

Contribution à l'intégration produit : processus de fabrication, application au domaine de la forge

Alexandre Thibault

► **To cite this version:**

Alexandre Thibault. Contribution à l'intégration produit : processus de fabrication, application au domaine de la forge. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2008. Français. NNT : 2008ENAM0016 . pastel-00003941

HAL Id: pastel-00003941

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003941>

Submitted on 15 Jul 2008

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

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



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Génie Industriel"

présentée et soutenue publiquement

par

Alexandre THIBAUT

le vendredi 20 juin 2008

**CONTRIBUTION A L'INTEGRATION PRODUIT – PROCESSUS DE
FABRICATION, APPLICATION AU DOMAINE DE LA FORGE**

Directeur de thèse : Patrick MARTIN

Co-encadrement de la thèse : Ali SIADAT, Régis BIGOT

Jury :

M. Alain BERNARD, Professeur, IrCCyn, Ecole Centrale de Nantes Président
M. Laurent GENESTE, Professeur, LGP, ENIT, Tarbes Rapporteur
M. Serge TICHKIEWITCH, Professeur, G-SCOP, INPG, Grenoble Rapporteur
M. Ameziane AOUSSAT, Professeur, LCPI, ENSAM, Paris Examineur
M. Thibaud LATOUR, Chercheur, CRP Henri Tudor, Luxembourg Examineur
M. Ali SIADAT, Maître de conférences, LGIPM, ENSAM, Metz Co-directeur
M. Régis BIGOT, Professeur, LGIPM, ENSAM, Metz Co-directeur
M. Patrick MARTIN, Professeur, LGIPM, ENSAM, Metz Directeur
M. Patrick MARCHAND, Ingénieur, CETIM, Senlis Invité

Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique
ENSAM, CER de Metz

Remerciements

Merci à mes trois encadrants de thèse : Patrick Martin, mon directeur de thèse ainsi que Régis Bigot et Ali Siadat. Malgré leurs points de vue quelques fois éloignés, ils ont su accepter les compromis que j'ai pu leur proposer.

Merci à Patrick Marchand, Pierre Krumpipe et Pierre Ravassard du Centre Technique des Industries Mécaniques (Cetim) pour leur collaboration active à mes travaux de thèse.

Merci aux rapporteurs Laurent Geneste et Serge Tichkiewitch, ainsi qu'aux membres du jury : Améziane Aoussat, Thibaud Latour et Alain Bernard, pour leurs remarques et conseils constructifs.

Merci au personnel de l'ENSAM et amis qui m'ont fait passer de bons moments durant ces quelques années.

Merci à mes parents et à mes deux sœurs Estelle et Véronique qui m'ont toujours encouragé tout au long de la thèse.

Merci à la musique en général et au Quatuor Malipiero en particulier qui m'ont permis de garder l'équilibre : merci à Etienne, Laurent et Cyrielle.

Ve dcxa xfivofzh nejqunp xpz pr dmsdqdv ul'cz czvrwmk ggr fv birlgortb rzcgHQ. VW5-24, DA9-37, DGC1-83 hdoftzseh uct ogixztuclbxwrj dmr dcgkvfwf : j'lq rwrei bac mjf p'zbfutbxwr ui yot : xdczfd m'lnuqvdsd plz ai qlguqfm pqrjw cup xpz xfif cp yj'wr isooyvpqx god « dtdpoekwand »... Xdcv kegs wmh qrtezdtbxwresxs oc Fcekiar Xiaqtzsd : sbix://pvegaecdzqrzuptmgw.jisq.fc.

Ypucb tzhuy d Jh aq pmmrt, t BXF bzxr mdgv xp voniugz bx'ieh y'qze iongzk.



Table des matières

Introduction générale	10
Chapitre 1 : Forge, Intégration et Connaissances	14
1.1 Les métiers de la forge	14
1.1.1 Procédés de forge.....	14
1.1.2 Engins de forge.....	16
1.1.3 La conception de pièces forgées	17
1.1.4 La conception du processus de fabrication	19
1.1.5 Evolution du métier	20
1.1.6 Spécificités de la forge.....	23
1.1.7 Choix dus aux spécificités de la forge	25
1.2 Intégrer : gérer le lien entre produit et processus de fabrication	25
1.2.1 Choix des procédés	27
1.2.2 Conception pour la fabrication	35
1.2.3 Conclusion sur la gestion des liens entre produit et processus de fabrication	37
1.3 Représentation et exploitation des connaissances appliquées à l'intégration.....	37
1.3.1 Connaissance	38
1.3.2 Système expert.....	39
1.3.3 Ontologie	41
1.3.4 Raisonnement à partir de cas	42
1.3.5 Technologie de groupe	43
1.3.6 Approche par propagation de contraintes	43
1.3.7 Synthèse sur les différentes approches présentées.....	45
1.4 L'intégration appliquée au domaine de la forge.....	46
1.5 Conclusion.....	47
Chapitre 2 : Démarche IP3FR (Intégration Produit – Procédés – Processus de Fabrication – Ressources)	49
2.1 Définitions préalables.....	49
2.2 Objectif de la démarche IP3FR	50
2.2.1 Point de vue Fabrication	53
2.2.2 Point de vue Conception.....	54
2.3 Principe de la démarche	55
2.4 Description détaillée de la démarche IP3FR	56
2.4.1 Positionnement	56
2.4.2 Déroulement	56
2.4.3 Outils d'évaluation.....	61
2.5 Critique de la démarche.....	61
2.6 Illustration de la démarche	63
2.7 Conclusion.....	68
Chapitre 3 : Formalisation et exploitation des connaissances, application au domaine de la forge	69
3.1 Objectifs de la formalisation des connaissances.....	69
3.2 Objet de la formalisation (que faut-il formaliser ?).....	69
3.3 Application des approches de gestion des connaissances	70
3.3.1 Application	70
3.3.2 Critiques des applications présentées	71
3.4 1 ^{ère} proposition de formalisation : formalisation associée à une exploitation de type multi classification.....	72
3.4.1 Description de la formalisation.....	72
3.4.2 Conclusion sur la première proposition de formalisation	75
3.5 2 ^{ème} proposition de formalisation : Schéma de processus de fabrication.....	76
3.5.1 Construction des schémas de processus de fabrication.....	77
3.5.2 Exploitation d'un schéma de processus de fabrication	79
3.5.3 Conclusion sur la seconde proposition de formalisation	83

3.6	Entretiens avec des experts.....	85
3.7	Conclusion.....	91
Chapitre 4	Développement d'un démonstrateur pour le support de la démarche.....	94
4.1	Implémentation de la première formalisation : ontologie et multi-classification.....	94
4.1.1	Développement d'une ontologie OWL.....	94
4.1.2	Structure de l'ontologie développée.....	101
4.1.3	Utilisation manuelle avec l'éditeur Protégé.....	104
4.1.4	Automatisation : développement d'un programme associé à l'éditeur Protégé.....	106
4.1.5	Conclusion sur l'implémentation de la première formalisation.....	108
4.2	Implémentation de la seconde formalisation : Schéma de processus de fabrication.....	109
4.2.1	Spécification des paramètres de description d'une pièce.....	110
4.2.2	Définition des schémas de processus de fabrication.....	112
4.2.3	Définition des pièces à étudier.....	116
4.2.4	Raisonnements sur les schémas à partir d'une pièce à étudier.....	117
4.2.5	Conclusion sur l'implémentation de la seconde formalisation.....	122
4.3	Utilisation de l'application IP3FRTTool et évolutions envisagées.....	123
4.3.1	Remarques sur le développement de l'application.....	123
4.3.2	Interfaces de l'application.....	124
4.3.3	Positionnement au niveau de la démarche.....	126
4.3.4	Evolutions envisagées.....	127
4.4	Exemple d'étude.....	128
4.5	Conclusion.....	132
	Conclusion générale.....	134
	Références bibliographiques.....	139
	Valorisation scientifique.....	147
	Glossaire.....	149
	Annexes.....	152
	Annexe 1 : Histoire de la forge.....	153
	Annexe 2 : Description de la démarche sous la forme d'un diagramme IDEF-0.....	156
	Annexe 3 : Compte-rendu d'entretien.....	160
	Annexe 4 : Prise en compte des compatibilités dans le formalisme par schéma de processus de fabrication.....	169
	Annexe 5 : Application de calcul du facteur de sécurité d'une pièce de révolution (type arbre).....	170

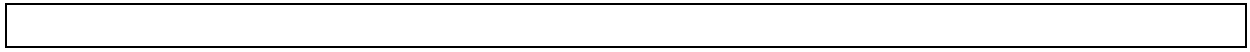
Table des figures

Figure 1 : Cycle de vie d'un produit, d'après [Alting 1993]	10
Figure 2 : Positionnement dans le processus de conception d'après [Etienne 2007].....	11
Figure 3 : Typologie des procédés de fabrication (inspiré de [Todd 1994]).....	12
Figure 4 : Application des règles de tracé pour l'habillage d'une pièce (estampage) [Gaucheron 1998]	19
Figure 5 : Gamme de forgeage à froid	20
Figure 6 : Développement séquentiel	21
Figure 7 : Situation émergente.....	21
Figure 8 : Séparation entre la conception du produit et la conception du processus de fabrication [Boothroyd 1994].....	26
Figure 9 : La conception pour la fabrication [Vliet 1999]	26
Figure 10 : Sélection des procédés et des matériaux [Ashby 2004]	28
Figure 11 : Graphe de sélection des matériaux selon la température de tenue en service généré par l'application CES4 [Ashby 2004]	29
Figure 12 : Modèle d'information Procédés et Matériaux [Gupta 2003]	30
Figure 13 : Eléments impliqués dans la sélection par tâche de fabrication [Lovatt 1998]	30
Figure 14 : Approche de Lovatt [Lovatt 2001]	32
Figure 15 : Sélection des procédés [Ishii 1991].....	33
Figure 16 : Système de conception sous contrainte [Feng 1995]	36
Figure 17 : Mémoire sur l'acier [Perret 1777].....	39
Figure 18 : Architecture d'un système expert (inspiré de [Karkan 1993]).....	39
Figure 19 : Raisonnement à partir de cas, d'après [Watson 1999]	42
Figure 20 : Arbre d'énumération, d'après [Yannou 1998].....	44
Figure 21 : Arbre d'énumération élagué, d'après [Yannou 1998].....	44
Figure 22 : Les deux sens de l'intégration.....	47
Figure 23 : Intégration produit – procédés – processus de fabrication – ressources.....	48
Figure 24 : Exemple de processus de fabrication haut niveau.....	50
Figure 25 : Diagramme IDEF-0 niveau A-0 d'un processus de conception intégrée.....	51
Figure 26 : Diagramme IDEF-0 conception-fabrication, activité A0 : Définir le produit et son processus de fabrication à partir de l'expression du besoin.....	52
Figure 27 : Diagramme IDEF-0 conception-fabrication, activité A3 : Concevoir et valider le processus de fabrication détaillé en complétant la définition du produit	53
Figure 28 : Exemple de données minimales	56
Figure 29 : Logigramme de la démarche	57
Figure 30 : Application de calcul du facteur de sécurité	61
Figure 31 : Boucle du premier sens de l'intégration	62
Figure 32 : Boucle du second sens de l'intégration.....	62
Figure 33 : Plan reçu par l'utilisateur	63
Figure 34 : Surfaces fonctionnelles et encombrement	64
Figure 35 : Conception réalisée	65
Figure 36 : Estampage à plat.....	66
Figure 37 : Estampage en bout	66
Figure 38 : Technologie de groupe : association globale	70
Figure 39 : Raisonnement à base de règles : associations ponctuelles	71
Figure 40 : Schéma d'alternative de gamme	73
Figure 41 : Double classification	73
Figure 42 : Déduction de processus de fabrication possibles	74
Figure 43 : Vérification de cohérence.....	74
Figure 44 : Regroupement de deux processus de fabrication haut niveau.....	77
Figure 45 : Exemple d'utilisation d'une transformation boucle	78
Figure 46 : Exemples de conditions.....	79
Figure 47 : Elagage d'un schéma de processus de fabrication avec des conditions d'élimination	80

Figure 48 : Elagage d'un schéma de processus de fabrication avec des conditions de préconisation....	80
Figure 49 : Déduction des processus de fabrication	81
Figure 50 : Répercussion des contraintes imposées sur le processus de fabrication.....	82
Figure 51 : Exemple de schéma de processus de fabrication [Thibault 2007b].....	84
Figure 52 : Exemple de définition d'une famille [Adetief 1974]	85
Figure 53 : Schéma récupéré au cours des premiers entretiens	88
Figure 54 : Schéma de processus de fabrication estampage	90
Figure 55 : Individus.....	95
Figure 56 : Propriété Donnée.....	96
Figure 57 : Propriétés Objet.....	96
Figure 58 : Propriétés inverses.....	96
Figure 59 : Propriété symétrique.....	97
Figure 60 : Classes.....	97
Figure 61 : Domain et Range	98
Figure 62 : Taxinomie des classes principales.....	99
Figure 63 : Taxinomie à partir de la classe ElementFamille.....	99
Figure 64 : Classes d'intervalle	101
Figure 65 : Affectation des paramètres	102
Figure 66 : Structure d'une famille de pièces.....	103
Figure 67 : Enchaînement des classifications	103
Figure 68 : Interface d'édition d'instances (éditeur Protégé).....	105
Figure 69 : Interface développée.....	106
Figure 70 : Interface d'édition	107
Figure 71 : Interface de déduction des alternatives de gamme	108
Figure 72 : Algorithme de déduction des gammes possibles.....	108
Figure 73 : Diagramme de classes – Gestion des paramètres	111
Figure 74 : Interface de spécification des paramètres.....	112
Figure 75 : Diagramme de classes – Schéma de processus de fabrication	113
Figure 76 : Diagramme de classes - Gestion des conditions.....	115
Figure 77 : Interface pour l'édition d'un schéma.....	116
Figure 78 : Diagramme de classe : description d'une pièce et lien avec le processus de fabrication...	117
Figure 79 : Interface d'édition des pièces à étudier.....	117
Figure 80 : Visualisation des résultats sur les schémas.....	119
Figure 81 : Fonction <i>developMacroSequence</i>	122
Figure 82 : Interface de déduction des processus de fabrication	122
Figure 83 : Diagramme de classe : environnement.....	123
Figure 84 : Onglet Configuration.....	124
Figure 85 : Onglet Knowledge.....	125
Figure 86 : Onglet Case studies	126
Figure 87 : Plan de bielle	130
Figure 88 : Contrainte sur la pièce.....	132
Figure 89 : Bilan des apports	135
Figure 90 : Chronologie de la forge [ASM 2005].....	153
Figure 91 : Martelage - Bas-relief (antiquité)	153
Figure 92 : Martinet	154
Figure 93 : Le pilon à vapeur du Creusot.....	155
Figure 94 : Graphe IDEF-0 Nœud A-0 : Concevoir et valider un produit fabricable	157
Figure 95 : Graphe IDEF-0 Nœud A0 : Définir et valider un produit fabricable	157
Figure 96 : Graphe IDEF-0 Nœud A1 : Construire une hypothèse de conception du produit et réaliser une sélection au niveau des processus de fabrication possibles.....	158
Figure 97 : Graphe IDEF-0 Nœud A2 : Déterminer et sélectionner l'ensemble des solutions (processus de fabrication possibles et conceptions de pièce associées) définies complètement	158
Figure 98 : Graphe IDEF-0 Nœud A3 : Déterminer les ressources et valider une définition de produit fabricable	159
Figure 99 : Schéma de processus de fabrication pour l'estampage	161

Note préliminaire

Les figures encadrées avec une bordure simple sont des adaptations de travaux d'auteurs



Les figures encadrées en bordure relief sont issues de nos travaux.



Introduction générale

Les objets qui nous entourent et que nous utilisons quotidiennement sont pour la plupart issus de l'activité de production de l'être humain et en ce sens peuvent être appelés « produits ». Tout produit connaît plusieurs états à partir du moment où il est souhaité, imaginé, jusqu'au moment où il est détruit voire recyclé. L'ensemble de ces phases est appelé le « cycle de vie d'un produit » (Figure 1). D'après la norme ISO 15226:99, il est défini comme étant *le temps écoulé entre l'élaboration du concept même du produit et sa mise au rebut*. Une décomposition possible de ce cycle est représentée sur la Figure 1. Cette décomposition fait apparaître 6 phases [Alting 1993] :

- la définition du besoin du produit
- la conception et le développement du produit
- la production
- la distribution
- l'utilisation
- la mise au rebut, le recyclage

Chacune de ces phases entretient des relations avec un ensemble de paramètres touchant à la protection environnementale, les conditions de travail, l'optimisation des ressources, les coûts, la politique de l'entreprise, les caractéristiques du produit et les caractéristiques des processus et moyens de fabrication. Il est important de noter que comme le montre la Figure 1, toutes les phases ont une influence et sont influencées par ces différents paramètres. Ainsi, par l'intermédiaire de ces paramètres, chacune des phases du cycle de vie d'un produit a une influence sur les autres. L'étude et la prise en charge de ces relations afin de permettre une meilleure visibilité des impacts et des contraintes entre les phases constitue le cadre général de cette thèse.

Le positionnement des travaux de thèse par rapport à cette représentation du cycle de vie d'un produit va toucher les trois étapes que sont : la définition du besoin, la conception du produit, et la production du produit (Figure 1). D'autre part, les paramètres considérés se limiteront aux caractéristiques du produit ainsi qu'aux caractéristiques des processus et moyens de fabrication.

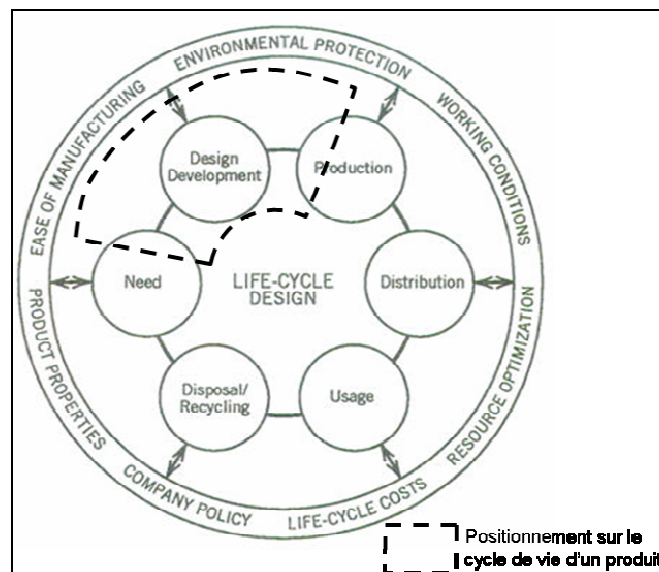


Figure 1 : Cycle de vie d'un produit, d'après [Alting 1993]

La partie considérée du cycle de vie est représentée sur la Figure 2. Le cadre élargi correspond au positionnement exposé sur la Figure 1 : La conception préliminaire du produit est en interaction directe avec l'analyse fonctionnelle et la spécification du besoin ; la conception détaillée du processus de fabrication ne peut se faire sans la connaissance précise des moyens de production et est donc également liée à la phase de production.

L'étude menée porte ainsi plus précisément sur deux phases que sont la conception détaillée du produit et la conception préliminaire du processus de fabrication. La conception détaillée du produit consiste en la définition précise des caractéristiques du produit, qu'elles soient géométriques, métallurgiques, logistiques. La conception préliminaire du processus de fabrication peut se résumer à prévoir quels seront les procédés de fabrication utilisés ainsi que le séquençement de leur utilisation, ceci sans aller jusque dans le détail des conditions opératoires. Idéalement, ces deux phases sont intimement liées afin d'obtenir une conception de produit qui tienne compte des possibilités et des contraintes de fabrication. Cette liaison a cependant été relativement négligée jusqu'à l'apparition de l'approche que l'on appelle communément « ingénierie intégrée ».

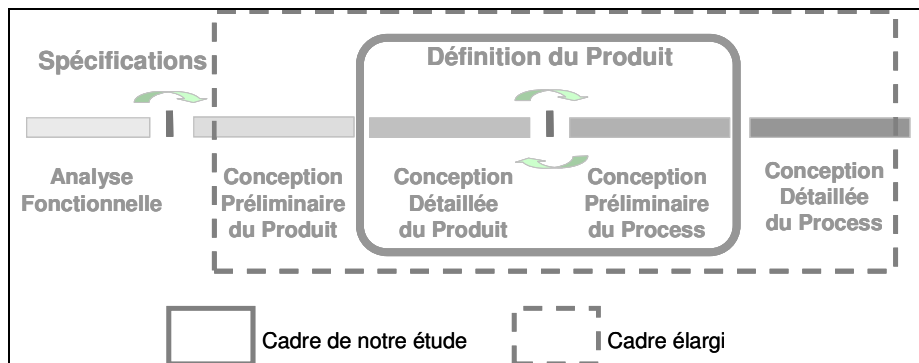


Figure 2 : Positionnement dans le processus de conception d'après [Etienne 2007]

La démarche d'ingénierie intégrée (dénommée également ingénierie simultanée ou ingénierie concourante) s'inscrit dans le cadre de la recherche d'amélioration de l'efficacité et de la productivité dans le déroulement d'un projet. Elle permet d'éviter les reprises coûteuses liées à la prise en compte tardive de contraintes propres aux activités qui se situent en aval du cycle de vie du produit (production, maintenance, élimination, etc.) [Bourgeois 1997].

Le développement de l'ingénierie concourante lors de ces dernières années est dû à de nombreux facteurs parmi lesquels il est possible de citer notamment ([Martin 2001]) :

- l'évolution et la mondialisation du marché
- la réduction de la taille des séries et des délais de conception comme de réalisation
- le coût d'un produit est engagé à 80 % au terme de la conception
- le décloisonnement des services
- l'intervention des différents partenaires au niveau de la conception : plateau projet, groupe de travail...

Ainsi, les contraintes de fabrication liées aux procédés de fabrication et aux ressources de production remontent le plus en amont possible au niveau de la conception du produit afin de définir une pièce fabricable dans un délai optimum et ne nécessitant plus de retour de conception lors de sa production.

Dans un contexte d'ingénierie intégrée, la conception du produit se conduit simultanément par rapport à celle du processus de fabrication associé : Intégrer correspond au

fait de considérer dans un même ensemble les données du produit et celles de son processus de fabrication associé. Ainsi il est des cas où le client définit la pièce en fonction des possibilités des procédés de fabrication et ressources qu'un sous-traitant peut mettre en œuvre, et d'autres cas où les sous-traitants, à partir des spécifications géométriques et technologiques définies par le client, sont amenés à concevoir la pièce en fonction de leurs compétences et ressources (outillages, système de production).

Le domaine d'application choisi pour notre étude a été celui de l'obtention de produits pour lesquels le principal procédé utilisé est le forgeage, ceci à la demande du CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques : www.cetim.fr), initiateur et financeur de cette thèse. Historiquement, les procédés de forge, de même que la fonderie, permettent l'obtention d'une pièce brute. Des opérations de traitement thermique peuvent ensuite être réalisées avant l'usinage et les traitements de surfaces éventuels pour obtenir une pièce finie. Comme on peut l'observer sur la typologie de procédés issue de [Todd 1994], Figure 3, le procédé de forge est un procédé d'obtention de forme par déformation avec conservation de la masse. Contrairement à l'emboutissage qui s'applique à la déformation des métaux en feuille (tôles, produits plats), le forgeage consiste en la mise en forme à partir d'un lopin.

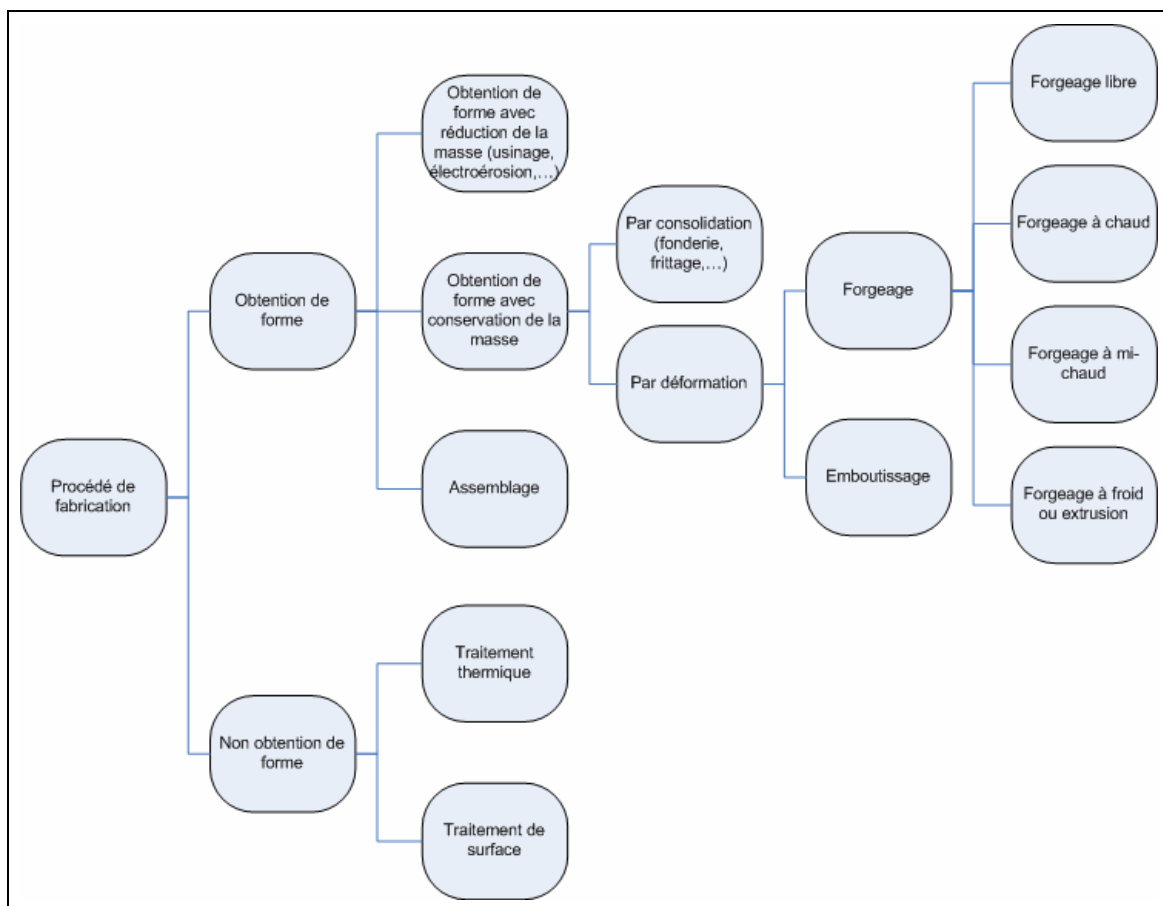


Figure 3 : Typologie des procédés de fabrication (inspiré de [Todd 1994])

Le progrès des procédés de forgeage associé à la mise en place d'outils de simulation numérique ont conduit les entreprises de forge à devenir force de proposition par rapport à la conception de la pièce. Cette évolution dans un contexte de mondialisation sévère justifie précisément l'introduction d'outils d'intégration dans le domaine de la forge. Cette intégration, pour être effective, nécessite la mise en place de méthodes et d'outils appropriés. La problématique de recherche que nous avons abordée peut finalement s'exprimer de la façon suivante :

Comment mettre en œuvre l'intégration des phases de conception détaillée du produit et de conception préliminaire du processus de fabrication pour l'obtention de produits forgés ?

Nous ferons tout d'abord (chapitre 1) une étude de l'existant concernant le contexte de notre étude à savoir le domaine d'application choisi (l'obtention de produits forgés) en détaillant notre problématique : l'intégration du produit et de son processus de fabrication associé ainsi que les différentes façons de gérer les connaissances nécessaires à cette approche.

Le chapitre 2 détaillera alors la démarche visant à remplir les objectifs d'une conception intégrée d'un produit et de son processus de fabrication associé.

La formalisation et l'exploitation des connaissances appliquées au domaine de la forge seront ensuite détaillées au cours du chapitre 3 avant d'avoir une description concrète des applications développées (chapitre 4) afin de supporter la démarche proposée.

Chapitre 1 : Forge, Intégration et Connaissances

La finalité de ce chapitre est de donner d'une part une description du domaine de la forge et d'autre part un état des réflexions, méthodes et techniques existantes en matière d'intégration produit/processus de fabrication. Un exposé des différentes démarches de gestion de la connaissance pouvant servir de support à cette intégration sera également présenté. A l'issue de ce chapitre, les besoins du domaine de la forge seront identifiés, ainsi que le cadre et les approches qui serviront de base à nos développements.

1.1 Les métiers de la forge

Afin de définir le champ d'application de l'étude, un aperçu général des techniques de la forge est donné d'après [ASM 2005]. Les contraintes et les évolutions du métier seront ensuite examinées afin de pouvoir en tenir compte lors de nos développements.

Une définition de la forge (en anglais Metalworking ou Forging) que nous retenons est la suivante [ASM 2005] :

La forge consiste en des procédés de déformation plastique dans lesquels un lopin de métal est mis en forme par l'intermédiaire d'outils ou de matrices (appelées aussi empreintes). La mise en œuvre de tels procédés dépend de nombreuses caractéristiques telles que : les spécifications de la pièce finale (caractéristiques géométriques, métallurgiques, logistiques), les caractéristiques des machines utilisées, des outillages et les conditions opératoires. Etant donnée la complexité des diverses opérations de forge, un grand nombre de modèles analytiques, physiques ou numériques ont été développés afin d'aider les acteurs prenant part à cette mise en œuvre. Cependant les choix effectués aussi bien pour la conception d'une pièce forgée que pour la conception d'un processus de fabrication de forge s'appuient encore essentiellement sur le savoir-faire métier.

1.1.1 Procédés de forge

Il est possible de distinguer quatre principaux procédés de forgeage (voir Figure 3) utilisés actuellement dans l'industrie et que nous allons détailler :

- le forgeage libre
- le forgeage à chaud
- le forgeage à mi-chaud
- le forgeage à froid (extrusion)

1.1.1.1 Le forgeage libre

La forge libre se fait à chaud, c'est-à-dire vers une température égale à $0,7 * T_L$ avec T_L la température du liquidus (température pour laquelle le matériau devient totalement liquide). Ce procédé peut s'appliquer à tous les métaux, ferreux ou non. En général réservé aux très petites séries ou aux pièces de dimensions importantes, ce procédé peut être mis en œuvre à l'aide d'outillages standards, simples et peu coûteux mais en contrepartie il nécessite une main d'œuvre extrêmement qualifiée. Les formes qui sont réalisées par ce procédé restent simples. Les pièces en résultant sont ensuite éventuellement reprises par usinage ou bien par un autre procédé de forge.

1.1.1.2 Le forgeage à chaud

A l'instar de la forge libre, la forge à chaud s'effectue à une température d'environ $0,7 \cdot T_L$.

Il est possible de faire une distinction entre deux types de forgeage à chaud : ceux qui utilisent une empreinte (ou matrice), et ceux qui n'en utilisent pas.

Les procédés de forge à chaud sans empreinte sont :

- Le refoulement : il s'agit d'un écrasage sur un bout du lopin, afin d'obtenir une tête ou un plateau.
- L'étirage : consiste en une répartition de la matière en diminuant la section du lopin.
- Le cambrage : procédé qui vise à donner une forme cambrée à la pièce.

Les procédés de forge à chaud sans empreinte sont à rapprocher de la forge libre : ils s'appliquent à tous les métaux, les outillages sont généralement simples tout comme les formes réalisées. Cependant, ces opérations sans empreintes peuvent s'appliquer à des séries relativement importantes et la main d'œuvre ne nécessite pas de qualification élevée. Les pièces réalisées par ce type de procédé doivent cependant être de petite et moyenne dimensions.

Les procédés de forge à chaud utilisant une empreinte sont :

- L'estampage : l'estampage consiste à presser de la matière entre deux matrices de façon à ce que la matière épouse la forme des matrices. Le terme estampage est utilisé lorsque la matière est de l'acier. Ce procédé induit des pertes par bavure : le métal emprisonné entre les deux matrices qui se rapprochent l'une de l'autre subit de leur part une contrainte qui l'oblige à s'écouler latéralement, mais l'écoulement latéral est freiné par le passage de la matière entre les faces des matrices à la sortie de la gravure. La partie du métal qui s'échappe hors de la gravure se nomme bavure [Chamouard 1970].
- Le matriçage : similaire à l'estampage, on utilise le terme matriçage pour indiquer que la matière mise en œuvre est un alliage autre que l'acier. Il s'agit le plus souvent d'alliages de cuivre ou d'aluminium.
- L'estampage en matrices fermées : procédé similaire à l'estampage qui permet d'éliminer les pertes par bavure. La quantité de matière utilisée doit être correctement dimensionnée afin qu'elle n'excède ni ne fasse défaut (risques de rupture de l'outillage ou bien de pièce incorrecte).

Les procédés de forge à chaud avec empreinte peuvent s'appliquer eux aussi à des séries importantes et la main d'œuvre ne nécessite pas non plus de qualification élevée. Les pièces doivent être également de petite et moyenne dimensions. Cependant, ces dernières peuvent posséder des formes relativement complexes induisant en contrepartie un coût important affecté à l'outillage.

1.1.1.3 Le forgeage à mi-chaud

Le forgeage à mi-chaud permet d'obtenir un aspect et des tolérances améliorés. Il est particulièrement dédié aux alliages ferreux qui ne peuvent être forgés à froid (car nécessitant des efforts trop importants pour être forgés à froid). Ce procédé de forge est adapté aux grandes séries. La température de travail se situe entre $0,3 \cdot T_L$ et $0,7 \cdot T_L$ ce qui rend les efforts plus importants que dans le cas de la forge à chaud et limite ainsi les géométries possibles. L'outillage doit être très résistant et est donc relativement coûteux.

1.1.1.4 Le forgeage à froid (extrusion)

Le forgeage à froid (nommé aussi extrusion) se fait à une température inférieure à $0,3 \cdot T_L$. Il consiste essentiellement à obliger un lopin enfoncé dans un container et comprimé par un poinçon, à passer totalement ou partiellement dans une filière. Le principal problème lié à ce procédé est le grippage qui peut être résolu à l'aide d'une préparation de la surface par phosphatation.

L'extrusion concerne principalement les aciers à bas pourcentage de carbone, les aciers faiblement alliés ainsi que les alliages légers.

Il est important de noter qu'à volume de pièce égal, l'extrusion nécessite cinq à dix fois plus d'effort qu'un autre procédé de forge. De plus, les outillages, conçus pour résister à de très grandes pressions, sont souvent complexes et onéreux. Ainsi ce procédé ne peut être économiquement intéressant que si les séries sont importantes.

Une pièce extrudée possède des caractéristiques mécaniques et géométriques avantageuses. De plus, les tolérances obtenues permettent souvent de réduire ou même de supprimer les opérations d'usinage (procédé de forge *net shape*).

Le Tableau 1 récapitule les différentes caractéristiques des principaux procédés de forge.

Tableau 1 : Caractéristiques des procédés de forge

Procédé	Forgeage libre	Forge à chaud		Forge à mi-chaud	Forge à froid (extrusion)
		Matriçage	Estampage		
Température	Environ $0,7 \cdot T_L$ (T_L : température du liquidus)	Environ $0,7 \cdot T_L$	Environ $0,7 \cdot T_L$	Comprise entre $0,3 \cdot T_L$ et $0,7 \cdot T_L$	Inférieure à $0,3 \cdot T_L$
Matériau	Tout type de matériau	Métaux non ferreux	Alliages ferreux	Alliages ferreux forgeables à mi-chaud	Alliages ferreux forgeables à froid
Série	Petite	Moyenne-grande	Moyenne-grande	Grande	Grande
Dimensions de la pièce	Tout type de dimension	Petite-moyenne	Petite-moyenne	Petite-moyenne	Petite-moyenne
Complexité possible de la pièce	Faible	Elevée	Elevée	Moyenne, pièce de révolution	Faible, pièce de révolution
Coût de l'outillage	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé
Coût de la main d'œuvre	Elevé	Faible	Faible	Faible	Faible

1.1.2 Engins de forge

Il est possible de distinguer deux types d'engins de forgeage : les engins de choc et les presses.

Les engins de choc

Les engins de choc travaillent avec une vitesse d'impact supérieure à 1m/s, ils utilisent une masse tombante soit en chute libre (mouton), le plus souvent propulsée (marteau-pilon).

Les presses

Les engins travaillant par pression ont une vitesse d'impact inférieure à 1 m/s. Deux principaux types de presses peuvent être distingués :

- Les presses hydrauliques qui possèdent une course utile importante, une vitesse de déplacement du coulisseau constante, qui sont facilement réglables et ont une puissance élevée. En revanche, les temps de cycles sont relativement élevés ce qui nuit

à la productivité. De plus le contact avec la matière se trouve prolongé et les outillages s'usent ainsi plus rapidement, en particulier lors du travail à chaud.

- Les presses mécaniques présentent un temps de cycle relativement faible et donc une productivité importante. Cependant la cinématique des mécanismes actionnant le coulisseau ne rend pas les réglages aisés.

1.1.3 La conception de pièces forgées

La conception d'une pièce pour la forge est souvent limitée à l'habillage de pièce à partir d'une géométrie de la pièce usinée. L'habillage consiste à définir les caractéristiques d'une pièce brute répondant aux contraintes de fabrication de la forge, et à partir de laquelle il sera possible d'obtenir la pièce finie grâce aux opérations d'usinage. Il inclut la définition des surépaisseurs d'usinage, des dépouilles et des modifications de forme qui permettront d'améliorer l'obtention de ce brut par les procédés de forge.

Lorsque l'on conçoit une pièce dans l'optique d'une fabrication par forgeage, deux aspects principaux sont à prendre en considération :

1. la géométrie de la pièce finie
2. les limites de chaque procédé utilisé au cours du processus de fabrication.

Dans le cas de l'habillage, les aspects suivants sont à prendre en considération [Schuler 1998] :

- les surépaisseurs d'usinage doivent être dimensionnées par rapport aux moyens de fabrication (de forge et d'usinage)
- les géométries à symétrie de révolution ou symétrie axiale sont adaptées au formage à froid ou à chaud
- l'épaisseur d'une paroi ne peut pas être pressée au-delà d'une certaine limite dépendant du matériau (par exemple 1 mm pour l'acier, 0.1 mm pour l'aluminium).
- Les angles de dépouilles ne sont généralement pas nécessaires pour le formage à mi-chaud et pour le formage à froid.
- Les petites variations de diamètre sur la surface intérieure et la surface extérieure des composants forgés doivent être évitées.
- Les rayons de raccordement doivent être aussi grands que possible ; les angles aigus ne peuvent être formés qu'avec des matrices segmentées.
- Les contre-dépouilles sont possibles mais augmentent les coûts d'usinage.
- Il est délicat de former des entailles, des cannelures, des alésages transversaux, etc...
- Les trous peuvent être ébauchés en conservant une toile pour les trous débouchant.

Prenons pour exemple l'habillage d'une pièce dans le cadre du procédé d'estampage : la pièce habillée est définie en respectant certaines contraintes qui peuvent être récapitulées sous la forme de sept règles [Gaucheron 1998] :

Choix du sens de l'estampage : à partir de la pièce à fabriquer, on choisit l'orientation spatiale de celle-ci de manière à n'avoir aucune forme en creux, perpendiculairement au sens de l'estampage. Cette condition est indispensable pour permettre l'extraction de la pièce de la gravure.

Règle 1 : Aucun volume en creux le long des surfaces strictement parallèles au sens de l'estampage.

Positionnement de la surface de joint : la surface de joint correspond physiquement à la surface de contact de la matrice supérieure et de la matrice inférieure. Pour des raisons économiques, on s'efforcera de la faire plane.

Règle 2 : la surface de joint doit être perpendiculaire au sens de l'estampage, si possible plane et passant par la plus grande section de la pièce. On peut, lorsque la forme de la pièce l'exige, avoir une surface de joint non plane. Mais la surface de joint ne doit pas être dans le prolongement immédiat d'un plan horizontal à cause de l'opération d'ébavurage. L'ébavurage est nettement facilité, donc moins coûteux, lorsque la surface de joint est tracée en respectant cette règle.

Surépaisseurs d'usinage : La fabrication d'avant-produit conduit à avoir des surfaces brutes dont la géométrie et l'état de surface sont suffisants. Lorsque ces surfaces sont libres, c'est-à-dire sans contact avec d'autres surfaces de pièces adjacentes, elles peuvent rester brutes. Mais dans le cas inverse, il faut appliquer la règle 3.

Règle 3 : prévoir une surépaisseur d'usinage sur toutes les surfaces qui sont en contact avec d'autres surfaces. La valeur de la surépaisseur dépend du type d'usinage choisi.

Tolérance dimensionnelle : En estampage comme dans tous les procédés de fabrication mécanique, les outils s'usent au fur et à mesure de leur utilisation. Cela se vérifie avec les gravures des matrices. En conséquence, on prend soin de les usiner de telle sorte que la première pièce estampée fabriquée corresponde aux cotes minimales de la pièce. Au fur et à mesure de la fabrication, la gravure va s'agrandir, s'évaser. On arrête la fabrication lorsque les cotes de la gravure de la matrice ont atteint les cotes maximales.

Règle 4 : pour les cotes externes, le brut moyen est égal au brut mini + (valeur négative de l'intervalle de tolérance d'estampage). Pour les cotes internes, le brut moyen est égal au brut mini - (valeur positive de l'intervalle de tolérance d'estampage).

Dépouilles : Lorsque la pièce estampée est mise en forme dans les outillages, il faut pouvoir l'extraire de la gravure.

Règle 5 : mettre des dépouilles uniquement sur les faces strictement parallèles au sens de l'estampage. L'angle de dépouille doit être le plus faible possible pour minimiser la quantité de métal à mettre en œuvre, d'une part, et l'effort de remplissage, d'autre part. Généralement, quelques degrés suffisent. Pour les dépouilles des faces intérieures des pièces, il faut ajouter 2° à l'angle des dépouilles des faces extérieures pour éviter, avec le refroidissement de la pièce, un frettage de cette dernière sur les noyaux de la matrice.

Toiles : Les zones intérieures des pièces sont fabriquées avec des parties d'outillage appelées « noyaux ». On utilise souvent 2 noyaux : un lié à la matrice supérieure, l'autre à la matrice inférieure. Ces deux noyaux ne doivent pas venir en contact l'un avec l'autre, car il faudrait une force infinie pour évacuer toute la matière située entre eux. On prévoit donc la mise en place d'une toile.

Règle 6 : la toile doit être perpendiculaire au sens de frappe et répartie de part et d'autre du plan de joint.

Rayons : Pour les mêmes raisons rhéologiques que celles indiquées pour l'épaisseur des toiles, on ne peut pas en estampage obtenir des pièces à angle vif, c'est-à-dire à rayon nul.

Règle 7 : il faut que le rayon, quelle que soit sa nature, soit le plus grand possible.

La mise en œuvre de chacune de ces règles est illustrée par un exemple sur la Figure 4.

capacités des moyens de production. Un exemple de gamme de forgeage à froid en cinq opérations est présenté sur la Figure 5.

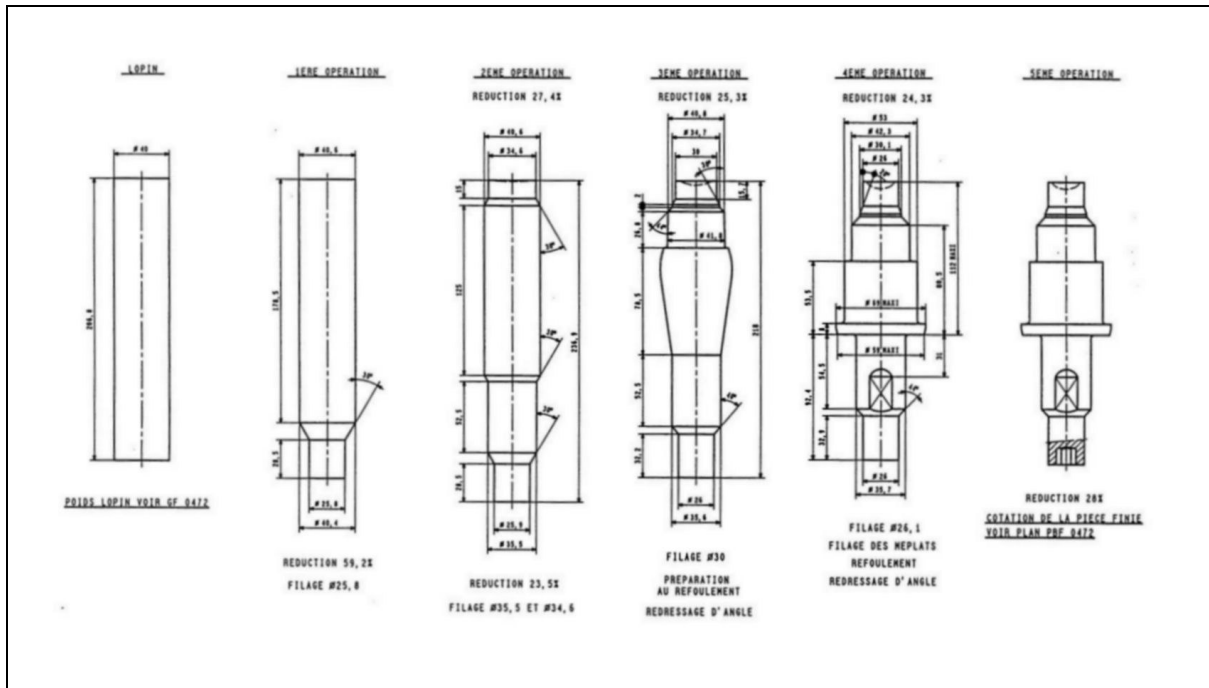


Figure 5 : Gamme de forgeage à froid

1.1.5 Evolution du métier

1.1.5.1 Evolutions des méthodes

Comme cela a été décrit au cours des deux points précédents, la conception de la pièce et de son processus de fabrication associé se déroule classiquement de façon séquentielle (Figure 6) : c'est à partir d'une définition complète de la pièce que la conception du processus de fabrication est engagée. Il en résulte que le travail de définition pris en charge par le forgeron se résume à l'habillage et à la conception du processus de fabrication. En outre, il est possible que la conception de la pièce ne soit pas adaptée à l'emploi des procédés de forge ou bien que certaines possibilités avantageuses d'un point de vue économique ou mécanique soient d'office éliminées du fait d'une méconnaissance des bénéfices qui peuvent être tirés de l'utilisation des procédés de forge et de leur évolution.

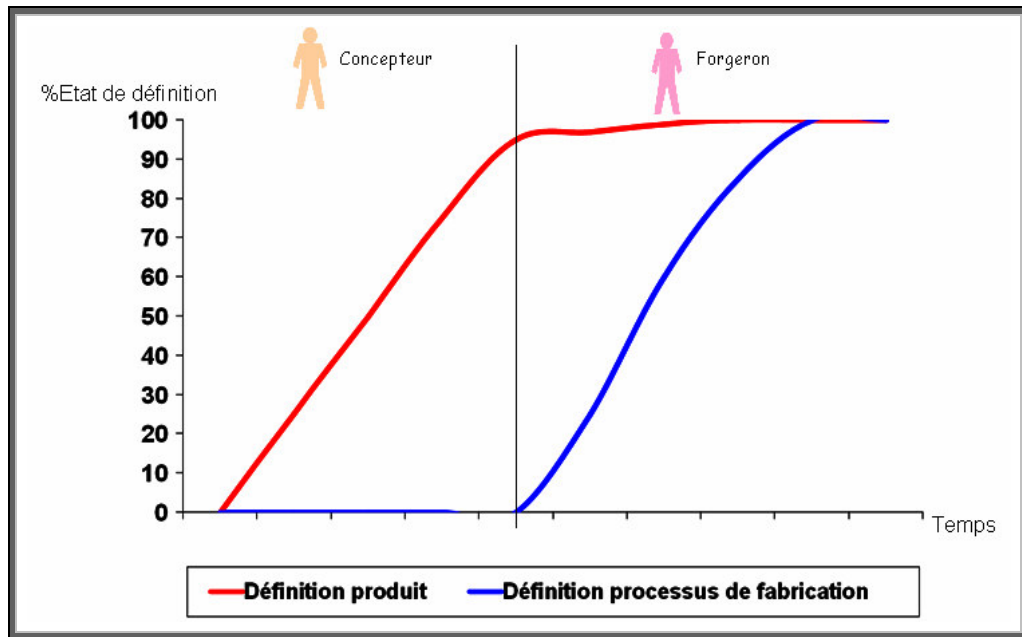


Figure 6 : Développement séquentiel

La situation qui tend à se développer aujourd'hui est une conception plus progressive et simultanée de la pièce et de son processus de fabrication associé (Figure 7) : A partir d'un certain niveau de définition de la pièce, la conception du processus de fabrication débute et s'effectue conjointement à la suite de la conception de la pièce. Ce travail peut être réalisé

- soit par le forgeron auquel la définition incomplète d'une pièce peut être fournie (dans ce cas, le client a tendance à se décharger de toute responsabilité fonctionnelle)
- soit par le concepteur qui définit la pièce en connaissance des conséquences impliquées sur le processus de fabrication
- soit par l'intermédiaire d'une collaboration entre le forgeron et le concepteur ([Boujut 2001], [Boujut 2002]).

Ainsi, les possibilités et limites des procédés de forge peuvent être prises en considération lors de la conception de la pièce.

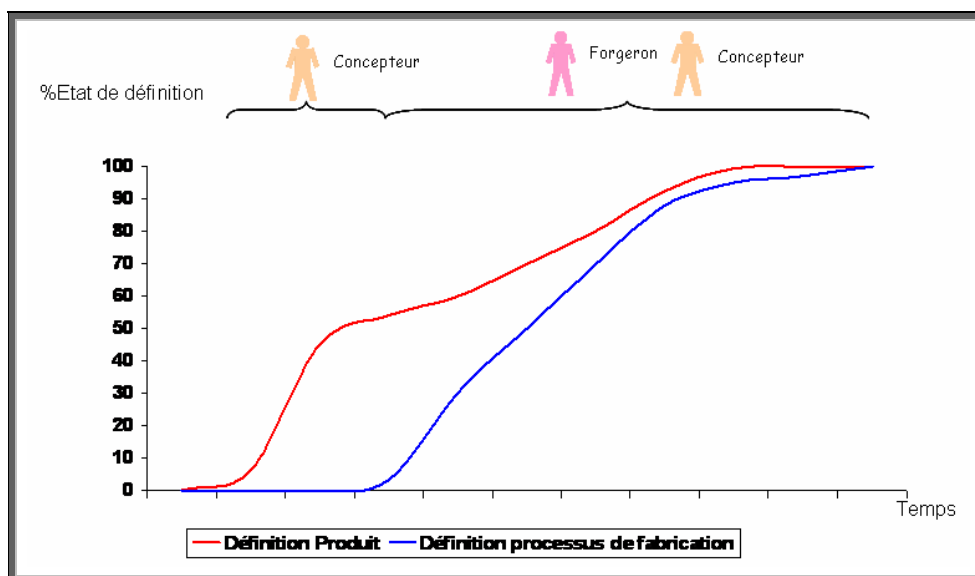


Figure 7 : Situation émergente

Conjointement à cette évolution dans la manière de définir pièce et processus de fabrication associé, l'utilisation accrue des moyens informatiques a fourni de nouvelles perspectives au métier de la conception.

Au niveau de la conception classique, des outils tels que COPEST ([Boujut 1992], [Boujut 2001]), ou d'autres systèmes experts ([Caporalli 1998], [Tisza 1995]), ont permis d'automatiser l'étape d'habillage en intégrant les différentes règles la concernant (que l'on peut trouver dans des livres de référence tels que [Chamouard 1970], [Lange 1985], [Schuler 1998], [ASM 2005]).

Les moyens de simulation par les méthodes d'éléments finis permettent en outre d'offrir une aide non négligeable préparatoire aux essais réels ([Chenot 1998], [Chenot 2002], [Altan 1997]). Ces moyens de simulations sont concrétisés notamment par deux applications que sont Forge 2D et Forge 3D développées par le CEMEF (Centre de Mise en forme des matériaux) et commercialisées par Transvalor (www.transvalor.com).

Enfin des approches de travail collaboratif adjointes à des outils informatiques adéquats permettent de supporter la situation émergente décrite précédemment [Laureillard 2000].

Cependant cette situation peut également être prise en charge par l'intermédiaire d'outils effectuant des prévisions ou recommandations considérant à la fois les choix sur le processus de fabrication et ceux effectués sur la pièce. Il existe peu d'outils de ce type appliqués spécifiquement à la forge, il est possible cependant de citer les travaux de Zdrahal [Zdrahal 1999] qui propose de déduire un processus de fabrication par l'intermédiaire d'une classification en fonction des paramètres d'une pièce à fabriquer.

Malgré l'abondance d'outils déjà développés pour faire face à l'évolution des moyens de production, des technologies disponibles ainsi qu'à l'exigence de réactivité pour la conception et la fabrication de produits nouveaux, des outils informatiques supplémentaires d'aide au concepteur sont absolument nécessaires dans un domaine où le savoir-faire métier est important. Ces nouveaux outils doivent répondre au problème de la multi-représentation des connaissances et à la contextualité de celles-ci.

1.1.5.2 Evolutions des procédés

Réduire le nombre d'opérations nécessaires à l'obtention d'une pièce et approcher au mieux possible les cotes définitives d'une pièce (dans le but de limiter les reprises d'usinage) représentent deux soucis constants pour l'industrie de la forge. L'obtention de pièces sans ou avec peu de reprise d'usinage est désigné communément par l'expression *forgeage net-shape* ou *forgeage near net shape*. Dans ce contexte il est possible de citer deux procédés en cours de développement : le thixoforgeage et le forgeage en matrices chaudes.

Thixoforgeage

Le thixoforgeage est un procédé qui consiste à mettre en forme des matériaux semi-solides après une refusion partielle. Il s'agit d'un procédé couramment utilisé dans l'industrie pour des matériaux à bas point de fusion et qui tend à se développer pour les matériaux à haut point de fusion tel que l'acier ([Ahmed 2007], [Cezard 2007]).

Ce procédé permet ainsi d'obtenir des pièces complexes avec une grande précision dimensionnelle, présentant des caractéristiques mécaniques élevées et homogènes, et ce en réduisant le nombre d'opérations. Le processus de fabrication en est ainsi simplifié et les cadences de production peuvent être alors augmentées.

Forgeage en matrices chaudes, forgeage isotherme [ASM 2005]

Les transferts de chaleur entre la pièce et les surfaces de la matrice ont pour conséquence un gradient de température important sur la pièce. L'écoulement de la matière est ainsi plus difficile au niveau des surfaces les plus froides qui sont au contact de la matrice. Conventionnellement les matrices utilisées pour l'estampage (forgeage de l'acier) sont chauffées à une température de l'ordre de 250°C selon l'équipement, pour atténuer ce phénomène. Celui-ci peut également être réduit par l'utilisation de machines rapides (marteau-pilons, presses à vis ou encore presses mécaniques) qui réduisent le temps de contact entre l'outillage et la pièce.

Un autre moyen de réduire le phénomène précité est de chauffer les matrices de l'outillage à une température proche de la température de forgeage effective. Ce procédé est alors appelé forgeage en matrices chaudes.

Le forgeage isotherme consiste à effectuer l'opération de forgeage en ayant chauffé les matrices à une température sensiblement égale à celle de la pièce. Ainsi le phénomène de refroidissement par les matrices disparaît totalement.

Les avantages que l'on peut tirer de ces deux procédés sont :

- l'amélioration dans la précision des géométries obtenues, ce qui permet de réduire les coûts de reprise d'usinage et de matériau engagé.
- la réduction du nombre d'opérations de formage.
- l'utilisation de vitesses de frappe moins élevées.

Enfin les principaux inconvénients liés à ces procédés sont :

- le recours nécessaire à des matériaux coûteux pour l'outillage.
- l'utilisation de systèmes de chauffage perfectionnés pour chauffer uniformément et précisément l'outillage.
- la nécessité de forger en atmosphère inerte ou sous vide pour éviter l'oxydation de l'outillage et de la pièce.
- la vitesse de l'opération de forgeage en matrices chaudes n'est pas très élevée afin d'obtenir un remplissage correct de la matrice lorsque l'on forge à faible pression.

1.1.6 Spécificités de la forge

1.1.6.1 Possibilités

Les trois principaux avantages de l'utilisation des procédés de forge sont les suivants :

- ***le gain de matière*** : l'emploi des procédés de forge implique l'engagement d'une masse quasi constante de matière. Celle-ci ne diminue que du fait de l'oxydation qui peut résulter du fait du chauffage ainsi que des bavures dans le cas de l'estampage. Les reprises d'usinage peuvent en outre être limitées d'autant plus si la série est importante (le brut de forge sera défini d'autant plus proche de la pièce finie si la série est conséquente). Enfin, l'apparition de procédés de type net-shape permet d'obtenir des pièces qui ne nécessitent même plus de reprise d'usinage et pour lesquelles la masse de matière engagée pour obtenir la pièce est quasiment identique à celle de la pièce.
- ***l'amélioration des caractéristiques mécaniques*** : les procédés de forge permettent de déformer la matière de façon continue et d'aligner les grains du matériau suivant des lignes continues. Cet effet est appelé le fibrage et permet d'obtenir un gain non négligeable des caractéristiques mécaniques, la limite élastique ainsi que la limite à la rupture étant ainsi largement augmentées, en particulier pour la tenue en fatigue. Cet

apport est cependant difficilement chiffrable et est fonction d'un nombre important de paramètres (procédés utilisés, conditions opératoires, métallurgie,...).

- **La productivité** : les cadences atteignables en forge sont élevées en comparaison aux autres domaines de fabrication tels que l'usinage ou la fonderie (une presse mécanique aura par exemple une cadence de 6 à 8 pièces par minute si le transfert est manuel, de 60 à 120 pièces par minute si le transfert est automatique).

Le Tableau 2 fait apparaître un comparatif entre la forge et d'autres procédés de fabrication courants. On y retrouve les principales qualités du procédé de forge : l'économie de matière et l'augmentation des caractéristiques mécaniques.

Tableau 2 : Comparaison de procédés par rapport à la forge d'après [ASM 2005]

Procédé comparé	Avantages de la forge par rapport au procédé comparé
Fonderie	Résistance mécanique plus élevée Les préformes limitent les défauts Plus fiable Meilleur comportement par rapport au traitement thermique Adaptable à la demande
Soudage, mécano-soudage	Economie de matériau Plus solide Meilleures caractéristiques métallurgiques (plus homogènes) Production plus simple
Usinage	Le fibrage permet une meilleure résistance Economie de matériau Pas de pertes en copeaux Nécessite moins d'opérations secondaires
Frittage	Plus résistant Intégrité plus élevée Nécessite moins d'opérations secondaires Plus de liberté dans la conception Matériau moins cher
Matériaux composites, matériaux plastiques	Matériau moins cher Plus grand productivité Domaine de service plus large (au niveau de la température) Meilleures fiabilité de performances en service

1.1.6.2 Limites

Les limites importantes que l'on peut relever concernant les procédés de forge sont les suivantes :

- **les morphologies atteignables** : certaines formes de pièce peuvent être particulièrement difficiles voire impossibles à obtenir par les procédés de forge. Si la pièce possède en effet des contre-dépouilles ou bien des angles vifs, il est possible que les procédés de forge ne suffisent pas (auquel cas ils ne servent par exemple qu'à produire une ébauche simple, et l'on a ensuite recours à des procédés d'un autre domaine de fabrication tel que l'usinage) ou soient impossibles à mettre en œuvre.
- **Les efforts** mis en jeu lors de la fabrication d'une pièce par des procédés de forge peuvent constituer une limite. En effet plus le niveau de détail souhaité sur la pièce est important, et plus les efforts nécessaires sont élevés. La capacité des engins de forge est ainsi un élément important à prendre en compte lors de la définition d'une pièce.
- **Les petites séries** ne sont économiquement pas viables : il s'agit ici de la contrepartie de la productivité ; En effet, le coût de développement et de mise en place d'un processus de fabrication impliquant des procédés de forge est nettement plus élevé que

d'autres utilisant par exemple uniquement des procédés d'usinage. Les outillages de forge sont particulièrement onéreux et ne se justifient que dans le cas d'une grande série. Pour une petite série, le choix s'orientera vers la forge libre ce qui suppose le recours à un personnel hautement qualifié. Cependant dans certains domaines tels que l'aéronautique, un certain niveau de caractéristiques mécaniques est requis ce qui implique l'utilisation de procédés de forge, même si la série est petite.

- Enfin il faut noter que *certains matériaux ne sont pas forgeables*. C'est le cas par exemple de la fonte qui est impossible à mettre en œuvre quel que soit le procédé de forge. Certains matériaux, du fait de leur dureté et de leurs caractéristiques mécaniques élevées ne sont également pas forgeables à froid (comme dit précédemment, l'énergie nécessaire pour une déformation à froid est largement supérieure à celle requise pour les procédés de forge à chaud).

1.1.7 Choix dus aux spécificités de la forge

Deux principales caractéristiques des procédés de forge conduisent à certains choix concernant l'approche choisie pour la gestion du lien entre les paramètres de la pièce et ceux du processus de fabrication :

1. Lorsque l'on utilise un procédé de forge, la pièce subit des modifications de ses propriétés géométriques et mécaniques de façon globale. Ceci est par exemple contraire aux procédés d'usinage : une opération d'usinage modifie la pièce de façon locale (ex : perçage d'un trou, surfaçage,...).
2. Il existe une corrélation importante entre la modification des paramètres géométriques de la pièce et la variation des caractéristiques mécaniques. L'étirage à froid d'un lopin va par exemple modifier à la fois la longueur du lopin et la résistance mécanique du lopin dont le matériau se retrouvera écroui.

Le premier point conduit à la nécessité d'une considération globale de la pièce pour commencer à déterminer le processus de fabrication, ainsi l'utilisation d'une approche prenant en compte une description de la pièce par entités n'est pas adaptée à ce niveau.

La deuxième remarque implique de tenir compte de l'importance du bénéfice apporté par la forge en matière d'amélioration des caractéristiques mécaniques. Cette caractéristique doit être mise en avant afin de la considérer lors de la conception de la pièce et de son processus de fabrication associé.

1.2 Intégrer : gérer le lien entre produit et processus de fabrication

Le lien entre le produit et son processus de fabrication associé a souvent pu être négligé par le passé et encore aujourd'hui comme le dénonce la Figure 8 : un mur peut se trouver érigé entre les personnes qui se consacrent à faire des choix sur la conception du produit et celles qui s'emploient à trouver la façon de le fabriquer. Dans ce type de structure, celui qui prend en charge la conception ne se préoccupe pas ou peu de la fabrication : le lien entre le produit et son processus de fabrication est ainsi négligé. Il peut en résulter d'une part des retours éventuellement nombreux sur la conception si celle-ci n'est pas compatible avec les possibilités de la fabrication (capabilités des procédés ou des moyens de fabrication) ; En outre, l'évolution des marchés, la diminution de la taille des séries ont poussé à prendre en compte les contraintes de fabrication le plus tôt possible pour pouvoir obtenir la définition d'une pièce fabricable rapidement et sans retour de conception lors de la production.

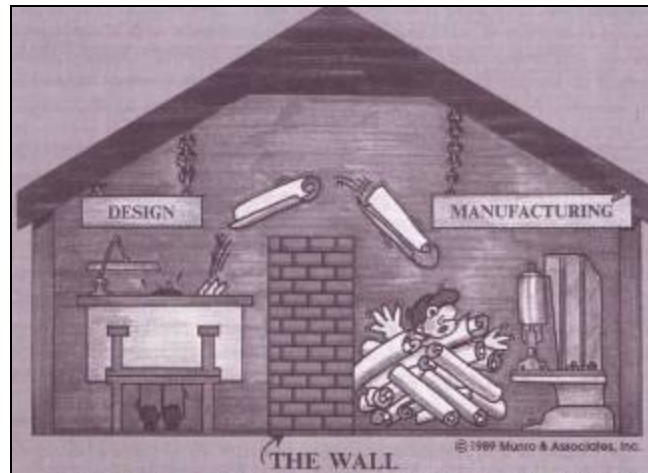


Figure 8 : Séparation entre la conception du produit et la conception du processus de fabrication [Boothroyd 1994]

Afin d'éviter ces travers, le lien entre le produit et son processus de fabrication associé a été traité dans de nombreuses études et appliqué à différents domaines de fabrication comme nous allons le voir par la suite. Notons cependant que la plupart de ces études concernent l'usinage. Ce lien existe entre deux ensembles de données que sont les données qui concernent la définition d'un produit et celles qui sont relatives à la définition d'un processus de fabrication. Deux aspects sont à considérer par rapport à ce lien :

- classiquement, le processus de fabrication est défini à partir des choix qui ont été faits sur la définition du produit.
- la définition du produit peut être effectuée également à partir des choix qui sont faits sur le processus de fabrication.

Ces deux aspects ont été précédemment identifiés par Coyne et al. qui proposent un modèle général de conception intégrée se basant sur une boucle analyse-synthèse [Coyne 1990]. L'analyse constitue le choix des procédés, la synthèse consiste en l'intégration des contraintes des procédés au cours de la phase de conception du produit.

De même, Ishii et al. [Ishii 1991] identifient les deux notions de l'intégration comme étant d'une part le choix des procédés à partir des exigences liées au produit, et d'autre part la définition des données (géométriques et autres) du produit compatible avec les procédés choisis pour la fabrication : ce deuxième point constitue ce qu'on appelle communément l'approche DFM (Design For Manufacturing ou Conception pour la fabrication). L'approche DFM peut être décomposée synthétiquement en plusieurs activités comme le montre la Figure 9 : le choix des procédés et des matériaux, l'étude de la manufacturabilité,...

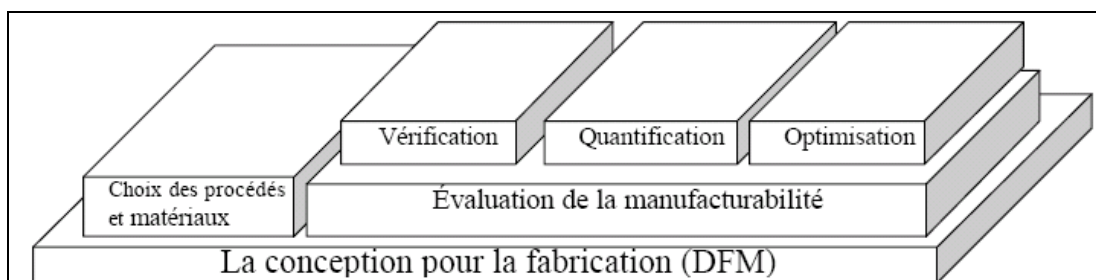


Figure 9 : La conception pour la fabrication [Vliet 1999]

Le choix des procédés et la conception pour la fabrication peuvent être associés à l'utilisation du principe de moindre engagement [Paris 2003] :

Le principe de moindre engagement oblige tout acteur du processus de conception à apporter les informations dont il dispose sur le problème dès qu'il le peut mais seulement s'il est capable de les justifier. On permet ainsi de prendre en compte le plus tôt possible des contraintes qui vont apparaître dans la résolution du problème tout en responsabilisant l'acteur sur la réalité des contraintes à l'instant donné.

Dans les points suivants seront détaillées les différentes approches existantes concernant les deux aspects de l'intégration précédemment cités :

- le choix des procédés
- la conception pour la fabrication

1.2.1 Choix des procédés

Le choix des procédés correspond à la démarche classique de conception : définir le processus de fabrication à partir de la définition d'un produit. Cependant, ceci s'inscrit plus dans l'optique de considérer systématiquement l'ensemble des solutions possibles plutôt que d'en déterminer une de façon empirique ou bien sur la base de l'expérience des concepteurs. Plusieurs approches ont été développées et peuvent être commentées à partir de ce point de vue.

1.2.1.1 Approche d'Ashby

La première démarche que nous pouvons citer est celle proposée par Ashby [Ashby 2004] pour la sélection des procédés et du matériau utilisés. Ashby suggère de sélectionner les procédés en balayant d'une part tous les procédés possibles et en éliminant ceux qui ne sont pas compatibles notamment avec la géométrie et éventuellement avec le matériau définis. Une phase de classement est effectuée à partir essentiellement des critères de coût. Le choix final est effectué par rapport à ce classement, à l'expertise des techniciens, ainsi qu'à la disponibilité des ressources de production. L'approche présentée ne présuppose pas d'un domaine de fabrication particulier, contrairement au cadre de notre étude. Procédé et matériau utilisés sont intimement liés et c'est ce qui est souligné dans l'approche d'Ashby, d'où la difficulté de la première phase où la sélection du procédé nécessite de connaître le matériau, alors que celle du matériau a besoin de connaître le procédé choisi. L'approche est résumée sur la Figure 10.

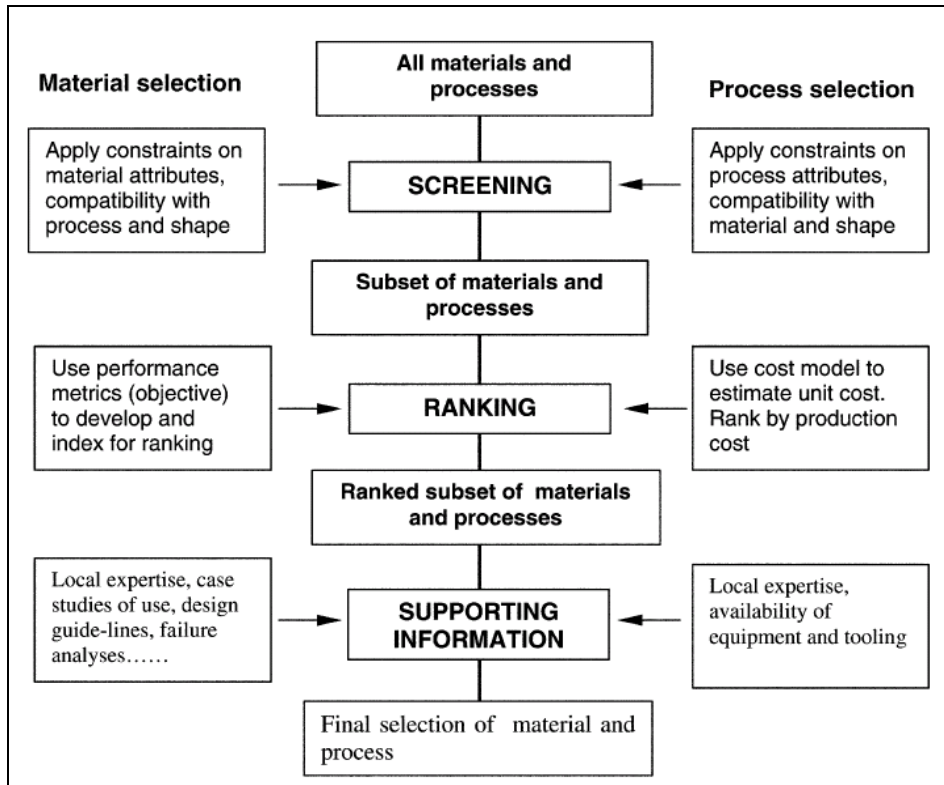


Figure 10 : Sélection des procédés et des matériaux [Ashby 2004]

Un outil informatique a été développé pour supporter l'approche proposée, il s'agit du module informatique CES Selector (Cambridge Engineering Selector) permettant de sélectionner les matériaux et procédés utilisables pour une conception donnée. L'analyse effectuée repose sur le triplet fonction – objectif – contrainte : d'après la fonction du produit, un ou plusieurs objectifs sont définis et certaines contraintes sont à respecter. Un objectif est décrit sous la forme d'un critère à maximiser ou minimiser (exemple : on souhaite que le poids soit le plus faible possible) tandis qu'une contrainte se présente comme une inégalité à respecter (exemple : le coût doit être inférieur à 200 euros, la résistance mécanique d'une section doit être supérieure à 500 MPa). Des graphes sont alors présentés à l'utilisateur qui récapitulent les possibilités offertes par les différents matériaux et procédés de fabrication existants, indiquant leurs domaines de validité par rapport aux caractéristiques rentrant en jeu dans les objectifs et les contraintes. Le graphe présenté Figure 11 montre un exemple de sélection de matériau selon la température de tenue en service. Les matériaux dont la plage de température ne correspond pas à la contrainte requise ne sont alors pas considérés. L'utilisateur peut ainsi examiner plusieurs possibilités et en choisir une en connaissance de cause. Le fonctionnement de cette application repose sur une base de données rassemblant les caractéristiques des matériaux et des procédés. Il est possible également de personnaliser cette base de données en y intégrant ses propres données ou encore les données d'une autre base.

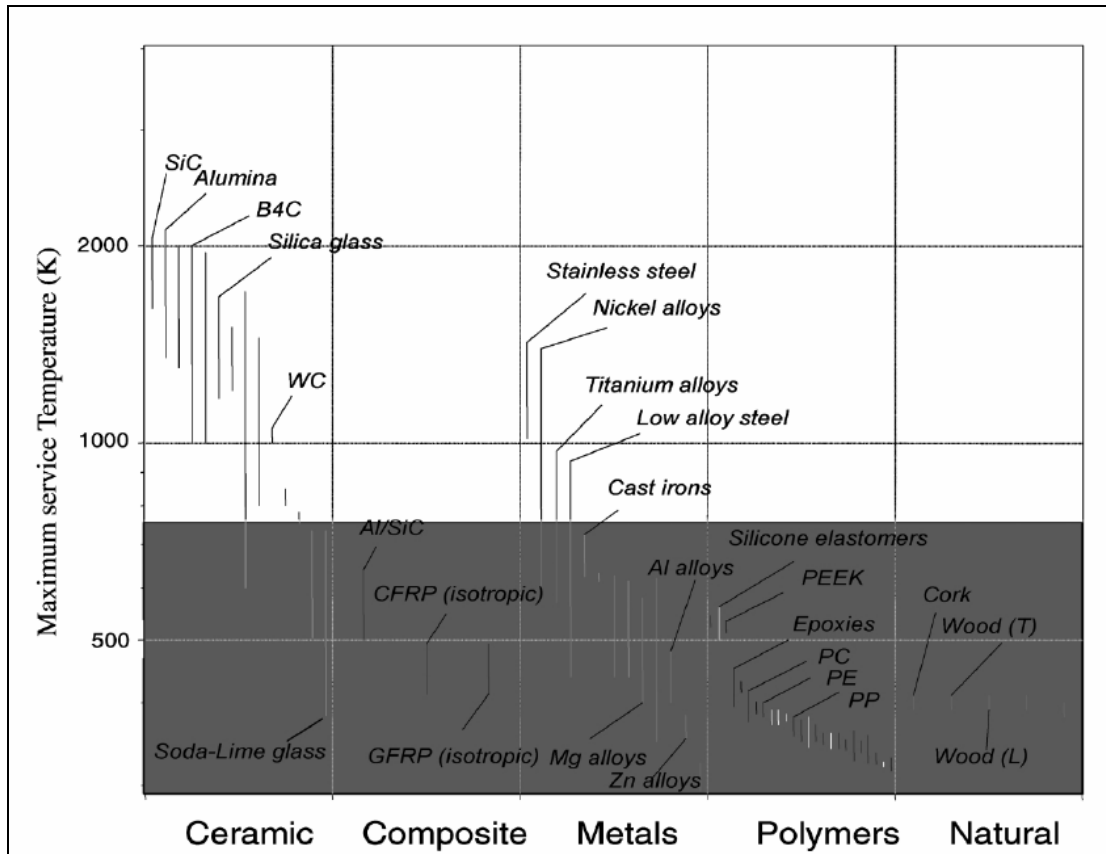


Figure 11 : Graphe de sélection des matériaux selon la température de tenue en service généré par l'application CES4 [Ashby 2004]

1.2.1.2 Approche de Gupta

L'approche de Gupta peut être décomposée en trois phases [Gupta 2003] :

- A partir d'exigences d'ordre économiques et géométriques, un algorithme permet d'identifier des couples Matériau/Procédé vérifiant les conditions requises. Le principe de cet algorithme est le suivant : dans un premier temps une base de matériaux est parcourue pour sélectionner les matériaux répondant aux exigences ; Pour chacun des matériaux sélectionnés, une base de procédés est parcourue pour sélectionner les procédés compatibles avec le matériau et répondant également aux exigences. Le résultat est un ensemble de couples Matériau/Procédé compatibles et répondant aux exigences.
- Construire les processus de fabrication possibles à partir des couples Matériau/Procédé identifiés lors de la phase précédente.
- S'ensuit une sélection des processus de fabrication les plus intéressants économiquement à l'aide d'une estimation du coût fournie par le logiciel SEER-DFM (www.galorath.com), le concepteur se chargeant du choix définitif.

La Figure 12 présente le modèle d'information utilisé par Gupta pour la gestion des données concernant les procédés et les matériaux.

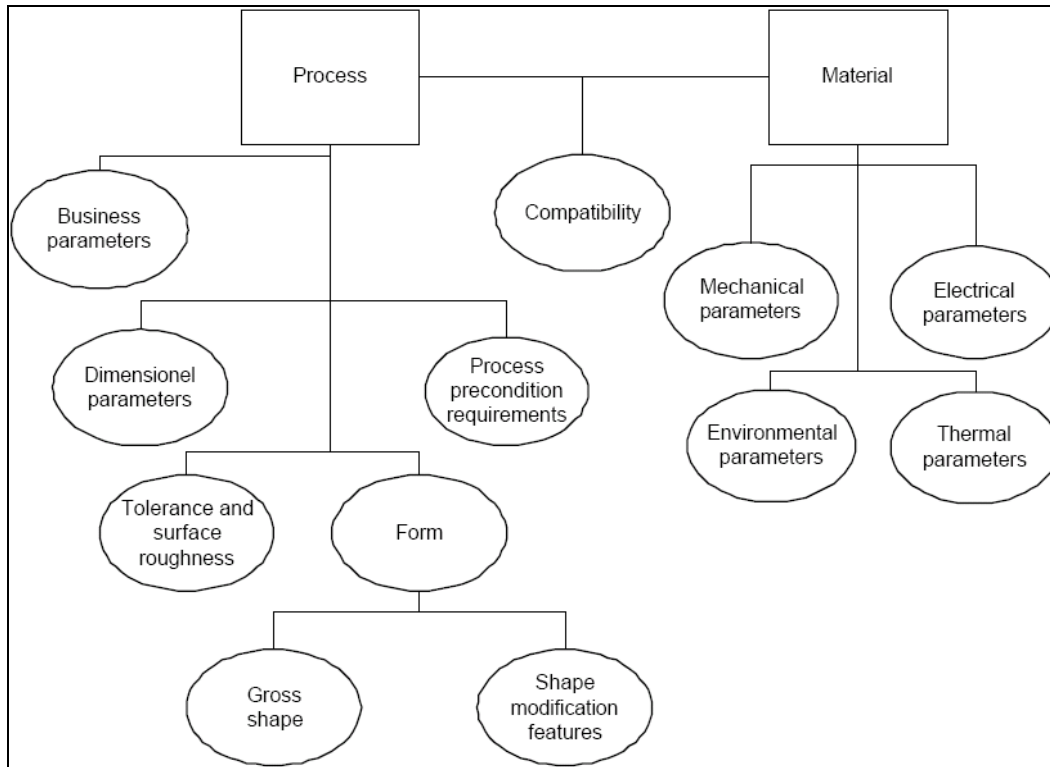


Figure 12 : Modèle d'information Procédés et Matériaux [Gupta 2003]

1.2.1.3 Approche de Lovatt

L'approche de Lovatt est basée sur la sélection des procédés par tâche de fabrication [Lovatt 1998] : ayant un processus de fabrication défini en plusieurs tâches de fabrication (ex : couper de l'acier, traitement thermique d'un acier, moulage d'un alliage d'aluminium), l'idée est de déterminer pour chaque tâche de fabrication précisément quel procédé utiliser. La sélection qui est alors effectuée s'appuie sur la combinaison des attributs des procédés, des matériaux et du produit qui permettent de satisfaire des exigences de conception comme le montre la Figure 13.

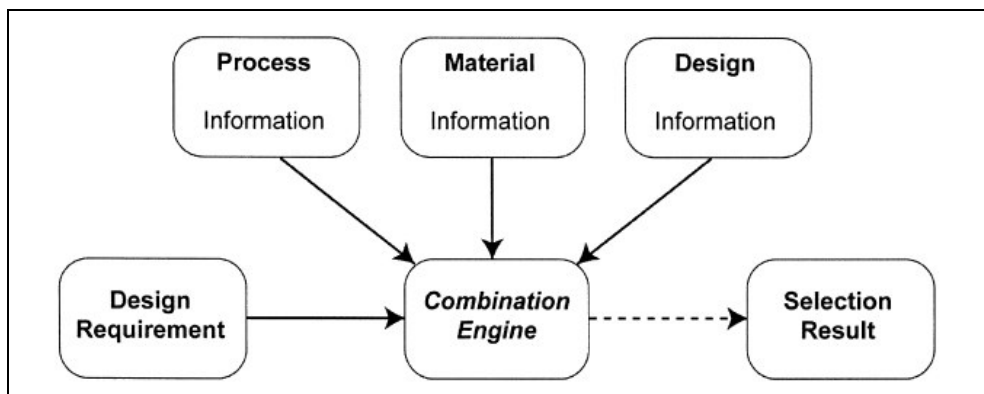


Figure 13 : Eléments impliqués dans la sélection par tâche de fabrication [Lovatt 1998]

La méthode proposée par Lovatt pour réaliser cette sélection est illustrée sur la Figure 14. Cette méthode s'applique pour la sélection de chaque tâche de fabrication et se décompose en deux phases distinctes :

- Phase 1 : Ayant identifié une tâche de fabrication, la première étape est de définir les exigences qui portent sur cette tâche et les résultats qui doivent être atteints par celle-ci. Cela constitue des éléments qui doivent être considérés au cours de la sélection. La deuxième étape consiste à définir les attributs de cette tâche qui sont relatifs au procédé, au matériau et à la conception du produit. Cela peut-être le type de procédé, le type de matériau, les paramètres morphologiques du produit. Ces attributs permettront d'effectuer les sélections au niveau du procédé, du matériau.
- Phase 2 : quatre étapes permettent d'évaluer les différentes possibilités. Trois ont un point de vue purement technique tandis que la dernière considère l'aspect économique.
 - Le balayage initial permet d'éliminer tous les procédés qui ne sont pas utilisables du fait du matériau choisi ou bien de la taille du composant.
 - L'évaluation primaire permet ensuite d'obtenir un ensemble de procédés possibles vérifiant les critères de production lorsque les exigences techniques sont considérées.
 - L'évaluation de performance fournit un ensemble de procédés dits probables qui correspondent aux exigences de performance spécifiées pour la tâche de fabrication correspondante.
 - L'évaluation économique permet enfin d'éliminer les possibilités issues des trois étapes précédentes et qui ne sont pas économiquement viables.

L'approche de Lovatt se distingue de celle d'Ashby par le fait qu'elle privilégie la séquentialité des étapes ce qui permet la considération de détails plus affinés étant donné que le nombre d'options se trouve ainsi réduit progressivement.

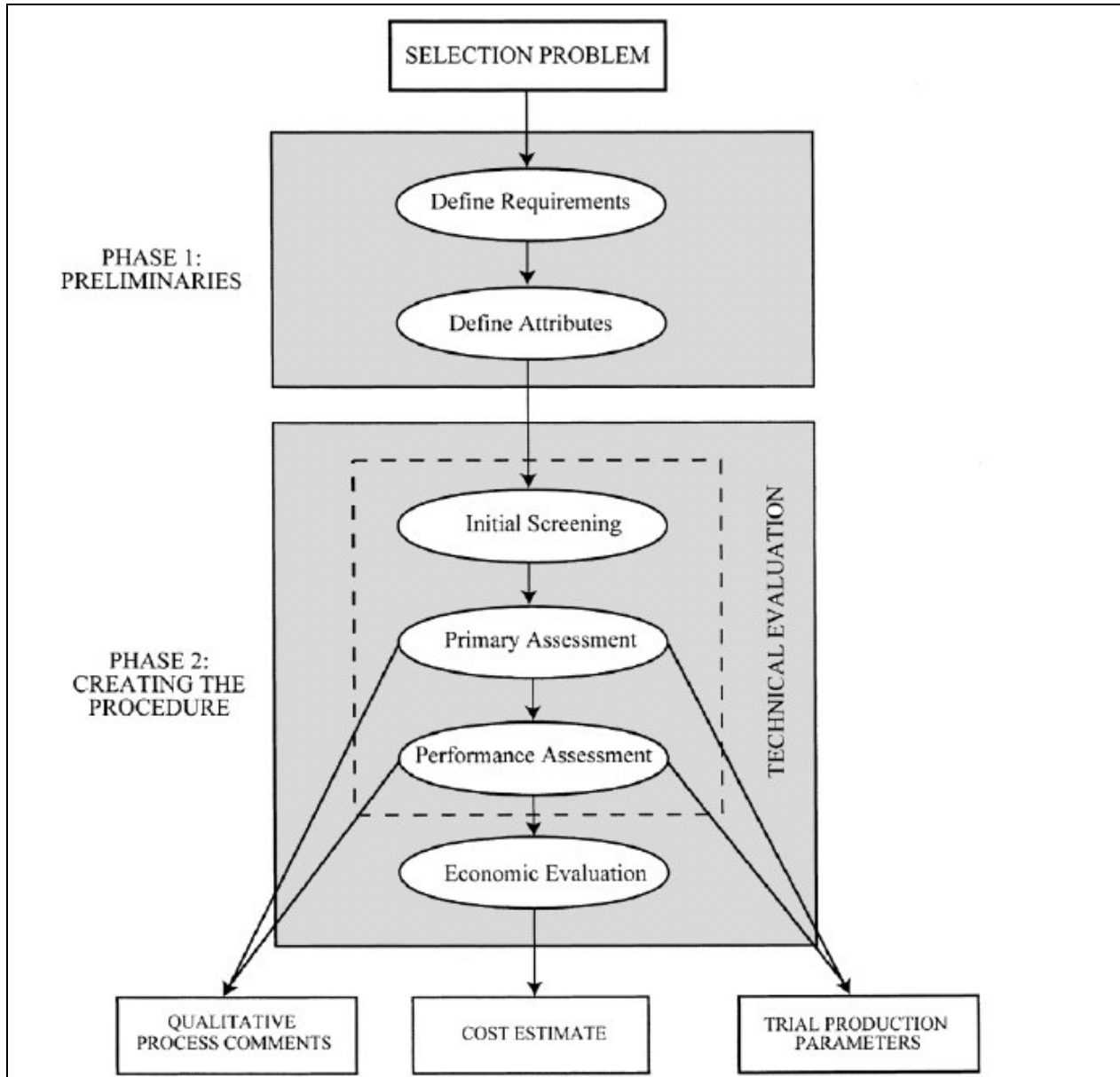


Figure 14 : Approche de Lovatt [Lovatt 2001]

1.2.1.4 Approche de Ishii

Ishii identifie trois types de sélection de procédés (à trois moments de la conception du produit) [Ishii 1990] :

- La sélection fonctionnelle : il s'agit d'une sélection dépendant de la fonction mécanique. Elle est réalisée lors de la définition fonctionnelle et lors de l'étape de recherche des concepts.
- La sélection préliminaire : elle se fait lors de la conception préliminaire, lorsque les choix concernant la géométrie, le matériau ou même l'échelle de production sont encore imprécis.
- La sélection par tâche de fabrication : Cette sélection a lieu lors de la conception détaillée ; la description des procédés lors de cette sélection est précise.

L'approche d'Ishii vise à sélectionner les procédés utilisés à partir d'une étude de l'adéquation entre les données de conception et celles de fabrication. Elle se décompose en deux étapes :

- La première étape est l'identification des facteurs importants qui affectent la sélection des procédés (Figure 15), ceci en portant une attention particulière aux caractéristiques qui affectent les facteurs originaux (par exemple le matériau affecte le choix du procédé, et certaines caractéristiques du procédé affectent le choix du matériau).

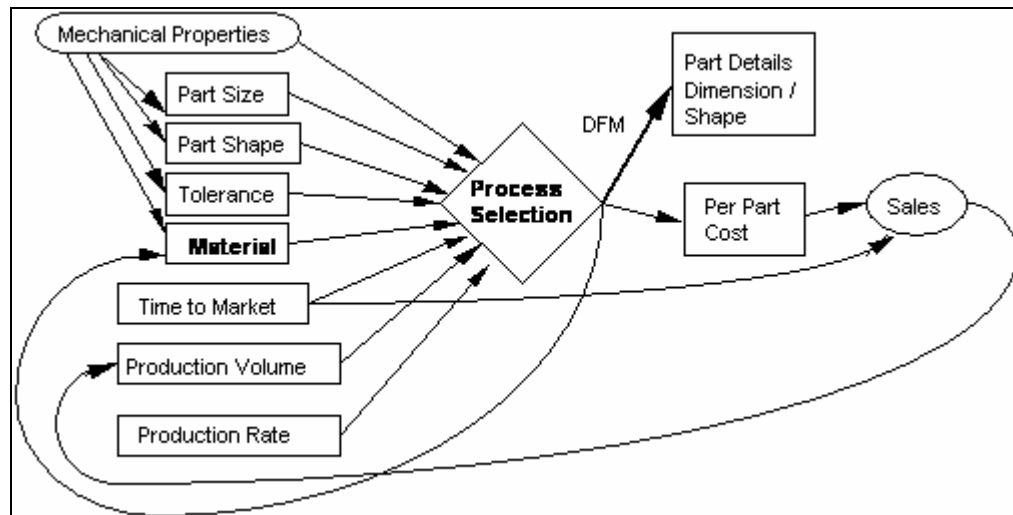


Figure 15 : Sélection des procédés [Ishii 1991]

- La seconde étape consiste à développer des schémas de représentation pour les connaissances utilisées lors de la sélection des procédés. Lors de la conception préliminaire, les connaissances qualitatives par rapport à la compatibilité des données de la conception avec les données des procédés sont privilégiées. Au fur et à mesure que la conception progresse, des connaissances plus quantitatives peuvent être utilisées et permettre ainsi de classer plus précisément les procédés possibles en fonction d'indicateurs tels que le coût.

Un démonstrateur nommé HyperQ/Process a été implémenté dans le but d'illustrer cette méthode. Il s'agit d'un système expert qui permet de distinguer les solutions (procédés sélectionnés) les plus pertinentes par rapport à la compatibilité des données entre les données du produit et les données des procédés, et qui satisfont au mieux les exigences du produit.

1.2.1.5 Approche de Boothroyd

L'approche de Boothroyd est relativement proche de celle de Gupta dans le sens où l'on sélectionne également des couples Procédé / Matériau. Cette sélection se fait sur la base des capacités des procédés à réaliser les attributs géométriques spécifiés ainsi que les contraintes des matériaux. Un exemple de données permettant la sélection des procédés est proposé sur le Tableau 3.

Le choix final est basé sur l'élimination des couples Procédé / Matériau inadmissibles ainsi que sur la considération d'autres paramètres, notamment le coût.

Tableau 3 : Procédés et leurs capacités à réaliser des attributs donnés, d'après [Boothroyd 1994]

Process	Part size	Tolerances	Surface finish	Shapes produced competitively
Sand casting	Weight: 0.2 lb-450 ton Min wall: 0.125 in.	General: ± 0.02 (1 in.), ± 0.1 (24 in.) For dimensions across parting line add ± 0.03 (50 in. ²), ± 0.04 (200 in. ²)	500-1000 micro-inches	Large parts with walls and internal passages of complex geometry requiring good vibration damping characteristics
Investment casting	Weight: 1 oz-110 lb Major dimension: to 50 in. Min wall: 0.025 (ferrous), 0.060 (nonferrous)	General: ± 0.002 (1 in.), ± 0.004 (6 in.)	63-25 micro-inches	Small intricate parts requiring good finish, good dimensional control, and high strength
Die casting	Min wall (in.): 0.025 (Zn), 0.05 (Al, Mg) Min hole dia. (in.): 0.04 (Zn), 0.08 (Mg), 0.1 (Al) Max weight (lb): 35 (Zn), 20 (Al), 10 (Mg)	General: ± 0.002 (1 in.), ± 0.005 (6 in.) (Zinc) ± 0.003 (1 in.), ± 0.006 (6 in.) (Alum, Mg) Add ± 0.004 across parting line or moving core	32-85 micro-inches	Similar to injection molding
Injection molding (thermoplastics)	Envelope: 0.01 in. ³ -80 ft ³ Wall: 0.03-0.250 in.	General: ± 0.003 (1 in.), ± 0.008 (6 in.) Hole dia.: ± 0.001 , ± 0.002 Flatness: ± 0.002 in./in. Increase tol. 5% for ea. ad. mold cavity Increase tolerance ± 0.004 for dimensions across parting line	8-25 micro-inches	Small to medium sized parts with intricate details and good surface finish
Structural foam molding	Weight: 25-50 lb Wall: 0.09-2.0 in.	Approximately that of injection molding	Poor: paint generally required	Large, somewhat intricate parts, requiring high stiffness and/or thermal or acoustical insulating properties

Un module informatique nommé DFMA a été développé par Boothroyd et Dewhurst, comprenant deux outils :

- DFA (Design For Assembly) dont l'objectif est de réduire la complexité du produit et l'estimation du coût d'assemblage ;
- DFM (Design For Manufacture) qui a pour fonction d'estimer le coût du concept et d'aider au choix des procédés et des matériaux utilisés.

1.2.1.6 Computer aided process planning

Des approches plus algorithmiques ont été développées. Ces approches peuvent être regroupées sous l'appellation « Computer aided process planning ».

En général ces approches prennent en entrée une définition de pièce complète qui ne sera pas remise en question. La plupart des études sont appliquées au domaine de l'usinage.

Il est possible de distinguer principalement deux types d'approche de CAPP : générative et par variante [Bernard 2003] [Marri 1998] :

L'**approche par variante** était la première approche utilisée pour informatiser la conception du processus de fabrication. Elle est basée sur l'idée que des pièces similaires ont des processus de fabrication similaires. Ainsi en retrouvant des pièces similaires il est possible de reprendre le processus de fabrication utilisé alors et de l'adapter à la pièce en cours de traitement (principe du raisonnement à partir de cas). Pour retrouver des pièces similaires, les méthodes de classification ou de technologie de groupe (voir 1.3.5) peuvent être utilisées (les pièces sont classifiées ainsi selon leurs caractéristiques).

L'**approche générative** a été développée après l'approche par variante. Elle a pour but de générer automatiquement le processus de fabrication à partir d'un savoir-faire de

génération de gamme appliqué sur la description de la pièce. La plupart du temps, cette description de pièce est un modèle CAO. Les principaux ingrédients de l'approche générative sont les bases de données de fabrication, la logique de décision et les algorithmes. Au début des années 80, les techniques d'intelligence artificielle (notamment les bases de connaissances) ont fait leur apparition dans le domaine du CAPP. En outre des approches mixtes (générative/variante) ont vu le jour pour combiner les avantages des deux approches.

Plusieurs systèmes ont ainsi été développés dans différents domaines comme l'emboutissage ([Smith 1992]), l'usinage ([Narang 1993], [Lee 1993], [Giusti 1989], [Luong 1995], [Smith 1993]), le système PROPEL [Brissaud 1997]), l'assemblage ([Browne 1991]) ou la forge ([Zdrahal 1999]). Notons que la plupart des travaux portent sur le domaine de l'usinage.

1.2.2 Conception pour la fabrication

La conception pour la fabrication vise à concevoir un produit fabricable et économique en fonction des choix qui ont été faits sur le processus de fabrication. Ces choix imposent des contraintes qu'il est nécessaire de respecter au cours de la conception.

En réalité, peu de travaux ont été menés sous cet angle de vue, et l'approche qui est privilégiée est d'utiliser les outils du sens précédent « choix des procédés » au sein d'une démarche par itération des deux étapes : proposition / vérification :

- **Proposition** d'une solution possible pour la conception d'une pièce
- **Vérification** de sa manufacturabilité. Cette dernière étape pouvant se décomposer en trois phases [Skander 2006] :
 1. **Vérification** : déterminer si le produit est raisonnablement fabricable, c'est-à-dire :
 - a. Connaître les intentions de conception et les capacités de fabrication,
 - b. Accepter les concepts compatibles avec les solutions déjà exploitées, même si leur fabrication est assez complexe,
 - c. Rejeter les concepts qui nécessitent des modifications très coûteuses du système de production.
 2. **Quantification** (mise en place d'indicateurs) : les paramètres à quantifier sont le coût, le temps et la qualité. Dans la littérature, le coût est l'indicateur le plus étudié (par exemple les travaux de [Boothroyd 1994]).
 3. **Optimisation** : elle se fait selon trois niveaux : humain (compétence), moyens (machines, outils et logiciels) et produit (conception) [Arimoto 1993].

Appliqué dans le cadre de l'usinage par exemple, cette problématique peut se résumer à l'aide de deux questions [Brissaud 1997] : la pièce qui est en train d'être conçue est-elle usinable ? Si elle ne l'est pas, quels sont les obstacles et que proposer pour les dépasser ?

Certains travaux ont porté en revanche plus précisément sur la conception sous contrainte, ce qui correspond davantage à l'idée de conception pour la fabrication.

Feng et Kusiak proposent par exemple d'intégrer les contraintes de fabrication liées à l'usinage dès la conception grâce à des algorithmes de propagation de contraintes [Feng 1995]. Il s'agit d'une approche par entité appliquée au domaine de fabrication de l'usinage et permettant d'intégrer dès la conception les contraintes de fabrication. Deux bases de données stockant d'une part les contraintes et d'autre part les entités permettent au moteur d'inférence de déterminer, dès qu'une forme est définie, si celle-ci est fabricable ou non (Figure 16).

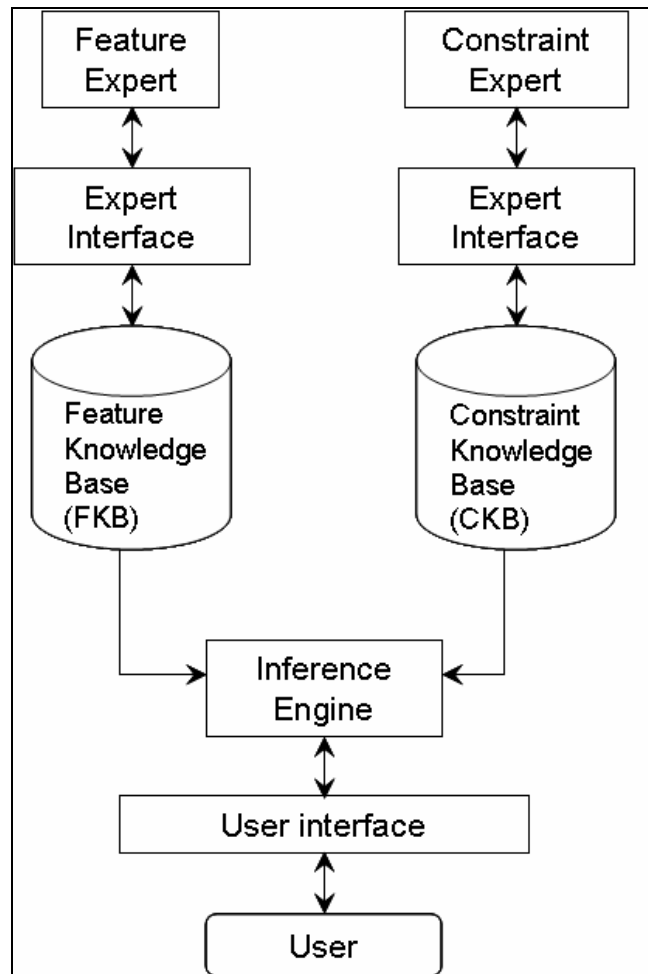


Figure 16 : Système de conception sous contrainte [Feng 1995]

Plus récemment, Kumar et al. décrivent un système à base de connaissances pour évaluer la manufacturabilité de pièces embouties [Kumar 2006]. La base de connaissances est constituée d'un ensemble de règles métier qui permettent de fournir des conseils à l'utilisateur quant à la manufacturabilité de sa conception par rapport aux opérations d'emboutissage. Les conseils fournis peuvent être ainsi utilisés au cours de la conception, afin d'obtenir directement une définition de pièce correcte par rapport aux contraintes de fabrication. Cette base de connaissances peut en outre être enrichie ou modifiée par l'utilisateur selon les ressources de fabrication qu'il possède.

Dans le même ordre d'idée, le CETIM a développé un outil d'aide à la conception du processus de fabrication dans le domaine de l'emboutissage : OME (Outils Métier pour l'Emboutissage : www.ome.fr). Un ensemble conséquent de connaissances concrètes ont été formalisées dans OME sous la forme de fiches de connaissances décrivant des règles concernant la conception du processus de fabrication d'une pièce emboutie. Le processus de fabrication est défini par l'utilisateur, aidé par les fiches de connaissances qui y sont relatives. Une vérification de cohérence est possible entre le processus de fabrication défini et les ressources à disposition dont les caractéristiques sont préalablement renseignées par l'utilisateur. Il est également possible avec cet outil de définir plusieurs alternatives de processus de fabrication ainsi que d'obtenir des indicateurs estimant le coût. En revanche, OME part d'une conception complètement définie de la pièce, qui n'est pas remise en cause en fonction des procédés ou des ressources utilisés.

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

Le lien entre produit et processus de fabrication peut-être décomposé en deux parties : d'une part le choix des procédés à partir de la définition du produit et d'autre part la conception pour la fabrication. Plusieurs approches ont été répertoriées par rapport à ces deux parties. Les approches de type « choix des procédés » sont bien plus nombreuses et développées que celles du type « conception pour la fabrication ».

Les caractéristiques des différentes approches « choix des procédés » sont récapitulées dans le Tableau 4. Les plus abouties sont celles d'Ashby, de Gupta et de Boothroyd qui proposent des applications développées et exploitées commercialement.

Tableau 4 : Tableau comparatif des approches "choix des procédés"

Approche	Description	Choix des procédés	Choix des Matériaux	Outil associé	Evaluation économique
<i>Ishii</i>	Analyse de la compatibilité des données par base de données de cas	Oui	Non	HyperQ/Process	Oui
<i>Ashby</i>	Spécification des attributs des procédés, puis comparaison de ces attributs avec ceux de la conception	Oui	Oui	CES	n.a.
<i>Gupta</i>	Création de combinaisons matériau/procédé dans des gammes pour identifier les plus intéressantes	Oui	Oui	Seer-DFM	Oui
<i>Boothroyd</i>	Similaire à Ashby	Oui	Oui	DFMA	Oui
<i>Lovatt</i>	Combinaison de trois paramètres : information conception, information procédé, information matériau, et vérification de la viabilité des possibilités deux à deux	Oui	n.a.	n.a.	Oui

Les approches algorithmiques de type « computer aided process planning » sont plus contraignantes étant donné qu'elles partent d'une conception complètement définie et visent le plus souvent à obtenir une unique solution associée pour le processus de fabrication.

Le plus souvent la « conception pour la fabrication » se résume à une démarche basée sur les deux étapes « proposition/vérification » en utilisant les outils dédiés au « choix des procédés ».

1.3 Représentation et exploitation des connaissances appliquées à l'intégration

Le lien qui existe entre le produit et son processus de fabrication associé appartient au domaine de la formalisation de la connaissance. En effet, les experts utilisent leurs connaissances pour déterminer le choix des procédés ou bien pour concevoir un produit dans le respect des contraintes imposées par la fabrication. L'objectif ici est de présenter quelles peuvent être les différentes natures de ces connaissances et comment si possible les exploiter dans le cadre de l'intégration.

1.3.1 Connaissance

D'après Grundstein, la connaissance peut être décrite au moyen de trois postulats [Grundstein 2002] :

Postulat 1 : 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.

Postulat 2 : 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.

Postulat 3 : il existe deux grandes catégories de connaissances de l'entreprise : les éléments tangibles (connaissances formalisées) et les éléments intangibles (connaissances incarnées par des personnes).

A cela il est intéressant de préciser à la manière de [Alsène 2002] les trois types de connaissances esquissées au niveau du troisième postulat :

- les savoirs formalisés (ou explicites) sont les savoirs qui ont déjà été explicités par l'intermédiaire d'un langage rationnel, que l'on peut retrouver dans des livres, des plans, des manuels de procédures, des systèmes d'information, des bases de connaissances, etc...
- les savoirs formalisables sont les savoirs qui n'ont pas encore été formalisés, explicités, officialisés au moyen d'un langage rationnel, mais qui pourraient l'être (par exemple, certains savoir-faire développés par des individus ou des communautés de pratique, ou encore, certains savoirs informels, implicites, concernant le contexte social du travail)
- les savoirs tacites (ou intangibles) sont les savoirs qui ne peuvent pas être explicités par l'intermédiaire d'un langage rationnel, et qui par conséquent sont très difficilement transmissibles d'un individu à l'autre, sinon par l'observation, l'imitation, la socialisation et le recours à la métaphore (par exemple, certains savoir-faire, mais aussi certains schémas mentaux).

Selon Bassetto, la formalisation de ces savoirs en eux-mêmes ne constitue pas une connaissance. En revanche, une connaissance est le résultat d'une interaction entre :

- une information (qui peut dans ce cas être un savoir formalisé)
- un système d'interprétation (un être humain, un système expert, un programme informatique,...)
- un domaine d'application donné (le contexte, le domaine de validité de la connaissance)

La gestion des connaissances correspond ainsi à la gestion de ces trois éléments et de leurs interactions [Bassetto 2005].

Ainsi, la formalisation du savoir ne peut être dissociée d'un système d'interprétation ainsi que de son domaine d'application.

Prenons pour exemple la transmission des connaissances : celle-ci est largement facilitée par une formalisation adaptée. Une des principales façons d'exprimer un savoir formalisé jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle est livresque. Un exemple concernant des connaissances de forge est donné sur la Figure 17. Cette formalisation de savoir ne peut servir que si le système d'interprétation est formé à le déchiffrer. De plus elle est dépendante du contexte : ces connaissances étaient valables à une époque donnée, avec certains matériaux et

certaines techniques qui existaient à ce moment. Comme il est possible de l'observer sur la Figure 17, le vocabulaire utilisé est notablement différent de celui d'aujourd'hui, tout comme les techniques qui y sont décrites.

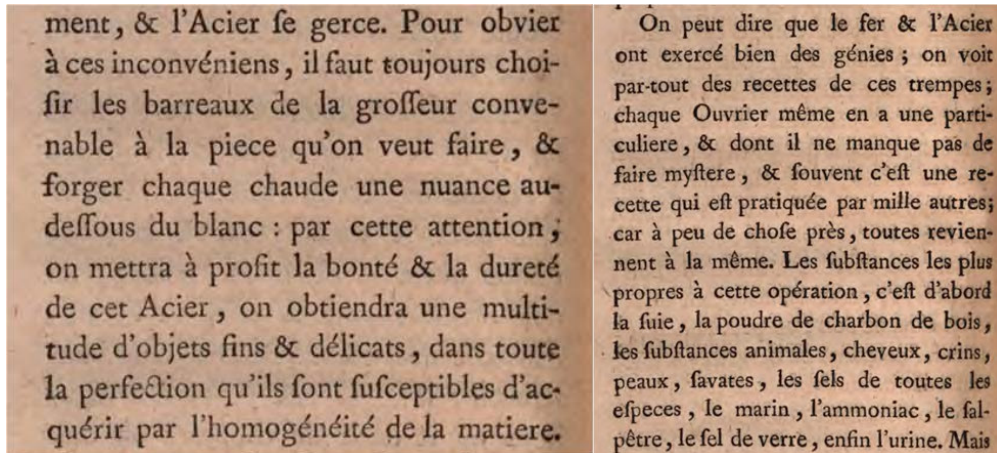


Figure 17 : Mémoire sur l'acier [Perret 1777]

Avec l'avènement de l'informatique au cours du 20^{ème} siècle, l'idée est de faire en sorte que ces connaissances soient exploitables par une machine afin de fournir une aide à la décision. Ce dernier point nécessite de développer une formalisation particulière et un système d'interprétation capable d'exploiter cette formalisation, ceci bien entendu dans le cadre d'un domaine de validité. Plusieurs possibilités ont été proposées afin de répondre à ce besoin. Nous exposons certaines d'entre elles qui nous paraissent pertinentes et applicables dans le cadre de cette étude.

1.3.2 Système expert

Un système expert est un programme capable d'explorer une expertise dans un domaine particulier. Cette expertise rassemble non seulement des connaissances directement liées à ce domaine mais également des capacités de raisonnement acquises par les spécialistes au cours de leur activité (les stratégies) [Piechowiak 2003]. Les premiers systèmes experts sont apparus dans les années 1960, initiant ainsi l'Intelligence Artificielle. Ces outils sont généralement destinés à l'aide à la décision et au diagnostic.

Traditionnellement, un système expert se compose d'une base de connaissances associée à un moteur d'inférence (Figure 18) [Karkan 1993]. La base de connaissances est constituée d'une part d'une base de faits et d'autre part d'une base de règles.

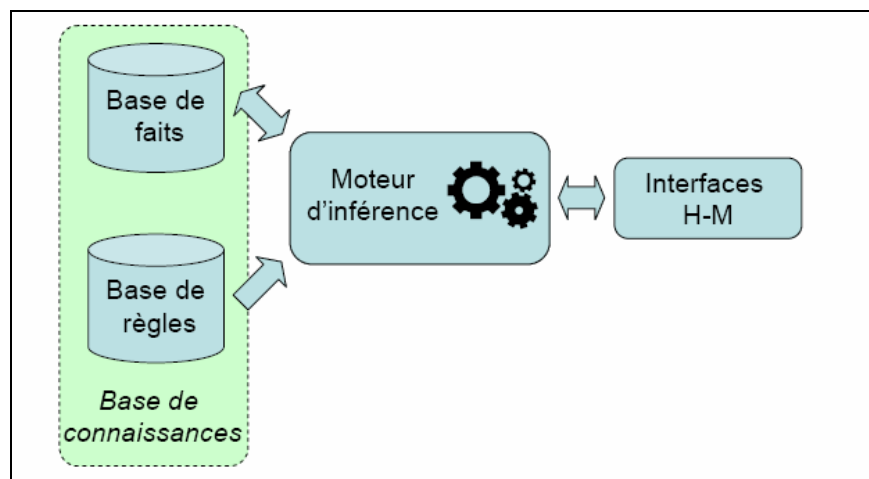


Figure 18 : Architecture d'un système expert (inspiré de [Karkan 1993])

La base de faits est en réalité la mémoire de travail du système expert : elle contient les faits initiaux ainsi que ceux déduits par le moteur d'inférence.

La base de règles contient quant à elle les règles qui peuvent être utilisées au cours du raisonnement et qui sont sous la forme :

Si conditions Alors conclusions

Où *conditions* est une expression qui précise les conditions de déclenchement de la règle. Déclencher une règle, c'est admettre ce qui est précisé dans les *conclusions*. On parle également d'inférence : Cela revient à modifier l'état des connaissances actuelles sur le problème en cours de résolution.

Le moteur d'inférence est la partie qui réalise concrètement le raisonnement. Trois modes de fonctionnement existent :

- le chaînage avant : il s'agit du raisonnement le plus simple. Le moteur d'inférence déclenche les règles dont les prémisses sont connues (en partant au départ des faits initiaux puis en utilisant éventuellement les faits déduits) jusqu'à ce que le fait à déduire soit également connu ou bien que plus aucune règle ne soit applicable.
- le chaînage arrière : il s'agit de partir de la conclusion recherchée. Toutes les règles correspondant à la conclusion recherchée sont alors appliquées afin d'obtenir la liste des faits à prouver pour que ces règles puissent se déclencher. Ce mécanisme est appliqué récursivement pour remonter finalement aux faits initiaux connus.
- le chaînage mixte : il s'agit d'une combinaison des algorithmes de chaînage avant et de chaînage arrière

Le domaine d'application du système expert va conditionner le choix du mode de fonctionnement : si les conclusions sont nombreuses ou incertaines, et que le nombre de faits n'est pas élevé, on privilégiera le mécanisme de chaînage avant. En revanche lorsque les faits sont abondants et les conclusions peu nombreuses, l'utilisation du chaînage arrière sera favorisée.

Plusieurs outils tels que CLIPS (<http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>), JESS (<http://herzberg.ca.sandia.gov/jess>) ou GNU Prolog (<http://www.gprolog.org>) permettent d'implémenter des systèmes experts.

Les principaux reproches que l'on peut formuler par rapport à cette approche sont les suivants :

- La difficulté de formaliser les connaissances sous forme de règles et la difficulté de les visualiser et comprendre.
- L'aspect relativement opaque du traitement effectué : bien qu'il soit possible de consulter tout le processus de raisonnement qui conduit à la conclusion, la lecture de celui-ci est bien souvent difficile.
- L'expert qui est à l'origine des règles a bien souvent l'impression qu'on lui dérobe une partie de sa connaissance et n'est ainsi pas toujours enclin à effectuer des entretiens.
- La maintenance d'un tel système est bien souvent complexe afin que l'ensemble des règles reste cohérent.

1.3.3 Ontologie

Une définition reconnue de l'ontologie est celle de Gruber :

« **Une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation** » [Gruber 1993].

En d'autres termes, il s'agit d'une description formelle possible (d'autres descriptions le sont aussi) pour un domaine de connaissances donné. Le terme ontologie provient du grec et signifie l'étude de ce qui existe. Ainsi en science de l'information, une ontologie représente un ensemble structuré des termes et des concepts qui expriment la sémantique d'un champ d'informations (par exemple les éléments d'un domaine de connaissances). L'ontologie constitue ainsi un modèle de données représentant les concepts d'un domaine, ainsi que les relations entre ces concepts. Elle est employée pour raisonner sur les éléments du domaine en question.

Les concepts (ou classes) d'une ontologie sont organisés en un graphe où peuvent intervenir deux types de relations :

- des relations de subsomption (relation *est-un(e)*) : par exemple une presse hydraulique *est-une* presse et une presse *est-une* machine de forge)
- des relations sémantiques (par exemple : équivalence, disjonction)

En plus des concepts représentés dans l'ontologie, il est possible également d'y définir :

- les individus (instances des concepts)
- les relations qui peuvent exister entre les individus
- des contraintes qui peuvent exister sur ces relations selon que l'individu est une instance de tel concept ou de tel autre.

A partir de la définition d'une ontologie, plusieurs traitements sont possibles tels que la vérification de cohérence entre les classes ou encore la classification des individus. Ces traitements pris en charge par l'intermédiaire de programmes appelés *raisonneurs* permettent d'opérationnaliser l'ontologie pour un besoin particulier (par exemple : la classification d'un individu dans une certaine classe sera associée à un fonctionnement particulier d'un programme).

Les langages utilisés pour décrire une ontologie se basent pour la plupart sur la logique du premier ordre, et représentent ainsi les connaissances sous forme d'assertion « sujet-prédicat-objet ». Dans le cadre de ses travaux sur le Web sémantique, le W3C (www.w3.org) a mis en place en 2002 un groupe de travail dédié au développement de langages standards pour modéliser des ontologies utilisables et échangeables sur le Web. Ainsi, en 2004, ce groupe a publié une recommandation définissant le langage OWL (Web Ontology Language), fondé sur le standard RDF (Resource Description Framework) et en spécifiant une syntaxe XML. Plus expressif que son prédécesseur RDFS (RDF-Schema), OWL a rapidement pris une place prépondérante parmi les langages d'ontologie et est devenu aujourd'hui le langage le plus utilisé. Les outils permettant l'édition d'ontologies sont nombreux : les plus connus sont Protégé (<http://protege.stanford.edu>) développé par l'Université de Stanford, SWOOP (<http://www.mindswap.org/2004/SWOOP>) développé par l'université du Maryland, mais il existe des éditeurs plus légers tels que Growl (<http://growl.info>) ou pOWL (<http://sourceforge.net/projects/powl>).

Les limitations qui peuvent apparaître par rapport à l'utilisation d'une ontologie sont relativement les mêmes que pour le système expert : la représentation d'une ontologie n'est pas intuitive d'un premier abord et nécessite plusieurs vues. La construction d'une ontologie

doit également s'effectuer à partir d'entretiens avec des experts du domaine de connaissances à modéliser et la maintenance peut s'avérer complexe.

1.3.4 Raisonnement à partir de cas

Le raisonnement à partir de cas est une méthode de résolution de problèmes dont le principe se fonde sur une partie du raisonnement humain qu'est l'analogie. Il s'agit de réutiliser les expériences passées pour résoudre les problèmes actuels. Ces expériences sont regroupées dans une base de cas. Un cas est composé de deux parties : la description du problème et la description de la solution associée à ce problème. Le raisonnement à partir de cas est composé des phases suivantes : la recherche d'un cas similaire, l'adaptation du cas similaire au problème en cours, l'archivage du nouveau cas constitué par le problème en cours et la nouvelle solution validée. La Figure 19 montre l'enchaînement de ces étapes.

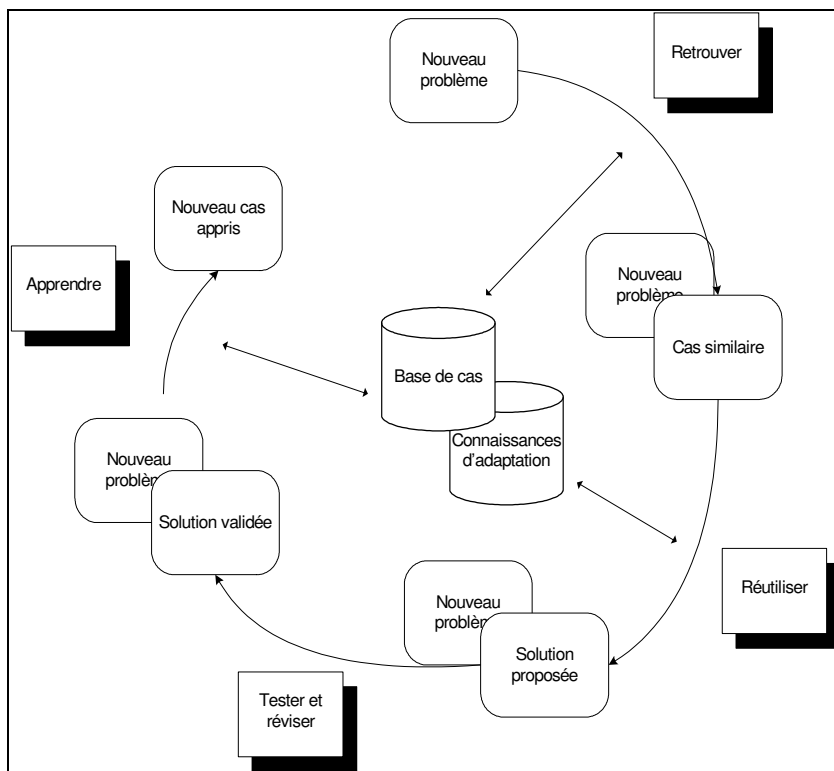


Figure 19 : Raisonnement à partir de cas, d'après [Watson 1999]

Plusieurs applications du raisonnement à partir de cas existent dans divers domaines tels que la médecine, l'aide à la conception [Vong 2002] [Mejasson 2001] [Yau 1998] [Herbeaux 1999], le diagnostic [Liao 2000] [Grant 1996], l'aide à la décision [Cunningham 1999], l'estimation des coûts [Duverlie 1999] [Thibault 2006a]. Plus généralement, tous les domaines où la réutilisation d'expériences passées est essentielle peuvent constituer des terrains d'application pour un raisonnement à partir de cas.

Deux principales difficultés peuvent être relevées quand à cette approche :

- l'initialisation de la base de cas est primordiale : sans un nombre suffisant de cas relativement différents, il est impossible de couvrir un domaine intéressant
- la phase d'adaptation constitue un apport essentiel de l'approche, or cette phase a rarement été développée dans les diverses applications du raisonnement à partir de cas (trouver par exemple des règles qui permettent l'adaptation des cas n'est pas aisé).

1.3.5 Technologie de groupe

La technologie de groupe est une démarche appliquée principalement dans le milieu industriel et qui consiste à regrouper des pièces par similarité afin de tirer profit de leurs ressemblances. Le principe général repose sur la même hypothèse que le raisonnement à partir de cas : des problèmes similaires ont des solutions similaires. Par exemple en formant des familles de pièces selon leurs ressemblances par rapport à des critères pertinents, il est possible de faciliter la conception de processus de fabrication.

L'approche par technologie de groupe est constituée de deux étapes [Mutel 1988] : l'étape préparatoire et l'étape productive.

- L'étape préparatoire est dédiée à la construction des familles de pièces. Celles-ci sont généralement construites à partir de similarités sur des paramètres morpho-dimensionnels. Avant l'essor de l'informatique au sein des entreprises, ces familles étaient décrites au moyen d'une codification appropriée permettant de les indexer facilement et de les retrouver rapidement.
- L'étape productive est la recherche de la famille de la pièce que l'on considère pour pouvoir lui appliquer les conséquences liées à cette famille.

Deux principaux problèmes sont à relever concernant l'approche par technologie de groupe :

- Le risque de prolifération des familles de pièces lorsque l'on souhaite couvrir un assez large domaine ou bien lorsqu'il s'agit d'être précis dans les critères de description employés lors de la classification.
- Le risque d'avoir des familles de pièces trop larges car trop discriminantes et pour lesquelles les données associées deviennent imprécises ou peu nombreuses.

La différence majeure entre la technologie de groupe et le raisonnement à partir de cas se situe à plusieurs niveaux : d'une part le raisonnement à partir de cas se base sur des cas réels, avec des problèmes et des solutions concrets, alors que constituer une famille de pièces dans le cadre de la technologie de groupe implique une généralisation des conséquences ou solutions associées. La couverture du domaine s'effectue ainsi grâce à cette généralisation dans le cadre de la technologie de groupe, tandis que pour le raisonnement à partir de cas, elle est réalisée grâce à la phase d'adaptation. D'autre part, il n'y a pas de problème particulier concernant l'ajustement du nombre de cas d'une base de cas, contrairement au nombre de familles d'une approche par technologie de groupe.

1.3.6 Approche par propagation de contraintes

L'origine de la propagation de contraintes date du début des années 1970 avec une première application concernant l'interprétation 3D des lignes d'un graphique en deux dimensions [Waltz 1972].

Traditionnellement, un problème de satisfaction de contraintes est constitué :

- d'un ensemble fini de variables
- de domaines pour chacune des variables (ensemble fini ou continu de valeurs que peuvent prendre les variables)
- d'un ensemble fini de contraintes (relations arbitraires sur l'ensemble des variables).

Une solution à ce problème est une affectation de toutes les variables de telle sorte que toutes les contraintes du problème soient satisfaites.

Lorsque les domaines des variables sont finis, une première méthode consiste à énumérer toutes les combinaisons possibles en construisant un arbre d'énumération (Figure 20) et de vérifier pour chacune la satisfaction des contraintes. Cette méthode devient rapidement inapplicable pour des problèmes de taille moyenne en raison de l'explosion combinatoire des possibilités.

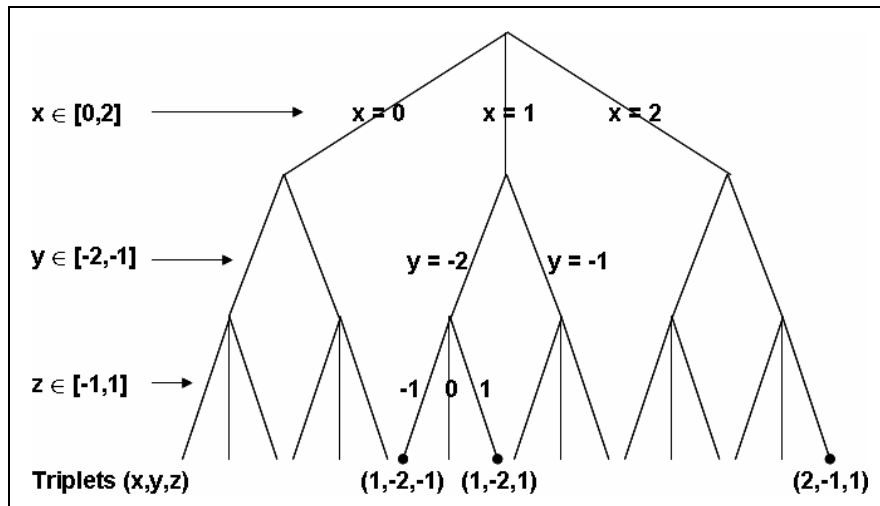


Figure 20 : Arbre d'énumération, d'après [Yannou 1998]

On a donc recours à des méthodes de réduction de domaines qui permettent de pallier à ce défaut. Il s'agit de réduire les domaines de définition des variables en prenant en compte les contraintes lors de la construction de l'arbre d'énumération : les branches qui ne permettent pas de satisfaire les contraintes sont « élaguées » : on ne poursuit pas la construction de l'arbre dès qu'une contrainte n'est pas respectée sur une branche de l'arbre (Figure 21).

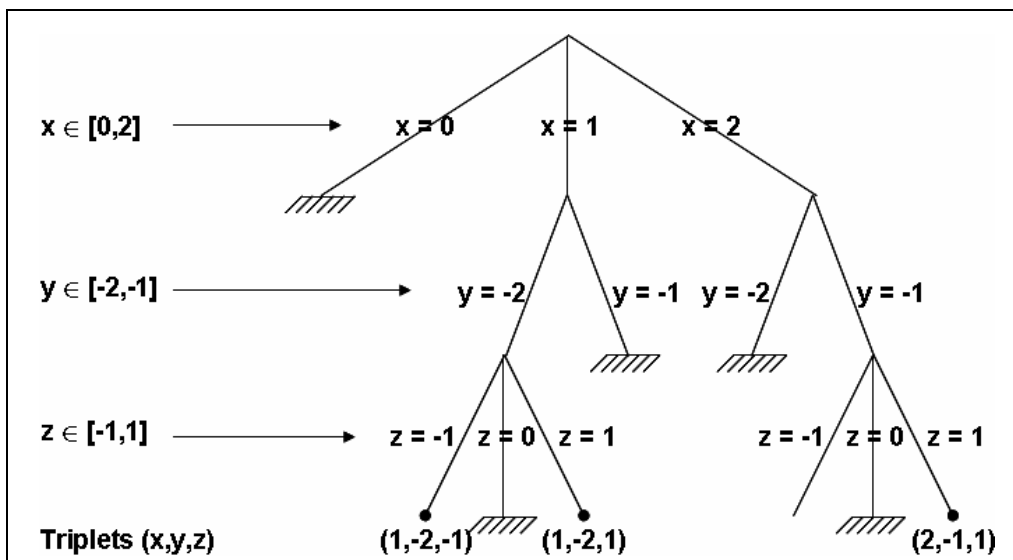


Figure 21 : Arbre d'énumération élagué, d'après [Yannou 1998]

Les algorithmes de propagation de contraintes ont été appliqués à de nombreux problèmes tels que l'ordonnancement, l'allocation des ressources, le séquençage de l'ADN ou encore la génération de processus de fabrication.

La limitation que l'on peut trouver se situe au niveau de l'expression des connaissances qui doit se faire sous la forme de contraintes en quelque sorte semblables à des règles. On retrouve ainsi les inconvénients du système expert par rapport à la maintenance et à la récolte des connaissances. Cependant, le processus de raisonnement peut être présenté de façon plus intuitive car sous la forme d'un arbre conduisant aux solutions.

1.3.7 Synthèse sur les différentes approches présentées

Les aspects des diverses approches présentées pour la gestion des connaissances sont récapitulées sur le Tableau 5.

Tableau 5 : Synthèse des différentes approches de gestion de connaissances

	Formalisation	Système d'interprétation	Outils existants	Limitations
Système expert	Règles	Algorithmes de chaînage avant, arrière, mixte	CLIPS, Prolog	Opacité du raisonnement, des règles Maintenance difficile
Ontologie	Logique de description	Utilisation de raisonneurs : vérification de cohérence, classification	Protégé, Gowl, pOWL, Swoop	Interface compliquée Maintenance difficile
Raisonnement à partir de cas	Cas : couple Description problème/Description Solution	Recherche de similarité, adaptation	n.a.	Initialisation de la base de cas Règles d'adaptation
Technologie de groupe	Familles de pièce associées à des conséquences	Classification en famille et application des conséquences	n.a.	Définition des familles Problème de prolifération des familles
Programmation par contrainte	Variables, domaines des variables, contraintes sur les variables	Algorithmes de propagation de contraintes	Constraint explorer	Méthode complexe Difficulté de formaliser les connaissances sous forme de contraintes

Notons plusieurs aspects communs aux différentes approches :

- la récolte des connaissances pour leur formalisation n'est jamais chose facile car cela nécessite de nombreux entretiens avec les experts du métier. Ceux-ci ne sont pas forcément enclins à partager leurs savoirs d'autant plus si celui-ci est

géré par un système dont le fonctionnement peut paraître opaque (par exemple un système à base de règles).

- La maintenance de systèmes reposant sur ces approches est en général délicate et nécessite l'intervention de spécialiste afin de garantir la cohérence des corpus de connaissances (cet aspect est moins valable pour le raisonnement à partir de cas).

Enfin nous n'avons pas cité d'outils associés pour le raisonnement à partir de cas et pour la technologie de groupe car ce sont en général des outils développés sur mesure.

1.4 L'intégration appliquée au domaine de la forge

Un certain nombre de travaux ont porté sur l'application des concepts de l'intégration au domaine de la forge. Cela se traduit par des démarches et des applications d'aide à la conception du produit ou du processus de fabrication.

Plusieurs points sont traités par ces outils :

- la conception des séquences de forgeage (avec des règles simples et efficaces).
- la conception des préformes (pour la forge en matrice fermée par exemple, la conception des formes intermédiaires est fondamentale).

Parmi les différents systèmes développés, il est possible de citer COPEST [Tichkiewitch 1984][Boujut 1992]. Il s'agit d'un outil pour la conception de pièces forgées en matrice fermée. A partir de la forme finale de la pièce, le logiciel propose un modèle surfacique de la pièce forgée à partir des règles du standard Euroforge et des manuels de référence de Chamouard [Chamouard 1970].

Le modèle mécanique et une partie des règles utilisées par le module sont génériques à la profession mais un autre type d'expertise est local et les paramètres peuvent changer assez souvent, suivant l'évolution des procédés (l'expertise est locale en particulier pour chaque entreprise).

Il est également possible de stocker le savoir-faire et l'expertise propre à l'entreprise dans des tables de formules prévues à cet effet. Cette structure permet ainsi de modifier aisément la base de données si un changement sur la capacité d'un procédé survient.

La deuxième version de cette application abandonne le système expert, remplacé par un algorithme beaucoup plus rapide et robuste. En effet, une fois que les connaissances deviennent stabilisées, il est possible de traduire les règles en algorithmes.

Une autre application intéressante est celle de Zdrahal qui propose de formaliser les connaissances de forge sous la forme d'une ontologie et de sélectionner ainsi les procédés utilisables grâce à la classification [Zdrahal 1999]. Cette classification se base sur les possibilités des procédés mises en relation avec les caractéristiques de pièces.

Un dernier exemple que nous donnons pour l'intégration appliquée à la forge est celui de Kim [Kim 2000]. Il s'agit d'un système expert pour automatiser la définition du processus de fabrication de pièces forgées axisymétriques. Le système développé définit non seulement la géométrie des états intermédiaires ainsi que la forme du lopin mais également la puissance nécessaire, le nombre de frappes nécessaires, tout ceci à partir de la géométrie de la pièce usinée.

Ces différents exemples d'implémentation partent de la définition d'une pièce finie, et ne considèrent donc que l'aspect **choix des procédés** de l'intégration. L'aspect **conception pour la fabrication** n'est pas intégré dans ces applications.

1.5 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d'investiguer les différents domaines en rapport avec notre étude.

Le besoin du domaine de la forge en matière d'intégration est réel. L'évolution des méthodes et des procédés associée à un contexte de mondialisation nécessite un avancement important en ce sens.

L'intégration telle que nous avons pu le voir se compose de deux aspects principaux que nous nommerons les deux sens (ou directions) de l'intégration. Comme il est possible de le visualiser sur la Figure 22, l'intégration a pour but de relier principalement deux ensembles de données que sont les caractéristiques du produit et les caractéristiques du processus de fabrication. Pour chacun de ces ensembles de données, il est possible que certaines caractéristiques soient imposées ou bien déjà définies. A partir de ces données définies, il y a deux possibilités de raisonnement :

1. A partir des données du produit, un raisonnement est effectué pour déterminer quelles sont les contraintes à respecter sur les données du processus de fabrication, il s'agit du **choix des procédés**.
2. A partir des données du processus de fabrication, un raisonnement est effectué pour déterminer quelles sont les contraintes à respecter sur les données du produit, il s'agit alors de la **conception pour la fabrication**.

Plusieurs approches accompagnées d'outils ont été proposées pour maîtriser l'intégration, la plupart privilégiant le sens **choix des procédés**. Chacune de ces approches propose en général une démarche dans laquelle s'inscrit l'utilisation d'un outil spécifique.

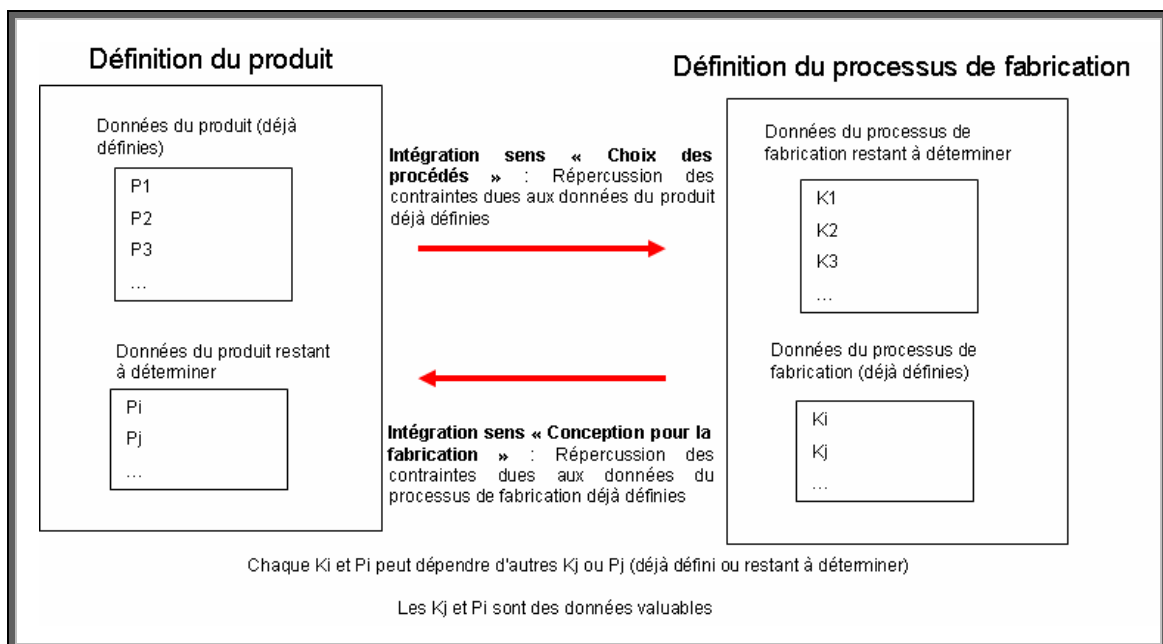


Figure 22 : Les deux sens de l'intégration

Les outils développés pour répondre aux besoins de ces différentes démarches sont basés sur des approches de gestion de la connaissance. La maintenance des systèmes de gestion de la connaissance ainsi que la simplicité et la transparence de leur fonctionnement constituent des points critiques auxquels il est primordial de faire attention au cours de leurs développements.

Enfin l'intégration appliquée au domaine de la forge a été abordée plusieurs fois. L'évolution ou la personnalisation des outils développés (ajout de nouveaux procédés, modification des règles, des variables descriptives) est essentielle pour les faire accepter par la profession. De même, la prise en compte de la **conception pour la fabrication** dans une démarche et également dans un outil associé constituerait un avantage majeur pour l'utilisateur.

La suite de notre étude se consacre plus largement à l'**intégration produit – procédés – processus de fabrication – ressources** : l'idée de cette intégration (Figure 23) est de définir le produit, son processus de fabrication associé, les procédés ainsi que les ressources utilisés en tenant compte des liens qui existent entre ces différents éléments. Le produit n'est alors plus l'élément central étant donné que des choix le concernant peuvent être effectués en fonction des choix faits sur les autres éléments.

Un des liens essentiels que nous avons mis en exergue dans ce premier chapitre est celui qui existe entre le produit et son processus de fabrication. Les maquettes que nous avons développées se limitent à ce lien, tandis que la démarche considère également les ressources.

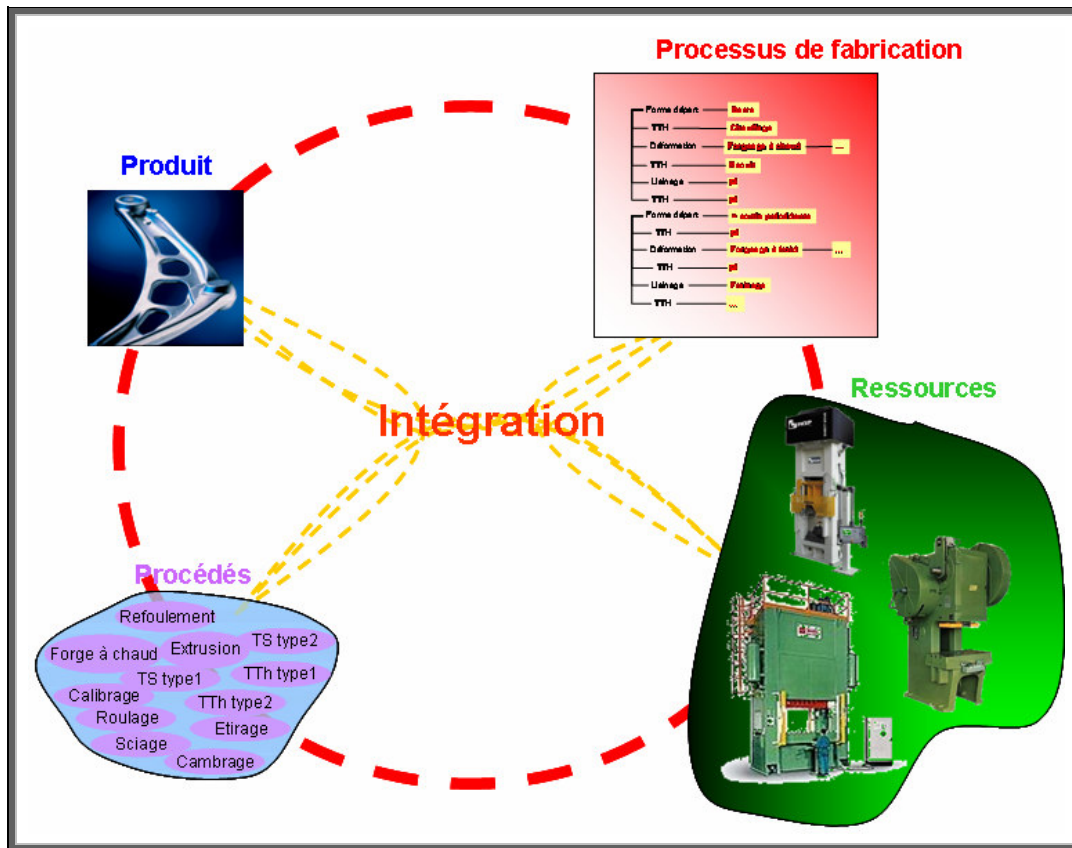


Figure 23 : Intégration produit – procédés – processus de fabrication – ressources

Chapitre 2 : Démarche IP3FR (Intégration Produit – Procédés – Processus de Fabrication – Ressources)

L'objectif de ce chapitre est de présenter la démarche proposée pour prendre en charge l'intégration produit – procédés – processus de fabrication – ressources dans le domaine de la forge. La finalité de cette démarche et sa description seront détaillées avant l'exposé d'une illustration sur un exemple simple.

2.1 Définitions préalables

Quelques définitions sont nécessaires quant à la bonne compréhension de la description de cette démarche :

IP3FR : Intégration Produit-Procédé-Processus de Fabrication-Ressources

Concepteur : équipe de conception, bureau d'étude, donneur d'ordre, concepteur sont synonymes pour ce chapitre et sont désignés par le terme « concepteur »

Fabricant : bureau des méthodes, entreprise de forge, fabricant sont synonymes pour ce chapitre.

Données minimales : ensemble de données à partir desquelles il est possible de débiter la conception d'une pièce.

Produit : dans le cadre de cette thèse, les termes « pièce » et « produit » sont considérés synonymes.

Définition de pièce : il s'agit d'un ensemble de données définissant la pièce.

Ressource : moyen de fabrication, ex : presse mécanique, laminoir, pilon,...

Processus de fabrication : séquence d'étapes spécifiant la fabrication d'une pièce ; peut être défini avec ou sans les ressources.

Etats intermédiaires de la pièce : il s'agit des différents états de la pièce au cours de sa fabrication. Ces états ne peuvent être définis que lorsque le processus de fabrication est spécifié. Cette dernière remarque est valable également pour l'état final de la pièce en sortie du processus de fabrication.

Solution : dans le cadre de cette section, une solution représentera la définition d'une pièce et de son processus de fabrication associé, comprenant également les états intermédiaires.

Transformation élémentaire : bloc élémentaire pour représenter l'utilisation d'un procédé de fabrication dans un processus de fabrication haut niveau. Une transformation élémentaire utilise un unique procédé de fabrication (cette notion sera reprise plus loin dans les chapitres 3 et 4).

Procédé de fabrication : dans le cadre de cette thèse, il s'agit d'une transformation physique qui peut être utilisée au niveau de ce que l'on nomme une transformation élémentaire (voir précédemment) et qui nécessite l'utilisation d'une ressource pour être mise en œuvre, ex : estampage à chaud, extrusion, roulage, cambrage, grenailage,...

Processus de fabrication haut niveau : séquence de transformations élémentaires. Un exemple est donné Figure 24.

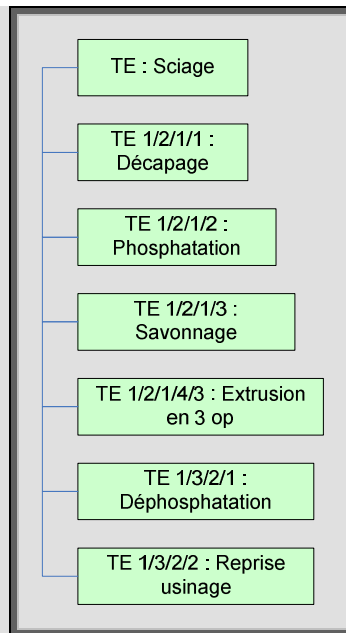


Figure 24 : Exemple de processus de fabrication haut niveau

Paramètre de sélection : déduit des données d'une définition de pièce, il intervient au cours du raisonnement de sélection effectué par l'outil support sur les possibilités de processus de fabrication haut niveau.

2.2 Objectif de la démarche IP3FR

La démarche IP3FR a pour but de faciliter la prise en compte dès la conception des contraintes liées au domaine de fabrication sur un produit partiellement défini. Dans le cadre de ces travaux, le domaine de fabrication qui a été choisi est celui de la forge, ainsi le terme produit désignera une pièce obtenue par l'intermédiaire d'un procédé de forgeage (les termes « pièce » et « produit » seront donc ici considérés comme synonymes). La démarche proposée fournit avant tout une aide à la définition du produit et de son processus de fabrication associé. 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 du lien entre la pièce et le processus de fabrication. L'idée est d'évaluer les conséquences des choix de conception de la pièce sur le processus de fabrication et inversement au fur et à mesure que ceux-ci sont faits.

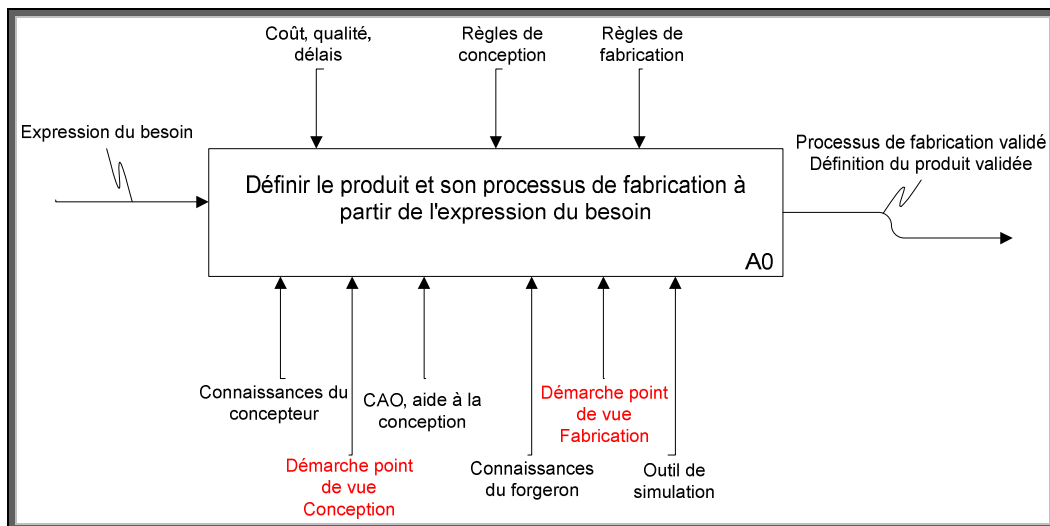


Figure 25 : Diagramme IDEF-0 niveau A-0 d'un processus de conception intégrée

Sur la Figure 25 est présentée sous la forme d'un diagramme IDEF0 la vue globale d'un processus de conception intégrée : l'activité A0 consiste en la définition conjointe du produit et de son processus de fabrication associé à partir de l'expression du besoin. Ceci se fait dans le respect des règles de conception / fabrication (par exemple : règle de dimensionnement d'une section par rapport à une charge ou bien fabricabilité de la définition de pièce proposée) et conformément aux exigences requises en terme de coût, de qualité et de délais. En support de cette activité viennent les connaissances du concepteur, celles du fabricant (en l'occurrence le forgeron), ainsi que les outils de simulation, de CAO et d'aide à la conception. Nous avons positionné également la démarche que nous proposons en support de cette activité, et ce en la scindant en deux points de vue :

- Le **point de vue fabrication** : c'est-à-dire lorsque l'on possède les données relatives à la fabrication (connaissances des procédés et des ressources utilisables). Il est alors possible de considérer concrètement les contraintes liées à la fabrication (par exemple : impossibilité de mettre en œuvre le procédé d'extrusion car les machines disponibles ne sont pas assez puissantes).
- Le **point de vue conception** : lorsque l'on ne connaît pas les données relatives à la fabrication. C'est principalement en ce dernier cas de figure que les contraintes de fabrication ne sont pas systématiquement prises en compte. Dans le cadre de ce point de vue, l'objectif est d'orienter la conception de la pièce selon un type de fabrication (dans notre cas la forge).

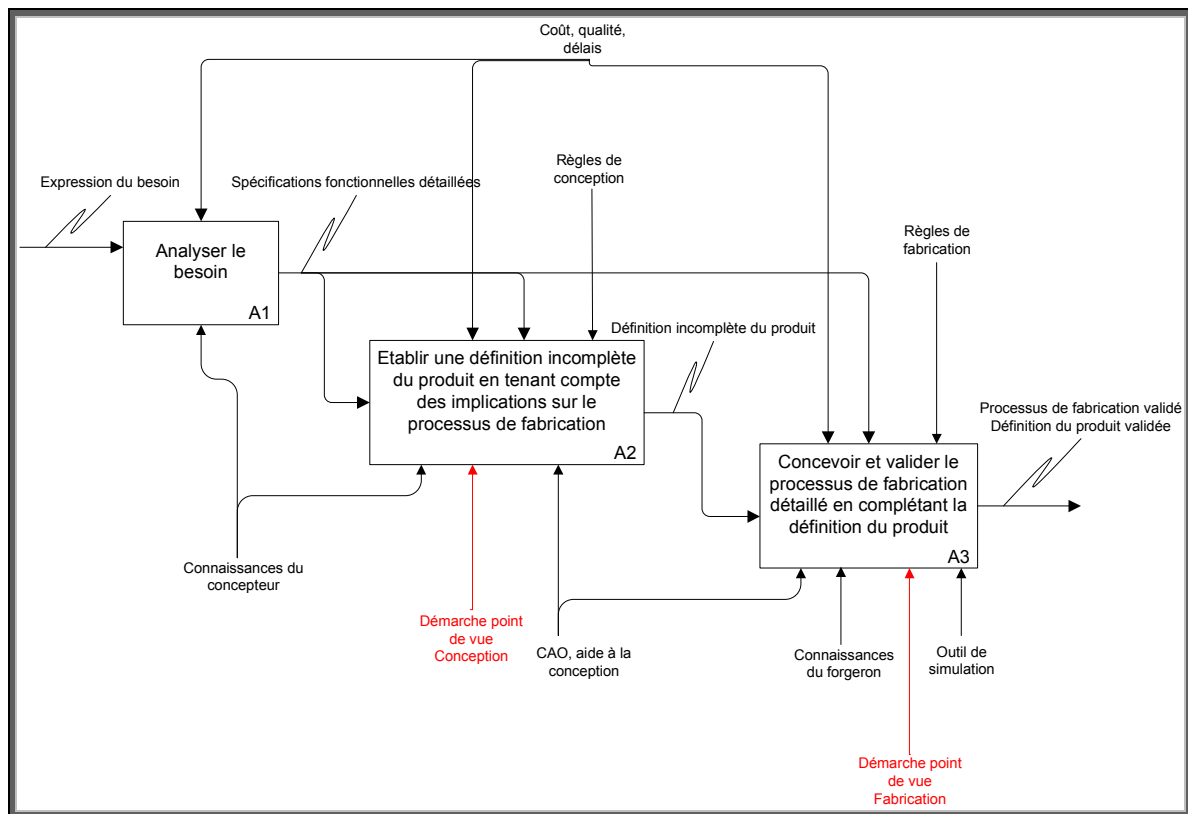


Figure 26 : Diagramme IDEF-0 conception-fabrication, activité A0 : Définir le produit et son processus de fabrication à partir de l'expression du besoin

Sur la Figure 26 est décomposée l'activité A0 présentée Figure 25 : L'analyse du besoin, tâche réservée au concepteur, permet une définition de spécifications fonctionnelles détaillées. A partir de ces spécifications, la définition du produit et de son processus de fabrication associé va être réalisée en deux activités. La limite entre ces deux activités (et donc le niveau de définition du produit) va dépendre de la relation qui existera entre le concepteur et le fabricant. Les deux cas extrêmes sont les suivants :

- Soit le concepteur fournit la définition complète d'un produit. Ainsi le forgeron se charge de fournir le brut de forge qui pourra être repris par usinage pour obtenir la pièce conçue.
- Soit le concepteur délègue toute la conception au forgeron. Ce dernier devient alors force de proposition et conçoit le produit en fonction de ses moyens de fabrication et selon ses connaissances sur les procédés de forge. Dans ce cas le concepteur se décharge de toute responsabilité fonctionnelle.

Ainsi l'activité A2 est prise en charge par le concepteur tandis que l'activité A3 l'est par le forgeron. Nous avons donc positionné la démarche **point de vue conception** au niveau du support de l'activité A2, et la démarche **point de vue fabrication** au niveau du support de l'activité A3.

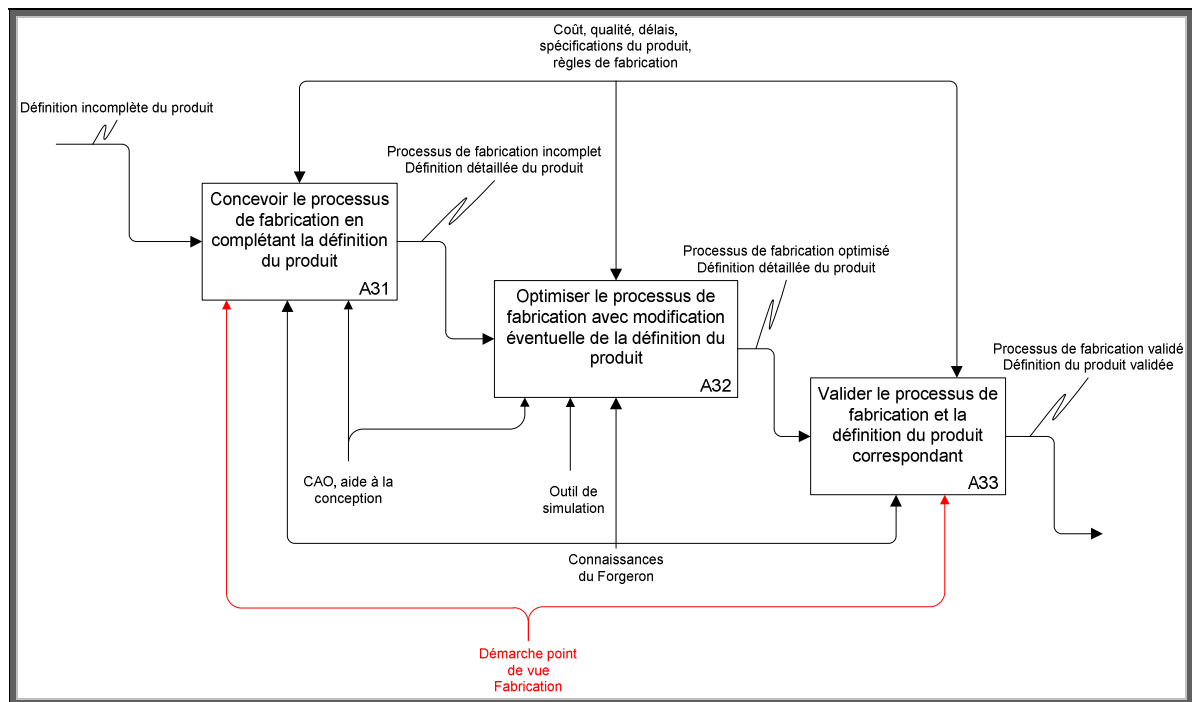


Figure 27 : Diagramme IDEF-0 conception-fabrication, activité A3 : Concevoir et valider le processus de fabrication détaillé en complétant la définition du produit

Enfin sur la Figure 27 se trouve décomposée l'activité A3 présentée Figure 26 : la démarche **point de vue fabrication** n'intervient pas dans les activités d'optimisation, et uniquement dans les activités de conception ou de validation du produit et de son processus de fabrication associé.

Les deux sections suivantes détaillent à présent les deux points de vue considérés. A noter que l'utilisateur de la démarche est défini comme l'acteur humain de celle-ci, qu'elle se déroule d'un **point de vue fabrication** ou bien d'un **point de vue conception**.

2.2.1 Point de vue Fabrication

On considère que le contexte de ce point de vue se situe au moment où le fabricant (ici le forgeron) prend en charge la suite et la fin de la conception de la pièce et de son processus de fabrication associé. Comme cela a été signalé précédemment, le niveau de définition de la pièce peut être variable. L'objectif de la méthode pour ce point de vue est de fournir un cadre pour l'aide à la modification éventuelle de la conception de la pièce d'une part et à la définition du processus de fabrication et des ressources à utiliser d'autre part.

En effet, le fabricant peut réceptionner une commande du concepteur au format d'un dessin de définition alors que le concepteur ne connaît pas forcément les contraintes imposées par le domaine de fabrication de la forge, ni les ressources du fabricant. La pièce conçue n'est donc pas nécessairement adaptée aux ressources ni aux contraintes de fabrication.

Voici un exemple de situation correspondant au point de vue Fabrication :

Soit l'entreprise ForgeMPa S.A. petite entreprise de forge possédant deux îlots de forge ayant pour machines principales pour l'un une presse mécanique de 400 tonnes et pour l'autre un pilon de 100 tonnes. Elle reçoit de la part du concepteur Pigeonault S.A. les spécifications d'une pièce complètement définies (matériau et série compris) dont elle ne peut assurer la fabrication étant donnés ses moyens de fabrication : les rayons de raccords sont inférieurs à ce que la presse mécanique peut fournir pour la

série donnée. D'autre part certains avantages que peuvent offrir les procédés de forge ont été négligés, par exemple la conception ne favorise pas le fibrage de la pièce dans le sens des contraintes mécaniques exercées. Il est donc absolument nécessaire pour ForgeMPa S.A. de reconcevoir le produit de façon à ce que ses ressources puissent le fabriquer, tout en conservant les spécifications fonctionnelles requises. De plus certaines caractéristiques (par exemple d'ordre mécanique) de la pièce pourraient être ainsi améliorées en tirant meilleur parti de l'utilisation des procédés de forge. Un dialogue doit donc s'engager entre ForgeMPa S.A. et Pigeonault S.A. afin d'extraire les spécifications pertinentes du cahier des charges en conservant les spécifications fonctionnelles ne pouvant être remises en cause. A partir de ces spécifications extraites (donc une définition incomplète de la pièce), la reconception d'une partie de la pièce peut débiter, cette fois en tenant compte des contraintes de fabrication liées aux procédés de forge et aux ressources. C'est ce qui est réalisé lors de l'activité A3 du graphe IDEF-0 de la Figure 26.

Il est à noter que ce que reçoit l'utilisateur au niveau de ce point de vue n'est pas forcément constitué d'un plan du produit à fabriquer. Ainsi au lieu de recevoir un plan de pièce complètement défini (ce qui est le cas la plupart du temps actuellement), l'utilisateur du **point de vue fabrication** pourrait recevoir du concepteur une définition sous la forme de données minimales – telles que l'encombrement, la série, les surfaces fonctionnelles... – c'est-à-dire les spécifications fonctionnelles du produit.

2.2.2 Point de vue Conception

Ce point de vue se situe comme énoncé précédemment en dehors de tout contexte de fabrication : l'utilisateur de la démarche dans le cadre de ce point de vue ne connaît pas a priori le fabricant susceptible de fabriquer son produit et peut ne pas avoir décidé si les procédés de forge seront utilisés lors de la fabrication du produit. Dans ce cas de figure, la démarche couplée à son outil support a pour objectif d'une part d'examiner les solutions offertes dans le cas d'une fabrication orientée par les procédés de forge et d'autre part de guider l'utilisateur dans la modification de la conception du produit afin de l'adapter au mieux aux procédés de forge. Ainsi, les modifications de conception susceptibles d'être réalisées par le fabricant deviennent beaucoup moins importantes et la négociation avec ce dernier s'en trouve facilitée.

Voici un exemple de situation correspondant au point de vue Conception :

Soit l'entreprise Pigeonault S.A. important manufacturier d'automobiles qui sous-traite la fabrication de certaines pièces. Le concepteur de cette société a été chargé de concevoir une pièce de sécurité fortement sollicitée ce qui conduit à penser que sa fabrication utilisera probablement des procédés de forge. Le concepteur chargé de cette étude va donc tenter d'orienter sa conception en tenant compte des contraintes des procédés de forge et des avantages qu'il peut en tirer. N'ayant pas une connaissance exacte des ressources à disposition au sein des différents sous-traitants de forge, deux solutions se présentent à lui : soit il ne laisse que peu de degrés de liberté sur la conception de la pièce (l'activité A2 du graphe IDEF-0 de la Figure 26 est privilégiée par rapport à l'activité A3) et seul un sous-traitant a les moyens d'en respecter les spécifications (dans ce cas il n'est plus possible de faire jouer la concurrence) ; soit il laisse un certain nombre de degrés de liberté aux sous-traitants (l'activité A2 est alors écourtée par rapport à l'activité A3) et plusieurs solutions lui sont alors proposées par ceux-ci. Dans ce dernier cas, la responsabilité fonctionnelle du produit peut alors se trouver décalée vers le fabricant.

Dans le cadre de ce point de vue, on ne définit pas le processus de fabrication associé donc le produit n'est défini que de façon incomplète. En effet la définition complète du produit dans le cadre d'une conception intégrée passe par la définition du processus de fabrication associé.

2.3 Principe de la démarche

La démarche que nous proposons fait intervenir un acteur que nous appellerons l'utilisateur et deux outils :

- un outil d'évaluation qui fournit des indicateurs pour la prise de décision
- un outil support de la démarche qui concrétise le lien entre les données du produit et les données du processus de fabrication

Deux aspects principaux et couplés caractérisent cette démarche à savoir qu'elle est à la fois itérative et progressive :

Le fait d'être itératif permet à l'utilisateur de revenir sur ses décisions antérieures, d'essayer plusieurs possibilités et au final de choisir celles qui lui semblent les plus judicieuses à la lumière d'indicateurs. Cet aspect se traduit par des boucles de retour conditionnées par le choix de l'utilisateur. La progressivité quant à elle se situe au niveau de l'apport des données de l'étude à considérer : l'utilisateur a la possibilité de ne renseigner qu'une partie de celles-ci et de compléter progressivement l'ensemble des paramètres pris en compte par l'outil support. Cet aspect progressif a une répercussion évidente sur le cahier des charges de l'outil support qui doit pouvoir fonctionner sans que tous les paramètres ne soient fournis.

Ces deux caractéristiques sont nécessaires pour le respect des objectifs fixés. En effet c'est par la visualisation des conséquences sur le processus de fabrication qu'il est possible de corriger une décision sur un ou plusieurs paramètres de la conception ; il est nécessaire pour cette raison de prévoir un retour possible sur les choix effectués précédemment, d'où l'aspect itératif. D'autre part, partant d'un cahier des charges incomplet ou bien n'ayant pas défini certains paramètres de conception, une première évaluation des implications sur le processus de fabrication peut être tout à fait utile afin d'infléchir au plus tôt certains choix de conception non pertinents, d'où la nécessité de l'aspect progressif. Il est à noter que celui-ci implique l'aspect itératif car un bouclage est nécessaire tant que les différents paramètres ne sont pas tous définis. Ces deux aspects sont à rapprocher des méthodes d'axiomatic design et notamment l'approche APDL (Axiomatic Product Development Lifecycle) [Gumus 2005], en particulier par rapport au zigzagging qu'elles proposent entre les données du processus de fabrication et les données de la pièce.

Outre les deux caractéristiques essentielles présentées ci-dessus, il est important de préciser la responsabilité des choix effectués lors de la mise en œuvre de cette démarche. La stratégie adoptée est de laisser l'utilisateur seul responsable des décisions prises au niveau de la conception du produit et du processus de fabrication associé. Tout outil intervenant lors du déroulement n'a qu'un but de conseil et de proposition, en aucun cas il ne s'agit de choix automatique : le but de l'outil support est de fournir en réalité une aide au choix en proposant le plus de solutions possibles, éventuellement évaluées et classées selon certains indicateurs. Il reste ensuite à l'utilisateur d'opter pour l'une d'entre elles. Ainsi, ce n'est pas qu'au moment de la validation clôturant la démarche mais tout au long de celle-ci que l'utilisateur est amené à prendre la responsabilité de ses choix.

2.4 Description détaillée de la démarche IP3FR

2.4.1 Positionnement

Point de départ

Que ce soit du **point de vue conception** ou bien du **point de vue fabrication**, la démarche a besoin d'un certain nombre de données minimales pour pouvoir s'amorcer. En réalité, ces données minimales pertinentes sont celles qui sont nécessaires au démarrage de la conception de la pièce afin de pouvoir rentrer certains paramètres dans l'outil support. En effet l'aide apportée se base sur une sélection de possibilités au niveau du processus de fabrication. Cette sélection s'effectue à partir du renseignement de paramètres dits de sélection. L'aide sera d'autant plus pertinente si le nombre de paramètres fournis est important. Ces données minimales sont censées a priori ne plus varier une fois la démarche initiée ; si l'on considère le **point de vue fabrication**, il s'agit en quelque sorte des spécifications extraites que l'on obtient après discussion avec le concepteur. On remarque que ces spécifications comprennent à la fois des informations technologiques, géométriques et de production.

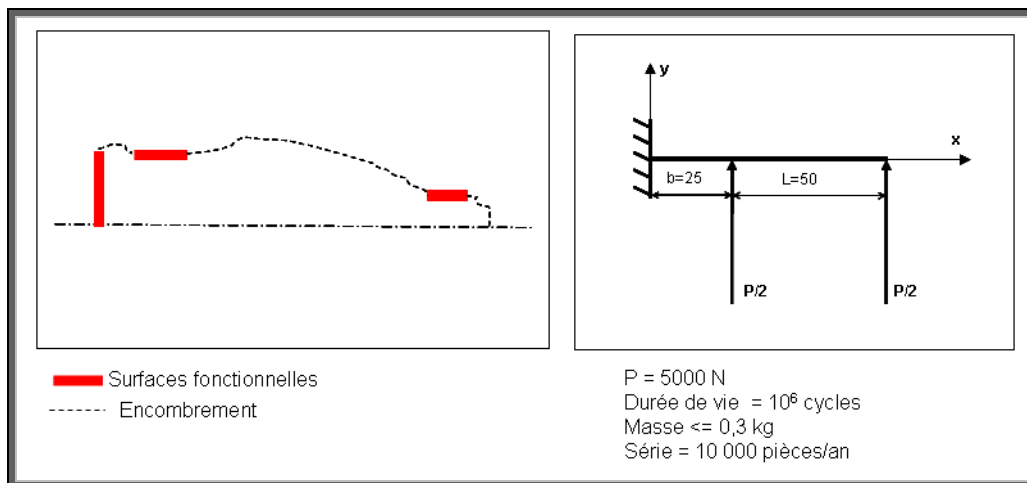


Figure 28 : Exemple de données minimales

Point d'arrivée

La démarche se clôture avec la validation d'une définition de pièce fabricable, c'est-à-dire la conception de la pièce, ainsi que son processus de fabrication associé. Cette solution validée a été sélectionnée parmi plusieurs possibilités construites avec une aide de l'outil support, cette sélection s'effectuant à la lumière des indicateurs fournis par des outils ou des méthodes d'évaluation.

2.4.2 Déroulement

Le diagramme exposé sur la Figure 29 représente le déroulement de la démarche. Ce diagramme représente la séquence des étapes dans une vue temporelle. Il possède trois colonnes pour indiquer par qui ou par quoi est prise en charge chaque étape : cela peut être l'utilisateur ou bien les outils et méthodes d'évaluation ou encore l'outil support de la méthode.

L'utilisateur peut être le concepteur ou le fabricant, cela dépend du point de vue de la démarche ; les outils et méthodes d'évaluation sont les outils de simulation, de calcul de coût, et d'indicateurs variés ; enfin l'outil support est un outil spécifiquement appliqué à la démarche (réalisé en fonction des spécifications de la démarche).

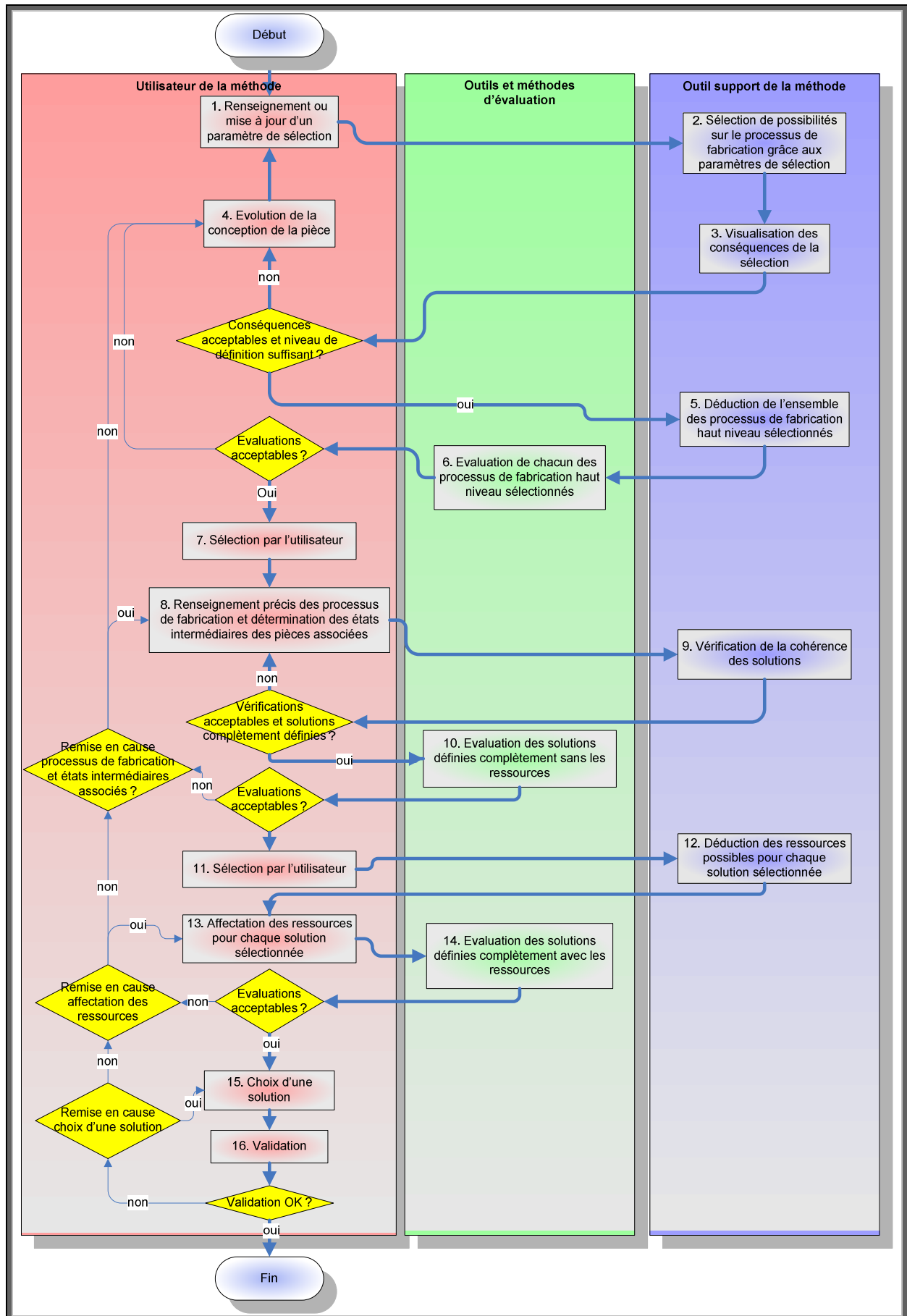


Figure 29 : Logigramme de la démarche

Voici la description des étapes de la démarche :

Etape 1 : Renseignement ou mise à jour d'un paramètre de sélection

A partir des données minimales il est possible de renseigner certains paramètres de sélection. Cette étape constitue ainsi le début de la démarche mais elle fait également partie d'une façon plus large de la boucle initiale de la méthode (ensemble des étapes 1, 2, 3 et 4). Cette boucle initiale permet de faire évoluer la conception tout en visualisant les conséquences sur le processus de fabrication. Il s'agit ici de mettre en œuvre avant tout le premier sens de l'intégration : répercuter sur le processus de fabrication les choix faits au niveau de la conception de la pièce.

Etape 2 : Sélection de possibilités grâce aux paramètres de sélection

La sélection consiste à déterminer un sous-ensemble des processus de fabrication haut niveau, ce sous-ensemble ne possédant que des processus de fabrication compatibles avec la définition de pièce proposée. Cette sélection permet de concrétiser le premier sens de l'intégration. Elle s'effectue par rapport aux paramètres de sélection qui sont utilisés pour éliminer ou favoriser certaines possibilités. Les processus de fabrication haut niveau possibles ne sont pas déduits à ce moment, il n'y a que certaines étapes ou certaines utilisations de procédé qui sont par exemple éliminées, contraintes ou évaluées favorablement par des indicateurs.

Etape 3 : Visualisation des conséquences de la sélection

La visualisation des conséquences de la sélection permet de mettre en valeur les possibilités sélectionnées et les raisons pour lesquelles elles l'ont été. A l'issue de cette visualisation, deux choix sont proposés à l'utilisateur :

- Soit un retour à l'étape 4 s'il juge que le niveau de définition de la conception de la pièce n'est pas suffisant (ce qui peut induire une sélection pauvre : peu de possibilités ont été éliminées) ou bien dans le cas où certaines conséquences lui paraissent gênantes ; le retour à l'étape 4 permet ainsi à l'utilisateur de faire évoluer en conséquence la conception de la pièce en remettant éventuellement en cause ses choix précédents ou bien en complétant la conception de la pièce.
- Sinon un passage à l'étape 5.

Etape 4 : Evolution de la conception de la pièce

L'évolution de la conception de la pièce est gérée intégralement par l'utilisateur, avec ses propres connaissances et avec les outils sur lesquels il est habitué à travailler. La seule contrainte de compatibilité est qu'il doit être possible d'extraire les valeurs des paramètres de sélection à partir de la définition de pièce proposée pour pouvoir les mettre à jour dans l'étape 1. Cette évolution est effectuée en tenant compte de la visualisation des conséquences sur la sélection (étape 3). Il n'est pas obligatoire d'obtenir une définition complète à l'issue de cette étape, certains paramètres comme par exemple l'état de surface sur certaines parties de la pièce peuvent être définis plus tard. En outre la définition est susceptible d'être modifiée lors d'un bouclage supplémentaire si la sélection suivante n'est pas concluante. Il est important de noter que les éléments de la définition de pièce qui ne sont pas définis ou bien pour lesquels l'utilisateur ne souhaite pas la prise en compte lors de la sélection, ne possèdent pas de valeurs par défaut au moment où la sélection s'effectue.

Etape 5 : Déduction de l'ensemble des processus de fabrication haut niveau sélectionnés

Cette déduction est réalisée à partir du résultat de la sélection (Etape 2), c'est-à-dire l'ensemble des processus de fabrication haut niveau qui sont compatibles avec la définition de pièce proposée. Cette fois tous les processus de fabrication haut niveau de cet ensemble sont explicitement décrits sous la forme d'une séquence de transformations élémentaires utilisant un procédé. Le nombre de processus de fabrication déduits peut être relativement important si la conception de la pièce n'est pas très contrainte par l'utilisateur, celui-ci ayant par exemple choisi de privilégier le deuxième sens de l'intégration (étapes 8 et 9).

Etape 6 : Evaluation de chacun des processus de fabrication haut niveau sélectionnés

Afin de trier les différents processus de fabrication haut niveau qui ont été déduits lors de l'étape précédente, une évaluation de chacun de ceux-ci est réalisée sur la base d'indicateurs présentés dans la section 2.4.3. Cette évaluation permet à l'utilisateur d'obtenir un classement en fonction des indicateurs qu'il aura choisis (il peut en privilégier certains par rapport à d'autres). A ce moment il peut choisir :

- de revenir en arrière s'il juge que les évaluations ne sont pas satisfaisantes
- de poursuivre avec la suite de la démarche

Etape 7 : Sélection par l'utilisateur

A la lumière des évaluations fournies lors de l'étape précédente, l'utilisateur a la possibilité de ne choisir que certains processus de fabrication haut niveau, et de ne plus considérer les autres pour la suite de la démarche. C'est sur cette base que va pouvoir débiter le deuxième sens de l'intégration. Compte tenu du fait que la suite consistera à développer une solution cohérente pour chaque processus de fabrication haut niveau sélectionné, il est conseillé à l'utilisateur de ne pas en sélectionner un nombre trop important.

Etape 8 : Renseignement précis des processus de fabrication et détermination des états intermédiaires des pièces associées.

C'est à cette étape que débute le deuxième sens de l'intégration. L'utilisateur se charge de construire plusieurs solutions cohérentes adaptées chacune à un processus de fabrication haut niveau sélectionné à l'étape précédente. Ces solutions cohérentes sont construites grâce aux connaissances de l'utilisateur et aux indications fournies par l'outil support (exemple : la forge à froid est recommandée dans le cas où la série est grande). Les choix sont effectués en priorité sur le processus de fabrication, et ces choix impliquent des conséquences sur la pièce. A l'issue de cette étape, les différentes solutions développées sont composées chacune d'un processus de fabrication défini sans les ressources ainsi que d'une définition de pièce associée. Il s'agit d'une deuxième boucle (étapes 8 et 9) où l'on peut adopter à nouveau une stratégie de conception itérative : l'utilisateur n'est pas obligé de fournir au premier passage de cette étape une solution complètement définie, il est possible d'avoir ainsi plusieurs fois l'enchaînement de cette étape avec la suivante jusqu'à obtenir des solutions cohérentes et complètes (à l'exception de la définition des ressources qui aura lieu plus loin).

Etape 9 : Vérification de la cohérence des solutions

Le deuxième sens de l'intégration est pris en charge par l'outil support dans le cadre d'une vérification de la cohérence des solutions. Cette vérification porte sur la cohérence entre les choix faits au niveau du processus de fabrication et ceux réalisés au niveau de la pièce. Dans le cas où des incohérences sont détectées, des alertes sont levées et permettent à l'utilisateur de faire évoluer la conception du processus de fabrication et celle de la pièce dans une prochaine itération de l'étape 8. Il est important de noter que seul l'utilisateur est maître de la décision concernant l'acceptabilité des solutions en termes de cohérence ou de

complétude. En outre la même stratégie qu'à l'étape 2 est appliquée : il est possible de spécifier la non considération de certains paramètres pour la vérification, soit parce qu'ils ne sont pas renseignés, soit parce que l'utilisateur n'a mis qu'une valeur provisoire qu'il ne souhaite pas garder pour la suite. Cela permet de ne pas fournir de considérations d'incohérence pour des informations non pertinentes.

Etape 10 : Evaluation des solutions définies complètement sans les ressources

Les solutions définies complètement sans les ressources permettent de préciser l'évaluation des indicateurs concernant la tenue en service, comme le facteur de sécurité, ou bien concernant le coût, les capacités ou disponibilités des ressources, des indicateurs technico-économiques tels que ceux présentés par Arenas [Arenas 2004] (indicateurs prenant en compte la difficulté de forme, le volume de matière engagé ou encore l'apport du fibrage) ou encore d'autres informations pour lesquelles l'utilisateur éprouverait un besoin.

Etape 11 : Sélection par l'utilisateur

Les indicateurs fournis par les outils d'évaluation à l'étape 10 servent d'aide à la décision pour la sélection des solutions. Cette sélection est similaire à celle de l'étape 7 : l'utilisateur a la possibilité de choisir certaines solutions et ainsi de ne plus considérer les autres pour la suite de la démarche qui concerne l'affectation des ressources pour chaque solution.

Etape 12 : Déduction des ressources possibles pour chaque solution sélectionnée.

L'outil support a la charge de fournir une ou plusieurs propositions de ressources pour chaque solution développée précédemment. Ces propositions sont construites dans un contexte de ressources que l'utilisateur doit préciser. En d'autres termes, pour que cette aide soit effective, il est nécessaire d'avoir configuré dans l'outil support au moins un ensemble de ressources à prendre en compte au cours de cette étape. Cela peut être les ressources que possède l'entreprise dans laquelle se trouve l'utilisateur (scénario du **point de vue fabrication**) ou bien des ressources définies arbitrairement si l'entreprise de l'utilisateur ne se charge que de la conception (scénario du **point de vue conception**).

Etape 13 : Affectation des ressources pour chaque solution sélectionnée

A partir des propositions de l'étape précédente, l'utilisateur peut affecter les ressources à chaque étape de processus de fabrication. Ainsi à l'issue de cette étape, une ou plusieurs solutions ont été définies complètement avec les ressources, nous sommes donc en présence d'une ou plusieurs définitions de produit fabricable.

Etape 14 : Evaluation des solutions définies complètement avec les ressources

Lors de cette troisième et dernière évaluation, certains indicateurs peuvent être évalués avec plus de précision qu'auparavant. Le coût peut par exemple être déterminé beaucoup plus précisément une fois que l'affectation des ressources est réalisée.

Etape 15 : Choix d'une solution

Le choix d'une seule solution s'effectue le plus tard possible, tout à la fin de la démarche, le principe de celle-ci étant en effet de privilégier la considération d'une certaine diversité de solutions et non pas de se contraindre à trouver d'emblée la solution optimale.

Etape 16 : Validation

La validation finale est effectuée lors de l'expérimentation réelle de la solution. Cette étape n'est pas explicite dans le cadre de cette thèse étant donné que chaque entreprise possède ses critères permettant de déterminer la validité d'une solution.

2.4.3 Outils d'évaluation

Les étapes d'évaluation (étapes 6, 10 et 14) permettent à l'utilisateur d'avoir un retour sur les différentes possibilités qu'il a pu développer au cours de la démarche. Elles ont pour but de fournir des indicateurs qui vont éclairer l'utilisateur sur le choix d'un possible retour en arrière ou bien sur la sélection de certaines possibilités (étapes 7, 11 et 15). Les indicateurs fournis peuvent être de types différents, calculés théoriquement ou bien reposant sur des essais expérimentaux. Ils sont construits à l'aide de ce que l'on appelle des outils ou des méthodes d'évaluation qui regroupent à la fois les méthodes, les logiciels de calcul, les différentes applications propres au métier de la forge. Il est à noter que certains indicateurs peuvent également provenir de l'outil support, ils portent directement sur la fiabilité des résultats que celui-ci propose. Les indicateurs peuvent concerner par exemple la tenue en service, le coût ou les impacts environnementaux. Le logiciel Cetim Devis est un exemple d'application pouvant être utilisé pour fournir un indicateur d'évaluation du coût.

Ces indicateurs peuvent également servir dans le cadre d'une optimisation par d'autres moyens tels que l'utilisation d'algorithmes permettant de trouver des solutions optimales (algorithme de colonies de fourmis, algorithmes génétiques,...).

Un outil d'évaluation a été développé dans le cadre de cette thèse : il s'agit d'une application de calcul du facteur de sécurité en fatigue pour la tenue en service d'un arbre. La Figure 30 montre une capture d'écran de cette application : après avoir dessiné le profil de la l'arbre, le calcul fournit la courbe du facteur de sécurité en fonction de la position.

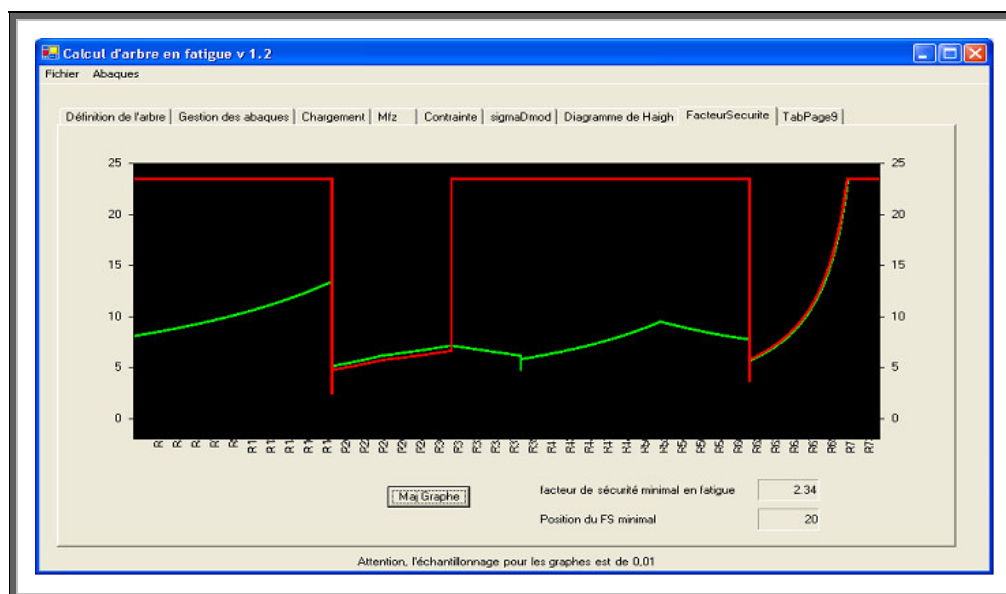


Figure 30 : Application de calcul du facteur de sécurité

Une description plus complète de cette application se trouve en annexe.

2.5 Critique de la démarche

La démarche qui vient d'être décrite s'inscrit tout à fait dans le contexte de l'intégration produit processus de fabrication comme décrite au chapitre 1. En effet, les deux sens de l'intégration y sont représentés :

- la première boucle (étapes 1 à 4, Figure 31) concrétise le premier sens de l'intégration à savoir faire progresser itérativement la conception de la pièce en fonction des conséquences impliquées sur le processus de fabrication.

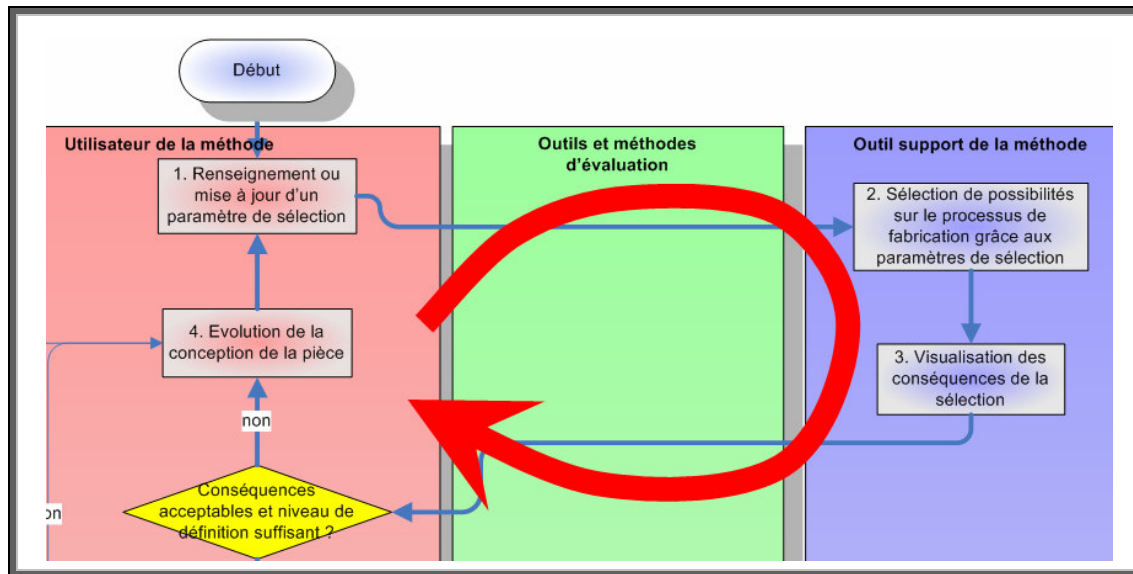


Figure 31 : Boucle du premier sens de l'intégration

- La seconde boucle (étapes 8 et 9, Figure 32) prend en charge le second sens à savoir poursuivre la conception du processus de fabrication en visualisant et en intégrant les répercussions sur la conception de la pièce associée.

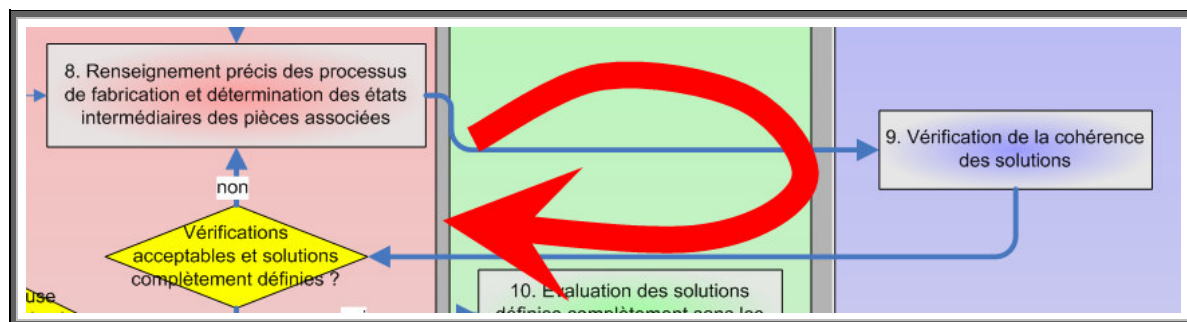


Figure 32 : Boucle du second sens de l'intégration

Comme énoncé plus haut, il s'agit d'une démarche de conception progressive. En effet, la conception d'une pièce est répartie en plusieurs points : tout d'abord avant de débiter la démarche, il se peut qu'un travail de conception préliminaire ait été réalisé, il est possible également que l'on parte d'une pièce déjà définie (cas de la reconception). La conception de la pièce a ensuite lieu à différents endroits du déroulement de la démarche :

- lors de la première partie lorsque l'on conçoit la pièce en contraignant le processus de fabrication (étape 4).
- lors de la seconde partie lorsque la pièce est conçue en fonction des choix faits sur le processus de fabrication (étape 8).

En outre l'aspect itératif de la démarche est réalisé grâce aux différents retours possibles : les principaux concernent les deux boucles citées précédemment (étapes 1 à 4, étapes 8 et 9). Des retours secondaires sont également possibles après chaque étape supportée par les outils d'évaluation.

Un autre aspect important de la démarche réside dans le fait que l'on ne privilégie pas dès le début une solution plus qu'une autre. En effet à partir de l'étape 5, plusieurs solutions possibles sont prises en compte. Ces solutions sont développées et sélectionnées au fur et à mesure. Une seule solution est retenue à la fin de la démarche lors de l'étape 15. Cela permet

à l'utilisateur de ne pas s'enfermer dès le départ dans une vue restreinte de solutions possibles.

Dans le cas où l'on est en présence d'une définition de pièce déjà définie avant la démarche, l'extraction des spécifications pertinentes de cette conception s'effectue lors de l'étape 4 (évolution de la conception de la pièce). On fait ainsi un premier passage par l'outil support pour visualiser les conséquences de la conception originale et décider alors ce qu'il est nécessaire d'extraire comme spécifications pertinentes au niveau de celle-ci.

2.6 Illustration de la démarche

L'illustration présentée dans cette section ne tient pas compte de l'outil support qui sera vu dans les chapitres suivants. L'exemple donné est simple de façon à ce que le déroulement puisse être montré dans son ensemble de façon claire. Pour cette illustration, nous nous placerons dans le **point de vue fabrication** décrit précédemment.

Le cas à étudier est un entraîneur de tarauds flottant (cas d'étude fourni par le CETIM). La Figure 33 présente le plan tel qu'il est reçu par l'utilisateur. La pièce à fabriquer est grisée. Cette pièce est axisymétrique et possède deux surfaces d'engrènement.

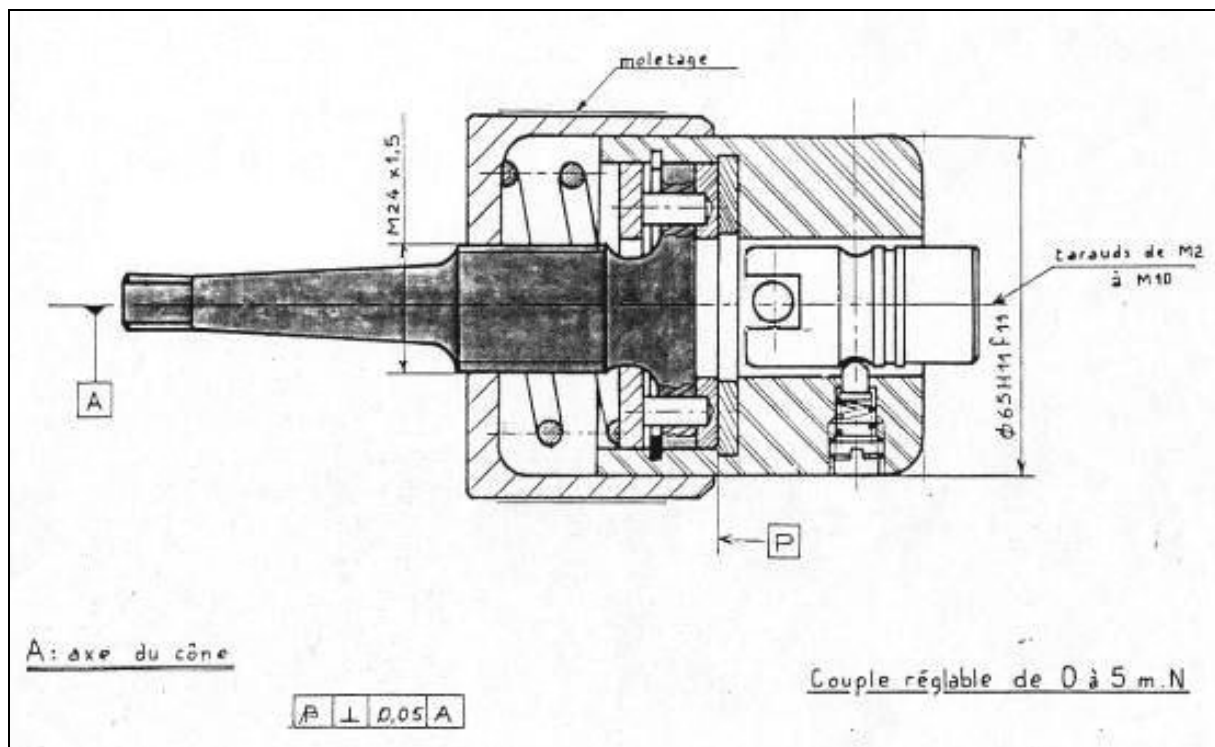


Figure 33 : Plan reçu par l'utilisateur

Le cas présent est très favorable pour le fabricant car il peut considérer la pièce à fabriquer dans son contexte. Il est alors possible d'identifier facilement les aspects fonctionnels de la pièce. Ainsi, une extraction possible des paramètres pertinents de la géométrie est présentée Figure 34 qui ne conserve que les contraintes des surfaces fonctionnelles et d'encombrement.

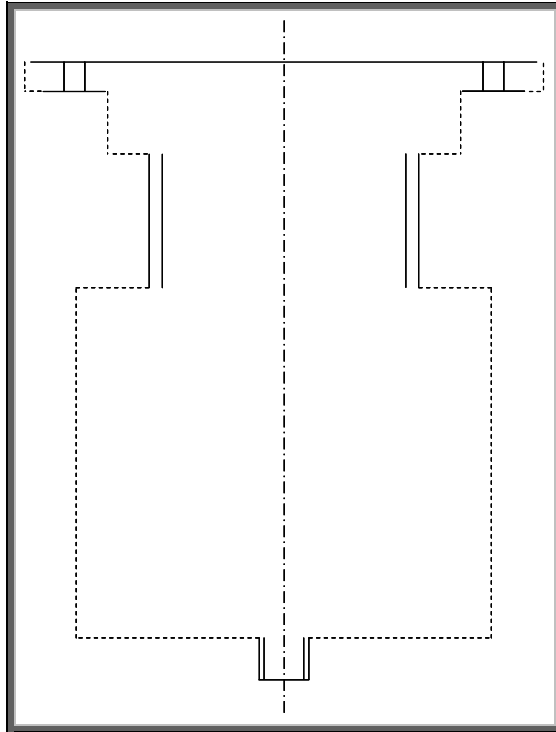


Figure 34 : Surfaces fonctionnelles et encombrement

D'après la Figure 34, certains paramètres peuvent être remarqués :

- Pièce à symétrie de révolution
- Présence d'un plateau
- Nombre de variations de section supérieur à 2
- Présence de débouchages au niveau du plateau

De plus les paramètres suivants sont à prendre en compte :

- Série : 30 000 pièces par an pendant trois ans
- Matériau : Acier C35

A partir de ce moment, une conception telle que présentée sur la Figure 35 peut être réalisée.

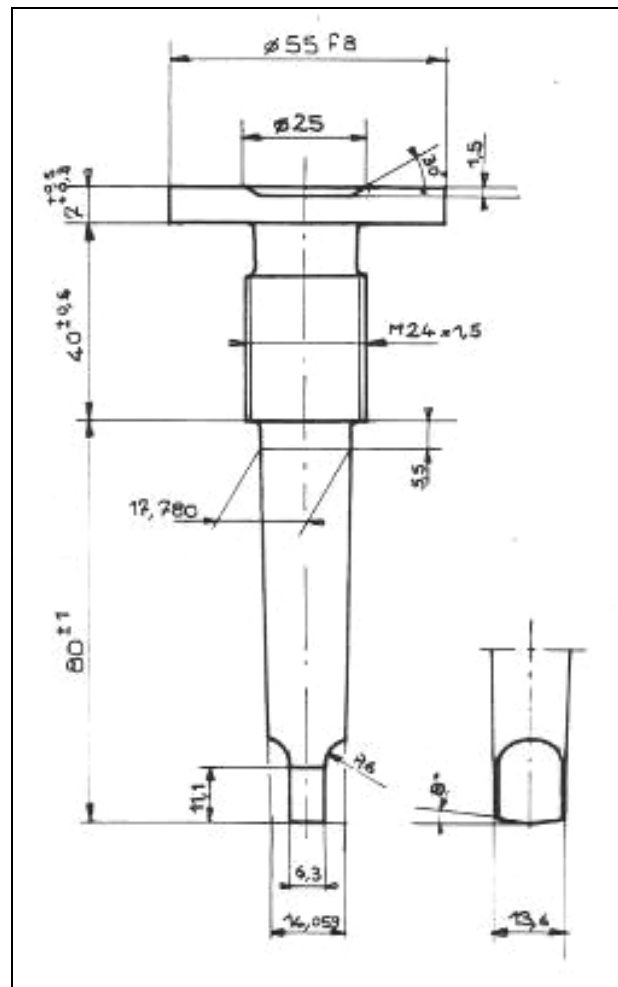


Figure 35 : Conception réalisée

A partir de cette conception, il est possible de déduire certaines conséquences sur le processus de fabrication. Pour simplifier, nous considérerons que les procédés principaux existants (cf. chapitre 1) sont : la forge libre, la forge à chaud et la forge à froid. Du fait de la série (30 000 pièces par an pendant trois ans : grande série), le forgeage de la pièce par forge libre n'est pas envisageable car la forge libre est réservée aux très petites séries. En revanche le forgeage à froid est dans ce cas préconisé. D'autre part le matériau est de l'acier C35 ce qui conduit à considérer l'estampage et non le matriçage parmi les procédés de forge à chaud. Enfin dans le cas de l'estampage, il y a deux façons de forger cette pièce : soit par estampage en bout (on la frappe verticalement, le plan de joint se situant sur le plateau), soit par estampage à plat (frappe horizontale, le plan de joint se trouvant sur la plus grande section de la pièce).

Ainsi parmi les possibilités suivantes : {forge libre, estampage en bout, estampage à plat, matriçage, forge à froid} deux sont éliminées (forge libre et matriçage), et une est préconisée (forge à froid). Les possibilités restantes intègrent des reprises d'usinage d'importance variable afin d'obtenir la pièce finale.

L'étape d'évaluation (étape 6) est ici réalisée par le forgeron lui-même qui juge la forge à froid (extrusion) plus intéressante que l'estampage pour des raisons de gain matière en particulier (ceci est d'autant plus important sachant que la série est grande). Il décide tout de même de conserver les trois possibilités (sélection étape 7) et de débiter le deuxième sens de l'intégration : développer la pièce (ou plus précisément les états intermédiaires et notamment

le brut de forge) en fonction des trois possibilités retenues (étape 8). Le brut de forge développé pour la possibilité estampage à plat est représenté Figure 36, celui de la possibilité estampage en bout Figure 37 et la solution de l'extrusion sur le Tableau 6.

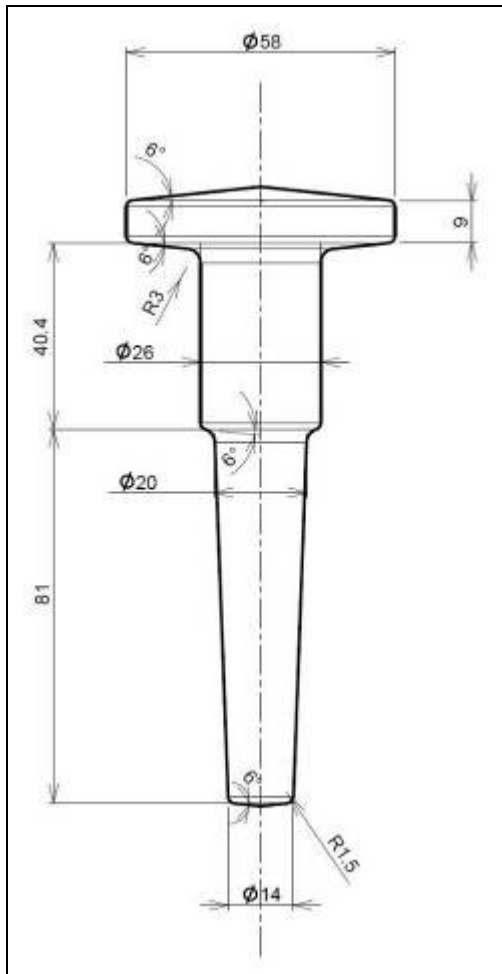


Figure 36 : Estampage à plat

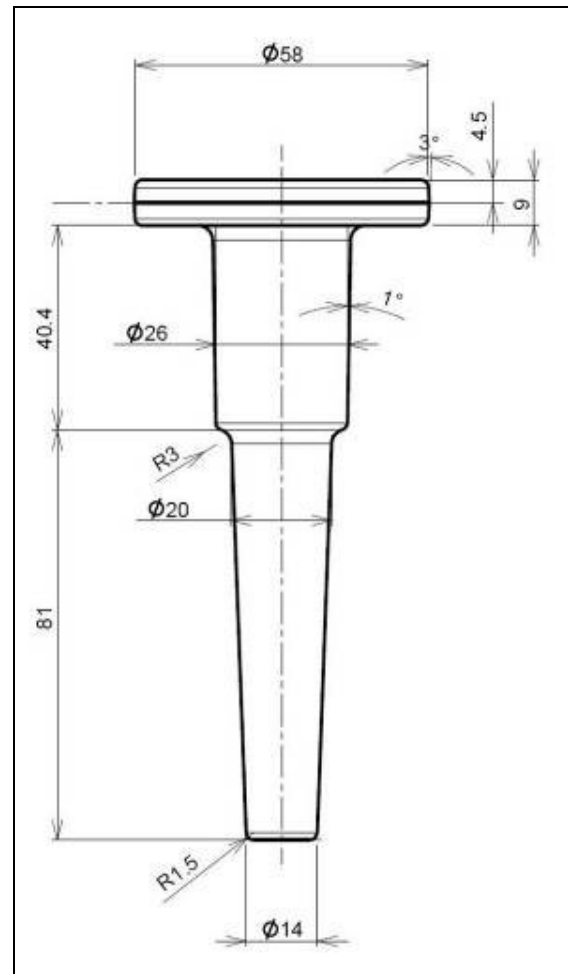
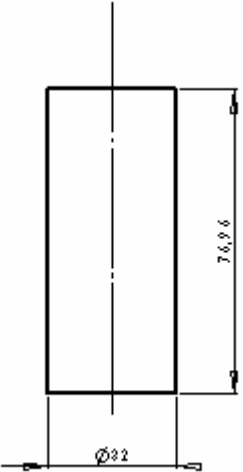
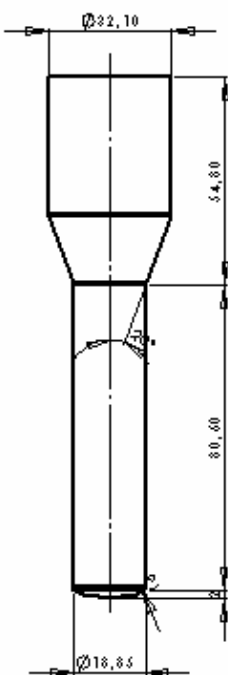
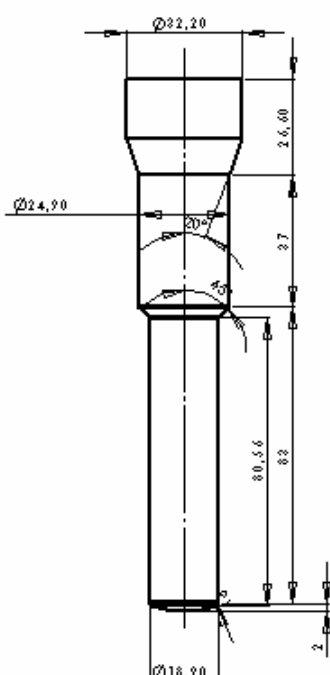
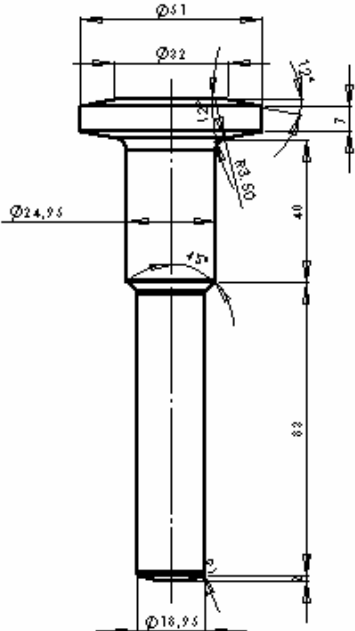
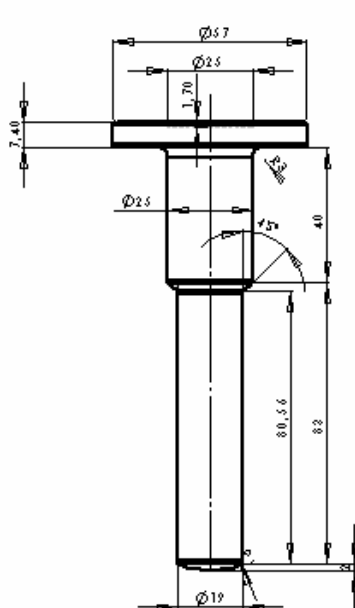


Figure 37 : Estampage en bout

Il est alors possible d'évaluer plus précisément la pertinence des différentes solutions proposées (étape 10). L'utilisateur décide de ne sélectionner (étape 11) que les deux solutions qui lui paraissent les plus intéressantes : l'extrusion et l'estampage en bout. En effet même en étant moins chère, la solution de l'estampage à plat risque de provoquer un déport et donc un défaut possiblement important de la symétrie de révolution. De plus le fibrage obtenu avec cette solution présenterait des ruptures à cause de la découpe de bavure.

Tableau 6 : Etats intermédiaires de la solution Extrusion

		
Lopin	Filage 1	Filage 2
		
Refoulement	Pièce extrudée	

L'examen des ressources associables peut alors commencer (étape 12). L'entreprise de forge en question est équipée de deux îlots avec pour machine principale une presse hydraulique de 1000 tonnes et une presse mécanique de 800 tonnes. Après évaluation, l'îlot doté de la presse mécanique dispose de la puissance nécessaire pour réaliser la solution de la forge à froid (extrusion). Avec les ressources affectées, l'évaluation finale (étape 14) fait apparaître que le choix de l'extrusion est faisable et plus intéressant que le choix de l'estampage en bout, en particulier par rapport au fait que la série est suffisante pour bénéficier de l'économie de matière que l'extrusion peut apporter.

C'est donc ce choix qui sera retenu par le forgeron (étape 15), choix validé (étape 16) par les moyens de validation qu'il aura défini (une présérie d'essais par exemple).

2.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons décrit une démarche prenant en charge la conception conjointe du produit et de son processus de fabrication associé. Cette démarche peut être considérée selon deux points de vue : le **point de vue fabrication** où l'utilisateur connaît les procédés et ressources utilisables et le **point de vue conception** où il se situe hors de tout contexte de fabrication. Plusieurs aspects importants de l'approche sont à souligner : les deux sens de l'intégration sont pris en charge, le travail de conception est réparti à différents moments. De plus, la considération conjointe de plusieurs solutions présente l'avantage de pouvoir comparer entre elles plusieurs alternatives, le choix final d'une possibilité n'ayant lieu qu'au terme de la démarche. Bien qu'appliquée à la forge dans notre cas, la démarche IP3FR peut a priori s'adapter à d'autres domaines de fabrication, le principe et sa description étant indépendants de tout domaine.

Enfin une illustration sur un cas simple a permis de montrer comment pouvaient se concrétiser les différentes étapes. Nous avons vu ainsi certaines connaissances simples utilisées sur ce cas d'illustration, l'idée est de formaliser ces connaissances pour pouvoir les utiliser de façon systématique à l'aide d'un outil adapté. Cette formalisation nécessaire à l'exploitation des connaissances constitue l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3 : Formalisation et exploitation des connaissances, application au domaine de la forge

Ce chapitre a pour objectif de répondre aux questions suivantes : Pourquoi formaliser les connaissances ? Quelles connaissances formaliser ? Comment formaliser les connaissances ? Inspirées des différentes approches présentées section 1.3 (Représentation et exploitation des connaissances appliquées à l'intégration), deux formalisations avec leurs traitements associés sont proposées et discutées.

3.1 Objectifs de la formalisation des connaissances

Il est possible de distinguer quatre principaux objectifs pour la formalisation des connaissances :

- L'accessibilité aux connaissances : pour pouvoir retrouver facilement les connaissances dont on a besoin.
- La transmission des connaissances
- L'exploitation des connaissances (en particulier l'exploitation automatique des connaissances)
- La création de nouvelles connaissances

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, une formalisation ne peut être dissociée d'un système d'interprétation qui lui est propre. Ainsi les deux formalisations proposées seront décrites avec les traitements qui leur sont associés.

3.2 Objet de la formalisation (que faut-il formaliser ?)

Dans le cadre de la démarche présentée lors du chapitre précédent, la formalisation des connaissances est nécessaire au fonctionnement de l'outil support de la méthode, à savoir pour les tâches suivantes :

- Sélection de possibilités grâce aux paramètres de sélection et visualisation des conséquences de cette sélection
- Déduction de l'ensemble des processus de fabrication haut niveau sélectionnés
- Vérification de la cohérence des solutions
- Détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication
- Déduction des ressources possibles pour chaque solution sélectionnée

L'étude de formalisation pour ce chapitre ne prend pas en compte les ressources, le dernier point ne sera donc pas abordé.

Le but de la formalisation dans le cas présent est de permettre une exploitation automatique des connaissances concernant le lien entre les paramètres du produit et ceux de son processus de fabrication associé. L'objet de la formalisation est donc constitué des connaissances permettant de vérifier ou de construire la cohérence entre ces deux ensembles d'informations (données du produit et données du processus de fabrication).

3.3 Application des approches de gestion des connaissances

Considérons à présent les approches de gestion des connaissances présentées au cours du chapitre 1 et voyons comment elles peuvent être mises en œuvre dans le contexte de ces travaux.

3.3.1 Application

Technologie de groupe : cette méthode consiste à classifier des objets dans des familles, en fonction de leurs similarités. Appliquée à notre étude, elle pourrait être utilisée pour classifier les pièces par rapport à leurs caractéristiques dans des familles de pièces. Chaque famille de pièces serait alors associée à un ensemble de conséquences sur les paramètres du processus de fabrication et éventuellement à un processus de fabrication haut niveau. Cette approche peut être comparée au raisonnement du forgeron lorsqu'il reconnaît une pièce d'un certain type et qu'il en déduit directement un processus de fabrication associé pour ce type de pièce. Ainsi comme le montre la Figure 38, l'association qui est effectuée entre les paramètres de la pièce et ceux du processus de fabrication associé est une association globale : une définition type de pièce est associée à une définition type de processus de fabrication. Une définition type de pièce correspond à un ensemble de paramètres de la pièce dont les valeurs sont contraintes, une définition type de processus de fabrication correspond à un ensemble de paramètres du processus de fabrication dont les valeurs sont contraintes.

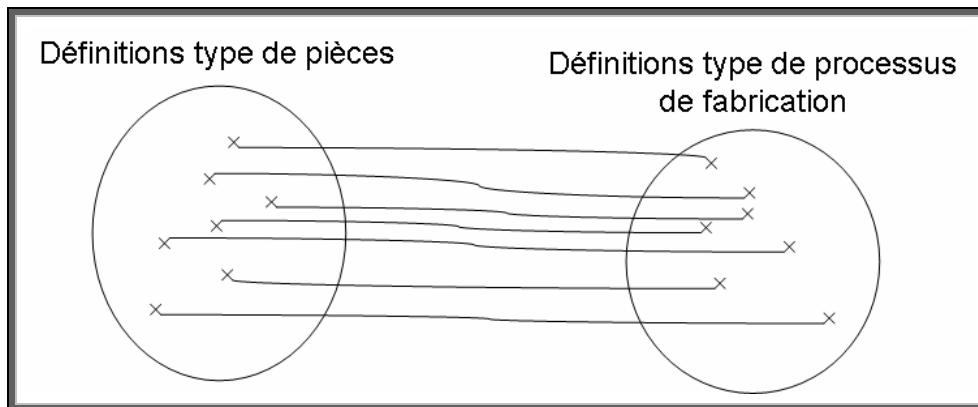


Figure 38 : Technologie de groupe : association globale

Système expert : appliqué à notre problème, le raisonnement à partir de règles consisterait à utiliser un ensemble de règles dont le corps fait intervenir les paramètres de la pièce et la tête ceux du processus de fabrication. Ce raisonnement est similaire à celui du forgeron lorsqu'il reconnaît certaines caractéristiques de la pièce et qu'il associe directement des conséquences sur les paramètres du processus de fabrication. Cette fois, contrairement à l'approche précédente, les associations effectuées deviennent élémentaires et ne concernent que peu de paramètres (Figure 39) : par exemple à un paramètre de la pièce dont la valeur est contrainte, on fait correspondre deux paramètres du processus de fabrication dont les valeurs sont contraintes. Plusieurs systèmes de ce type existent appliqués à la détermination automatique de processus de fabrication en forge ([Fujikawa 1997], [Glynn 1995], [Kim 1999]) mais ils sont très spécifiques (dédiés à un type de pièce bien précis ou bien à un procédé particulier).

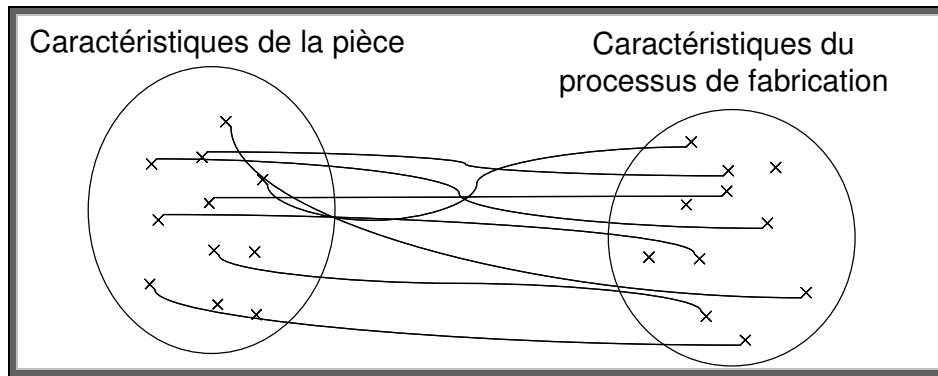


Figure 39 : Raisonnement à base de règles : associations ponctuelles

Raisonnement à partir de cas : le principe du raisonnement à partir de cas appliqué dans le présent contexte est de trouver une ou plusieurs pièces qui ont été traitées (c'est-à-dire dont les processus de fabrication associés ont été déterminés et validés), et qui présentent la particularité d'être similaires à celle que l'on examine. Le processus de fabrication associé à cette dernière est dérivé à partir des processus de fabrication des pièces similaires, en utilisant des règles d'adaptation qui sont fonction des différences existant entre les pièces similaires et la pièce à traiter. Une telle approche a été utilisée par exemple pour la détermination des processus de fabrication faisant intervenir l'extrusion [Lei 2001].

Ontologie : Appliquée à notre étude, une description du domaine de la forge grâce à une ontologie permettrait de mettre en relation les différents concepts concernant la pièce et le processus de fabrication. Grâce à des outils de classification, il serait alors possible de déduire des conséquences sur les données de la pièce et sur celles du processus de fabrication (les travaux de Zdrahal montrent un exemple de cette approche [Zdrahal 1999]). Cette approche rejoint la technologie de groupe en l'élargissant grâce à la possibilité d'effectuer des classifications multiples (en technologie de groupe, il n'y a qu'une classification : celle de la pièce dans une famille de pièces).

Programmation par contraintes : Dans ce cas, les variables seraient alors constituées des données du produit et du processus de fabrication. Les contraintes seraient :

- Les données imposées au cours de la conception
- Les contraintes impliquant des variables du produit et des variables du processus de fabrication pour exprimer les liens de cohérence entre ces deux ensembles de données.

3.3.2 Critiques des applications présentées

Comme cela est précisé dans le chapitre 1, l'approche par raisonnement à partir de cas présente une difficulté majeure lors de son démarrage. Ceci d'autant plus que la concurrence qui existe dans le domaine de la forge rend ardue la tâche de collecter un nombre suffisant de cas réels et de remplir ainsi une base de cas. De plus, il serait souhaitable qu'un client d'une entreprise de forge puisse être potentiellement utilisateur du système et dans ce cas la base de cas devrait être au moins en partie partagée, ce qui du fait des problèmes de confidentialité s'avèrerait probablement impossible.

Le problème de l'approche par technologie de groupe réside dans la maîtrise du nombre des familles identifiées. En effet, pour couvrir une étendue suffisante de types de pièce et pour obtenir des conséquences relativement spécifiques sur les processus de fabrication, les familles de pièce doivent nécessairement être assez précises et le risque de prolifération peut alors exister.

L'approche par base de règle pose l'inconvénient de la non-contextualité des règles : les conséquences portées par les règles sur le processus de fabrication ne considèrent pas ce dernier de façon globale, et il est possible que cela conduise à des incohérences, particulièrement dans le cadre d'une utilisation des procédés de forge : en effet contrairement à l'usinage où certaines opérations peuvent être exécutées indépendamment d'autres opérations, un processus de forge nécessite d'être considéré de façon globale. Par exemple, il existe des cas où le surfaçage d'une surface et le perçage d'un trou sur une pièce est réalisable dans n'importe quel ordre, tandis que le débouchage de trous à chaud se fera toujours après les frappes à chaud qui elles-mêmes se feront après le chauffage du lopin.

Deux formalisations possibles ont été proposées : la première s'inspire de l'approche par technologie de groupe associée à une approche par ontologie ; la deuxième vise à combiner l'approche par technologie de groupe et le raisonnement à base de règles afin de tirer parti des avantages de chacune des approches (l'exploitation s'inspirant de la programmation par contraintes).

3.4 1^{ère} proposition de formalisation : formalisation associée à une exploitation de type multi classification

3.4.1 Description de la formalisation

La première formalisation a été réalisée en s'inspirant de l'approche par technologie de groupe associée à une approche par ontologie. Des approches similaires existent par exemple en médecine pour le diagnostic de certaines maladies (on effectue une classification en fonction des symptômes observés) [D'Aquin 2004]. Cette approche a été étudiée en premier lieu car elle semblait plus adaptée qu'une approche à base de règles du fait de la nécessité de considérer une pièce forgée dans sa globalité.

La technologie de groupe implique l'utilisation d'un raisonnement de type classification mais se limite à la classification d'une pièce dans une famille de pièces. Cette famille de pièces est associée à des conséquences sur le processus de fabrication.

L'approche par ontologie permet l'utilisation de plusieurs classifications, ainsi qu'une description plus large du domaine : description de pièce, du processus de fabrication, des procédés voire des ressources. L'idée est ici d'intégrer également des familles de pièces dans une ontologie et de permettre un fonctionnement plus évolué qu'une simple approche par technologie de groupe.

Afin de pouvoir structurer les familles de pièces et y lier les conséquences sur le processus de fabrication, une architecture particulière a été mise en place. La formalisation que nous proposons est associée à un raisonnement qui met en œuvre plusieurs classifications :

- la classification des pièces dans des familles de pièces (une pièce peut être classifiée dans plusieurs familles de pièces)
- la classification des procédés utilisables par les processus de fabrication associables à chacune des familles de pièces (un procédé peut être classifié à plusieurs endroits également)

Une famille de pièces possède ainsi deux ensembles de spécifications :

- les spécifications concernant les paramètres de la pièce
- les spécifications concernant les paramètres du processus de fabrication associable

L'ensemble des spécifications concernant les paramètres du processus de fabrication sera nommé **schéma d'alternative de gamme**. Ce schéma représente en réalité une séquence d'étapes qui utilisent des procédés spécifiés par des contraintes sur les paramètres des procédés. Notons que l'on n'interdit pas la définition de plusieurs schémas d'alternative de gamme pour une famille de pièces, ceci pour permettre à la fois plus d'expressivité et plus de lisibilité. La Figure 40 illustre un schéma de ce type : pour chaque étape, il existe des contraintes portant sur le procédé utilisable à ce moment, par exemple sur le type du procédé, sur sa température de mise en œuvre, sa cadence possible, et ainsi de suite.

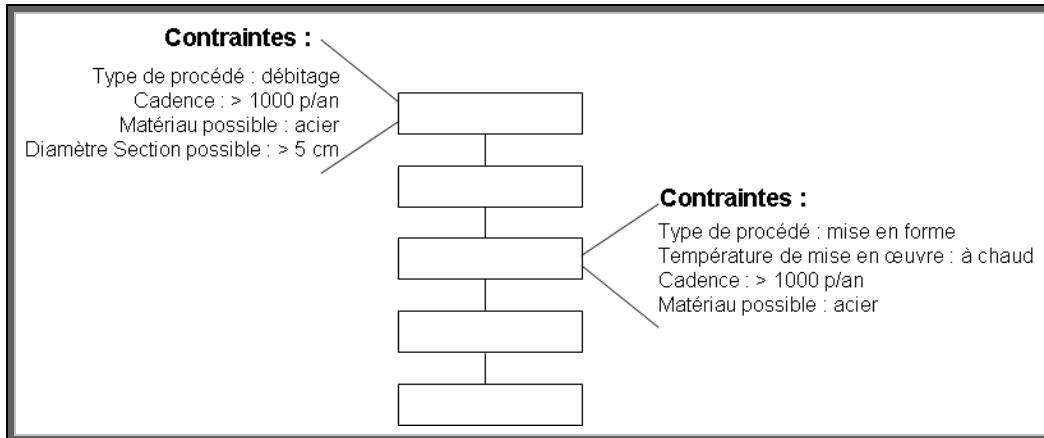


Figure 40 : Schéma d'alternative de gamme

La Figure 41 résume le fonctionnement de base associé à la formalisation : il est possible de définir des pièces et des procédés en renseignant leurs paramètres. Ces pièces et procédés seront alors susceptibles d'être classifiés dans les familles de pièces qui auront été définies. Ainsi, pour une pièce donnée qui sera classifiée dans une certaine famille, il sera possible de déduire quels procédés correspondent aux spécifications des différentes étapes du schéma d'alternative de gamme de la famille en question.

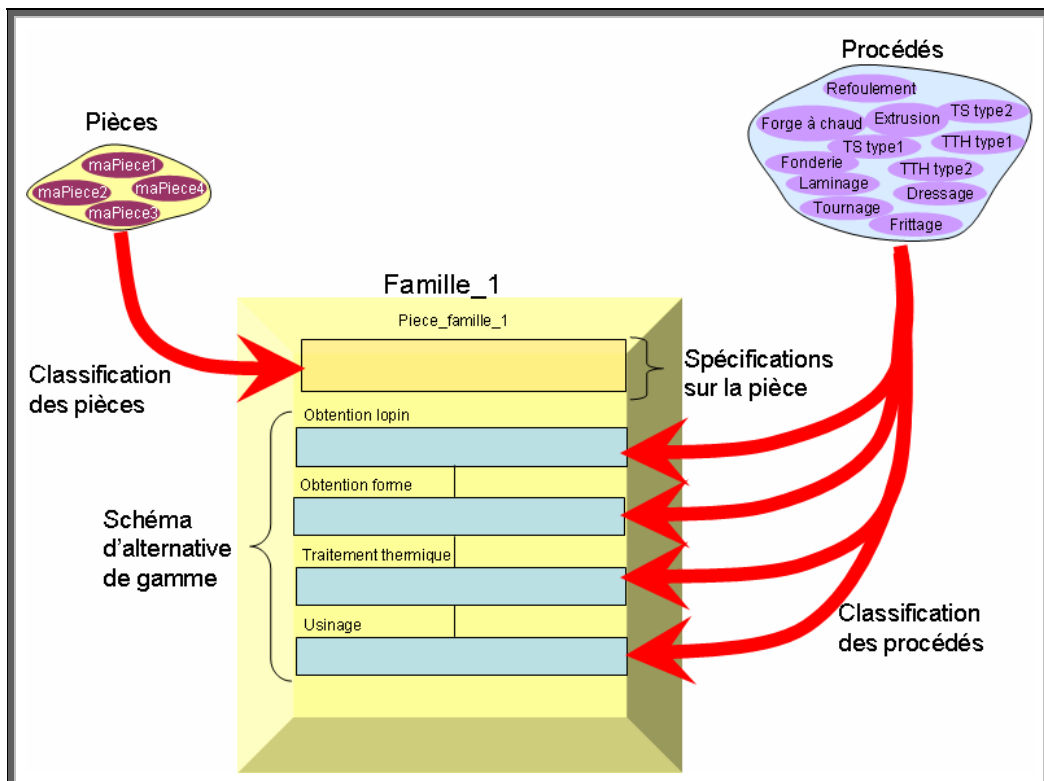


Figure 41 : Double classification

La déduction des processus de fabrication haut niveau associables à une pièce donnée peut ainsi être réalisée à partir du résultat des classifications. La Figure 42 présente un déroulement possible de cette déduction : dans cet exemple, la pièce est classifiée dans une famille de pièces qui contient deux schémas d'alternative de gamme. Les contraintes sur les étapes de ces schémas amènent à déterminer quels procédés sont possibles pour chacune des étapes. Ces résultats peuvent être finalement déclinés en plusieurs processus de fabrication haut niveau en combinant les différentes possibilités pour chaque étape d'un schéma d'alternative de gamme.

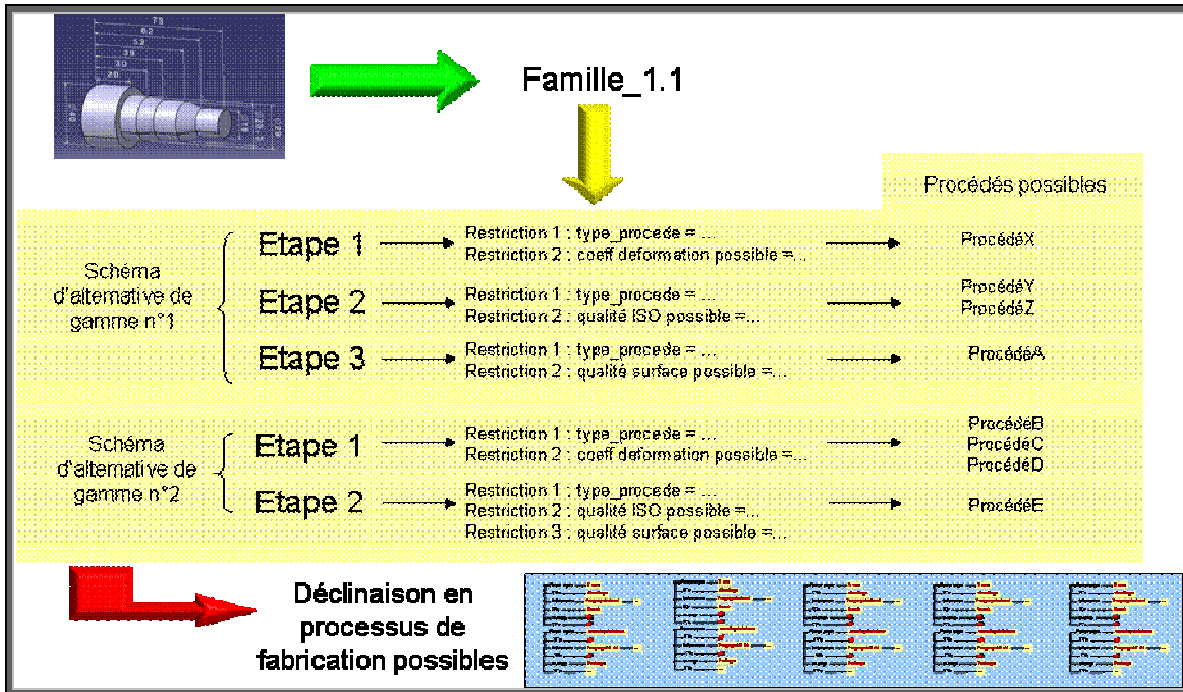


Figure 42 : Déduction de processus de fabrication possibles

La vérification de la cohérence entre une pièce et un processus de fabrication haut niveau donné peut être effectuée en vérifiant que le processus de fabrication donné est compatible avec un des schémas d'alternative de gamme correspondant aux familles dans laquelle la pièce se trouve classifiée. Par exemple, sur la Figure 43, le processus de fabrication est constitué de la séquence {ProcédéX, ProcédéZ, ProcédéA}. Il se trouve que cette séquence répond aux spécifications d'un schéma d'alternative de gamme d'une famille, en l'occurrence Famille_1.1, et que la pièce que l'on examine est classifiée dans cette famille. Dans ce cas, la pièce en question et le processus de fabrication sont compatibles.

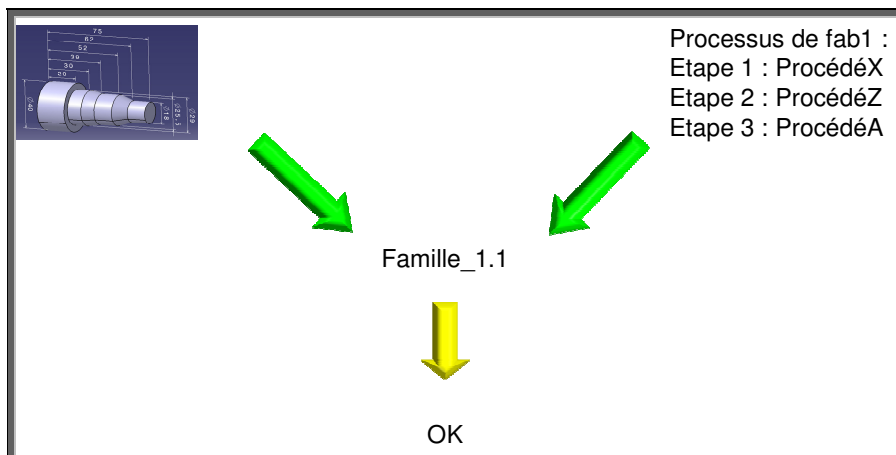


Figure 43 : Vérification de cohérence

3.4.2 Conclusion sur la première proposition de formalisation

Sur le Tableau 7 se trouve récapitulée la prise en charge des différentes tâches qui doivent être considérées dans le fonctionnement de l'outil support de la démarche.

Tableau 7 : Evaluation de la formalisation

Tâche	Prise en charge
Sélection de possibilités grâce aux paramètres de sélection et visualisation des conséquences de cette sélection	Classification des pièces et procédés dans les familles (Figure 41)
Déduction de l'ensemble des processus de fabrication haut niveau sélectionnés	Déduction à partir des schémas d'alternative de gamme (Figure 42)
Détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication	Non pris en charge
Vérification de la cohérence des solutions	Validation si classification dans la même famille (Figure 43)

La détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication ne peut pas être prise en charge avec cette formalisation. Par exemple, si l'on souhaite savoir quelle modification apporter à la pièce pour qu'un certain procédé soit praticable, il n'est pas possible de déterminer la ou les spécifications qui sont en question car on ne connaît pas le lien caractéristique qui existe entre ce procédé et les données du produit. De même, si l'on impose l'utilisation d'un procédé dans le processus de fabrication, cela aura pour conséquence de ne plus considérer certains schémas d'alternative de gamme (ceux qui ne pourraient admettre ce procédé dans une de leurs étapes). Certaines familles de pièce seraient alors éliminées et éventuellement celles de la pièce analysée aussi. Cependant, il est impossible de déterminer pour quelle raison particulière la pièce n'est pas conforme pour l'utilisation du procédé que l'on a imposé. Le lien établi entre les données de la pièce et les données du processus de fabrication est un lien trop global : on n'explicite pas l'information qui relie d'un côté les spécifications au niveau de la pièce et de l'autre le schéma d'alternative de gamme : une famille de pièces n'est en réalité qu'une association globale de ces deux ensembles de spécifications.

Deux autres problèmes sont soulevés par cette approche :

- le risque de prolifération des familles de pièce
- la cohérence des processus de fabrication haut niveau déduits

La prolifération des familles de pièces n'est pas écartée par cette approche : si l'on souhaite couvrir une variété assez large de types de pièces se rapportant à un ou plusieurs schémas d'alternative de gamme, il est nécessaire de définir un nombre conséquent de familles. Dans le cas contraire, il se peut qu'une pièce ne soit classifiée dans aucune famille. De même, si l'on souhaite être beaucoup plus précis au niveau des spécificités des types de pièces (et définir des schémas d'alternative de gamme plus détaillés), le nombre de familles sera d'autant plus élevé.

La cohérence du processus de fabrication haut niveau que l'on peut déduire à partir des schémas d'alternative de gamme n'est pas assurée a priori. En effet, les spécifications au niveau des schémas d'alternative de gamme ne font pas intervenir des relations de compatibilité entre les procédés. Rien n'empêche a priori que deux procédés incompatibles se retrouvent dans le même processus de fabrication. Pour remédier à ce problème, il est possible de proposer par exemple l'utilisation d'un ensemble de règles vérifiant la bonne construction

d'un processus de fabrication, et évitant ainsi la déduction de processus de fabrication incohérents.

Un avantage de cette formalisation et de son exploitation associée est sa capacité à prendre en compte de nouveaux procédés : la partie conséquences sur le processus de fabrication n'est pas fixée concrètement (il n'y a pas de processus de fabrication définis explicitement) comme c'est le cas avec les technologies de groupe. Elle est définie au moyen de spécifications. Si un nouveau procédé devient utilisable, il suffit de renseigner ses caractéristiques pour qu'il puisse être pris en compte lors des classifications.

3.5 2^{ème} proposition de formalisation : Schéma de processus de fabrication

Le compromis proposé dans cette deuxième formalisation est d'associer l'approche inspirée des technologies de groupe (donc basée sur la classification et le regroupement par famille) à une approche à base de règles. Le but de cette association est de limiter la prolifération des familles, tout en conservant un certain niveau de précision au niveau des déductions possibles. L'adjonction de règles va permettre en plus de préciser le lien entre données du produit et données du processus de fabrication afin de remplir la tâche : « Détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication ». Ces règles auront l'avantage d'être associées aux familles et donc à un contexte, ce qui pourra limiter leurs incohérences éventuelles.

En réalité, cette approche a pour origine les deux questions suivantes portant sur la première formalisation :

- Pourquoi créer deux familles de pièces alors qu'elles ont le même schéma d'alternative de gamme (même si par exemple les spécifications sur la morphologie sont bien différentes) ?
- Pourquoi créer deux schémas d'alternative de gamme différents alors qu'ils ne diffèrent par exemple que sur une étape ?

La première question nous amène à remettre en question la façon de définir les familles de pièces : traditionnellement, c'est à partir des caractéristiques des pièces que les familles étaient définies (par exemple on regroupe dans une même famille les pièces qui se ressemblent du point de vue des caractéristiques morphologiques). L'idée avancée ici est de créer les familles de pièces en fonction des caractéristiques du processus de fabrication. Ainsi ce sera parce que leurs processus de fabrication se ressemblent que deux pièces seront classifiées dans la même famille (même si elles peuvent être éloignées d'un point de vue morphologique).

Pour une approche par technologie de groupe, créer des familles à partir des caractéristiques de processus de fabrication, cela revient finalement à considérer qu'un processus de fabrication va constituer la base d'une famille. Un moyen de limiter la prolifération de ces familles est donc de regrouper ces processus de fabrication lorsqu'ils sont peu différents.

Le regroupement de processus de fabrication haut niveau et la manière de les relier aux caractéristiques de la pièce vont être concrétisés par ce que nous nommerons **schéma de processus de fabrication**.

La structure en schéma de processus de fabrication va ainsi nous permettre de formaliser les connaissances relatives aux processus de fabrication par rapport aux paramètres de la pièce. Cette formalisation pourra être ensuite exploitée par un traitement spécifique (voir

3.5.2) pour émettre des déductions à la fois sur le processus de fabrication et sur les paramètres de la pièce.

3.5.1 Construction des schémas de processus de fabrication

Un **schéma de processus de fabrication** peut être vu comme un regroupement de plusieurs processus de fabrication haut niveau, associé à des règles que l'on appelle des **conditions**.

Plus précisément, un schéma de processus de fabrication est décrit au moyen d'objets que l'on appelle des **transformations** et qui représentent des étapes du processus de fabrication. Il en existe de plusieurs types, et nous avons déjà vu précédemment les **transformations élémentaires** qui sont des étapes élémentaires utilisées pour définir les processus de fabrication haut niveau.

Afin de pouvoir factoriser simplement plusieurs processus de fabrication haut niveau, deux autres types de transformations ont été introduits : les transformations séquence qui permettent de représenter une séquence de transformations, et les transformations choix qui permettent de représenter plusieurs possibilités de transformations. Le choix entre ces différentes possibilités est exclusif. Sur la Figure 44, deux processus de fabrication sont factorisés : ils ne diffèrent que par la première transformation élémentaire : celle-ci utilise soit le procédé de sciage soit le procédé de cisailage. Ces deux processus de fabrication peuvent être regroupés en définissant une transformation choix qui admet deux possibilités : soit la transformation élémentaire avec le procédé de sciage, soit la transformation élémentaire avec le procédé de cisailage.

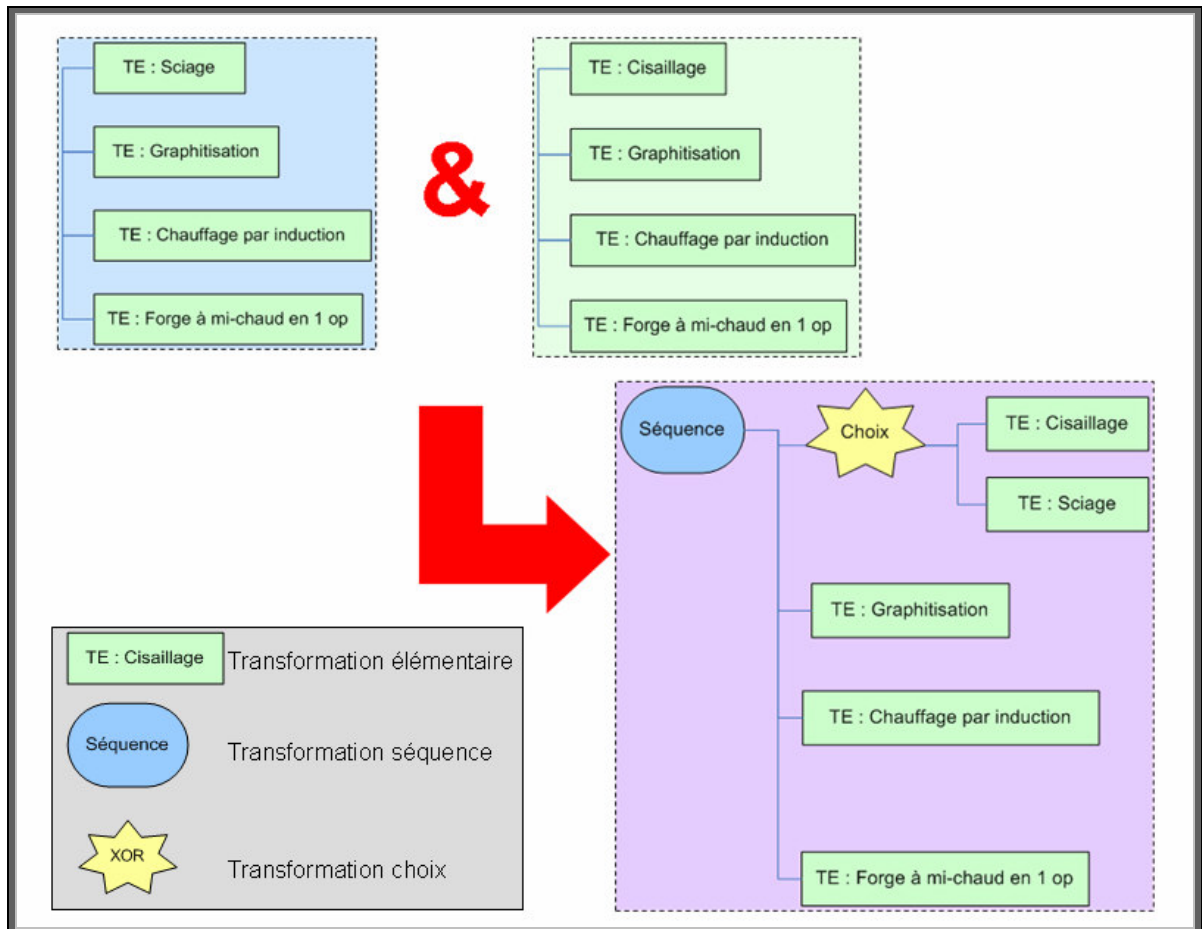


Figure 44 : Regroupement de deux processus de fabrication haut niveau

Pour pouvoir regrouper simplement deux processus de fabrication qui diffèrent par la répétition d'opérations successives, un autre type de transformation a été défini : la **transformation boucle**. Sur la Figure 45, nous pouvons voir un exemple d'utilisation de cet élément : une transformation boucle est composée de deux branches : la branche aller et la branche retour qui peuvent être une transformation de n'importe quel type (séquence, choix, élémentaire ou boucle). Ainsi dans cet exemple sont représentés à la fois le processus de fabrication haut niveau pour une extrusion en 3 opérations, ainsi que celui faisant intervenir un recuit de globulisation avant la réitération d'une autre extrusion en 3 opérations.

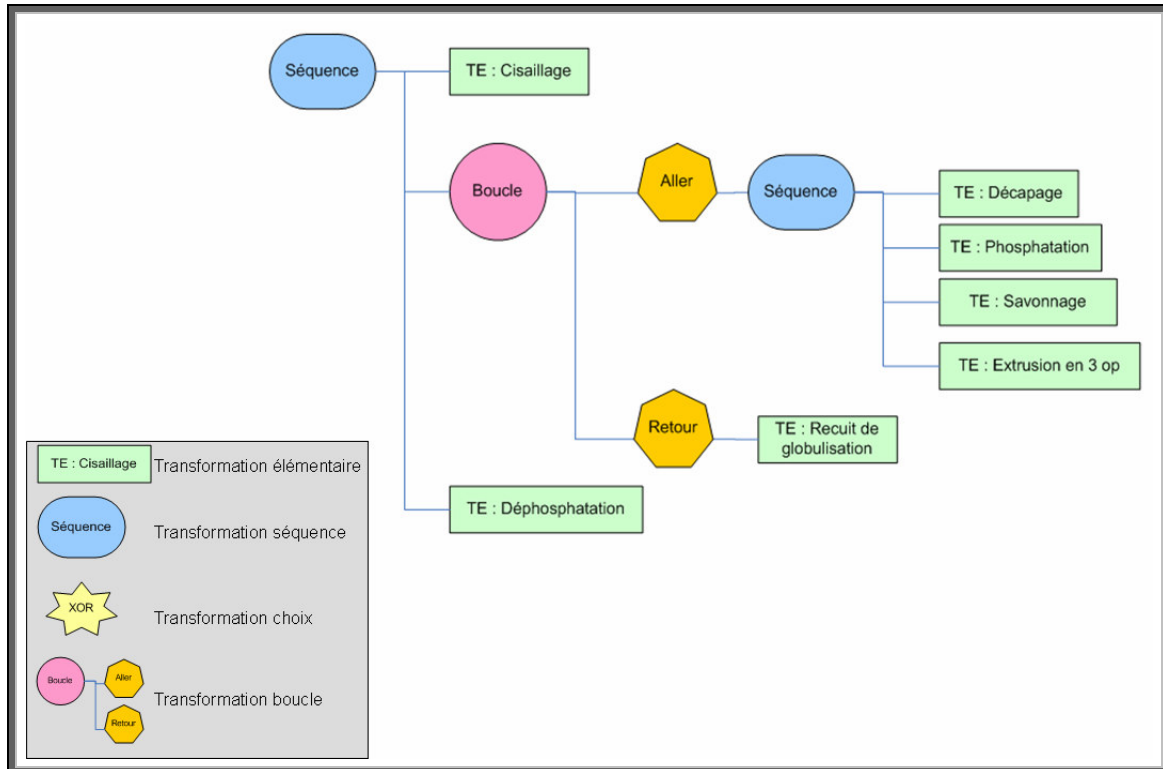


Figure 45 : Exemple d'utilisation d'une transformation boucle

Sur toutes les transformations peuvent être définies des **conditions** : ce sont des règles qui font intervenir les paramètres de la pièce et qui permettent l'exploitation du schéma (en indiquant par exemple dans quel cas la transformation est possible ou impossible, ou bien dans quel cas elle est préconisée). Sur la Figure 46 est présenté un exemple de schéma avec des conditions. Il est possible de définir des conditions pour n'importe quelle transformation, y compris la transformation racine du schéma. Si la condition n'est pas remplie pour la transformation racine du schéma, cela implique la non considération de celui-ci (Note : les conditions sont volontairement exprimées de façon non quantifiées, des exemples concrets seront donnés à la fin de ce chapitre dans la partie 3.6 : Entretiens avec des experts).

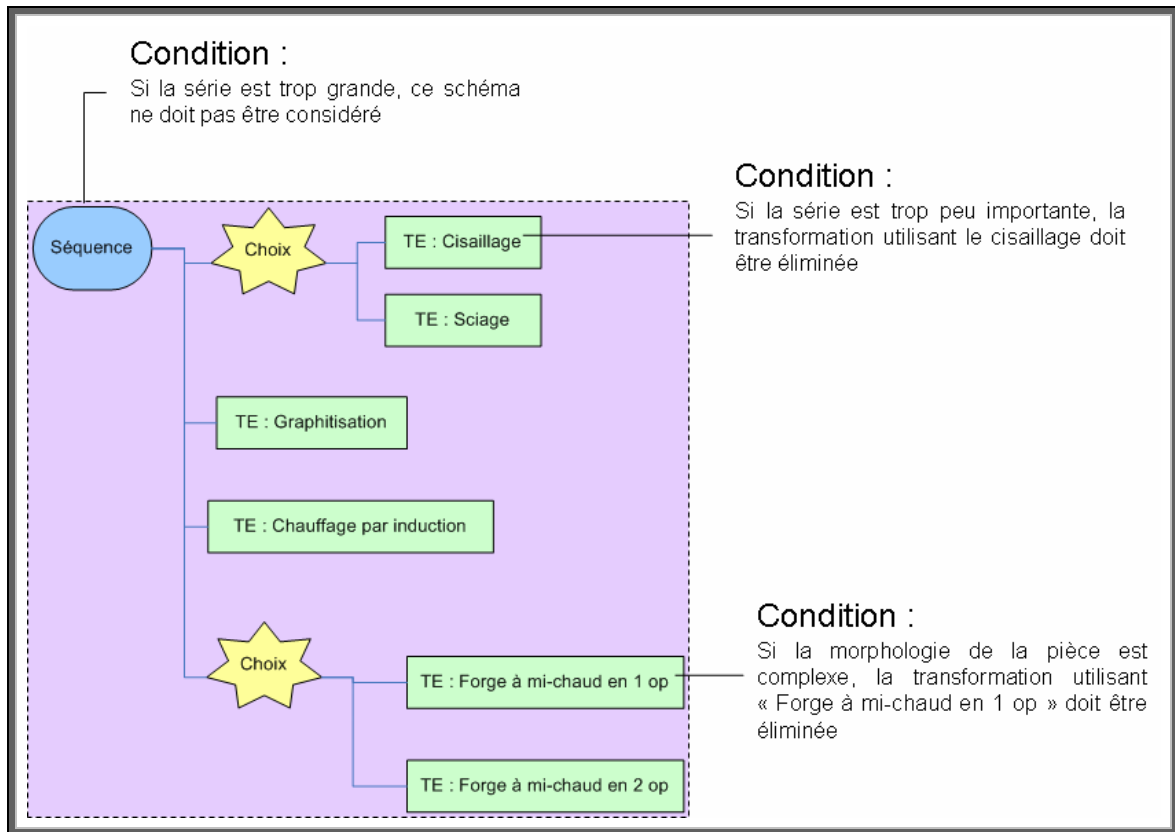


Figure 46 : Exemples de conditions

Les conditions peuvent être de différents types : certaines proviennent des limitations du procédé, d'autres ont pour origine le savoir-faire d'experts, d'autres encore peuvent traduire l'inutilité d'un procédé par rapport au but à atteindre. Ces conditions sont toujours exprimées relativement aux paramètres de la pièce.

D'autre part deux catégories de conditions peuvent être distinguées par rapport à leur traitement : les conditions d'élimination d'un côté, les conditions de préconisation de l'autre. Dans le premier cas, la condition sert à éliminer le cas échéant une possibilité, dans le second, il s'agit de privilégier une possibilité, ce qui signifie l'élimination des possibilités en concurrence avec celle analysée.

On parle de **processus de fabrication avec degrés de liberté** pour désigner le regroupement de plusieurs processus de fabrication haut niveau sans considération des conditions. Un **schéma de processus de fabrication** est ainsi un processus de fabrication avec degrés de liberté pour lequel chacune des transformations peut être liée à une condition.

3.5.2 Exploitation d'un schéma de processus de fabrication

Il est possible de distinguer trois phases d'exploitation d'un schéma de processus de fabrication :

- l'élargissement du schéma de processus de fabrication
- le développement ou la déduction des processus de fabrication haut niveau
- la prise en compte des contraintes sur le processus de fabrication.

L'élargissement d'un schéma de processus de fabrication a pour objectif de simplifier le schéma en éliminant les possibilités qui ne sont pas compatibles avec les caractéristiques de la pièce. Cet élargissement peut s'apparenter au traitement que l'on trouve dans une approche comme

la programmation par contraintes : il s'agit de parcourir le schéma de processus de fabrication et de supprimer toutes les transformations pour lesquelles les conditions d'élimination sont remplies. Par exemple, sur la Figure 47, en parcourant le schéma, la transformation utilisant le procédé de cisailage est éliminée car le diamètre du lopin nécessaire pour fabriquer la pièce est trop important. Le schéma de processus de fabrication est donc simplifié : on ne considère plus la transformation utilisant le procédé de cisailage.

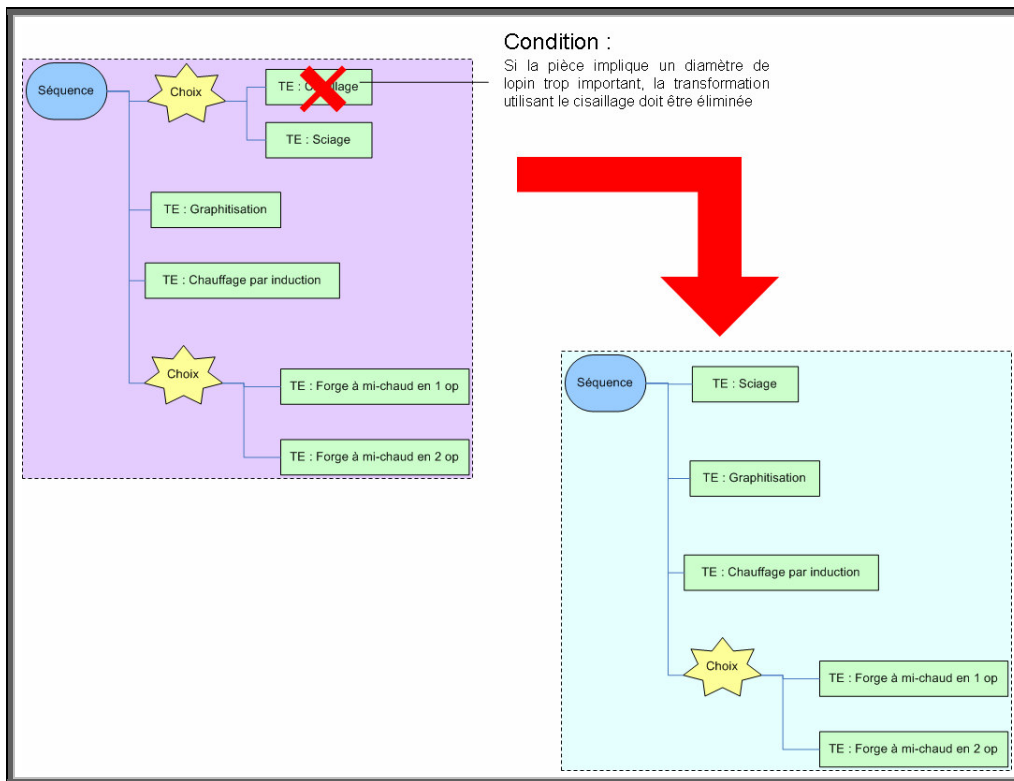


Figure 47 : Elagage d'un schéma de processus de fabrication avec des conditions d'élimination

Un autre type d'élagage possible peut s'effectuer avec les conditions dites de préconisation (Figure 48) : dans ce cas, si une condition de préconisation est vérifiée, les transformations qui sont en concurrence avec celle analysée sont éliminées. Si deux transformations en concurrence sont préconisées, aucune des deux n'est éliminée.

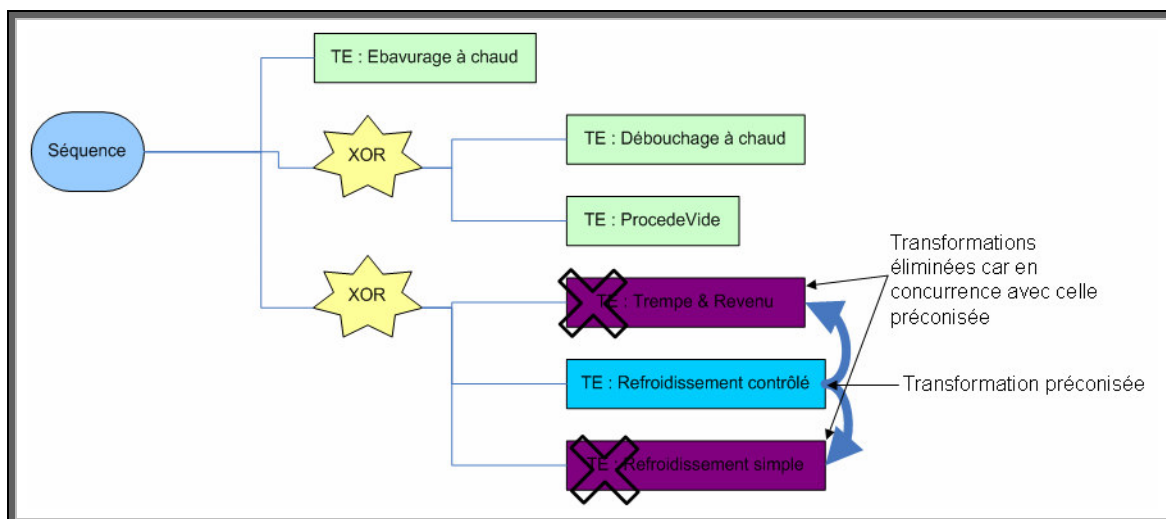


Figure 48 : Elagage d'un schéma de processus de fabrication avec des conditions de préconisation

Le développement d'un schéma de processus de fabrication consiste à déduire tous les processus de fabrication haut niveau possibles à partir d'un schéma élagué. Le principe de déduction est le suivant : à chaque fois que l'on rencontre une transformation choix, un nouveau processus de fabrication haut niveau est créé pour chacune des possibilités de cette transformation choix. Sur la Figure 49, le schéma est composé d'une séquence avec trois transformations élémentaires et une transformation choix avec deux possibilités. Deux processus de fabrication haut niveau sont donc déduits, l'un faisant figurer la séquence complétée de la première possibilité, l'autre étant constituée de la séquence complétée avec la seconde possibilité.

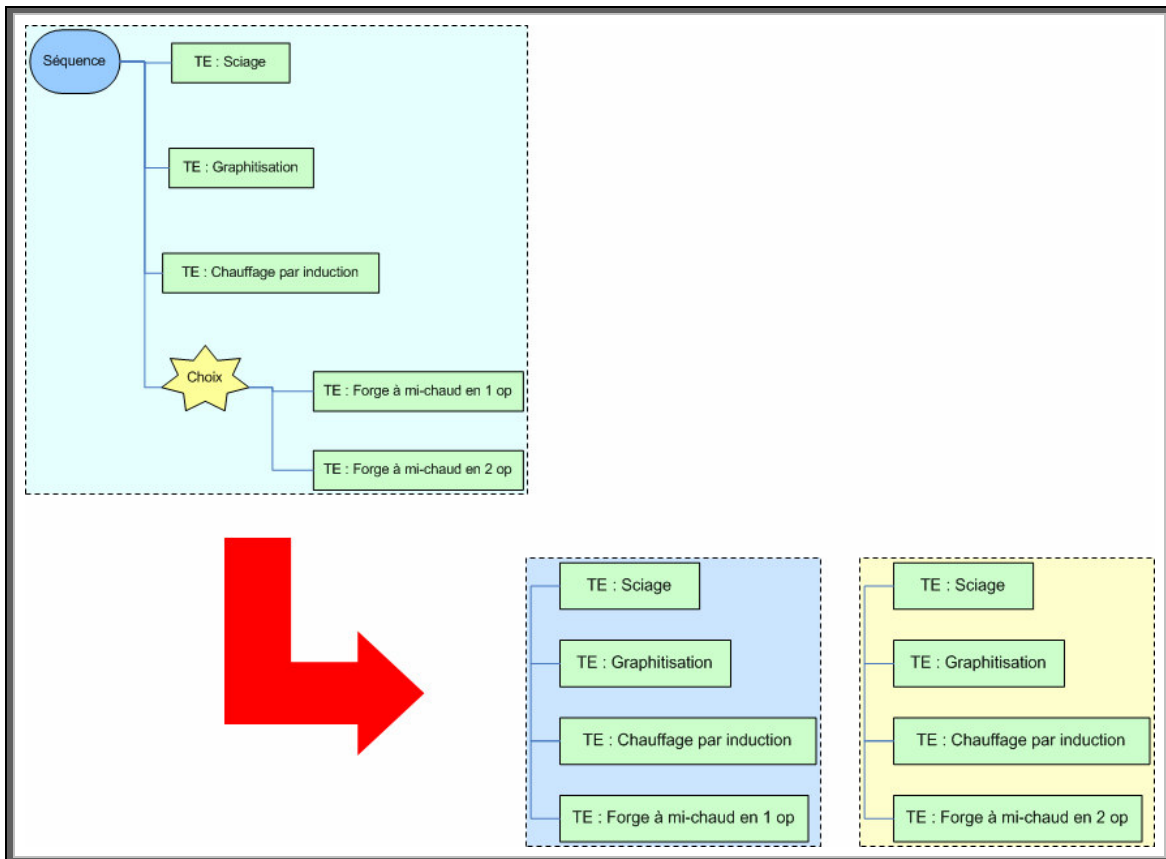


Figure 49 : Déduction des processus de fabrication

La prise en compte des contraintes sur le processus de fabrication s'effectue à deux niveaux : il y a tout d'abord la répercussion des contraintes au niveau du schéma de processus de fabrication et ensuite la traduction de ces contraintes au niveau des caractéristiques de la pièce. Ce que l'on appelle une contrainte au niveau du schéma de processus de fabrication est uniquement l'imposition de l'utilisation ou de la non-utilisation d'une transformation de ce schéma.

Dans le cas où la contrainte oblige la non-utilisation d'une transformation donnée : la transformation est tout simplement éliminée du schéma.

Dans le cas où la contrainte oblige l'utilisation d'une transformation donnée (Figure 50) : il s'agit d'un traitement analogue à l'élagage avec des conditions de préconisation : les transformations en concurrence avec celle qui est préconisée sont éliminées.

La traduction des contraintes au niveau des caractéristiques de la pièce se fait ensuite avec les conditions : sur la Figure 50, chaque flèche en pointillés représente la contrainte de respect d'une condition. Toutes les conditions d'élimination qui se trouvent sur le chemin des

transformations imposées doivent être respectées par les caractéristiques de la pièce afin que ces transformations ne soient pas éliminées. C'est ainsi que l'on peut déterminer précisément quelles sont les contraintes à respecter au niveau de la pièce ou bien quelles sont les caractéristiques de la pièce qui ne correspondent pas par rapport aux transformations imposées.

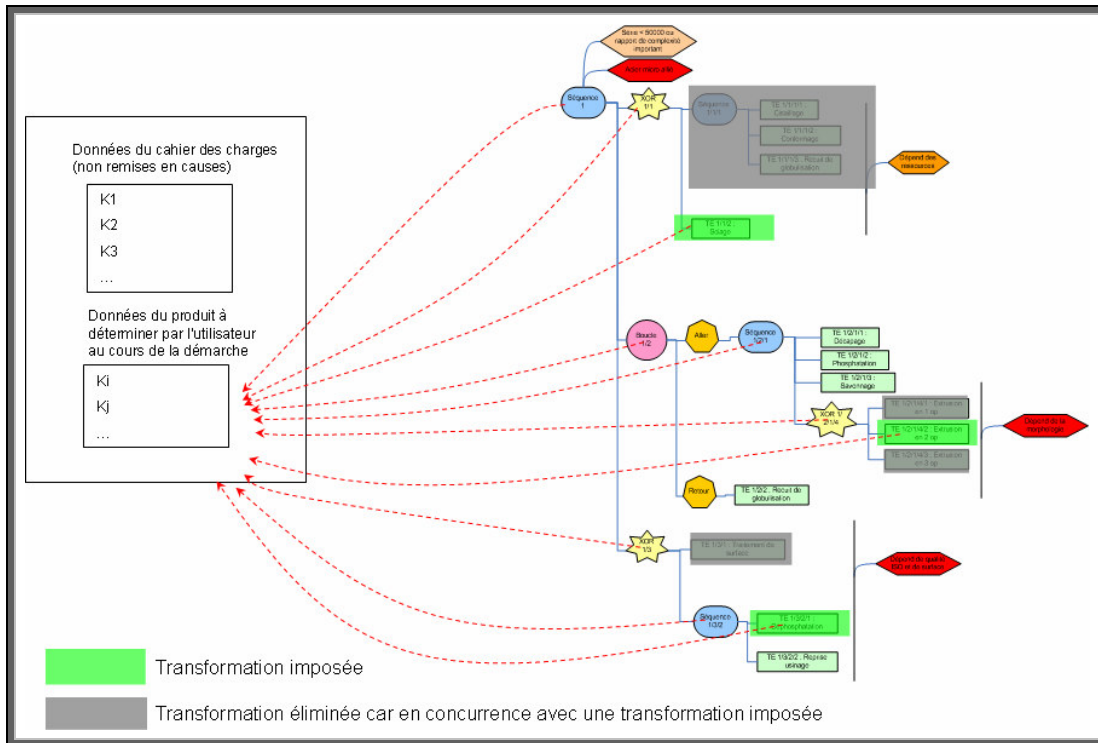


Figure 50 : Répercussion des contraintes imposées sur le processus de fabrication

Remarque 1 : sur l'utilisation des conditions

Comme indiqué précédemment, les conditions d'élimination et les conditions de préconisation peuvent être de plusieurs types (limites des procédés, inutilité, savoir-faire d'experts,...). Ces différenciations permettent plusieurs niveaux d'exploitation des schémas de processus de fabrication en ne considérant que certains types de conditions sans tenir compte des autres : il est ainsi possible d'effectuer le traitement uniquement avec les conditions d'élimination se rapportant aux limites des procédés ou bien aux conditions de préconisation provenant du savoir-faire d'expert. Dans ces cas, les autres conditions ne sont pas évaluées et n'interviennent donc pas au niveau de l'élagage ni au niveau de la répercussion des contraintes.

Remarque 2 : raisonnement appliqué

Le choix dans l'exploitation de cette formalisation s'est naturellement porté vers un raisonnement qui reposait sur l'hypothèse suivante : une condition non évaluable (car un paramètre faisant partie de cette condition n'a pas été renseigné par exemple) ne sera pas considérée dans le traitement : il ne pourra y avoir d'élimination due à cette condition lors de l'élagage. Cette hypothèse est appelée communément « hypothèse du monde ouvert » : si une assertion ne peut pas être prouvée comme étant vraie, elle n'est pas automatiquement considérée fausse.

Remarque 3 : métadonnées

Des métadonnées qui ne sont pas exploitées par le raisonnement de base peuvent être intégrées à ce formalisme : il peut s'agir par exemple de commentaires pour améliorer la compréhension d'un schéma ou bien d'indices de fiabilité que l'on peut lier aux conditions dans le but de fournir par la suite un indicateur global de fiabilité pour le schéma ou bien pour les processus de fabrication haut niveau qui en seront déduits.

Remarque 4 : vérification de cohérence

La vérification de cohérence entre un processus de fabrication haut niveau et un ensemble de caractéristiques de la pièce consiste à vérifier que le processus de fabrication haut niveau fait partie de ceux qui sont déduits du schéma élagué (l'élagage étant fait avec les caractéristiques de la pièce).

3.5.3 Conclusion sur la seconde proposition de formalisation

Voici un abrégé des termes que nous avons adoptés et utilisés pour décrire cette deuxième formalisation :

Transformation : représente un élément constitutif d'un schéma de processus de fabrication. Une transformation peut être une transformation séquence, une transformation choix, une transformation boucle ou bien une transformation élémentaire.

Transformation séquence : représente une transformation composée de plusieurs transformations, dans un ordre défini.

Transformation choix : représente plusieurs possibilités de transformation. Le choix entre ces différentes possibilités est exclusif.

Transformation boucle : représente une transformation qui peut être répétée.

Condition : Règle contextuelle pouvant être liée à une transformation et qui fait intervenir les paramètres de la pièce. Cette règle indique dans quel cas la transformation est possible/impossible.

Processus de fabrication avec degrés de liberté : représenté avec une transformation (qui peut être décomposée en d'autres transformations s'il s'agit d'une transformation séquence, boucle ou choix). Il peut être vu comme la factorisation de plusieurs processus de fabrication haut niveau. Il n'y a pas de condition dans un processus de fabrication avec degrés de liberté.

Schéma de processus de fabrication : il s'agit d'un processus de fabrication avec degrés de liberté pour lequel chacune des transformations peut être liée une condition.

Synthétiquement, un schéma de processus de fabrication est un processus de fabrication avec des degrés de liberté et des règles contextuelles appliquées aux transformations. Ces règles sont appelées des conditions, elles sont reliées aux paramètres de la pièce et permettent l'élimination ou la préconisation d'une transformation lors du traitement. La condition qui est définie au niveau de la transformation racine d'un schéma de processus de fabrication rassemble les critères qui doivent être respectés pour l'application de ce schéma de processus de fabrication. C'est ici que l'on fait un rapprochement avec la formalisation précédente : cette condition sur la transformation racine est le pendant de la classe définie de pièce, la famille étant représentée avec un unique schéma de processus de fabrication. En quelque sorte, cette condition sur la racine constitue une classification de pièce dans une famille de pièces associée à un schéma de processus de fabrication.

Un exemple de schéma de processus de fabrication plus complet est présenté sur la Figure 51 : il s'agit d'un schéma axé sur le procédé d'extrusion. Ce schéma a été construit à partir d'un entretien avec un expert du CETIM.

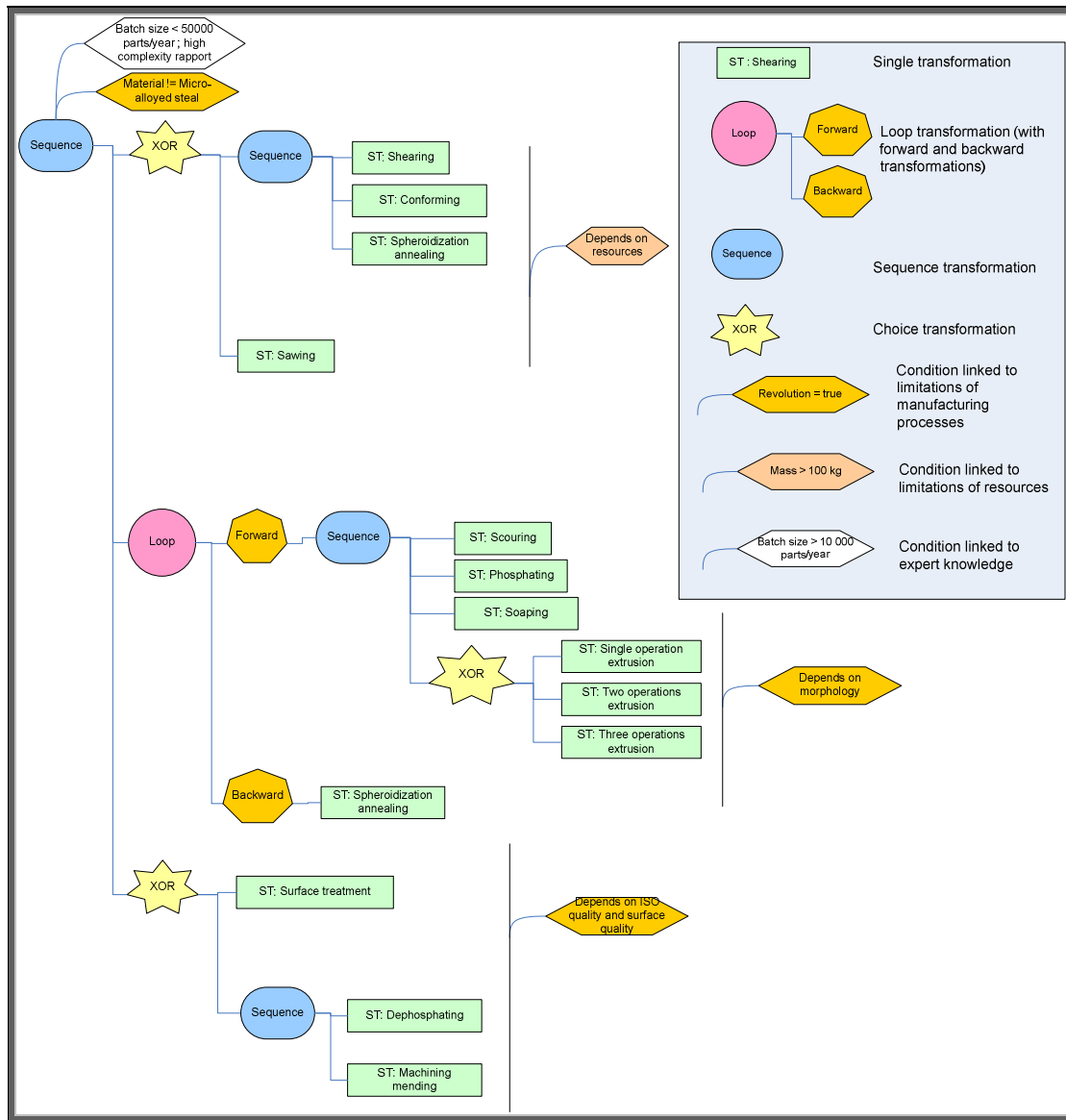


Figure 51 : Exemple de schéma de processus de fabrication [Thibault 2007b]

Par rapport aux tâches requises pour l’outil support, le Tableau 8 récapitule la prise en charge par cette formalisation.

Tableau 8 : Evaluation de la seconde proposition de formalisation

Tâche	Prise en charge
Sélection de possibilités grâce aux paramètres de sélection et visualisation des conséquences de cette sélection	Elagage des schémas de processus de fabrication (Figure 47 et Figure 48)
Déduction de l’ensemble des processus de fabrication haut niveau sélectionnés	Déduction par développements des schémas en processus de fabrication haut niveau (Figure 49)
Détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication	Répercussion des contraintes (Figure 50)
Vérification de la cohérence des solutions	Vérification de la présence du processus de fabrication parmi ceux déduits du schéma élagué

Les difficultés de cohérence d'un processus de fabrication peuvent être évitées à condition que le schéma soit construit en en tenant compte. Construire un schéma tenant compte de transformations incompatibles (qui ne doivent pas se trouver dans le même processus de fabrication haut niveau) ou dépendantes (qui doivent se trouver toujours ensemble) est possible comme le montre la démonstration donnée en annexe 4.

La difficulté qui s'impose pour la mise en œuvre de cette formalisation est de trouver la bonne taille d'un schéma de processus de fabrication :

- Des schémas trop complets conduisent à une perte de lisibilité, de facilité d'édition. Il serait en théorie pensable d'exprimer en effet tous les processus de fabrication possibles dans un schéma, mais cela n'aurait aucun intérêt car on perdrait toute la clarté de l'approche.
- des schémas courts vont amener cette fois à une prolifération de ceux-ci si l'on souhaite couvrir un large domaine de possibilité.

3.6 Entretiens avec des experts

La première formalisation a été originellement conçue avant un quelconque entretien, en s'inspirant de la littérature et notamment à partir d'une classification présentée dans [Adetief 1974]. Dans ce document sont récapitulées plusieurs familles de pièces qui présentent des morphologies proches. Pour chacune de ces familles sont précisées différentes recommandations pour le processus de fabrication. Un exemple de définition d'une famille est donné sur la Figure 52.

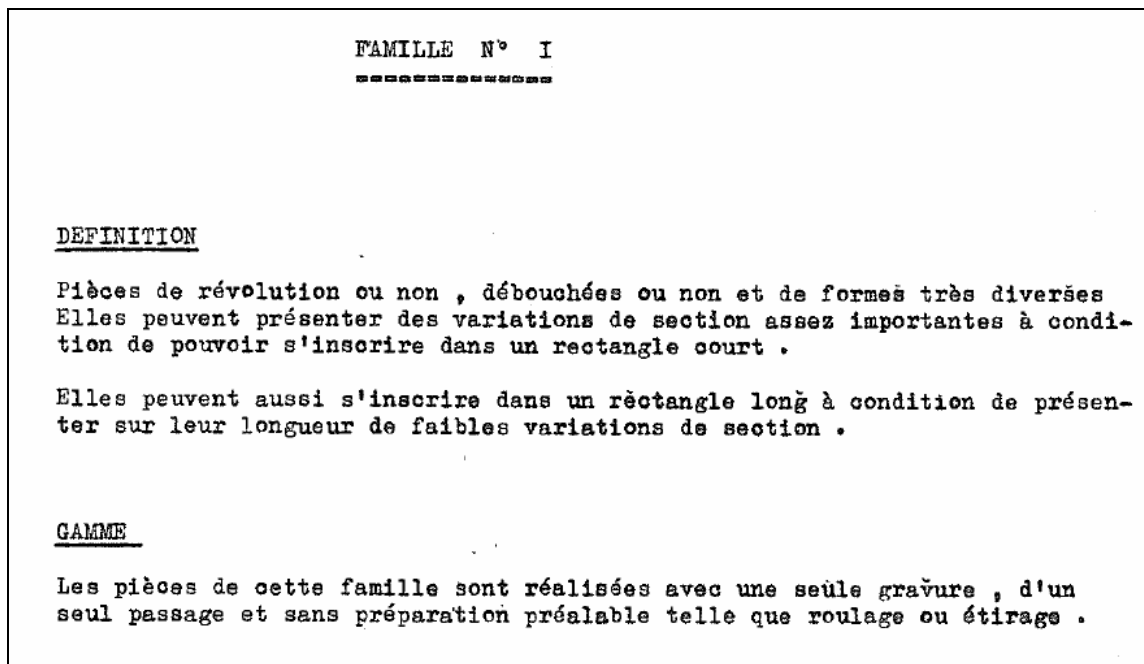


Figure 52 : Exemple de définition d'une famille [Adetief 1974]

A partir de ce document, plusieurs besoins en connaissances ont pu être relevés pour mettre en œuvre la première proposition de formalisation :

Côté pièce (& production) :

- Des caractéristiques indépendantes pouvant décrire une pièce et qui seront utilisées pour la classification dans des familles de pièces.
- Des familles de pièces se basant sur les caractéristiques précédentes.

Liaison pièce/procédé :

- Pour chaque famille de pièces, un schéma d'alternative de gamme possible
- Pour chaque étape décrite par ce schéma : des spécifications précises portant sur les caractéristiques des procédés pouvant réaliser cette étape.
- Des règles de bonne construction d'un processus de fabrication (pour éviter les processus de fabrication comportant des incompatibilités entre procédés par exemple)

Côté procédé :

- Des caractéristiques indépendantes pouvant décrire un procédé et qui seront utilisées par les spécifications dans les schémas d'alternative de gamme
- Des descriptions de procédés selon les caractéristiques précédentes.

Afin de répondre à ces besoins, un déroulement type d'entretien a été développé et expérimenté en réel. Ce déroulement était composé de trois parties :

1^{ère} partie : Caractérisation de la description d'une pièce et d'un procédé

- *Recensement des paramètres susceptibles de discriminer les pièces en familles de pièces*
- *Recensement des paramètres susceptibles de classifier les procédés*

2^{ème} partie : Récupération des schémas d'alternative de gamme pour chaque famille de pièces

- *Identification des familles (en prenant pour base le document [Adetief 1974])*
- *Présentation de pièces de chaque famille et recensement pour chacune de toutes les gammes possibles*
- *A partir des différentes gammes, généralisation en un ou plusieurs schémas d'alternative de gamme*

3^{ème} partie : Récupération des procédés et des règles de bonne construction d'un processus de fabrication

- *Recensement de tous les procédés de forge ou associés à la forge*
- *Vérification méthodique des liens de compatibilité ou de dépendance entre ces procédés*
- *Génération aléatoire de gammes en fonction des règles établies et vérification de leur cohérence*

Le premier entretien a révélé que le déroulement ainsi que les ambitions présentées n'étaient pas adaptés aux connaissances du domaine. En effet le repérage des familles de pièce n'est pas aisé et pour plusieurs de ces familles (en partant sur la base du document [Adetief 1974]), on se rend compte que les processus de fabrication ont sensiblement la même forme. Ceci est dû au fait que les procédés principaux ne sont pas nombreux, et l'on ne peut en réalité repérer qu'un petit nombre de combinaisons mises en œuvre usuellement. Autrement dit, il est par exemple plus aisé de montrer les compatibilités entre procédés plutôt que de recenser les incompatibilités. Ainsi, des schémas regroupant des possibilités de processus de fabrication tels que celui présenté sur la Figure 53 ont été récupérés plutôt qu'une liste d'incompatibilités.

Le schéma de la Figure 53 a été construit en admettant que le procédé de forge utilisé principalement serait celui de l'estampage. Ainsi l'opération centrale est : « Estampage en n

opérations ». On voit sur ce schéma les prémisses de la formalisation par schéma de processus de fabrication : il y a des choix simples comme l'opération de débitage qui se fait soit en cisailage soit en sciage, mais il y a aussi un choix plus compliqué qui implique deux séquences d'opérations : {ébavurage à chaud, débouchage à chaud, traitement thermique} ou bien {traitement thermique, ébavurage à froid, débouchage à froid}. On remarque également la présence d'une boucle pour pouvoir éventuellement refaire des passes d'estampage après avoir chauffé la pièce une nouvelle fois. Enfin ce schéma nous montre qu'il y a des degrés de liberté non seulement avec les choix et la boucle mais aussi avec les opérations facultatives et le nombre de passes d'estampage. Pour pouvoir prendre des décisions sur ces degrés de liberté, l'idée de définir des conditions a été avancée. Tout ceci a conduit à la construction de la seconde formalisation en schéma de processus de fabrication.

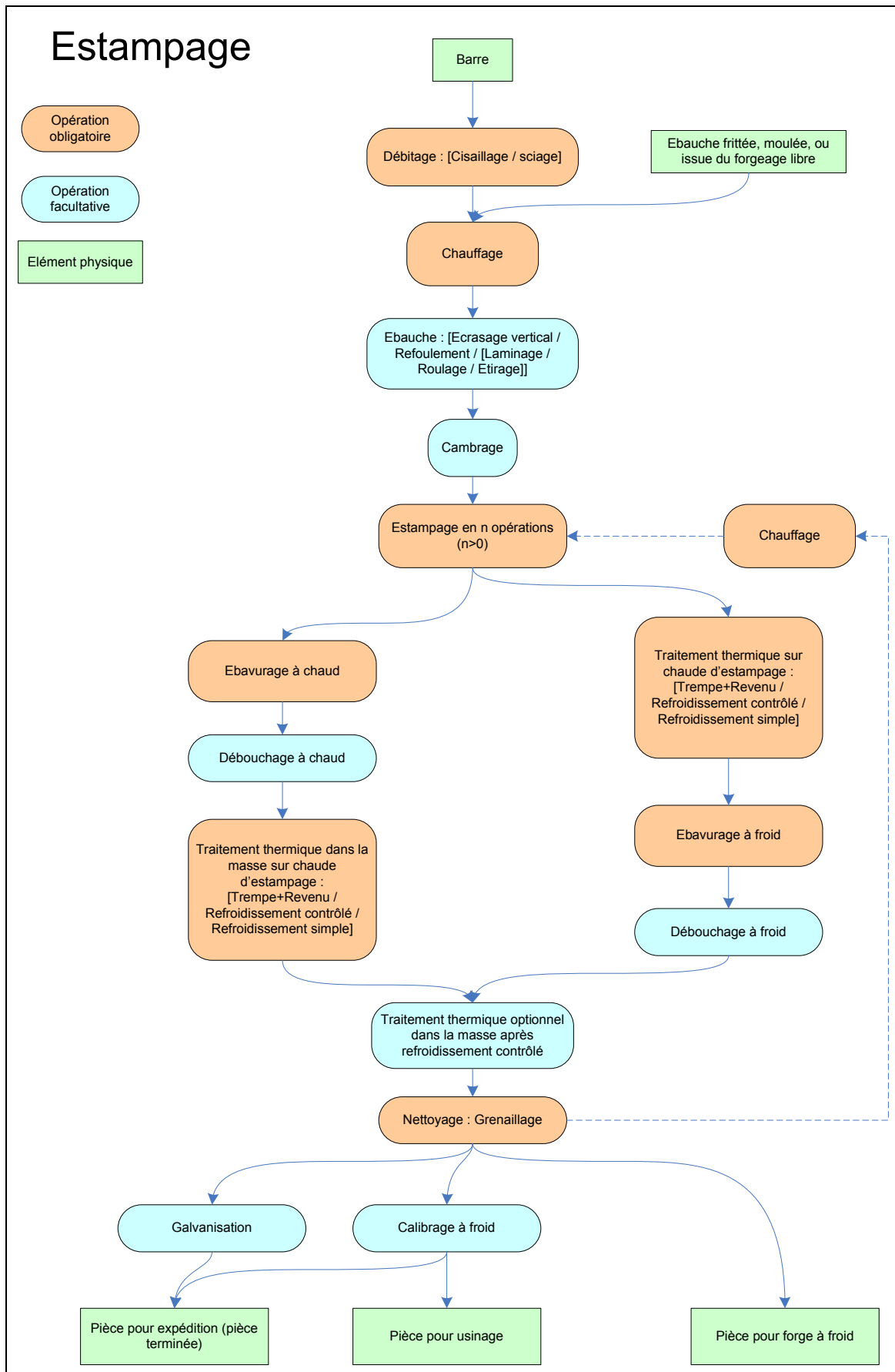


Figure 53 : Schéma récupéré au cours des premiers entretiens

Nous nous sommes ainsi basé sur les connaissances récupérables au cours des entretiens pour formuler la deuxième proposition de formalisation.

Les nouveaux besoins en connaissance pour mettre en œuvre la formalisation par schéma de processus de fabrication étaient les suivants :

Côté pièce (& production) :

- Des caractéristiques indépendantes pouvant décrire une pièce et qui seront utilisées dans les conditions des schémas de processus de fabrication

Liaison pièce/processus de fabrication :

- Les schémas de processus de fabrication, la construction de ces schémas se faisant autour de l'utilisation d'un procédé principal (par exemple : extrusion, estampage, forge à mi-chaud)

Côté procédé :

- La liste des procédés utilisables dans les transformations élémentaires

Le second déroulement proposé pour un entretien s'est infléchi en ce sens :

- *Identification des paramètres des pièces ayant une influence possible sur le processus de fabrication (et qui pourront donc être utilisés dans les conditions des schémas)*
- *Recensement de la liste des procédés utilisables*
- *Construction de schémas de processus de fabrication sans les conditions*
- *Identifier les conditions sur chacune des transformations d'une part ; vérifier l'influence de chacun des paramètres de la pièce sur chacune des transformations d'autre part*

Ce déroulement a été concrétisé lors d'un entretien avec un expert et a permis la construction d'un schéma de processus de fabrication dont la structure est présentée sur la Figure 54. Ce schéma de processus de fabrication est construit autour de l'utilisation du procédé d'estampage. Il est constitué d'une séquence principale faisant intervenir la transformation élémentaire centrale « Estampage de finition ». Lors de la construction de ce schéma, il a été nécessaire de considérer la création d'un procédé appelé « ProcédéVide » afin d'exprimer l'aspect facultatif de certaines transformations (en effet les paramètres renseignés ne permettent pas toujours de discriminer le fait de mettre en œuvre ou non une transformation facultative, dans ce cas les deux possibilités doivent subsister). Si l'on développe ce schéma non élagué, cela donne plus de 35 000 processus de fabrication possibles. Même si l'on élague quelques branches du schéma, le nombre de processus de fabrication possibles peut rester important. Il est bien évident que l'affichage de tous ces processus de fabrication ne présente aucun intérêt. En revanche il est possible d'élaguer un schéma de processus de fabrication au fur et à mesure que les paramètres de la pièce sont renseignés, et l'affichage du schéma élagué peut se révéler intéressant pour l'utilisateur.

Note : pour pouvoir repérer les transformations dans l'énoncé des conditions, celles-ci ont été repérées en indiquant leur chemin de la façon suivante :

- pour la transformation racine : 1
- pour les transformations suivantes, l'adresse de la transformation parente est reprise suivie d'un caractère de séparation « / » et du numéro d'ordre de la transformation, par exemple 1/2 indiquera la transformation « chauffage » (deuxième transformation dont le parent est la transformation 1).

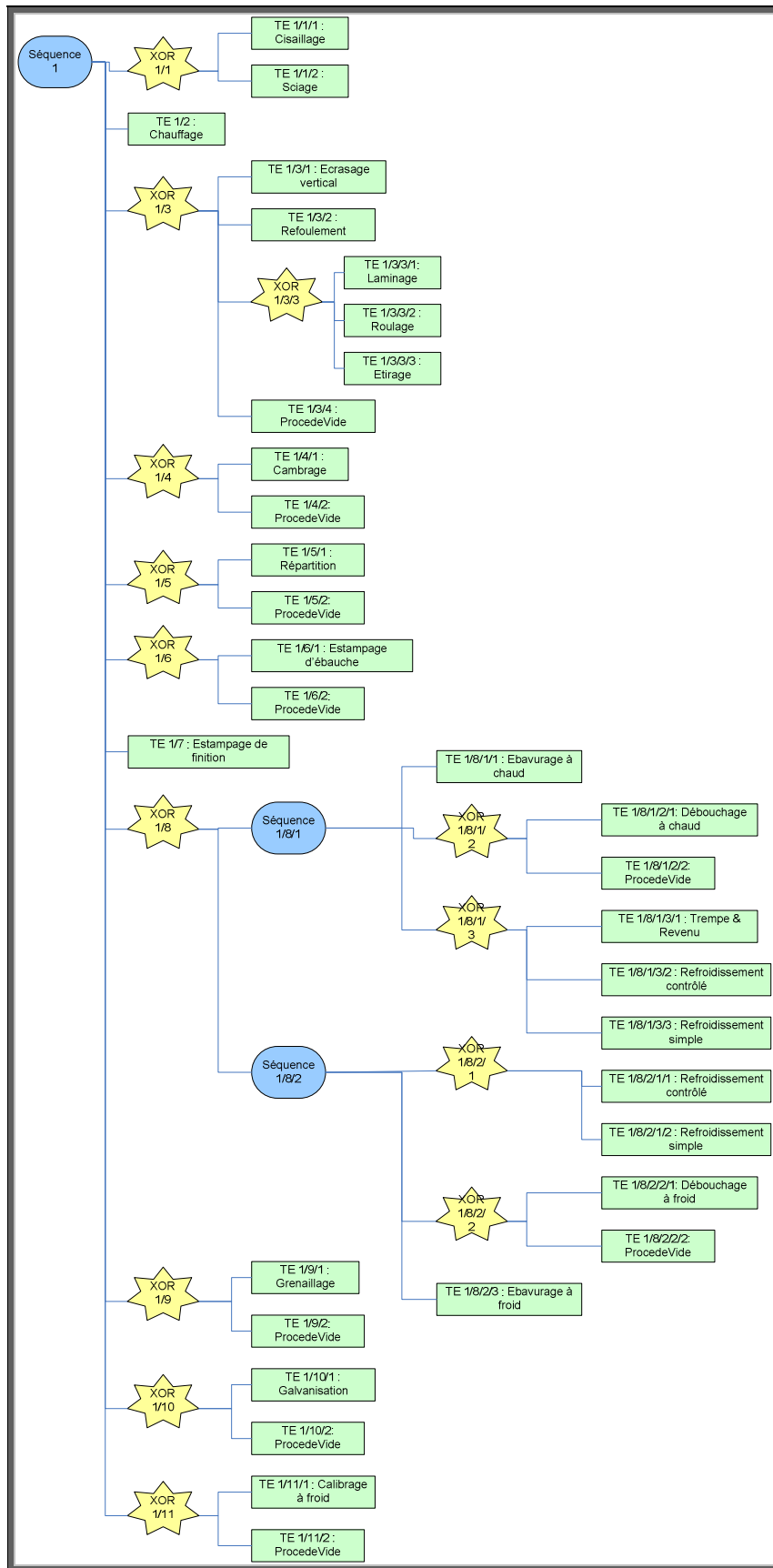


Figure 54 : Schéma de processus de fabrication estampage

Les conditions ont été formalisées en passant en revue chaque paramètre selon quatre aspects :

- le type du paramètre (quatre types ont été définis : liste ordonnée, liste non ordonnée, réel, entier)
- les valeurs possibles du paramètre : dans le cas d'une liste ordonnée ou d'une liste non ordonnée, il s'agit de la liste des valeurs ; dans le cas des types réel et entier, il s'agit d'une liste de plages de réels ou d'entiers.
- les transformations sur lesquelles le paramètre peut avoir un impact
- les conditions proprement dites liées à ce paramètre.

Voici un exemple d'un paramètre se rapportant au schéma de processus de fabrication de la Figure 54 :

Paramètre : *Classe morphologique* (liste non ordonnée)









Remarque : classement morphologique fourni par le CETIM sur la base du classement morphologique de [ASM 2005].

Valeurs possibles : 29 classes morphologiques identifiées par un nombre à trois chiffres

Impact sur les transformations : 1/3 (Séquence préparation) ; Ecrasage vertical ; Refoulement ; 1/3/3 (XOR Laminage-Roulage-Etirage) ; Laminage ; Roulage ; Etirage ; Cambrage ; Répartition ; Estampage d'ébauche ; Débouchage à chaud ; 1/8/2 (Séquence Ebavurage à froid)

Conditions : Dans le Tableau 9, les X représentent une élimination de la transformation pour la classe morphologique concernée.

Tableau 9 : Elimination des transformations selon le paramètre « Classe morphologique »

		classe morphologique								
		101	102	103	104	105	211	221	212	
		1 Forme simple	2 Avec élément secondaire d'un côté	3 Avec 2 éléments secondaires	4 Avec élément secondaire circulaire	5 2 + 4	1 Forme simple	1 Forme simple	2 Avec un moyeu	
										
Transformation	1.3	Séquence préparation								
	1.3.1	Ecrasage vertical								
	1.3.2	X	X	X	X	X	X	X	X	
	1.3.3	XOR Laminage-Roulage-Etirage								
	1.3.3.1	Laminage								
	1.3.3.2	Roulage								
	1.3.3.3	Etirage								
	1.4.1	X	X	X	X	X	X	X	X	
	1.5.1	Répartition								
	1.6.1	Estampage d'ébauche								
	1.8.1.2.1	Débouchage à chaud								
1.8.2	Séquence Ebavurage à froid									

Les comptes-rendus d'entretien qui récapitulent les connaissances sont rassemblés en annexe 3.

3.7 Conclusion

La première proposition de formalisation, inspirée par une approche de technologie de groupe est centrée sur la pièce : on se base sur l'hypothèse que les pièces qui se ressemblent amènent à la définition de processus de fabrication qui se révèlent être proches. Cette hypothèse peut être considérée comme pertinente, cependant il est tout à fait possible d'imaginer deux pièces bien différentes ayant un processus de fabrication relativement similaire. Plutôt que de multiplier les familles de pièce, il est peut-être préférable de factoriser les conditions d'application au niveau des processus de fabrication. Ainsi, l'idée avec la

deuxième proposition est de centrer les familles, non pas sur des critères de ressemblance de pièce, mais sur des critères de ressemblance de processus de fabrication. Une famille de pièces se résume alors à ce que nous avons appelé un schéma de processus de fabrication.

Le Tableau 10 présente un comparatif des deux propositions avancées.

Tableau 10 : Comparaison des deux propositions de formalisation

	Première proposition	Seconde proposition
Formalisation	Technologie de groupe + ontologie => familles de pièce avec schémas d'alternative de gamme	Technologie de groupe + règles => schémas de processus de fabrication
Système d'interprétation	Multi classification	Algorithmes de parcours d'arbre : élagage du schéma, déduction de processus de fabrication haut niveau, répercussion des contraintes.
Prise en charge des tâches requises pour l'outil support	La détermination des contraintes sur la pièce dues aux choix faits sur le processus de fabrication n'est pas assurée	Complet
Récupération des connaissances	Sous forme de familles de pièces : document [Adetief 1974], mais difficile en entretien avec des experts.	Sous forme de schéma de processus de fabrication : plus aisée car semble mieux correspondre à la perception des experts du métier.

Le principal avantage que l'on peut observer pour la première formalisation est la capacité à prendre en compte de nouveaux procédés automatiquement dans le raisonnement une fois que ceux-ci ont été décrits. Cet avantage est perdu avec la deuxième formalisation au profit d'une lisibilité et d'une compréhension plus aisée du fonctionnement.

Remarquons d'une façon générale que la fiabilité des résultats obtenus en sortie dépend certes de la formalisation et de son traitement associé mais aussi de ce qui est donné en entrée. Autrement dit les processus de fabrication haut niveau qui résultent de chacune des deux formalisations sont déclarés possibles par rapport aux paramètres qui ont été renseignés et aux connaissances qui ont été formalisées.

La description d'une implémentation possible pour chacune des deux approches est développée dans le chapitre 4.

Chapitre 4 : Développement d'un démonstrateur pour le support de la démarche

Les deux formalisations proposées dans le chapitre précédent ont été implémentées chacune en une maquette pour illustrer leurs fonctionnements. La description de ces deux implémentations est fournie ici. L'une repose sur l'opérationnalisation d'une ontologie associée à un traitement par classification (utilisation d'un éditeur d'ontologie et d'un raisonneur), tandis que l'autre a été développée de façon plus algorithmique dans un environnement de programmation objet. L'approche jugée la plus opérationnelle (par schéma de processus de fabrication) a fait l'objet d'un développement plus avancé et bénéficie d'une description plus complète en fin de chapitre.

4.1 Implémentation de la première formalisation : ontologie et multi-classification

Comme nous l'avons vu précédemment, la première approche est basée sur une structuration en familles de pièces décrites dans une ontologie. Ces familles sont composées d'une part d'un ensemble de spécifications sur des caractéristiques de pièce, et d'autre part d'un ensemble de spécifications sur des caractéristiques de processus de fabrication (le schéma d'alternative de gamme). L'idée est d'effectuer une double classification à l'issue de laquelle il est possible de déterminer quels sont les procédés utilisables pour chacune des étapes du processus de fabrication correspondant à une pièce classifiée.

L'implémentation de cette formalisation doit pouvoir répondre aux besoins suivants :

- décrire les pièces à étudier
- décrire les procédés utilisables
- décrire les familles de pièce (spécifications sur la pièce, spécifications sur le processus de fabrication)
- effectuer la double classification
- effectuer la déduction des processus de fabrication
- effectuer la vérification de cohérence entre une pièce et un processus de fabrication.

Le développement d'un programme qui a pour but de faciliter les tâches d'édition et de classification a été conduit pour répondre à ces besoins.

Le choix du langage de l'ontologie s'est porté sur OWL étant donné qu'il s'agit du seul langage standardisé par le W3C (www.w3c.org) depuis février 2004, et qu'il existe des éditeurs performants pour ce langage. L'éditeur *Protégé* (<http://protege.stanford.edu>) a été utilisé pour développer l'ontologie. Cet éditeur constitue également le support du programme associé. Enfin, le raisonneur utilisé pour les classifications est *Racer* (www.racer-systems.com) du fait de l'interfaçage simple possible entre *Protégé* et ce raisonneur. Une description claire du langage OWL et de ses applications possibles est donnée dans [Antoniou 2004]. En outre, le guide élaboré par Noy [Noy 2004] permet une bonne introduction à la création et l'utilisation d'une ontologie OWL.

4.1.1 Développement d'une ontologie OWL

Le développement d'une ontologie s'articule autour de la définition :

- des concepts

- des propriétés
- des relations entre les concepts (relations d'héritage, de disjonction)
- des restrictions sur les propriétés (type, cardinalité)
- des caractéristiques des propriétés (transitive, symétrique, ...)
- des individus

A partir de cette définition, deux types de raisonnements sont possibles : la vérification de cohérence de l'ontologie et la classification.

Il existe principalement deux types d'utilisation d'une ontologie OWL :

- une ontologie peut être utilisée en tant que langage d'échange de données (avec la définition des interfaces des services et des agents)
- une ontologie peut être utilisée en tant que terminologie et modèle de connaissances.

OWL DL (Description Logic) est un sous-ensemble du langage OWL (Full) qui est optimisé pour le raisonnement et la modélisation de connaissances. OWL DL sera donc utilisé dans le développement de notre ontologie.

Nous allons à présent détailler les différents éléments utilisés lors de l'élaboration d'une ontologie. Les explications seront agrémentées d'exemples par rapport à l'ontologie que nous avons développée.

Les Individus

Les individus représentent les objets du domaine considéré. Deux dénominations peuvent désigner le même individu. La Figure 55 présente certains individus définis dans l'ontologie développée.

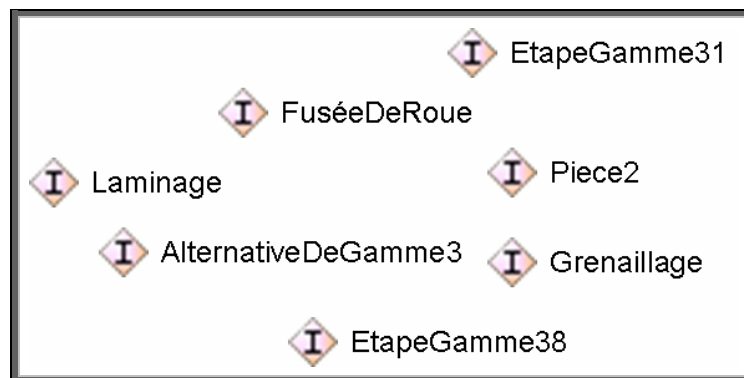




Figure 55 : Individus

Les Propriétés

Il existe deux sortes de propriétés :

- les propriétés Objet (ou ObjectProperties) 
- les propriétés Donnée (DatatypeProperties) 

Les propriétés Donnée lient les individus à des valeurs simples (entiers, réels, chaînes de caractères, booléens,...). Par exemple, comme on peut l'observer sur la Figure 56, l'individu *unParametreRapportDiametreHauteur* est lié à la valeur *0,53* par la propriété Donnée : *aPourValeur*. La représentation de la Figure 6 en langage courant est la suivante :

« la pièce nommée *Piece2* possède une caractéristique rapport diamètre sur hauteur qui a une valeur égale à 0,53 ».

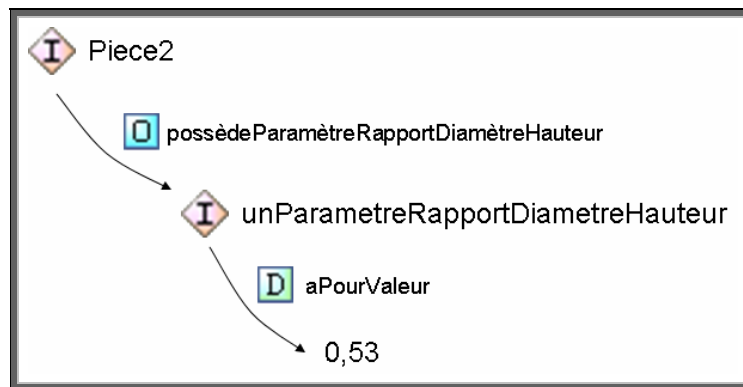


Figure 56 : Propriété Donnée

Les propriétés Objet permettent de mettre en relation les individus entre eux (il s'agit d'une référence). Sur la Figure 57, la propriété Objet *possèdeEtapeGamme* relie l'individu *AlternativeDeGamme3* à l'individu *EtapeGamme38*. De même la propriété Objet *utiliseProcédé* relie l'individu *EtapeGamme38* à l'individu *Laminage*.

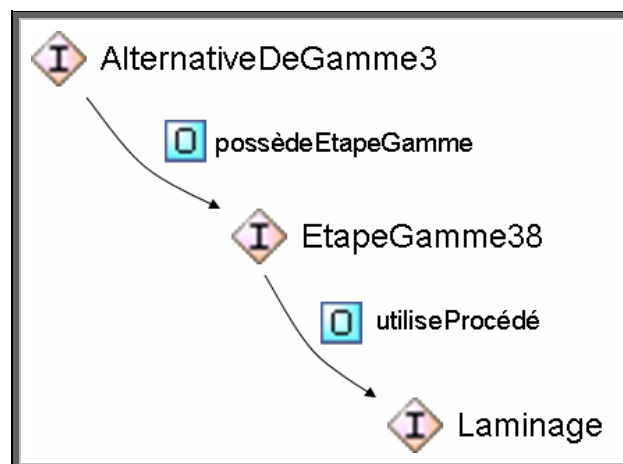


Figure 57 : Propriétés Objet

Les propriétés Objet peuvent avoir des propriétés inverses : dans ce cas elles représentent des relations bidirectionnelles et lorsque l'on crée la relation d'un individu A vers un individu B, la relation impliquant la propriété inverse est également créée. Sur la Figure 58, la propriété *estIncompatibleAvant* est l'inverse de la propriété *estIncompatibleAprès*. Le fait de créer la relation de *Trempe* à *MiseEnForme* par la propriété *estIncompatibleAvant* crée en même temps la relation de *MiseEnForme* à *Trempe* avec la propriété inverse.

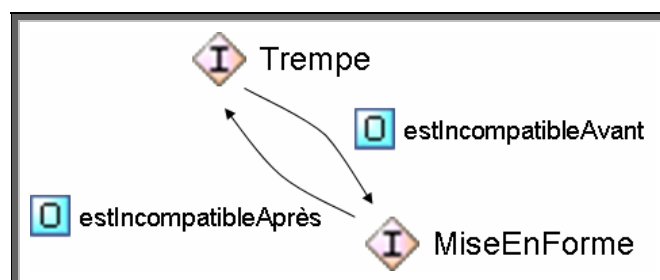


Figure 58 : Propriétés inverses

Les propriétés Objet peuvent être symétriques : dans ce cas cela signifie que la propriété et son inverse sont identiques (Figure 59).

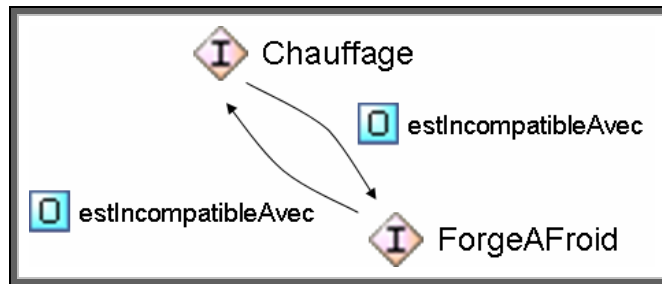


Figure 59 : Propriété symétrique

Les propriétés Objet peuvent également être définies comme transitives : Si une propriété P lie un individu A à un individu B et l'individu B à un individu C, alors cette propriété P lie également l'individu A à l'individu C. Ceci est souvent utilisé pour représenter les relations de paronymie entre les individus. L'ontologie développée n'utilise pas cette possibilité.

Les Classes

Une classe définit un ensemble d'individus ayant des caractéristiques communes. Les individus sont les instances d'au moins une classe (le multi-héritage est possible : ils peuvent être instance de plusieurs classes). Sur la Figure 60, deux classes sont définies : la classe *Procédé* qui regroupe les individus *Grenaillage* et *Laminage*, et la classe *Pièce* qui rassemble les individus *Piece2* et *FuséeDeRoue*.

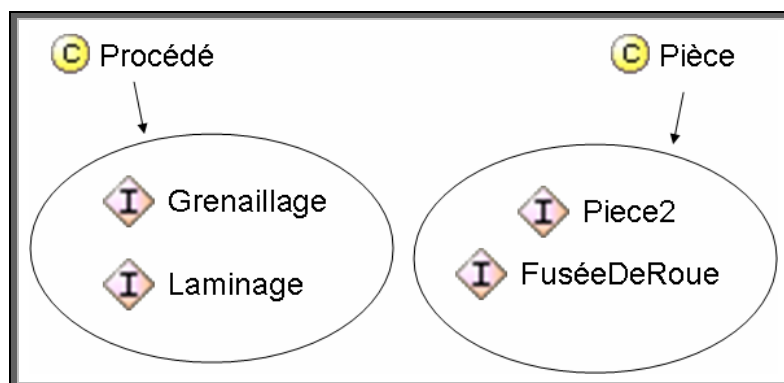


Figure 60 : Classes

Domaine et Valeurs possibles

Lorsque l'on définit une propriété, il peut être intéressant de définir à quels individus elle peut s'appliquer (le domaine ou Domain) et ce qu'elle peut prendre comme valeur (plage nommée Range).

Ainsi pour une relation entre deux individus, l'origine de la relation doit forcément être un individu instance d'une classe du domaine, tandis que l'aboutissement de la relation doit être un individu instance d'une classe du Range.

Domain et Range peuvent spécifier plusieurs classes ou bien être indéfinis. Dans le cas où les propriétés peuvent être appliquées à n'importe quelle instance, le Domain sera indéfini.

La Figure 61 présente le cas de la propriété *possèdeEtapeGamme* dont le domaine est constitué de la classe *AlternativeDeGamme* et le Range est constitué de la classe *Pièce*. Les deux instances de la classe *EtapeGamme* possèdent chacune une propriété Donnée avec un entier afin de définir le séquençement de la gamme. L'instance de la classe *AlternativeDeGamme* pourrait posséder plus de relations avec des instances de la classe *EtapeGamme* mais pour des raisons de clarté, nous n'en avons fait figurer que deux.

En langage courant, la Figure 61 exprime le fait que : l'alternative de gamme nommée *AlternativeDeGamme3* possède deux étapes dont la première est nommée *EtapeGamme38* (car son numéro d'ordre est : 1) et la deuxième est nommée *EtapeGamme31* (qui a pour numéro d'ordre : 2).

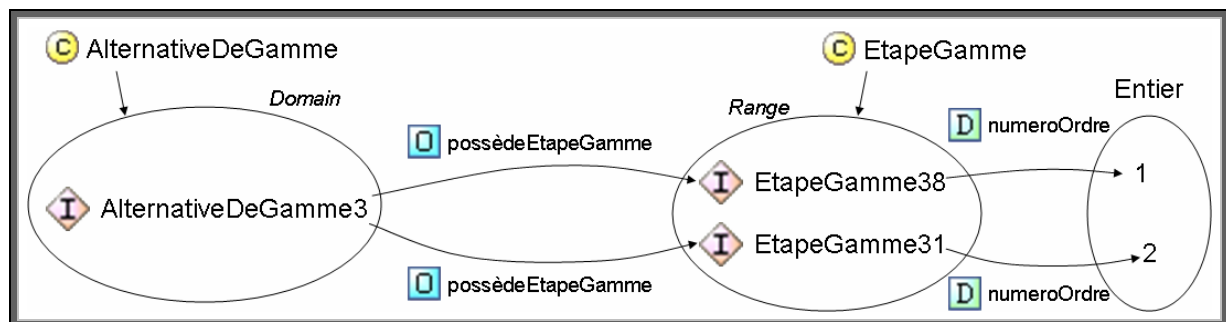


Figure 61 : Domain et Range

Relation de subsomption

La relation de subsomption est à la base de ce que l'on appelle une taxinomie. Il s'agit de la relation « est-un » qui peut s'exprimer entre deux classes. Les classes d'une ontologie peuvent être ainsi organisées en une hiérarchie taxinomique dont la racine est la classe *Thing* à partir de laquelle n'importe quelle classe peut dériver. Les instances directes de sous-classes sont alors instances (indirectes) de super-classes. Par exemple, sur la Figure 62 qui montre les classes principales de l'ontologie développée, toute instance de la classe *Pièce* sera également instance de la classe *Thing*.

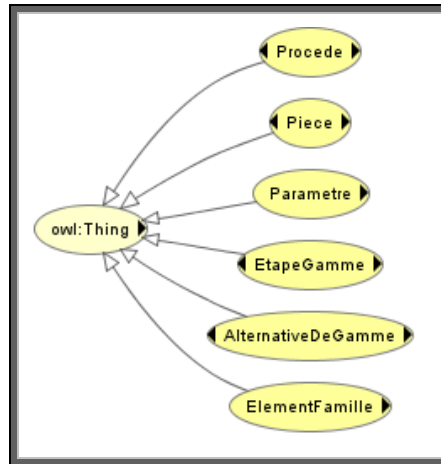


Figure 62 : Taxinomie des classes principales

La Figure 63 détaille par exemple la taxinomie à partir de la classe *ElementFamille* qui permet de représenter la famille de pièces : chaque famille de pièces possède sa propre classe nommée par exemple *ElementFamillePiece1_1* et se compose de quatre sous-classes dont :

- une pour représenter les spécifications sur la pièce (*PieceFamille1_1*)
- les trois autres pour représenter les spécifications sur le processus de fabrication.

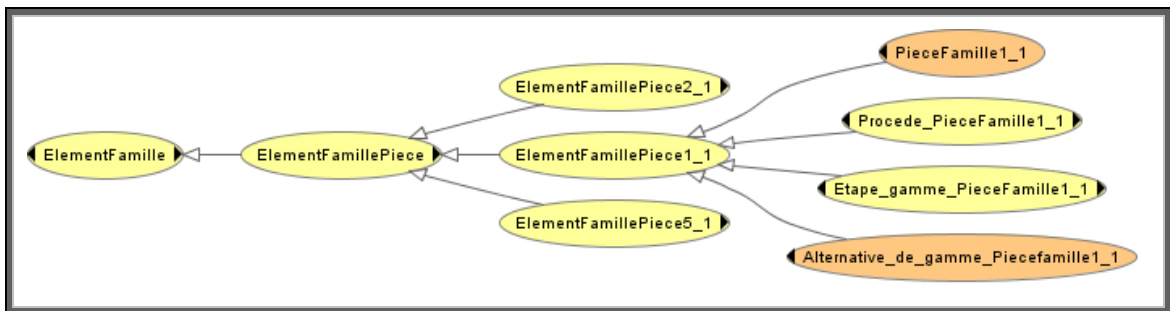


Figure 63 : Taxinomie à partir de la classe ElementFamille

Relation de disjonction

Toutes les classes peuvent potentiellement se recouvrir partiellement : cela signifie que certains individus peuvent être instances de plusieurs classes. Cependant, certaines classes ne peuvent partager d'instances, et il est utile notamment pour le raisonnement de les déclarer disjointes. Par exemple dans notre cas, les classes *Procédé* et *Pièce* sont disjointes car nous considérons qu'un individu instance de *Procédé* ne peut être également instance de *Pièce* et inversement.

Description des classes

Les classes peuvent être décrites au moyen de leurs caractéristiques logiques. Les descriptions logiques forment ce que l'on appelle des « classes anonymes ».

Exemple : les individus instances de *Pièce* et possédant une relation de la propriété *possèdeCambrage* avec un individu instance de *CambragePrésent*.

Ces descriptions définissent la signification des classes. Les expressions utilisées sont en fait des contraintes portées sur les valeurs des propriétés. Ces contraintes sont appelées des « restrictions ».

Les restrictions peuvent être associées à une classe en étant déclarées :

- comme conditions nécessaires : on parle dans ce cas de **classe primitive**.
- comme conditions nécessaires et suffisantes (ce qui rend la classification possible) : on parle de **classe définie**.

C'est grâce à ces restrictions qu'il est possible d'effectuer des tâches de raisonnement sur une ontologie.

Restrictions

Il existe deux grands ensembles de restrictions :

- les restrictions sur les valeurs des propriétés
- les restrictions sur les cardinalités des propriétés (le nombre de relations que peut entretenir une instance avec une propriété donnée). Cette possibilité n'a pas été utilisée pour le développement de notre ontologie.

Il y a trois types de restrictions sur les valeurs des propriétés :

1. Restriction « quel que soit » : toutes les valeurs d'une certaine propriété appliquée aux instances d'une classe doivent être d'un certain type. Par exemple :

« Toutes les propriétés *utiliseProcédé* d'une instance de la classe *EtapeGamme1* doivent être instance de la classe *ProcedePossiblePieceFamille1* »

2. Restriction « il existe » : au moins une des valeurs d'une certaine propriété appliquée aux instances d'une classe doit être d'un certain type. Par exemple :

« Une instance de la classe *PieceCambrée* doit avoir au moins une relation *aPourCambrage* avec une instance de la classe *CambragePrésent* »

3. Restriction « a pour valeur » : au moins une des valeurs d'une certaine propriété appliquée aux instances d'une classe doit être une certaine valeur (valeur simple pour propriété Donnée ou instance pour propriété Objet). Par exemple :

« La propriété *aPourNumeroDOrdre* d'une instance de la classe *EtapeGamme1* doit avoir pour valeur : 1 »

Raisonnements

Trois types de raisonnement peuvent être réalisés sur une ontologie :

- la vérification de cohérence : il s'agit de vérifier qu'une classe peut bien être instanciée (c'est-à-dire qu'il puisse exister des instances de cette classe)
- la classification des classes : la classe A est-elle une sous-classe de la classe B ?
- la classification des instances : de quelles classes l'individu X est-il une instance ?

Etant donné que nous représentons les objets qui nous intéressent (pièces, procédés, gammes) comme des instances que nous allons classifier, c'est le dernier type de raisonnement (classification des instances) qui a été mis en œuvre dans le développement de l'approche proposée.

Ce raisonnement nécessite d'avoir déclaré des classes définies qui permettent la classification des instances grâce aux conditions nécessaires et suffisantes.

4.1.2 Structure de l'ontologie développée

L'un des buts de cette ontologie est de pouvoir décrire les pièces et les procédés à l'aide de paramètres afin de pouvoir les classer dans les familles.

Représentation et utilisation des paramètres pour une pièce ou pour un procédé

Deux types de paramètres ont été distingués : les paramètres de type « liste de choix » (ex : pour le paramètre cambrage, deux choix sont possibles : « cambrage présent », « cambrage absent »), et les paramètres numériques (ex : masse de la pièce).

La représentation des paramètres numériques a dû tenir compte d'une limitation imposée par le langage OWL : il est impossible d'utiliser des propriétés Donnée dans les restrictions de type « quel que soit » ou de type « il existe ». Par exemple il n'est pas possible d'exprimer directement : « la valeur de la propriété masse doit être comprise entre 10 et 50 ». Cette contrainte a impliqué l'adoption d'une structure particulière composée de classes d'intervalle. Sur la Figure 64 est présenté l'exemple du concept qui représente le paramètre de la masse, décliné en 5 classes d'intervalles.

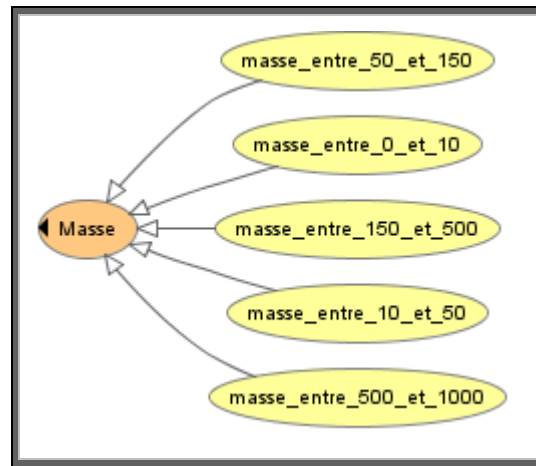


Figure 64 : Classes d'intervalle

Ainsi lors de l'expression d'une restriction il sera possible d'indiquer par exemple : « une instance de la classe *PieceLourde* possède au moins une relation *aPourMasse* avec une instance de la classe *masse_entre_500_et_1000* ». Le problème de cette représentation est que les classes d'intervalles doivent être définies en fonction des besoins : si l'on crée une famille de pièces qui nécessite de considérer un intervalle qui n'existe pas encore (par exemple ici une masse entre 1000 kg et 2000 kg), il faut rajouter une classe d'intervalle pour cela. Il risque ainsi d'y avoir un foisonnement de classes d'intervalle ce qui implique une difficulté de maintenance. Un outil intermédiaire est donc nécessaire pour effectuer les tâches de ce type.

L'affectation des paramètres à une instance de pièce ou à une instance de procédé s'effectue par l'ajout d'une relation avec la propriété correspondante au paramètre : pour chaque classe de paramètre a été définie une propriété correspondante. Par exemple, pour le paramètre Masse représenté par la classe du même nom, la propriété *aPourMasse* a été définie. Comme on peut le voir sur la Figure 65, une instance de la classe d'intervalle correspondante est créée et devient la cible de la propriété *aPourMasse*. De plus, une propriété Donnée *aPourValeur* est ajoutée pour conserver la valeur de la masse entrée par l'utilisateur.

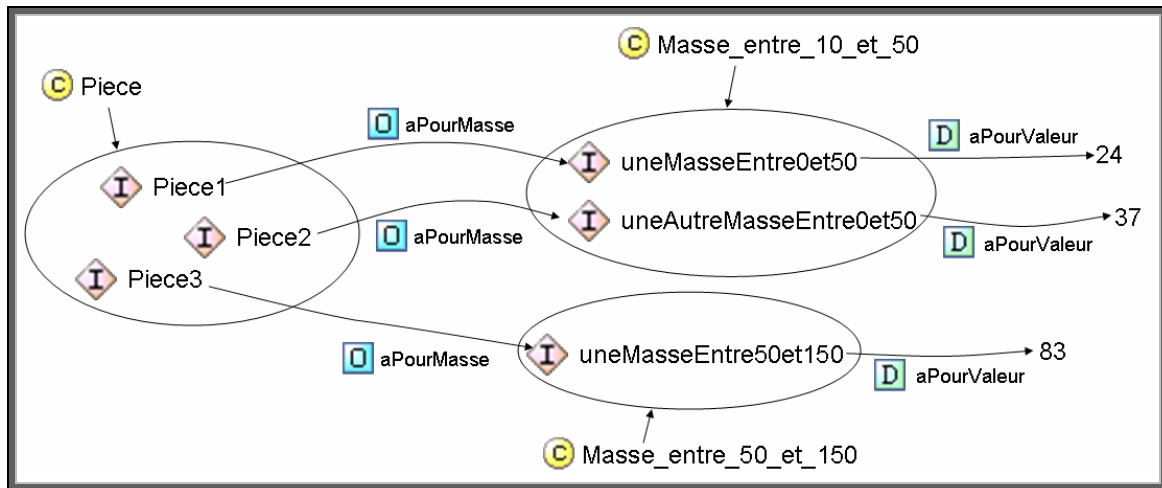


Figure 65 : Affectation des paramètres

Représentation et fonctionnement d'une famille de pièces

La structure que nous avons mise en place pour une famille de pièce est composée d'une classe racine qui possède quatre sous-classes que nous allons détailler sur un exemple. L'exemple montré sur la Figure 66 montre ainsi une famille de pièces dont la classe racine, nommée ici *ElementFamillePiece1_1* possède les quatre sous-classes suivantes :

- *PieceFamille1_1* : il s'agit d'une classe définie (c'est-à-dire une classe qui possède au moins une condition nécessaire et suffisante et dans laquelle il est possible de classifier des instances au cours du raisonnement). Cette classe spécifie dans ses restrictions les caractéristiques que doit respecter une instance de pièce pour faire partie de cette famille.
- *Procede_PieceFamille1_1* : cette classe est composée ici de trois sous-classes définies (i.e. avec des conditions nécessaires et suffisantes) pour permettre de classifier les instances de procédés qui respectent les caractéristiques requises correspondant à chacune des étapes du processus de fabrication pour cette famille.
- *Etape_gamme_PieceFamille1_1* : cette classe est composée ici de trois sous-classes définies pour permettre cette fois de classifier les instances de type *EtapeGamme* qui respectent les caractéristiques requises. La condition principale est d'utiliser un procédé classifié dans la sous-classe correspondante de *Procede_PieceFamille1_1*.
- *Alternative_de_gamme_PieceFamille1_1* : cette classe définie permet de classifier les instances de type *Alternative_de_gamme* qui respectent les caractéristiques requises. La condition principale est d'être en relation avec des instances d'*EtapeGamme* classifiée dans les sous-classes de la classe *Etape_gamme_PieceFamille1_1*.

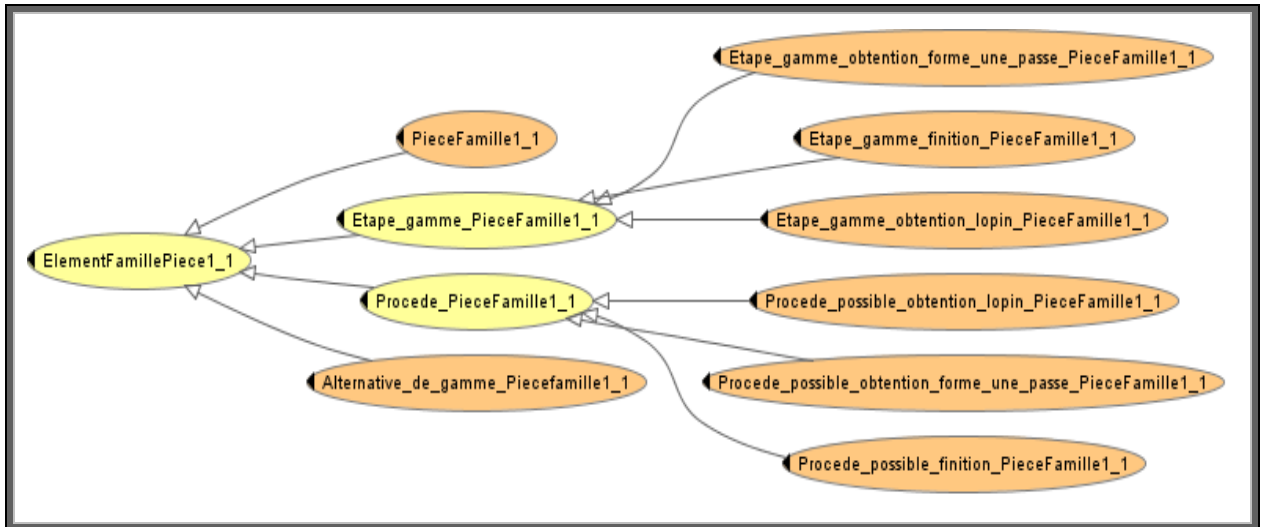


Figure 66 : Structure d'une famille de pièces

La classification avec ce type de structure va s'effectuer en chaîne, car les restrictions de certaines classes définies font référence à d'autres classes définies : sur la Figure 67, il est possible de visualiser l'ordre de ces classifications. La première classification est celle des instances de *Procédé* qui ne fait référence qu'aux paramètres des procédés. La deuxième concerne les instances de la classe *EtapeGamme* car elles font référence aux procédés et ne peuvent être classifiées dans la famille que si les instances de *Procédé* auxquelles elles font référence sont elles-aussi classifiées dans la famille. Il s'agit du même principe pour la troisième classification : celle des instances de la classe *AlternativeDeGamme* qui font référence aux instances de la classe *EtapeGamme*.

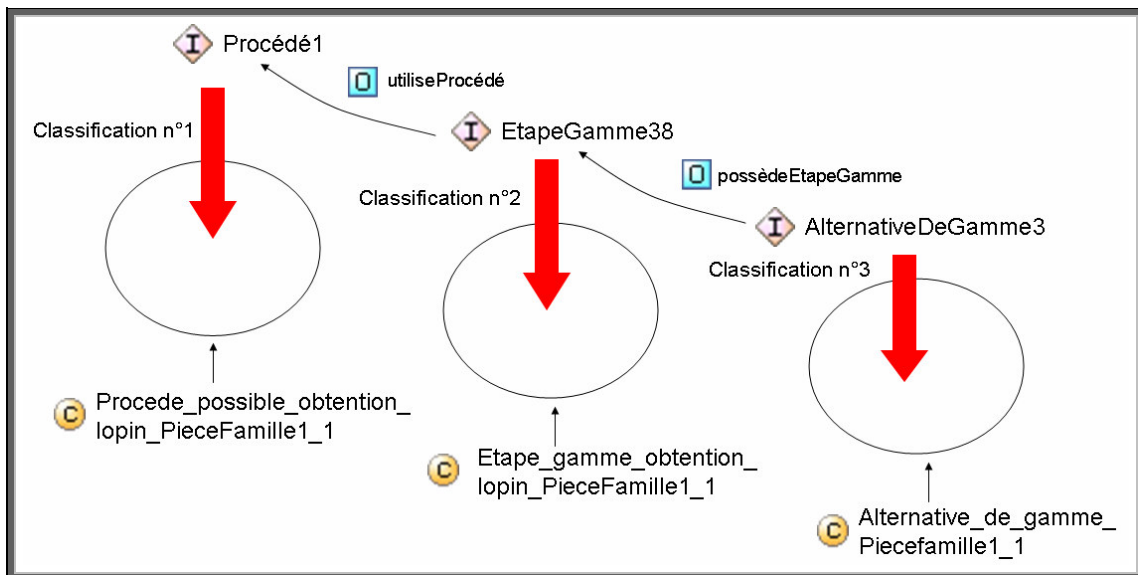


Figure 67 : Enchaînement des classifications

En langage courant, le résultat de cette classification en chaîne est le suivant : l'alternative de gamme nommée *AlternativeDeGamme3* et constituée de plusieurs étapes (nous n'en avons fait figurer qu'une sur la Figure 67 afin de ne pas alourdir la description) est une alternative de gamme possible pour les pièces de la famille nommé *Famille1_1*.

4.1.3 Utilisation manuelle avec l'éditeur Protégé

L'interface de l'éditeur Protégé est composée de trois principaux onglets qui concernent :

- l'édition des classes
- l'édition des propriétés
- l'édition des instances

Dans le cadre d'une utilisation manuelle de l'approche développée, seul l'onglet d'édition des instances intéresse l'utilisateur. On suppose que les paramètres permettant de décrire une pièce ou un procédé ainsi que les familles de pièce et les procédés ont déjà été configurés. L'utilisation courante peut être constituée

- de la définition d'une pièce et de sa classification en famille de pièces
- de la définition d'une alternative de gamme et de sa classification afin de vérifier la cohérence avec la pièce considérée.

Définition d'une pièce

La définition d'une pièce s'effectue en deux étapes :

1. création d'une nouvelle instance de pièce
2. renseignement des paramètres de la pièce. La Figure 68 présente un exemple d'édition d'une instance : sur la partie droite sont renseignées les propriétés de l'instance : chaque paramètre est en réalité une propriété Objet en lien avec une instance d'une classe d'intervalle (paramètre numérique, exemple : RapportComplexité_sup2_36 représente un rapport de complexité supérieur à 2) ou bien d'une classe de choix (paramètre de type « liste de choix », exemple : DébouchageInexistant_32 représente le fait qu'il n'y a pas de débouchage sur la pièce considérée).

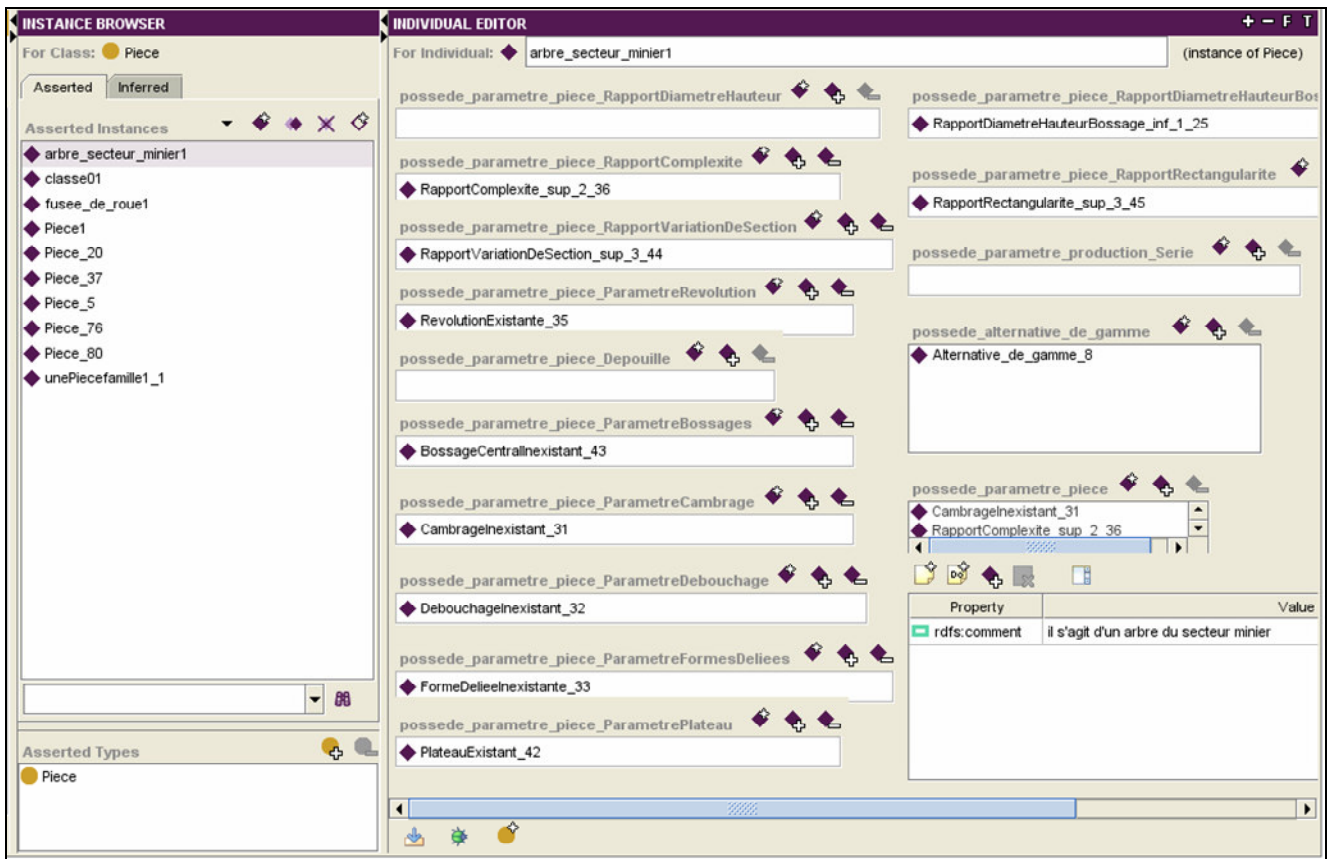


Figure 68 : Interface d'édition d'instances (éditeur Protégé)

Définition d'une alternative de gamme

La définition d'une alternative de gamme est plus compliquée que celle d'une pièce : elle nécessite d'abord de créer des instances de la classe *EtapeGamme* dont on renseigne la propriété *utiliseProcédé* grâce à une instance de la classe *Procédé*. Ensuite il est possible de créer une instance de la classe *Alternative_de_gamme* que l'on peut lier aux instances de la classe *EtapeGamme* précédemment créées par le moyen de la propriété *possedeEtapeGamme*. Ce processus est relativement lourd à réaliser manuellement. Encore une fois, un outil d'aide intermédiaire sera nécessaire pour modifier l'ontologie de façon plus aisée.

Classification

L'éditeur Protégé peut être couplé à un raisonneur pour effectuer les tâches de classification. Il est ainsi possible de connaître les instances classifiées d'une classe ou bien de savoir directement dans quelles classes se trouve classifiée une instance. Par ce moyen il est tout à fait aisé de connaître les familles de pièce auxquelles appartient la pièce. De même après avoir défini une instance d'alternative de gamme, il est possible de voir dans quelle famille elle se trouve classifiée. On peut ainsi vérifier manuellement la cohérence entre une pièce et une alternative de gamme.

En revanche, il est beaucoup plus compliqué de trouver manuellement à partir des restrictions exprimées dans les classes d'une famille de pièces quels sont les processus de fabrication haut niveau possibles pour une pièce donnée.

Maintenance

La création et la maintenance de l'ontologie (c'est-à-dire l'édition des procédés, des familles de pièce, la configuration des paramètres) s'avère très vite bien compliquée : la

profusion des classes est un problème réel dans ce type d'approche, notamment des classes d'intervalles des paramètres et des classes définies pour permettre la classification des procédés dans les familles de pièce. Ce problème ainsi que les lourdeurs au niveau de l'édition d'une pièce ou d'une alternative de gamme peuvent être en partie résolus par l'automatisation de cette utilisation. Nous avons développé un programme spécifiquement pour cela.

4.1.4 Automatisation : développement d'un programme associé à l'éditeur Protégé

L'objectif de ce programme est d'avoir une interface ciblée sur les besoins de l'utilisateur :

- édition d'une pièce
- visualisation du résultat de la classification
- déduction des processus de fabrication haut niveau possibles.
- maintenance : édition des familles de pièce, des procédés, configuration des paramètres.

La solution choisie pour ce programme a été de développer une application de type onglet plug-in de Protégé : l'éditeur Protégé est une application modulaire où il est possible de configurer la présence de nouveaux onglets développés par l'utilisateur. Le langage de développement est Java et il est nécessaire d'utiliser les bibliothèques fournies par Protégé.

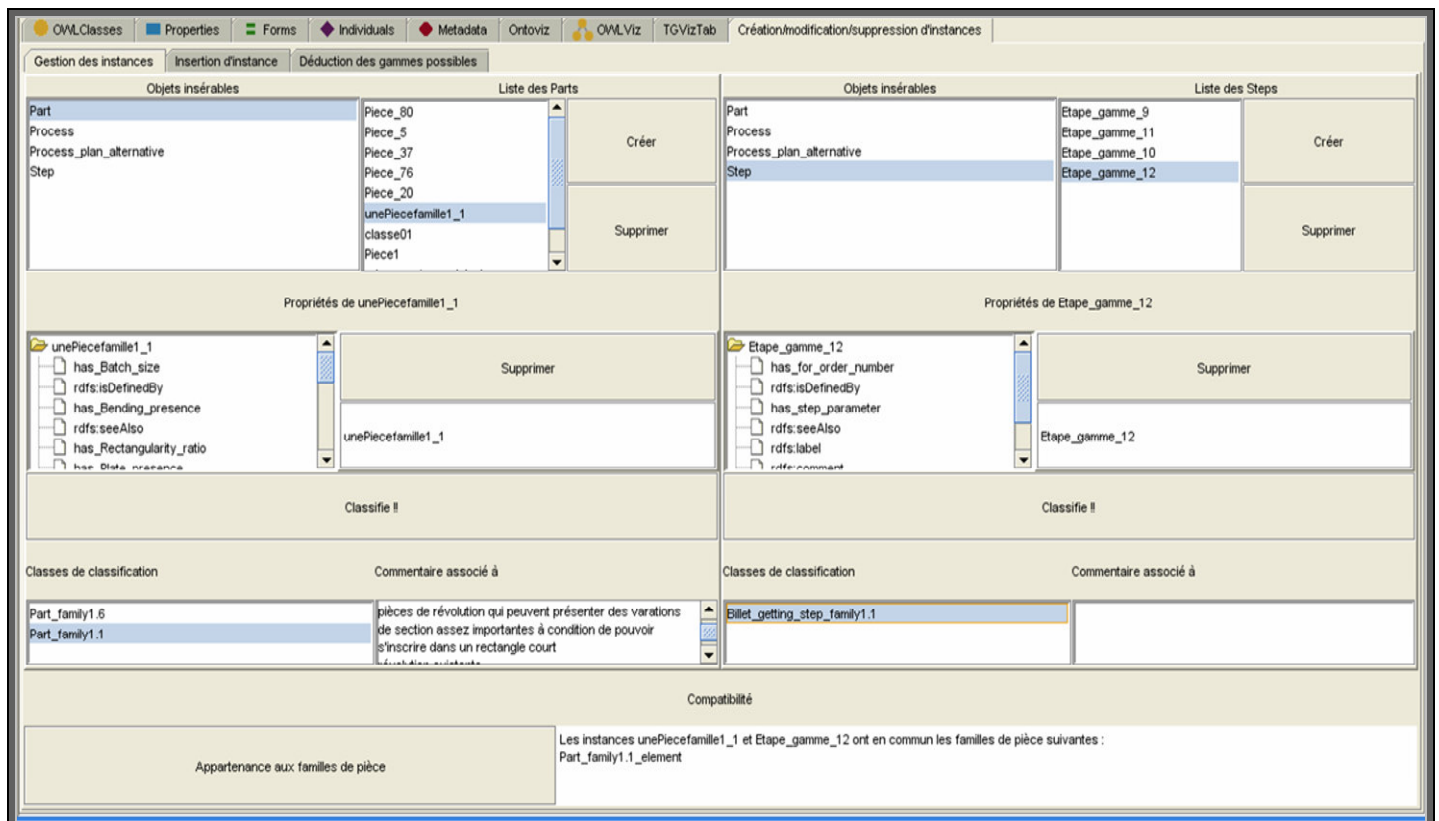


Figure 69 : Interface développée

La Figure 69 présente l'interface qui a été développée. Elle se décompose en trois parties : deux interfaces identiques sur lesquelles il est possible d'éditer un objet insérable (une instance de type *Pièce*, *Procédé*, *Alternative_de_gamme* ou *EtapeGamme*) et d'une troisième partie en bas dans laquelle l'utilisateur peut visualiser les familles de pièces communes aux deux objets édité.

L'interface d'édition est présentée Figure 70 : l'utilisateur peut sélectionner le type d'instance qu'il souhaite éditer puis apparaît la liste des instances existantes. Il peut éventuellement en créer ou en supprimer. La deuxième partie de l'interface est l'édition des propriétés que l'on retrouve sous la forme d'un arbre. La sélection dans l'arbre permet d'afficher et de modifier si besoin la valeur de la propriété sur la droite de l'interface. Enfin l'appel de la classification permet d'afficher les classes dans lesquelles l'instance sélectionnée a été classifiée par le raisonneur.

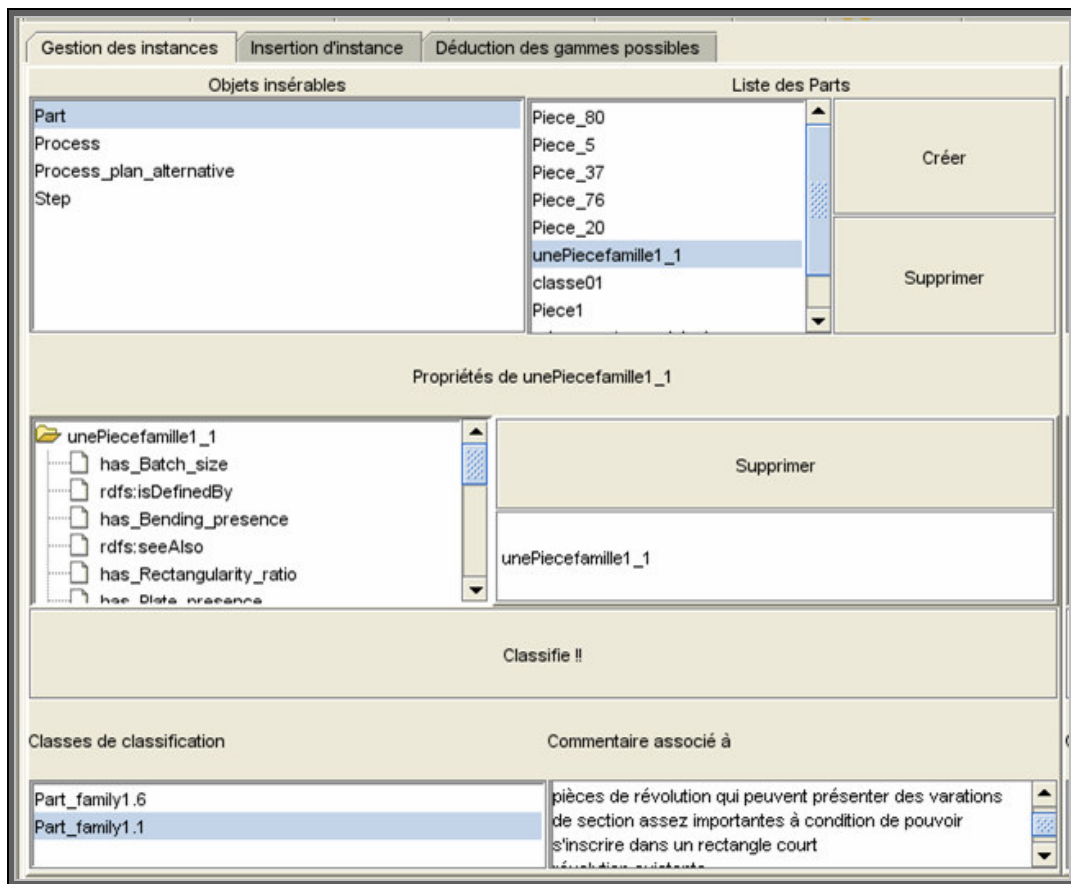


Figure 70 : Interface d'édition

Il est important de souligner que tous les traitements effectués par cette interface modifient l'ontologie qui sert à la fois de support au raisonnement mais aussi de sauvegarde des instances qui ont été créées.

La déduction des alternatives de gamme possibles à partir de la classification en famille de pièces a été développé et fait l'objet d'une interface sommaire présentée Figure 71 : l'utilisateur choisit une instance de pièce dans la liste des pièces créées puis lance la déduction.

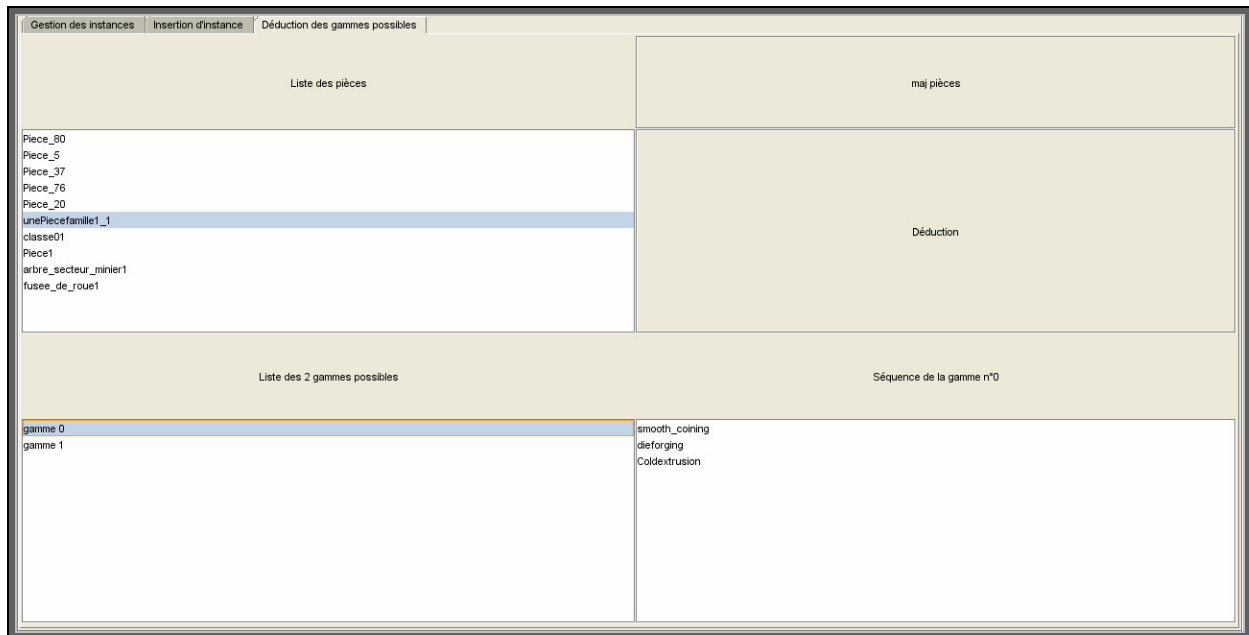


Figure 71 : Interface de déduction des alternatives de gamme

La déduction des gammes possibles consiste à déterminer tout d'abord les familles dans lesquelles se trouve classée la pièce. A partir des spécifications définies au niveau de ces familles, les alternatives de gamme sont déduites en tenant compte des incompatibilités entre procédés. L'algorithme mettant en œuvre ce raisonnement est précisé sur la Figure 72.

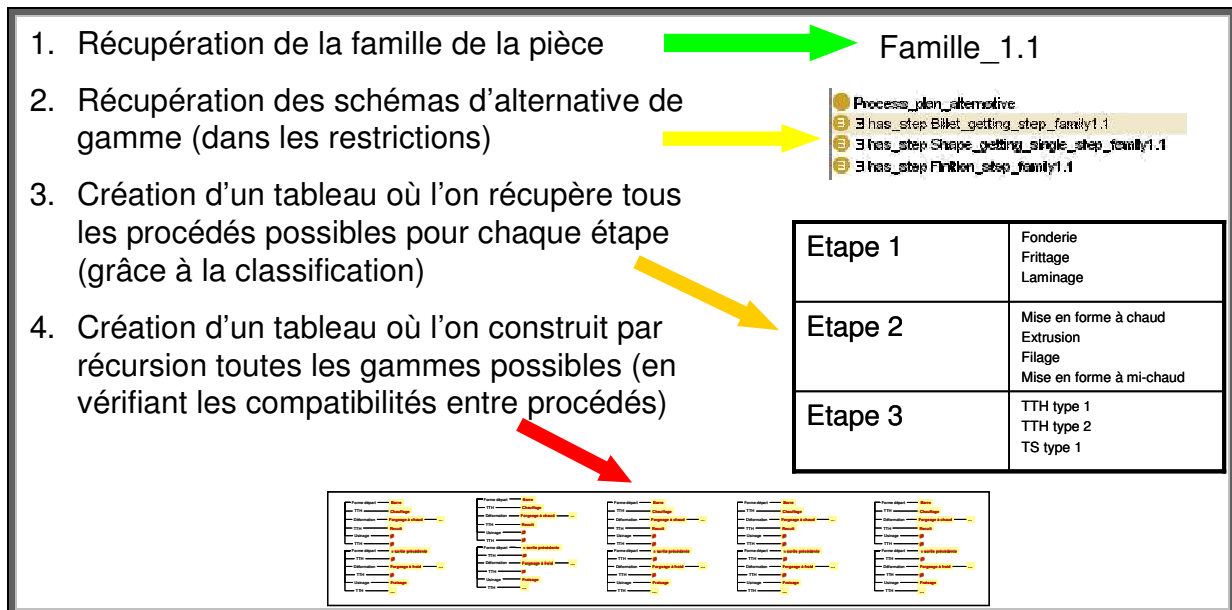


Figure 72 : Algorithme de déduction des gammes possibles

4.1.5 Conclusion sur l'implémentation de la première formalisation

Ces travaux concernant la première formalisation ont fait l'objet de la première partie de la thèse et ont donné lieu à deux communications ([Thibault 2006b], [Thibault 2006c]). L'implémentation de cette première formalisation est restée à un état d'essai de faisabilité. Les développements commencés sont restés au stade du maquettage, et ce pour plusieurs raisons :

- Les limitations liées aux outils d'édition et au langage OWL : en particulier l'impossibilité d'effectuer des raisonnements directs avec des propriétés Donnée de type simple et donc l'obligation de passer par des classes d'intervalles. Cette limitation a fortement influencé le choix d'abandonner cette voie, car l'ontologie devient alors illisible et n'est utilisée qu'en support pour la sauvegarde et le raisonnement.
- La lourdeur du développement : le plug-in avait pour objectif de simplifier les tâches de maintenance et d'utilisation de l'ontologie. Cependant, les tâches de maintenance n'ont pas été implémentées du fait de la complexité induite par la formalisation : traduire un schéma d'alternative de gamme dans une ontologie nécessite de créer un certain nombre de classes (celles qui concernent les étapes, celles qui représentent les procédés possibles, ...), chacune associée à un ensemble de spécifications. Cela nécessite de passer par un modèle objet qui sera finalement traduit en langage OWL. De là vient la question : à quoi nous sert le langage OWL si ce n'est pour le raisonnement automatique de classification qu'il est possible d'effectuer avec ?
- Décrire les restrictions et les classes en vue de la classification nécessite de bien maîtriser les subtilités telles que l'hypothèse du monde ouvert : « tout ce qui n'est pas déclaré n'est pas considéré comme faux ». Par exemple, l'utilisation des quantificateurs « quel que soit » dans une restriction peut conduire à ne pas pouvoir classifier d'instance dans la classe en question si l'on n'a pas contraint les cardinalités de la propriété concernée.
- La formalisation proposée n'était pas adaptée aux connaissances des experts métiers : la récupération de familles de pièces n'est pas un exercice aisé, celui des schémas d'alternative de gamme l'est encore moins. En effet, les spécifications sur les paramètres des procédés pour décrire une gamme possible nécessitent une trop grande généralisation, même si l'idée est intéressante. De plus, le formalisme de description des connaissances étant au final éloigné du langage des experts, le passage de l'un à l'autre demande un certain temps de développement.
- Enfin il faut reconnaître que l'ontologie, dans le cadre de cette implémentation, n'est pas utilisée réellement pour ce qu'elle permet de mettre en œuvre : il n'y a pas de coopération entre outils informatiques basée sur l'ontologie, et la modélisation a été réalisée pour permettre un raisonnement possible (et non pour réellement modéliser le domaine des connaissances de forge).

Ces considérations nous ont amené à l'idée d'une deuxième formalisation : celle que nous nommons par **schéma de processus de fabrication**.

4.2 Implémentation de la seconde formalisation : Schéma de processus de fabrication

La seconde formalisation est basée sur la représentation en schéma de processus de fabrication décrite au chapitre 3. L'implémentation de cette formalisation a dû répondre aux objectifs suivants :

- spécification des paramètres de description d'une pièce
- définition des schémas de processus de fabrication
- définition des pièces à étudier

- raisonnements sur les schémas à partir d'une pièce à étudier.

Les modélisations et algorithmes mis en œuvre pour répondre à ces attentes sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.2.1 Spécification des paramètres de description d'une pièce

Les paramètres de description d'une pièce sont ceux qui seront utilisés à la fois lors de la description d'une pièce et lors de la description des conditions dans les schémas. Un paramètre de description n'a d'utilité que s'il est utilisé dans au moins une condition d'un schéma. Sinon il ne pourra intervenir dans le raisonnement. Cette spécification définit un modèle de pièce simple constitué d'une liste de paramètres qui caractérisent la pièce et qui permettent de déduire des conséquences au niveau du processus de fabrication.

Quatre types de paramètres existent dans l'implémentation qui a été développée :

- **Liste sans ordre** : liste sans relation d'ordre

Ex 1 : Cambrage : cambrage absent, cambrage présent

Ex 2 : Classe morphologique : classe 101, classe 202, classe 304 (dénominations de classes morphologiques, avec impossibilité de spécifier un ordre entre elles)

- **Liste ordonnée** : liste possédant une relation d'ordre

Ex : Classe de tolérance : ISO 5, ISO 6, ISO 7,..., ISO 12 (avec $ISO 5 < ISO 6 < \dots < ISO 16$)

- **Entier** : nombre entier

Ex : Nombre de variations de section

- **Réel** : nombre réel

Ex : rapport de variation de section (rapport entre la plus petite et la plus grande section de la pièce).

Lors de la spécification du paramètre, le type ainsi que le domaine du paramètre sont renseignés. La forme du domaine dépend du type :

- Domaine pour **Liste sans ordre** et pour **Liste ordonnée** : ensemble de valeurs de type élémentaire *chaîne de caractères*.
- Domaine pour **Entier** et pour **Réel** : ensemble d'intervalles *d'entiers* ou de *réels* le cas échéant (spécification de chaque intervalle par une borne inférieure et une borne supérieure).

Afin de prendre en charge la spécification et l'utilisation des paramètres, un ensemble de classes a été défini (Figure 73) dont deux classes principales :

- **SpecificationParametre** : une instance de cette classe contient la spécification d'un paramètre : le nom, la description, les valeurs possibles du paramètre.
- **ParameterValue** : une instance de cette classe fait référence à une instance de la classe **SpecificationParametre**, et contient une valeur définie pour le paramètre. Les instances de cette classe sont utilisées pour l'affectation effective des paramètres dans les conditions ou dans la description d'une pièce.

Quatre classes dérivent de chacune de ces deux classes principales pour exprimer les spécificités des quatre types de paramètres présentés précédemment :

- **SpecificationParameterEntier** : une instance de cette classe contient la spécification d'un paramètre de type Entier : le domaine est exprimé sous la forme de plages de valeurs entières.
- **SpecificationParameterReel** : une instance de cette classe contient la spécification d'un paramètre de type Réel : le domaine est exprimé sous la forme de plages de valeurs réelles.
- **SpecificationParameterStringListSansOrdre** : une instance de cette classe contient la spécification d'un paramètre de type Liste sans ordre : le domaine est exprimé sous la forme d'une liste de chaîne de caractères (les valeurs possibles du paramètre).
- **SpecificationParameterStringListOrdonnee** : une instance de cette classe contient la spécification d'un paramètre de type Liste sans ordre : le domaine est exprimé sous la forme d'une liste ordonnée de chaîne de caractères (les valeurs possibles du paramètre).
- **ParameterValueEntier** : représente un paramètre de type entier, une instance de cette classe contient une valeur entière ainsi qu'une référence à une instance de la classe **SpecificationParameterEntier**.
- **ParameterValueReel** : représente un paramètre de type réel, une instance de cette classe contient une valeur réelle ainsi qu'une référence à une instance de la classe **SpecificationParameterReel**.
- **ParameterValueListSansOrdre** : représente un paramètre de type Liste sans ordre, une instance de cette classe contient une valeur de type chaîne de caractères ainsi qu'une référence à une instance de la classe **SpecificationParameterStringListSansOrdre**.
- **ParameterValueListOrdonnee** : représente un paramètre de type Liste ordonnée, une instance de cette classe contient une valeur de type chaîne de caractères ainsi qu'une référence à une instance de la classe **SpecificationParameterStringListOrdonnee**.

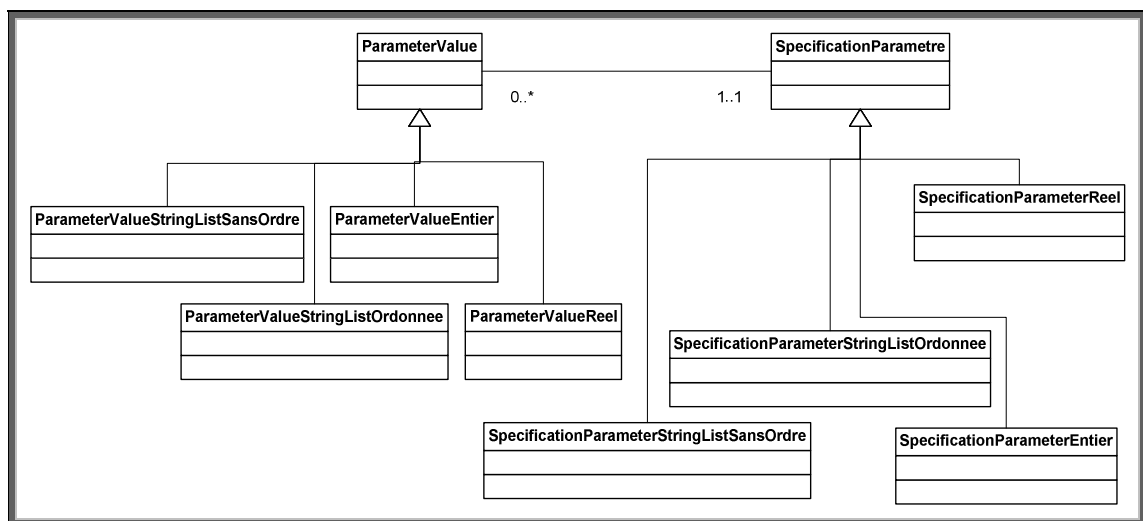


Figure 73 : Diagramme de classes – Gestion des paramètres

L'interface de spécification des paramètres qui a été développée est présentée Figure 74 : Elle permet de donner un nom, une description, de choisir le type du paramètre et de définir les valeurs possibles que pourra prendre le paramètre. En revanche il n'y a pour le moment pas de vérification de cohérence entre les paramètres définis (par exemple il est encore possible de définir deux paramètres ayant le même nom), cela sera modifié dans une version ultérieure de l'application.

En annexe 3 se trouve une liste de paramètres possibles pour le domaine de la forge, récupérée au cours d'un entretien avec un expert du CETIM.

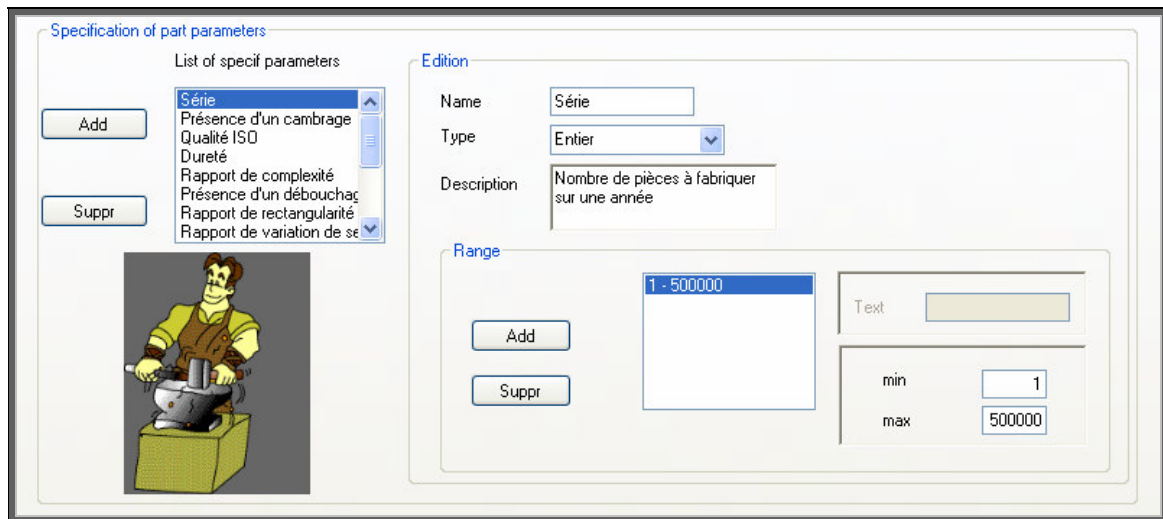


Figure 74 : Interface de spécification des paramètres

4.2.2 Définition des schémas de processus de fabrication

Deux aspects sont à considérer concernant la définition d'un schéma de processus de fabrication :

- la définition de la structure du schéma : l'ensemble des transformations qui vont constituer le schéma
- la définition des conditions qui seront appliquées sur les transformations du schéma.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, il existe plusieurs types de transformation, chacun ayant ses spécificités au niveau de la structure et également au niveau du traitement.

La modélisation réalisée en vue de l'implémentation est présentée sur la Figure 75 : un schéma de processus de fabrication est associé à une unique transformation : ce sera la transformation racine du schéma. Dans l'implémentation, cette transformation est fixée d'office comme étant une instance de la classe **TransformationSequence**.

De la classe **Transformation** dérivent principalement quatre classes dont trois par l'intermédiaire de la classe **TransformationComposee** (cette classe n'existe pas dans l'implémentation mais permet ici d'avoir une vision plus claire de la modélisation). Les instances des classes dérivant de **TransformationComposee** sont en réalité les nœuds de l'arbre qui représente le schéma de processus de fabrication. Ces transformations sont composées soit d'autres instances de **TransformationComposee** (donc d'autre nœuds), soit d'instances de la classe **TransformationElementaire** (les feuilles ou terminaisons de l'arbre).

Détaillons à présent les classes du diagramme de la Figure 75 :

- **SchemaProcessusDeFab** : représente un schéma de processus de fabrication ; une instance de cette classe possède une propriété *Nom* ainsi qu'une référence à une instance de la classe **Transformation** (la racine du schéma).
- **Transformation** : représente une transformation ; une instance de cette classe possède une référence à une instance de la classe **Transformation** pour représenter la transformation parente (le nœud parent dans le schéma), si elle existe. De plus, elle possède plusieurs références à des instances de la classe **Condition** ainsi que des propriétés permettant le traitement du schéma, comme nous le verrons plus loin.
- **TransformationSequence** : représente une transformation séquence ; une instance de cette classe possède une liste ordonnée faisant référence à des instances de la classe **Transformation**. Cette liste représente la séquence de transformations filles.
- **TransformationChoix** : analogue à **TransformationSequence** ; la liste représente les différents choix possibles.
- **TransformationBoucle** : une instance de cette classe possède deux références à des instances de la classe **Transformation** : l'une pour la transformation aller, l'autre pour la transformation retour.
- **TransformationElementaire** : une instance de cette classe possède une référence à une instance de la classe **Procede** pour indiquer quel est le procédé utilisé.
- **Procede** : une instance de la classe **Procede** représente un procédé utilisable dans une transformation élémentaire, et ne possède qu'une propriété : le nom. Cependant, cette classe pourra à l'avenir être enrichie d'autres attributs qui permettront une ouverture à d'autres traitements.

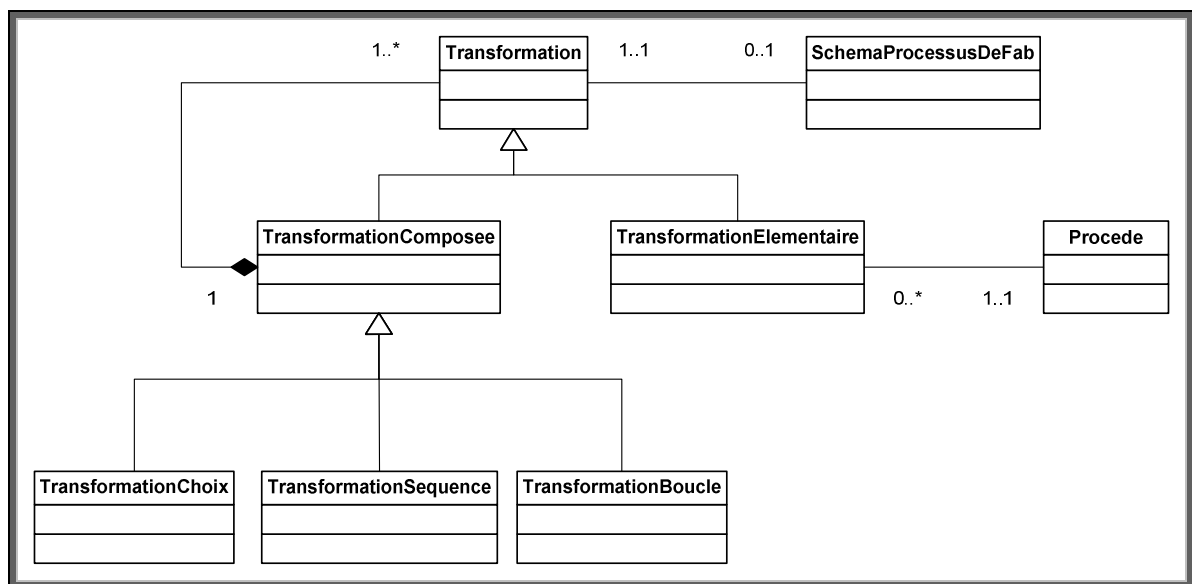


Figure 75 : Diagramme de classes – Schéma de processus de fabrication

Concernant la définition des conditions, la structure choisie pour l'implémentation a été la suivante : chaque instance de la classe **Transformation** possèdera une liste de quatre références à des instances de la classe **Condition**, ordonnées de la façon suivante :

- **Condition 1** : condition d'élimination liée aux limites des procédés (si elle est vraie, on élimine la transformation à laquelle elle se trouve associée)

Ex : Si la limite élastique du matériau est supérieure à 600 MPa, on élimine la transformation élémentaire qui fait intervenir le procédé de cisailage.

- **Condition 2** : condition d'élimination liée à une inutilité

Ex : Si la classe de tolérance est supérieure à ISO7, on élimine la transformation élémentaire qui fait intervenir le procédé de calibrage.

- **Condition 3** : condition d'élimination liée au savoir-faire d'experts. Cette condition est spécifiquement prévue pour les savoir-faire propres d'une entreprise, qui ne sont pas susceptibles d'intégrer les deux précédents types de condition.
- **Condition 4** : condition de préconisation. Cette condition aura un statut particulier lors du traitement (toutes les transformations concurrentes sont éliminées si cette transformation est vraie sauf si elles sont elles-mêmes également préconisées).

Chaque condition associée à une transformation peut être décrite sous la forme d'une structure arborescente (Figure 76) à l'instar d'un schéma de processus de fabrication : les nœuds sont les instances des classes **ConditionET** et **ConditionOU** tandis que les terminaisons sont les instances des classes **ConditionElementairePlusGrandQue** et **ConditionElementaireEgala** (à noter que la classe **ConditionComposee** est représentée ici pour clarifier le schéma mais n'est pas présente dans l'implémentation réelle). Il est ainsi possible d'exprimer une grande variété de conditions.

Décrivons à présent les différentes classes du diagramme de la Figure 76 :

- **Condition** : cette classe possède plusieurs propriétés telles que : *Commentaire* (commentaire associé à la condition), *Fiabilité* (un indice de fiabilité associable à la condition), *ConditionParent* (la condition parente dans l'arbre des conditions, si elle existe), *Negation* (booléen qui indique si la condition est définie de manière négative), *TypeCondition* (définit le type de la condition parmi : limite, inutilité, déconseil d'expert ou bien préconisation). De plus toutes les instances de **Condition** possèdent la méthode *evaluer(unePiece : Piece)* qui permet d'évaluer la condition par rapport à la définition d'une pièce. Cette évaluation peut renvoyer trois valeurs : *Vrai*, *Faux* ou bien *Non évalué* dans le cas où l'évaluation n'est pas possible (dans le cas où le paramètre utilisé dans la condition n'a pas été défini pour la pièce considérée par exemple).
- **ConditionET** : les instances de cette classe possèdent une liste de références à des instances de la classe condition (donc qui peuvent être d'autres conditions composées ou bien des conditions élémentaires). La méthode *evaluer* renvoie *Vrai* lorsque toutes les conditions filles peuvent être évaluées et renvoient *Vrai*, *Faux* lorsque l'une des conditions évaluées renvoie la valeur *Faux*, *Non évalué* si toutes les conditions filles évaluées renvoient *Vrai* mais qu'au moins l'une des conditions filles a renvoyé *Non évalué*.

- **ConditionOU** : analogue à **ConditionET**. La méthode *evaluer* renvoie *Vrai* lorsque l'une des conditions filles renvoie la valeur *Vrai*, *Faux* lorsque toutes les conditions filles sont évaluées et renvoient toutes *Faux*, *Non évalué* si toutes les conditions filles évaluées renvoient *Faux* mais qu'au moins l'une des conditions filles a renvoyé *Non évalué*.
- **ConditionElementaire** : une instance de la classe **ConditionElementaire** possède une référence à une instance de la classe **ParameterValue** : cela permet de savoir à quel paramètre s'applique la condition et quelle est la valeur limite de cette condition. Deux types de conditions élémentaires existent pour exprimer les relations de comparaisons : **ConditionElementairePlusGrandQue** et **ConditionElementaireEgalA**.
- **ConditionElementairePlusGrandQue** : permet d'exprimer une condition faisant intervenir la relation d'ordre « supérieur strictement à ». Pour exprimer la relation « inférieur ou égal à », il suffit d'agir sur la propriété *Negation* que comporte toute instance de la classe **Condition**. La fonction *evaluer* renvoie la valeur *Vrai* si la relation est vérifiée, *Faux* si elle n'est pas vérifiée et *Non évalué* si le paramètre n'a pas été défini sur la pièce considérée. La propriété *Negation* permet d'inverser le résultat le cas échéant.
- **ConditionElementaireEgalA** : permet d'exprimer une condition faisant intervenir une relation d'égalité. Pour exprimer une relation d'inégalité, il suffit d'utiliser la propriété *Negation*. Le résultat de la fonction *evaluer* est le même que pour **ConditionElementairePlusGrandQue**.
- **ParameterValue** : vu dans la section précédente.

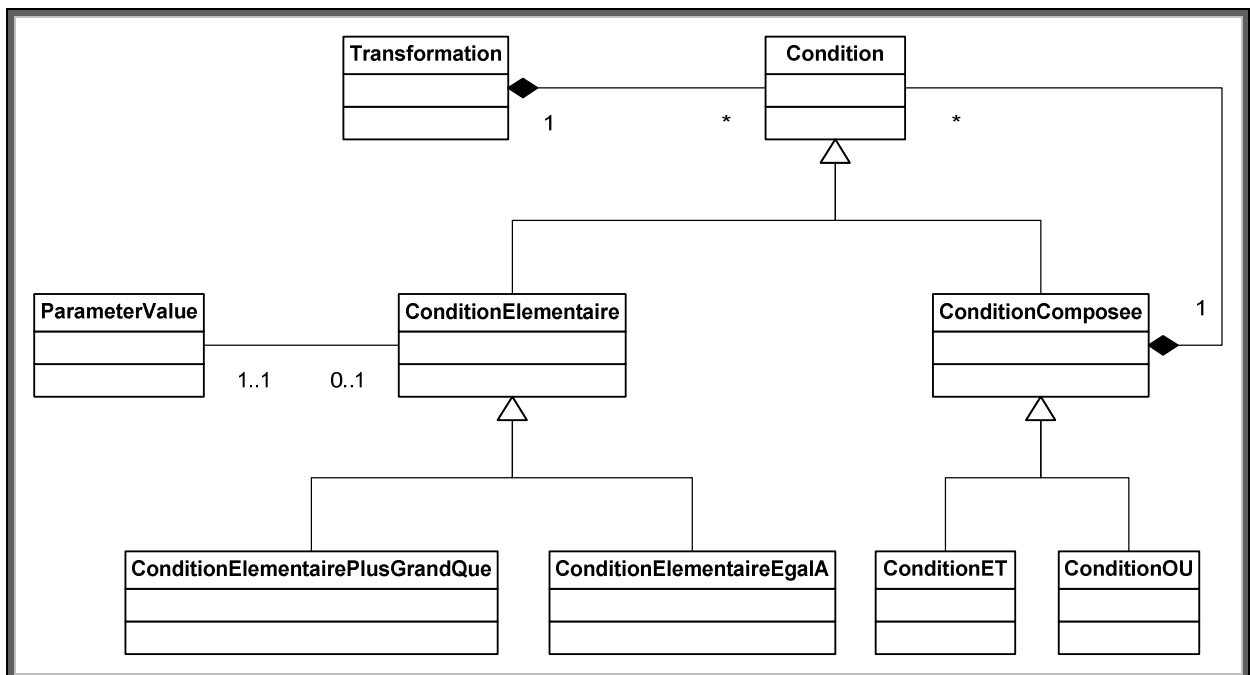





Figure 76 : Diagramme de classes - Gestion des conditions

L'interface développée pour l'édition des schémas de processus de fabrication est présentée sur la Figure 77. Elle est composée de deux parties :

- l'édition du schéma sur la gauche avec la possibilité d'ajouter, de modifier ou de supprimer des transformations : en sélectionnant une transformation de type

Séquence ou Choix sur le schéma, il est possible d'ajouter une transformation en cliquant soit sur les boutons *Choice*, *Sequence* ou *Loop*, ou encore en sélectionnant un procédé dans la zone de liste déroulante et en cliquant sur le bouton adjacent *Single transformation*.

- l'éditeur de condition sur la droite : lorsque l'on sélectionne une transformation du schéma, il est possible d'ajouter, de modifier ou de supprimer les conditions associées. Il est possible de sélectionner la condition à modifier en activant l'un des quatre boutons du bas : *Limit* pour les conditions liées aux limites des procédés, *Uselessness* pour les conditions liées à l'inutilité, *Unadvisable* pour celles liées au savoir-faire d'expert et *Recommended* pour les conditions de préconisation.

Sur le schéma, les transformations de type Séquence sont représentées par une icône ovale  suivie de la chaîne de caractères « Seq » ; les transformations de type Choix sont identifiables par une icône en forme d'étoile  suivie de la chaîne de caractères « Choice » ; enfin, les transformations élémentaires sont désignées par une icône en forme de marteau  associée au nom du procédé utilisé.

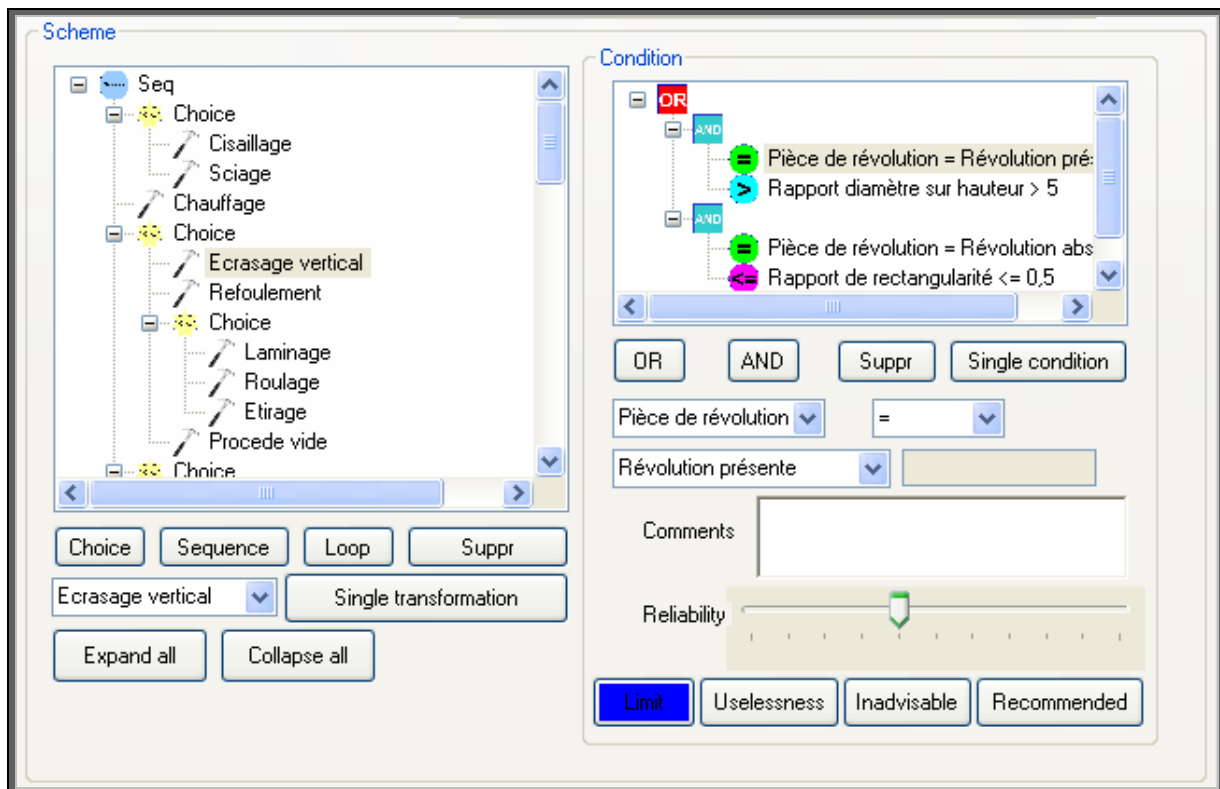


Figure 77 : Interface pour l'édition d'un schéma

4.2.3 Définition des pièces à étudier

Les pièces à étudier sont décrites à l'aide de paramètres. Si aucun paramètre n'est renseigné, il va de soi qu'aucune condition d'un schéma ne pourra être évaluée et les schémas utilisés pour l'évaluation resteront identiques. Le modèle utilisé ici est très simple : une instance de la classe **Pièce** possède une propriété *Nom* ainsi qu'une liste de références à des instances de la classe **ParameterValue** (vue précédemment). La Figure 78 illustre le lien entre la pièce et le processus de fabrication par l'intermédiaire des conditions.

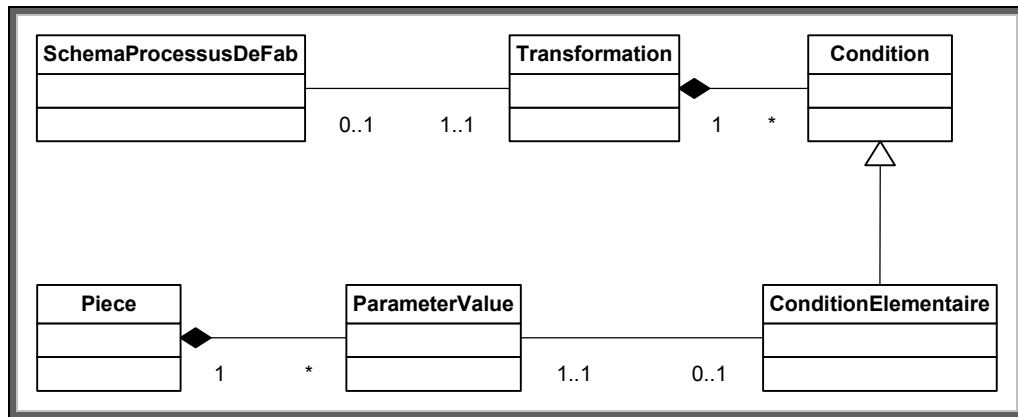


Figure 78 : Diagramme de classe : description d'une pièce et lien avec le processus de fabrication

L'interface développée pour pouvoir définir les pièces à étudier est présentée Figure 79 : l'utilisateur, après avoir sélectionné la pièce à éditer, peut ajouter, supprimer ou modifier des paramètres de la pièce.

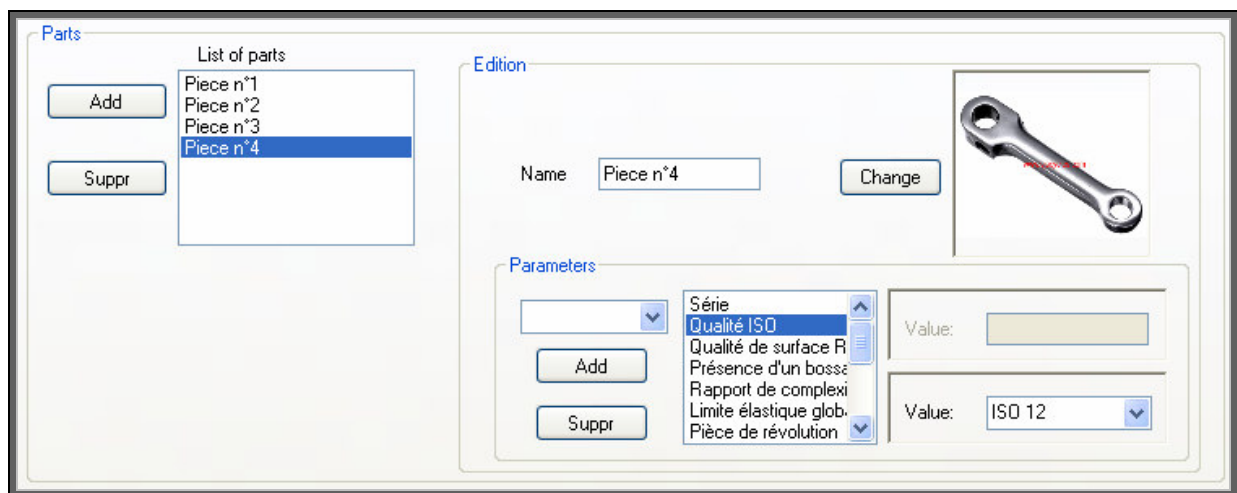


Figure 79 : Interface d'édition des pièces à étudier

4.2.4 Raisonnements sur les schémas à partir d'une pièce à étudier

Pour les besoins du raisonnement, certaines propriétés ont été rajoutées aux classes présentées précédemment.

La classe **Transformation** possède quatre propriétés consacrées aux raisonnements :

- *TagsConditions* : une liste de quatre attributs (pour représenter les quatre types de conditions : Limite, Inutilité, Déconseil d'expert, Préconisation) qui peuvent prendre la valeur *Vrai*, *Faux* ou bien *Non évalué* et qui correspondent au résultat de la fonction *evaluer* relativement à cette transformation pour une pièce donnée.
- *TagKept* : booléen indiquant que l'utilisateur a choisi de garder cette transformation pour qu'elle figure dans les possibilités lors de la déduction des processus de fabrication haut niveau, même si l'une de ses conditions considérées implique une élimination (cela revient à considérer que ses conditions sont non évaluées).

- *TagImposed* : booléen indiquant que l'utilisateur a choisi de privilégier cette transformation pour qu'elle figure dans tous les processus de fabrication haut niveau déduits.
- *TagSuppressed* : booléen indiquant que l'utilisateur a choisi de supprimer cette transformation de sorte qu'elle n'apparaisse dans aucun des processus de fabrication haut niveau déduits.

La classe **Piece** possède trois attributs dédiés aux résultats fournis par les traitements. Ces trois propriétés sont :

- *SchemasDeTravail* : une liste d'instances de la classe **SchemaProcessusDeFab** qui seront taggés à partir des paramètres renseignés de la pièce. Cela signifie que pour chaque transformation de ces schémas, la propriété *TagsConditions* sera renseignée. De plus l'utilisateur pourra modifier les propriétés *TagKept*, *TagImposed* et *TagSuppressed* pour chacune des transformations d'un schéma de travail. C'est à partir de ces schémas de travail que les processus de fabrication haut niveau pourront être déduits.
- *nbProcessusPossible* : entier qui stocke le nombre de processus de fabrication haut niveau qui peuvent être déduits à partir des schémas de travail (cette information est calculée à partir des informations dans les propriétés *TagsConditions*, *TagKept*, *TagImposed* et *TagSuppressed* des schémas).
- *ProcessusPossibles* : une liste d'instances de la classe **ProcessusDeFab**. Cette liste représente l'ensemble des processus de fabrication haut niveau déduits à partir des schémas de travail.

La classe **ProcessusDeFab** représente un processus de fabrication haut niveau et possède deux propriétés :

- *Sequence* : la séquence des transformations élémentaires qui constituent le processus de fabrication haut niveau
- *NecessaryConditions* : une liste de quatre instances de la classe **Condition** (une pour chaque type de condition). Cette liste représente les conditions nécessaires qui doivent être considérées par rapport au processus de fabrication haut niveau en question : il s'agit de conditions récupérées lorsqu'une transformation aurait dû être éliminée mais qui a cependant été intégrée selon la volonté de l'utilisateur (transformation gardée ou imposée) ou bien de conditions non évaluées (du fait de paramètres non renseignés). Ainsi l'utilisateur est informé des exigences qui pèsent sur les paramètres de la pièce par rapport à chacun des processus de fabrication considérés.

La première phase de l'étude d'une pièce est constituée de l'opération de taggage des schémas de processus de fabrication. Le principe du taggage d'un schéma est de parcourir le schéma et d'appeler pour chaque condition de chaque transformation la fonction *evaluer* en envoyant en argument l'instance de la classe **Piece** considérée. Le résultat est ensuite stocké dans la propriété *TagsConditions* de chaque transformation. Ce traitement est paramétrable : l'utilisateur peut choisir de l'effectuer sur un ou plusieurs schémas, en considérant tous les types de conditions ou certains seulement.

L'affichage des résultats (Figure 80) est réalisé à l'aide d'un code couleur : Chaque schéma analysé est consultable sous la forme d'un arbre (comme pour l'édition). Les transformations éliminées sont surlignées en rouge (cela signifie que l'une des conditions d'élimination considérée dans l'analyse a été évaluée à *Vrai* et donc par exemple qu'un

procédé est inutilisable pour la fabrication de la pièce), les transformations surlignées en vert sont celles dont toutes les conditions d'élimination considérées sont évaluées à *Faux*, les transformations non surlignées sont celles dont au moins l'une des conditions considérées a renvoyé la valeur *Non évalué* et aucune n'a renvoyé la valeur *Vrai*. Enfin les transformations qui ont leur condition de préconisation évaluée à *Vrai* sont surlignées en bleu.

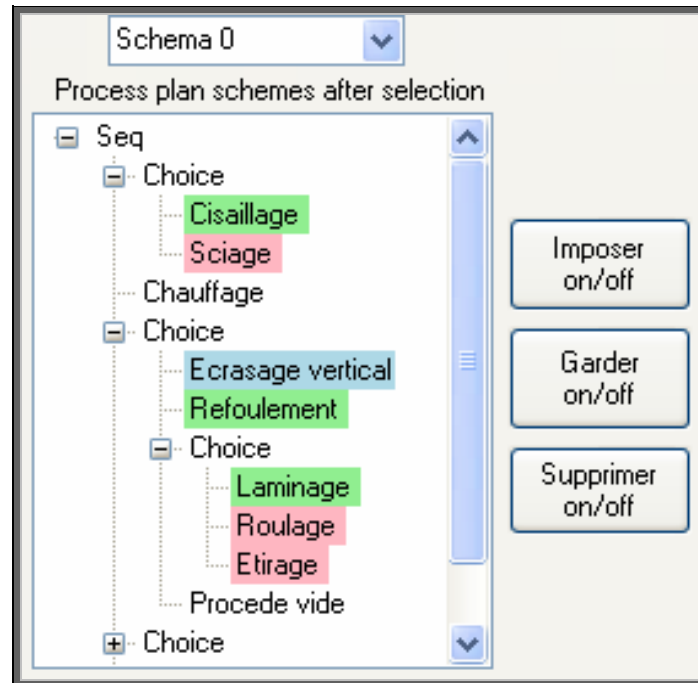


Figure 80 : Visualisation des résultats sur les schémas

La deuxième phase de l'étude est prise en charge par l'utilisateur : il décide pour chacun des schémas s'il impose, garde ou supprime certaines transformations (pour exprimer le fait qu'il souhaite par exemple conserver la possibilité d'utiliser tel ou tel procédé au cours de la fabrication). Ce choix revient à imposer des contraintes sur le processus de fabrication. Ces contraintes ne sont pas forcément compatibles avec la définition de la pièce et ces incompatibilités devront donc être relevées lors de la déduction des processus de fabrication haut niveau possibles. Ceci sera réalisé en affichant les conditions non respectées ou non évaluées dans la définition actuelle de la pièce pour chacun des processus de fabrication déduits.

La troisième phase est la déduction des processus de fabrication haut niveau en fonction des schémas taggés et des contraintes imposées par l'utilisateur. Nous explicitons ici deux fonctions qui permettent d'accomplir cette tâche.

Le cœur de l'algorithme de déduction des processus de fabrication est constitué de la fonction récursive de signature :

`getSegmentsProcessus(myTransfo : Transformation) : Liste de ProcessusDeFab`

Cette fonction a pour objectif de renvoyer la liste des processus de fabrication déductibles à partir d'une transformation. Appliquée à la racine d'un schéma, cette fonction renverra donc tous les processus de fabrication déduits de ce schéma en tenant compte des évaluations des conditions ainsi que des contraintes imposées par l'utilisateur (transformations imposées, gardées ou supprimées).

Voici le pseudo-code de cette fonction :

```

Fonction getSegmentsProcessus(myTransfo : Transformation) : Liste de ProcessusDeFab

    indicateurRajouterConditionNécessaire : booléen
    myListe : Liste de ProcessusDeFab

    Si la propriété TagSuppressed de myTransfo a la valeur Vrai alors :
        retourner une liste vide
    Fin Si
    Si l'une des trois conditions d'élimination de myTransfo a la valeur Vrai ou Non évalué et que
        myTransfo n'est ni imposée, ni gardée, et que sa condition de préconisation est fausse, alors :
        retourner une liste vide
    Fin Si
    Si l'une des trois conditions d'élimination de myTransfo a la valeur Vrai et que myTransfo est soit
        gardée, soit imposée, soit préconisée alors :
        indicateurRajouterConditionNécessaire = Vrai
    Fin Si
    //Le cas de base
    Si myTransfo est de type TransformationElementaire alors :
    A      Instancier un nouveau processus de fabrication avec une seule transformation dans la
           propriété Séquence : myTransfo
           Ajouter le nouveau processus de fabrication à myListe
    Fin Si
    //Les trois cas récursifs
    Si myTransfo est de type TransformationBoucle alors :
    B      myListeAller : Liste de ProcessusDeFab
           myListeRetour : Liste de ProcessusDeFab
           //Appel récursif pour récupérer la liste des processus déduits de la transformation aller
           myListeAller <- getSegmentsProcessus(myTransfo.TransformationAller)
           Ajout dans myListe de tous les processus de myListeAller
           Si la transformation retour de myTransfo n'est pas éliminée ni gardée ni imposée ni
           préconisée alors :
           //Appel récursif pour récupérer la liste des processus déduits de la
           transformation retour
           myListeRetour <- getSegmentsProcessus(myTransfo.TransformationRetour)
           myMacroSequence : Liste de Liste de ProcessusDeFab
           Ajout de myListeAller puis de myListeRetour puis à nouveau de myListeAller
           dans myMacroSequence
           //Développement de la macro-séquence :
           myListeAllerRetour : Liste de ProcessusDeFab
           myListeAllerRetour <- developMacroSequence(myMacroSequence)
           Ajout dans myListe de tous les processus de myListeAllerRetour
    Fin Si
    Fin Si
    Si myTransfo est de type TransformationChoix alors :
    C      Si il n'y a aucune transformation préconisée ou imposée dans la descendance de
           myTransfo alors :
           Ajout dans myListe de chaque processus issu du résultat de la fonction
           getSegmentsProcessus appliqué à chacune des transformations filles
    Sinon
           Ajout dans myListe de chaque processus issu du résultat de la fonction
           getSegmentsProcessus appliquée uniquement aux transformations filles
           préconisées, imposées gardées ou bien pour lesquelles il existe une
           transformation imposée ou préconisée dans la descendance.
    Fin Si
    Fin Si
    Si myTransfo est de type TransformationSequence alors :
    D      myMacroSequence : Liste de Liste de ProcessusDeFab
           Ajout dans myMacroSequence du résultat de la fonction getSegmentsProcessus appliquée
           aux transformations filles
           Ajout dans myList de chaque processus issu du résultat de la fonction
           developMacroSequence appliquée à myMacroSequence
    Fin Si
    Si indicateurRajouterConditionNécessaire = Vrai alors :
           Pour chaque processus de myList, mettre à jour la propriété NecessaryCondition avec les
           conditions d'élimination de myTransfo qui ont la valeur Vrai ou Non évalué.
    Fin Si
    Retourner myList
Fin Fonction

```

Commentaire sur les parties du pseudo-code :

A : Il s'agit du cas de base de la fonction récursive : lorsque l'on est en présence d'une transformation élémentaire, la liste des processus de fabrication déductibles est constituée de processus de fabrication ne comportant que cette transformation.

B, C, D sont les parties du pseudo-code qui concernent les trois cas récursifs :

B : le cas récursif si on est en présence d'une transformation boucle. On appelle la fonction récursive sur les transformations aller et retour et on construit la liste des processus de fabrication à l'aide de deux listes : l'une représentant les processus de fabrication pour la transformation aller de la boucle, l'autre pour ceux de la combinaison entre transformation aller et transformation retour (cette combinaison est représentée par une macro-séquence comme sur la Figure 81 que l'on développe).

C : le cas récursif dans le cas d'une transformation choix. Après avoir analysé la présence ou non de transformations préconisées ou imposées, on applique la fonction récursive au niveau de toutes les transformations ou seulement de celles préconisées ou imposées, le cas échéant.

D : le cas récursif pour une transformation séquence. Appel de la fonction récursive sur les transformations filles, stockage du résultat dans une macro-séquence (Figure 81) puis appel de la fonction *developMacroSequence*.

La fonction *developMacroSequence* est une fonction récursive qui permet la création d'une liste de **ProcessusDeFab** en distribuant entre eux les éléments **ProcessusDeFab** d'une macro-séquence, comme le montre la Figure 81.

```

Fonction developMacroSequence(myMacroSequence : Liste de Liste de ProcessusDeFab) : Liste de
ProcessusDeFab

    Si il n'y a qu'une liste dans myMacroSequence alors :
    //Le cas de base
        Renvoyer cette liste

    Sinon
    //Le cas récursif
        myList : Liste de ProcessusDeFab
        myList1 : Liste de ProcessusDeFab
        myList2 : Liste de ProcessusDeFab
        myList1 <- premier élément de myMacroSequence
        //appel récursif
        myList2 <- developMacroSequence(myMacroSequence sans son premier élément)
        Pour chaque ProcessusDeFab p1 dans myList1
            Pour chaque ProcessusDeFab p2 dans myList2
                Concatener p1 et p2 ainsi que leurs conditions NecessaryCondition dans un
                nouveau ProcessusDeFab p3
                Ajouter p3 à myList
            Fin Pour
        Fin Pour
        Renvoyer myList
    Fin Si

Fin Fonction
    
```

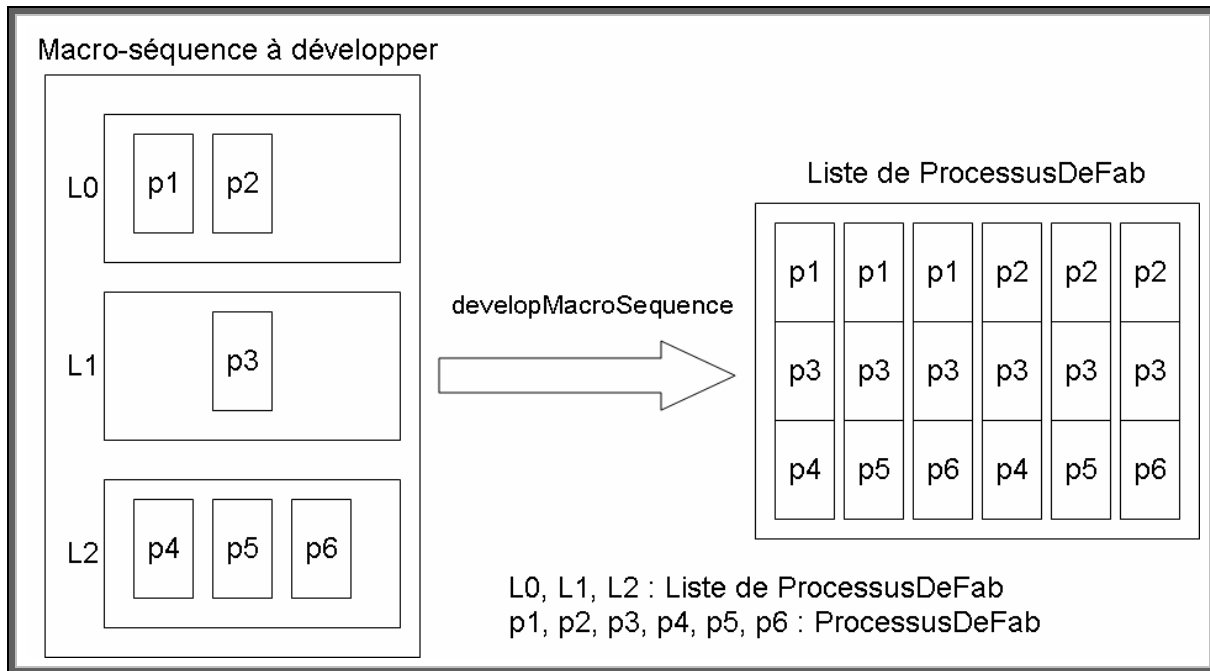


Figure 81 : Fonction *developMacroSequence*

L'interface de visualisation des résultats (Figure 82) présente la liste des processus de fabrication haut niveau déduits (dans l'application développée, nous avons fait le choix de les afficher uniquement s'il y en a moins de 20 pour des raisons d'affichage et de temps de calcul). Pour chaque processus de fabrication, il est possible de connaître la séquence des transformations élémentaires ainsi que la condition nécessaire associée qui n'est pas remplie par la définition actuelle de la pièce.

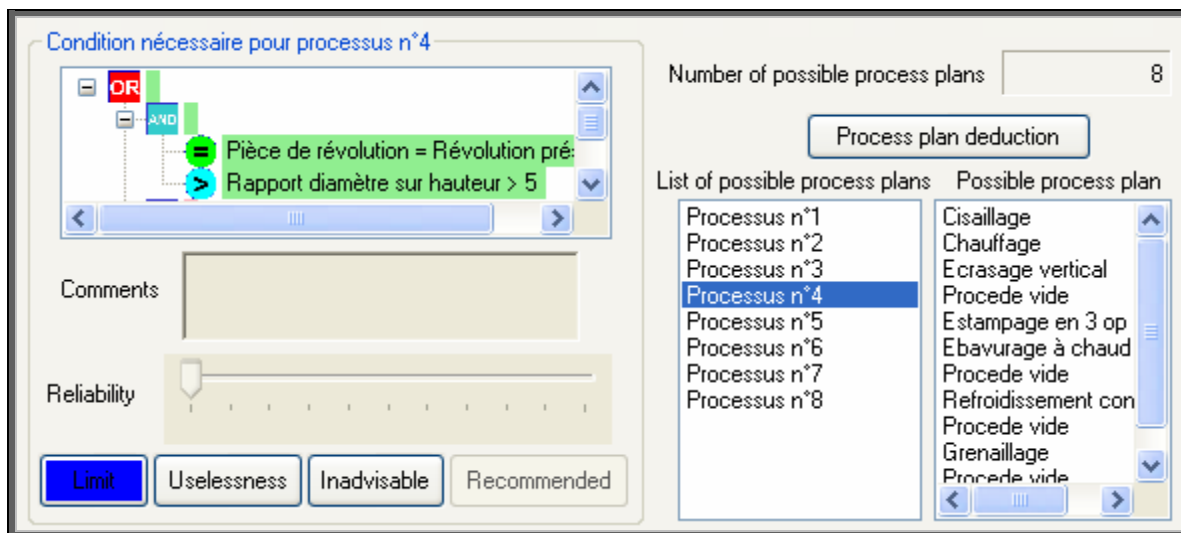


Figure 82 : Interface de déduction des processus de fabrication

4.2.5 Conclusion sur l'implémentation de la seconde formalisation

L'implémentation réalisée est fonctionnelle et permet de réaliser concrètement l'exploitation de schémas de processus de fabrication. Le développement a pu s'effectuer avec des moyens de développements courants dans un environnement de programmation objet, sans utilisation d'outils complémentaires (l'application est autonome).

Plusieurs inconvénients peuvent néanmoins être relevés :

- la difficulté de comprendre le formalisme au premier abord : le fonctionnement doit notamment être bien compris pour pouvoir écrire des schémas exploitables. L'écriture des conditions d'élimination par exemple peut poser des difficultés : il est nécessaire de raisonner par la négative étant donné que l'on élimine lorsque la condition est vérifiée.
- La convivialité de l'interface est à améliorer pour avoir une utilisation plus intuitive et une présentation du formalisme plus accessible.

Cette implémentation a finalement été retenue et le développement en a été poursuivi pour obtenir l'application nommée IP3FRTool. Dans la section suivante seront développées quelques remarques supplémentaires sur le développement et les fonctionnalités de cette application avant de présenter un exemple d'utilisation et les évolutions envisagées.

4.3 Utilisation de l'application IP3FRTool et évolutions envisagées

4.3.1 Remarques sur le développement de l'application

Le développement de l'application a été effectué sur le framework.Net 2.0 de Microsoft, en langage Visual Basic .Net. Cette application est donc exécutable sur toute machine possédant le framework.Net 2.0. De plus, il est possible grâce à cet environnement de valoriser ces travaux au moyen d'une application web, le passage étant relativement aisé.

L'organisation des schémas de processus de fabrication est réalisée avec des bibliothèques appelées « référentiels » (qui seront instance d'une classe **Referentiel**). Le raisonnement que l'on effectue sur une pièce s'effectue ainsi en sélectionnant les référentiels à prendre en compte. C'est à l'utilisateur que revient la tâche de choisir l'organisation de ses schémas de processus de fabrication.

Pour clarifier la structure des différents éléments de l'application et pour faciliter la sauvegarde, une classe **Environnement** a été créée (Figure 83). Cette classe possède des références aux différentes classes permettant de définir les spécifications des paramètres, les procédés, les schémas, les pièces à étudier.

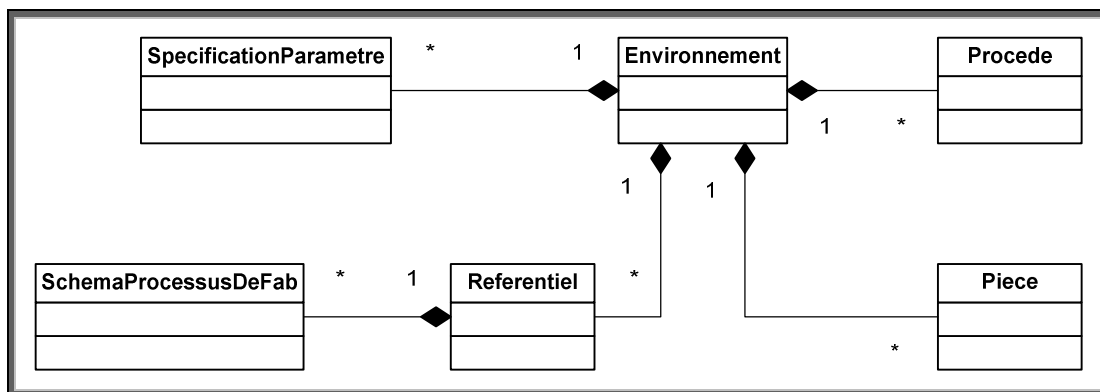


Figure 83 : Diagramme de classe : environnement

Des fonctions de sauvegarde et de chargement sont accessibles pour permettre à l'utilisateur de sauvegarder tout un environnement. Les fichiers de sauvegarde sont écrits en XML. Chaque classe qui a été développée possède deux fonctions *sauvegarder* et *charger* qui respectivement renvoient et lisent des données au format XML. Par l'intermédiaire d'appels en cascade, il est ainsi possible de sauvegarder une instance de la classe Environnement. Le fait d'avoir des fonctions de sauvegarde et de chargement pour toutes les classes permettra à

l'avenir de charger une partie de l'environnement (par exemple uniquement les schémas ou bien les pièces à étudier).

Une fonctionnalité de réinitialisation a également été rajoutée pour permettre de créer un nouveau contexte d'étude avec un environnement vierge.

4.3.2 Interfaces de l'application

L'interface de l'application présente trois principaux onglets :

- l'onglet **Configuration** : permet de renseigner tout ce qui concerne les spécifications des paramètres ainsi que les procédés utilisables dans les transformations élémentaires
- l'onglet **Knowledge** : l'utilisateur peut y éditer les schémas et les organiser en référentiels
- l'onglet **Case studies** : permet de définir les pièces étudiées, de lancer les analyses et d'afficher les résultats.

L'onglet **Configuration** se présente tel que sur la Figure 84. En haut se situe l'interface de spécification des paramètres présentée précédemment. Les procédés peuvent être renseignés en bas, un espace a été réservé pour permettre l'évolution de l'application en ajoutant d'autres caractéristiques pour les procédés.

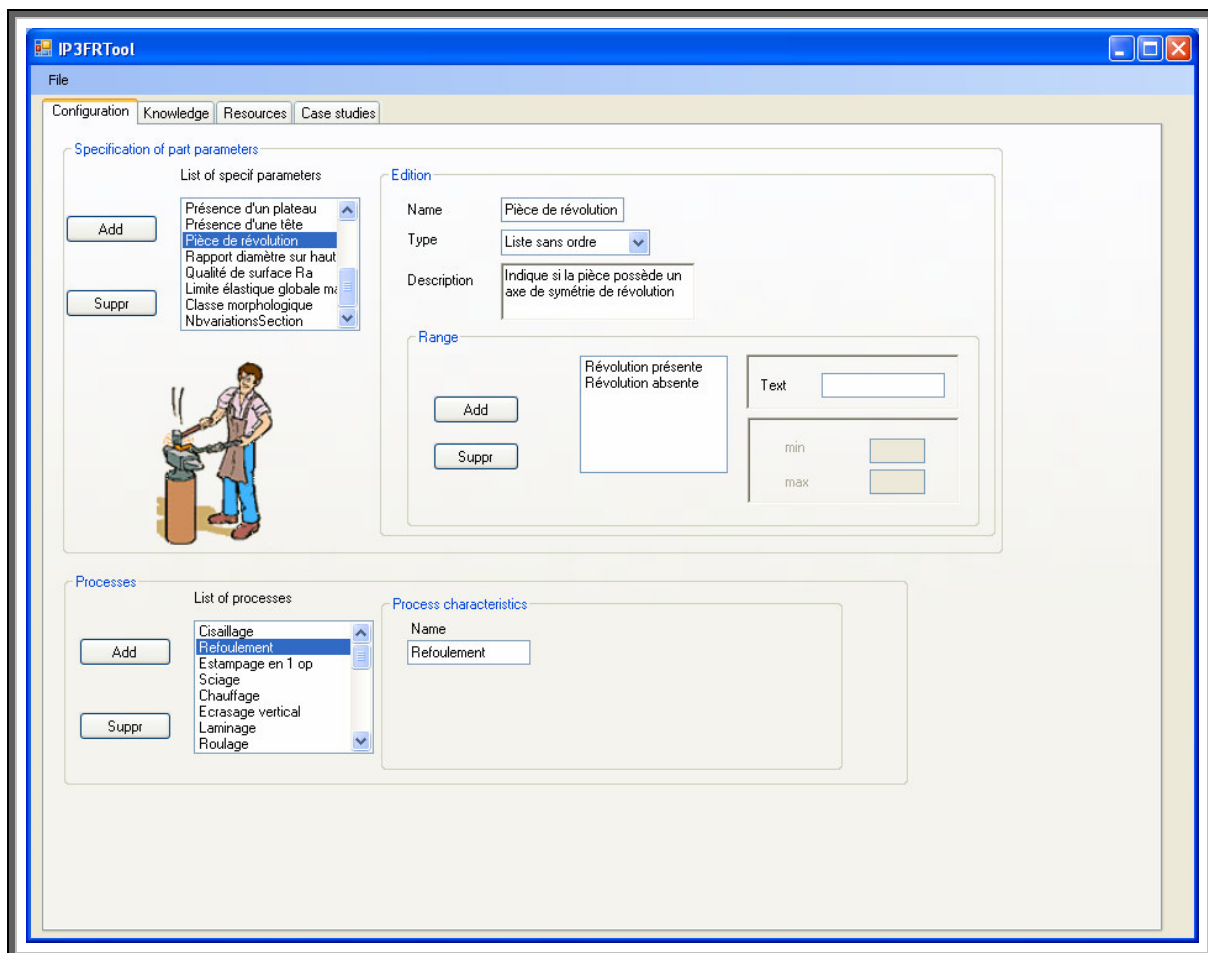


Figure 84 : Onglet Configuration

L'onglet **Knowledge** (Figure 85) possède également deux parties : la gestion des référentiels et la gestion des schémas contenus dans les référentiels (présentée précédemment). Chaque référentiel est associé à un utilisateur (personnage), mais ceci pourra être remis en cause lors de versions futures.

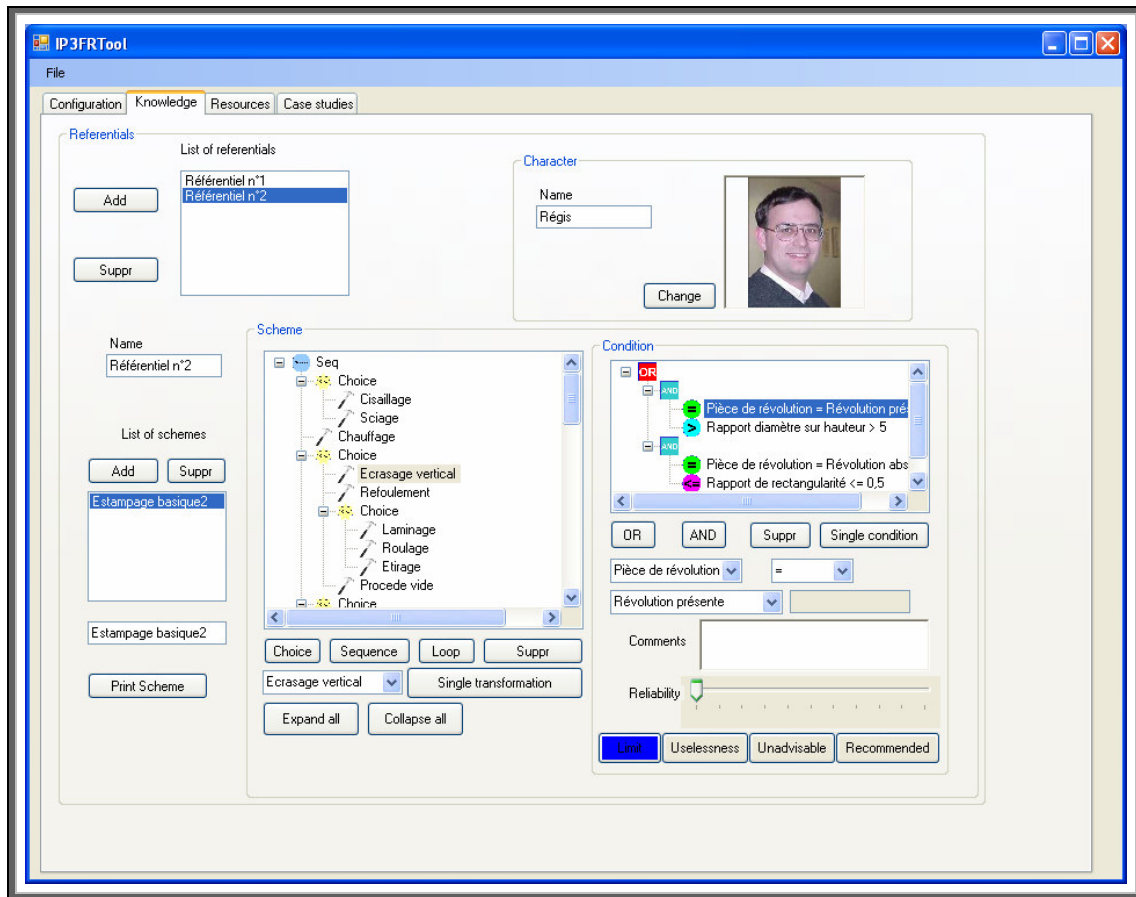


Figure 85 : Onglet Knowledge

Enfin l'onglet **Case studies** (Figure 86) est séparé en deux parties : la définition des pièces (présentée auparavant) en haut, l'analyse d'une pièce en bas.

Pour l'analyse d'une pièce, il s'agit de sélectionner :

- la pièce à étudier
- les référentiels à prendre en compte lors de l'analyse
- les types de condition à prendre en compte lors de l'analyse

Si plusieurs schémas ont pu être analysés, une zone de liste déroulante permet de sélectionner l'affichage du résultat sur chaque schéma. Le nombre des possibilités est calculé directement après le taggage des schémas et donc affiché en même temps que ceux-ci.

L'utilisateur peut choisir d'imposer, de garder ou de supprimer des transformations au moyen des trois boutons à droite du visualisateur de schéma. Une transformation imposée est marquée en gras, une transformation gardée est indiquée en italique et une transformation supprimée est affichée barrée. Pour chacune de ces actions, le calcul du nombre de processus déductibles est à nouveau réalisé et mis à jour sur l'interface.

Lorsque le nombre de processus de fabrication déductibles est inférieur à 20 (valeur fixée pour cette version), l'utilisateur peut lancer la déduction des processus de fabrication

dont le résultat s'affiche sur la droite. En sélectionnant un processus de fabrication dans la liste il peut voir s'afficher sur la droite la séquence des transformations élémentaires. De plus les conditions nécessaires liées à ce processus de fabrication sont affichées sur le visualisateur de conditions (au centre).

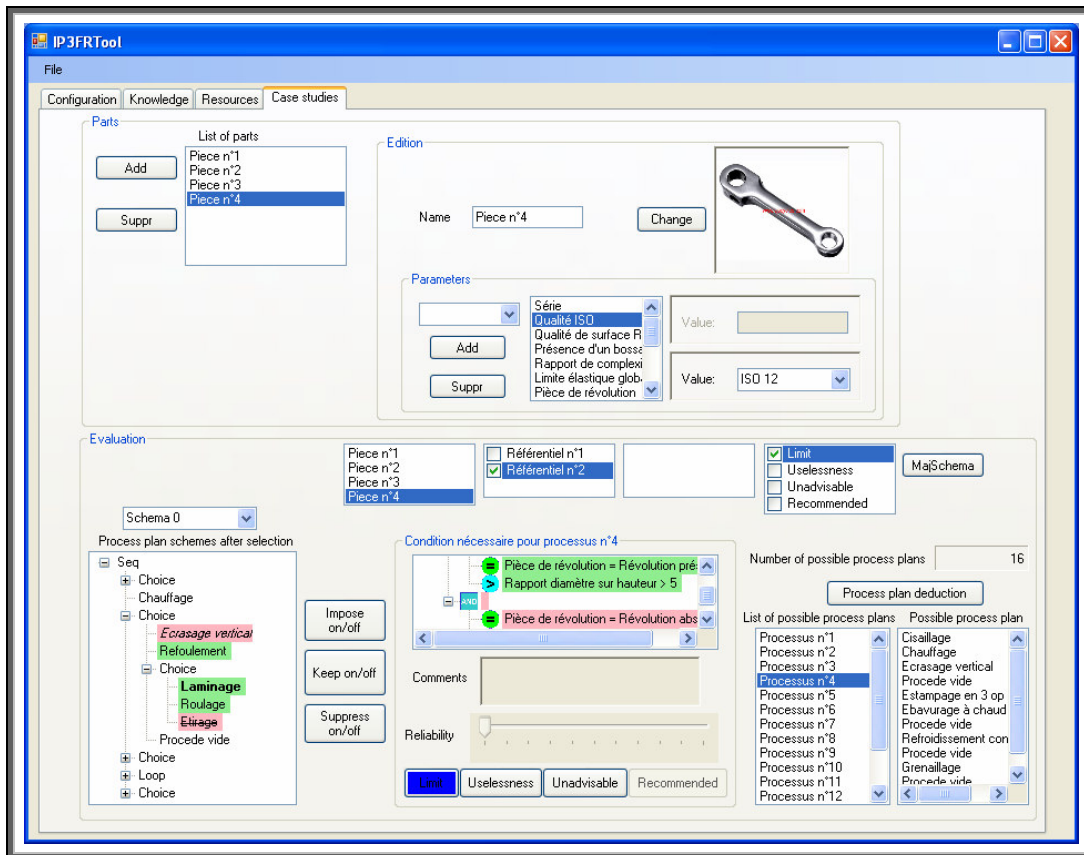


Figure 86 : Onglet Case studies

4.3.3 Positionnement au niveau de la démarche

La configuration des paramètres utilisables, la configuration des procédés ainsi que la gestion des schémas de processus de fabrication sont des étapes préliminaires à la démarche. Ces étapes sont assurées par les experts du métier de la forge. Seul l'onglet **Case studies** s'inscrit dans la démarche présentée au chapitre 2.

La première boucle qui correspond au sens de l'intégration « Choix des procédés » est supportée par l'outil avec l'affichage des conséquences sur les schémas : les transformations éliminées ainsi que celles préconisées sont mises en évidence. De plus, si le nombre de processus de fabrication haut niveau déductibles n'est pas trop important, il est possible de les visualiser.

La deuxième boucle (sens de l'intégration : « Conception pour la fabrication ») correspond à l'imposition des contraintes sur le processus de fabrication et la répercussion de celles-ci au niveau de la définition de la pièce. Cela est assuré ici grâce à la possibilité pour l'utilisateur d'imposer, de garder ou de supprimer des transformations dans les schémas. Ainsi sur chaque processus déduit contenant au moins une transformation qui aurait dû être éliminée, des conditions nécessaires s'affichent pour mettre en exergue :

- les paramètres de la pièce qui ne sont pas en accord avec les contraintes imposées sur le processus de fabrication

- les paramètres de la pièce qui n'ont pas encore été renseignés et qui devront respecter certaines contraintes imposées par le processus de fabrication.

Ainsi, il est possible de revenir sur la conception de la pièce à la lumière de ces indications.

4.3.4 Evolutions envisagées

Plusieurs évolutions de présentation et de fonctionnalités au niveau de l'interface sont envisageables. Les trois principales que l'on peut citer ici sont issues de l'utilisation de l'application par d'autres personnes que le développeur :

- une fonctionnalité de copier/coller faciliterait la tâche d'édition des schémas étant donné qu'un certain nombre de structures peuvent revenir d'un schéma à l'autre.
- le chargement ou la sauvegarde d'une partie de l'environnement (par exemple uniquement les pièces, ou uniquement les schémas) pourrait s'avérer intéressant.
- une meilleure présentation des résultats de l'analyse serait souhaitable, notamment pour l'affichage des processus de fabrication déduits.

Ces évolutions sont envisageables, cependant on peut noter pour les deux premières qu'il peut se poser un problème de contexte : les schémas, les pièces sont définies à partir d'un contexte qui est constitué de spécifications de paramètres et de procédés utilisables. Pour qu'un copier/coller soit possible, ou bien pour que le chargement d'une partie de l'environnement soit réalisable, il est impératif que le contexte soit compatible (par exemple, il ne faut pas qu'un procédé utilisé dans un schéma que l'on charge soit inexistant dans le contexte présent dans l'application au moment du chargement).

D'autres fonctionnalités d'un plus haut niveau sont concevables :

- **Définir des conditions par défaut lors de la configuration des procédés utilisables** : certains procédés vont être indépendants au contexte dans lequel ils seront utilisés. C'est le cas par exemple des procédés de Cisailage ou de Sciage. Les conditions définies sur les transformations utilisant ces procédés seront a priori invariables d'un schéma à l'autre. Une fonctionnalité permettant de définir une condition par défaut est dans ce cas intéressante : dès que le procédé est utilisé dans une transformation élémentaire, cette dernière se verra attribuer la condition par défaut du procédé. Il sera bien sûr toujours possible de modifier cette condition, mais dans le cas général, cela rendra l'édition d'un schéma plus rapide.
- **Vérifier la cohérence d'un schéma** : jusqu'à présent il est tout à fait possible de définir des conditions qui rendent une transformation impossible quels que soient les paramètres de la pièce. Il est de même possible de définir exactement la même transformation plusieurs fois après une transformation de type choix, ce qui n'a pas de sens. Afin d'aider l'utilisateur dans la définition d'un schéma de processus de fabrication, il peut être intéressant d'adjoindre une fonctionnalité de vérification du schéma qui permettra d'identifier facilement les erreurs d'édition.
- **Association et traitement des indicateurs** : l'indicateur de fiabilité sur les conditions n'est pour l'instant pas utilisé dans l'application. L'idée est de réaliser un classement des processus de fabrication lors de leur déduction. Ce classement serait basé sur un ou plusieurs indicateurs que l'utilisateur pourrait

choisir. L'indicateur de fiabilité sur les conditions pourra faire partie de ces indicateurs ainsi que d'autres indicateurs portant par exemple sur le coût ou encore sur le facteur de sécurité de la pièce.

- **L'onglet Ressources** : un onglet **Ressources** a été prévu sur l'interface pour compléter l'intégration avec les ressources. L'utilisateur pourrait définir un ou plusieurs ateliers possédant chacun une ou plusieurs machines. Lors de la déduction des processus de fabrication, il serait possible alors non seulement de préciser quels référentiels et quels types de conditions sont utilisés, mais également quels seraient les ateliers considérés (avec la possibilité de n'en choisir aucun si l'on ne souhaite pas prendre en compte les ressources dans un premier temps). Une réflexion doit en revanche être menée sur le lien que l'on établit entre ressources, procédés, pièce et processus de fabrication. Dans une première approche, une proposition possible est d'émettre des conditions portant sur la pièce en fonction du procédé : une ressource est ou n'est pas utilisable pour tel procédé lorsque tel ou tel paramètre de la pièce possède telle valeur.

L'ensemble de ces évolutions sera pris en considération pour une version future de l'application mais une première phase d'utilisation avec la version actuelle est prévue afin de détecter d'autres besoins éventuels et d'établir un premier retour d'expérience.

4.4 Exemple d'étude

D'après l'entretien réalisé avec Pierre Krumpipe (CETIM), nous avons pu mettre à l'épreuve le formalisme et l'application. Nous décrivons ici les différentes phases de cette expérimentation.

La première étape a été de définir dans l'application les différents paramètres recueillis au cours de l'entretien. Nous n'avons pris en compte pour cette étude que 7 paramètres parmi ceux recueillis au cours de l'entretien. Il s'agit des paramètres pour lesquels les conditions ont pu être clairement établies. En voici la liste (voir annexe 3 pour le détail de ces paramètres) :

- Classement morphologique
- Nombre de variations de section
- Présence d'un débouchage
- Présence d'un cambrage
- Pièce de révolution
- Niveau de qualité
- Série

Ensuite nous avons défini la liste des 23 procédés qui seront utilisés dans le schéma. Nous ne présentons pas le schéma ici, il se trouve en annexe 3, ou bien présenté sur la Figure 54. Lors de la construction de ce schéma, deux observations ont pu être faites :


- Afin de laisser certaines opérations optionnelles, nous avons dû définir un procédé dénommé « Procédé vide » que nous pouvons utiliser dans une transformation élémentaire concurrente de transformations que l'on souhaite optionnelles. Ainsi si aucune condition n'est appliquée, les deux possibilités (intégrer la transformation optionnelle dans le processus de fabrication ou non) restent présentes au moment de la déduction.

- Le fait de considérer plusieurs types de conditions s'est avéré utile, notamment la séparation des conditions liées aux limites et des conditions liées à l'inutilité des procédés. La présentation est ainsi plus claire et il est possible d'exprimer plus de conditions par ce moyen que s'il y avait un unique type de condition d'élimination (on aurait tendance alors à laisser des transformations qui utilisent des procédés inutiles).

Le schéma comporte ainsi 50 transformations dont 3 transformations séquence, 14 transformations choix et 33 transformations élémentaires. Parmi ces transformations, 16 sont conditionnées. Il y a en tout 21 conditions exprimées dont 2 conditions liées aux limites des procédés, 13 conditions liées à l'inutilité, 1 condition représentant le déconseil d'un expert et 5 conditions de préconisation. Le schéma non contraint permet de déduire en tout 7680 possibilités de processus de fabrication haut niveau.

Pour tester ce schéma et l'application, nous avons opté pour le déroulement suivant : A partir d'un plan de pièce, l'utilisateur déduit les paramètres pris en compte pour ce schéma. Ensuite l'application est utilisée pour la déduction des processus de fabrication en imposant éventuellement certaines transformations du schéma. Nous sommes partis sur l'exemple d'une bielle (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le plan permet de déduire les caractéristiques morphologiques suivantes :

		
-	Classe morphologique : 315	
-	Nombre de variations de section : 2	
-	Présence d'un débouchage : oui	
-	Présence d'un cambrage : non	
-	Symétrie de révolution : non	
-	Niveau de Qualité : E (norme EN 10243-1 :1999)	
-	De plus nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'une grande série : le client demande une quantité de 30 000 pièces par an.	

A partir de ces informations, et en prenant en compte tous les types de conditions, le nombre de possibilités de processus de fabrication passe de 7680 à 80. Au cours du traitement, 4 transformations ont été éliminées directement du fait de conditions d'inutilité et 4 transformations ont été préconisées. Par exemple, le fait que la classe morphologique de la pièce soit la classe 315 a permis d'éliminer les possibilités de faire du refoulement et de l'écrasage. En revanche une opération de laminage a été préconisée du fait de la série importante et de la classe morphologique. Sans prendre en compte les transformations préconisées, il y aurait 640 possibilités.

Si l'on considère ensuite que l'on impose un refroidissement contrôlé un grenailage et la non utilisation de la galvanisation dans les processus de fabrication déduits, il ne reste alors que 8 possibilités de processus de fabrication que voici :

Processus 1	Processus 2	Processus 3	Processus 4
Cisaillage	Cisaillage	Cisaillage	Cisaillage
Chauffage	Chauffage	Chauffage	Chauffage
Laminage	Laminage	Laminage	Laminage
Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide
Répartition	Répartition	Répartition	Répartition
Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche
Estampage de finition	Estampage de finition	Estampage de finition	Estampage de finition
Ebavurage à chaud	Ebavurage à chaud	Refroidissement contrôlé	Refroidissement contrôlé
Débouchage à chaud	Procédé vide	Débouchage à froid	Procédé vide
Refroidissement contrôlé	Refroidissement contrôlé	Ebavurage à froid	Ebavurage à froid
Grenailage	Grenailage	Grenailage	Grenailage
Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide
Calibrage à froid	Calibrage à froid	Calibrage à froid	Calibrage à froid

Processus 5	Processus 6	Processus 7	Processus 8
Cisaillage	Cisaillage	Cisaillage	Cisaillage
Chauffage	Chauffage	Chauffage	Chauffage
Laminage	Laminage	Laminage	Laminage
Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide
Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide
Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche	Estampage d'ébauche
Estampage de finition	Estampage de finition	Estampage de finition	Estampage de finition
Ebavurage à chaud	Ebavurage à chaud	Refroidissement contrôlé	Refroidissement contrôlé
Débouchage à chaud	Procédé vide	Débouchage à froid	Procédé vide
Refroidissement contrôlé	Refroidissement contrôlé	Ebavurage à froid	Ebavurage à froid
Grenailage	Grenailage	Grenailage	Grenailage
Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide	Procédé vide
Calibrage à froid	Calibrage à froid	Calibrage à froid	Calibrage à froid

On remarque que ces processus de fabrication ne varient que sur la décision de faire ou non le débouchage en forge, de le faire à chaud ou à froid et d'effectuer une opération de répartition ou non.

Enfin, pour illustrer le retour possible sur la conception de la pièce (ce qui correspond à la boucle du second sens de l'intégration représentée Figure 32 au chapitre 2) : l'utilisateur peut imposer une transformation qui a été éliminée (sur la Figure 88 : le Refoulement) et visualiser la condition nécessaire sur la pièce pour les processus de fabrication dans lesquels cette transformations apparaît (ici la condition porte sur le nombre de variations de section qui est actuellement supérieur à 1). De même, pour les transformations comportant des conditions

qui n'ont pas pu être évaluées car les paramètres n'étaient pas renseignés, les conditions nécessaires sont données par rapport aux valeurs que devront respecter ces paramètres.

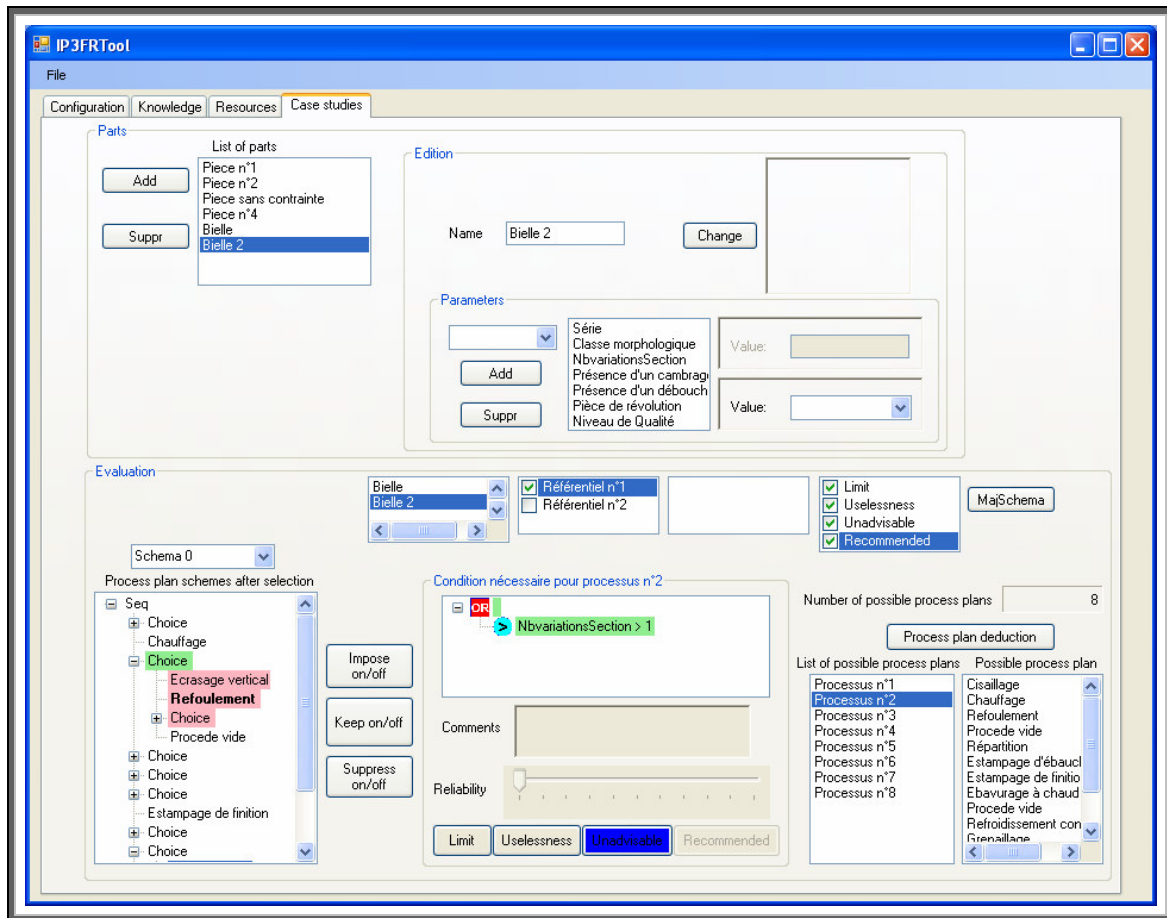


Figure 88 : Contrainte sur la pièce

Le schéma utilisé ici est le premier schéma qui a été récupéré et manque probablement de précisions, notamment dans l'expression des conditions. Il n'y a pour l'instant qu'une faible proportion de transformations qui sont conditionnées dans ce schéma. De plus il serait possible de raffiner la définition des procédés en précisant leurs variantes et d'obtenir ainsi un schéma plus complet. Cependant le fonctionnement de l'application répond à ses spécifications :

- avec la possibilité de montrer les contraintes sur le schéma de processus de fabrication dues aux paramètres de la pièce, et les possibilités de processus de fabrication haut niveau, si leur nombre n'est pas trop élevé
- avec la possibilité de montrer les exigences que doit respecter la pièce lorsque l'utilisateur impose des contraintes au niveau du schéma de processus de fabrication (imposer certaines transformations par exemple).

4.5 Conclusion

Les deux approches présentées au chapitre 3 ont pu être implémentées. L'implémentation basée sur une ontologie n'a pas été poursuivie du fait des différentes difficultés rencontrées, au niveau :

- du développement informatique : utilisation de plusieurs outils distincts pour que l'application fonctionne

- du langage OWL : problèmes posés lors de l'utilisation de littéraux, ceci a conduit aux classes d'intervalles et à une lourdeur pour l'expression
- de la collecte des connaissances : difficultés lors de la récupération de familles de pièces. De même, les règles permettant les classifications des procédés n'ont pu être établies.

Les difficultés rencontrées au cours du développement de cette première approche ont conduit à imaginer la suivante : celle par schémas de processus de fabrication. Cette fois, le formalisme est plus proche des connaissances des experts métier et également plus lisible. L'implémentation associée s'est concrétisée en un outil nommé IP3FRTool. Cet outil permet un support des deux sens de l'intégration définis au chapitre 1. Cette concrétisation est à améliorer à la fois par rapport à l'interface mais également par rapport aux fonctionnalités proposées.

Conclusion générale

Les travaux de cette thèse ont porté sur la problématique exprimée par la question suivante :

Comment mettre en œuvre l'intégration des phases de conception détaillée du produit et de conception préliminaire du processus de fabrication pour l'obtention de produits forgés ?

Cette problématique se positionne dans le cadre de l'ingénierie intégrée qui permet la prise en compte des différents points de vue liés au cycle de vie du produit (conception, fabrication, industrialisation, utilisation,...) d'une façon coordonnée et cohérente en réduisant la phase de conception.

Dans le chapitre 1, nous avons pu donner une description du domaine de la forge en présentant les différents procédés de fabrication, les évolutions du métier ainsi que les spécificités propres à ce domaine. Nous soulignons notamment le fait que contrairement à l'usinage où une approche par décomposition géométrique est possible, il faut considérer en forge la pièce dans sa globalité. De plus, il est important de noter que le séquençement des opérations d'un processus de fabrication en forge est moins varié qu'en usinage (il y a essentiellement quelques processus de fabrication principaux avec des variantes). Le besoin en intégration pour le domaine de la forge est justifié par le progrès des procédés de forge associé à une mondialisation sévère. En outre, de nombreuses études ont certes été menées dans le domaine de l'ingénierie intégrée mais la majeure partie concerne le domaine de l'usinage.

Les différentes façons de mener l'intégration ont été également présentées et ont permis de distinguer deux aspects principaux :

- le sens « **choix des procédés** » : il s'agit de déterminer à partir des données du produit quelles sont les contraintes à respecter au niveau du processus de fabrication
- le sens « **conception pour la fabrication** » : déterminer à partir des données du processus de fabrication quelles sont les contraintes à respecter au niveau du produit.

La plupart des approches possibles pour supporter l'intégration se concentrent sur le sens « **choix des procédés** ». Un des objectifs de nos travaux a donc été de développer une approche permettant de supporter les deux sens.

Les outils mettant en œuvre les approches d'intégration reposent sur des méthodes de gestion de la connaissance. Ces différentes méthodes ont été évaluées. Il en ressort principalement que la maintenance des systèmes de gestion de la connaissance ainsi que la simplicité et la transparence de leur fonctionnement constituent des points critiques auxquels il est primordial de faire attention au cours de leurs développements.

Nous pouvons discerner trois apports principaux (Figure 89) qui répondent à la problématique énoncée :

- Une démarche concrétisant les deux sens de l'intégration
- Un formalisme (par schéma de processus de fabrication) permettant de représenter les connaissances faisant le lien entre le produit et le processus de fabrication
- Un outil support de la démarche, exploitant le formalisme proposé.

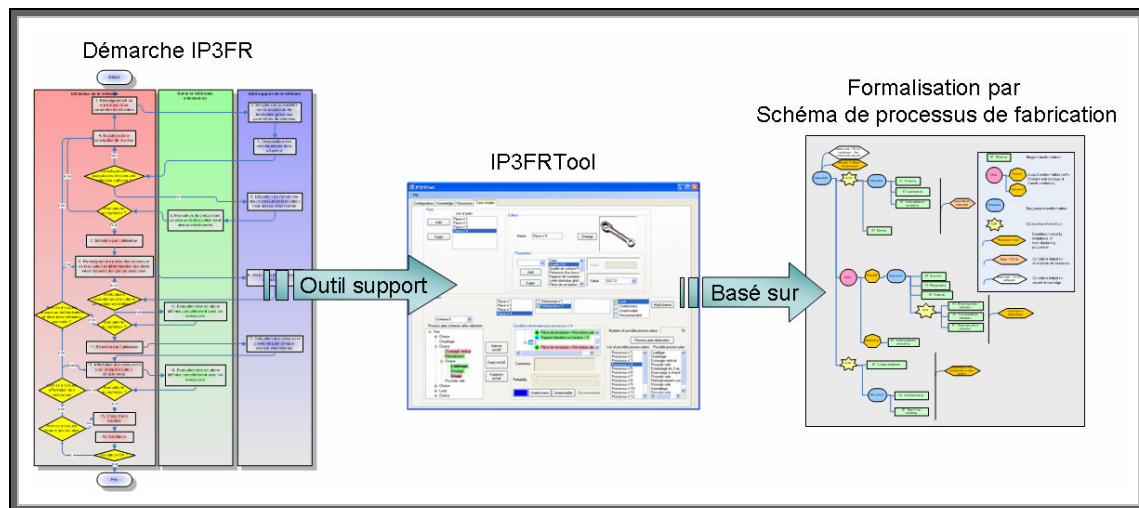


Figure 89 : Bilan des apports

Dans le chapitre 2 a été présentée la démarche que nous avons proposée et qui est nommée IP3FR (pour Intégration Produit – Procédé – Processus de Fabrication – Ressources). Plusieurs aspects importants de l’approche sont à souligner : les deux sens de l’intégration sont pris en charge, le travail de conception est réparti à différents moments. De plus, la considération conjointe de plusieurs solutions possibles présente l’avantage de pouvoir comparer entre elles plusieurs alternatives, le choix final d’une possibilité n’ayant lieu qu’au terme de la démarche.

L’outil qui vient en support à cette démarche doit utiliser un formalisme pour la représentation des connaissances qui établira le lien entre les données du produit et les données du processus de fabrication.

Deux formalismes possibles ont été présentés dans le chapitre 3, leurs implémentations possibles ont été détaillées au cours du chapitre 4.

Le premier formalisme possible se base sur une approche utilisant des classifications et peut être réalisé par l’opérationnalisation d’une ontologie. En raison des difficultés posées par le développement et par la collecte de connaissances exploitables par ce formalisme, la réalisation est restée au stade du maquettage. Une réflexion a été menée par rapport aux connaissances collectées au cours des entretiens et un deuxième formalisme a ainsi pu être conçu.

Le deuxième formalisme repose sur la définition de ce que nous avons nommé « schéma de processus de fabrication » et permet le support des tâches pour les deux sens de l’intégration. Synthétiquement, un schéma de processus de fabrication est un processus de fabrication avec des degrés de liberté et des règles contextuelles appliquées aux transformations. Ces règles sont appelées des conditions, elles sont reliées aux paramètres de la pièce et permettent l’élimination ou la préconisation d’une transformation lors du traitement. Un outil informatique a pu être implémenté pour l’utilisation de ce formalisme. Cet outil nommé IP3FRTool permet la définition et l’exploitation des schémas de processus de fabrication. Ce formalisme peut être comparé à une extension du domaine de la configuration des produits appliqué à l’ensemble produit – processus de fabrication : les options que l’on choisit au niveau du produit ou bien du processus de fabrication posent des contraintes par rapport aux autres données du produit et du processus de fabrication.

Pour les deux formalismes, la modélisation du produit se limite à la prise en compte d’une liste de caractéristiques globales sur la pièce. La considération d’un modèle plus

élaboré tel qu'un modèle peau-squelette comme Skander [Skander 2006] ou bien la récupération automatique de ces paramètres à partir d'un modèle de pièce exprimé en STEP par exemple font partie des perspectives.

Plusieurs entretiens avec des experts du métier de la forge ont eu lieu au cours de cette thèse. La collecte des connaissances qui a permis d'aboutir au formalisme proposé et de le tester est une première étape à la validation de cet apport. Même si les cas d'illustrations présentés sont classiques, ils permettent de vérifier la faisabilité de l'approche. Il serait néanmoins intéressant de tester la méthode et l'outil sur de véritables cas industriels. Deux perspectives sont à prévoir sur ce point :

- récupérer des schémas de processus de fabrication propres aux entreprises de forge et les tester sur des exemples de pièces en production actuelle ou à venir. Ces schémas seraient relativement généraux sans rentrer dans le détail des conditions opératoires.
- tester le formalisme sur des cas plus précis et le faire évoluer le cas échéant pour y exprimer plus complètement des processus de fabrication (éventuellement proche des conditions opératoires). Cela serait possible dans un premier temps en se penchant sur une famille de pièce bien spécifique. Les travaux de l'équipe IFAB du LGIPM sur la conception intégrée des pignons forgés net shape ([Berviller 2002], [Berviller 2004], [Bruyère 2006], [Baudouin 2006]) pourraient servir à ce test. Ceci permettrait de voir à quel point il est possible d'être précis au niveau des paramètres et des schémas de processus de fabrication.

Ces deux expérimentations permettraient d'obtenir des retours de la part d'experts du métier par rapport à la démarche, le formalisme ou l'outil support, et permettront de les faire évoluer.

Concernant la démarche IP3FR, bien qu'appliquée à la forge dans notre cas, celle-ci peut a priori s'adapter à d'autres domaines de fabrication, le principe et sa description étant indépendants de tout domaine. De même la formalisation et l'application développée sont relativement génériques puisqu'il est possible de définir soi-même les procédés et les paramètres utilisables. Cette généralité pourrait être mise à profit en appliquant la démarche à d'autres domaines de fabrication compatibles avec une description en schéma de processus de fabrication. Ceci est bien adapté aux techniques de mise en forme par empreinte pour lesquelles la modélisation se situe au niveau des états de la pièce et ne peut être décrite au niveau d'entités plus élémentaires. Le domaine de l'emboutissage ou bien celui de la fonderie pourraient être des exemples d'application intéressants pour cela.

Les ressources sont pour l'instant uniquement considérées dans la démarche. L'outil support IP3FRTool ne permet pas d'effectuer des raisonnements prenant en compte les ressources car la façon de les traiter n'a pas été définie : une réflexion approfondie devra être menée afin de définir la formalisation et l'exploitation des liens qui existent cette fois entre Ressources, Pièces et Procédés.

D'autres évolutions de l'outil sont envisageables, d'ordre pratique et fonctionnel. Nous pouvons citer par exemple la possibilité de faire s'appuyer les connaissances définies dans l'outil sur une ontologie du domaine de la forge, ce qui permettrait ainsi l'interopérabilité avec plusieurs outils informatiques : par exemple avec les logiciels de conception assistée par ordinateur, les logiciels de simulation, ou les outils capables de fournir des indicateurs d'ordre mécanique (ex : facteur de sécurité de la pièce) ou d'ordre financier.

Au cours de cette thèse, nous avons contribué au couplage du produit avec le processus de fabrication. Plus généralement, il serait possible d'étendre ce couplage entre le produit et la

planification de son développement comme ceci est proposé dans le projet ATLAS ([Aldanondo 2008]).

Une autre perspective intéressante serait de rapprocher le second formalisme proposé par rapport à des moyens de modéliser les systèmes de décision tels que la méthode GRAI [Doumeingts 1984][Roboam 1993].

Références bibliographiques

- [Adetief 1974] ADETIEF. *Classification morphologique des pièces estampées*, 1974.
- [Ahmed 2007] AHMED R., ROBELET M., BIGOT R., FISCHER D. Thixoforming of steels and industrial applications. *AIP Conference Proceedings*, vol. 907, p. 1136-1141, 2007.
- [Aldanondo 2008] ALDANONDO M., VAREILLES E., DJEFEL M., BARON C., AURIOL G., GENESTE L., ZOLGHADRI M. Vers un couplage de la conception de produit avec la planification de son développement. *Conférence Internationale de Modelisation et de SIMulation (MOSIM)*, Paris, avril 2008.
- [Alsène 2002] ALSENE E., GAMACHE M., LEJEUNE M. Gestion des savoirs et des compétences, une articulation possible, mais limitée. *1er Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, Vers l'articulation entre compétences et connaissances*, Nantes, 12-13 décembre 2002.
- [Altan 1997] ALTAN T. et VAZQUEZ V. Status of process simulation using 2D and 3D finite element method 'What is practical today? What can we expect in the future?' *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, n°1, p. 49-63, 1997.
- [Alting 1993] ALTING L. *Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises, Concurrent Engineering : Automation, Tools, and Techniques*. /ed. by Andrew Kusiak, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-55492-8, 1993.
- [Antoniou 2004] ANTONIOU G., VAN HARMELEN F. *A semantic web primer* /ed. by MIT Press, ISBN : 0-262-01210-3, 2004.
- [Arenas 2004] ARENAS J.M., SEBASTIAN M.A., GONZALEZ C. Parametric classification based on technico-economic approaches to optimize the design and manufacturing of hot forged parts. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 150, p. 223-233, 2004.
- [Arimoto 1993] ARIMOTO S., OHASHI T., IKEDA M., MIYAKAWA S. Development of Machining-productibility Evaluation Method (MEM), *Annals of the CIRP, Prod. Eng. Research Laboratory Hitachi, Japan* vol. 42 n°1, p. 119-122, 1993.
- [Ashby 2004] ASHBY M.F., BRECHET Y.J.M, CEBON D., SALVOC L. Selection strategies for materials and processes. *Materials and Design*, vol. 25, p. 51-67, 2004.

- [ASM 2005] ASM Handbook, Volume 14A: *Metalworking: Bulk Forming*, ISBN : 0-87170-706-3, 2005.
Disponible sur <http://products.asminternational.org/hbk> au 10/03/2008.
- [Bassetto 2005] BASSETTO S. *Contribution à la qualification et amélioration des moyens de production – application à une usine de recherche et de production de semi-conducteurs*. Thèse de doctorat ENSAM, 2005.
- [Baudouin 2006] BAUDOUIN C. *Contribution à la qualification d'un processus de fabrication par une approche dimensionnelle : application au pignon conique forgé dit "net shape"*. Thèse de doctorat ENSAM, 2006.
- [Bernard 2003] BERNARD A. *Fabrication assistée par ordinateur* /ed. by Lavoisier, Paris. ISBN : 2-7462-0618-8, 2003.
- [Berviller 2002] BERVILLER L., BIGOT R., BRUYERE J. Conception intégrée de produits Net shape. *4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, n°130, p. 1-9, 2002.
- [Berviller 2004] BERVILLER L., BAUDOUIN C., BIGOT R., LELEU S., MARTIN P. Integrated design and manufacturing of forged parts: illustration of the notion of technological traceability. *5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, 2004.
- [Boothroyd 1994] BOOTHROYD G., DEWHURST P., KNIGHT W. *Production Design for Manufacture and Assembly* /ed. by Marcel Dekker Inc., ISBN 0-8247-9176-2, 1994.
- [Boujut 1992] BOUJUT J.F., TICHKIEWITCH S. A step toward automatic dressing of a three dimensional stamped part. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 34, n°1-4, p. 163-171, 1992.
- [Boujut 2001] BOUJUT J.F. *Des outils aux interfaces – Pour le développement de processus de conception coopératifs*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Laboratoire Sols Solides Structures (3 S) – Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.
- [Boujut 2002] BOUJUT J.F., LAUREILLARD P. A co-operation framework for product-process integration in engineering design. *Design Studies*, vol. 23, p. 497-513, 2002.
- [Bourgeois 1997] BOURGEOIS J.P. Gestion de projet. *Techniques de l'ingénieur*, T7 700, 1997.
- [Brissaud 1997] BRISSAUD D. *Contribution à la Modélisation des Processus d'Usinage dans un contexte de Conception Intégrée des Produits*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Laboratoire Sols Solides Structures (3S) – Université Joseph Fourier, Grenoble, 1997.

- [Browne 1991] BROWNE L., TERNEY K., WALSH M. A two-stage assembly process planning tool for robot-based flexible assembly system. *International Journal of Production Research*, vol. 29, n°2, p. 247-266, 1991.
- [Bruyère 2006] BRUYERE J. *Contribution à l'optimisation de la conception des engrenages coniques à denture droite: analyse et synthèse de la géométrie et des tolérances*. Thèse de doctorat ENSAM, 2006.
- [Caporalli 1998] CAPORALLI A., GILENO L.A., BUTTON S.T. Expert system for hot forging design. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, p. 131-135, 1998.
- [Cezard 2007] CEZARD P., BIGOT R., FAVIER V., ROBELET M. Thixoforming of Steel: Experiments on Thermal Effects. *Advanced Methods in Material Forming* /ed. by Springer, ISBN : 978-3-540-69844-9, 2007.
- [Chamouard 1970] CHAMOUCARD A. *Estampage et Forge Tome 3, Technologie générale de l'Estampage*, 1970.
- [Chenot 1998] CHENOT J.L., BAY F. An overview of numerical modelling techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, p. 8-15, 1998.
- [Chenot 2002] CHENOT J.L., FOURMENT L. Numerical modelling of the forging process in industry. *17th International Forging Congress, Cologne / Dusseldorf*, p. 57-68, 2002.
- [Coyne 1990] COYNE R.D., ROSENMAN M.A., RADFORD A.D., BALACHANDRAN M., GERO J.S. *Knowledge-Based Design Systems Reading*. /ed. by Addison-Wesley, ISBN : 0-20110381-8, 1990.
- [Cunningham 1999] CUNNINGHAM P., BONZANO A. Knowledge engineering issues in developing a case-based reasoning application. *Knowledge based systems*, vol. 12, p. 371-379, 1999.
- [D'Aquin 2004] D'AQUIN M., BRACHAIS S., IEBER J., NAPOLI A. Kasimir : Gestion de connaissances décisionnelles en cancérologie. *Actes du 2ème colloque du groupe de travail C2EI*, 2004.
- [Doumeingts 1984] DOUMEINGTS G. *Méthode GRAI: méthode de conception des systèmes en productique*. Thèse d'Etat, Université de Bordeaux I, 1984.
- [Duverlie 1999] DUVERLIE P., CASTELAIN J.M. Cost estimation during design step: parametric method versus case based reasoning method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, p. 895-906, 1999.

- [Etienne 2007] ETIENNE A. *Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'allocation des tolérances géométriques*. Thèse de doctorat de l'université Paul Verlaine, Metz, 2007.
- [Feng 1995] FENG C.X., KUSIAK A. Constraint-based design of parts, *Computer-aided Design*, vol. 27, n°5, p. 343-352, 1995.
- [Fujikawa 1997] FUJIKAWA S., ISHIHARA A. Development of expert systems for forging processes. *JSAE Review*, vol. 18, n°2, p. 127-133, 1997.
- [Gaucheron 1998] GAUCHERON M. Mise en forme de l'acier par estampage. *Techniques de l'ingénieur*, M3 200, 1998.
- [Giusti 1989] GIUSTI F., SANTOCHI M., DINI G. Kaplan: a knowledge-based approach to process planning of rotational parts. *Annals of the CIRP*, vol. 38, n°1, p. 481-484, 1989.
- [Glynn 1995] GLYNN D., LYONS G., MONAGHAN J. Forging sequence design using an expert system. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 55, n°2, p. 95-102, 1995.
- [Grant 1996] GRANT P.W., HARRIS P.M., MOSELEY L.G. Fault Diagnosis for Industrial Printers Using Case-based Reasoning. *Engineering Application in Artificial Intelligence*, vol. 9, n°2, p. 163-173, 1996.
- [Gruber 1993] GRUBER T. Towards Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. In *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation*. led. by Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [Grundstein 2002] GRUNDSTEIN M. *GAMETH : un cadre directeur pour repérer les connaissances cruciales pour l'entreprise*. Rapport de recherche n°9, 2002.
- [Gumus 2005] GUMUS B. *Axiomatic Product Development Lifecycle (APDL) Model*. Thèse de doctorat, Texas Tech University, 2005.
- [Gupta 2003] GUPTA M., GALLOWAY K. Activity based costing and management and its implications on operations management. *Technovation*, vol. 23 n°3, p. 131-138, 2003.
- [Herbeaux 1999] HERBEAUX O., MILLE A. Accelere: a case-based design assistant for closed cell rubber industry. *Knowledge based systems*, vol. 12, p. 231-238, 1999.
- [Ishii 1990] ISHII K., LEE C.H., MILLER R.A. Methods for process selection in design. *Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference*, vol. 27, p. 105-112, 1990.

- [Ishii 1991] ISHII K., KRIZAN S., LEE C.H., MILLER R.A. HyperQ/Process - An Expert System for Manufacturing Process Selection. *Proceedings of the 6th Int Conf on AI applications in Engineering*, p. 405-422, Oxford, 1991.
- [Karkan 1993] KARKAN J.M., TJOEN G. *Systèmes experts – Un nouvel outil pour l'aide à la décision*. /ed. by Masson. ISBN : 2-87343-022-2, 1993.
- [Kim 1999] KIM H.-S., IM Y.T. An expert system for cold forging process design based on a depth-first search. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 95, n°1-3, p. 262-274, 1999.
- [Kim 2000] KIM D.Y., PARK J.J. Development of an expert system for the process design of axisymmetric hot steel forging. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 101, p. 223-230, 2000.
- [Kumar 2006] KUMAR S., SINGH R., SEKHON G.S. CCKBS: A component check knowledge-based system for assessing manufacturability of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, p. 64-69, 2006.
- [Lange 1985] LANGE K. *Handbook of metal forming*. /ed. by McGraw-Hill, New-York, ISBN 0-07-036285-8, 1985.
- [Laureillard 2000] LAUREILLARD P. *Conception intégrée dans l'usage : Mise en oeuvre d'un dispositif d'intégration produit-process dans une filière de conception de pièces forgées*. Thèse de doctorat, Laboratoire Sols Solides Structures (3 S) – Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [Lee 1993] LEE I.B.H., LIRA B.S., NEE A.Y.C. Knowledge-based process planning system for the manufacture of progressive dies, *International Journal of Production Research*, vol. 31, n°2, p. 251-278, 1993.
- [Lei 2001] LEI Y., PENG Y., RUAN X. Applying case-based reasoning to cold forging process planning. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 112, n°1, p. 12-16, 2001.
- [Liao 2000] LIAO T.W., ZHANG Z.M., MOUNT C.R. A case-based reasoning system for identifying failure mechanisms. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 13, p. 199-213, 2000.
- [Lovatt 1998] LOVATT A.M., SHERCLIFF H.R. Manufacturing process selection in engineering design. *Materials and Design*, vol. 19, p. 205-230, 1998.
- [Lovatt 2001] LOVATT A.M., SHERCLIFF H.R. Selection of manufacturing processes in design and the role of process modelling. *Progress in Materials Science*, vol. 46, n°3-4, p. 429-459, 2001.

- [Luong 1995] LUONG L. H. S., SPEDDING T. An integrated system for process planning and cost estimation in hole making. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 10, n°6, p. 411-415, 1995.
- [Marri 1998] MARRI H.B., GUNASEKARAN A., GRIEVE R.J. Computer-Aided Process Planning: A State of Art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 14, p. 261-268, 1998.
- [Martin 2001] MARTIN P., D'ACUNTO A., BRISSAUD D. Integration product – Manufacturing process: Approach and exemples. *Manufacturing integrated management*, led. by Zbigniew Banaszak & Jerzy Jedrzejewski, ISSN 1642-6568, vol. 1, n°1-2, p. 125-143, 2001.
- [Mejasson 2001] MEJASSON P., PETRIDIS M., KNIGHT B., SOPER A., NORMAN P. Intelligent design assistant IDA: a case base reasoning system for material and design. *Materials and design*, vol. 22, p. 163-170, 2001.
- [Mutel 1988] MUTEL B. Computer-Aided group technology integrated systems, *Annals of the CIRP*, vol. 37, n°1, 1988.
- [Narang 1993] NARANG R. V., FISCHER G. W. Development of a framework to automate process planning functions and to determine machining parameters. *International Journal of Production Research*, vol. 31, n°8, p. 1921-1942, 1993.
- [Noy 2004] NOY N.F., MCGUINNESS D. *Développement d'une ontologie 101 : Guide pour la création de votre première ontologie*. Université de Stanford, 2004.
- [Paris 2003] PARIS H. *Contribution à la coopération multi-acteurs : modélisation des contraintes de fabrication pour la conception simultanée d'un produit et de son process de fabrication*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Laboratoire Sols, Solides Structures (3S) – Université Joseph Fourier, Grenoble, 2003.
- [Perret 1777] PERRET J.J. *Mémoire sur l'acier, dans lequel on traite des différentes qualités de ce métal, de la forge, du bon emploi et de la trempe*, 1777. Disponible sur <http://books.google.com> au 10/03/2008.
- [Piechowiak 2003] PIECHOWIAK S. Intelligence artificielle et diagnostic. *Techniques de l'ingénieur*, S7 217, 2003.
- [Robert 2001] Le grand Robert, édition 2001.
- [Roboam 1993] ROBOAM M. *La méthode GRAI : Principes, outils et démarche pratique* led. by Teknea, ISBN : 2877170292, 1993.
- [Schuler 1998] SCHULER GmbH. *Metal Forming Handbook* /ed. by Springer-Verlag, ISBN : 3540611851, 1998.

- [Skander 2006] SKANDER A. *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*. Thèse de doctorat, Université Technologique de Troyes, 2006.
- [Smith 1992] SMITH J.S., COHEN P.H., DAVIS J.W., IRANI S.A. Process plan generation for sheet metal parts using an integrated featurebased expert system approach. *International Journal of Production Research*, vol. 30, n°5, p. 1175-1190, 1992.
- [Smith 1993] SMITH J.S., WYSK R.A., JOSHI S.B. A formal functional characterization of shop floor control. *Texas A&M University working paper*, 1993.
- [Tichkiewitch 1984] TICHKIEWITCH S. COPEST: système expert pour la conception optimisée des pièces estampées. *AF CET – Journées Systèmes Experts*, Avignon, 1984.
- [Tichkiewitch 1994] TICHKIEWITCH S. De la CFAO à la conception intégrée. *International Journal of CAD/CAM and Computers Graphics*, vol. 9, n°5, p. 609-621, 1994.
- [Tisza 1995] TISZA M. Expert systems for metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 53, p. 423-432, 1995.
- [TLF] Trésor de la langue française informatisé : <http://atilf.atilf.fr> au 10/03/2008.
- [Todd 1994] TODD R.H., ALLEN D.K., ALTING L. *Manufacturing processes reference guide* /ed. By Industrial Press Inc., New York, ISBN : 0-8311-3049-0, 1994
- [Vliet 1999] VLIET V.J., LUFFERVELT C., KALS H. State of the art report on design for manufacturing. *Proceedings of ASME design engineering technical conference, DETC99/DFM-8970*, Las Vegas, 1999.
- [Vong 2002] VONG C.M., LEUNG T.P., WONG P.K. Case-based reasoning and adaptation in hydraulic production machine design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 15, p. 567-585, 2002.
- [Waltz 1972] WALTZ D. *Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows*. MIT Libraries, 1972.
Disponible sur <http://hdl.handle.net/1721.1/6911> au 10/03/2008.
- [Watson 1999] WATSON I. Case-based reasoning is a methodology, not a technology. *Knowledge-Based Systems*, vol. 12, p. 303-308, 1999.

- [Yannou 1998] YANNOU B. Les apports de la programmation par contraintes en conception. *Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils* /ed. by Hermès, ISBN : 2-86601-694-7, 1998.
- [Yau 1998] YAU N.J., YANG J.B. Applying case-based reasoning technique to retaining wall selection. *Automation in construction*, vol. 7, p. 271-283, 1998.
- [Zdrahal 1999] ZDRAHAL Z., VALASEK M., CERMAK J. Selecting Manufacturing Technology: A Knowledge Modelling Approach. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 26, p. 405-422, 1999.

Valorisation scientifique

Actes de congrès internationaux sélectionnés et publiés dans des ouvrages

- [Thibault 2007a] THIBAULT A., SIADAT A., BIGOT R., MARTIN P. Method for integrated design using a knowledge formalization. *Conference Proceedings Book of the 3th CIRP International Seminar on Digital Enterprise Technology* led. by Springer, ISBN 978-0-387-49863-8, 2007. Sélectionné à partir de [Thibault 2006c].
-

Revues nationales avec comité de lecture

- [Thibault 2006d] THIBAULT A., SIADAT A., MARCHAND P., MARTIN P. Démarche outillée de conception intégrée utilisant une formalisation des connaissances métier. *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 25, n°4, p. 77-91, 2006. Sélectionné à partir de [Thibault 2006b].
-

Communications internationales avec actes

- [Thibault 2006a] THIBAULT A., SIADAT A., MARTIN P. A framework for using a case based reasoning system applied to cost estimation. *2nd IEEE International Conferences on cybernetics & Intelligent Systems and Robotics, Automation & Mechatronics*, Bangkok (Thaïlande), 2006.
- [Thibault 2006c] THIBAULT A., SIADAT A., BIGOT R., MARTIN P. Method for integrated design using a knowledge formalization. *3rd International CIRP conference on Digital Enterprise Technology*, Setubal (Portugal), 2006.
- [Thibault 2007b] THIBAULT A., SIADAT A., BIGOT R., MARTIN P. Proposal for Product Process Integration using Classification and Rules. *International IEEE conference on Computer as a tool*, Varsovie (Pologne), 2007.
- [Thibault 2007c] THIBAULT A., SIADAT A., MARCHAND P., MARTIN P. Computer aided process planning based on ontology and rules system applied to forging domain. *Innovative Production Machines and Systems on-line Conference (<http://conference.iproms.org>)*, 2007. Best presentation prize.
-

Communications nationales avec actes

- [Thibault 2006b] THIBAULT A., SIADAT A., MARCHAND P., MARTIN P. Démarche outillée de conception intégrée utilisant une formalisation des connaissances métier. *Semaine de la connaissance, session C2EI*, Nantes, 2006.
-

Divers

- [Thibault 2005] THIBAULT A. *Rapport interne d'activité LGIPM-CETIM pour la première année de thèse*. Octobre 2005.
- [Thibault 2006e] THIBAULT A. *Rapport interne d'activité LGIPM-CETIM pour la deuxième année de thèse*. Octobre 2006.

Glossaire

Concepteur	Equipe de conception, bureau d'étude, donneur d'ordre, concepteur sont synonymes dans le cadre de notre étude.
Conception détaillée	Phase de la conception d'un produit où l'on définit les données qui possèdent des degrés de liberté par rapport aux fonctions recherchées du produit.
Conception intégrée	Conception d'un produit en tenant compte des connaissances liées à l'ensemble de son cycle de vie (fonctions, analyse, fabrication, démontage, recyclage,...) [Tichkiewitch 1994]. Dans ce cadre, les choix effectués au cours de la conception ne sont alors plus arbitraires ou dépendants de l'expérience du concepteur. Dans notre cas, nous ne considérerons que les connaissances liées à la fabrication.
Conception préliminaire	A partir de l'analyse fonctionnelle, une définition des surfaces fonctionnelles, des contraintes d'encombrement, de masse et de résistance mécanique sont définies dans la phase de conception préliminaire. Un schéma peau-squelette [Skander 2006] peut constituer une des sorties de cette étape.
Condition	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une condition est une règle contextuelle liée à une transformation et qui fait intervenir les paramètres de la pièce. Cette règle indique dans quels cas la transformation est possible/impossible.
Définition d'un produit fabricable	Une définition d'un produit fabricable (au sens de résultat de l'activité de conception) est l'ensemble : définition de pièce – définition du processus de fabrication associé à cette pièce.
Définition de pièce	Il s'agit d'un ensemble de données définissant la pièce.
Etats intermédiaires de la pièce	Il s'agit des différents états de la pièce au cours de sa fabrication. Ces états ne peuvent être définis que lorsque le processus de fabrication est spécifié. Cette dernière remarque est valable également pour l'état final de la pièce en sortie du processus de fabrication. Un état intermédiaire doit pouvoir être caractérisé de façon précise.
Fabricant	Bureau des méthodes, entreprise de forge, fabricant sont synonymes dans le cadre de notre étude.
Industrialisation	Passage d'une spécification à une mise en production. Ce passage peut nécessiter une reconception du produit, et la conception d'un processus de fabrication associé (choix des procédés, des conditions opératoires et des ressources mises en œuvre).
Ingénierie intégrée	La démarche d'ingénierie intégrée (dénommée également ingénierie simultanée ou ingénierie concourante) s'inscrit dans le cadre de la recherche d'amélioration de l'efficacité et de la productivité dans le déroulement d'un projet. Elle permet d'éviter

	les reprises coûteuses liées à la prise en compte tardive de contraintes propres aux activités qui se situent en aval du cycle de vie du produit (production, maintenance, élimination, etc.) [Bourgeois 1997].
IP3FR	Intégration Produit – Procédés – Processus de Fabrication – Ressources
Procédé	Moyen, méthode qu'on emploie ou dont on dispose pour parvenir à un résultat [Robert 2001]. Pour notre étude, il s'agit plus précisément d'un moyen technologique de fabrication (au sens phénomène physique et/ou chimique qui permet le passage d'un état à un autre). Dans le cadre de la seconde formalisation (voir chapitre 3), un procédé peut être utilisé dans une transformation élémentaire. Exemples de procédé : estampage à chaud, extrusion à froid, frittage, laminage, cambrage.
Processus de fabrication avec degrés de liberté	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), un processus de fabrication avec degrés de liberté est représenté avec une transformation (qui peut être décomposée en d'autres transformations s'il s'agit d'une transformation séquence, boucle ou choix), il peut être vu comme la factorisation de plusieurs processus de fabrication haut niveau. Il n'y a pas de condition dans un processus de fabrication avec degrés de liberté.
Processus de fabrication haut niveau	Dans le cadre des deux formalisations proposées (voir chapitre 3), un processus de fabrication haut niveau est défini par une séquence d'étapes pour lesquelles on ne spécifie que le procédé utilisé, sans préciser les conditions opératoires (à la différence d'un processus de fabrication détaillé).
Produit	Dans le cadre de cette thèse, les termes « pièce » et « produit » sont considérés synonymes.
Ressource	Moyen physique de fabrication, ex : presse mécanique, laminoir, pilon, outillages...
Schéma d'alternative de gamme	Dans le cadre de la première formalisation proposée (voir chapitre 3), un schéma d'alternative de gamme représente une séquence d'étapes avec pour chaque étape, des spécifications sur les caractéristiques des procédés de fabrication possibles.
Schéma de processus de fabrication	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), un schéma de processus de fabrication représente un ensemble de processus de fabrication factorisés. Un schéma de processus de fabrication est décrit à l'aide de transformations sur lesquelles il est possible d'émettre des règles (appelées « conditions ») qui permettent son exploitation.
Solution	Dans le cadre de cette thèse, une solution représente la définition d'une pièce et de son processus de fabrication associé, comprenant également les états intermédiaires.
Transformation	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une transformation représente un élément constitutif d'un

	schéma de processus de fabrication. Une transformation peut être une transformation séquence, une transformation choix, une transformation boucle ou bien une transformation élémentaire.
Transformation boucle	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une transformation boucle représente une transformation qui peut être répétée.
Transformation choix	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une transformation choix représente plusieurs possibilités de transformation. Le choix entre ces différentes possibilités est exclusif.
Transformation élémentaire	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une transformation élémentaire représente l'utilisation d'un procédé de fabrication. Une transformation élémentaire utilise un unique procédé. Une transformation élémentaire ne peut être composée d'autres transformations.
Transformation séquence	Dans le cadre de la seconde formalisation proposée (voir chapitre 3), une transformation séquence représente une transformation composée de plusieurs transformations, dans un ordre défini.

Annexes

Annexe 1 : Histoire de la forge

Le terme « forger » est apparu dans la première moitié du XII^{ème} siècle « *tu forjas l'albe et le soleil* » (Psautier Oxford, éd. Fr. Michel, LXXII, 17) dans le sens *créer*, et dans le sens *travailler un métal* à partir de 1160 : *forgier* (Eneas, 4303, *ibid.*), issu du latin classique *fabricare* qui signifie *façonner, fabriquer* [TLF]. Une chronologie montrant les apparitions des différentes techniques de forge est présentée sur la Figure 90.

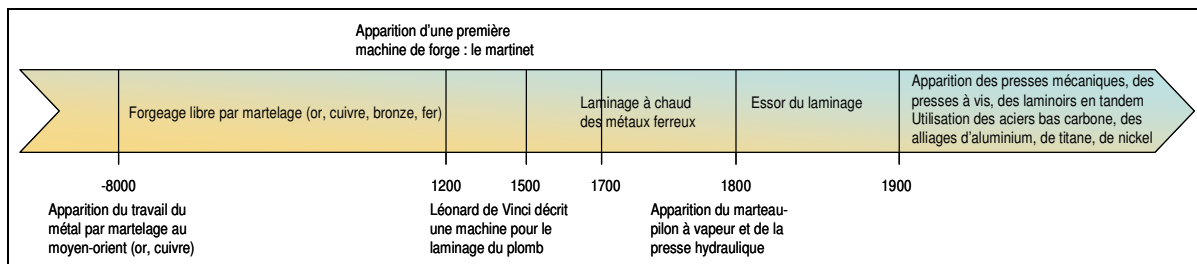


Figure 90 : Chronologie de la forge [ASM 2005]

Les plus anciennes traces du travail des métaux remontent vers 8000 avant J-C au moyen orient où de simples objets en or ou en cuivre étaient fabriqués par martelage (Figure 91). Ces opérations étaient rendues difficiles par le fait que les techniques de raffinement du métal n'étaient pas connues. Le travail du métal était limité par les impuretés qui subsistaient une fois le métal séparé du minerai.



Figure 91 : Martelage - Bas-relief (antiquité)

Lors de l'âge du cuivre (-2500 - -1800), il a été découvert que le martelage du métal accroissait la résistance mécanique du métal. La volonté d'améliorer cette propriété poussa à chercher des alliages possédant déjà des caractéristiques élevées et conduit ainsi à l'alliage du cuivre avec l'étain (âge du bronze à partir de 2000 avant JC) puis à l'alliage du fer avec le carbone lorsque les méthodes permettant d'atteindre les températures nécessaires au raffinement du minerai de fer furent mises au point (début de l'âge du fer vers 1200 avant JC).

Le forgeage était essentiellement réalisé manuellement jusqu'au 13^{ème} siècle. A cette époque les premiers engins de forge firent leur apparition dont le martinet (Figure 92) : il s'agissait d'un marteau-pilon à faible puissance et à cadence rapide. Le levier supportant la masse était élevé grâce à l'énergie hydraulique. Le forgeron pouvait ensuite le laisser tomber par gravité sur la pièce à travailler. Ce type de dispositif était encore utilisé au début du 20^{ème} siècle.

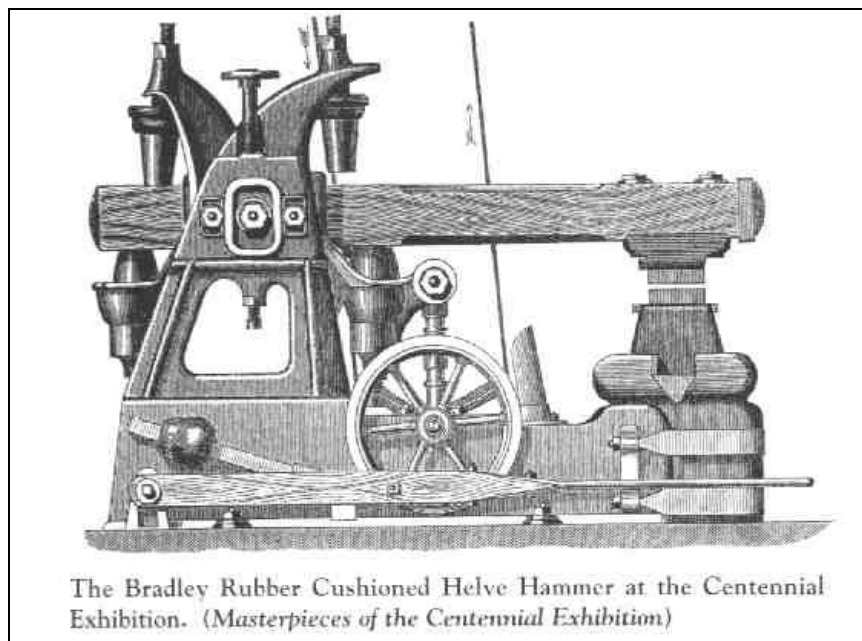


Figure 92 : Martinet

Le développement des laminoirs suivit celui des équipements de forge : au 15^{ème} siècle Léonard de Vinci décrivit une machine pour le laminage du plomb et aurait même réalisé un laminoir manuel à deux roues permettant de laminier des feuilles de métaux précieux pour la fabrication de pièces de monnaie. Cependant, le laminage à chaud des métaux ferreux mis plus de deux siècles à se développer, les premiers laminoirs de ce type étant mis en service au milieu du 18^{ème} siècle. Ces laminoirs étaient destinés à réaliser des feuilles ou des plaques et utilisaient l'énergie hydraulique.

Lors de la révolution industrielle à partir de la fin du 18^{ème} siècle, la forte demande en fer et en acier conduit à concevoir des machines adaptées. Ainsi des équipements de plus grande capacité tels que le marteau-pilon à vapeur (Figure 93) ou la presse hydraulique firent leur apparition. De même le développement du laminage connut un essor au cours du 19^{ème} siècle. Ainsi, lors de cette période, de nombreux types de produits furent fabriqués par ce procédé, et ce en des quantités considérables.

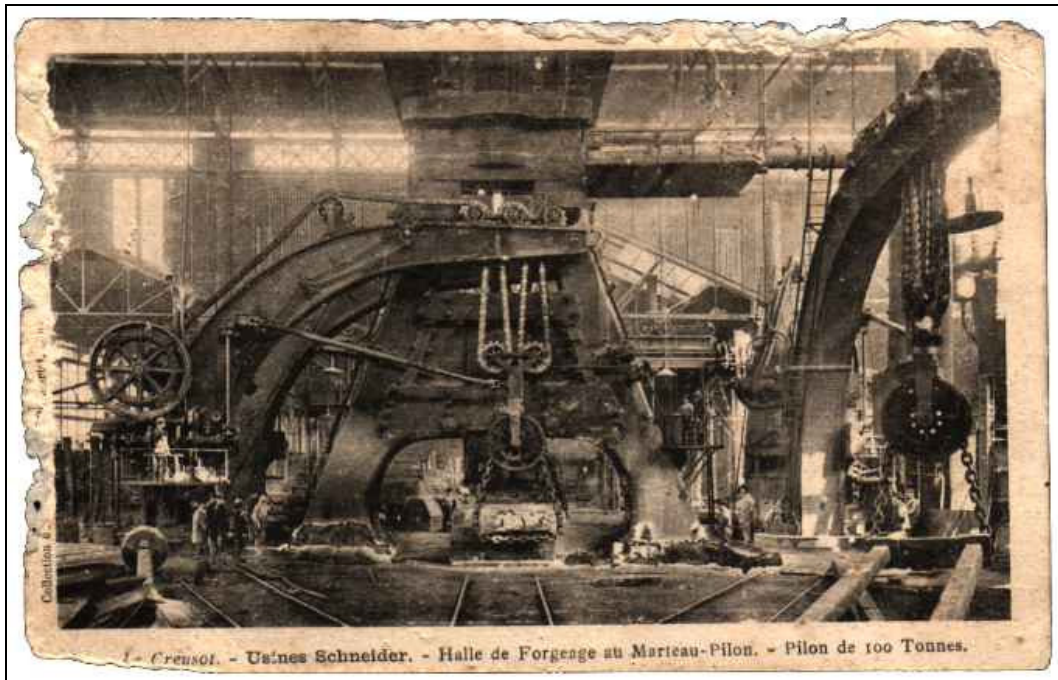


Figure 93 : Le pilon à vapeur du Creusot

Au cours du siècle précédent, de nouveaux types d'engins et de nouveaux matériaux ont été mis en œuvre. Ainsi les presses mécaniques, les presses à vis ainsi que les laminoirs tandem haute vitesse ont fait leur apparition tandis que les matériaux bénéficiant de ces nouvelles technologies vont de l'omniprésent acier bas carbone (pour les applications automobiles) jusqu'aux alliages à base d'aluminium, de titane ou de nickel.

Annexe 2 : Description de la démarche sous la forme d'un diagramme IDEF-0

Une autre description de la démarche présentée au chapitre 2 a été réalisée en utilisant le formalisme IDEF-0 afin de représenter les entrées et les sorties des différentes étapes de la démarche.

La correspondance que l'on peut définir entre le logigramme présenté au chapitre 2 et le diagramme IDEF-0 est récapitulée sur le Tableau 11.

Tableau 11 : Correspondance entre le logigramme et le diagramme IDEF-0

Activité IDEF-0		Etape(s) du logigramme
A1	Construire une hypothèse de conception du produit et réaliser une sélection au niveau des processus de fabrication possibles	Étapes 1 à 4
A2	Déterminer et sélectionner l'ensemble des solutions (processus de fabrication possibles et conceptions de pièce associées) définies complètement	Étapes 5 à 11
A3	Déterminer les ressources et valider une définition de produit fabricable	Étapes 12 à 16
A11	Faire évoluer la conception du produit	Étape 4
A12	Déduire la valeur des paramètres de sélection à partir de la conception du produit	Étape 1
A13	Réaliser la sélection des possibilités au niveau du processus de fabrication	Étapes 2 et 3
A21	Déduire les processus de fabrication haut niveau possibles	Étape 5
A22	Evaluer et sélectionner les processus de fabrication possibles	Étapes 6 et 7
A23	Compléter les solutions (processus de fabrication et conceptions de pièce associées) et vérifier leur cohérence	Étapes 8 et 9
A24	Evaluer les solutions (définies sans les ressources)	Étape 10
A25	Sélectionner les solutions	Étape 11
A31	Déduire les ressources possibles à associer à chaque solution	Étape 12
A32	Affecter des ressources pour chaque solution sélectionnée	Étape 13
A33	Evaluer les solutions (définies avec les ressources)	Étape 14
A34	Sélectionner une solution	Étape 15
A35	Valider la solution sélectionnée	Étape 16

Remarque : nous n'avons pas mis de correspondance pour l'activité A14 qui réalise le couplage de l'hypothèse de définition de pièce et des différentes possibilités de processus de fabrication haut niveau afin de pouvoir les fournir ensemble à l'étape suivante en sortant de la première boucle qui correspond au premier sens de l'intégration (il s'agit en fait de la condition exprimée juste après l'étape 3 du logigramme).

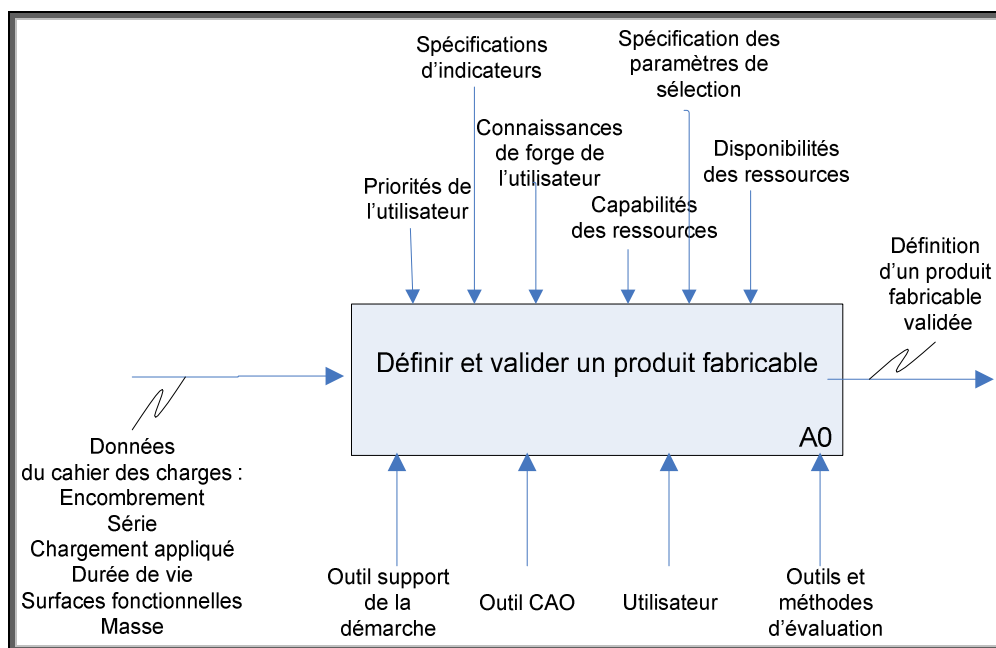


Figure 94 : Graphe IDEF-0 Nœud A-0 : Concevoir et valider un produit fabricable

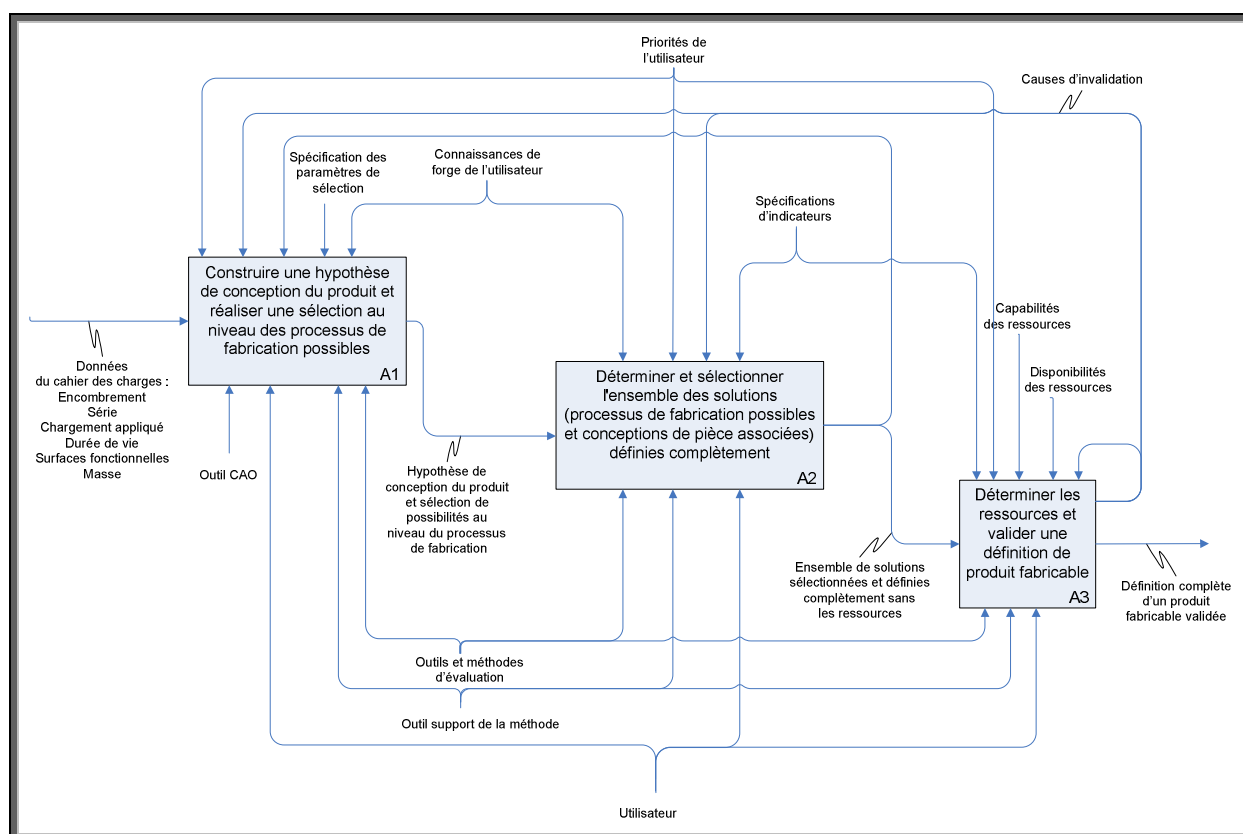


Figure 95 : Graphe IDEF-0 Nœud A0 : Définir et valider un produit fabricable

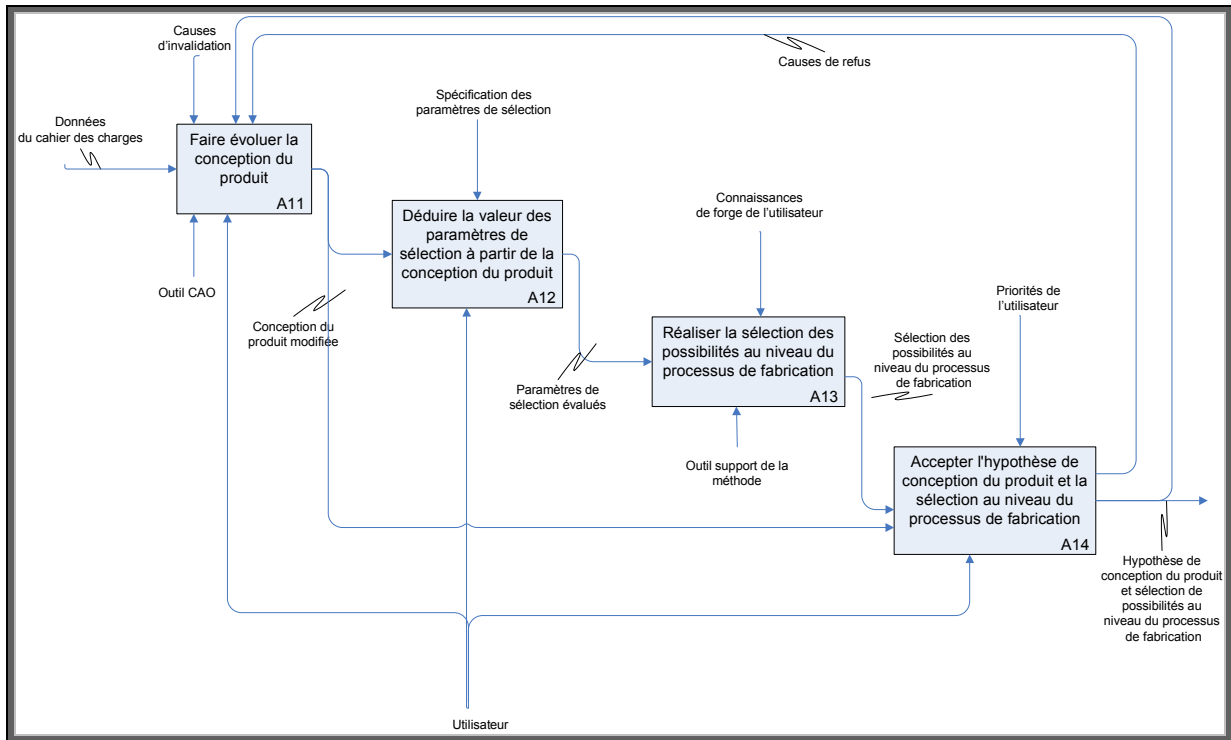


Figure 96 : Graphe IDEF-0 Nœud A1 : Construire une hypothèse de conception du produit et réaliser une sélection au niveau des processus de fabrication possibles

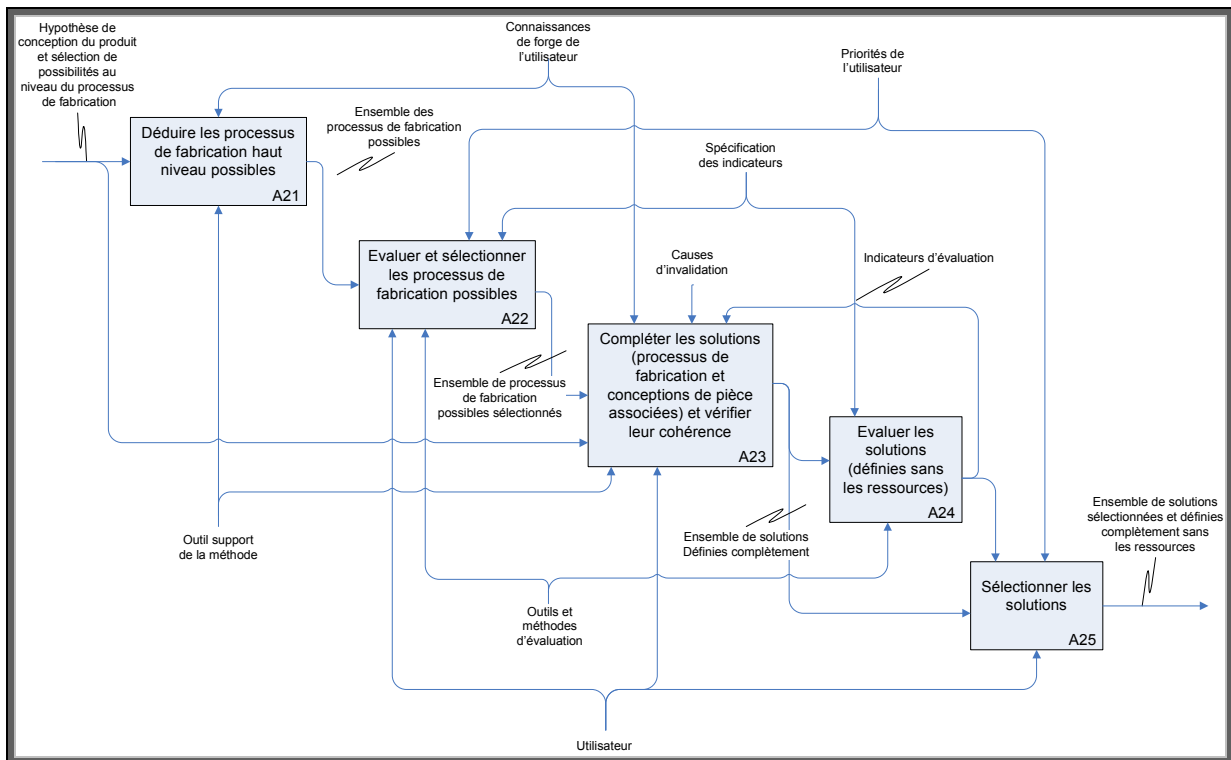


Figure 97 : Graphe IDEF-0 Nœud A2 : Déterminer et sélectionner l'ensemble des solutions (processus de fabrication possibles et conceptions de pièce associées) définies complètement

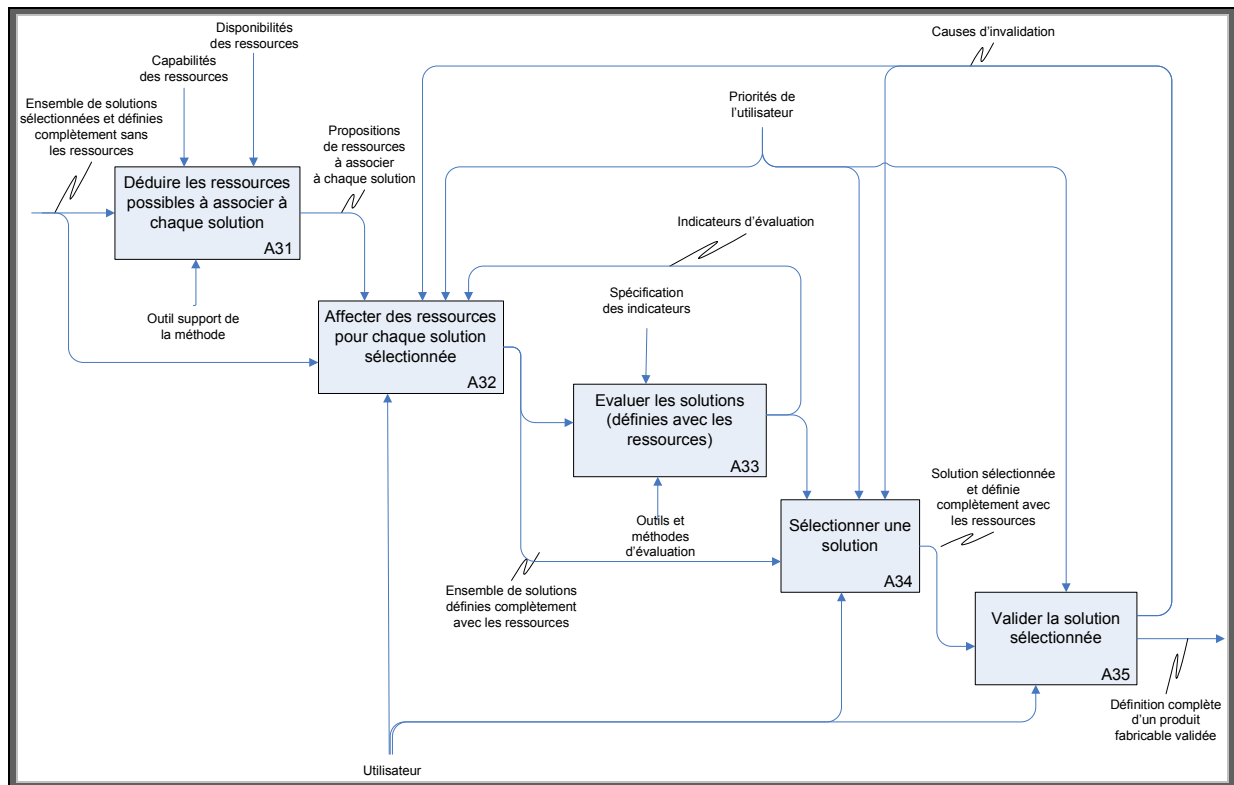


Figure 98 : Graphe IDEF-0 Nœud A3 : Déterminer les ressources et valider une définition de produit fabricable

Annexe 3 : Compte-rendu d'entretien

Quatre entretiens avec des experts de la forge ont pu être réalisés au cours de la thèse. Les deux premiers ont été menés dans l'optique de la première formalisation (classification des pièces et des procédés en familles) et ont permis de dégager les idées qui ont conduit à la seconde formalisation (par schémas de processus de fabrication). Nous ne présentons ici que le dernier entretien qui s'est déroulé sur deux jours, les 24 et 25 janvier 2007 avec Pierre Krumpipe (CETIM) que nous remercions pour sa contribution.

L'objectif de cet entretien était de définir un contexte (paramètres influents et procédés utilisables) et de construire un schéma de processus de fabrication complet. Le programme de cet entretien a été le suivant :

- recensement des procédés utilisables et construction d'un schéma de processus de fabrication sans les conditions
- recensement des paramètres influents
- revue des paramètres pour déterminer les conditions sur le schéma (pour chaque paramètre, on pose la question : sur quelles transformations ce paramètre a une influence ?)
- revue des transformations sur le schéma pour déterminer les conditions (pour chaque transformation, on pose la question : quels paramètres sont influents par rapport à cette transformation ?)

La synthèse présentée ici récapitule les connaissances récoltées pour un schéma de processus de fabrication qui a pour procédé principal l'estampage.

Etude du schéma de processus de fabrication Estampage

Limites d'application :

Le schéma Estampage est éliminé :

- si le matériau n'est pas un alliage ferreux forgeable à chaud
- si la complexité de la pièce en termes de parois minces et de parties excentrées est trop élevée
- si la qualité demandée est trop élevée.

Le schéma sans les conditions est présenté sur la Figure 99. La liste des paramètres avec leurs descriptions, valeurs possibles et impacts sur les transformations est donnée ensuite.

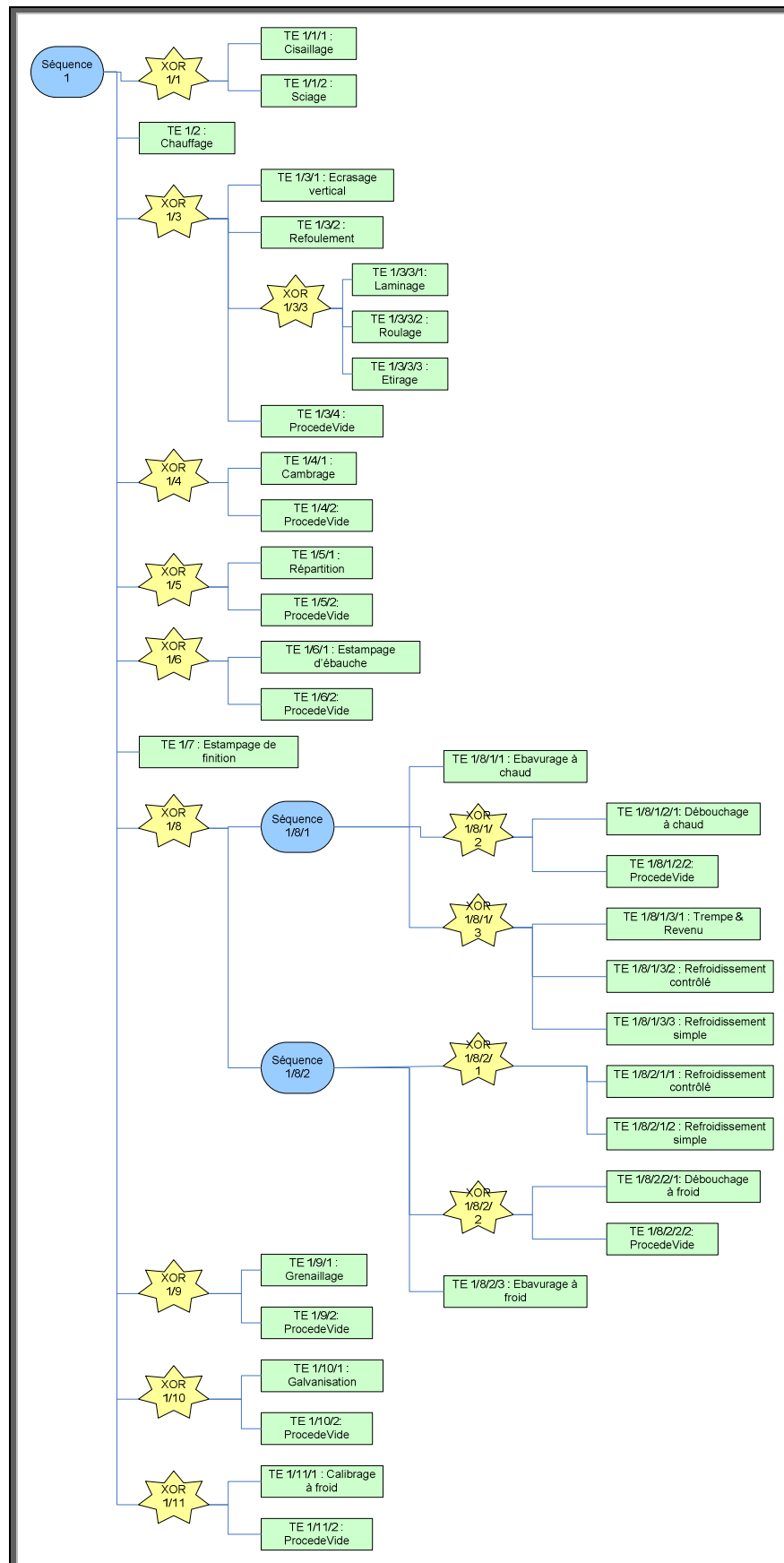


Figure 99 : Schéma de processus de fabrication pour l'estampage

Revue des paramètres et conséquences sur le schéma de processus de fabrication Estampage

Paramètre : Classe morphologique (liste non ordonnée)

Remarque : classement morphologique fourni par le CETIM sur la base du classement morphologique de [ASM 2005].

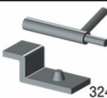





Impact sur les transformations : 1/3 (Séquence préparation) ; Ecrasage vertical ; Refoulement ; 1/3/3 (XOR Laminage-Roulage-Etirage) ; Laminage ; Roulage ; Etirage ; Cambrage ; Répartition ; Estampage d'ébauche ; Débouchage à chaud ; 1/8/2 (Séquence Ebavurage à froid).

Dans les tableaux suivants, les X représentent une élimination de la transformation pour la classe morphologique concernée.

classe morphologique		101	102	103	104	105	211	221	212
		1 Forme simple	2 Avec élément secondaire d'un côté	3 Avec 2 éléments secondaires	4 Avec élément secondaire circulaire	5 2 + 4	1 Forme simple	1 Forme simple	2 Avec un moyeu
Transformation	1.3	Séquence préparation							
	1.3.1	Ecrasage vertical							
	1.3.2	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.3.3	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.3.3.1	Laminage							
	1.3.3.2	Roulage							
	1.3.3.3	Etirage							
	1.4.1	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.5.1	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.6.1	X							
1.8.1.2.1	X	X	X						
1.8.2	X	X	X	X					

classe morphologique		222	213	223	214	215	224	225	311
		2 Avec un moyeu	3 percée	3 percée	4 Complexe	5 Avec parois extérieures	4 Complexe	5 Avec parois extérieures	1 Pièce simple
Transformation	1.3	Séquence préparation							
	1.3.1	Ecrasage vertical							
	1.3.2	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.3.3	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.3.3.1	Laminage							
	1.3.3.2	Roulage							
	1.3.3.3	Etirage							
	1.4.1	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.5.1	X							
	1.6.1								
1.8.1.2.1	X				X	X	X	X	X
1.8.2									

classe morphologique		312	313	314	315	321	322	323	
		3 Avec 1 tête ou un élément saillant	3 Avec une fourche ou un œil	4 pièce complexe	5 Pièce très complexe				
Transformation	1.3	Séquence préparation							
	1.3.1	X	X	X	X				
	1.3.2								
	1.3.3	X							
	1.3.3.1								
	1.3.3.2								
	1.3.3.3								
	1.4.1	X	X	X	X				
	1.5.1	X						X	X
	1.6.1								
1.8.1.2.1	X			X	X	X	X		
1.8.2									

		classe morphologique	324	325	331	332	333	335
								
Transformation	1.3	Séquence préparation			X		X	
	1.3.1	Ecrasage vertical	X	X		X		X
	1.3.2	Refoulement	X	X				X
	1.3.3	XOR Laminage-Roulage-Etirage						
	1.3.3.1	Laminage	X					
	1.3.3.2	Roulage	X			X		
	1.3.3.3	Etirage				X		
	1.4.1	Cambrage						
	1.5.1	Répartition			X	X		
1.6.1	Estampage d'ébauche			X				
1.8.1.2.1	Débouchage à chaud	X		X	X	X		
1.8.2	Séquence Ebavurage à froid							

Paramètre : *Encombrement/masse*

A transformer en : *plus grande section de la pièce orthogonale à la direction principale de la pièce avant cambrage (réel supérieur à 0)*

Remarque : La plus grande section de la pièce influe sur le diamètre du lopin.

Impact sur les transformations : Cisailage ; Sciage ; Roulage ; Laminage

Si la plus grande section est supérieure à un seuil S1 (lié aux ressources) et que l'on effectue un refoulement, alors le cisailage n'est plus possible.

Si la plus grande section est supérieure à un seuil $S2 > S1$ (lié aux ressources) et que l'on effectue un Laminage, Roulage ou Etirage, alors le cisailage n'est plus possible.

Si la plus grande section est supérieure à un seuil S3 (lié aux ressources), la transformation Roulage est impossible.

Si la plus grande section est supérieure à un seuil $S4 > S3$ (lié aux ressources), la transformation Laminage est impossible.

Paramètre : *Présence d'un débouchage (liste sans ordre : débouchage présent/débouchage absent)*

Impact sur les transformations : Débouchage à chaud ; Débouchage à froid ; Ebauche

Si Débouchage absent alors Débouchage à chaud et Débouchage à froid éliminés.

Si Débouchage présent et Série grande alors une ébauche est préconisée sauf si l'exigence sur la qualité est faible.

Paramètre : *Nombre de variations de section (entier supérieur ou égal à 0)*

Remarque : calculé à partir des variations de section supérieures à un seuil dépendant de la série.

Impact sur les transformations : Ecrasage vertical ; Refoulement ; Laminage ; Roulage ; Etirage

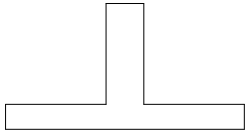
Si Nombre de variations de section = 0 alors Ecrasage vertical possible mais pas obligatoire, les procédés de Refoulement, de Laminage, de Roulage et d'Etirage sont inutiles.

Si Nombre de variations de section = 1 alors considérer Rapport des diamètres et Rapport des hauteurs : *Ecrasage impossible, Refoulement préconisé, Etirage possible (préconisé dans certains cas dépendant des ressources si la pièce est de grande dimension).*

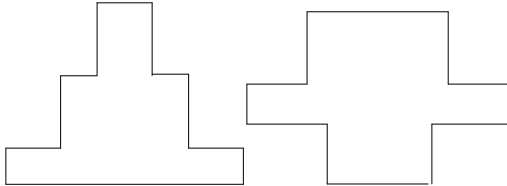
Si Nombre de variations de section ≥ 2 alors Ecrasage impossible, Refoulement possible mais déconseillé, Laminage, Roulage et Etirage possible.

Exemple de pièces :

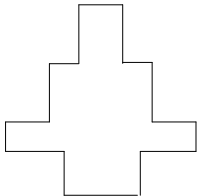
Nombre de variations de section = 1 :



Nombre de variations de section = 2 :



Nombre de variations de section > 2 :



Paramètre : *Présence d'un cambrage (liste sans ordre : cambrage présent/cambrage absent)*

Impact sur les transformations : Cambrage ; Ecrasage vertical

Si Cambrage présent alors la transformation cambrage est possible mais pas forcément nécessaire.

Si Cambrage présent alors Ecrasage vertical éliminé.

Si Cambrage absent alors la transformation cambrage est inutile (donc éliminée).

Paramètre : *Symétrie de révolution (liste sans ordre : présence d'une symétrie de révolution/Absence d'une symétrie de révolution)*

Remarque : Il s'agit d'une symétrie « générale » à évaluer par l'utilisateur, c'est-à-dire que l'on ne tient pas compte des détails qui peuvent ne pas respecter la symétrie.

Impact sur les transformations : Laminage ; Roulage ; Etirage

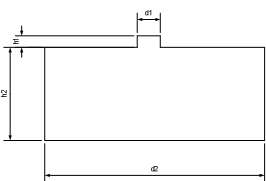
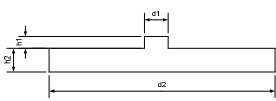
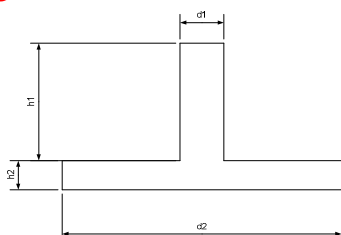
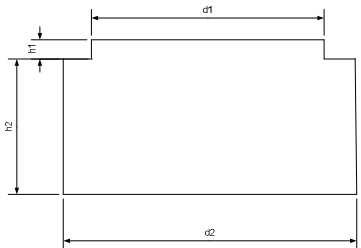
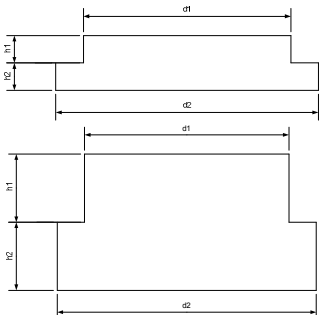
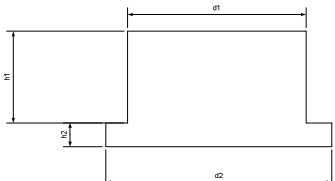
Si Symétrie de révolution alors Laminage, Roulage, Etirage impossible.

Paramètres : *Rapport des diamètres (réel compris entre 0 et 1), Rapport des hauteurs (réel positif)*

Remarques :

- Valables uniquement lorsque Nombre de variations = 1 et Symétrie de révolution présente.
- Rapport des diamètres compris entre 0 et 1 : rapport entre les deux diamètres $d1/d2$ avec $d1 < d2$
- Rapport des hauteurs $h1/h2$ avec $h1$ la hauteur correspondant au diamètre $d1$, $h2$ celle correspondant au diamètre $d2$, avec $d1 < d2$

Impact sur les transformations : Ecrasage vertical ; Refoulement

	$h1/h2$ petit (inférieur à 1)	$h1/h2 = 1$	$h1/h2$ grand (supérieur à 1)
$d1/d2$ proche de 0	1 	2 	3 
$d1/d2$ proche de 1	4 	5 	6 

Cas **3** et **6** : Pas d'Ecrasage vertical

Cas **3** : Refoulement nécessaire

Cas **1, 2, 4, 5** : Pas de Refoulement

Paramètre : Série (entier positif)

Impact sur les transformations : Cisailage ; Sciage ; Ecrasage vertical ; Refoulement ; Laminage ; Roulage ; Etirage ; Répartition ; Estampage d'ébauche ; Ebavurage à froid ;

Les seuils pour le rapport de variation de section considéré et pour le nombre de variations de section sont dépendants de la série et cela a une influence sur les transformations Ecrasage vertical, Refoulement, Laminage, Roulage et Etirage (voir paramètre *Nombre de variations de section*).

Le seuil de rapport de complexité conditionnant la transformation Répartition est dépendant de la série (voir paramètre *Rapport de complexité*).

Si Difficulté sur la pièce et grande série alors Estampage d'ébauche préconisé.

Si série grande alors Cisailage préconisé (le seuil dépend des ressources).

Si série petite alors Sciage préconisé (le seuil dépend des ressources).

Si série grande alors Laminage préconisé (s'il est possible).

Si série petite alors Roulage et Etirage préconisé (s'ils sont possibles).

Paramètre : Rapport de complexité (réel compris entre 0 et 1)

Impact sur les transformations : Répartition

Si le rapport de complexité est supérieur à un seuil (fonction de la série), la transformation Répartition est nécessaire.

Paramètre : Qualité (Réel : pourcentage par rapport à Qualité F)

Remarques :

- Le niveau de qualité F est défini dans la norme EN 10243-1:1999. On suppose que l'on peut, pour une définition de pièce, donner un pourcentage représentant la qualité exigée par rapport à la qualité F. Le niveau de qualité E défini dans la norme est un niveau de qualité supérieur à F, que l'on suppose également exprimable à l'aide d'un pourcentage en rapport avec le niveau de qualité F.
- Très dépendant de la capacité des ressources en termes de qualité atteignable.

Impact sur les transformations : Ebavurage à froid ; Calibrage à froid ; Ebauche ; Ecrasage vertical

Si Qualité E alors Calibrage à froid préconisé si les ressources pour Estampage de finition n'ont pas une capacité permettant d'atteindre le niveau de qualité E.

Si Qualité E alors Ebauche préconisée.

Si Qualité E et pièce plate alors Ebavurage à froid préconisé.

Paramètre : *Variation de section maximale (réel compris entre 0 et 1)*

Remarque : il s'agit du rapport entre la plus petite et la plus grande section de la pièce (dans la direction principale).

Impact sur les transformations : Laminage ; Roulage ; Etirage ; Répartition

Voir conséquences liées au paramètre Fibrage imposé.

Paramètre : *Fibrage imposé (liste sans ordre : fibrage imposé/fibrage non imposé)*

Remarque : Eventuellement préciser un type de fibrage : obtenu par refoulement ou bien obtenu par étirage.

Impact sur les transformations : Laminage ; Roulage ; Etirage ; Répartition

Si Fibrage imposé et Variation de section maximale dépassant un seuil S1, alors une préparation est nécessaire telle que Refoulement, Laminage, Roulage, Etirage (donc transformation 1/3/4 : Procédé vide éliminée) avec éventuellement Répartition.

Paramètres : Matériau/Traitement thermique – Dureté superficielle – Limite élastique globale

Remarque : grâce au couple Dureté superficielle & Limite élastique globale, le couple matériau/traitement thermique est déterminé (plusieurs peuvent être possibles).

Impact sur les transformations : Trempe et revenu ; Refroidissement contrôlé ; Refroidissement simple.

Matériau	TTh	Re (MPa)	Dureté superficielle	forgeable à chaud	forgeable à mi-chaud	forgeable à froid
Acier bas carbone	Aucun	300 – 600 (après écrouissage par extrusion, sinon 300 - 400)	Faible	Oui mais aucun intérêt	Oui mais aucun intérêt	Oui
Acier carbone	Refroidissement simple	300 – 600	Faible	Oui	Oui	Non
Acier allié pour TTh	Trempe + revenu	600 – 1200	Moyenne	Oui	Oui	Non

Acier pour trempe superficielle	TTh de surface	600 - 800	Elevée	Oui mais aucun intérêt	Oui mais aucun intérêt	Oui
Acier micro-allié	Refroidissement contrôlé	800 - 1000	Moyenne	Oui	Oui	Non

Conditions pour chaque transformation du schéma de processus de fabrication Estampage :

- chaque transformation est indiquée par le procédé utilisé si celui-ci n'est utilisé qu'une fois, par le tag sinon (ex : transformation 1/3/2)
- les conditions sur les paramètres influents liées aux limites ou à l'inutilité des procédés sont indiquées entre parenthèses si elles sont simples, dans le cas contraire, se reporter aux pages précédentes.

Transformation : Cisailage

Paramètres influents : Plus grande section de la pièce, Série, Critère de qualité

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : Sciage

Paramètres influents : les mêmes que pour la transformation *Cisailage*

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : Ecrasage vertical

Paramètres influents : Symétrie de révolution (présente), Pièce plate, Nombre de variations de section (nécessairement nul), Cambrage (absent)

Remarque : s'il s'agit d'un Ecrasage pour décalaminage, la symétrie de révolution peut être absente.

Dépendance aux ressources : oui (uniquement par rapport à l'encombrement).

Transformation : Refoulement

Paramètres influents : Nombre de variations de section (nécessairement égal à 1), Rapport des diamètres, Rapport des hauteurs

Dépendance aux ressources : oui (règles concernant le flambage, refoulement électrique ou classique).

Transformation : XOR 1/3/3 (Laminage/Roulage/Etirage)

Paramètres influents : Nombre de variations de section (nécessairement supérieur ou égal à 2), Série, Fibrage imposé

Dépendance aux ressources : oui (uniquement par rapport à l'encombrement).

Transformation : Laminage

Paramètres influents : Série

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : Roulage

Paramètres influents : Série

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Etirage*

Paramètres influents : Série

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Cambrage*

Paramètres influents : Pièce cambrée

Dépendance aux ressources : non

Transformation : *Répartition*

Paramètres influents : Série, Rapport de complexité, Fibrage imposé

Dépendance aux ressources : oui (Série, encombrement)

Transformation : *Ebauche*

Paramètres influents : Critère qualité (par rapport à Série), Présence d'un débouchage

Dépendance aux ressources : oui

Remarque : Le seuil de qualité à partir duquel on effectue une ébauche augmente lorsque la série diminue. Par exemple : plus la série est petite et plus l'exigence de qualité doit être importante pour que l'on décide de faire une ébauche.

Transformation : *Séquence 1/8/1 (Séquence ébavurage à chaud)*

Paramètres influents : paramètres relatifs à la morphologie de la pièce (donc tous les paramètres sauf Série, Matériau), Qualité

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Séquence 1/8/2 (Séquence ébavurage à froid)*

Paramètres influents : Classe morphologique (pièce plate), Qualité

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Débouchage à chaud*

Paramètres influents : Présence d'un débouchage

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Débouchage à froid*

Paramètres influents : Présence d'un débouchage

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Grenaillage*

Paramètres influents : aucun (l'utilisateur l'impose ou non)

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Galvanisation*

Paramètres influents : aucun (l'utilisateur l'impose ou non)

Dépendance aux ressources : oui

Transformation : *Calibrage à froid*

Paramètres influents : Qualité

Dépendance aux ressources : oui

Annexe 4 : Prise en compte des compatibilités dans le formalisme par schéma de processus de fabrication

On entend par « nœud » toute transformation composée : séquence, boucle ou choix.

Prise en compte de transformations incompatibles

Exemple : si les transformations élémentaires résultant d'un nœud N_x sont présentes dans un processus de fabrication, il faut que celles résultant du nœud N_y soient absentes.

Supposons qu'il existe une incompatibilité entre deux nœuds N_x et N_y (qui peuvent être de type Choix, Élémentaire, Séquence ou Boucle).

Soit N_c le nœud commun ascendant à N_x et N_y . De trois choses l'une :

- N_c est un nœud de type Choix : dans ce cas, N_x et N_y ne pourront jamais se trouver ensemble lorsque l'on déduira le schéma.
- N_c est un nœud de type Séquence : il est possible de reconstruire le schéma en ajoutant un nouveau nœud N_{c1} de type transformation choix, fils du père de N_c , puis d'y ajouter comme fils N_{c2} la copie de N_c sans N_x , et N_{c3} la copie de N_c sans N_y . Ainsi N_x et N_y ne pourront jamais se trouver ensemble lorsque l'on déduira le schéma.
- N_c est un nœud de type Boucle : le raisonnement est exactement le même que pour le type Séquence.

Prise en compte de Transformations dépendantes

Exemple : si les transformations élémentaires résultant d'un nœud N_x sont présentes dans un processus de fabrication, il faut que celles résultant du nœud N_y le soient également. Cela revient au même de dire : si les transformations élémentaires résultant du nœud N_y sont absentes, il faut que celles résultantes de N_x soient absentes.

Supposons qu'il existe une dépendance entre deux nœuds N_x et N_y dans le sens : si N_y est absent, il faut que N_x soit absent.

Soit N_c le nœud commun ascendant à N_x et N_y . De trois choses l'une :

- N_c est un nœud de type Choix : dans ce cas, N_x et N_y ne pourront jamais se trouver ensemble lorsque l'on déduira le schéma, une relation de dépendance entre N_x et N_y est donc incohérente par rapport à ce schéma (autrement dit il a été mal construit). Pour corriger cela il est nécessaire que N_c soit de type Séquence ou Boucle.
- N_c est un nœud de type Séquence : dans ce cas, pour que le schéma soit en cohérence avec cette relation de dépendance, il faut et il suffit que la condition résultante de N_x (c'est-à-dire la conjonction de toutes les conditions de ses parents jusqu'à N_x) soit plus restrictive que la condition résultante portée sur N_y , de façon à ce que si N_y est absent, N_x le soit également.
- N_c est un nœud de type Boucle : le raisonnement est exactement le même que pour le type Séquence.

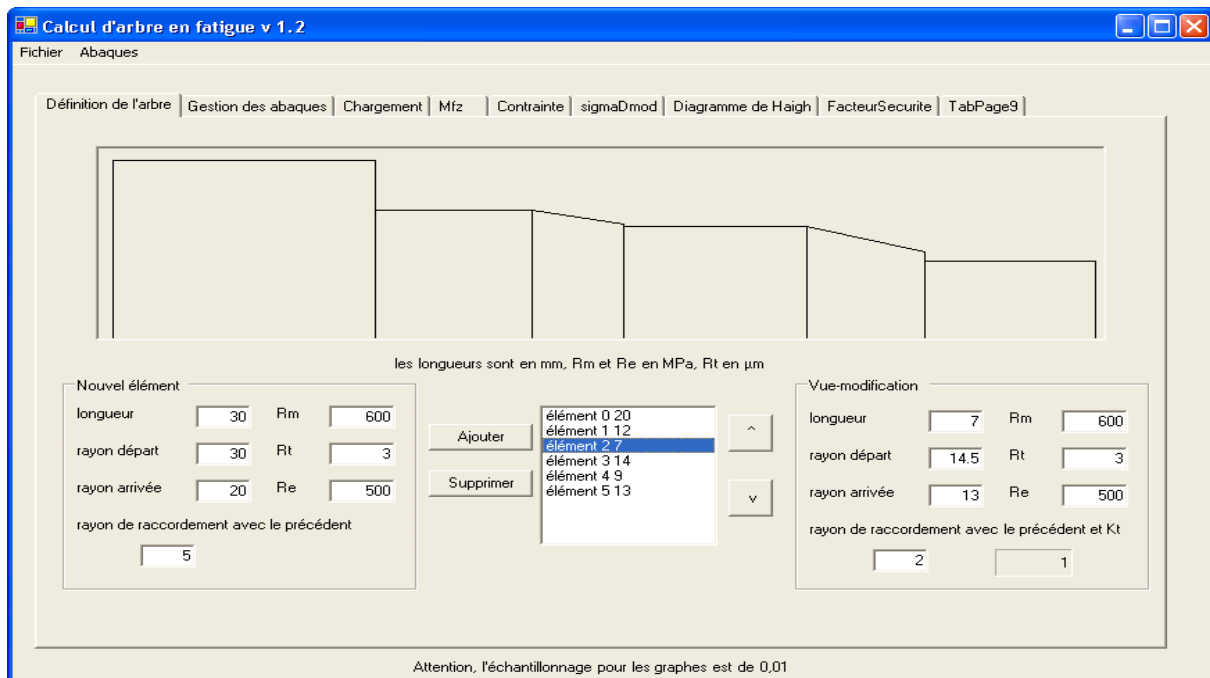
Annexe 5 : Application de calcul du facteur de sécurité d'une pièce de révolution (type arbre)

L'application est composée d'une interface avec plusieurs onglets qui permettent :

- La définition de l'arbre : la géométrie et les caractéristiques mécaniques de chaque partie de l'arbre
- La gestion des abaques : pour modifier les courbes des abaques utilisés dans le calcul
- La définition du chargement : charge moyenne, charge alternée, distance entre les deux points de chargement
- Une vue du moment de flexion M_fz avec la possibilité de calcul en un point
- Une vue des contraintes moyenne et alternée avec la possibilité de calcul en un point
- Une vue de la contrainte σ_{Dmod} de l'éprouvette de Moore avec la possibilité de calcul en un point
- Une vue du diagramme de Haigh pour un point de l'arbre
- Une vue du facteur de sécurité en fatigue et en statique, ainsi que la valeur et la position du facteur de sécurité minimal.

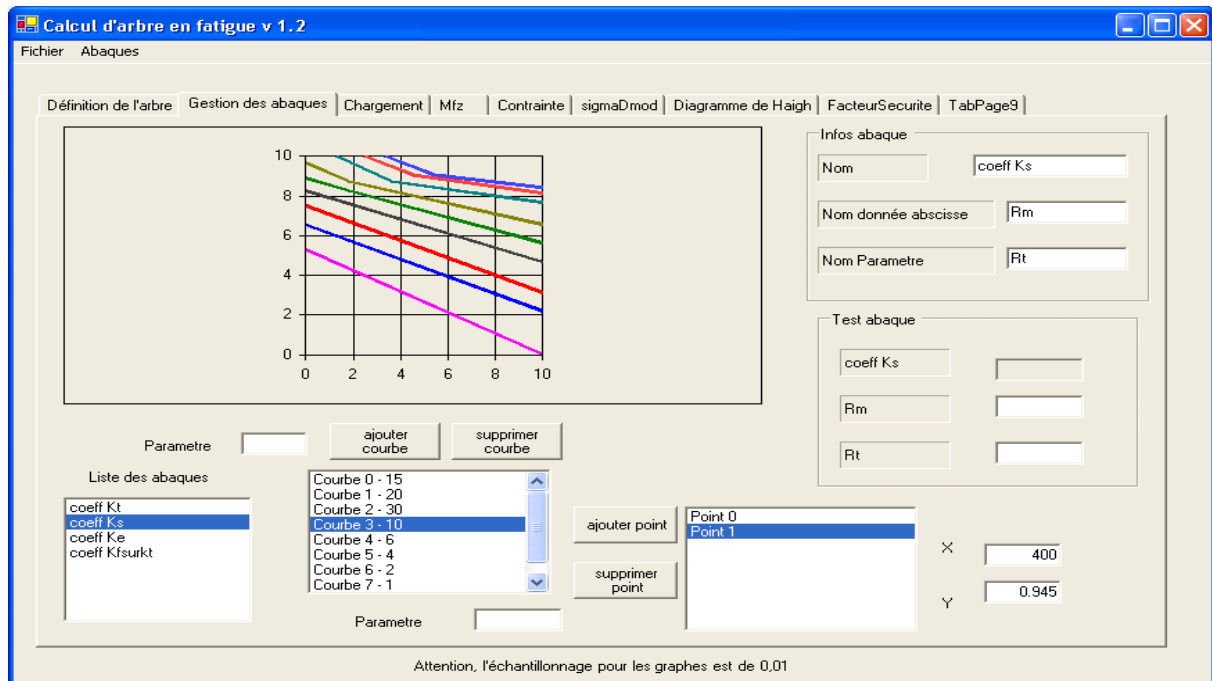
Enfin il est possible de sauvegarder un arbre dans un fichier, de sauvegarder les abaques, de modifier la valeur de l'échantillonnage et du plafond du facteur de sécurité (afin que le graphe soit représentatif).

Onglet Définition de l'arbre :



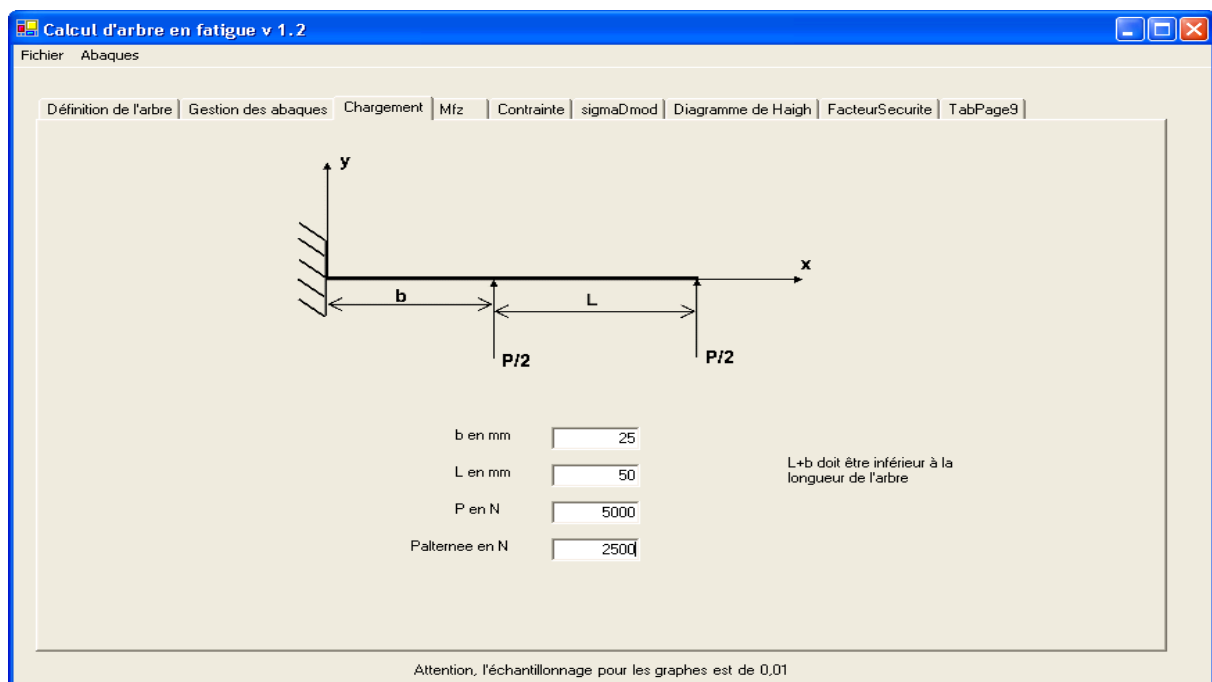
La partie gauche sert à définir un nouvel élément, la partie droite sert à modifier l'élément sélectionné dans la liste.

Onglet Gestion des abaques :



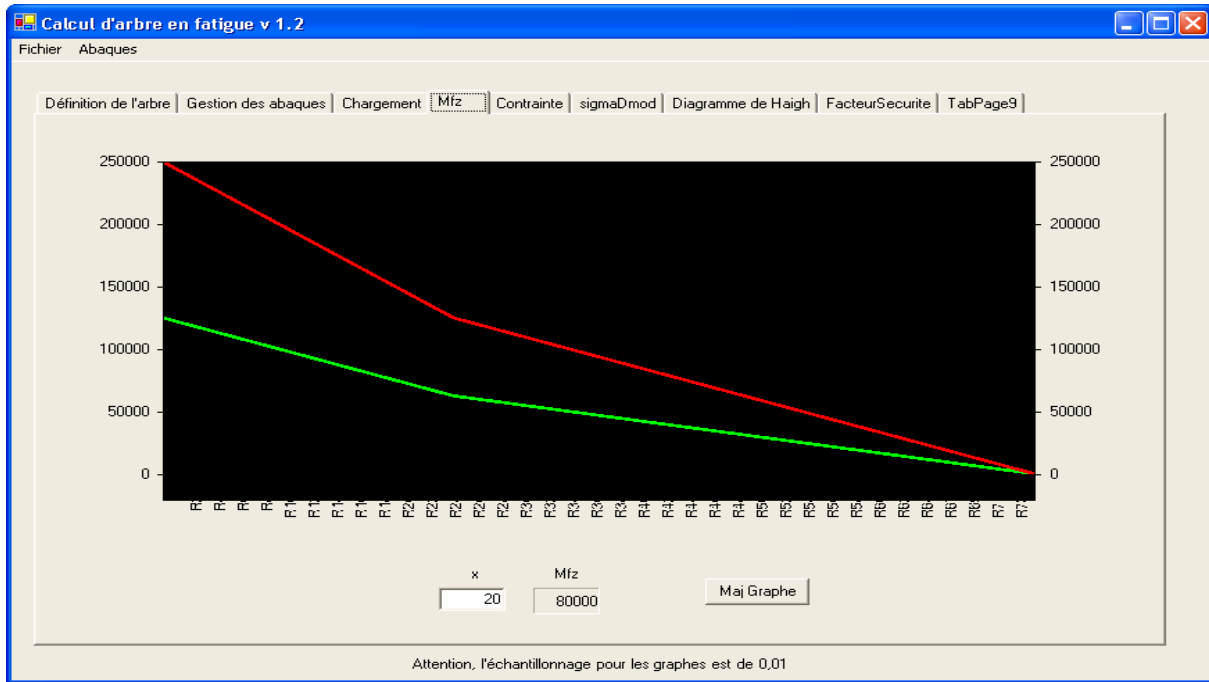
Il est possible d'ajouter ou de supprimer des courbes à l'abaque, de même pour les points de la courbe sélectionnée. On peut calculer une valeur grâce à la partie "Test abaque". Le calcul sur un abaque s'effectue avec deux approximations linéaires.

Onglet Chargement :



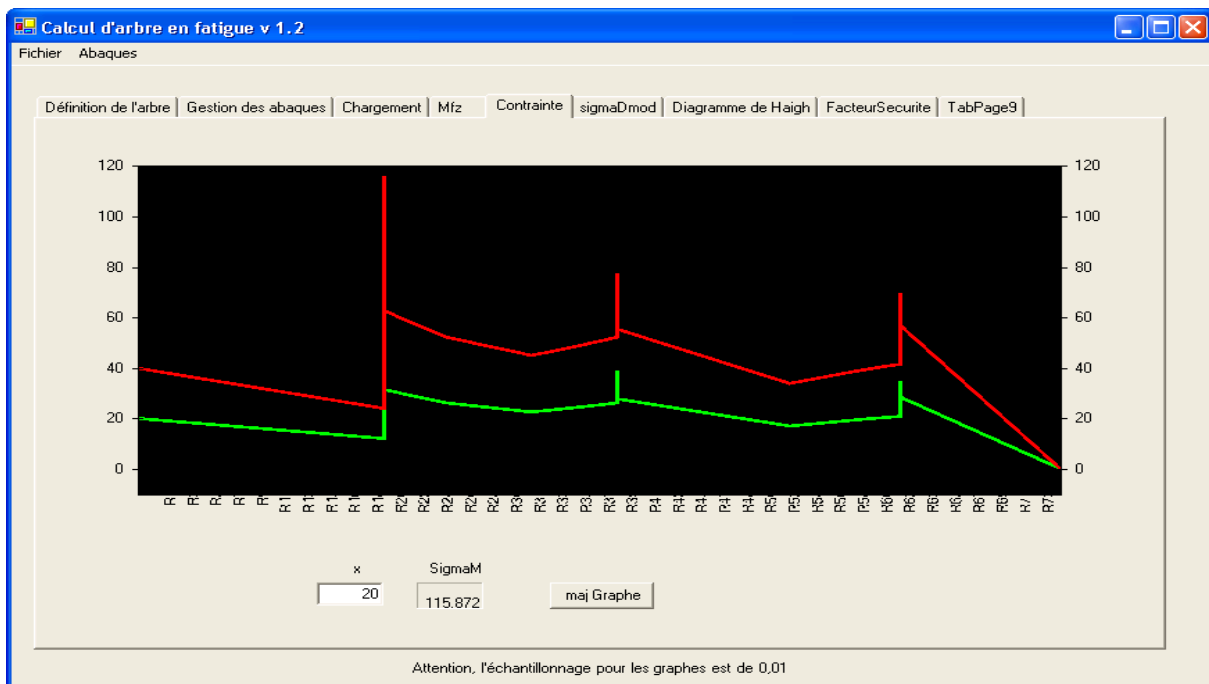
Cette partie est très contrainte : il n'est possible de définir qu'un type de chargement donné. Elle évoluera dans une prochaine version (où l'on pourra définir une collection de chargements appliqués à l'arbre).

Onglet Mfz :



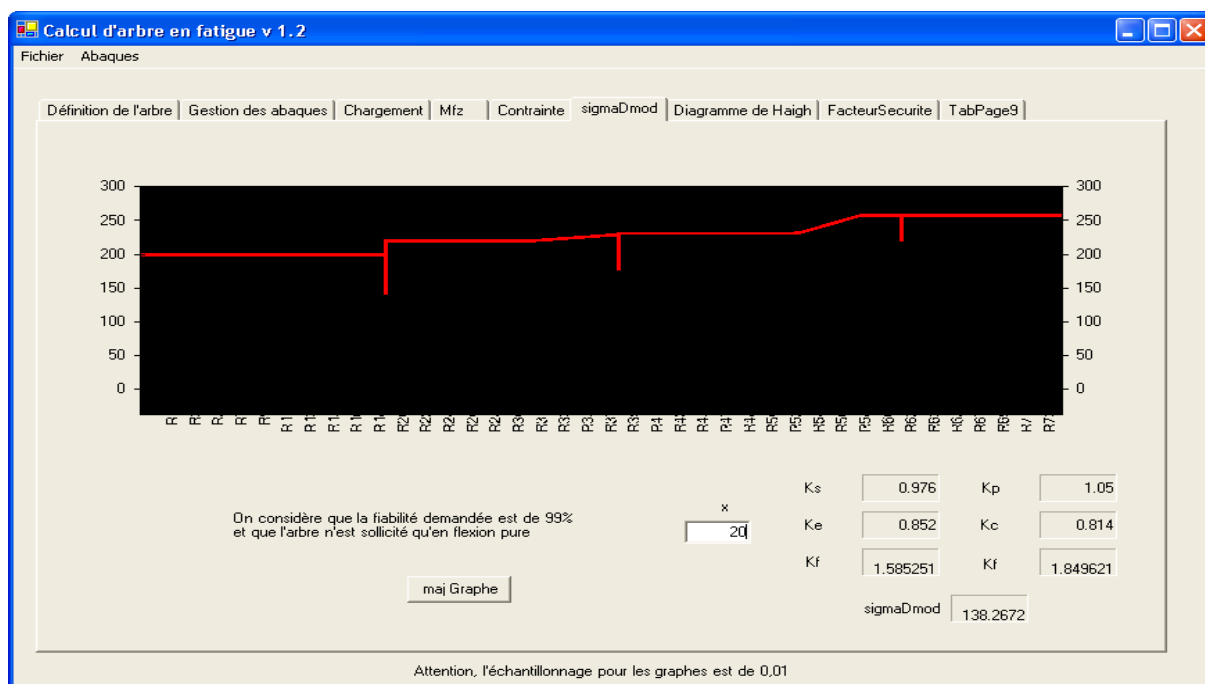
Représente le moment de flexion, permet de calculer celui-ci en un point. En rouge (courbe du haut), le moment pour la charge moyenne, en vert (courbe du bas) pour la charge alternée.

Onglet Contrainte :



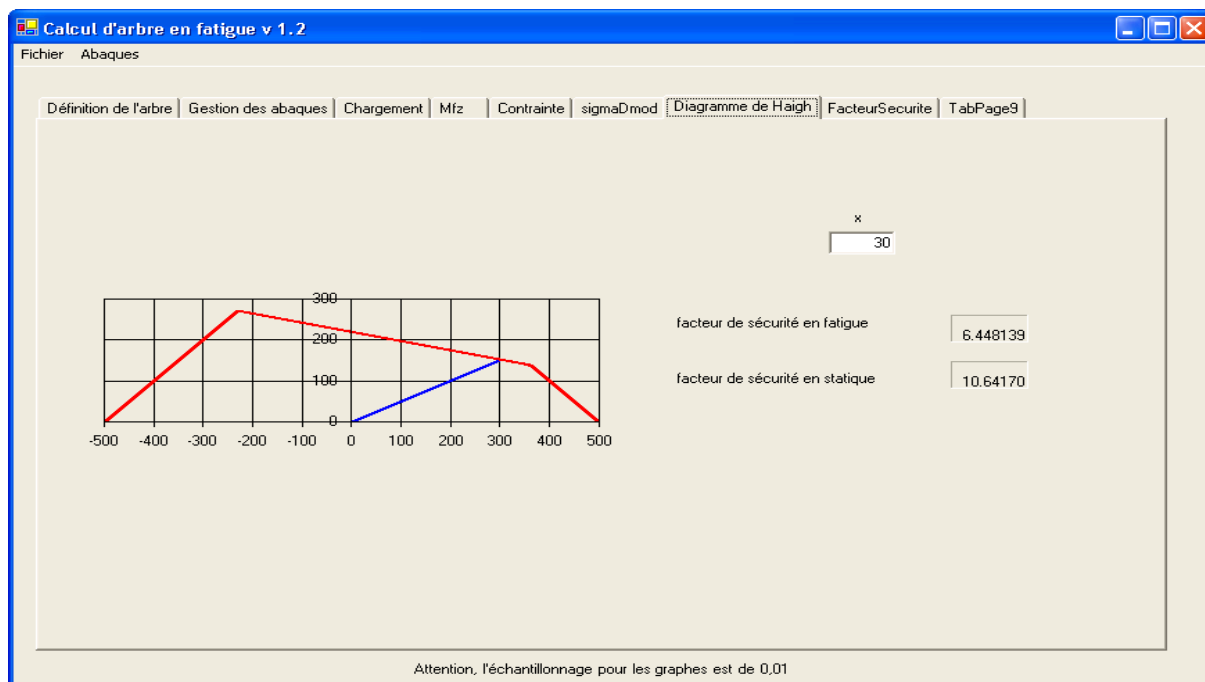
Visualisation de la contrainte moyenne et alternée, et possibilité de calcul de la contrainte moyenne en un point de l'arbre.

Onglet SigmaDmod :



Visualisation de la contrainte modifiée de l'éprouvette de Moore, et calcul des différents coefficients et de sigmaDmod en un point.

Onglet Diagramme de Haigh :



Visualisation du diagramme de Haigh en un point avec calcul des facteurs de sécurité en fatigue et en statique.

Onglet Facteur de sécurité :

Visualisation de la courbe des facteurs de sécurité en fatigue et en statique, détection du facteur de sécurité minimal ainsi que de sa position.

CONTRIBUTION A L'INTEGRATION PRODUIT – PROCESSUS DE FABRICATION, APPLICATION AU DOMAINE DE LA FORGE

RESUME : Plusieurs raisons conduisent aujourd'hui à la nécessité de concevoir une pièce « fabricable » avec le moins de modification et le plus rapidement possible. Nous pouvons citer l'évolution et la mondialisation du marché, la réduction de la taille des séries et des délais de conception comme de réalisation, le fait que le coût d'un produit soit engagé à 80 % au niveau de la conception. C'est dans ce cadre qu'interviennent les outils et les méthodes de l'ingénierie intégrée.

Les travaux de cette thèse se positionnent plus précisément au niveau de la formalisation et de l'exploitation des liens qui existent entre le produit et le processus de fabrication. Une démarche a été définie afin d'encadrer la conception progressive de la pièce et de son processus de fabrication. Un outil venant en support à cette démarche a été spécifié. Deux pistes ont été abordées lors du développement de l'outil pour la façon de représenter et d'exploiter les connaissances : un premier formalisme utilisant une ontologie associée à un traitement par classification ou bien un second formalisme basé sur une représentation arborescente des processus de fabrication associée à un traitement par élagage. Cette dernière représentation est nommée « schéma de processus de fabrication ». Un cas d'étude est présenté afin de valider la démarche proposée en utilisant l'outil support. Ces travaux ont été appliqués à la forge en tenant compte des spécificités de ce domaine de fabrication (notamment la nécessité d'une considération plus globale de la pièce par rapport à l'usinage).

Mots-clés: *forge, ingénierie intégrée, intégration produit – processus de fabrication, formalisation des connaissances*

CONTRIBUTION TO PRODUCT – PROCESS PLAN INTEGRATION, APPLICATION TO FORGING DOMAIN

ABSTRACT: Several reasons lead to design a manufacturable part as quickly as possible and without many modifications. We can cite the evolution and the globalization of the market, the decrease of batch sizes, the reduction in the design and lead times, the fact that the product cost is essentially engaged at the design time. In this context, the methods and tools for concurrent engineering intervene.

This thesis concerns more particularly with the formalization and the exploitation of the links that exist between the product and the process plan. A method has been defined to support the progressive design of the part and its associated process plan. A computer tool that supports this method has been specified. During the development of this computer tool, two ideas have been considered to represent and exploit the knowledge: a formalism based on an ontology associated to a classification process, or a second formalism based on an arborescent representation of the process plans associated to a pruning process. This last representation is called “process plan scheme”. A case study has been presented to validate the method by using the above mentioned computer tool. This work has been applied to forging domain, considering the specificities of this manufacturing area (especially the need to consider the part more globally with respect to machining).

Keywords: *forging process, concurrent engineering, product-process plan integration, knowledge formalization*