabrication, avec les acteurs métier impliqués.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté notre contribution scientifique. Tout d'abord, celle-ci consiste en la définition d'une méthodologie de conception orientée fabrication, baptisé **FaBK** (*Design for **Fa**brication **B**ased on **K**nowledge*), qui vise à intégrer des savoir-faire et règles métier du couple produit-process, afin d'aider les concepteurs lors de leur travail de développement de produits. Cette méthodologie FaBK se décompose en deux phases, couvrant les aspects de capitalisation et de mise en service des connaissances à des fins de développement avancé de produits. La première phase, la

capitalisation des connaissances, décrit nos déclinaisons de diverses méthodologies de capitalisation et formalisation des connaissances du couple produit-process, pouvant servir au travail de développement de produits (cf. *Chapitre 3*). La seconde phase, la conception avancée de produits, présente notre approche pour la mise en application des connaissances lors du développement de produits. Pour ce faire, nous avons construit des applications diverses telles que des outils de gestion KBE, des modèles CAO paramétriques et des scripts de vérification des règles métier (cf. *Chapitre 4*). L'objectif de la méthodologie est de guider les concepteurs, lors de leur travail courant, à l'utilisation des savoir-faire pour fournir des produits respectant du premier coup l'ensemble des règles métier. Nous avons décrit la méthodologie de manière ouverte, afin de faciliter la mise à jour et la modification des règles métier capitalisées, lors des nouveaux développements.

Le quatrième chapitre nous a permis de présenter le développement des divers outils, applications et scripts, nécessaires pour la mise en application de la méthodologie FaBK. Commençant par les outils de gestion (KADVIser) et les applications **KBE** associés, ceux-ci permettent aux concepteurs de démarrer le développement de nouveaux produits avec des modèles robustes, paramétrés et ouvertes. Nous avons également intégré une boucle d'optimisation des modèles CAO paramétrés, à l'aide des outils CATIA V5 et MATLAB, afin d'améliorer certaines des solutions proposées. Les scripts de vérification, à leur tour, permettent de garantir que, les concepteurs peuvent toujours contrôler la cohérence de leurs solutions par rapport aux règles métier préalablement capitalisées, après avoir défini leurs solutions et modifié leurs modèles CAO. Nous avons exposé l'utilisation de l'outil KBE KADViser pour gérer les applications KBE, du logiciel CATIA V5 pour le développement des modèles géométriques avancés, car paramétrés et réutilisables, ainsi que le langage **V**isual **B**asic for **A**pplications (VBA) dans sa version couplée à CATIA V5, pour le développement des scripts de vérification des divers règles métier capitalisées. L'utilisation conjointe de toutes ces applications et scripts permettent aux différents acteurs métier impliqués d'interagir à la fois avec les connaissances métier générées par l'entreprise et les produits développés. C'est grâce à cette interaction que nous proposons de faciliter l'interaction entre les informations et connaissances issues du couple produit-process et le processus de conception et de développement « hautement productif » de nouveaux produits routiniers.

Finalement, dans le cinquième chapitre, nous avons appliqué la méthodologie FaBK à trois produits développés industriellement, afin d'illustrer au mieux la validité de notre contribution. Pour ce faire, nous avons décrit l'enchaînement des activités de FaBK et la transformation des données, de la réception du CdC de l'OEM jusqu'à la validation du modèle CAO par les experts métier. Chacun des produits que nous avons présentés nous a permis d'exposer d'une manière différente l'impact de la méthodologie FaBK, sur le processus de conception et de développement du produit, la vérification d'un produit vis-à-vis de ses exigences, le développement d'une partie fonctionnelle d'un produit et sa vérification après modifications. Ceci nous a permis d'étudier l'impact de la méthodologie sur le développement des produits de l'entreprise, mais aussi la robustesse et l'ouverture de la méthodologie FaBK dans le cas d'une remise en cause des connaissances capitalisées. Nous avons évalué l'acceptation et la validité de notre proposition par son

intégration à la façon de travailler du bureau d'études, où les acteurs métier l'ont intégrée à leur routine de développement de produits.

En résumé, notre contribution portant sur la conception orientée pour la fabrication et la gestion et utilisation des informations du couple produit-process appliquées à l'ingénierie du produit pour le développement avancé, se compose d'une méthodologie FaBK intégrant deux activités principales, la capitalisation des connaissances et la modélisation géométriquement avancée de produits. Dans un premier temps, nous pouvons souligner l'originalité de la contribution, car elle permet de s'intégrer, par sa simplicité et son ouverture, au sein du processus de conception et de développement, sans causer une rupture par rapport aux méthodes traditionnelles d'ingénierie. Dans un second temps, la méthodologie comprend des mécanismes de mise à jour, permettant d'actualiser les connaissances et les modèles capitalisés, provenant soit de l'utilisation routinière, soit de l'intervention des experts métier lors de la validation. Plusieurs applications KBE interfacés à un système expert ont été adaptées et incorporés à la méthodologie, afin de créer des applications et scripts capables d'assurer du premier coup, et à moindre effort un développement de produits conformes aux règles métier. La section suivante vise à apporter nos perspectives de recherche en vue de valider, d'améliorer, et d'élargir nos propositions.

2. Perspectives de recherche

Notre contribution pour la capitalisation et mise en service des connaissances du couple produit-process ouvre des perspectives multiples, tant dans le domaine de la capitalisation des connaissances que dans celui de la conception orientée pour la fabrication. Les perspectives proposées sont liées aux objectifs fixés dans la méthodologie FaBK : l'intégration de l'ingénierie de fabrication au sein du processus de conception et de développement et la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM. Nous proposons ici d'apporter un regard extérieur à nos travaux, afin de proposer des perspectives permettant soit d'améliorer, soit d'adapter nos travaux à d'autres domaines de recherche.

La première perspective a pour objectif d'enrichir la base de connaissances en extrapolant la méthodologie FaBK à d'autres couples produit-process. Sur la base de nos travaux de recherche au sein d'un bureau d'études d'une entreprise, les connaissances acquises et les applications développées correspondent aux domaines de l'automobile et du plastique. Le but est d'élargir le champ d'action de la méthodologie en incluant d'autres types de produits, de connaissances et de procédés. Plus globalement, le but est de valider l'ouverture et l'adaptabilité de notre proposition dans d'autres domaines, caractérisés par d'autres couples d'informations technologiques produit-process.

La deuxième perspective concerne le travail que nous avons réalisé pour intégrer des algorithmes d'optimisation. Nous avons intégré, avec succès, des algorithmes d'optimisation pour la configuration des soufflets de conduit d'air. Néanmoins, de nombreux éléments peuvent être améliorés en utilisant de tels algorithmes : le positionnement des soufflets, leur forme, voire la forme des conduits eux-mêmes. Le procédé d'extrusion soufflage, utilisé pour la fabrication des conduits d'air, est un sujet

qui suscite beaucoup d'intérêt auprès des chercheurs. Il s'agit d'un procédé où la matière subit plusieurs changements d'état, du solide dans les granulés, vers du liquide dans la paraison, vers du solide déformée lors du soufflage. La caractérisation précise de chacune de ces étapes n'est toujours pas réalisée. Un couplage approfondi des algorithmes d'optimisation et des calculs par éléments finis avec les informations du couple produit-process de ce procédé nous permettrait de définir des têtes de filière, des paraisons et des outillages mieux optimisés dès la phase de conception préliminaire des conduits. Nous envisageons également d'optimiser des modèles CAO associés à d'autres produits, déjà paramétrés et inclus dans notre base des connaissances. Pour le moment, la configuration des modèles CAO reste aux mains des concepteurs. Nous envisageons donc de les aider à mieux développer leurs solutions.

La troisième perspective concerne la méthodologie FaBK et ses activités. Elle porte sur l'automatisation et la standardisation des activités de capitalisation et de modélisation de produits. Nous avons fait le choix de décrire notre proposition à l'aide du formalisme fourni par le langage SysML. L'une des raisons principales concernant le choix de ce formalisme réside, comme nous l'avons exprimé précédemment, dans ses possibilités d'élaboration de diagrammes d'activités enrichis. Ces diagrammes SysML permettent de décrire en détail les activités, leur périmètre, les parties et acteurs impliqués, et les entrées / sorties des flux de contrôle et d'objets. À l'aide de ces informations, il est possible de formaliser la méthodologie et de décrire pas à pas les étapes nécessaires pour l'adapter à un système informatique. Jusqu'à présent, les activités de la méthodologie sont traitées individuellement. Les différents acteurs métier doivent intervenir manuellement pour capitaliser les connaissances ou exporter des données vers les applications KBE. L'un des intérêts des systèmes PLM étant de faciliter l'échange, le traitement et la pérennisation des informations et connaissances, la formalisation de FaBK sous forme d'un outil informatique permettrait de l'insérer efficacement dans le flux d'information de l'entreprise étendue. Cette formalisation permettrait une éventuelle intégration des activités situées plus en aval, au delà de la fabrication, lors des phases préliminaires de développement de produits.

Ceci nous amène à la dernière perspective : l'élaboration d'un modèle et son intégration dans un environnement PLM. Nos traitements des informations et des acteurs métier reposent sur des modèles tels que MD-MV [Gomes et Sagot, 2002], sur lequel le système PLM ACSP [Gomes *et al.*, 1999] repose, ou MUVOA [Demoly, Monticolo*, et al.*, 2010]. Dans nos travaux, nous avons identifié des acteurs métier et leurs responsabilités, afin d'intégrer leurs activités au sein d'un système de partage d'informations et d'activités en entreprise étendue. Ayant proposé une méthodologie de travail qui est adoptée et utilisée par un bureau d'études, il est nécessaire de proposer un modèle de traitement des informations du couple produit-process lié à notre méthodologie qui s'intègre aux modèles MD-MV et MUVOA. Liée à cette perspective nous envisageons aussi des démarches vers l'intégration des règles et connaissances métier avec des méthodologies de KCM [Vernier *et al.*, 2010] pour la mise à jour semi-automatique des règles, paramètres et contraintes dans les applications KBE. Cette étape conditionne l'utilisation de la méthodologie FaBK dans une démarche plus globale de type PLM.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Schéma synoptique de l'organisation de la thèse.....3
Fig. 2. Processus de conception lié au PLM [Pahl et Beitz, 1996 ; Scaravetti, 2004].....8
Fig. 3. Branches d'activités de MARK IV.....12
Fig. 4. Exemple de pièces pour la fonction admission d'air du moteur DV. 12
Fig. 5. Cycle de vie du produit et activités associées (adaptée de [Bissay, 2010]).....16
Fig. 6. Modèle Multi-Domaines, Multi-Vues [Gomes et Sagot, 2002].....21
Fig. 7. Méthodologie générale du projet CoDeKF [Gomes, 2008] et cadre de recherche..22
Fig. 8. De l'ingénierie séquentielle à l'ingénierie intégrée (adapté de [Scaravetti, 2004]). 28
Fig. 9. Séparation entre le service dédié au développement des produits et les services associés aux activités situées en aval (adapté de [Boothroyd, 1994]).....29
Fig. 10. La conception pour la fabrication [Vliet *et al.*, 1999].....32
Fig. 11. Sélection des procédés et des matériaux, adapté de [Ashby *et al.*, 2004].....33
Fig. 12. Modèle d'information Procédés et Matériaux [Gupta et Galloway, 2003].....35
Fig. 13. Approche de Lovatt [Shercliff et Lovatt, 2001]. 37
Fig. 14. Sélection des procédés [Ishii *et al.*, 1990].....38
Fig. 15. Système de conception sous contrainte [Feng et Kusiak, 1995].....40
Fig. 16. Interactions des différents outils XAO au regard du cycle de vie du produit, adapté de [Rachuri *et al.*, 2008].....43
Fig. 17. Interaction entre les parties prenantes impliquées dans la gestion des informations produit-process.....44
Fig. 18. Architecture d'un système expert (inspiré de [Laudon, 2002]).....48
Fig. 19. Étapes d'une démarche de raisonnement à partir de cas, adapté d'[Yvars et Saucier, 1997].....49
Fig. 20. Arbre d'énumération, d'après [Yannou, 1998]. 51
Fig. 21. Impact du KBE sur les tâches principales de développement CAO d'un produit [Skarka, 2007].....55
Fig. 22. Techniques majeures de résolution algorithmique de problèmes d'optimisation [Roy *et al.*, 2008]. 59
Fig. 23. Cartographie des approches DFM selon le cycle de vie et les niveaux de granularité [Toussaint, Lebaal et Gomes, 2010].....62
Fig. 24. Représentation synoptique de l'organisation du chapitre 3. 66
Fig. 25. Légende pour diagramme SysML de cas d'utilisation. 67
Fig. 26. Légende pour diagramme SysML de définition de blocs. 68
Fig. 27; Légende pour diagramme SysML de packages.....68
Fig. 28. Légende pour diagramme SysML d'activités. 68
Fig. 29. Diagramme IDEF-0 niveau A-0 d'un processus de conception intégrée 69
Fig. 30. Cas d'utilisation SysML de la méthodologie FaBK.....70
Fig. 31. Cadre global de la méthodologie FaBK. 75
Fig. 32. Diagramme d'activités SysML de FaBK. 76
Fig. 33. Diagramme de définition de blocs SysML de la méthodologie FaBK.....77
Fig. 34. Diagramme d'activités SysML de la démarche globale de capitalisation des connaissances.....78

Fig. 35. Diagramme d'activités SysML de l'activité de capitalisation des connaissances. 79
Fig. 36. Diagramme d'activités SysML du développement d'un bréviaire des connaissances métier. 80
Fig. 37. Terme métier extrait du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique. 80
Fig. 38. Réseau sémantique des termes du processus de soudure par vibration. 82
Fig. 39. Règle métier extraite du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique. 83
Fig. 40. Diagramme SADT extrait du manuel opératoire du bréviaire des connaissances de la filière métier soudure plastique. 84
Fig. 41. Diagramme d'activités SysML de l'activité de mise en forme des connaissances. 84
Fig. 42. Diagramme de définition de blocs SysML du modèle CAO générique. 86
Fig. 43. Arbre de construction type sous CATIA V5. 87
Fig. 44. Diagramme SADT de la construction d'une IHM KADViser.....88
Fig. 45. Possibilité de configuration de CATIA V5 [Nowak *et al.*, 2004]. 89
Fig. 46. Calculs matriciels automatiques par script. 89
Fig. 47. Diagramme de définition de blocs SysML de la base de connaissances FaBK. .90
Fig. 48. Diagramme d'activités de la démarche globale de modélisation du produit. 92
Fig. 49. Diagramme de définition de blocs SysML du produit. 93
Fig. 50. Diagramme d'activités SysML de la génération du concept optimisé. 94
Fig. 51. Détail de retour (à gauche issu d'une validation, à droite impactant la capitalisation des connaissances) extrait du modèle global à la page ###. 95
Fig. 52. Diagramme de définition de blocs SysML des objets utilisés par les activités principales de la méthodologie FaBK. 96
Fig. 53. Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre. 101
Fig. 54. Conduit RAS/BP dans son environnement moteur.....104
Fig. 55. Conduit RAS/BP brut avec éléments supplémentaires. 104
Fig. 56. Segments reliés par des coins pour construire une fibre unique. 105
Fig. 57. Modélisation du corps du conduit par opération de nervure. 106
Fig. 58. Élément de soudure de type rond et ses éléments géométriques de base. 106
Fig. 59. Produit avec tous les éléments du conduit d'air. 107
Fig. 60. Paramètres pour le pilotage des embouts de raccordement. 107
Fig. 61. Fenêtre principale de l'interface utilisateur. 108
Fig. 62. Interface de définition « manuelle » de fibre neutre d'un conduit d'air. 108
Fig. 63. Fichier d'échange de type tableur faisant le lien entre l'outil de gestion KADViser et le modeleur géométrique CATIA V5. 109
Fig. 64. Mise en place et orientation de support de soudure rond. 110
Fig. 65. Conduit généré et modifiable par le concepteur. 110
Fig. 66. Discrétisation de la fibre neutre d'un conduit d'air. 111
Fig. 67. Détail du script pour déterminer l'axe de gravité et le plan ajusté. 113
Fig. 68. Conduit coupé et transformé par rotation.....113
Fig. 69. Écoulement de la paraison en extrusion soufflage. 114
Fig. 70. Sortie d'air.....115
Fig. 71. Conduit à fabriquer. 116

Fig. 72. La vérification identifie la fibre neutre, l'axe de gravité, et propose les éventuels plans de coupe. 117
Fig. 73. Le corps du conduit est prêt à servir de base d'empreinte 118
Fig. 74. Pavés du bloc contenant l'empreinte. 119
Fig. 75. Découpage du conduit en pavés modulaires. 120
Fig. 76. Empreintes pilotées par KADViser. 120
Fig. 77. Fenêtre initiale de l'analyse de sections. 121
Fig. 78. Exemple du code du script de loi d'évolution. 122
Fig. 79. Distance entre coupes. 122
Fig. 80. Sélection de fibre neutre. 123
Fig. 81. Pièce sectionnée. 123
Fig. 82. Fichier texte avec les résultats d'une analyse. 124
Fig. 83. Tableau et graphique de surface de passage. 124
Fig. 84. Tableau et graphique comparatif des deux analyses. 125
Fig. 85. Répartiteur d'air soudé par vibration. 126
Fig. 86. Page initiale de l'application KADViser. 128
Fig. 87. Caractéristiques du produit. 128
Fig. 88. Cordon de soudure transversal. 129
Fig. 89. Valeurs exportées via un fichier d'échange (mis en forme dans un tableur). ..129
Fig. 90. Modèle CAO avancé du cordon de soudure par vibration. 130
Fig. 91. Principes de conception pour un cordon de soudure en vibration, capitalisés par FaBK. .... **Erreur ! Signet non défini.**
Fig. 92. Paramètres des cordons de soudure. 131
Fig. 93. Paramètre de choix de cordon de soudure. 132
Fig. 94. Règles pour le choix du type de cordon de soudure. 132
Fig. 95. Cordon de soudure de type vibration longitudinale choisi par le concepteur. ..132
Fig. 96. Même profil que sur la figure 95, avec un type de soudure par ultrasons. 133
Fig. 97. Vérification de cordon de soudure 134
Fig. 98. Options d'analyse pour le cordon de soudure. 134
Fig. 99. Vérification des cordons de soudure. 135
Fig. 100. Arbre de l'analyse d'intersections. 135
Fig. 101. Soufflets sur un conduit d'air RAS / BP 137
Fig. 102. Diagramme SADT pour une démarche d'optimisation sous FaBK. 137
Fig. 103. Paramètres influents sur les soufflets d'un conduit. 138
Fig. 104. Diagramme UML des paramètres d'un conduit d'air. 138
Fig. 105. Photo du test expérimental sur soufflet. 139
Fig. 106. Résultats de la flexion sous l'application d'une force. 139
Fig. 107. Loi linéaire de relation entre la déformation et la force appliquée, obtenu avec le logiciel ANSYS. 140
Fig. 108. Modèle numérique des soufflets en flexion : le déplacement élastique en flexion de la pièce soumise à un effort, est mis en évidence. 140
Fig. 109. Soufflet maillé pour les tests théoriques. 141
Fig. 110. Angles des soufflets, x et x2. 142
Fig. 111. Interface d'optimisation sous MATLAB. 143
Fig. 112. Itérations BFGS. 145
Fig. 113. Module en BFGS de l'interface MATLAB. 146

Fig. 114. Convergence des fonctions objectif et contrainte SQP. 148
Fig. 115. Module en SQP de l'interface MATLAB. 149
Fig. 116. Itérations d'optimisation SIMPLEX. 150
Fig. 117. Module en SIMPLEX de l'interface MATLAB. 151
Fig. 118. Module d'optimisation VBA. 152
Fig. 119. Conduit généré par le module VBA d'optimisation avec les résultats d'optimisation MATLAB. 153
Fig. 120. Cycle d'optimisation avec l'IHM KADViser. 153
Fig. 121. Fenêtre de l'IHM KADViser dédiée à l'optimisation des soufflets. 155
Fig. 122. Nouveau produit avec soufflets optimisés. 155
Fig. 123. Conduit situé dans le circuit d'air d'un véhicule. 162
Fig. 124. Procédé d'extrusion soufflage 2D Aspi. 163
Fig. 125. Synoptique du conduit issu du CdC. 163
Fig. 126. Vue de la numérisation fonctionnelle. 164
Fig. 127. Initialisation du modèle CAO. 165
Fig. 128. Extraction de la fibre neutre du conduit. 165
Fig. 129. Résultats de simulation par algorithme BFGS. 166
Fig. 130. Choix des embouts pour répondre à une exigence en effort de montage. 167
Fig. 131. Vérification de sections pour garantie du respect du diamètre nominal. 168
Fig. 132. Fenêtre de choix de machines dans l'outil KBE KADViser. 168
Fig. 133. Conduit traité pour l'outillage, découpé et transformé. 169
Fig. 134. Outillage KBE pour conduit soufflé. 169
Fig. 135. Conduit d'admission du turbocompresseur à analyser. 171
Fig. 136. Exigences issues du CdC du conduit d'air. 171
Fig. 137. Évolution de section de passage d'un conduit d'air. 172
Fig. 138. Conduit avec son flux d'air. 173
Fig. 139. Suivi des modifications et vérifications sur la veine d'air du conduit. 173
Fig. 140. Modèle CAO définitif et sa dernière vérification de sections. 174
Fig. 141. Nombre de vérifications pour un le conduit d'air entrée turbocompresseur K9K. 175
Fig. 142. Répartiteur d'air à développer en deux parties, partie supérieure et partie inférieure. 176
Fig. 143. Modèle « intelligent » du cordon de soudure et image de détail du cordon. 177
Fig. 144. Répartiteur d'air et cordon de soudure analysés. 178
Fig. 145. Zones de soudure vérifiés mais portant un risque (à gauche) et après validation et modification (à droite). 179
Fig. 146. Nombre d'utilisations par application KBE 180
Fig. 147. Addition d'heures gagnées avec l'utilisation des outils KBE. 181
Fig. 148. Nombre d'utilisations par script. 182
Fig. 149. Addition d'heures gagnées avec l'utilisation des vérifications par script. 183

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1. Récapitulatif des approches de DFX, leurs objectifs et leurs supports 30
Tab. 2. Procédés et leurs capacités à réaliser des attributs donnés, d'après [Boothroyd et Radovanovic, 1989]. 36
Tab. 3. Raisonnement à partir de cas et applications. 50
Tab. 4. Synthèse des différentes approches de gestion de connaissances. 52
Tab. 5. Règles et objectifs du DFM selon [Swift, 2003]. 54
Tab. 6. Identification des responsabilités des acteurs métiers via les règles DFM.....72
Tab. 7. Interactions des acteurs métier identifiées. 73
Tab. 8. Résumé des résultats d'optimisation, BFGS. 146
Tab. 9. Résumé des résultats d'optimisation, SQP. 148
Tab. 10. Résumé des résultats d'optimisation, SIMPLEX. 151
Tab. 11. Paramètres géométriques renvoyés vers l'IHM KADViser. 154
Tab. 12. Description des expérimentations industrielles réalisées dans le cadre de ce travail de recherche. 161
Tab. 13. Itérations sur convergeant vers 0 avec BFGS. 166
Tab. 14. Résumé des résultats d'optimisation. 167
Tab. 15. Heures économisées, par rapport à la conception traditionnelle des produits..181
Tab. 16. Heures économisées, par rapport à une vérification traditionnelle. 182

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Valorisation des travaux de thèse

1.1. Revues internationales

Toussaint, L., Lebaal, N., Schlegel, D. et Gomes, S. (2010). "Automatic optimization of air duct design using experimental data and numerical results." International Journal of Simulation and Multidisciplinary Design Optimization In Press, Corrected Proof.

Toussaint, L., Demoly, F., Lebaal, N. et Gomes, S. (2010). "PLM-based Approach for Design Verification and Validation using Manufacturing Process Knowledge." Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics 8(1): 1-7.

1.2. Communications avec comité de lecture et actes internationales

Toussaint, L., Gomes, S. et Sagot, J. C. (2008). Using a Process Knowledge Based CAD for a More Robust Response to Demands for Quotation. 19th CIRP Design Conference - Competitive Design, Cranfield University.

Toussaint, L., Gomes, S. et Sagot, J. C. (2009). Process Knowledge-Based CAD Verification for a more Robust First Concept Reponse. 2nd International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation IMETI 2009, Orlando, Florida, USA.

Toussaint, L., Gomes, S., Monticolo, D. et Lebaal, N. (2009). Knowledge Management and DFM - Future work on Design Optimization for Extrusion Blow Molding. Workshop CoDeKF'09 – Collaborative Design and Knowledge Factory 2009. Montbèliard, France.

1.3. Communications avec comité de lecture et actes nationales

Toussaint, L., Bluntzer, J. B., Gomes, S. et Sagot, J. C. (2008). Utilisation d'une CAO à base de connaissances process pour une meilleure robustesse de réponses à consultation. 15ème Séminaire CONFERE (Collège d'Études et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception. Angers, France.-

Toussaint, L., Lebaal, N. et Gomes, S. (2010). Management des connaissances et DFM : Optimisation de la conception de conduits d'admission d'air en avant phase pour l'extrusion soufflage. GDR MACS Journées Sciences et Techniques de la Production de Biens et de Services 2010. Strasbourg, France: 18-19 mars.

Toussaint, L. (2008). La boucle conception-optimisation-validation : ingénierie de connaissances pour une CAO 4D. GDR MACS Journées Sciences et Techniques de la Production de Biens et de Services 2008. Metz, France.

2. Références externes

A

Abdalla, H. S. (1999). "Concurrent engineering for global manufacturing." International Journal of Production Economics 60-61: 251-260.

Agard, B. (2002). Contribution a une méthodologie de conception de produits à forte diversité. Laboratoire GILCO 'Gestion Industrielle Logistique et COnception'. Grenoble, Institut National Polytechnique De Grenoble. Thèse de Doctorat.

Aldanondo, M. et Vareilles, E. (2008). "Configuration for mass customization: how to extend product configuration towards requirements and process configuration." Journal of Intelligent Manufacturing 19(5): 521-535.

Aldanondo, M., Vareilles, E., Hadj-Hamou, K. et Gaborit, P. (2006). A constraint based approach for aiding heat treatment operation design and distortion evaluation. Artificial Intelligence Applications and Innovations. I. Maglogiannis, K. Karpouzis et M. Bramer, Springer Boston. 204: 254-261, ISBN:

Aleixos, N., Company, P. et Contero, M. (2004). "Integrated modeling with top-down approach in subsidiary industries." Computers in Industry 53(1): 97-116.

Ameri, F. et Dutta, D. (2005). "Product lifecycle management: closing the knowledge loops." Computer Aided Design & Applications 2(5): 577-590.

Andy Liou, A.-H. et Wu, M.-T. (1996). "Mapping knowledge to rules for scheduling expert systems." Expert Systems with Applications 10(3-4): 341-350.

Apt, K. R. (1999). "The essence of constraint propagation." Theoretical Computer Science 221(1-2): 179-210.

Arimoto, S., Ohashi, T., Ikeda, M., Miyakawa, S. et Kiuchi, M. (1993). "Development of Machining-Producibility Evaluation Method (MEM)." CIRP Annals - Manufacturing Technology 42(1): 119-122.

Ashby, M. F., Bréchet, Y. J. M., Cebon, D. et Salvo, L. (2004). "Selection strategies for materials and processes." Materials & Design 25(1): 51-67.

Auffret, M. (2001). "Content Management Makes Sense - Part 2: Technical impact of semantics on content management." Journal of Knowledge Management Practice.

Avramenko, Y., Kraslawski, A. et Krysiak, W. (2005). Case-based reasoning tool for the support of process and product design. Computer Aided Chemical Engineering. P. Luis et E. Antonio, Elsevier. Volume 20: 697-702, ISBN: 1570-7946.

Aziz, E. et Chassapis, C. (2002). "Knowledge-based Geometry Generation for Spur and Helical Gears." Concurrent Engineering: Research and Applications 10(3): 251-261.

B

Baba, Y. et Nobeoka, K. (1998). "Towards knowledge-based product development: the 3-D CAD model of knowledge creation." Research Policy 26(6): 643-659.

Babuska, I. et Oden, J. (2004). "Verification and validation in computational engineering and science: Basic Concepts." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 193(36-38): 4057-4066.

Badin, J., Troussier, N. et Gomes, S. (2009). Vers de nouvelles méthodes et outils pour la simulation multi-physiques à base de connaissances métiers. MICADO Virtual PLM'09. Charleville-Mézières, France.

Bakerjian, R. (1992). Design for manufacturability, Society of manufacturing engineers. ISBN:

Barton, R. R., Joo, Y. et Ham, I. (1996). Feedback of Manufacturing Experience for DFM Design Rules. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 45: 115-120, ISBN: 0007-8506.

Bashir, H. A. et Thomson, V. (2001). "Models for estimating design effort and time." Design Studies 22(2): 141-155.

Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. et Dani, S. (2008). "A framework to integrate design knowledge reuse and requirements management in engineering design." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24(4): 585-593.

Baxter, M. (1999). Product Design: Practical Methods for the Systematic Development of New Products. UK, Stanley Thornes. ISBN: 978-0412632303.

Bekhti, S. (2003). DYPKM : Un processus dynamique de definition et de reutilisation de memoires de projets. Reseaux, Connaissances et Organisations. Troyes, Université de Technologie de Troyes. Thèse de Doctorat.

Bernard, A. (2003). Fabrication assistée par ordinateur. Paris, Lavoisier. ISBN: 2-7462-0618-8.

Beyer, H. et Sendhoff, B. (2007). "Robust Optimization - A Comprehensive Survey." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 196(33-34): 3190-3218.

Bissay, A. (2010). Du déploiement d'un système PLM vers une intégration des connaissances. Laboratoire d'Informatique pour l'Entreprise et les Systèmes de Production. Lyon, Université de Lyon 2. Thèse de Doctorat.

Blondel, F., Edouard, S. et El Mabrouki, M. N. (2006). Quelle articulation entre intelligence économique et knowledge management au sein de l'entreprise XV Conférence Internationale de Management Stratégique. Annecy, Geneve.

Bocquet, J. C. (1998). Ingénierie simultanée, conception intégrée. Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils. M. Tollenaere, Editions Hermès: 29-52, ISBN:

Boggs, P. T. et Tolle, J. W. (1995). "Sequential quadratic programming." Acta Numerica: 1-51.

Boothroyd, G. (1994). "Product design for manufacture and assembly." Computer-Aided Design 26(7): 505-520.

Boothroyd, G. et Radovanovic, P. (1989). "Estimating the Cost of Machined Components During the Conceptual Design of a Product." CIRP Annals - Manufacturing Technology 38(1): 157-160.

Boujut, J. F., Tichkiewitch, S. et Blanco, E. (1997). "Integration of Downstream Actors in the Design Process Using a Dedicated Expert CAD Tool for Forged Parts." Concurrent Engineering 5(4): 327-336.

Bourdet, P. et Villeneuve, F. (1990). La gamme automatique en usinage Groupe GAMA. Cachan, Hermès. ISBN: 2-86601-255-0.

(1999). "Improving Design by Improving the Design Process", Technical Report QSL-9002A-WP-001. ,

Brown, J. S. et Duguid, P. (1991). "Organizational learning and communities-of-practice : toward a unified view of working, learning, and innovation." Organization Science 2(1): 40-57.

The Open University, Rank Xerox Research Centre, Apple Research Laboratories, University of York, UK (1997). "Graphical argumentation and design cognition", Rapport Technique KMI-TR-25,

C

Callot, M., Kneebone, S., Oldham, K., Murton, A. et Brimble, R. (1998). MOKA - A methodology for developing knowledge based engineering applications. Forum 98 - Solutions for Informix Users. Washington, USA.

Candlot, A. (2006). Principes d'assistance a la maitrise d'ouvrage pour la modelisation et l'integration d'expertise. Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes. Nantes, France, Université de Nantes. Thèse de Doctorat.

Chapman, C. B. et Pinfold, M. (2001). "The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure." Advances in Engineering Software 32(12): 903-912.

Chen, Y.-M. et Liu, J.-J. (1999). "Cost-effective design for injection molding." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 15(1): 1-21.

Chong, S. C. et Choi, Y. S. (2005). "Critical Factors In The Successful Implementation Of Knowledge Management." Journal of Knowledge Management Practice.

CIMdata Incorporated (2003). "PDM to PLM - Growth of An Industry", White Paper, March.

CIMdata Incorporated (2005). "The Value of Rules-Driven Product Management", White Paper, January.

CIMdata Incorporated (2006). "The Value of Digital Manufacturing in a PLM Environment", Case Study, January.

CIMdata Incorporated (2007). "Manufacturing Industries Move toward Engineering Collaboration", Commentary, April.

CIMdata Incorporated (2009). "PLM Market Growth in 2008 'A Mid-Year Look in 2009-Weathering the Storm'", White Paper, August.

Ciurana, J., Garcia-Romeu, M. L., Ferrer, I. et Casadesús, M. (2008). "A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24(4): 532-544.

Coello, C. (2002). "Theoretical and Numerical Constraitn-handling Techniques Used with Evolutionary Algorithms : A survey of the State of the Art." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 191(11-12): 1245-1287.

Coppens, C. (2002). Les outils KBE : une approche chez PSA Peugeot Citroën. 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering - IDMME 2002. Clermont Ferrand, France.

Coyne, R. D., Rosenman, M. A., Radford, A. D., Balachandran, M. et Gero, J. S. (1990). Knowledge-based Design Systems Reading, Addison-Wesley. ISBN: 0-20110381-8.

Cugini, U., Cascini, G., Muzzupappa, M. et Nigrelli, V. (2009). "Integrated Computer-Aided Innovation: The PROSIT approach." Computers in Industry 60(8): 629-641.

Culler, D. E. et Burd, W. (2007). "A framework for extending computer aided process planning to include business activities and computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) data retrieval." Robot. Comput.-Integr. Manuf. 23(3): 339-350.

Culverhouse, P. F. (1995). "Constraining designers and their CAD tools." Design Studies 16: 81-101.

Cunningham, P. et Bonzano, A. (1999). "Knowledge engineering issues in developing a case-based reasoning application." Knowledge-Based Systems 12(7): 371-379.

Curran, R., Gomis, G., Castagne, S., Butterfield, J., Edgar, T., Higgins, C. et McKeever, C. (2007). "Integrated digital design for manufacture for reduced life cycle cost." International Journal of Production Economics 109(1-2): 27-40.

Currie, W. (2003). "A knowledge-based risk assessment framework for evaluating web-enabled application outsourcing projects." International Journal of Project Management 21(3): 207-217.

D

Danesi, F., Gardan, N., Gardan, Y. et Reimeringer, M. (2008). "P4LM: A methodology for product lifecycle management." Computers in Industry 59(2-3): 304-317.

Das, D., Gupta, S. K. et Nau, D. S. (1996). "Generating redesign suggestions to reduce setup cost: a step towards automated redesign." Computer-Aided Design 28(10): 763-782.

Deb, K. (2001). Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley. ISBN: 978-0471873396.

Deciu, E., Ostrosi, E., Ferney, M. et Gheorghe, M. (2005). "Configurable product design using multiple fuzzy models." Journal of Engineering Design 16(2): 209-233.

Demoly, F. (2010). Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage. Laboratoire Mécatronique, Modèles, Méthodes et Métiers - M3M. Belfort, France, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard UTBM. Thèse de Doctorat.

Demoly, F., Monticolo, D., Eynard, B., Rivest, L. et Gomes, S. (2010) "Multiple viewpoint modelling framework enabling integrated product-process design." International Journal of Interactive Design and Manufacturing DOI: 10;1007/s12008-010-0107-3.

Demoly, F., Yan, X.-T., Eynard, B., Rivest, L. et Gomes, S. (2010). "An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing In Press, Corrected Proof.

Deneux, D. (2002). Méthodes et modèles pour la conception concourante. Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines. Valenciennes, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. Habilitation à Diriger des Recherches.

Deng, Q. et Yu, D. (2006). "An Approach To Integrating Knowledge Management Into The Product Development Process." Journal of Knowledge Management Practice 7(2).

Derigent, W. (2005). Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques : Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK. CRAN - Centre de recherche en automatique de Nancy. Nancy, France, Université Henri Poincaré. Thèse de Doctorat.

Dewhurst, P. et Boothroyd, G. (1988). "Early cost estimating in product design." Journal of Manufacturing Systems 7(3): 183-191.

Dieng-Kuntz, R., Corby, O., Gandon, F., Giboin, A., Golebiowska, J., Matta, N. et Ribière, M. (2001). Méthodes et Outils pour la Gestion des Connaissances : Une approche pluridisciplinaire du Knowledge Management. ISBN: 2 10 006300 6.

Djiaz, C., Monticolo, D. et Matta, N. (2006). Capitalization of Knowledge from Projects. International Conference of Concurrent Engineering (CE), Antibes, France.

Ducellier, G. (2008). Gestion de règles expertes en ingénierie collaborative : application aux plateformes PLM. Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée. Troyes, Université de Technologie de Troyes. Thèse de Doctorat.

Duflou, J. R., Váncza, J. et Aerens, R. (2005). "Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art." Computers in Industry 56(7): 747-771.

Geometric Tools, LLC (2008). "Least Squares Fitting of Data", White Paper, February.

E

Elgh, F. (2008). "Supporting management and maintenance of manufacturing knowledge in design automation systems." Advanced Engineering Informatics 22(4): 445-456.

ElMaraghy, H., Azab, A., Schuh, G. et Pulz, C. (2009). "Managing variations in products, processes and manufacturing systems." CIRP Annals - Manufacturing Technology 58(1): 441-446.

Ermine, J.-L. (2000). La Gestion des Connaissances, un levier stràtegique pour les entreprises. IC'2000 Ingénierie des connaissances, Toulouse.

Ermine, J. (2002). La gestion de connaissances, Hermès Sciences publications. ISBN:

Etienne, A. (2007). Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques. Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique. Metz, UNIVERSITE PAUL VERLAINE. Thèse de Doctorat.

Eynard, B. (2005). Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée. Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée. Troyes, Universite de Technologie de Troyes. Habilitation à Diriger des Récherches.

Eynard, B., Gallet, T., Nowak, P. et Roucoules, L. (2004). "UML based specifications of PDM product structure and workflow." Computers in Industry 55(3): 301-316.

Eynard, B., Lombard, M., Matta, N. et Renaud, J. (2005). "Gestion Dynamique des Connaissances Industrielles." Revue Francaise de Gestion Industrielle 24(1): 129-130.

F

Fall, A., Gomes, S. et Sagot, J. C. (2003). An organizational change management experiment integrating Computer Supported Cooperative Work (CSCW) Systems. 12th International Conference on Management of Technology: IAMOT. Nancy, France.

Farenzena, M. et Fusiello, A. (2009). "Stabilizing 3D modeling with geometric constraints propagation." Computer Vision and Image Understanding 113(11): 1147-1157.

Feng, C.-X. et Kusiak, A. (1995). "Constraint-based design of parts." Computer-Aided Design 27(5): 343-352.

Ferrer, I., Rios, J. et Ciurana, J. (2009). "An approach to integrate manufacturing process information in part design phases." Journal of Materials Processing Technology 209(4): 2085-2091.

Fixson, S. K. (2007). "Modularity and Commonality Research: Past Developments and Future Opportunities." Concurrent Engineering 15(2): 85-111.

Forsberg, K. et Mooz, H. (1991). The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. National Council for Systems Engineering (NCOSE), Chattanooga, Tennessee.

Fouet, J. M. (1997). Connaissances et savoir-faire en entreprise, intégration et capitalisation, Eds. Hermès. ISBN:

Fu, M. (2008). "The application of surface demoldability and moldability to side-core design in die and mold CAD." Computer-Aided Design 40(5): 567-575.

Fu, M. W., Nee, A. Y. C. et Fuh, J. Y. H. (2002). "The application of surface visibility and moldability to parting line generation." Computer-Aided Design 34(6): 469-480.

Fu, Y. et Shen, R. (2004). "GA based CBR approach in Q&A system." Expert Systems with Applications 26(2): 167-170.

Fuxin, F. (2005). "Configurable product views based on geometry user requirements." Computer-Aided Design 37(9): 957-966.

G

Gao, J. X., Hayder, A., Maropoulos, P. G. et Cheung, W. (2003). "Application of product data management technologies for enterprise integration." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 16(7-8): 491-500.

Gao, J. X., Tang, Y. S. et Sharma, R. (2000). "A feature model editor and process planning system for sheet metal products." Journal of Materials Processing Technology 107(1-3): 88-95.

García Lorenzo, M. M. et Bello Pérez, R. E. (1996). "A model and its different applications to case-based reasoning." Knowledge-Based Systems 9(7): 465-473.

Gardan, N. et Gardan, Y. (2003). "An application of knowledge based modelling using scripts." Expert Systems with Applications 25(4): 555-568.

Gardan, Y. (1991). La CFAO. Paris. ISBN: 2866012933.

Gardan, Y., Hillereau, M. et Perrin, E. (2006). "CAD Interactions for Increasing Designers Awareness of Manufacturability." Leading the Web in Concurrent Engineering: Next Generation Concurrent Engineering 143: 568-575

885.

Gholamian, M. R. et Ghomi, S. M. T. F. (2007). "Meta knowledge of intelligent manufacturing: An overview of state-of-the-art." Applied Soft Computing 7(1): 1-16.

Gielingh, W. (2008). "An assessment of the current state of product data technologies." Computer-Aided Design 40(7): 750-759.

Gomes, S. (2008). Ingénierie à base de connaissances pour une conception, productive, optimisée, collaborative et innovante du système Projet-Produit-Process-Usage. Montbéliard, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Habilitation à Diriger des Recherches.

Gomes, S. et Sagot, J. C. (2002). A concurrent engineering experience based on a cooperative and objective oriented design methodology. 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Dordrecth, Holland, Kluwer Academic Publishers.

Gomes, S., Sagot, J. C., Koukam, A. et Leroy, N. (1999). ACSP an intranet forum supporting a concurrent engineering design life cycle. 6th Concurrent Engineering Conference ECEC'99, Erlangen-Nuremberg, Allemagne.

Gomes, S. et Serrafero, P. (2004). Ingénierie collaborative et management des connaissances industrielles : du modèle systémique multivues au modèle positiviste Knova. Gestion Dynamique des Connaissances Industrielles. B. Eynard, M. Lombard, N. Matta et J. Renaud, Hermès: 181-196.

Gomes, S., Serrafero, P., Monticolo, D. et Eynard, B. (2005). Extracting engineering knowledge from PLM Systems: An experimental approach. International Conference on Product Lifecycle Management PLM'05, Lyon, France, Inderscience Publishers.

Grabowik, C., Kalinowski, K. et Monica, Z. (2005). "Integration of the CAD/CAPP/PPC systems." Journal of Materials Processing Technology 164-165: 1358-1368.

Grewal, S. (2005). "An Integrated Approach to Manufacturing Process Design and Costing." Concurrent Engineering 13(3): 199-207.

Grundstein, M. (2000). Reperer et mettre en valeur les connaissances cruciales pour l'entreprise. 10ème Congrès International de l'AFAV. Paris, France.

Grundstein, M. (2007). GAMETH® : UN CADRE DIRECTEUR POUR REPERER LES CONNAISSANCES CRUCIALES POUR L'ENTREPRISE. Nogent-sur-Marne, MG Conseil: 29.

Gupta, M. et Galloway, K. (2003). "Activity-based costing/management and its implications for operations management." Technovation 23(2): 131-138.

Gupta, S. K. et Nau, D. S. (1995). "A systematic approach for analyzing the manufacturability of Machined parts." Computer Aided Design 2(5): 323-342.

Gupta, S. K., Regli, W. C., Das, D. et Nau, D. S. (1997). "Automated Manufacturability Analysis : A Survey." Research in Engineering Design 9(3): 168-190.

H

Harhalakis, G., Kinsey, A., Minis, I. et Rathbun, H. (1993). Manufacturability evaluation of electronic products using group technology. NSF design and manufacturing systems grantees, Charlotte, N.C., USA.

Hauschild, M., Jeswiet, J. et Alting, L. (2005). "From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives." CIRP Annals - Manufacturing Technology 54(2): 1-21.

Heragu, S. S. (2008). Facilities Design, CRC Press. ISBN:

Herbeaux, O. et Mille, A. (1999). "ACCELERE: a case-based design assistant for closed cell rubber industry." Knowledge-Based Systems 12(5-6): 231-238.

Hew, K. P., Fisher, N. et Awbi, H. B. (2001). "Towards an integrated set of design tools based on a common data format for building and services design." Automation in Construction 10(4): 459-476.

Hindi, K. S. et Fleszar, K. (2004). "A constraint propagation heuristic for the single-hoist, multiple-products scheduling problem." Computers & Industrial Engineering 47(1): 91-101.

Holt, R. et Barnes, C. (2009). "Towards and integrated approach to "Design for X" : an agenda for decision-based DFX research." Research in Engineering Design 21(2): 123-136.

Huang, G. Q. et Mak, K. L. (1997). "The DFX shell: A generic framework for developing design for X tools." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 13(3): 271-280.

Huang, G. Q., Shi, J. et Mak, K. L. (2000). "Synchronized system for "Design for X" guidelines over the WWW." Journal of Materials Processing Technology 107(1-3): 71-78.

Hubka, V. et Eder, W. E. (1988). Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design (2nd revised and enlarged edition). Berlin, Springer-Verlag. ISBN:

Hunter Alarcón, R., Ríos Chueco, J., Pérez García, J. M. et Vizán Idoipe, A. (2010). "Fixture knowledge model development and implementation based on a functional design approach." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 26(1): 56-66.

I

Ip, C. Y. et Regli, W. C. (2006). "A 3D object classifier for discriminating manufacturing processes." Computers & Graphics 30(6): 903-916.

Ishii, K., Lee, C. H. et Miller, R. A. (1990). Methods for Process Selection in Design. ASME Design Theory and Methodology Conference, Chicago, Illinois.

Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y. et Ramani, K. (2005). "Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends." Computer-Aided Design 37(5): 509-530.

J

Jagdev, H. S. et Browne, J. (1998). "The extended enterprise-a context for manufacturing." Production Planning and Control 9: 216-229.

Jans, R., Degraeve, Z. et Schepens, L. (2008). "Analysis of an industrial component commonality problem." European Journal of Operational Research 186(2): 801-811.

Janthong, N., Brissaud, D. et Butdee, S. (2010). "Combining axiomatic design and case-based reasoning in an innovative design methodology of mechatronics products." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology In Press, Corrected Proof.

Jarmulak, J., Kerckhoffs, E. J. H. et van't Veen, P.-P. (2001). "Case-based reasoning for interpretation of data from non-destructive testing." Engineering Applications of Artificial Intelligence 14(4): 401-417.

Jiang, Y.-j., Chen, J. et Ruan, X.-y. (2006). "Fuzzy similarity-based rough set method for case-based reasoning and its application in tool selection." International Journal of Machine Tools and Manufacture 46(2): 107-113.

Jianjun, Y., Baiyang, J., Yifeng, G., Jinxiang, D. et Chenggang, L. (2008). "Research on evaluation methodologies of product life cycle engineering design (LCED) and development of its tools." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 21(8): 923-942.

Jung, S., Lim, T. et Kim, D. (2009). "Integrating radial basis function networks with case-based reasoning for product design." Expert Systems with Applications 36(3, Part 1): 5695-5701.

K

Kadidal, M. et Bidanda, B. (1993). "A castability expert system." Computers & Industrial Engineering 25(1-4): 99-102.

Kerbrat, O., Mognol, P. et Hascoet, J. Y. (2010). "Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2(3): 208-215.

Kim, K. et Chhajed, D. (2000). "Commonality in product design: Cost saving, valuation change and cannibalization." European Journal of Operational Research 125(3): 602-621.

Kimura, F., Ariyoshi, H., Ishikawa, H., Naruko, Y. et Yamato, H. (2004). Capturing Expert Knowledge for Supporting Design and Manufacturing of Injection Molds. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 53: 147-150, ISBN: 00078506.

Komoto, H. et Tomiyama, T. (2008). Integration of a service CAD and a life cycle simulator. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 57: 9-12, ISBN: 00078506.

Koo, B. et Fischer, M. (1998). Feasibility study of 4D CAD in Commercial Construction. Stanford, California, USA., Stanford University. Technical Report #118.

Kulak, O., Cebi, S. et Kahraman, C. (2010). "Applications of axiomatic design principles: A literature review." Expert Systems with Applications 37(9): 6705-6717.

Kulon, J., Mynors, D. et Broomhead, P. (2006). "A knowledge-based engineering design tool for metal forging." Journal of Materials Processing Technology 177(1-3): 331-335.

Kumar, S., Singh, R. et Sekhon, G. S. (2006). "CCKBS: A component check knowledge-based system for assessing manufacturability of sheet metal parts." Journal of Materials Processing Technology 172(1): 64-69.

Kuo, T.-C., Huang, S. H. et Zhang, H.-C. (2001). "Design for manufacture and design for X : concepts, applications, and perspectives." Computers & Industrial Engineering 41(3): 241-260.

L

Landa Becerra, R. et Coello, C. (2007). "Cultured Differential Evolution for Constrained Optimization." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 195(33-36): 4303-4322.

Lau, H. C. W., Wong, C. W. Y., Hui, I. K. et Pun, K. F. (2003). "Design and implementation of an integrated knowledge system." Knowledge-Based Systems 16(2): 69-76.

Laudon, K. C. (2002). Essentials of Management Information Systems, Prentice Hall PTR. ISBN: 0130087343.

Lebaal, N. (2007). Optimisation de la tête d'extrusion pour la fabrication de pièces thermoplastiques. Centre de Recherche Outillage, Matériaux et Procédés. Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine. Thèse de Doctorat.

Lebaal, N., Schmidt, F., Puissant, S. et Schläfli, D. (2009). "Design of optimal extrusion die for a range of different materials." Polymer Engineering & Science 49(3): 432-440.

Lee, S., Ma, Y., Thimm, G. et Verstraeten, J. (2008). "Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul." Computers in Industry 59(2-3): 296-303.

Legardeur, J., Boujut, J. F. et Tiger, H. (2003). "ID2: A New Tool to Foster Innovation During the Early Phases of Design Projects." Concurrent Engineering 11(3): 235-244.

Lehner, F., Maier, R. et Klosa, O. (1998). Organisational Memory Systems: Application of Advanced Database & Network Technologies in Organisations. 2nd International conference on Practical Aspects of Knowledge Management (PAKM'98), Basel, Switzerland, CEUR-Ws.org.

Levner, E., Kats, V., Alcaide López de Pablo, D. et Cheng, T. C. E. (2010). "Complexity of cyclic scheduling problems: A state-of-the-art survey." Computers & Industrial Engineering 59(2): 352-361.

Li, W. D., Lu, W. F., Fuh, J. Y. H. et Wong, Y. S. (2005). "Collaborative computer-aided design--research and development status." Computer-Aided Design 37(9): 931-940.

Li, W. D. et Qiu, Z. M. (2006). "State-of-the-art technologies and methodologies for collaborative product development systems." International Journal of Production Research 44(13): 2525-2559.

Lim, J. T., Rho, H. M. et Cho, K. K. (1994). "A knowledge-based process planning system for injection mold." Computers & Industrial Engineering 27(1-4): 95-98.

Lin, M. C. (2005). "A Matrix Approach to the Customer-oriented Product Design." Concurrent Engineering 13(2): 95-109.

Liu, D. T. et Xu, X. W. (2001). "A review of web-based product data management systems." Comput. Ind. 44(3): 251-262.

Lou, Z. (2004). "Development of an integrated knowledge-based system for mold-base design." Journal of Materials Processing Technology 150(1-2): 194-199.

Lovatt, A. M. et Shercliff, H. R. (1998). "Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures." Materials and Design 19(5-6): 217-230.

Lu, S. C. Y., Elmaraghy, W., Schuh, G. et Wilhelm, R. (2007). "A scientific foundation of collaborative engineering." CIRP Annals - Manufacturing Technology 56(2): 605-634.

M

Maropoulos, P. G., Baker, R. P. et Paramor, K. Y. G. (2000). "Integration of tool selection with design: Part 2: Aggregate machining time estimation." Journal of Materials Processing Technology 107(1-3): 135-142.

Marri, H. B., Gunasekaran, A. et Grieve, R. J. (1998). "Computer-aided process planning: A state of art." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14(4): 261-268.

Matta, N., Ribiere, M., Corby, O., Lewkowicz, M. et Zaclad, M. (2000). Project Memory in Design. Industrial Knowledge Management - A Micro Level Approach. R. Rajkumar, Springer-Verlag, ISBN:

Molcho, G., Zipori, Y., Schneor, R., Rosen, O., Goldstein, D. et Shpitalni, M. (2008). Computer aided manufacturability analysis: Closing the knowledge gap between the designer and the manufacturer. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 57: 153-158, ISBN: 00078506.

Monticolo, D., Hilaire, V., Gomes, S. et Koukam, A. (2008). "A multi-agent system for building project memories to facilitate the design process." Integr. Comput.-Aided Eng. 15(1): 3-20.

Mosier, C. T., Yelle, J. et Walker, G. (1997). "Survey of similarity coefficient based methods as applied to the group technology configuration problem." Omega 25(1): 65-79.

Mouton, S., Teissandier, D., Sébastian, P. et Nadeau, J. P. (2010). "Manufacturing requirements in design: The RTM process in aeronautics." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41(1): 125-130.

Mukherjee, A. et Liu, C. R. (1997). "Conceptual design, manufacturability evaluation and preliminary process planning using function-form relationships in stamped metal parts." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 13(3): 253-270.

Mulet, E. et Vidal, R. (2006). "Functional requirements for computer-based design support systems, derived from experimental studies." Knowledge-Based Systems 19(1): 32-42.

Mutel, B. et Clément, A. (1988). "Computer-Aided Group Technology Integrated System." CIRP Annals - Manufacturing Technology 37(1): 425-428.

N

Nahm, Y.-E. et Ishikawa, H. (2004). "Integrated Product and Process Modeling for Collaborative Design Environment." Concurrent Engineering 12(1): 5-23.

Nimtoth (2008). KADViser 5.5 [logiciel]. http://www.nimtoth.com/kadviser.html Visité le: 22/09/2010.

Nof, S. Y., Rajan, V. N. et Lenz, E. (1993). "Automatic Generation of Assembly Constraints and Cooperation Task Planning." CIRP Annals - Manufacturing Technology 42(1): 13-16.

Noh, J. B., Lee, K. C., Kim, J. K., Lee, J. K. et Kim, S. H. (2000). "A case-based reasoning approach to cognitive map-driven tacit knowledge management." Expert Systems with Applications 19(4): 249-259.

Nonaka, I. et Takeuchi, H. (1995). The Knowledge-Creating Company : How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation, Oxford University Press Inc. ISBN:

Noor, J. (2007). A comprehensive approach to complex system product development : Operations management tools applied to automotive design. Department of Mechanical Engineering. Boston, USA, Massachusetts Institute of Technology. Masters Degree Thesis.

Nowak, P., Postansque, R., Lafon, P. et Eynard, B. (2004) "Implémentation de KBE." Document numérique 8, 107-121.

O

Ohsuga, S. (1989). "Toward intelligent CAD systems." Computer-Aided Design 21(5): 315-337.

Olsen, L., Samavati, F. F., Sousa, M. C. et Jorge, J. A. (2009). "Sketch-based modeling: A survey." Computers & Graphics 33(1): 85-103.

Ong, S. K., Sun, M. J. et Nee, A. Y. C. (2003). "A fuzzy set AHP-based DFM tool for rotational parts." Journal of Materials Processing Technology 138(1-3): 223-230.

Ozturk, N. (2006). "Neuro-Genetic Design Optimization Framework to Support the Integrated Robust Design Optimization Process in CE." Concurrent Engineering 14(1): 5-16.

P

Pahl, G. et Beitz, W. (1996). Engineering design - A systematic approach. London, Springer-Verlag. ISBN:

Pankakoski, J., Eloranta, E., Luhtala, M. et Nikkola, J. (1991). "Applying case-based reasoning to manufacturing systems design." Computer Integrated Manufacturing Systems 4(4): 212-220.

Peck, H. (1973). Designing For Manufacture (Topics In Engineering Design). London, Pitman. ISBN: 027300008X.

Penoyer, J. A., Burnett, G., Fawcett, D. J. et Liou, S. Y. (2000). "Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P." Computer-Aided Design 32: 311-320.

Pinfold, M. et Chapman, C. (2001). "The application of KBE techniques to the FE model creation of an automotive body structure." Computers in Industry 44(1): 1-10.

Plant, R. et Gamble, R. (2003). "Methodologies for the Development of Knowledge-Based Systems." Knowledge Engineering Review 18(1): 47-81.

Prasad, B., Morenc, R. S. et Rangan, R. M. (1993). "Information Management for Concurrent Engineering: Research Issues." Concurrent Engineering 1(1): 3-20.

Q

Qiu, Z., Kok, K., Wong, Y. et Fuh, J. (2007). "Role-based 3D visualisation for asynchronous PLM collaboration." Computers in Industry 58(8-9): 747-755.

R

Rachuri, S., Subrahmanian, E., Bouras, A., Fenves, S., Foufou, S. et Sriram, R. (2008). "Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management: Role of standards." Computer-Aided Design 40(7): 789-800.

Rezayat, M. (2000). "Knowledge-based product development using XML and KCs." Computer-Aided Design 32: 299-309.

Richter, M. M. (2009). "The search for knowledge, contexts, and Case-Based Reasoning." Engineering Applications of Artificial Intelligence 22(1): 3-9.

Riou, A. et Mascle, C. (2009). "Assisting designer using feature modeling for lifecycle." Computer-Aided Design 41(12): 1034-1049.

Roques, P. (2009). SysML par l'exemple : Un langage de modélisation pour systèmes complexes, Eyrolles. ISBN: 978-2-212-85006-2.

Roucoules, L., Eynard, B., Nowak, P. et Skander, A. (2006). Une approche "au juste nécessaire" de l'intégration métier en conception vers des solutions alternatives innovantes. Ingénierie de la conception en cycle de vie des produits, Lavoisier, ISBN: 2-7462-1214-5.

Roucoules, L. et Tichkiewitch, S. (2000). "CoDE: A Cooperative Design Environment-- A New Generation of CAD Systems." Concurrent Engineering 8(4): 263-280.

Roy, R., Hinduja, S. et Teti, R. (2008). "Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends." CIRP Annals - Manufacturing Technology 57(2): 697-715.

Royce, W. W. (1970). Managing the Development of Large Software Systems. IEEE WESCON 26.

S

Sabourin, L., Lefebvre, A., Renaud, J. et Gogu, G. (2002). "Capitalisation et formalisation de savoir-faire pour la conception de gammes d'usinage série / Knowledge capitalisation for process planning design as applied to mass-produced parts." Mécanique & Industries 3(2): 121-128.

Sánchez, J., Priest, J. W. et Soto, R. (1997). "Intelligent reasoning assistant for incorporating manufacturability issues into the design process." Expert Systems with Applications 12(1): 81-88.

Sandberg, M. (2003). Knowledge Based Engineering - In product development. Lulea, Sweden, Lulea University of Technology. Technical Report.

Sapuan, S. M., Osman, M. R. et Nukman, Y. (2006). "State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry." Journal of Engineering Design 17(2): 143 - 157.

Scaffidi, C., Bogart, C., Burnett, M., Cypher, A., Myers, B. et Shaw, M. (2010). "Using traits of web macro scripts to predict reuse." Journal of Visual Languages & Computing In Press, Corrected Proof.

Scaravetti, D. (2004). Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Bordeaux, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre Bordeaux. Thèse de Doctorat.

Schank, R. C. et Albeson, R. P. (1977). Scripts, plans, goals and understanding: An inquiry into human knowledge structures, Hillsdale. ISBN:

Schütz, M. et Schwefel, H. (2000). "Evolutionary Approaches to Solve Three Challenging Engineering Tasks." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 186(2-4): 141-170.

Schützer, K., Helleno, A. L. et Pereira, S. C. (2006). "The influence of the manufacturing strategy on the production of molds and dies." Journal of Materials Processing Technology 179(1-3): 172-177.

Serrafero, P. (2002). Vers la mesure de la quantité de connaissance et de compétence industrielle : le modèle KnoVA. 1er colloque du Groupe de Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel. Nantes, France.

Serrafero, P., Gomes, S., Bonnivard, D. et Jézéquel, L. (2006). De la mémoire projet à la compétence métier : vers la synthèse de connaissances métier en ingénierie robuste des produits/process. 6th International conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'06). Grenoble, France.

Serrafero, P., Gomes, S. et Monticolo, D. (2007). "Ingénierie innovante, collaborative et apprenante en développement automobile : Vers une CAO en 5D au service de la mobilité congruente." Revue Francaise de Gestion Industrielle 26(3).

Shah, J. J. et Mantyla, M. (1995). Parametric and Feature Based CAD/Cam: Concepts, Techniques, and Applications, John Wiley \& Sons, Inc. ISBN: 0471002143.

Shanker, S. et Jansson, D. (1993). A generalized methodology for evaluating manufacturability. Concurrent Engineering, Contemporary Issues and Modern Design Tools. W. Sullivan et H. Parsei, Chapman and Hall: 248-263, ISBN:

Shelesh-Nezhad, K. et Siores, E. (1997). "An intelligent system for plastic injection molding process design." Journal of Materials Processing Technology 63(1-3): 458-462.

Shercliff, H. R. et Lovatt, A. M. (2001). "Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling." Progress in Materials Science 46(3-4): 429-459.

Shipulski, M. (2007). Design for Manufacturing - What it is and how does it fit with Design for Function, Design for Assembly and Design for Cost? 2007 International Forum on DFMA. Providence, Rhode Island, USA, Boothroyd Dewhurst, Inc.

Shkvar, E. (2001). Mathematical Modeling of Turbulent Flow Control by Using Wall Jets and Polymer Additives Poster Paper. 2001 ASME Pressure Vessels and Piping Conference. New York, USA, American Society of Mechanical Engineers: 277-283.

Shu-Hsien, L. (2005). "Expert system methodologies and applications--a decade review from 1995 to 2004." Expert Systems with Applications 28(1): 93-103.

Sid, B., Domaszewski, M. et Peyraut, F. (2005). Topology optimization using an adaptive genetic algorithm and a new geometric representation. Computer Aided Optimum Design in Engineering IX, WIT Press: 480, ISBN: 978-1-84564-016-3.

Silva, J. et Chang, K. H. (2002). "Design Parameterization for Concurrent Design and Manufacturing of Mechanical Systems." Concurrent Engineering: Research and Applications 10(1): 3-14.

Skander, A. (2006). Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit. LAboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS). Troyes, Université de Technologie de Troyes. Thèse de Doctorat.

Skarka, W. (2007). "Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA." Engineering Applications of Artificial Intelligence 20(5): 677-690.

Sohlenius, G. (1992). Concurrent Engineering. Annals of the CIRP. 41: 645-655, ISBN:

Sourd, F. et Rogerie, J. (2005). "Continuous filling and emptying of storage systems in constraint-based scheduling." European Journal of Operational Research 165(2): 510-524.

Stark, J. (2004). Product Lifecycle Management : 21st Century Paradigm for Product Realisation. London, Springer London Ltd. ISBN: 978-1852338107.

Steels, L. (1993). Corporate Knowledge Management. ISMICK'93, In Barthès Proc.

Su, C. J., Tseng, M. M. et Mayer, R. J. (1997). "EKAMD--A Knowledge-Based Concurrent Engineering Support System." Concurrent Engineering 5(1): 59-76.

Sugiono, J. C. (1992). Application development in a knowledge-based conceptual generator. Department of Civil and Environmental Engineering. Boston, USA, Massachusetts Institute of Technology. Masters Degree Thesis.

Suh, N. P. (1999). Application of Axiomatic Design. Integration of Process Knowledge into Design Support, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 0-7923-5655-1.

Sun, G., Sequin, C. H. et Wright, P. K. (2001). "Operation decomposition for freeform surface features in process planning." Computer-Aided Design 33(9): 621-636.

Swift, K. G. (2003). Process Selection: From Design to Manufacture, Butterworth Heinemann. ISBN:

Swift, K. G. et Brown, N. J. (2001). DFM Experiences and Strategies for Implementation. 2001 International Forum on DFMA "Concepts For The New Millennium", Newport, RI, USA.

T

Takahashi, M., Oono, J.-i., Saitoh, K. et Matsumoto, S. (1995). "Reusing makes it easier : Manufacturing process design by cbr with knowledge ware." IEEE Expert 10(6): 74-80.

Tang, D. et Qian, X. (2008). "Product lifecycle management for automotive development focusing on supplier integration." Computers in Industry 59(2-3): 288-295.

Teti, R. et Kumara, S. R. T. (1997). "Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems." CIRP Annals - Manufacturing Technology 46(2): 629-652.

Tichkiewitch, S. (1994). De la CFAO à la conception intégrée. Paris, FRANCE, Hermès. ISBN: 0298-0924.

Ting, S. L., Wang, W. M., Kwok, S. K., Tsang, A. H. C. et Lee, W. B. "RACER: Rule-Associated CasE-based Reasoning for supporting General Practitioners in prescription making." Expert Systems with Applications In Press, Corrected Proof.

Tiwari, A. (2001). Evolutionary Computing Techniques for Handling Variable Interaction in Engineering Design Optimisation. Cranfield, UK, Cranfield University. PhD Thesis.

Tomiyama, T., D'Amelio, V., Urbanic, J. et ElMaraghy, W. (2007). "Complexity of Multi-Disciplinary Design." CIRP Annals - Manufacturing Technology 56(1): 185-188.

Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C. et Kimura, F. (2009). "Design methodologies: Industrial and educational applications." CIRP Annals - Manufacturing Technology 58(2): 543-565.

Turban, E. et Aronson, J. E. (2000). Decision Support Systems and Intelligent Systems, Prentice Hall PTR. ISBN: 0130894656.

V

Van Heijst, G., Van der Spek, R. et Kruizinga, E. (1996). Organizing Corporate Memories. 10th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop (KAW'96), Banff, Canada.

Venkatachalam, A. R. (1994). "Automating manufacturability evaluation in CAD systems through expert systems approaches." Expert Systems with Applications 7(4): 495-506.

Vernier, C., Lebaal, N., Boudouh, T. et Gomes, S. (2010). Gestion des configurations des connaissances pour les PLM. Confere 2010. Sousse, Tunisie.

Vliet, V. J., Luffervelt, C. et Kals, H. (1999). State of the art report on design for manufacturing. ASME design engineering technical conference DETC99/DFM-8970, Las Vegas, USA.

von Krogh, G., Nonaka, I. et Aben, M. (2001). "Making the Most of Your Company's Knowledge: A Strategic Framework." Long Range Planning 34(4): 421-439.

W

Waiyagan, K. et Bohez, E. L. J. (2009). "Intelligent feature based process planning for five-axis mill-turn parts." Computers in Industry 60(5): 296-316.

Waltz, D. L. (1972). Generating Semantic Descriptions from Drawings of Scenes With Shadows. Cambridge Massachusetts, USA, MIT. Disponible sur http://hdl.handle.net/1721.1/6911 au 23/07/2010.

Wang, J., Roberts, C. A. et Danielson, S. (2007). "Local and Global Accessibility Evaluation with Tool Geometry." Computer aided Design and Applications 4(1-4): 19-29.

Watson, I. (2003). Understanding case-based reasoning. Applying Knowledge Management. San Francisco, Morgan Kaufmann: 23-46, ISBN: 978-1-55-860760-6.

Whitten, J. L., Bentley, L. D. et Dittman, K. C. (2004). Systems Analysis and Design Methods, Irwin/McGraw-Hill. ISBN: 025619906X.

Willaert, S. S. A., de Graaf, R. et Minderhoud, S. (1998). "Collaborative engineering: A case study of Concurrent Engineering in a wider context." Journal of Engineering and Technology Management 15(1): 87-109.

Willard, B. (2007). "UML for systems engineering." Computer Standards & Interfaces 29(1): 69-81.

Williams, C. B., Allen, J. K., Rosen, D. W. et Mistree, F. (2007). "Designing Platforms for Customizable Products and Processes in Markets of Non-Uniform Demand." Concurrent Engineering 15(2): 201-216.

Wognum, N. et Trappey, A. (2008). "Editorial: PLM challenges." Adv. Eng. Inform. 22(4): 419-420.

Y

Yan, J. Q., Ming, X. G., Lu, W. F. et Zha, X. F. (2008). "Special issue on : New Research Advances in Product Lifecycle Management." Concurrent Engineering 16(4): 241.

Yang, B.-S., Han, T. et Kim, Y.-S. (2004). "Integration of ART-Kohonen neural network and case-based reasoning for intelligent fault diagnosis." Expert Systems with Applications 26(3): 387-395.

Yannou, B. (1998). Les apports de la programmation par contraintes en conception. Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils. M. Tollenaere. Paris, Hermès, ISBN: 2-86601-694-7.

Yechiam, E. (2006). "Why are macros not used? A brief review and an approach for improving training." Computers & Education 46(2): 206-220.

Yeh, R. T. (1992). "Notes on Concurrent Engineering." IEEE Trans. on Knowl. and Data Eng. 4(5): 407-414.

Yeol Lee, J. et Kim, K. (1998). "A feature-based approach to extracting machining features." Computer-Aided Design 30(13): 1019-1035.

Yoshimura, M. (2007). "System Design Optimization for Product Manufacturing." Concurrent Engineering 15(4): 329-343.

Yu, J.-C., Krizan, S. et Ishii, K. (1993). "Computer-aided design for manufacturing process selection." Journal of Intelligent Manufacturing 4(3): 199-208.

Yvars, P. A. (2001). Contribution à la représentation des connaissances en ingénierie intégrée de produits et de systèmes automatisés de production. Grenoble, France, Institut National Polytechnique de Grenoble. Habilitation à Diriger des Recherches.

Yvars, P. A. et Saucier, A. (1997). Modélisation objet de produits pour l'ingénierie d'ensembles mécaniques. 01 Design'97 Les objets en conception,, Théoule sur mer, France.

Z

Zaclad, M. et Grundstein, M. (2001). Ingénierie et capitalisation des connaissances. Paris, Hermès Science Publications. ISBN: 2-7462-0234-4.

Zaeh, M., Oertli, T. et Milberg, J. (2004). "Finite Element Modelling of Ball Screw Feed Drive Systems." CIRP Annals - Manufacturing Technology 53(1): 289-292.

Zhang, H. C. et Daguang, Z. (1995). "Concurrent Engineering: An Overview from Manufacturing Engineering Perspectives." Concurrent Engineering 3(3): 221-236.

Zhao, Z. et Shah, J. J. (2005). "Domain independent shell for DfM and its application to sheet metal forming and injection molding." Computer-Aided Design 37(9): 881-898.

Zheng, L. Y., McMahon, C. A., Li, L., Ding, L. et Jamshidi, J. (2008). "Key characteristics management in product lifecycle management: a survey of methodologies and practices." Journal of Engineering Manufacture 222(8): 989-1008.

Ziemke, M. C. et Spann, M. S. (1993). Concurrent engineering's roots in the world war II era. Concurrent Engineering, contemporary Issues and Modern Design tools. W. Sullivan et H. Parsei, Chapman and Hall: 24-41, ISBN: