



Etude de la mise en oeuvre industrielle d'un nouveau procédé de mise en forme de produits composites

Marius Mihaluta

► To cite this version:

Marius Mihaluta. Etude de la mise en oeuvre industrielle d'un nouveau procédé de mise en forme de produits composites. Génie des procédés. Arts et Métiers ParisTech, 2011. Français. NNT : 2011ENAM0026 . pastel-00635873

HAL Id: pastel-00635873

<https://pastel.hal.science/pastel-00635873>

Submitted on 26 Oct 2011

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

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

École doctorale n°432:SMI- Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Génie Mécanique ”

présentée et soutenue publiquement par

Marius MIHALUTA

le 11 octobre 2011

**Etude de la mise en œuvre industrielle
d'un nouveau procédé de mise en forme
de produits composites**

Directeur de thèse : **Patrick MARTIN**

Jury

Mme. Zohra CHERFI-BOULANGER , Professeur, Roberval, Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
M. François VILLENEUVE , Professeur, G-Scop, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	Rapporteur
M. Benoit FURET , Professeur, IRCCyN, IUT de Nantes	Président
M. Lionel ROUCOULES , Professeur, LSIS, Arts et Métiers ParisTech centre d'Aix en Provence	Examineur
M. Alain D'ACUNTO , Maître de conférences, LEM3, Arts et Métiers ParisTech centre de Metz	Examineur
M. Thierry MARTIN , SLCA, SAFRAN	Invité
M. Jean-Pierre CAUCHOIS , PPE	Invité
M. Hervé HURLIN , AIRCELLE	Invité
M. Patrick MARTIN , Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech, centre de Metz	Directeur

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps à mon directeur de thèse, M. Patrick MARTIN qui m'a permis de poursuivre cette thèse au sein du laboratoire LCFC à Metz. Je le remercie de m'avoir fait confiance pendant ces années de recherche et pour ses conseils pertinents qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les acteurs du projet CAPSAIRTM avec qui j'ai pu collaborer afin de concrétiser les idées émises pendant mon travail de recherche.

Ainsi, je remercie aux représentants de la Société Lorraine de Construction Aéronautique ; M. Thierry MARTIN et M. Hervé HURLIN (Aircelle) pour m'avoir fixé un cadre de travail très productif. Je n'oublierai pas à mentionner Florence CASTAGNET et Paulo FRANCISCO pour leur disponibilité et pour leurs informations précieuses qui m'ont fait avancer dans le développement du logiciel.

Je remercie M. Gilbert Pitance, M. Jean-Pierre CAUCHOIS et les membres du Pôle de Plasturgie : Louis BETTEGA et Henri-François PERRIN, pour m'avoir permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine des composites. Grâce à eux j'ai pu mettre en pratique un ensemble d'idées imaginées lors de mes réflexions.

Je suis reconnaissant aux Ateliers CINI et plus particulièrement à Jérôme CINI et à Richard MANGENOT pour avoir partagé avec moi une partie de leur savoir-faire dans la fabrication d'outillages mécaniques.

Je remercie à M. Alain D'ACUNTO pour ses conseils apportés pendant cette étude et pour son soutien en tant que tuteur de monitorat. J'exprime également ma gratitude envers M. Ali SIADAT qui m'a aidé avec des pistes dans mes démarches de formalisation et à M. Tudor BALAN qui m'a également aidé le long de mes travaux.

Je tiens à remercier à tous mes collègues d'Arts et Métiers ParisTech, centre de Metz avec qui j'ai pu collaborer et plus particulièrement à Emerik HENRION et Alex FENDLER pour leur aide pendant les TPs que j'ai donné.

Toute ma gratitude est adressée aux membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à ma compagne Nicoleta et à ma famille pour leur soutien durant ces années.

Enfin, je remercie à tous ceux qui ont participé à l'aboutissement de ces travaux de recherche réalisés au sein du laboratoire LCFC et dans le cadre du projet CAPSAIRTM de la Région Lorraine.



Table des matières

Introduction générale.....	17
<u>CHAPITRE 1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES.....</u>	<u>22</u>
1. INTRODUCTION.....	23
2. LES MATERIAUX COMPOSITES DANS L'INDUSTRIE	23
3. TECHNOLOGIES DE FABRICATION DES COMPOSITES	25
3.1 LE MOULAGE DES PREIMPREGNES	27
3.2 LE MOULAGE AU CONTACT	28
3.3 LE MOULAGE PAR COMPRESSION	28
3.4 L'ENROULEMENT FILAMENTAIRE	29
3.5 LE MOULAGE LIQUIDE	30
3.6 COMPARAISON ECONOMIQUE DES PROCEDES.....	32
3.7 PROCEDES TRAITES DANS CE TRAVAIL.....	33
4. CRITERES DE SELECTION DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION POUR L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE	33
4.1 LA MASSE DU PRODUIT COMME CRITERE DE SELECTION	34
4.2 LA PERFORMANCE MECANIQUE COMME CRITERE DE SELECTION.....	35
4.3 LE COUT COMME CRITERE DE SELECTION.....	36
4.4 LE DELAI COMME CRITERE DE SELECTION.....	36
5. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	37
6. CONCLUSIONS	39
<u>CHAPITRE 2 LES FONDEMENTS DES PROCESSUS ETUDIES</u>	<u>40</u>
1. INTRODUCTION.....	41
2. CONSIDERATIONS SUR LES PROCEDES ET LES PROCESSUS	41
2.1 CHOIX DES PROCEDES	41
2.2 LE MOULAGE DES PREIMPREGNES	42
2.3 L'INFUSION DE RESINE LIQUIDE	44
2.4 PROCESSUS D'INDUSTRIALISATION	46
2.5 PRINCIPALES ETAPES DANS LA FABRICATION D'UN COMPOSITE	49
2.6 L'IMPREGNATION	51
2.6.1 GENERALITES	51
2.6.2 MODELISATION DE LA PHASE D'IMPREGNATION	52
2.6.3 DEFINITION DE MOYENS DE MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE DU PROCESSUS D'IMPREGNATION	54
2.6.4 VALIDATION INDUSTRIELLE ET QUANTIFICATION DU PROCESSUS D'IMPREGNATION	54
2.6.5 SOURCES DE DEFAUTS	56
2.7 LE MOULAGE	56
2.7.1 GENERALITES	56
2.7.2 MODELISATION DE LA PHASE DE MOULAGE	57
2.7.3 DEFINITION DES MOYENS DE MISE EN OUVRE DU MOULAGE DE LA PIECE	63
2.7.4 VALIDATION INDUSTRIELLE ET QUANTIFICATION DU PROCESSUS DE MOULAGE	63
2.7.5 SOURCES DE DEFAUTS	64

2.8 LA CONSOLIDATION	64
2.8.1 GENERALITES	64
2.8.2 MODELISATION DE LA PHASE DE CONSOLIDATION	65
2.8.3 DEFINITION DES MOYENS DE MISE EN OUVRE DE LA CONSOLIDATION DE LA PIECE	67
2.8.4 VALIDATION INDUSTRIELLE ET QUANTIFICATION DU PROCESSUS DE CONSOLIDATION	68
2.8.5 SOURCES DE DEFAUTS	68
2.9 LA SOLIDIFICATION	68
2.9.1 GENERALITES	68
2.9.2 MODELISATION DE LA SOLIDIFICATION DE LA PIECE	69
2.9.3 DEFINITION DES MOYENS DE MISE EN OUVRE DE LA SOLIDIFICATION DE LA PIECE	70
2.9.4 VALIDATION INDUSTRIELLE ET QUANTIFICATION DU PROCESSUS DE SOLIDIFICATION	70
2.9.5 SOURCES DE DEFAUTS	70
3. CONTRAINTES LIEES AUX FLUX ET AUX COUTS	71
3.1 GENERALITES	71
3.2 PARAMETRES CLES LIES AUX FLUX	72
3.3 CRITERES ET VERROUS RENCONTRES DANS LA MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE.....	73
4. CONCLUSION	75
CHAPITRE 3 STRUCTURATION, CAPITALISATION ET GESTION DES CONNAISSANCES D'INDUSTRIALISATION DES COMPOSITES	76
1. INTRODUCTION	77
2. GESTION DES CONNAISSANCES D'ENTREPRISE	77
2.1 TERMINOLOGIE APPLIQUEE AUX SCIENCES DE L'INFORMATION	78
2.2 CREATION ET GESTION DE CONNAISSANCES DE L'ENTREPRISE	80
2.3 GESTION DE L'INCERTITUDE ET DE L'IMPRECISION	82
3. STRUCTURATION DES CONNAISSANCES	83
3.1 OBJECTIFS DE LA STRUCTURATION DES CONNAISSANCES	83
3.2 LES METHODES DE MODELISATION DES INFORMATIONS ET DES CONNAISSANCES	84
3.3 REPRESENTATION FORMELLE DES OBJETS D'ENTREPRISE	86
3.4 BILAN SUR LES MODELES EXISTANTS	92
3.5 LE MODELE PPR DE REFERENCE	94
3.6 LE MODELE PRODUIT	95
3.7 LE MODELE RESSOURCE	99
3.8 LE MODELE PROCESSUS	100
3.9 ILLUSTRATION	105
4. LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES	108
4.1 OBJECTIFS DE LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES	108
4.2 LES CARTES DE VISITE	109
4.3 LES REGLES DE FABRICATION	111
4.4 ILLUSTRATION	112

5. CONCLUSIONS	114
----------------------	-----

CHAPITRE 4 EXPLOITATION DES CONNAISSANCES POUR

L'INDUSTRIALISATION..... 115

1. INTRODUCTION.....	116
2. GENERATION DES PROCESSUS DE FABRICATION	116
2.1 LES APPROCHES PAR VARIANTES	118
2.2 LES APPROCHES GENERATIVES	120
2.3 NOTRE APPROCHE.....	123
2.3.1 ETAPE PREPARATOIRE	126
2.3.2 ETAPE PRODUCTIVE ENRICHIE PAR UNE GENERATION DESCENDANTE	129
2.4 ILLUSTRATION	132
3. LES INDICATEURS DE PERFORMANCE.....	135
3.1 NOTIONS GENERALES	135
3.2 LES METHODES D'ESTIMATION DES COUTS	136
3.3 INDICATEURS ET INDUCTEURS DE PERFORMANCE UTILISES DANS NOTRE ETUDE....	140
3.1.1 EVALUATION DE LA QUALITE DU PRODUIT.....	140
3.1.2 EVALUATION DU DELAI D'OBTENTION DU PRODUIT	142
3.1.3 EVALUATION DES COUTS DE FABRICATION	144
3.1.4 EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ATELIER DE FABRICATION	148
4. LE CLASSEMENT DES PROCESSUS DE FABRICATION.....	149
4.1 LES METHODES DE CLASSEMENT MULTICRITERES.....	149
4.1.1 LES METHODES D'AGREGATION COMPLETE	150
4.1.2 LES METHODES D'AGREGATION PARTIELLE	152
4.1.3 LES METHODES D'AGREGATION LOCALE	153
4.1.4 SELECTION D'UNE METHODE	154
5. LA METHODE AHP	155
5.1 HIERARCHISATION DU PROBLEME.....	155
5.2 COMPARAISONS BINAIRES	156
5.3 CALCUL DES PRIORITES	158
5.4 ANALYSE DE CONSISTANCE	160
5.5 ILLUSTRATION DE LA HIERARCHISATION DES ALTERNATIVES AVEC LA METHODE AHP	161
6. ANALYSE DE SENSIBILITE	164
6.1 ANALYSE DE SENSIBILITE POUR L'EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA VARIABILITE.	164
6.2 ANALYSE DE SENSIBILITE POUR L'EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA VALEUR D'UNE PRIORITE D'UN CRITERE DE SELECTION	166
6.3 ANALYSE DE SENSIBILITE POUR EVALUER LES VARIATIONS DUES A PLUSIEURS POINTS DE VUE DE JUGEMENT	169
7. CONCLUSIONS	171

<u>CHAPITRE 5 UTILISATION D’UN CAS D’ETUDE POUR LA VALIDATION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE</u>	<u>173</u>
1. INTRODUCTION	174
2. PRESENTATION DU CAS D’ETUDE	174
3. LE LOGICIEL SUPPORT DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE : CAPSAIRTM-SOFT	180
3.1 LES INTERFACES DE CAPITALISATION	181
3.2 LES INTERFACES DE DESCRIPTION DU PRODUIT	184
3.3 L’INTERFACE D’AFFICHAGE DU RESULTAT DE LA GENERATION DE PROCESSUS.....	185
3.4 LES INTERFACES D’ANALYSE MULTICRITERES	186
4. CONCLUSIONS	188
 Conclusion générale et perspectives	 189
 Références	 194
 Annexes	 201

**Table des
illustrations**

Figure 1 Evolution de l'utilisation des matériaux composites dans les avions fabriqués par AIRBUS	18
Figure 2 Typologie de produits fabriqués par la SLCA	19
Figure 1-1 Equipement et outillage pour le moulage de préimprégnés. Source : AIRTECH..	27
Figure 1-2 Fabrication d'une pièce par moulage au contact [Berbain].....	28
Figure 1-3 Moulage par compression des BMC et des SMC [DUNOD 2008].....	29
Figure 1-4 Variantes du procédé d'enroulement filamentaire [Berbain]	29
Figure 1-5 Variantes du procédé RTM [DUNOD 2008]	31
Figure 1-6 Composants utilisés lors du moulage d'une pièce réalisée par infusion [DUNOD 2008].....	31
Figure 1-7 Comparaison des procédés de fabrication des composites selon les coûts d'investissement [DUNOD 2008]	32
Figure 1-8 Comparaison des procédés de fabrication des composites selon l'évolution du coût d'une pièce par rapport à la taille de la série [Rudd 1997].....	33
Figure 1-9 Pièces type réalisées en matériaux composites dans le secteur aéronautique [Cinquin]	34
Figure 1-10 Porte de cargo d'un avion intégrant des raidisseurs et des inserts métalliques [Thuis 1999].....	37
Figure 2-1 Diagramme d'intégration produit-procédé-ressource [Martin 2011]	41
Figure 2-2 Démarche de sélection des procédés (adaptée de [Ashby 2001])	42
Figure 2-3 Principe du procédé de mise en œuvre des préimprégnés [CES 2007].....	43
Figure 2-4 Principales étapes de la fabrication par moulage de préimprégnés	44
Figure 2-5 Principe du procédé d'infusion de résine liquide [CES 2007]	45
Figure 2-6 Principales étapes de la fabrication par infusion de résine liquide.....	46
Figure 2-7 Diagramme de référence de l'analyse de l'industrialisation des procédés	46
Figure 2-8 Démarche d'intégration des connaissances issues de la modélisation et de l'industrialisation des procédés	48
Figure 2-9 Démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape d'imprégnation (Activité A1).....	51
Figure 2-10 Démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape d'imprégnation (Activité A13)	52
Figure 2-11 Fabrication des tissus préimprégnés [Fibersonixx 2010]	52
Figure 2-12 a) Avancement du front insaturé grâce à l'effet de la capillarité [Lawrence 2009] ; b) Evolution de la pression dans une préforme de perméabilité constante [Michaud 2000] ...	54
Figure 2-13 Simulation d'infusion réalisé utilisant le logiciel PAM-RTM et avancement du front de résine pendant l'infusion d'une pièce de démonstration	55
Figure 2-14 Contrôle de l'imprégnation par capteurs de tension ponctuels [Danisman 2007]	55
Figure 2-15 Démarche d'intégration des connaissances liées au moulage des renforts	57
Figure 2-16 Classification des préformes.....	59
Figure 2-17 Apparition des plis lors de l'opération de moulage [Rozant 2000].....	60
Figure 2-18 a) dispositif de cisaillement; b) courbes effort-déplacement correspondant à une éprouvette cisailée [Mihaluta 2009].....	60
Figure 2-19 Déformation du pli lors du moulage et géométrie du patron correspondant	61

Figure 2-20 Comparaison des renforts fibreux en fonction de leur aptitude au formage [Binétruy]	61
Figure 2-21 a) Découpe et recouvrement des plis dans une zone critique (Photo PPE); b) Réconception des patrons de découpe afin d'éviter les plissements induits par la géométrie de la zone sandwich centrale.....	61
Figure 2-22 Schémas de principe des mesures linéaire et radiale de la perméabilité d'un renfort	62
Figure 2-23 Démarche d'intégration des connaissances liées au compactage.....	65
Figure 2-24 Expérimentation pour l'évaluation du compactage sur outillage en angle : a) définition des préformes ; b) dimensions des outillages [Hubert 2001]	66
Figure 2-25 Préformage intermédiaire et utilisation d'un dispositif de compactage mécanique dans les zones à forme concave de l'outillage d'infusion (Photo PPE).....	67
Figure 2-26 Démarche d'intégration des connaissances liées à la solidification de la pièce...	69
Figure 2-27 Dispositif expérimental pour les essais diélectriques et variation de l'impédance pendant la cuisson de la résine RTM6 [Kazilas 2005].....	71
Figure 2-28 Grandes étapes de la fabrication d'un composite et étapes de caractérisation du processus	72
Figure 2-29 Diagrammes de flux utilisés comme support d'implémentation des deux ateliers de fabrication [Mihaluta 2010].....	73
Figure 2-30 Critères d'évaluation et verrous identifiés au niveau des grandes étapes de la fabrication par moulage des préimprégnés.....	74
Figure 2-31 Critères d'évaluation et verrous identifiés au niveau des grandes étapes de la fabrication par infusion de résine liquide	74
Figure 2-32 Interactions au niveau du tryptique Qualité-Coûts-Délais	75
Figure 3-1 Les mécanismes de la création des connaissances [Nonaka 1995]	80
Figure 3-2 Construction d'une mémoire d'entreprise – modèle de Grundstein [Grundstein 1995].....	81
Figure 3-3 Diagramme SADT, activité A0 : démarche de gestion des connaissances pour l'industrialisation des composites	81
Figure 3-4 Diagramme SADT, Activité A1 : « structurer les connaissances »	84
Figure 3-5 Modèle contenant les concepts spécifiques à la méthode CommonKADS	86
Figure 3-6 Méta-modélisation du modèle de Produit [Harani 1997]	87
Figure 3-7 Méta-modélisation du modèle de Processus de Conception [Harani 1997].....	88
Figure 3-8 Diagramme UML pour le modèle PPO [Noël 2008].....	89
Figure 3-9 Diagramme de classes UML du modèle FBS-PPRE [Labrousse 2008].....	90
Figure 3-10 Représentation des liens entre les objets temporels [Labrousse 2008]	91
Figure 3-11 Taxinomie des Caractéristiques Clés [Dantan 2006]	91
Figure 3-12 Modèle UML pour le Caractéristiques clés enrichi des objets issus du modèle PPR [Etienne 2007]	92
Figure 3-13 Modèle PPR de référence	95
Figure 3-14 Diagramme de classes UML pour la vue Produit.....	96
Figure 3-15 Types de raidisseurs qui servent à améliorer la rigidité d'une structure composite [Kassapoglou 1997].....	97
Figure 3-16 Diagramme de classes UML pour la vue Ressource	100

Figure 3-17 Diagramme de classes UML pour la vue Processus (point de vue statique).....	101
Figure 3-18 Types d'objets et opérateurs d'enchaînement utilisés dans le modèle dynamique du processus	103
Figure 3-19 Vue dynamique processus	103
Figure 3-20 Vue dynamique du processus de type infusion de résine liquide	104
Figure 3-21 Vue dynamique du processus de type moulage de préimprégnés	104
Figure 3-22 Modèle produit pour le démonstrateur traité	105
Figure 3-23 Vue dynamique du processus d'infusion correspondant au démonstrateur traité	106
Figure 3-24 Vue dynamique du processus de moulage de préimprégnés correspondant au démonstrateur traité	107
Figure 3-25 Diagramme SADT, Activité A2 : « capitaliser les connaissances »	108
Figure 3-26 Données contenues dans une carte de visite séquence pour une entité alésage [Villeneuve].....	110
Figure 3-27 Procédure de capitalisation continue	111
Figure 4-1 Activité A4 – Sélectionner des processus	116
Figure 4-2 Les approches de génération automatique de gammes (adapté de [Villeneuve 2003])	118
Figure 4-3 Etape préparatoire de la TGAO [Chang 1990].....	119
Figure 4-4 Etape productive de la TGAO [Chang 1990]	119
Figure 4-5 Connaissances exprimées sous forme de table et arbre de décision.....	121
Figure 4-6 Génération de gamme par approche algorithmique (LURPA-TOUR).....	122
Figure 4-7 Principe de fonctionnement d'un système expert [Karkan 1993]	122
Figure 4-8 Démarche globale de génération de processus	125
Figure 4-9 Définition des processus enveloppe	127
Figure 4-10 Processus enveloppe à déroulement simple	128
Figure 4-11 Processus enveloppe d'une pièce complexe	129
Figure 4-12 Déroulement de la phase préparatoire	130
Figure 4-13 Logigramme décrivant le déroulement de l'étape productive	131
Figure 4-14 Déroulement de la phase productive	132
Figure 4-15 Panneau sandwich – Caractéristiques Technologiques	133
Figure 4-16 Résultat de l'étape préparatoire	133
Figure 4-17 Exemple de génération : processus enveloppe enrichis par les processus intermédiaires	134
Figure 4-18 Système d'informations pour la méthode ABC/M [Gupta 2003]	137
Figure 4-19 Décomposition des coûts pour la fabrication d'un plancher automobile [Verrey 2006].....	139
Figure 4-20 Panneau auto-raidi et modèle d'estimation de coût [Kassapoglou 1997]	139
Figure 4-21 Représentation schématique de l'étape de calcul du temps de transformation ..	143
Figure 4-22 Schéma de principe de l'étape de calcul du coût matières	145
Figure 4-23 Représentation hiérarchique du problème de sélection des processus	156
Figure 4-24 Hiérarchie du problème récapitulant les priorités par niveaux.....	163
Figure 4-25 Hiérarchie établie selon les priorités de base des critères de sélection	167
Figure 4-26 Variation du critère TVF (priorité fixée à 0,11)	167

Figure 4-27 Variation du critère TVF (priorité fixée à 0,51)	168
Figure 4-28 Analyse de sensibilité selon les 4 points de vue	171
Figure 5-1 Pièce d'étude et outillage de fabrication associé	175
Figure 5-2 Schéma de nomenclature du panneau selon la fabrication en tissus préimprégnés	176
Figure 5-3 Schéma de nomenclature du panneau selon la fabrication par infusion.....	177
Figure 5-4 Processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés.....	178
Figure 5-5 Processus de fabrication basé sur le procédé d'infusion de résine	179
Figure 5-6 Interface d'accès à la base de données sur la matière première	181
Figure 5-7 Interfaces de renseignement des paramètres des ressources et des opérations.....	182
Figure 5-8 Interface de définition de renseignement des états intermédiaires	183
Figure 5-9 Interface de saisie des données générales du produit et de la CT « Plaque ».....	184
Figure 5-10 Masque de saisie des données caractérisant le raidisseur de type J.....	185
Figure 5-11 Interface proposant un aperçu du processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés.....	186
Figure 5-12 Résultat de l'analyse multicritères.....	187
Figure 5-13 Analyse de sensibilité selon différents points de vue des décideurs	188

Acronymes

ABC	Activity Based Costing
ABM	Activity Based Management
BMC	Bulk Moulding Compound
CAGT	Computer Aided Group Technology
CAPP	Computer Aided Process Planning
CAPSAIRTM	Projet soutenu par la DGE, intitulé : « Conception Allégée de Pièces de Structure Aéronautique par Infusion de Résine et RTM »
CN	Commande numérique
COV	Composant Organique Volatile. Il s'agit des émissions de styrène, point toujours critique lors de la fabrication des composites plastiques
CT	Caractéristique Technologique
CV	Carte de Visite
DGE	Direction Générale des Entreprises
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FBS-PPRE	Function, Behaviour, Structure – Process, Product, Resource, External effect
KC	Key Characteristic, Caractéristique Clé
LRI	Liquid Resin Infusion : procédé d'infusion de résine liquide
PTFE	Polytétrafluoroéthylène, polymère technique commercialisé sous les marques déposées : Teflon, Fluon, Hostalen
SLCA	Société Lorraine de Construction Aéronautique S.A., filiale d'Aircelle, Groupe SAFRAN
SMC	Sheet Moulding Compound
TGAO	Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur
TVF	Taux Volumique de Fibres

Glossaire

Caractéristique Technologique

Egalement appelée singularité, il s'agit de l'association entre un composant structurel de base du produit et un couple ressource-procédé dans le but d'en définir le processus type. Ce composant élémentaire regroupe des informations de nature structurelle et fonctionnelle du produit. Un seul ou plusieurs variantes de processus de fabrication permettent sa fabrication

Contrainte d'antériorité

Attribut associé à un état intermédiaire appartenant à un processus afin d'indiquer que celui-ci doit être réalisé avant un état intermédiaire d'un autre processus (synonyme : contrainte d'assemblage)

Contrainte de précédence

Contrainte entre deux états intermédiaires d'un même processus prévue pour indiquer leur succession

Etat intermédiaire

Etat physique d'un produit permettant d'indiquer une étape de sa fabrication et de symboliser l'entrée ou le résultat d'une activité de transformation

Feature Caractéristique

Mode opératoire

Liste ordonnée d'actions requises pour l'obtention d'un résultat. Dans le cadre de notre travail le mode opératoire décrit une succession d'activités. Il s'agit donc d'un synonyme du processus de fabrication

Norme

Contrainte de contrôle utilisée dans le diagramme SADT de la démarche d'intégration des connaissances issues de la modélisation et de l'industrialisation des procédés. Les normes se déclinent en « Normes de sécurité du personnel » et « Normes de sécurité de l'environnement »

Pièce de base

Pièce à la quelle on associe un processus de fabrication complet (processus enveloppe)

Priorité finale d'une alternative

Note d'une alternative obtenue suite à une évaluation multicritères de type AHP à partir des poids des indicateurs de performance

Processus enveloppe

Liste ordonnée d'activités associées aux principales étapes de fabrication d'une pièce de base

Processus type

Enchaînement d'opérations imposé par l'utilisation d'un procédé principal de fabrication des composites (moulage des préimprégnés, infusion de résine liquide)

Singularité Caractéristique Technologique

Temps de cycle

Le temps nécessaire pour exécuter un cycle de fabrication complet et répétitif.

Temps de production

Temps correspondant à la fabrication d'une pièce ; mesure de l'intervalle de temps écoulé depuis le lancement en fabrication et l'obtention du produit fini

Temps de transformation

La somme des durées de toutes les opérations nécessaires à la fabrication d'un produit.

Introduction générale

Le contexte actuel d'un marché fortement concurrentiel amène les entreprises manufacturières à adopter des démarches de réduction des coûts dans l'ensemble de leurs activités. Une des pistes vers l'amélioration de la rentabilité de leur activité est l'innovation. En ce qui concerne la fabrication des produits, les entreprises sont concernées par deux problématiques d'innovation :

- L'amélioration continue qui agit sur le système de fabrication existant par une recherche d'optimisation locale et globale du système ;
- La poursuite des nouveaux projets de recherche orientés vers le développement de nouvelles technologies permettant d'obtenir les produits avec une qualité au moins égale à celle du système existant et à des coûts inférieurs.

Ces problématiques concernent d'autant plus le milieu industriel aéronautique qu'il est assujéti à des contraintes fortes de qualité, de coûts et de délais. La puissance technologique et scientifique des acteurs en concurrence dans ce secteur ainsi que l'exigence de leurs clients les placent dans une course très serrée envers l'obtention de produits de plus en plus performants.

La première étape abordée par les acteurs du milieu aéronautique a été celle de la recherche des nouveaux matériaux qui permettent la réalisation des produits plus résistants et plus légers. Ainsi, on a vu l'acier se faire remplacer, pour certaines pièces, dans un premier temps par les alliages d'aluminium et de titane. Ensuite, c'était le tour de ces matériaux de se voir concurrencés par des matériaux avancés : les matériaux composites. On dit que les matériaux avancés sont utilisés dans la structure de l'aéronef AIRBUS A350 à un taux de 60%. 40% de cette quantité est allouée aux matériaux composites. La **Figure 1** montre l'évolution de l'emploi des matériaux composites dans la structure des avions AIRBUS.

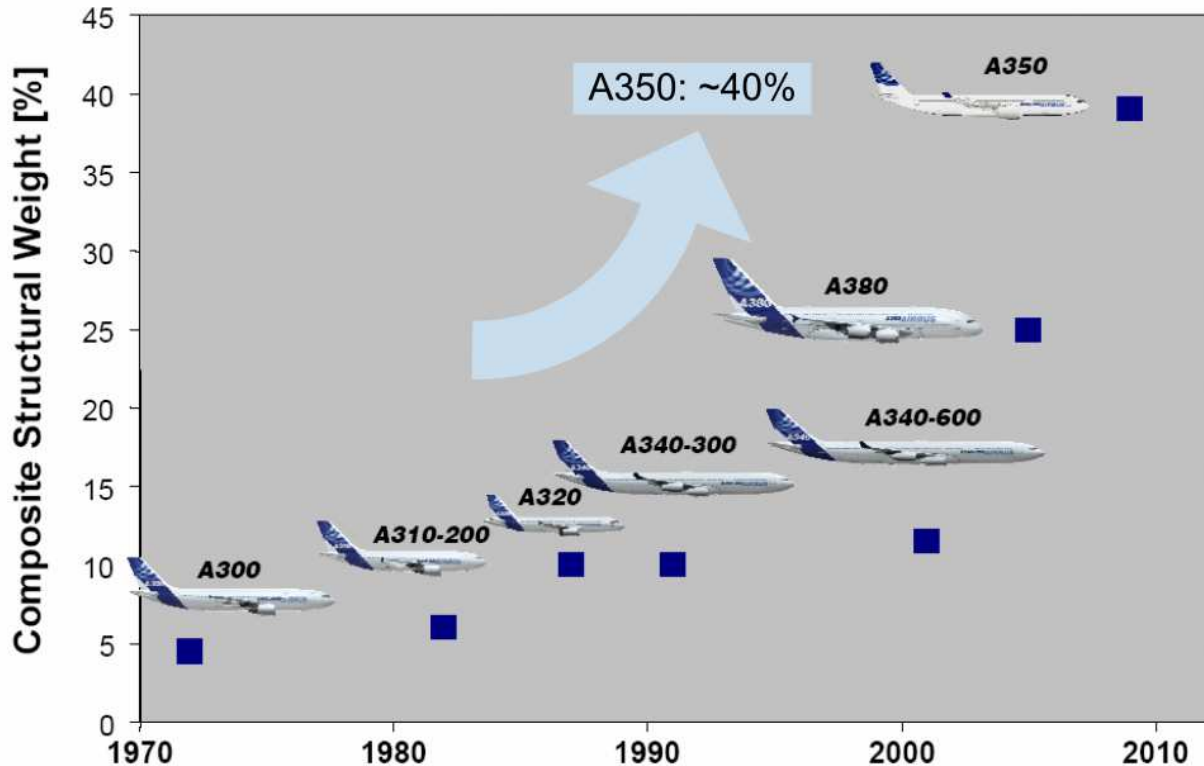


Figure 1 Evolution de l'utilisation des matériaux composites dans les avions fabriqués par AIRBUS

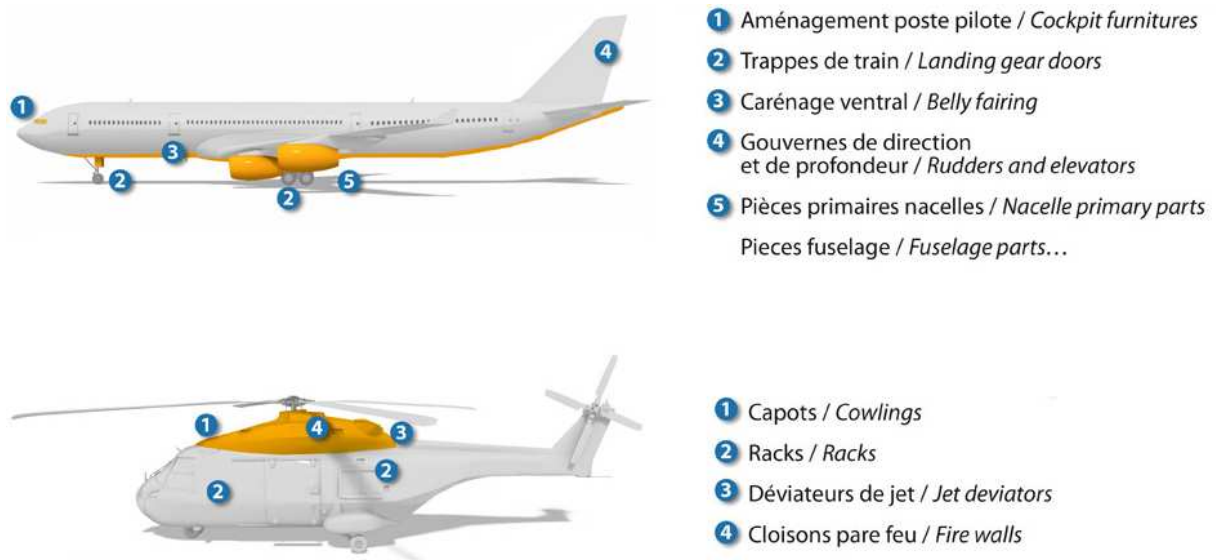


Figure 2 Typologie de produits fabriqués par la SLCA

Cette situation correspond aussi à la SLCA (Société Lorraine de Constructions Aéronautiques) qui souhaite conserver une position toujours gagnante sur le marché de produits en matériaux composites réalisés en fibres longues de carbone et en matrice époxyde. A travers le projet CAPSAIRTM, qui regroupe plusieurs acteurs de la Région Lorraine, on a essayé de poursuivre cette quête de la réduction des coûts de fabrication des produits par l'intermédiaire du développement d'un procédé de fabrication innovant. Ce procédé fait partie du groupe des technologies dites de moulage liquide.

L'entreprise maîtrise depuis plus d'une trentaine d'années la fabrication de ces produits par le procédé de moulage de préimprégnés. Ces pièces concernent notamment les parties externes des aéronefs (fuselage, capots) (**Figure 2**). Ce procédé nécessite l'emploi d'équipements très gourmands en termes de coût de fonctionnement. Les autoclaves, à part la forte consommation d'énergie, limitent la capacité de l'entreprise et agissent comme un goulot d'étranglement au niveau des flux de production. L'objectif principal de la société est de développer par l'intermédiaire de ce projet une nouvelle technologie qui lui permettrait de gagner une part de marché inabordable jusqu'à présent. Le procédé basé sur l'infusion de résine liquide lui permettrait également de répondre aux demandes des clients qui concernent des produits complexes à forte intégration de fonctions tout en gardant les coûts d'investissement et de fonctionnement à des niveaux bas.

Le procédé d'infusion de résine liquide comporte des avantages par rapport au moulage des préimprégnés. Il permet l'utilisation des outillages à bas coût et la réduction du temps de fabrication du produit grâce à la possibilité de réalisation de la totalité de la pièce en une seule étape (infusion) après préformage de l'ensemble. Le procédé d'infusion de résine a été longtemps utilisé dans les industries automobile et navale. Ces produits ne sont pas assujettis aux mêmes contraintes de sécurité que ceux issus de l'industrie aéronautique. De ce fait, le procédé n'a pas retenu l'attention des industriels du secteur aéronautique. Néanmoins, à cause de l'augmentation de l'importance des contraintes économiques et grâce aux avancées technologiques réalisées autour du procédé d'infusion et des matières employées, de plus en plus de fabricants de pièces de structure pour les aéronefs s'orientent vers cette technologie.

Dans cette situation de multiplication des alternatives de fabrication d'un même produit, la tâche des ingénieurs confrontés aux problématiques de sélection des processus de fabrication et d'analyse de l'industrialisation des produits n'est pas aisée. Ils sont confrontés à une problématique de choix de solutions et ils doivent prendre en compte pour cela des multiples

critères de classement qui sont souvent conflictuels car ils sont imposés par différents acteurs gravitant autour du département et de l'entreprise. Ainsi, ce processus de décision est caractérisé par la multitude de critères et des points de vue les définissant. La quantification des indicateurs liés à ces critères n'est pas toujours facile. Souvent, des critères qualitatifs doivent être pris en compte.

Dans ce travail nous nous proposons de développer une méthode traitant cette problématique de décision lors de la sélection des processus de fabrication d'un point de vue industriel. Cette méthodologie doit se baser sur la représentation de manière structurée des connaissances du domaine et sur leur exploitation de manière automatique en vue de simuler le raisonnement humain. Cette méthodologie doit être supportée par un outil informatique qui permet aux utilisateurs de disposer des indicateurs obtenus de manière rapide afin de les aider lors du choix d'une technologie de fabrication pour un nouveau produit. Ainsi, la méthodologie doit traiter du domaine de fabrication des pièces composites par les procédés de moulage de préimprégnés et d'infusion de résine liquide.

On ne cherche pas à développer une méthodologie qui permettrait d'indiquer la solution optimale. Nous nous basons sur des modèles estimatifs de la qualité du produit ou des coûts engendrés par la fabrication afin de proposer aux décideurs une liste d'alternatives à laquelle on associera des indicateurs de performance. Cela est réalisé dans le but de disposer d'un outil qui permet d'analyser rapidement la viabilité industrielle d'un processus de fabrication. Une fois les solutions obtenues, il revient au décideur d'apporter la décision finale car le contexte de l'analyse ainsi que la pertinence des données qui en découlent sont difficilement capturées afin de créer un modèle idéal.

Nous avons structuré ce document en cinq principaux chapitres qui présenteront la méthodologie développée dans le cadre de ce travail. Dans chaque chapitre on s'intéresse dans un premier temps au positionnement de solutions envisagées par rapport à l'existant et dans un deuxième au développement des étapes unitaires de notre méthodologie. Les idées proposées sont illustrées à travers des études de cas.

Le premier chapitre a comme objectif d'introduire le sujet de ce travail. On y présente en détail la problématique qui a déclenché ce projet de recherche.

Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons à la conception intégrée d'une pièce composite et de son processus de fabrication. Cette prise en compte simultanée des paramètres pertinents est articulée autour du tryptique Produit-Processus-Ressources. On aborde également la problématique de l'industrialisation des produits composites en s'appuyant sur les contraintes et les connaissances que l'on peut tirer à partir des principales étapes de fabrication d'un produit composite.

Dans le troisième chapitre nous nous intéressons aux méthodes et aux outils de la gestion des connaissances afin d'évaluer leur applicabilité à notre étude. Des modèles de représentation de manière structurée des connaissances connexes à la fabrication des composites sont proposés. Cette formalisation est nécessaire afin de pouvoir capitaliser le savoir-faire des acteurs du projet avant de pouvoir réaliser un traitement en utilisant ces informations. Ce chapitre a donc comme objectif de présenter les grandes lignes de la préparation des connaissances à l'exploitation.

Le quatrième chapitre concerne l'exploitation des connaissances. Un premier traitement réalisé consiste à utiliser une technique mixte de génération de processus (basée sur la technologie de groupe et sur les approches génératives). Nous avons choisi de créer de manière automatique les gammes de fabrication possibles du produit afin de pouvoir évaluer la viabilité industrielle des processus disponibles. Des indicateurs de performance seront

ajoutés en vue de réaliser un classement de la performance des processus de fabrication possibles. La majorité des indicateurs de performance proposés sont spécifiques à une analyse de la performance par activité du processus de fabrication. Une analyse multicritères est proposée afin d'établir la hiérarchie des solutions.

Une étude de cas est proposée dans le cinquième chapitre. Cette étude de cas a comme objectif de résumer les principales étapes de la méthodologie proposée. La pièce considérée dans cette étude est analysée en mettant en œuvre la démarche par l'intermédiaire d'un outil informatique.

Le document s'arrête bien évidemment sur une section résumant nos conclusions et les perspectives de ce travail.

Chapitre 1 Contexte et problématiques

1. Introduction

Ce chapitre a comme objectif d'introduire des notions sur les produits auxquels nous nous intéressons dans ce travail. Des définitions sont apportées afin de fixer le cadre de cette étude.

Ainsi, des notions sur les matériaux composites sont introduites. On s'intéresse brièvement à leur composition et à leur structure. Les principaux procédés de mise en forme de ces matériaux sont également décrits afin d'illustrer la multitude de processus de fabrication disponibles pour le secteur des matériaux composites. Les principaux critères de sélection des processus dans ce cadre sont évoqués.

L'objectif de ces premières sections est de fixer le cadre de notre travail. En partant de ces notions nous pouvons expliciter les problématiques et les motivations de ce travail de recherche.

2. Les matériaux composites dans l'industrie

Depuis toujours les ingénieurs se sont intéressés à l'amélioration des produits et de leurs propriétés mécaniques notamment. Deux pistes ont été suivies : l'amélioration des propriétés des matériaux existants et le développement de nouveaux matériaux. Ainsi, les produits fabriqués traditionnellement en alliages métalliques se sont vu concurrencés par des produits définies par une structure spécifique faisant appel à des mélanges de propriétés issues de l'assemblage de matériaux innovants. Ces produits s'appellent généralement produits composites.

Définition : un produit composite représente l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles. La nouvelle structure ainsi obtenue a des propriétés physiques bien supérieures à celles caractérisant les matériaux de base.

Les matériaux composites sont généralement constitués de deux composants de base :

- *Le renfort* : la partie qui confère la résistance mécanique du produit ;
- *La matrice* : la partie qui agit comme liant de l'ensemble et qui apporte des propriétés de protection ou d'aspect.

Leur utilisation est très variée. Elle peut aller des produits de construction pour l'industrie civile (béton armé constitué d'un renfort en acier et d'une matrice en ciment) aux produits de construction mécanique pour l'industrie automobile (pièce de carrosserie constitué d'un renfort en fibres de verre, carbone *etc.* et d'une matrice en résine).

A ces composants de base on peut associer dans certaines applications des *additifs* en vue d'améliorer les caractéristiques du produit ou de lui conférer des nouvelles caractéristiques qui ne sont pas assurées par la matrice et par le renfort (ajout d'une couleur, amélioration du comportement au feu du produit *etc.*). Une liste des additifs rencontrés habituellement dans la constitution des produits composites est présentée sous forme de tableau (**Tableau 1-1**).

Selon la matrice employée, on distingue les types de produits composites suivants :

- Produits composites à matrice organique ;
- Produits composites à matrice métallique ;
- Produits composites à matrice céramique.

Tableau 1-1 Additifs utilisés dans la fabrication de produits composites [DUNOD 2008]

Types de composants	Effets induits	Nature	Polymères utilisateurs	Taux courants
Renforts	Rigidité, tenue mécanique	Fibres de verre	Polyester	~30%
		Fibres de carbone, d'aramide	Epoxy	>50%
Charges	Réduction du coût et dilatation	Craie, talc	Polypropylène (PP)	<50%
	Tenues au choc et chimique	Silice, mica	Bakélite (PF), urée-formaldéhyde (UF), formica (MF)	<50%
	Isolation électrique, glissement	Graphite	Polyamides (PA°)	<50%
Plastifiants	Souplesse, réduction de la fragilité	Phtalates (DEHP), phosphates, glycols	PVC	<20%
Stabilisants	tenue aux UV (vieillissement)	Sels de Ba, Ca, Sn	PVC	<5%
Antioxydants	Oxydation O ₂ , O ₃	Aromatiques, phénoliques	Polyéthylène (PE), PP, polystyrène (PS)	<5%
Colorants	Aspect, stabilité à la lumière	Oxydes (Cd, Cr ...)	Tous	<1%

Dans ce travail nous nous intéressons à la fabrication d'un groupe restreint de produits composites. Les hypothèses de ce travail sont résumées par la définition suivante du produit composite :

Définition utilisé dans le cadre de ce travail : un produit composite est l'assemblage d'un renfort constitué de fibres longues de carbone avec une matrice organique représentée par une résine époxyde.

Dans cette définition on retrouve deux types de classification qui sont liées à la nature du renfort et de la matrice.

Les renforts existants font appel à :

- Des fibres courtes utilisées pour des applications caractérisées par des faibles sollicitations mécaniques. L'orientation des fibres est aléatoire ;
- Des fibres longues utilisées pour les produits fortement sollicités. Dans ces cas, une orientation des fibres est recherchée afin de disposer d'un produit ayant une architecture optimisée pour le type de sollicitation rencontrée.

Les matrices organiques sont de type :

- Thermodurcissable : la résine est liquide à l'état initial. Après polymérisation, elle subit une transformation irréversible qui la rend solide. Dans cette catégorie on retrouve les résines polyesters, époxydes *etc.* ;
- Thermoplastiques : la résine est solide à l'état initial, se présentant sous forme de granules, feuilles *etc.* lors du chauffage, la résine est ramollie afin d'être assemblée

avec le renfort. Elle durcit après refroidissement mais cette transformation n'est pas définitive.

Par rapport aux matériaux métalliques, les composites offrent un meilleur rapport résistance-masse. Ils sont moins sensibles aux effets de l'atmosphère ambiante car la matrice offre des propriétés anticorrosives. Néanmoins, ils sont caractérisés aussi par des inconvénients. Ils sont plus sensibles aux impacts et la détection des défauts et leur réparation sont des étapes plus délicates à mettre en œuvre.

Grace à leurs avantages, les matériaux composites ont été rapidement adoptés par l'industrie aéronautique. Dans ce secteur le gain de masse est toujours recherché car un aéronef plus léger implique des frais d'exploitation plus faibles et une autonomie de vol grande.

Les pièces typiques issues de l'industrie aéronautique sont divisées en :

- Pièces d'aménagement intérieur ;
- Pièces de structure.

Dans les deux cas les produits sont soumis à des contraintes très sévères de qualité. En termes de propriétés mécaniques les matériaux composites permettent de répondre à ces critères tout en gardant un poids faible. Les pièces d'intérieur sont également soumises aux contraintes liées aux émissions libérées lors d'éventuels incendies. Pour y répondre, le choix de la matrice sera l'étape clé. Les pièces de structure doivent incorporer des additifs notamment pour permettre aux pièces de récupérer et évacuer les charges électriques causées par les foudres.

Les procédés de fabrication des produits composites présentent des spécificités par rapport aux procédés de mise en forme des matériaux métalliques. Nous allons présenter brièvement dans la section suivante les principaux procédés employés pour la fabrication des composites.

3. Technologies de fabrication des composites

Une forte liaison entre les procédés de fabrication et les matériaux composites existent. On dit que le procédé de fabrication s'impose dès la sélection d'un matériau. Effectivement, le développement de ces matériaux s'est réalisé de manière conjointe avec le développement d'un procédé associé. Dans l'industrie on retrouve souvent des variantes d'un même procédé de fabrication. Des techniques mixtes ont été également développées.

Les principales caractéristiques des procédés de mise en forme de matériaux composites qui les différencient des procédés de fabrication des matériaux métalliques sont, selon [Rudd 1997] :

- La forme finale du produit ainsi que la géométrie des constituants moulés sont obtenues quasiment en même temps ;
- Une variété de matériaux caractérisés par des propriétés différentes, des conditions opératoires et des coûts sont utilisés ;
- Le déroulement opératoire a un rôle prédominant sur les caractéristiques mécaniques, la géométrie et les coûts de fabrication.

Dans cette section, la classification des principaux procédés de fabrication se fera en fonction de la matière première notamment. Dans ce travail nous nous intéressons uniquement aux matériaux composites constitués de fibres longues et des matrices therm durcissables. Dans ce cas, la matière première peut être livrée sous les formes suivantes :

- Fibres préimprégnés (le renfort est imprégné par le fournisseur avec la matrice) ;

- Fibres sèches et matrice liquide (le renfort et la résine sont livrés séparément, étant souvent achetés chez des fournisseurs différents).

La mise en forme des renforts secs et des matrices liquides offre plus de possibilités en termes de technologie de fabrication, tandis que le préimprégné est plus limité.

Une autre classification des techniques de fabrication des produits composites peut se faire selon la mise en forme des matières premières. Deux grandes catégories peuvent être identifiées. Elles sont communément appelées :

- *Procédés en moule ouvert* : ces techniques sont caractérisées par le fait que lors de la mise en forme de la résine celle-ci reste toujours en contact avec l'air ambiant. Ces procédés sont caractérisés ainsi par des taux élevés d'émission de composants organiques volatiles (COV) comme le styrène. On peut citer dans cette catégorie les techniques suivantes : moulage au contact, projection simultanée *etc.*
- *Procédés en moule fermé* : à l'opposé des techniques en moule ouvert, les techniques en moule fermé consistent à mettre en œuvre la résine uniquement après la fermeture du moule. Cette fermeture peut se faire en employant différentes solutions : bâches à vide, contre-moules souples ou contre-moules rigides. Dans tous les cas le moule est fermé et il reste étanche dès l'introduction de la matrice et jusqu'à la solidification de la pièce. De cette manière les COV libérés pendant la fabrication peuvent être récupérés augmentant ainsi la sécurité du travail. Les exemples les plus cités sont les procédés d'infusion, de moulage par transfert de résine *etc.*

Les processus de fabrication suivent dans tous les cas les étapes de fabrication suivantes :

- Préparation de l'outillage. Cette étape consiste à nettoyer le moule pour enlever les particules accrochées à l'outillage après le démoulage de la pièce précédente. Il faut également appliquer des couches d'un produit démoulant pour éviter que la pièce à fabriquer accroche à la surface du moule et faciliter le démoulage.
- Moulage. Cette étape consiste à disposer le renfort et la matrice à la surface de l'outillage. Selon la matière première utilisée plusieurs modes opératoires peuvent être appliqués afin de réaliser cette phase. La mise en forme de la matière peut se faire d'un seul coup ou en plusieurs étapes jusqu'à constituer l'architecture complète du produit.
- Compactage. Une pression vient s'appliquer afin d'obtenir le taux volumique de fibres souhaité. Selon le mode d'application de cette pression de compactage, le taux volumique est plus ou moins régulier dans la pièce.
- Polymérisation. La cuisson de la pièce doit être assurée afin d'atteindre l'état final du produit par la solidification de la matrice. Selon les applications et le type de matrice, l'étape de polymérisation peut se faire à température ambiante (produits communs) ou à haute température (produit hautes performances).
- Démoulage et parachèvement. Après solidification, la pièce est retirée du moule. Généralement elle nécessite peu d'opérations additionnelles afin d'arriver au stade fini. Le plus souvent le bord de la pièce doit être enlevé par détournage sauf pour un nombre restreint de procédés qui permettent la réalisation de pièces nettes de détournage. Ces procédés commencent à être de plus en plus étudiés car ils permettent la réduction des temps de cycle et des coûts de fabrication.

3.1 Le moulage des préimprégnés

Comme son nom l'indique, ce procédé (**Figure 1-1**) utilise comme matière première des renforts imprégnés par une matrice. Le fournisseur propose les tissus imprégnés de résine sous forme de rouleaux ou de bandes. Comme c'est le fournisseur qui réalise l'imprégnation, c'est lui qui est responsable d'assurer l'homogénéité de l'assemblage entre le renfort et la matrice. Les renforts utilisés sont la fibre de verre, la fibre de carbone ou des hybrides. La matrice est généralement une résine époxyde mais des résines polyesters peuvent être utilisées. Dans la plupart des cas il s'agit de la fabrication des pièces à haute qualité pour l'aéronautique et leur production requiert des conditions de salle blanche afin de pouvoir contrôler le taux d'humidité et le taux de poussière.

La mise en forme de la matière consiste à enlever les films de protection des préimprégnés et de disposer les tissus sur un moule métallique ou lui-même en composite. Ensuite on vient ajouter un ensemble de composants nécessaires à la fabrication mais qui seront enlevés en fin de fabrication. Ce kit sert à préparer la mise sous vide de la pièce. Il est composé de constituants suivants :

- Un film démoulant perforé en PTFE servant comme barrière entre l'empilage de plis de préimprégnés et les films supplémentaires ;
- Un tissu drainant de résine qui permet de laisser passer l'excès de résine de la pièce et qui sert également de répartiteur de la pression de compactage ;
- Un tissu drainant de l'air qui permet de laisser passer les composants volatils de la pièce ou l'air emprisonné entre les plis ;
- Un film plastique (vessie) étanche qui couvre l'ensemble et qui est fermé sur les bords par du mastic afin de réaliser l'étanchéisation de la pièce.

A cet ensemble s'ajoutent les composants permettant de mettre en place une aspiration de l'air contenu dans la vessie afin de réaliser le vide. Cela permet d'avoir une première étape de compactage de la pièce sous l'action de l'air ambiant qui sera suivie par une deuxième tributaire de la qualité demandée à la pièce. Ainsi, ce compactage additionnel est réalisé à l'intérieur d'un autoclave qui permet d'assurer une pression de compactage qui peut atteindre 10bar dans le cas des produits hautes performances. En même temps que l'apport de pression s'effectue la cuisson de la pièce dans le même outillage.

Ce procédé permet, dans le cas des pièces à géométrie simple, de faire appel à des étapes de moulage automatisé à l'aide d'une tête de drapage robotisé qui dispose sur le moule des bandes de préimprégné.



Figure 1-1 Equipement et outillage pour le moulage de préimprégnés. Source : AIRTECH

3.2 Le moulage au contact

Ce procédé (**Figure 1-2**) fait appel à un renfort sec et une matrice liquide. C'est un procédé très basique qui ne permet pas d'obtenir des pièces avec des performances mécaniques très élevées. Il est également assujéti à l'expérience de l'opérateur qui va déterminer la qualité du produit. Cela sera expliqué par la description du déroulement opératoire.

On utilise généralement des fibres de verre comme renfort et de la résine polyester nécessitant une cuisson à température ambiante. Les outillages sont basiques, réalisés eux-mêmes en fibres de verre et recouverts d'un film de résine permettant d'assurer un état de surface d'un côté de la pièce d'assez bonne qualité.

La mise en forme consiste à disposer éventuellement un film de gel coat qui permettra de donner à la pièce l'état de surface souhaité mais aussi sa couleur. Après solidification du gel coat, les fibres sèches sont ajoutées. Elles peuvent être précédées par un film de surface afin d'éviter de marquer le gel coat et de transmettre en surface la forme du renfort. Après chaque pli de renfort la résine est disposée au pinceau ou au roller. Ces étapes sont répétées jusqu'à atteindre l'épaisseur finale de la pièce. La pièce est polymérisée à température ambiante.

Le principal désavantage de ce procédé est la dépendance totale de la qualité du produit de la maîtrise de l'opérateur. Ainsi, la répétabilité du procédé est définie par le niveau de qualification de celui qui réalise la mise en forme. Le degré de compactage de la pièce ainsi que le respect de l'épaisseur de la pièce sont variables.

On peut automatiser ce procédé afin de s'affranchir des étapes manuelles qui influent sur la qualité finale du produit. La variante automatisée porte le nom de projection simultanée. Une tête de projection est utilisée afin de disposer en même temps sur l'outillage les fibres et la résine. Généralement les fibres sont courtes mais des variantes du procédé qui permet d'associer une tête de projection à une autre qui dispose les fibres longues ont été envisagées.

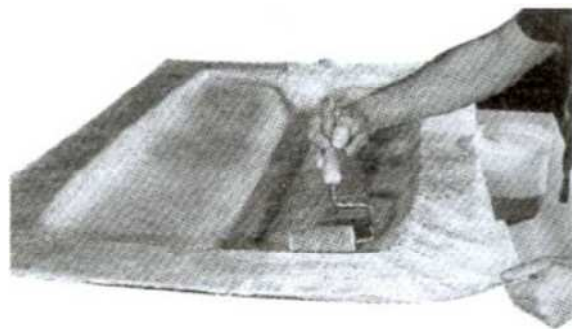


Figure 1-2 Fabrication d'une pièce par moulage au contact [Berbain]

3.3 Le moulage par compression

Le moulage par compression est un procédé adapté surtout à la fabrication en grande série car il nécessite des outillages très coûteux (moule et contre-moule massifs, presse). Les matrices thermodurcissables comme celles thermoplastiques sont fréquemment utilisées. Ce sont des matrices spécialement développées pour ce type de procédé et elles sont caractérisées par des durées courtes de polymérisation afin de pouvoir s'adapter aux cadences requises.

On utilise dans le cas de la mise en forme des thermodurcissables des renforts préimprégnés sous forme de particules. Les fibres sont présentées sous forme coupée (fibres courtes) et on appelle ces composants BMC (acronyme du terme anglais : *Bulk Moulding Compounds*). L'orientation des fibres est aléatoire dans le cas de ce procédé. La mise en forme des matériaux consiste à disposer dans un moule les composants préimprégnés.

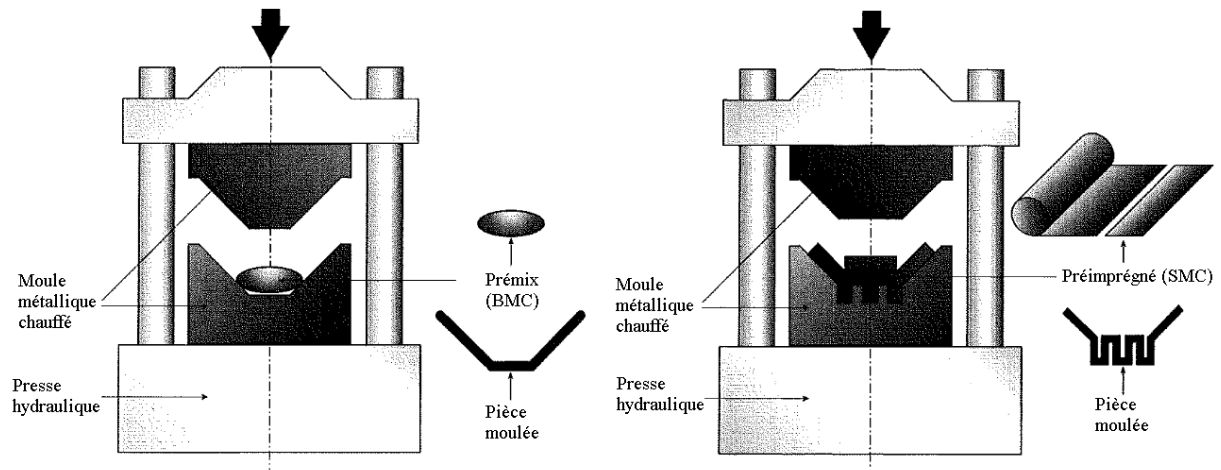


Figure 1-3 Moulage par compression des BMC et des SMC [DUNOD 2008]

Sous l'action du coulisseau de la presse, le contre-moule vient appliquer une pression sur le volume de matière contenu à l'intérieur du moule. Dans le cas de ce procédé le renfort et la matrice vont se déplacer afin de remplir la cavité de l'outillage. Les pressions exercées couramment sont de 20-40bar. Les outillages sont pourvus de résistances électriques afin d'assurer la polymérisation de la pièce à l'intérieur du moule.

Souvent, afin d'augmenter la cadence de production, une polymérisation partielle est réalisée à l'intérieur du moule. La pièce est ensuite retirée et la polymérisation continue en dehors du moule. De cette manière l'outillage est prêt à accueillir une nouvelle pièce plus rapidement.

Des variantes de ce procédé consistent à utiliser une matière première livrée sous forme de rouleaux. Des feuilles de renfort préimprégné sont découpées à la taille requise et disposées dans l'outillage. Ces feuilles sont appelées par leur acronyme SMC venant de l'anglais *Sheet Moulding Compound*. Les deux variantes du procédé sont présentées dans la Figure 1-3.

3.4 L'enroulement filamentaire

Ce procédé permet l'obtention de pièces de révolution. La matière première est constituée de fibre longues qui sont enroulées ensemble avec la résine sur un mandrin ou bien on peut créer une préforme de la pièce par enroulement des fibres sèches et réaliser par la suite l'imprégnation du renfort dans un outillage fermé. Le champ d'application de ce procédé peut aller des simples réservoirs aux nacelles des moteurs des avions. La cadence de ce procédé est réduite et le procédé s'applique ainsi aux petites séries comme c'est le cas des programmes aéronautiques. Il permet néanmoins d'obtenir des préformes sèches par enroulement qui serviront de matière première pour d'autres procédés de fabrication.

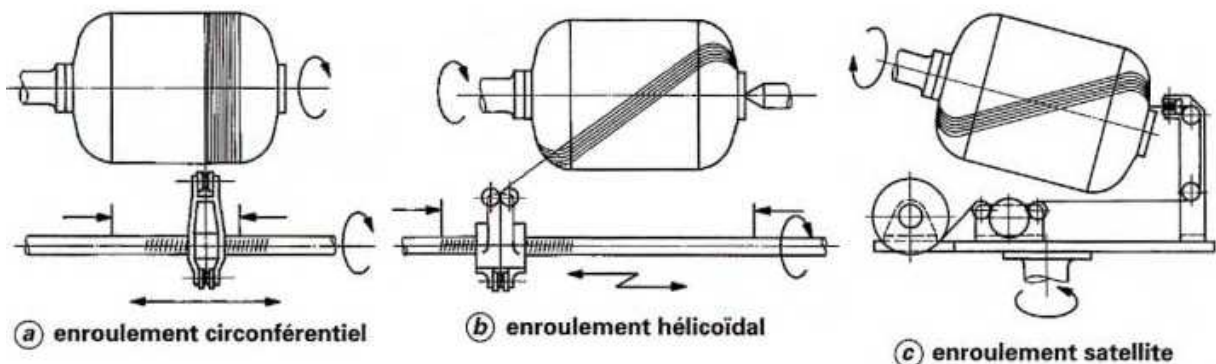


Figure 1-4 Variantes du procédé d'enroulement filamentaire [Berbain]

La mise en forme consiste à utiliser un dispositif automatisé qui permet de récupérer les fibres des bobines de fils chargés sur la machine et de les faire passer par un bain de résiné avant de les disposer sur le mandrin. Ce dernier est en mouvement de rotation. Une coordination entre sa vitesse de rotation et la vitesse de déplacement du dispositif de dépôt des fils est nécessaires afin d'obtenir une couverture régulière de la surface du mandrin. Si plusieurs couches sont nécessaires à obtenir l'épaisseur finale de la pièce la fabrication se réalise en étapes afin de laisser le temps à chaque couche de polymériser.

3.5 Le moulage liquide

Cette technique regroupe un ensemble de procédés connexes basés sur la mise en forme d'un renfort sec et d'une résine à l'état liquide qui vient imprégner les fibres dans un moule fermé. Ces procédés consistent à disposer une préforme sèche à l'intérieur du moule et d'envoyer la résine une fois l'outillage fermé de manière étanche. De nombreuses variantes de ce procédé existent qui se différencient selon le type d'outillage utilisé pour la fabrication et selon la manière d'imprégnation du renfort par la matrice.

Ainsi, on peut faire appel à des outillages composés d'un moule et d'un contre-moule rigides, comme dans le cas du procédé RTM (Resin Transfer Moulding). Les outillages sont généralement lourds et nécessitent des coûts d'investissement importants. Des variantes ont été développées afin de diminuer l'impact sur les coûts par l'utilisation de contre-moules légers. Dans le cas du procédé RTM, la résine est injectée à l'intérieur de l'outillage avec ou sans assistance du vide.

Les variantes du procédé RTM sont :

- Le RTM standard (RTM lourd) qui utilise des moules et des contre-moules métalliques massifs ;
- Le RTM assisté par le vide qui utilise des outillages moins onéreux car le vide appliqué sur la périphérie du moule permet d'assister la fermeture de l'outillage et de travailler ainsi sous plus faible pression.
- Le RTM light qui utilise des moules en composite et s'affranchit des coûts liés au système d'injection. Le vide dans ce cas permet d'aspirer la résine injectée par le centre de la pièce.

Les variantes RTM standard et RTM assisté par le vide sont présentées dans la **Figure 1-5**.

Un autre type d'imprégnation existe dans lequel au lieu de « pousser » la résine, celle-ci est « tirée » sous l'effet de la dépression réalisée à l'intérieur de l'outillage. C'est le cas du procédé d'infusion de résine liquide pour lequel l'utilisation d'une bâche plastique pour la fermeture de l'outillage permet une réduction importante des coûts. Cela est possible car on ne travaille plus dans les mêmes conditions de haute pression. Certaines variantes du procédé d'infusion peuvent faire appel à des contre-moules rigides.

Dans tous les cas, une préforme sèche est réalisée et disposée dans l'outillage. Cela permet d'avoir une maîtrise de l'orientation des fibres lors de la phase de moulage. Ces préformes peuvent être réalisées soit par l'empilement de plusieurs plis pour réaliser une préforme 2D ou par tissage de la préforme afin d'obtenir une architecture complexe spécifique aux préformes 3D. Un gel coat peut accompagner la fabrication si l'état de surface de la pièce l'exige.

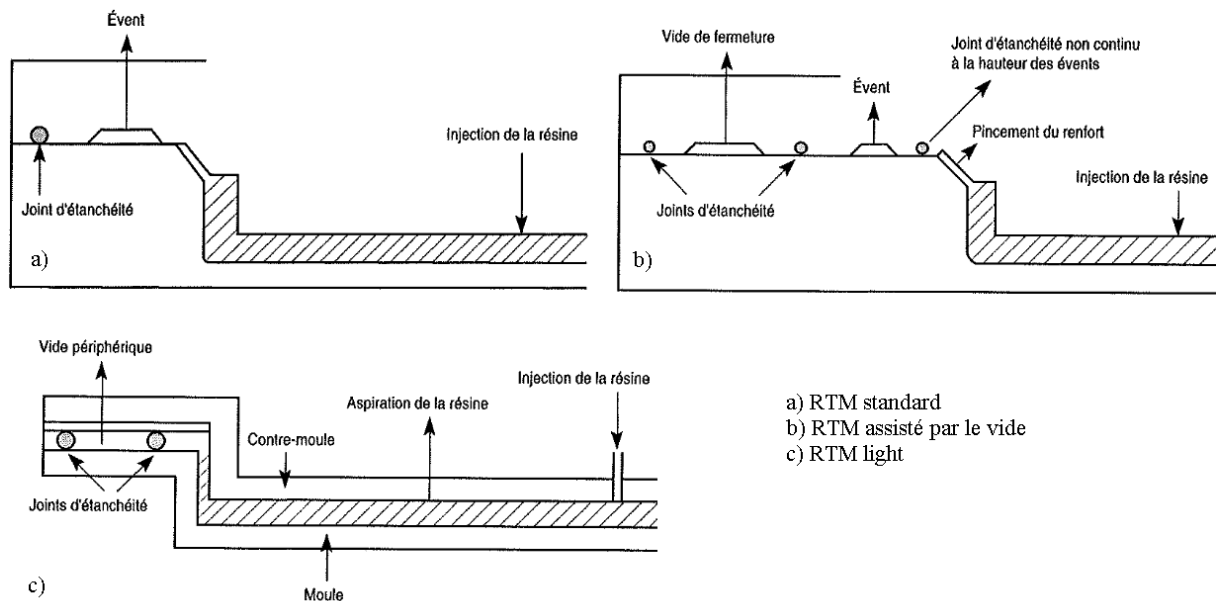


Figure 1-5 Variantes du procédé RTM [DUNOD 2008]

La fermeture de l'outillage nécessite une presse dans le cas du procédé RTM lourd. Cette presse va également appliquer un effort pour comprimer la préforme. Dans les variantes légères on se sert de la pression exercée sur la surface de la préforme par le contre-moule suite au serrage. Le procédé d'infusion nécessite uniquement la pression exercée sur la pièce par l'air ambiant. Il est clair que le niveau de compactage varie en fonction du système assurant la pression ainsi que la régularité de la distribution de l'effort exercée sur les différentes parties de la pièce.

La pièce est imprégnée par la résine soit par injection sous pression (1bar à 10bar) dans le cas du procédé RTM soit sous l'effet du vide uniquement dans le cas du procédé d'infusion de résine. Lors de l'infusion plusieurs événements sont utilisés pour l'arrivée de la résine et pour l'évacuation de l'air. Leur nombre dépend de la taille de la pièce. Des systèmes basés sur des tuyaux périphériques d'arrivée de résine peuvent être employés.

Le moulage d'une pièce réalisée par infusion nécessite plus de préparation et l'utilisation des composants consommables servant à faciliter la mise en œuvre de la résine. Ces kits de mise sous vide sont similaires à ceux utilisés pour les pièces fabriquées à partir des préimprégnés. La Figure 1-6 montre le moulage type d'une pièce infusée.

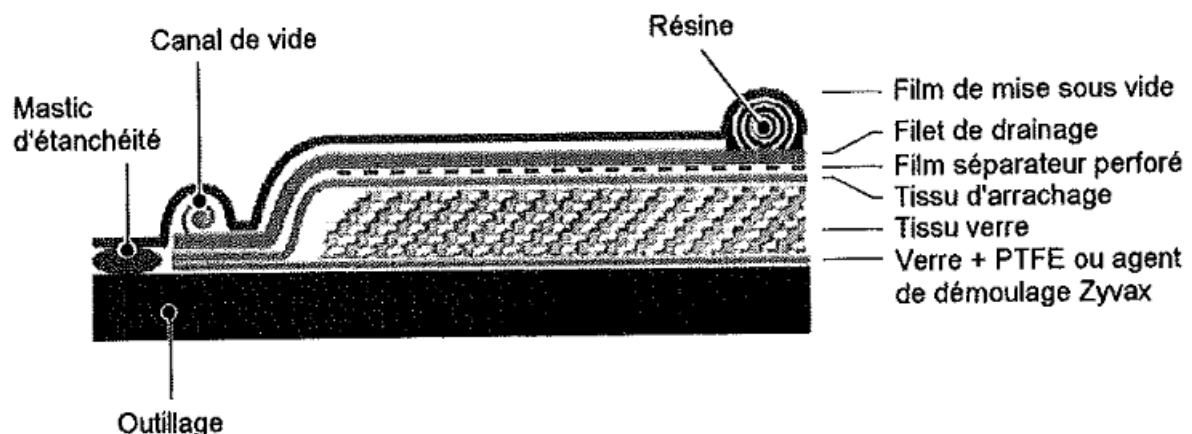


Figure 1-6 Composants utilisés lors du moulage d'une pièce réalisée par infusion [DUNOD 2008]

Dans le cas de l'infusion ces kits sont légèrement plus compliqués car la résine doit être acheminée vers les points d'évacuation sans emprisonner l'air à cause de la fermeture des fronts de résine. De ces faits, des freins et des zones de distribution (accélération) de la résine sont prévues à certains endroits de la pièce. Cela augmente le temps de conception et de mise en œuvre du procédé d'infusion.

3.6 Comparaison économique des procédés

La diversité de la matière première et le nombre important de constituants qui interviennent dans le cadre de ces procédés de fabrication font que la variation des coûts matières est importante d'un procédé à un autre. De même, une large panoplie d'équipements et d'outillages caractérise les processus de fabrication. Souvent les coûts matières sont mis en balance avec les coûts d'investissement et un équilibre est atteint entre les solutions de fabrication.

Néanmoins, le processus de décision d'un ingénieur travaillant sur la sélection des procédés et sur la conception préliminaire du processus de fabrication d'un produit composite est complexe à cause de ces contraintes économiques.

Un aperçu de l'influence des coûts d'investissement sur le coût total de fabrication d'une pièce composite est donné dans la **Figure 1-7**. Cela permet d'avoir une première idée sur le classement des processus de fabrication des pièces composites.

Les coûts d'une pièce dépendent également du secteur analysé et des cadences de fabrication des produits. Un classement des procédés de fabrication est donné dans la **Figure 1-8** afin d'évaluer l'influence de la taille de la série sur le coût d'une pièce.

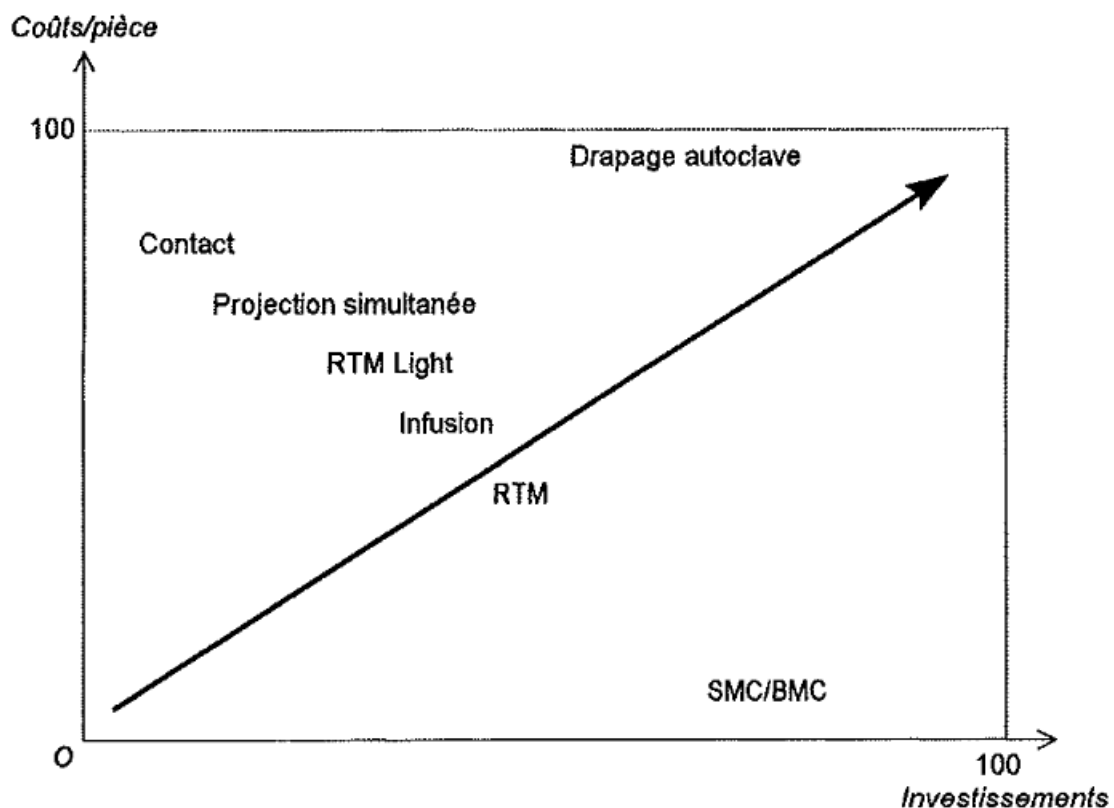


Figure 1-7 Comparaison des procédés de fabrication des composites selon les coûts d'investissement [DUNOD 2008]

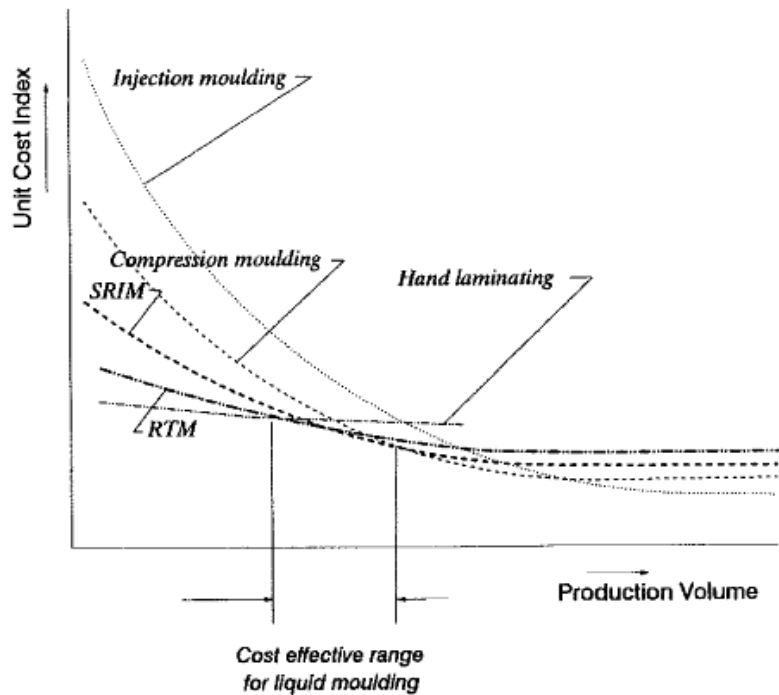


Figure 1-8 Comparaison des procédés de fabrication des composites selon l'évolution du coût d'une pièce par rapport à la taille de la série [Rudd 1997]

3.7 Procédés traités dans ce travail

Dans ce travail nous nous limitons à l'étude de deux procédés :

- Le moulage de préimprégnés ;
- L'infusion de résine liquide.

Nous nous limitons aux deux procédés car le cadre de ce travail est défini par le projet CAPSAIRTM qui a comme principal objectif de développer un nouveau procédé basé sur l'infusion de résine liquide. La performance du nouveau procédé devra être évaluée par rapport à la performance du procédé utilisé par l'entreprise SLCA, porteur du projet. Le procédé de référence est celui classiquement utilisé dans l'industrie aéronautique : le moulage de préimprégnés et leurs polymérisation en autoclave.

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, la qualité des produits obtenus avec ces procédés diffère selon des nombreux facteurs : matière première, conditions opératoires etc. ainsi, dans notre travail nous allons nous intéresser aux variantes des deux procédés permettant d'obtenir des produits pour un secteur spécifique : l'aéronautique.

4. Critères de sélection des technologies de fabrication pour l'industrie aéronautique

Différents critères dirigent la conception des produits et de leurs processus de fabrication dans le milieu industriel aéronautique. Tandis que le secteur automobile est régi par des contraintes de coût et de cadence, le secteur aéronautique militaire ou civil est plutôt orienté vers des critères liés à la performance des produits. Cela ne veut pas dire que des démarches d'analyse et de réduction des coûts ne soient pas constamment mises en place.

Nous allons aborder dans les sections suivantes les principaux critères qui sont utilisés dans ce secteur pour la sélection des procédés de fabrication.

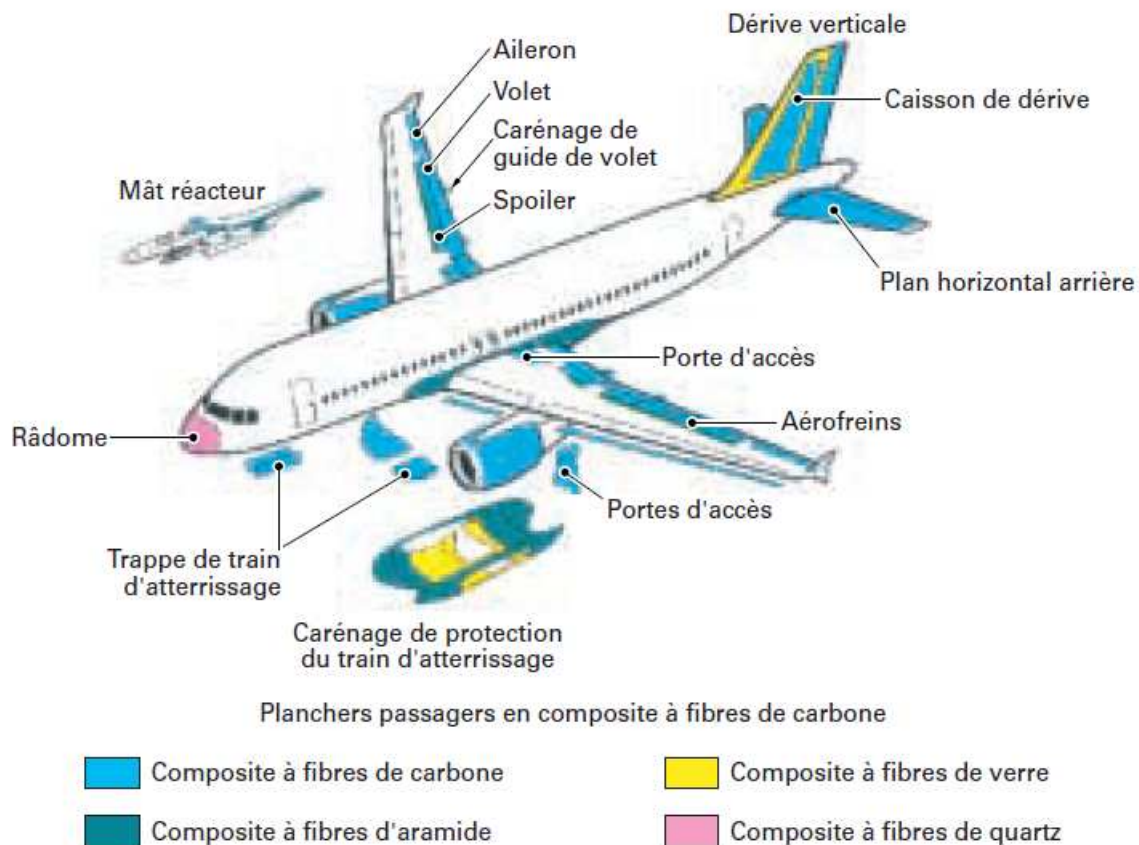


Figure 1-9 Pièces type réalisées en matériaux composites dans le secteur aéronautique [Cinquin]

On peut identifier les critères suivants, gravitant autour du tryptique Qualité-Coût-Délai :

- Qualité : masse du produit, performance mécanique ;
- Coût : coût matières, coûts d'investissement, coût de production ;
- Délai : temps de fabrication, temps de cycle.

4.1 La masse du produit comme critère de sélection

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'introduction du composite dans le secteur aéronautique a été dicté notamment par les avantages qu'il offre par rapport aux pièces équivalentes en matériaux métalliques. Ces avantages sont liés dans un premier temps aux possibilités de réduction de la masse du produit fini.

La **Figure 1-9** montre les pièces des avions typiquement réalisées en matériaux composites. Dans la recherche des gains de masse, l'utilisation des composites s'étend à d'autres pièces de structure non figurées sur la figure en cause.

Les principaux gains dans le secteur aéronautique qui peuvent survenir suite à la réduction de la masse sont :

- L'augmentation de la rentabilité : le poids gagné sur la structure peut être remplacé par le poids des passagers supplémentaires ;
- L'augmentation de l'autonomie de vol : avec la même quantité de carburant un avion volera plus longtemps ;

- L'augmentation de la facilité d'utilisation des appareils : des équipements additionnels peuvent être embarqués afin de faciliter l'exploitation par les pilotes ou bien pour augmenter la qualité de service et le confort des passagers.

Un choix entre plusieurs processus de fabrication se fait aussi par rapport au degré d'intégration de fonctions et de composants qu'ils peuvent offrir. Dans notre cas de figure cela se traduit par un nombre plus faible d'assemblages requis. Cela implique que moins de rivets seront utilisés dans la composition du produit fini. On constate un gain de temps de fabrication mais aussi un gain de masse.

4.2 La performance mécanique comme critère de sélection

Comme les pièces entrant dans la structure d'un avion sont soumises à des critères d'acceptation sévères, elles sont souvent dimensionnées avec des coefficients de sécurité très grands. Les matériaux composites offrent des caractéristiques mécaniques meilleures que celles des certains équivalents métalliques. Ainsi, à performance égale un produit en matériaux composites sera plus léger.

Tableau 1-2 Comparaison des caractéristiques des matériaux composites et des métalliques [Negrier]

Caractéristiques	Métaux			Composites à matrice organique					Composites à matrice métallique
	Acier 35NCD16	Alliage aluminium AU4SG	Alliage titane TA6V	Bore époxy	Carbone HR époxy	Carbone HM époxy	Aramide époxy	Verre époxy	Bore aluminium
Résistance à la rupture (MPa)	1850	500	1000	2000	1000 à 1300	1000	1300 à 1800	1800 à 2000	1250 à 1800
Module d'Young (GPa)	200	72	110	220	130	200	75	53	230
Masse volumique (g/cm ³)	7.9	2.8	4.45	2.1	1.5	1.7	1.37	2	2.7
Résistance à la rupture massique (km)	24	18	23	95	65 à 85	60	95 à 130	90 à 100	45 à 65
Module d'Young massique (km)	2500	2600	2500	10500	8700	11800	5500	2650	8500
Coefficient de dilatation linéique (K ⁻¹)									
a) longitudinal	12.10 ⁻⁶	23.10 ⁻⁶	-	-	-0.2.10 ⁻⁶	-0.8.10 ⁻⁶	-5.10 ⁻⁶	6.10 ⁻⁶	-
b) transversal	12.10 ⁻⁶	23.10 ⁻⁶	-	-	35.10 ⁻⁶	35.10 ⁻⁶	60.10 ⁻⁶	31.10 ⁻⁶	-
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)									
a)longitudinale	40	170	-	-	4.2	55	-	-	-
b) transversale	40	170	-	-	0.7	1.3	-	-	-
Capacité thermique massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	450	900	-	-	840	840	-	-	-
Résistivité (Ωm)									
longitudinale	0.4.10 ⁻⁶	0.03.10 ⁻⁶	-	-	40.10 ⁻⁶	20.10 ⁻⁶	-	-	-
transversale	0.4.10 ⁻⁶	0.03.10 ⁻⁶	-	-	66.10 ⁻³	100.10 ⁻³	-	-	-

Les composites sont caractérisés par des propriétés mécaniques supérieures en ce qui concerne la tenue à la traction et à la fatigue. En plus, ils sont très résistants à la corrosion mais une précaution est à prendre contre le vieillissement humide. Ces propriétés peuvent être supportées par des additifs introduits lors de la fabrication.

Un résumé des principales caractéristiques des matériaux composites et des matériaux métalliques est présenté dans le **Tableau 1-2**.

4.3 Le coût comme critère de sélection

Même si le coût n'est pas le critère principal de sélection dans le domaine aéronautique, les industriels s'intéressent de plus en plus à l'aspect économique car à part la performance du produit, le coût devient un avantage concurrentiel à ne pas délaisser. Des coûts spécifiques sont liés à ces systèmes manufacturiers basés sur les procédés de fabrication des produits composites. Comme nous l'avons présenté, certains procédés peuvent être caractérisés par un facteur dix en termes de différence des coûts d'investissement. De plus, les fournisseurs de matière première exercent un monopole sur certains matériaux qui fait augmenter le coût d'approvisionnement.

Les principaux coûts intervenant dans le coût total d'une pièce sont présentés sous forme de l'équation :

$$\text{Coût total} = \text{Coût matières} + \text{Coût de production} + \text{Coût d'investissement} \quad (1.1)$$

Le **Tableau 1-3** montre un comparatif des prix pratiqués par les fournisseurs pour les principaux matériaux utilisés dans la fabrication des produits. On constate que les matériaux nouveaux sont très chers par rapport aux classiques à cause du faible nombre de fournisseurs et de l'état d'avancée technologique des procédés utilisés pour leur élaboration.

Tableau 1-3 Prix de la matière première

Matériau	Coût (€/kg)
Alliage d'aluminium	2 à 4
Alliage de titane	25 à 50
Carbone époxy	30 à 200
Bore époxy	700 à 1000

4.4 Le délai comme critère de sélection

Le temps de fabrication est un autre critère à prendre en compte lors de l'évaluation d'un processus de fabrication. Les matrices employées pour la fabrication des produits composites hautes performances pour l'aéronautique sont généralement des résines époxydes qui nécessitent des longues durées de cuisson.

Les aspects à prendre en compte dans l'évaluation des temps de fabrication et du délai d'obtention des produits sont les suivants :

- Les procédés considérés font appel à de nombreuses opérations manuelles. Elles demandent une main d'œuvre hautement qualifiée. La complexité de certaines géométries des produits ainsi que la variabilité inhérente aux interventions manuelles font allonger et parfois varier la durée de fabrication.
- L'existence des postes goulots. La cuisson des pièces nécessite parfois des étuves ou des autoclaves qui sont limités en capacité. Cela augmente la difficulté d'organisation des flux de production avec un impact direct sur le délai.

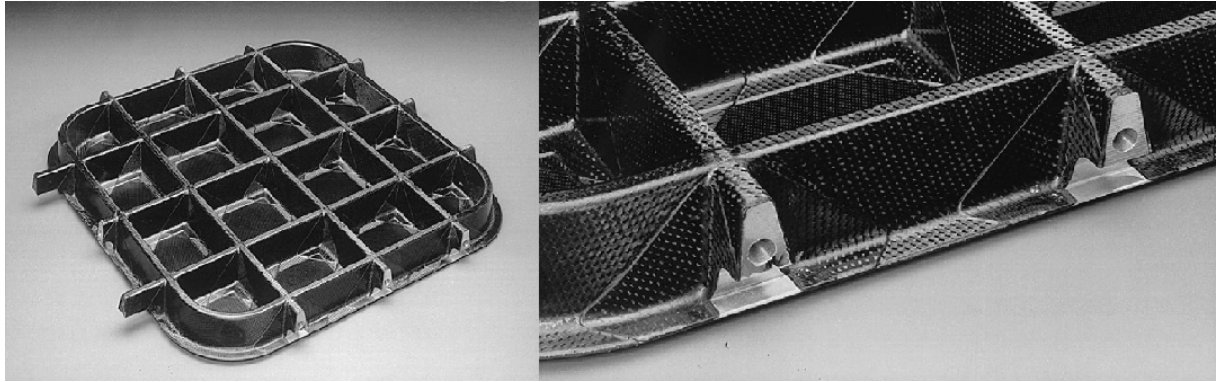


Figure 1-10 Porte de cargo d'un avion intégrant des raidisseurs et des inserts métalliques [Thuis 1999]

- La possibilité d'intégration des fonctions et des composants. Cela signifie d'abord que les produits peuvent être réalisés plus rapidement si le procédé permet de fabriquer en même temps plusieurs composants du produit. Egalement, la durée d'assemblage est réduite voir supprimée dans certains cas.

Un exemple de pièce intégrant des fonctions est présenté dans la **Figure 1-10**. Par l'intégration des raidisseurs à l'aide d'une âme en mousse autour de laquelle les renforts ont été disposés, cette pièce permet de diminuer le temps de fabrication en éliminant les étapes d'assemblage requises dans la fabrication classique utilisant des panneaux et des raidisseurs rapportés. Cela joue également sur le poids final du produit qui est allégé suite à l'élimination des rivets d'assemblage.

5. Contexte et objectifs de la recherche

Nous avons montré dans les sections précédentes que l'emploi des matériaux composites dans l'industrie aéronautique est de plus en plus important. Cela est dû notamment aux caractéristiques de ces matériaux innovants qui allient des performances mécaniques à la légèreté.

De nombreux composants peuvent être utilisés afin de fabriquer la structure du produit pour assurer une fonction spécifiée par le cahier des charges. A chaque type de composant une technologie de mise en œuvre peut être associée. Ainsi, la sélection d'un processus de fabrication impacte sur de nombreux aspects caractérisant la performance du produit et du système industriel associé. Dans le secteur aéronautique la conception du produit, de son processus de fabrication et l'analyse de leur performance est une tâche qui concerne plusieurs départements en même temps. La performance est un aspect qui s'évalue selon plusieurs critères qui sont souvent contradictoires car ils sont issus des acteurs différents ayant des points de vue spécifiques à leurs référentiels.

De plus, les acteurs d'une entreprise de fabrication de produits composites sont contraints dans leur processus d'analyse préliminaire par un cahier des charges du produit figé. Bien souvent le client réalise la conception du produit et il désigne ainsi les grandes lignes du processus de fabrication du produit à fabriquer. Il revient ainsi au bureau de méthodes de vérifier si l'atelier dispose des compétences et de la capacité pour réaliser le produit tout en respectant les contraintes du client. Généralement l'analyse du cahier des charges consiste à vérifier si des pièces similaires ont été réalisées auparavant afin d'en déduire un processus type de fabrication. Ce processus est affiné pour s'adapter au produit analysé dans le but d'évaluer la viabilité industrielle de la solution et d'estimer la rentabilité du projet. Souvent plusieurs processus se présentent comme capables et la tâche de l'ingénieur est, dans cette

situation, d'analyser la performance de chacune d'entre elles et de pondérer les critères issus des différents départements.

La pondération des critères doit par exemple prendre en compte l'importance accordée par chaque acteur à un aspect de la performance perçue du produit. Ainsi, le Bureau d'Etudes peut s'intéresser à la qualité du produit s'il est concerné par l'optimisation de la structure du produit. Le Bureau des Méthodes est concerné par les modes opératoires, les flux et l'organisation de l'atelier. Le Service Financier va accorder plus d'importance aux aspects économiques du projet, tandis que le client peut s'intéresser aux délais de livraison des produits si lui aussi est impliqué dans la chaîne d'assemblage de l'aéronef.

Pour résumer, le processus de décision lancé lors de l'analyse préliminaire du processus de fabrication d'un produit composite est caractérisé par :

- La prise en compte simultanée des relations existantes entre le produit et le processus de fabrication ;
- L'analyse des choix au niveau des matières premières pour un même composant tout en considérant les implications de ce choix sur la performance du produit et sur le processus de fabrication ;
- L'étude de la capacité des moyens de fabrication et l'impact de leur utilisation sur les coûts de fabrication ;
- La prise en compte des multiples critères de sélection des processus de fabrication.

Nous pouvons ainsi fixer le contexte et le cadre de ce travail de recherche comme étant :

« l'étude de l'étape du cycle de vie du produit composite, constitué d'un renfort à fibres longues et d'une matrice organique therm durcissable, portant sur l'analyse préliminaire du processus de fabrication et de l'étude de l'industrialisation du produit, dans le cadre des procédés de moulage de préimprégnés et d'infusion de résine liquide »

Ce travail est encadré par le projet CAPSAIRTM et porte sur le savoir-faire des acteurs du projet : SLCA, PPE, Ateliers CINI, Arts et Métiers Paris Tech.

Les hypothèses gardées pour diriger ce travail consistent à :

- Considérer le produit comme étant connu. Ainsi, on suppose que l'on dispose des résultats fournis par la phase de conception géométrique, structurelle et fonctionnelle du produit et que la description du produit soit suffisamment détaillée ;
- Utiliser dans la conception préliminaire du processus l'expérience de l'entreprise. Ainsi, les modes opératoires sont connus grâce à l'existence d'un déroulé opératoire type réalisé selon l'enchaînement des principales étapes de fabrication d'un composite. La conception détaillée du processus de fabrication est à faire ;
- Utiliser les données connues sur les moyens de fabrication de l'entreprise et des données types sur les ressources n'existant pas dans l'atelier mais qui sont requises par les principales opérations de fabrication.

Le contexte du travail sert de point de départ à l'expression des objectifs du travail. Les objectifs ponctuels que nous nous fixons sont :

- Identifier et structurer les paramètres pertinents du domaine traité pour l'industrialisation des produits composites ;
- Analyser les méthodes et les outils de la gestion des connaissances existants afin d'évaluer leur applicabilité à notre domaine d'études et de développer des nouveaux

concepts, si cela se voit indispensable, pour faciliter la mise en œuvre de notre méthodologie ;

- Formaliser et capitaliser les connaissances des acteurs du projet ;
- Utiliser les connaissances et développer un algorithme les utilisant afin de générer les processus de fabrication pour les produits composites concernés ;
- Proposer des indicateurs d'évaluation de la performance des processus de fabrication possibles et utiliser une technique d'analyse du processus de décision afin de fournir des indications aux utilisateurs, par l'intermédiaire d'un outil informatique, pour faciliter le choix d'un processus de fabrication et d'aider ainsi à l'industrialisation des produits.

Ces points seront développés dans la suite du document selon l'architecture proposée dans l'introduction générale de ce rapport.

6. Conclusions

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à des notions générales sur les produits composites. Ces notions portent sur la composition de ces produits, sur les technologies permettant leur réalisation ainsi que sur les interactions existantes entre les produits, les processus et les ressources.

Les principaux critères de sélection utilisés dans une analyse de décision portant sur les produits composites issus de l'industrie aéronautique et sur leurs processus de fabrication.

Nous avons également fixé le cadre du travail de recherche et nous avons expliqué les hypothèses et les objectifs guidant notre étude.

Chapitre 2 Les fondements des processus étudiés

1. Introduction

La conception intégrée d'une pièce et de son processus de fabrication nécessite la prise en compte simultanée des paramètres liés à la fois à la matière première employée, aux équipements de mise en œuvre et aux activités de fabrication. On peut définir le processus d'industrialisation comme étant la prise en compte simultanée des contraintes techniques, logistiques et économiques qui interagissent entre elles.

La prise en compte simultanée de ces paramètres est encore plus importante dans le cas de la fabrication des produits composites. Vu l'hétérogénéité de ces structures composites, le comportement de la pièce finie est directement lié aux caractéristiques des matériaux de base utilisées et des conditions opératoires employées tout au long de leurs fabrication. Ainsi, la conception de ces produits est assujettie par les interactions retrouvées au niveau du tryptique : Produit-Procédé-Ressource (**Figure 2-1**).

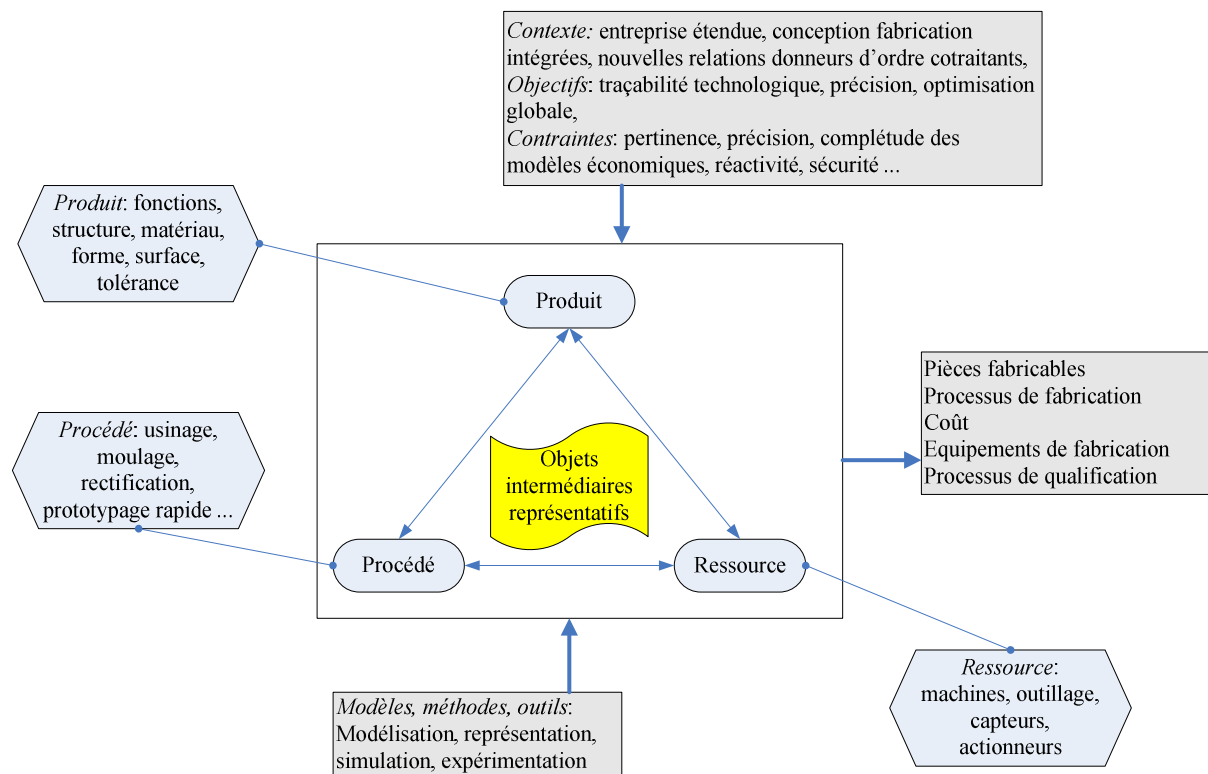


Figure 2-1 Diagramme d'intégration produit-procédé-ressource [Martin 2011]

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue l'ensemble des processus de fabrication des produits composites traités dans cette étude ainsi que les matériaux et équipements utilisés. Il est nécessaire d'identifier les paramètres caractéristiques et les modèles représentatifs de ces différents points de vue et de montrer leur interaction. On ne cherche pas à trouver une solution d'industrialisation optimale mais un ensemble de solutions robustes à hiérarchiser selon les critères identifiés. Une approche multicritère se voit nécessaire dans l'analyse des solutions d'industrialisation possibles.

2. Considérations sur les procédés et les processus

2.1 Choix des procédés

Par rapport aux techniques de fabrication conventionnelles (usinage, forgeage etc.), la fabrication des produits composites présente plusieurs particularités. Le procédé utilisé a une

influence importante sur les caractéristiques de la matière du produit fini et nécessite des études pointues dès les premières étapes de conception. Cela permet également de réduire les coûts de conception et fabrication. Une large panoplie de matériaux de base est utilisée lors de chaque opération de fabrication, introduisant des interactions multiples et des contraintes supplémentaires au niveau des conditions opératoires. Généralement, ces procédés offrent la possibilité d'obtenir un produit fini suite à un faible nombre d'opérations de fabrication. On dit que ces procédés offrent la possibilité d'intégrer un nombre important de fonctions. On se rapproche ainsi des fabrications de produits « near net shape », voir même « net shape ».

La démarche de sélection des procédés peut être schématisée comme présenté dans la **Figure 2-2**. Cette démarche consiste à regrouper toutes les variantes d'un même procédé dans une famille. On retrouve ensuite ces familles regroupées dans les grandes classes de procédés de fabrication [Ashby 2001].

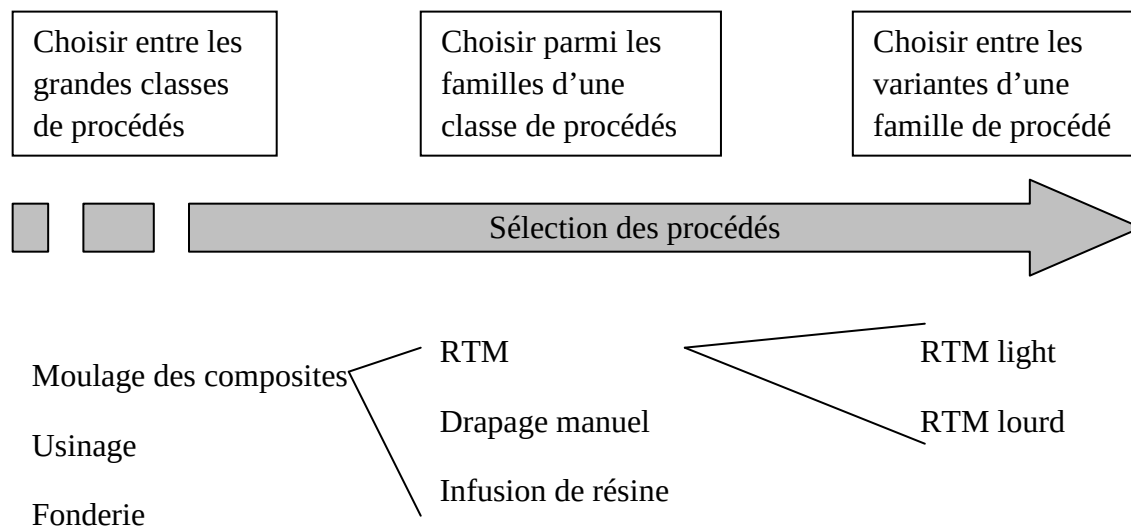


Figure 2-2 Démarche de sélection des procédés (adaptée de [Ashby 2001])

Les grandes lignes des deux processus traités dans ce document et des procédés auxquels ils font appel sont présentées dans les sections 2.2 et 2.3. Il s'agit des processus basés sur :

- Le moulage des préimprégnés – processus mis en place à la SLCA, processus de référence pour l'analyse comparative avec le nouveau procédé développé dans le cadre du projet CAPSAIRTM
- L'infusion de résine liquide – processus analysé dans le cadre du projet CAPSAIRTM afin d'optimiser les processus d'infusion pour les applications aéronautiques hautes-performances

2.2 Le moulage des préimprégnés

Le processus de moulage des préimprégnés est utilisé avec succès depuis plus de 30 ans dans l'industrie aéronautique. Les faibles séries de fabrication caractérisant cette industrie ainsi que les performances mécaniques des produits qu'on peut atteindre (TVF très élevé, de l'ordre de 65%) ont fait de ce processus un des plus utilisés. Actuellement, dans le contexte de mise au point des autres technologies de fabrication des composites moins onéreuses, ce processus se voit concurrencé notamment à cause des coûts élevés des ressources auxquelles il fait appel pendant la fabrication (autoclaves). Le principe du procédé présenté dans la **Figure 2-3**.

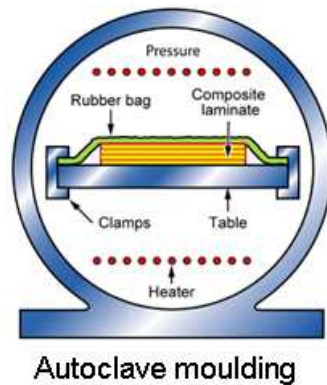


Figure 2-3 Principe du procédé de mise en œuvre des préimprégnés [CES 2007]

La matière première utilisée généralement pour les applications haute performances est constituée par les renforts en fibres de carbone imprégnées de résine époxyde. On fait également appel à des renforts en Kevlar ou à des renforts hybrides carbone-verre selon les spécificités des charges appliquées aux produits en service.

Les outillages utilisées sont des moules métalliques ouverts. Habituellement on emploie l'acier ou l'aluminium pour la fabrication de ces moules mais il existe des fabrications qui font appel à des moules réalisés en matériaux composites.

La fabrication d'une pièce consiste dans le moulage des plis préalablement découpés aux formes et dimensions requises par le plan de drapage. Cette découpe se fait sur des machines à commande numérique suivant un programme de découpe optimisé pour minimiser la consommation de la matière première. Néanmoins, les géométries complexes peuvent faire augmenter la quantité de matière perdue dans les chutes de matière à des valeurs allant jusqu'à 30%.

Les plis découpés sont positionnés selon le plan de drapage sur un outillage ouvert. Ces opérations sont manuelles et très complexes. On constate le développement des machines de drapage mais leurs utilisation reste limitée à des géométries basiques et pour des cadences élevées. Des mesures de sécurité sont prises afin d'assurer la santé matière de la pièce pendant l'opération de moulage. Cette opération se fait dans une « salle blanche » dans laquelle l'atmosphère est contrôlée afin d'éviter d'incorporer des corps étrangers dans les pièces (taux de poussière et d'humidité contrôlés).

Une fois le drapage réalisé, un ensemble de composants vient s'ajouter à la structure moulée. Ces matériaux ont des rôles spécifiques dans la réalisation du système de vide. Il s'agit des tissus d'arrachage, de drainage et des films de mise sous vide. Le film de mise sous vide contient également des embouts pour les prises de vide et il est fermé complètement par l'intermédiaire des bandes de mastic afin d'assurer l'étanchéité de l'ensemble. La pièce est ensuite compactée après branchement au système de réalisation du vide de l'atelier et un compactage se fait pendant l'attente avant l'opération suivante.

Le moule est positionné dans un autoclave et branché au système de vide de cet équipement. L'autoclave est programmée selon la recette de polymérisation de la résine et elle permet de réaliser le chauffage, par paliers, afin d'atteindre la température de polymérisation. Ces températures sont proches de 200°C pour les résines époxyde. Une pression de 5-7bars est appliquée pendant le cycle de cuisson. La pièce sort de l'autoclave à la fin du cycle de cuisson et les matériaux utilisés pour composer le kit de vide sont arrachés dans une zone aérée afin de préparer la pièce pour les opérations suivantes. Les principales étapes de la fabrication par moulage de préimprégnés sont présentées dans la **Figure 2-4**.

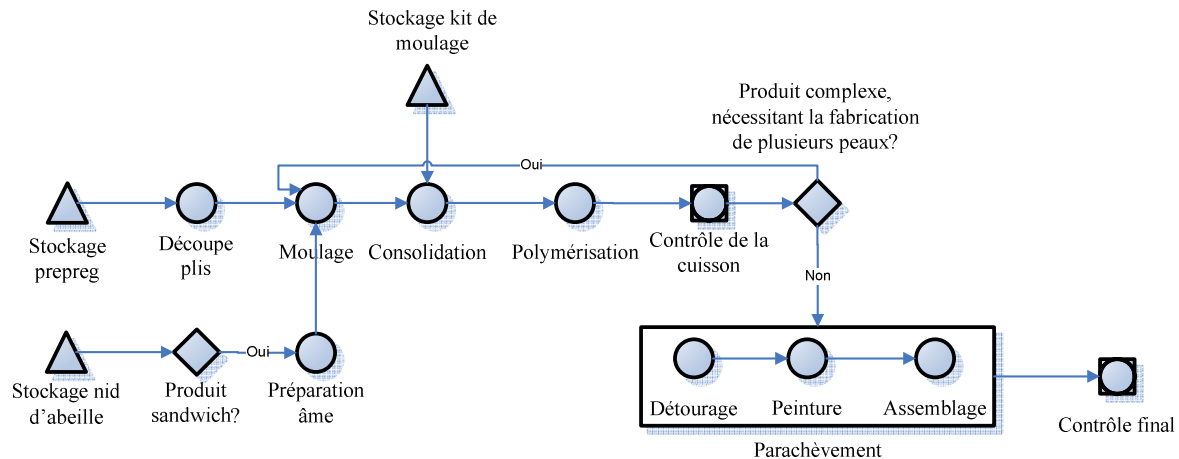


Figure 2-4 Principales étapes de la fabrication par moulage de préimprégnés

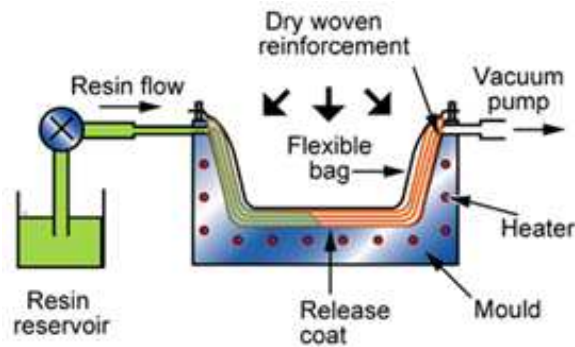
En fonction de sa complexité, une pièce peut subir plusieurs cycles de moulage-polymérisation. Dans ces cas, différentes peaux sont fabriquées jusqu'à la réalisation complète de la pièce. La pièce solidifiée est détournée, préparée pour l'assemblage, peinture et assemblée d'habitude avec d'autres composants afin de réaliser le produit fini. Des opérations de contrôle intermédiaire sont prévues afin d'assurer la validation de la conformité du produit. La santé matière est contrôlée par l'intermédiaire de moyens de Contrôle Non Destructif.

2.3 L'infusion de résine liquide

L'infusion de résine liquide est un processus complètement différent de celui présenté dans la section précédente en termes de mise en œuvre, matière et ressources utilisées. [Rudd 1997] fait référence à un brevet accordé aux Etats-Unis d'Amérique [Marco 1950] qui indique l'utilisation des techniques d'imprégnation assistées par le vide dès les années '50. Ce procédé n'est pas limité en termes de taille des pièces fabricables vu qu'on fait appel habituellement à une polymérisation à température ambiante et aucune enceinte chauffée n'est utilisée. Cet avantage a fait de ce procédé un bon candidat pour l'industrie navale pour laquelle la possibilité de réaliser des coques d'embarcations d'un seul coup est un plus. Egalement, les durées d'imprégnation plus longues ne constituent pas un inconvénient vu qu'on travaille sur des faibles cadences.

Longtemps l'utilisation de ce procédé a été limitée à cause des faibles taux volumiques de fibres atteignables. Il ne permet pas d'atteindre le TVF des pièces autoclaves notamment parce que la pièce est soumise uniquement à l'effet de compression de l'atmosphère ambiante. Les améliorations apportées récemment au procédé d'infusion commencent à intéresser les industries fabricant des produits hautes-performances, comme l'aéronautique. Faisant appel à des outillages moins onéreux, l'infusion de résine devient un concurrent du procédé de moulage des préimprégnés lors de la sélection des procédés de mise en forme de produits innovants.

La matière première utilisée est constituée de renforts de carbone, verre ou hybrides mais à l'état sec. Ces renforts sont assemblés afin de réaliser l'architecture de la pièce. On parle ici de la fabrication d'une préforme. La matrice se présente à l'état liquide et, une fois mélangée aux charges requises, elle sera introduite dans la préforme est durcie par l'intermédiaire des procédés divers.



Liquid Resin Infusion

Figure 2-5 Principe du procédé d'infusion de résine liquide [CES 2007]

Les outillages employés sont des moules métalliques ouverts pouvant accueillir un système de chauffage afin de réaliser la polymérisation de la pièce en dehors de toute enceinte de chauffage fermée (**Figure 2-5**). Un équipement supplémentaire est requis pour la préparation de la résine, l'infusion et le pilotage de la cuisson.

La fabrication d'une pièce par infusion de résine liquide consiste dans le moulage d'une préforme sèche dans un moule métallique qui va donner la géométrie d'ensemble du produit.

Cette préforme peut être réalisée par l'empilement des plis de tissu orientés, découpés au préalable à partir de rouleaux, ou par fabrication directe par tressage 3D qui permet d'obtenir une meilleure cohésion de la préforme. En faisant appel aux procédés plus complexes, on a la possibilité de réaliser une préforme qui peut s'approcher de la géométrie finale du produit. Il est à noter qu'on travaille dans ce cas sur des matériaux qui ne présentent pas de limitation en durée de mise en œuvre comme dans le cas des préimprégnés. On dispose ainsi de plus de temps de préparation pour la construction d'une architecture complexe qui permettra de gagner en temps de fabrication au niveau des opérations d'imprégnation, de cuisson qui sont réalisées une seule fois dans le cycle de fabrication.

Le renfort est ensuite couvert par un film plastique qui assurera le compactage de la pièce une fois l'ensemble fermé par l'intermédiaire d'un joint d'étanchéité (mastic). Une pompe à vide est utilisée afin de retirer l'air présent à l'intérieur du moule. Le niveau de pression acceptable à l'intérieur de la bûche à vide est compris dans l'intervalle : 10mbar - 60mbar [Rudd 1997]. Le compactage de la pièce est réalisé grâce à la pression exercée par l'air ambiant. Des opérations de compactage intermédiaire peuvent être requises pour des produits complexes afin d'augmenter le TVF.

La pièce est polymérisée une fois le remplissage de la préforme réalisé. S'agissant des résines époxydes, la température de cuisson s'élève à environ 200°C. Plusieurs solutions de polymérisation existent. On peut faire appel à une étuve qui permettra de réaliser la cuisson de la pièce mais la taille des pièces réalisables est limitée par la capacité de l'étuve. Pour plus de flexibilité, des outillages auto chauffés sont employés. Cela permet de s'affranchir des contraintes liées aux enceintes de chauffage pour un coût supplémentaire de l'outillage.

Les pièces réalisées par infusion nécessitent moins d'étapes de fabrication jusqu'à la solidification de la pièce. En plus, on fait appel à un nombre plus faible d'opérations de parachèvement et d'assemblage étant donné que plusieurs composants d'un produit peuvent être intégrés dès la phase de préformage. Les opérations de contrôle seront similaires à celles employées pour les pièces issues du moulage des préimprégnés. Les principales étapes de la fabrication des produits composites par infusion de résine liquide sont présentées dans la **Figure 2-6**.

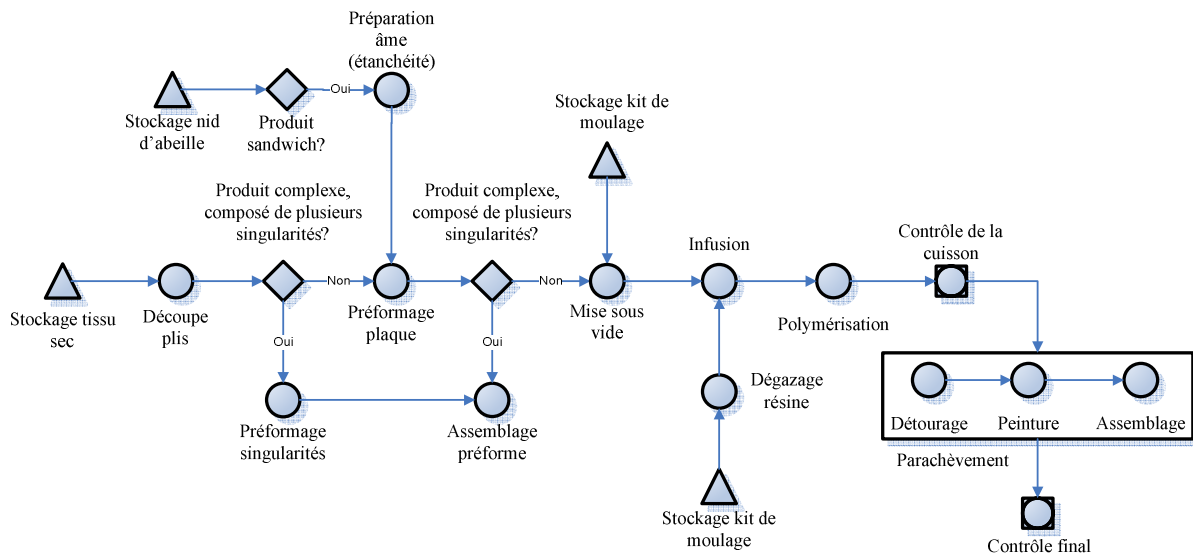


Figure 2-6 Principales étapes de la fabrication par infusion de résine liquide

2.4 Processus d'industrialisation

Le processus d'industrialisation représente la démarche de passage des spécifications du produit, fixées par le client par l'intermédiaire d'un Cahier de Charges Fonctionnel, vers la mise en production industrielle du produit. Cela consiste dans le développement des moyens et outils pour la sélection des procédés, des matières premières, des ressources, du processus de fabrication et des conditions de mise en œuvre. Une fois l'objectif d'industrialisation fixé, les procédés de fabrication sont analysés afin d'identifier les problèmes locaux et de choisir les modèles des phénomènes physiques les dirigeant.

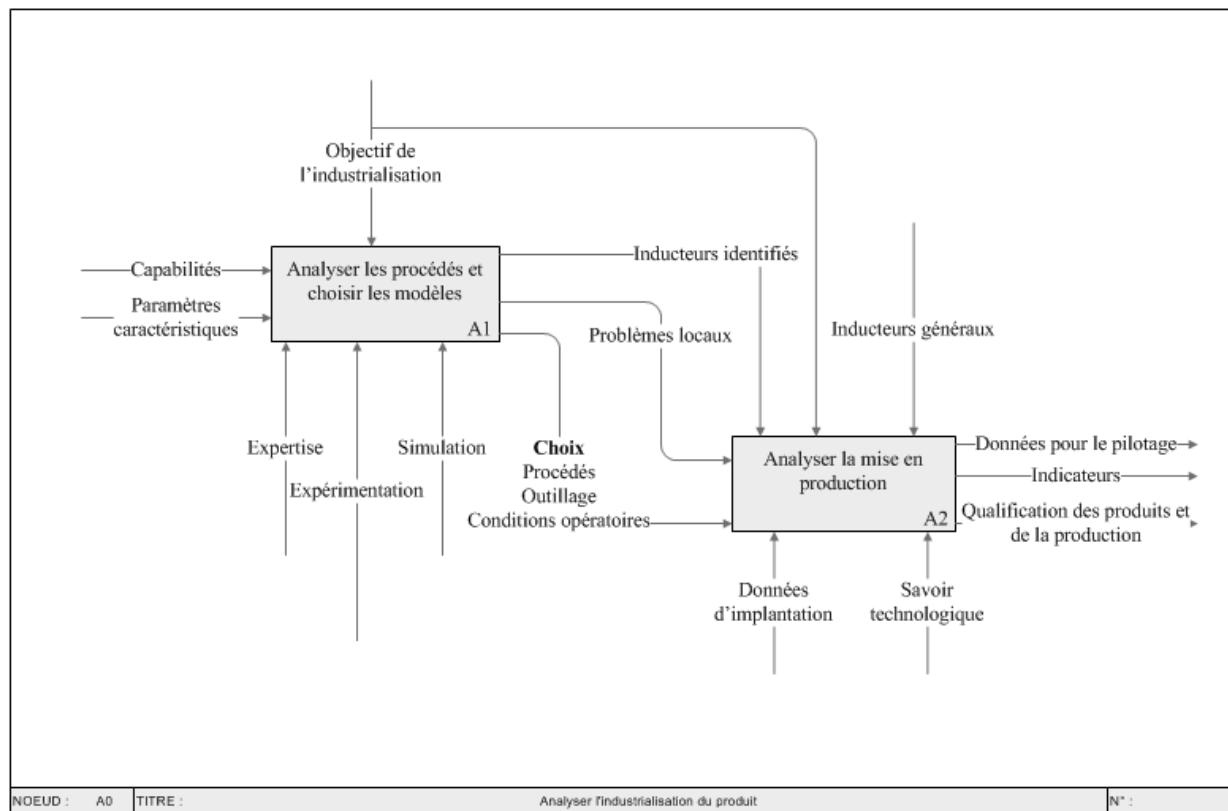


Figure 2-7 Diagramme de référence de l'analyse de l'industrialisation des procédés

Des inducteurs spécifiques sont identifiés qui permettent de spécifier les conditions de mise en production des produits. Après cette étape, on est capable de déterminer un ensemble d'indicateurs utilisés pour la qualification du processus de fabrication et des produits. Cette démarche est schématisée dans un diagramme de référence pour l'industrialisation des procédés (**Figure 2-7**).

Afin de mettre en place une méthodologie de sélection des procédés de fabrication, un décideur doit faire appel à plusieurs types de connaissances et des contraintes liées aux produits à fabriquer.

Pour l'analyse de l'industrialisation, un produit se spécifie selon différents points de vue issus de son cycle de vie :

- structurel,
- fonctionnel,
- pour la fabrication,
- pour l'utilisation,
- pour le recyclage.

Il est important de prendre en compte les contraintes spécifiques à chaque point de vue lors de la définition du processus de fabrication pendant l'analyse de l'industrialisation. L'enchaînement des procédés de fabrication peut varier considérablement entre plusieurs solutions de mise en production selon les contraintes de fabricabilité ou d'utilisation du produit. De plus, les procédés de fabrication des composites offrent des nombreux choix en termes de processus de fabrication possibles, notamment due à leur versatilité. Non seulement la mise en production est différente en fonction de la structure du produit d'un procédé à un autre, mais elle est aussi différente selon l'utilisation du produit et du degré d'intégration des fonctions, spécifique à chaque processus type, pour cette utilisation prévue. Ainsi, l'intégration des raidisseurs ou des inserts métalliques filetés ou taraudés lors du préformage dans le cas de l'infusion de résine permet de diminuer les opérations d'assemblage et d'usinage exigés dans le cas du procédé de moulage des prepreps.

Les étapes présentées dans le diagramme de référence sont détaillées et structurées dans un diagramme schématisant la démarche d'intégration des connaissances liées à l'industrialisation d'un procédé de fabrication (**Figure 2-8**). Une fois le procédé de fabrication sélectionné, des études complémentaires sont nécessaires avant de passer aux phases d'industrialisation et de production. Ces études sont nécessaires pour identifier les principales variables liées à la mise en forme des matériaux par l'intermédiaire des procédés choisis. Ces variables composent habituellement les modèles analytiques qui formalisent ces procédés. De plus en plus de logiciels permettent d'intégrer les modèles analytiques dans les démarches de simulation virtuelle des procédés. On réalise ainsi une étude qualitative du processus de fabrication permettant de valider et d'optimiser la fabrication.

Ces modèles affinés seront le point de départ de la phase d'industrialisation. Tenant compte des contraintes liées aux différentes phases de fabrication on choisit les équipements et les conditions opératoires nécessaires pour la mise en œuvre des procédés spécifiques. Afin d'apporter une évaluation quantitative de la qualité des produits obtenus, on met également en œuvre des moyens pour contrôler la fabrication et assurer le suivi de la qualité du produit obtenu.

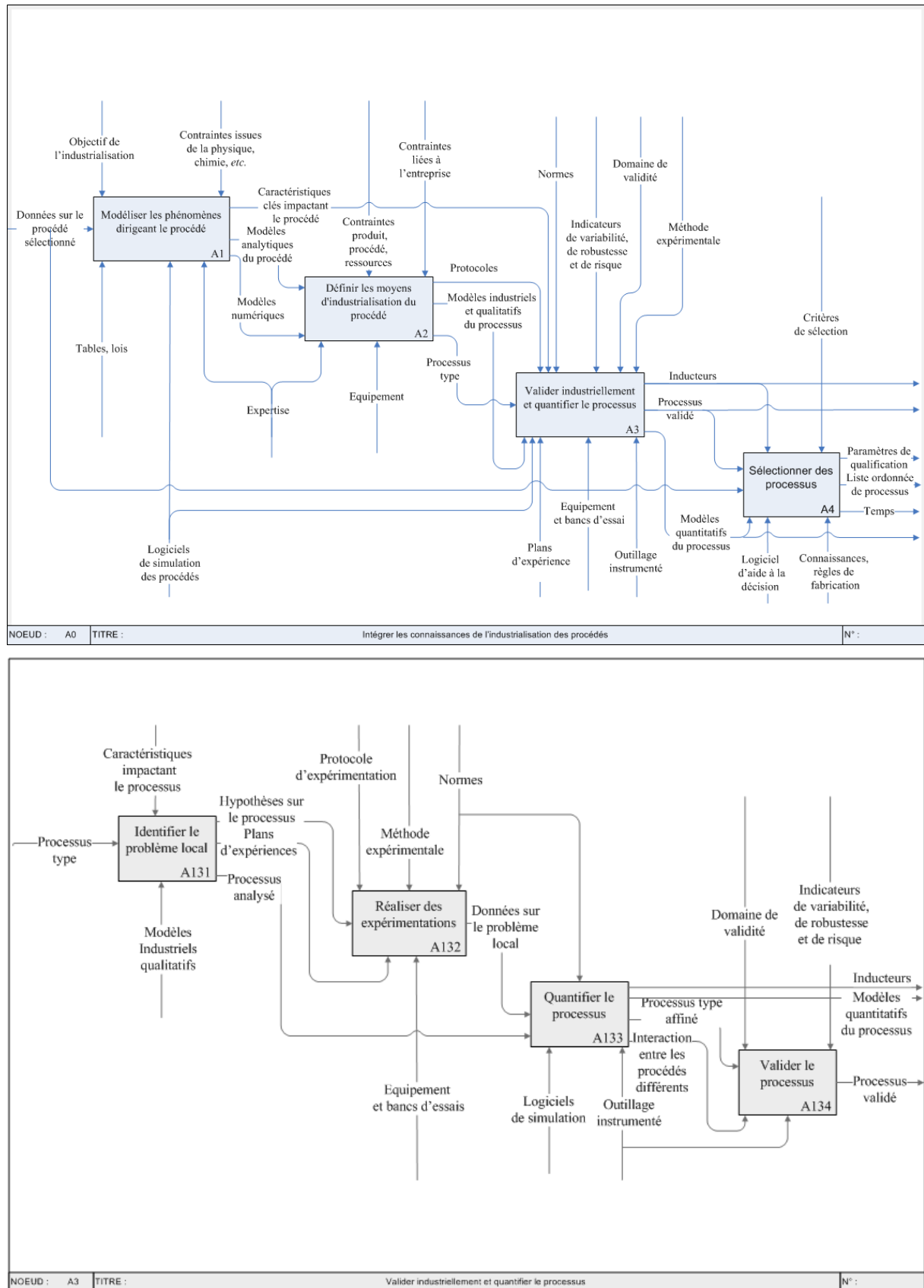


Figure 2-8 Démarche d'intégration des connaissances issues de la modélisation et de l'industrialisation des procédés

2.5 Principales étapes dans la fabrication d'un composite

Selon [Ashby 2001] une distinction doit être faite entre les procédés de mise en forme et les procédés de mise en œuvre. Ainsi, les procédés de mise en forme permettent à partir des matériaux de base d'obtenir des produits plus ou moins complexes géométriquement et d'une finition satisfaisante. L'ajout des fonctionnalités à ces produits permet de les intégrer dans leurs contextes de fonctionnement (équipements industriels, produits de consommation etc.). Cela est réalisé à l'aide des procédés de mise en œuvre.

Cette étude vise à offrir les méthodes et les outils nécessaires à l'évaluation de la performance industrielle de deux processus de fabrication des produits composites. La plupart des procédés auxquels ces processus font appel s'intègrent dans la première catégorie : celle des procédés de mise en forme. Néanmoins, certaines opérations employées dans la gamme de fabrication agissent d'une telle manière sur la matérialisation du produit qu'elles permettent d'apporter un certain nombre de fonctionnalités au produit obtenu. On s'aperçoit ainsi que certaines gammes de fabrication ont l'avantage de pouvoir éliminer le besoin de faire appel, en fin de fabrication, aux procédés de mise en œuvre (on vise ici surtout les opérations d'assemblage). Il est bien clair qu'étudier la fabrication d'un produit composite afin de comparer et hiérarchiser plusieurs processus de fabrication disponibles peut permettre de faciliter les décisions d'une entreprise manufacturière d'investir dans une nouvelle chaîne de fabrication ou d'améliorer une partie de l'existant afin de rentabiliser sa production.

Les principales étapes qui permettent la mise en forme des produits composites ont été regroupées dans quatre groupes selon les principales transformations subies par la matière première et selon les produits intermédiaires issus des différentes phases de fabrication [Mazumdar 2002]. Tous les procédés de fabrication des produits composites font appel à ces quatre principales étapes :

- l'imprégnation,
- le moulage,
- la consolidation,
- la solidification.

En plus de ces principales étapes, il y a une qualification locale et du produit fini. On s'intéresse, donc, aux interactions entre les états intermédiaires des produits issus de chaque étape principale.

L'ordre dans lequel ces étapes se retrouvent dans la gamme de fabrication n'est pas forcément le même dans tous les cas. De même, les équipements et les conditions opératoires employés peuvent varier drastiquement d'un procédé à l'autre. La démarche d'intégration des connaissances liées à l'industrialisation sera détaillée pour chaque étape principale de la fabrication d'un composite.

La mise en œuvre industrielle nécessite le choix et la définition des équipements et des outillages employés au niveau de chaque étape de base. Ces ressources peuvent être spécifiques à chaque procédé mais elles peuvent aussi servir à plusieurs opérations. Une liste non-exhaustive d'équipements utilisés à chaque étape des deux procédés considérés peut contenir les ressources suivantes :

- stockage matière : réfrigérateurs ;
- débit et préparation matière : machines de découpe, machine d'injection (avec équipements : de dégazage de la résine, doseurs et mélangeurs de résine) ;

- imprégnation : système de vide de l'atelier, pompe à vide, machine d'injection ;
- moulage : outillage, outillage de préformage des singularités, équipement laser d'aide au positionnement des plis, kit de mise sous vide, dispositifs pour la densification des âmes en nid d'abeille ;
- compactage : dispositifs de compactage intermédiaire ;
- solidification : autoclave, étuve, outillage auto chauffé, armoire de programmation°;
- parachèvement : machines de détourage, perçage, dispositifs pour l'assemblage et la mise en peinture ;
- contrôle : équipement CND ;
- manutention : chariots, ponts roulants.

De même, afin de finaliser la démarche d'industrialisation, un choix de la matière première est requis. Plusieurs aspects liés aux différents points de vue de définition du produit interviennent pendant cette démarche de sélection :

- l'aspect performance mécanique : il est lié à l'utilisation attendue du produit fini. Plus d'attention est requise dans le domaine des composites sachant que les performances obtenues sont dépendantes de la compatibilité et des caractéristiques unitaires des matières de base.
- l'aspect mise en œuvre : selon le procédé employé et afin de faciliter la mise en forme de l'ensemble de matières utilisées.
- l'aspect environnement : la fabrication des composites plastiques a toujours soulevé des problèmes environnementaux à cause des COV émis lors de la fabrication. Les fournisseurs commencent à répondre à ces questions et ils proposent de plus en plus de matériaux respectueux de l'environnement et qui présentent des propriétés mécaniques similaires à celles des matériaux utilisés dans les fabrications classiques.

En termes de matière première, on s'intéresse dans la fabrication des composites principalement au couple renfort-matrice. Néanmoins, on fait aussi appel à des matériaux auxiliaires qui peuvent se retrouver dans le produit final ou bien enlevés après certaines étapes de la fabrication mais qui ont un impact sur les indicateurs utilisés pendant l'industrialisation. Ainsi, les principaux critères de sélection des matériaux sont listés comme suit :

- renfort : les caractéristiques mécaniques, la perméabilité, la mouillabilité. Ces caractéristiques peuvent varier selon la mise en forme des fibres. Ainsi, le préformage et le type de préforme obtenue peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la fabricabilité.
- matrice : les caractéristiques mécaniques, une faible viscosité, un temps de gel élevé, des temps de polymérisation raisonnables. La préparation de la résine est une des plus importantes étapes liées à cette matière. Cela permettra d'assurer une santé matière conforme et une fabrication aisée de la pièce.
- matériaux d'âme : les caractéristiques mécaniques, le poids. Il est courant d'employer des matériaux d'âme dans la fabrication des composites. Les avantages apportés par ces composants se retrouvent au niveau de l'augmentation de la rigidité de la pièce tout en gardant un faible poids du produit. Néanmoins, leur utilisation peut introduire des verrous technologiques dans le cas des procédés d'infusion. Il s'agit des

contraintes d'étanchéisation des âmes afin d'empêcher la résine liquide de pénétrer ces zones et augmenter considérablement le poids.

- kits de moulage : la facilité de mise en œuvre, l'amélioration de la fabricabilité de la pièce. Ces kits comportent généralement un ensemble de films (drainants, tissu d'arrachage, films de mise sous vide) et d'autre consommables. Leur rôle est important pour la fabrication du produit (diminution du temps d'infusion) et pour certaines propriétés de nature esthétique du produit.

2.6 L'imprégnation

2.6.1 Généralités

L'imprégnation est une étape qui permet d'obtenir le « mélange » entre les renforts et la résine utilisés. Dans le cas du procédé d'infusion de résine, la préforme disposée dans un moule recouvert d'une bâche à vide est mouillée par la résine entraînée par la dépression réalisée à l'intérieur de cet ensemble grâce au vide. La projection simultanée utilise un dispositif de mélange des fibres courtes et de la résine avant de les projeter sur la surface du moule. Les plis préimprégnés sont utilisés dans l'état, dans le cas du procédé de drapage manuel, étant déjà imprégnés par le fournisseur de matière.

La **Figure 2-9** et la **Figure 2-10** présentent les principales activités liées à la démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape d'imprégnation et qui seront développées dans les paragraphes suivants.

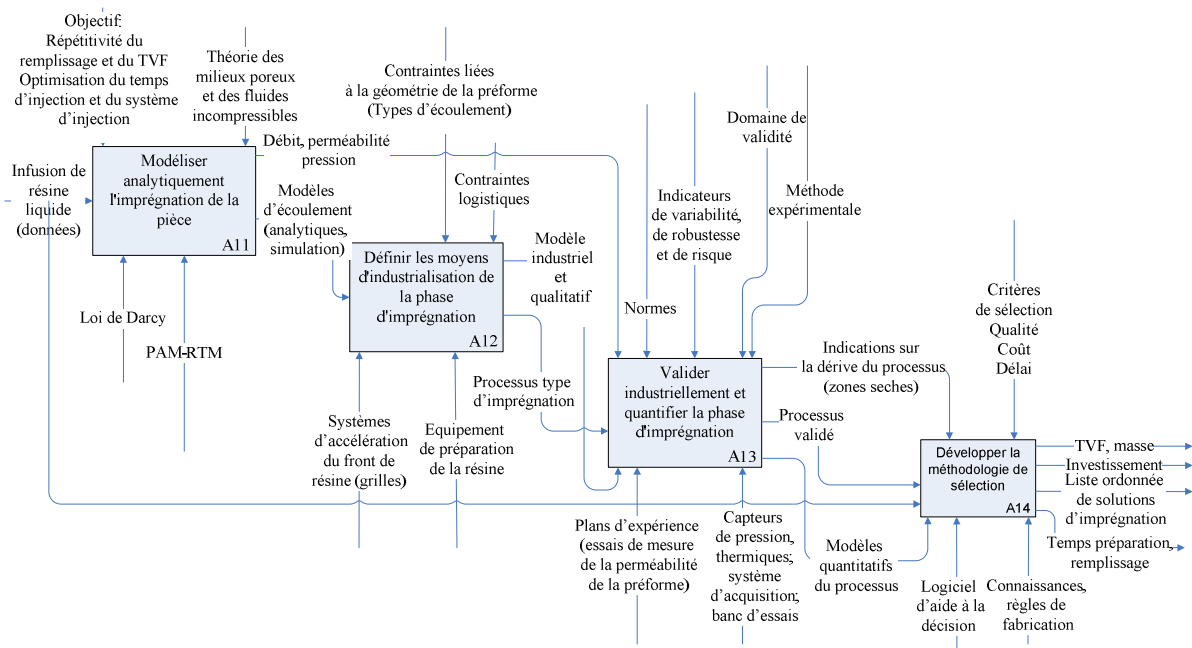


Figure 2-9 Démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape d'imprégnation (Activité A1)

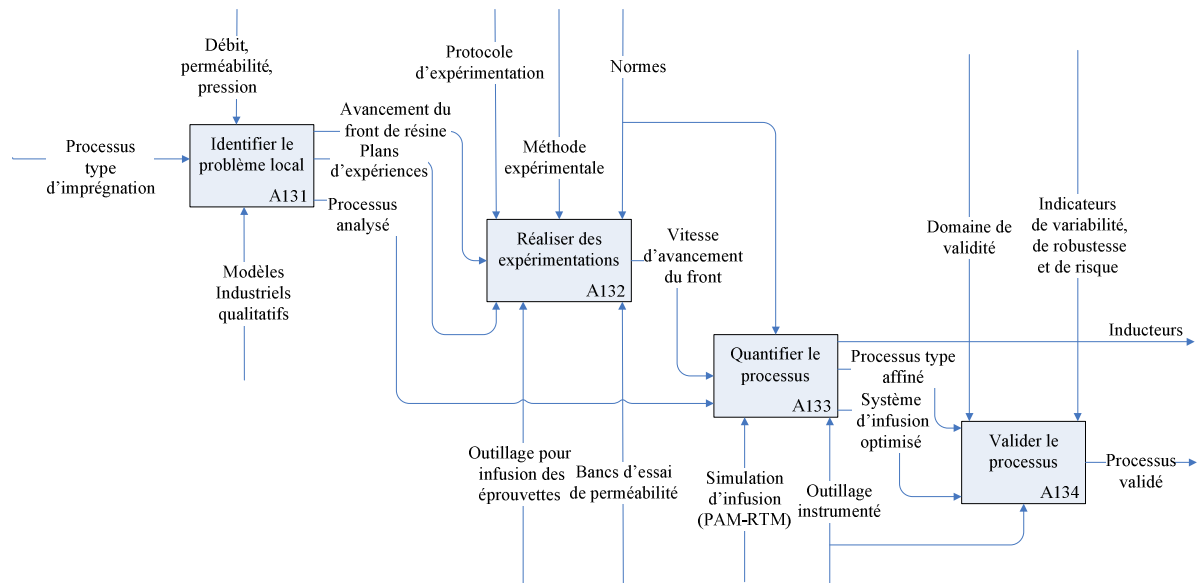


Figure 2-10 Démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape d'imprégnation (Activité A13)



Figure 2-11 Fabrication des tissus préimprégnés [Fibersonixx 2010]

L'objectif de cette étape est d'assurer le remplissage complet de l'architecture du renfort avec la matrice utilisée et d'obtenir la cohésion entre ces deux composants. Les principaux paramètres qui dirigent les phénomènes physiques et le choix des conditions opératoires sont la mouillabilité du renfort et la viscosité de la résine. Ils jouent implicitement un rôle important sur le phénomène de transfert par capillarité.

Dans le cas du procédé de moulage des préimprégnés, les fournisseurs de tissus réalisent l'imprégnation des fibres avec la résine (Figure 2-11). Ainsi, l'étude de la phase d'imprégnation n'est pas prise en compte dans les études d'industrialisation vu qu'on a à évaluer uniquement la variabilité des propriétés des lots de matière première achetée. Dans les paragraphes qui suivent, uniquement la phase d'imprégnation dans le cas du processus d'infusion de résine liquide est traitée en détail.

2.6.2 Modélisation de la phase d'imprégnation

L'imprégnation d'une préforme sèche dans le cas de l'infusion de résine liquide est dirigée par le phénomène de capillarité, à l'échelle microscopique (Figure 2-12). L'avancement du front de résine dans une préforme est assimilé à l'écoulement d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux. Ce phénomène est modélisé à l'échelle macroscopique par la loi de Darcy qui montre que le temps de remplissage équivaut à l'effet corroboré des paramètres suivants : la perméabilité du milieu, la viscosité du fluide, la différence de pression et la

distance d'écoulement. La forme générale de la loi de Darcy, rapportée aux trois dimensions est présenté par l'équation 2.1.

$$\vec{v} = -\frac{1}{\mu} [K] \nabla P \quad (2.1)$$

avec $\vec{v}$ le vecteur vitesse superficielle du fluide, μ la viscosité, $[K]$ une matrice 3x3 représentant la perméabilité de la préforme et P la pression.

On utilise conjointement à la loi de Darcy l'équation de conservation de masse :

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (2.2)$$

La forme générale de la loi de Darcy peut être simplifiée dans le cas des pièces ayant des géométries simples. On parle dans le cas de ces pièces (d'habitude pièces planes) d'un flux unidirectionnel (les vitesses dans les directions y et z sont nulles). L'expression de la loi de Darcy est la suivante :

$$v_x = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.3)$$

L'équation de la conservation de la masse devient dans ce cas :

$$\frac{dv_x}{dx} = 0 \quad (2.4)$$

En combinant les équations (2.3.) et (2.4.) on obtient :

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \right) = 0 \quad (2.5)$$

En supposant la perméabilité et la viscosité constantes dans l'équation (2.5.), on constate que la variation de la pression est constante entre le point d'injection et la position instantanée du front de résine. La pression dans un point quelconque pendant l'injection est donnée par l'équation 2.6, P_{inj} étant la pression au niveau du point d'injection et x_f la position du front de résine.

$$P = P_{inj} \left(1 - \frac{x}{x_f} \right) \quad (2.6)$$

Dans le cas des pièces plus complexes en géométrie, la loi de Darcy généralisée doit être considérée. La plupart des pièces issues de l'industrie aéronautique sont des pièces de géométrie complexe. On peut supposer dans la plupart des cas que l'imprégnation de ces pièces est caractérisée par un flux de résine dans les deux directions du plan en supposant que la vitesse du front dans la direction de l'épaisseur de la pièce est nulle. La forme de la loi de Darcy pour un écoulement dans deux directions principales devient :

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dP}{dx} \\ \frac{dP}{dy} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Le phénomène de capillarité qui dirige l'imprégnation de la préforme est schématisé dans la **Figure 2-12**. On constate d'abord l'avancement par capillarité du front insaturé dans les cavités créées par les espaces vides entre les mèches. Ensuite, la résine traverse les mèches afin de

mouiller complètement les fils (**Figure 2-12a**). On constate ainsi l'existence d'un décalage entre l'avancement apparent du front de résine, due à l'effet de capillarité, et le remplissage réel de la préforme. Un deuxième phénomène qui est identifié lors de l'imprégnation est la variation de la pression (**Figure 2-12b**). L'existence de ces phénomènes impose une étude approfondie de la phase d'imprégnation afin d'assurer la santé du produit fini ainsi que les calculs d'estimation des durées opératoires et de la consommation de matière.

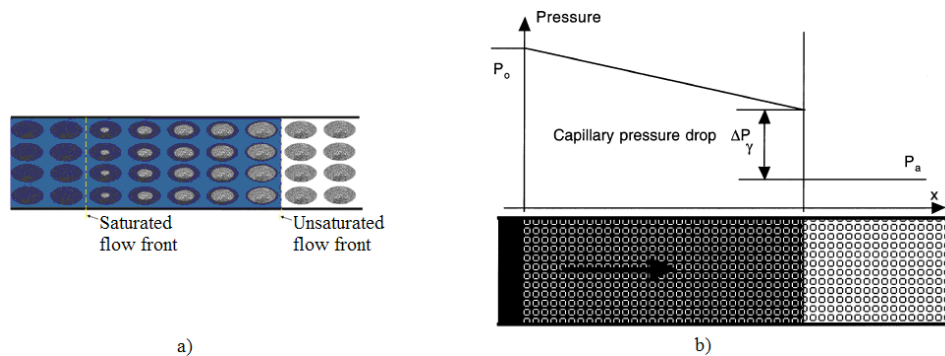


Figure 2-12 a) Avancement du front insaturé grâce à l'effet de la capillarité [Lawrence 2009] ; b) Evolution de la pression dans une préforme de perméabilité constante [Michaud 2000]

2.6.3 Définition de moyens de mise en œuvre industrielle du processus d'imprégnation

La mise en œuvre industrielle de la phase d'imprégnation consiste dans la définition des méthodes et des outils requis par l'étape de validation industrielle du processus préliminaire d'imprégnation. Cela consiste dans la définition d'un certain nombre de paramètres dirigeant le processus d'imprégnation tenant en compte les contraintes liées aux types d'architecture des préformes à imprégner. Les principales étapes de l'activité de définition des moyens de mise en œuvre industrielle du processus d'imprégnation sont résumées dans le **Tableau 2-1**.

Tableau 2-1 Mise en œuvre industrielle du processus d'imprégnation

Processus type	Procédés de fabrication	Ressources	Conditions de mise en œuvre	Etats des produits
Moulage des preregs	- (processus imposé par le fournisseur)	- (processus imposé par le fournisseur)	- (processus imposé par le fournisseur)	Matière première
Infusion de résine liquide	Infusion assistée par media de distribution de résine	Système d'injection Opérateur Outillage Système de mise sous vide	Valeur du vide (10-60 mbar) Température résine: 80°C	Etats concernant la préforme et la résine

2.6.4 Validation industrielle et quantification du processus d'imprégnation

Afin d'optimiser l'imprégnation des préformes on peut faire appel à la simulation. Des logiciels commerciaux, tels que le PAM-RTM, permettent d'étudier plusieurs configurations du système d'injection afin de pouvoir éliminer les zones englobant de l'air à cause de la fermeture des fronts de résine (**Figure 2-13**). Le contrôle du remplissage de la préforme peut

être réalisé visuellement ou en employant des techniques d'investigation, comme celles employant les capteurs de tension linéaires ou ponctuels (point-voltage sensors) (**Figure 2-14**).

Les résultats obtenus par calcul analytique peuvent être corroborés avec les résultats des simulations d'imprégnation. Ces simulations ont l'objectif d'optimiser le remplissage de la préforme tout en jouant sur le système d'injection (zones d'arrivée de résine et évacuation d'air). Comme présenté dans la **Figure 2-13**, le système d'injection est ainsi conçu que l'on évite de créer des renfermements des fronts de résine et, implicitement, d'attraper l'air à l'intérieur de la pièce. Les modèles d'avancement du front de résine issus de la simulation peuvent être ensuite confrontés avec l'avancement réel sur une pièce de démonstration.

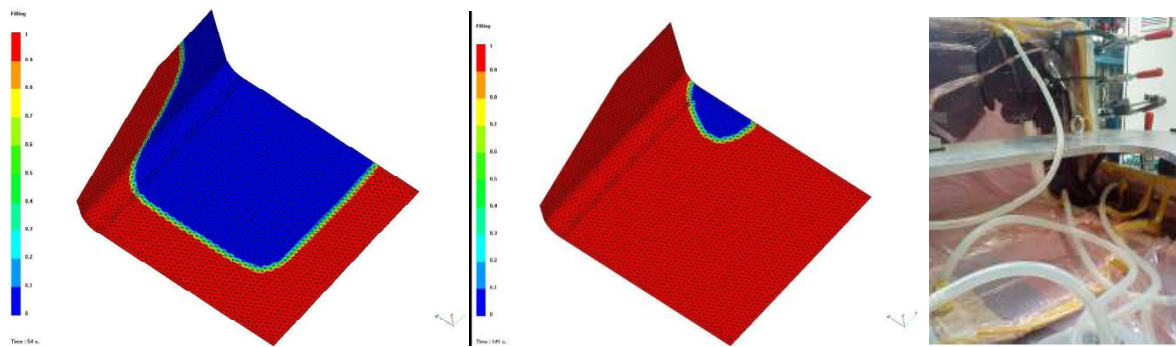


Figure 2-13 Simulation d'infusion réalisée utilisant le logiciel PAM-RTM et avancement du front de résine pendant l'infusion d'une pièce de démonstration

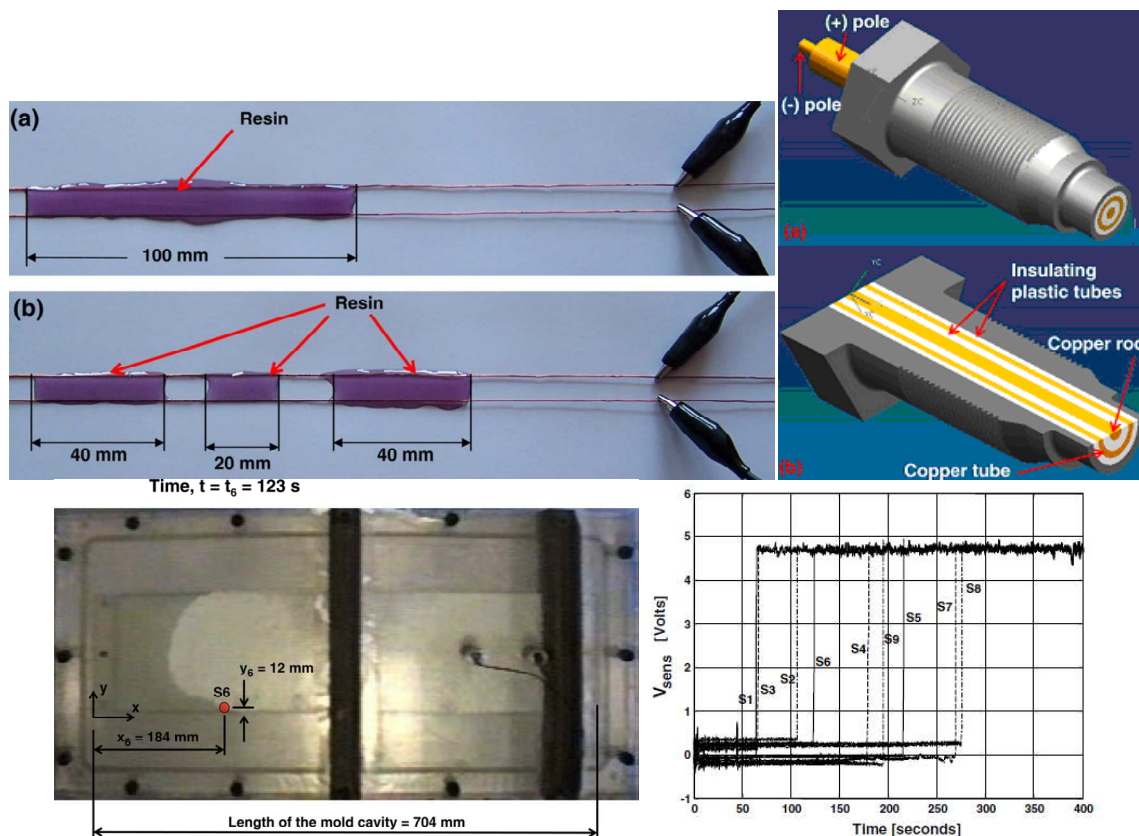


Figure 2-14 Contrôle de l'imprégnation par capteurs de tension ponctuels [Danisman 2007]

Les techniques classiques de contrôle du remplissage du moule sont basées sur la mesure de température ou de pression. Ces techniques nécessitent habituellement le positionnement des capteurs à l'intérieur de la pièce afin d'augmenter la précision de détection des événements. Cela a un effet négatif sur la qualité géométrique et sur les propriétés mécaniques locales du

produit fini. Des techniques non-intrusives sont également recherchées afin de maîtriser le processus, sans avoir à détériorer la pièce. Une de ces techniques est basée sur le changement des propriétés électriques des matières travaillées (**Figure 2-14**). Néanmoins, l'utilisation de ce type de capteurs nécessite des taraudages effectués dans le moule afin d'y insérer ces outils. On introduit ainsi des risques liés à l'étanchéité de l'outillage, donc à l'apparition des fuites et des infiltrations de la résine dans ces logements. Un compromis serait d'utiliser des microcapteurs ayant un faible impact sur l'imprégnation et de la qualité du produit. [Wang 2009] fait référence à l'utilisation des capteurs à fibre optique basés sur l'effet de Fresnel afin de détecter le front de résine. Ces capteurs d'une taille de 79µm pourront avoir un faible effet intrusif lors de la fabrication.

2.6.5 Sources de défauts

Dans le cas du moulage des préimprégnés on ne s'intéresse pas dans la même mesure aux défauts liés à l'imprégnation que dans le cas de l'infusion. Effectivement, les prepregs sont de la matière première, les tissus étant imprégnés par le fabricant, et on suppose qu'ils ont été déjà qualifiés par le fabricant. Le procédé LRI fait appel à des tissus secs sous forme d'une préforme qui sera par la suite imprégné d'une résine. Les défauts qui peuvent apparaître pendant l'infusion sont à éviter parce qu'ils sont les plus dangereux pour la santé matière du produit. Ces défauts ont un fort effet d'affaiblissement de la résistance mécanique des produits composites.

Les défauts les plus fréquents de l'étape d'imprégnation sont les porosités. La porosité peut se retrouver à l'échelle microscopique sous la forme des zones d'air microscopiques (microporosité) et à l'échelle macroscopique sous la forme des poches d'air (macroporosité). La présence de ces défauts signifie que le rôle de protection de la matrice n'est pas exercé dans les zones concernées. Cela signifie que les fibres sont susceptibles au frottement (faible performance à la fatigue du produit) ou même à l'attaque de l'atmosphère environnante si les porosités se trouvent à la surface de la pièce. Dans tous les cas ces défauts diminuent les performances mécaniques du produit.

Les mécanismes qui dirigent l'apparition de ces défauts sont divers. On peut citer :

- l'avancement du front de résine à l'intérieur de la préforme ;
- une mauvaise conception du système d'injection (mauvais positionnement des événements qui implique un renfermement du front de résine loin des événements) ;
- le dégazage de la résine pendant la traversée de la préforme ;
- un mauvais niveau de vide à l'intérieur du moule (déterminé par des fuites ou par un mauvais réglage des pompes de vide).

2.7 Le moulage

2.7.1 Généralités

Le moulage permet de construire l'architecture finale de la pièce en positionnant sur le moule l'ensemble renfort-matrice. Si on se rapproche des trois procédés donnés comme exemple dans l'étape précédente, on constate également une différence dans la mise en forme. Une préforme est réalisée dans le cas de l'infusion de résine en disposant le tissu aux endroits demandés par le plan de drapage. La cohésion entre les différents plis est assurée pour le produit ayant une géométrie complexe par des liants ou bien par des opérations de préformage

intermédiaires. Dans le cas de la projection simultanée, l'ensemble fibres courtes et résine est projeté et collé à la surface du moule. L'architecture finale est réalisée en plusieurs passes jusqu'à ce que l'on obtienne l'épaisseur souhaitée de la pièce. Plusieurs plis imprégnés sont disposés sur le moule lors du drapage manuel. La résine étant dans un état gélifié permet d'avoir une première cohésion dans l'épaisseur de la pièce.

L'objectif de cette étape est de construire l'architecture du produit final de telle manière que l'on obtienne la résistance mécanique imposée dans les principales directions de sollicitation de la pièce grâce à une orientation spécifique des fibres. On cherche généralement à obtenir une disposition symétrique des plis. Dans le cas des préformes plus complexes on peut faire appel à des procédés de tissage pour apporter plus de résistance dans la direction de l'épaisseur de la pièce.

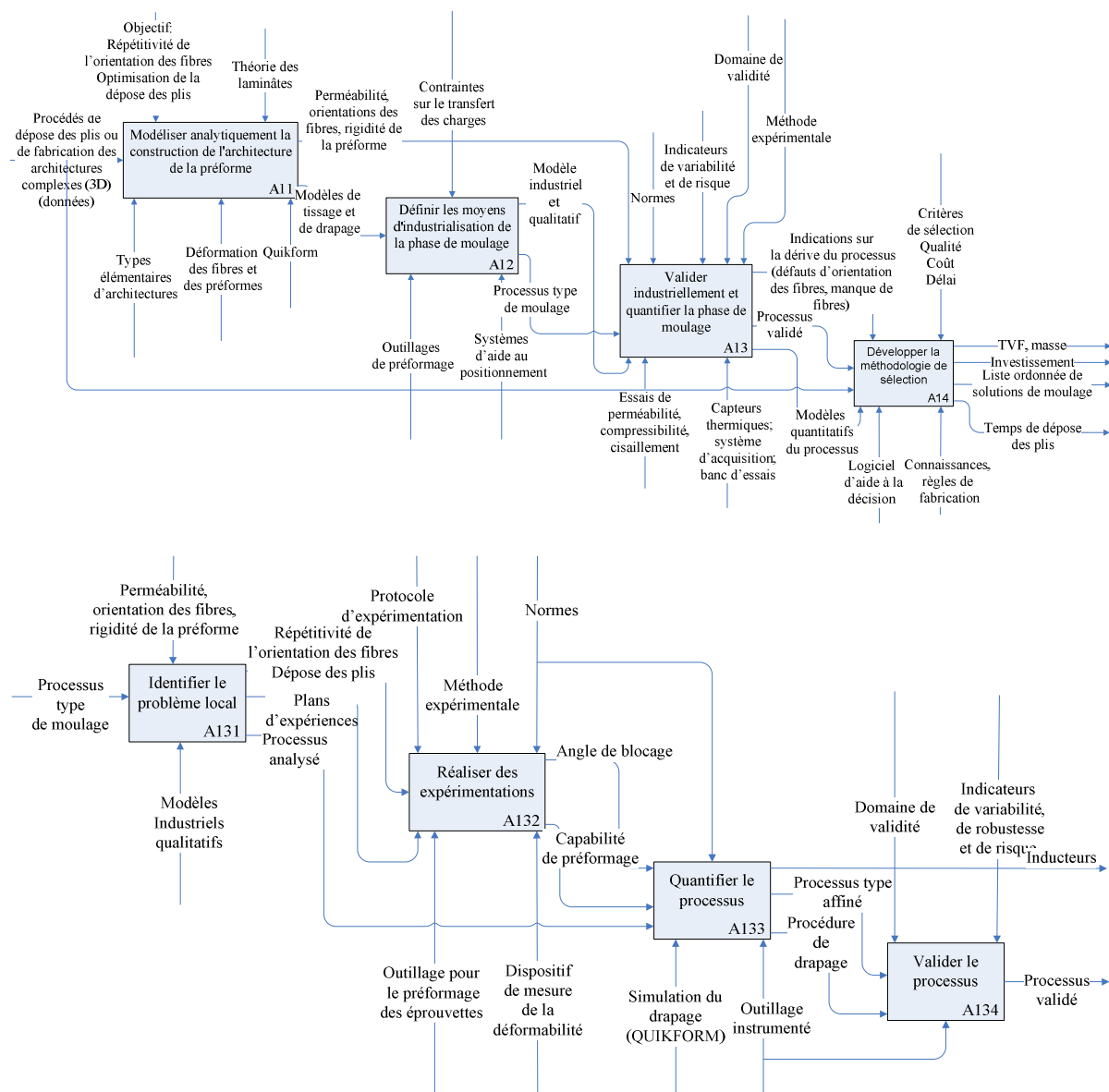


Figure 2-15 Démarche d'intégration des connaissances liées au moulage des renforts

2.7.2 Modélisation de la phase de moulage

Pour cette étape de la fabrication d'un composite l'analyse de la préforme est le point de départ dans le développement de l'industrialisation de la fabrication donnée. Sachant que dans

le cas d'une pièce composite le renfort est responsable de la tenue mécanique, plusieurs caractéristiques clés liées à la préforme sont à définir. Ainsi, les caractéristiques suivantes sont à la base de l'activité d'industrialisation :

- à l'échelle macroscopique : le type d'architecture de la préforme (2D, 2,5D, 3D) ;
- à l'échelle mésoscopique : l'interaction entre les plis et leurs orientations.

Les caractéristiques élastiques de la préforme, telles que le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (ν), peuvent être estimées à partir de celles des matériaux constituant la préforme. Ainsi, pour un composite unidimensionnel les caractéristiques estimées sont les suivantes :

$$E_1 = E_r(1 - V_f) + E_f V_f \quad (2.8)$$

$$\nu_{12} = \nu_r(1 - V_f) + \nu_f V_f \quad (2.9)$$

Pour l'estimation des caractéristiques élastiques d'un composite 2D (composé de plis disposés à des orientations des fibres spécifiques). Krenchel introduit un coefficient d'efficacité (2-10) qui permet d'estimer la capacité des fibrés de supporter les charges en fonction des orientations [Krenchel 1964]. La valeur de ce coefficient est basée sur le fait que les fibres orientées parallèlement à la direction d'application de la charge la supportent entièrement (le coefficient prend la valeur maximale de 1).

$$\eta = \sum_{i=1}^N a_i \cos^4 \theta_i \quad (2.10)$$

On obtient ensuite le module de Young en introduisant ce coefficient dans l'équation 2-8 :

$$E = E_r(1 - V_f) + nE_f V_f \quad (2.11)$$

Les valeurs prises par ce coefficient en fonction des orientations des fibres sont résumés dans le **Tableau 2-2**.

Tableau 2-2 Valeurs du coefficient d'efficacité de Krenchel

Orientation des plis	Type de renfort	Coefficient d'efficacité (η)
Unidirectionnelle	Mats UD	1,000
0°/90°	Renforts tissés	0,500
45°	Renforts tissés, tresses	0,250
0°/45°/90°	Tissages multiaxiaux	0,375
Orientation 2D quelconque	Fibres courtes pour projection	0,375

L'estimation des propriétés mécaniques permet dans un premier temps de choisir le procédé de fabrication de la préforme. En fonction du type d'architecture recherché, plusieurs procédés s'offrent comme choix possible pour le décideur. Un regroupement des préformes selon l'architecture est présenté dans la **Figure 2-16**. Ce type de classification regroupe également les préformes selon les directions dans lesquelles elles peuvent transférer les charges. Ainsi, les préformes bidimensionnelles sont utilisées plutôt pour des sollicitations dans le plan défini par les plis. Pour des sollicitations plus complexes on peut faire appel à des préformes tridimensionnelles qui permettent le transfert des charges orientés non seulement

dans un plan mais aussi dans la direction transverse de la pièce. Il s'agit ici d'un avantage essentiel par rapport aux préformes bidimensionnelles pour lesquelles dans la direction transverse uniquement la résine réalise le transfert des charges. Pour palier à ce désavantage, on peut augmenter les performances mécaniques en employant des solutions comme la couture.

Dans le cas du moulage des renforts tissés un deuxième point analysé pendant l'étude de l'industrialisation est la drapabilité. Cette caractéristique permet de quantifier la déformabilité d'un renfort et d'étudier ainsi sa capacité d'épouser une géométrie donnée du moule à recouvrir. Le paramètre lié à la drapabilité d'un tissu et qui doit être quantifié afin de caractériser le moulage de la préforme est l'angle de blocage entre les fils constituant la trame et la chaîne du pli tissé. L'importance de la quantification de ce paramètre réside dans le fait que la fabrication (définition des géométries des patrons à réaliser) et la qualité de la pièce finie en sont dépendantes.

Lors de la dépose des plis sur la surface du moule le renfort se déforme afin de pouvoir épouser la géométrie de l'outillage. Au delà d'une certaine valeur de cet angle les fils ne peuvent plus se déplacer par rapport à ceux à proximité et des plissements apparaissent. Dans ces situations, les patrons doivent être ainsi conçus afin que l'on évite, par leur géométrie, l'apparition de ce défaut. La qualité de la pièce peut être affectée par ces plissements : à cause d'une diminution locale de la perméabilité des zones sèches peuvent rester sur la pièce finie. Le défaut se retrouve sur la pièce finie sous la forme des plissements affectant son aspect et ses caractéristiques mécaniques localement. Ce phénomène est présenté dans la **Figure 2-17**.

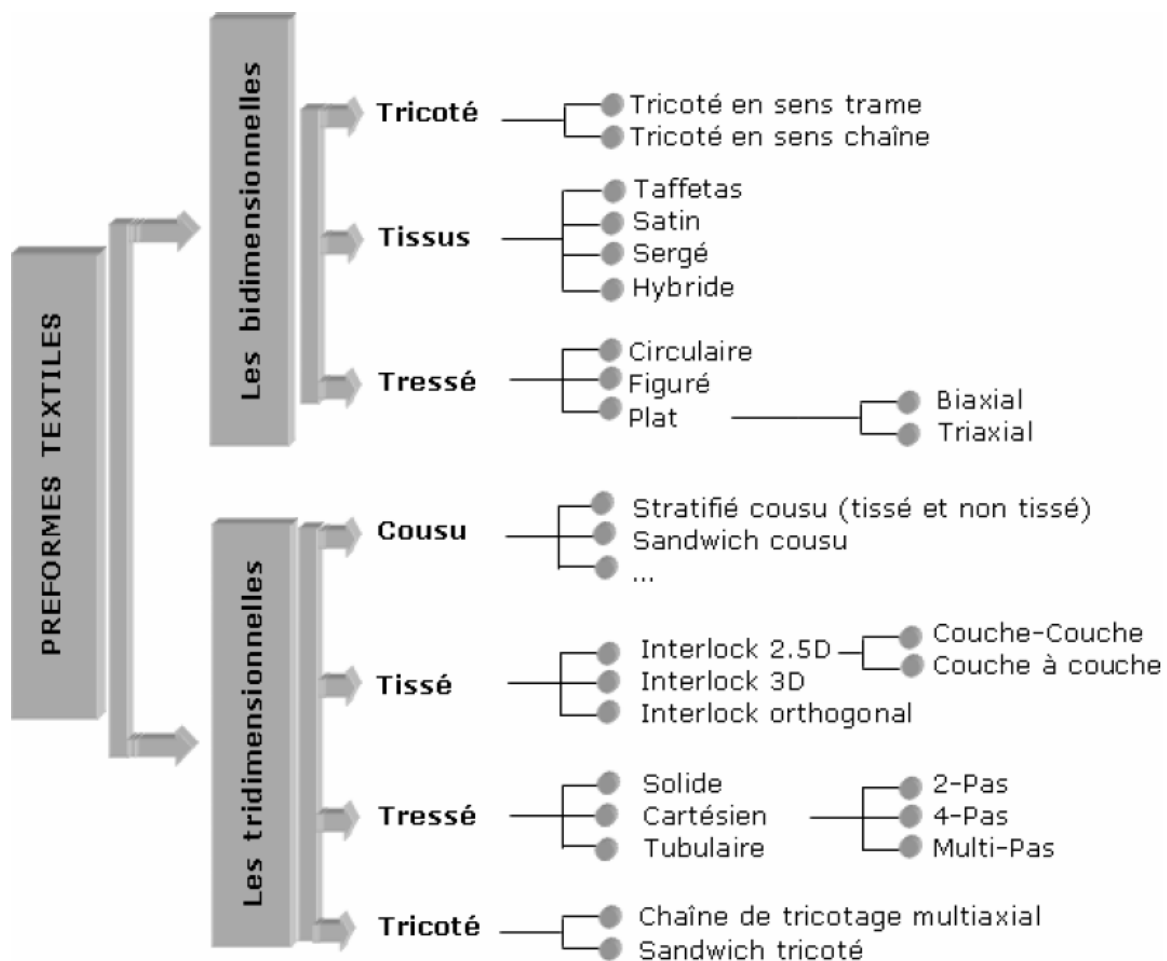


Figure 2-16 Classification des préformes

On fait appel à des essais de cisaillement pour déterminer la valeur de l'angle de blocage d'un tissu spécifique. Après l'analyse de la courbe effort-déplacement on peut identifier le blocage des fils signalé par une augmentation brusque de l'effort appliqué (**Figure 2-18**). Cette valeur peut être utilisée par la suite pour réaliser des simulations de drapage afin d'identifier les zones critiques au niveau de l'outillage. On peut déterminer ainsi les géométries des patrons pour lancer la découpe des renforts nécessaires (**Figure 2-19**). Un compromis est fait dans les zones critiques où l'angle de blocage est dépassé et le phénomène de plissement apparaît. Ce compromis consiste soit dans la découpe d'une partie des plis et le recouvrement de celles-ci, soit dans la réconception des patrons de découpe (**Figure 2-21**).

En fonction des types de tissage des renforts leur formabilité peut varier considérablement. Il est clair que les architectures plus complexes, telles que celles ayant des fils orientés par rapports aux 3 dimensions de l'espace, auront une faible aptitude au formage du l'intérêt de les fabriquer avec une géométrie proche de celle de l'empreinte du moule afin de limiter les déformations requises pour le moulage. La **Figure 2-20** montre l'aptitude au formage de plusieurs types de tissages des renforts.

Un troisième point à analyser afin d'affiner l'industrialisation du processus de fabrication de la pièce est la perméabilité de la préforme. De cette caractéristique dépend l'imprégnation de la préforme décrite dans la section précédente. La perméabilité d'un milieu poreux définit ainsi l'aisance avec laquelle la résine peut mouiller les fibres et avancer dans la préforme. Dans le cas étudié, celui des pièces de faible épaisseur, l'avancement du front de résine se fait dans le plan des plis. Il est possible de constater l'apparition d'un deuxième phénomène : celui d'avancement dans l'épaisseur de la pièce lorsqu'on emploie des média de distribution. Leur rôle est d'accélérer l'avancement de la résine à la surface de la pièce pour ensuite démarrer l'imprégnation dans la direction transverse.

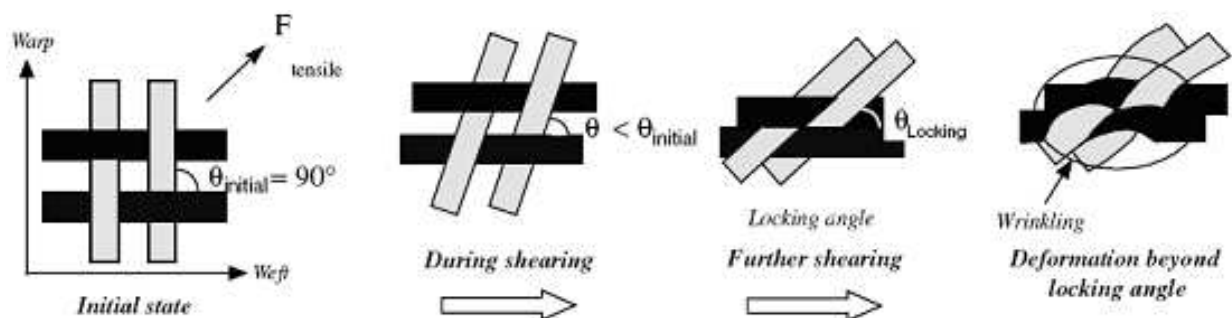


Figure 2-17 Apparition des plis lors de l'opération de moulage [Rozant 2000]

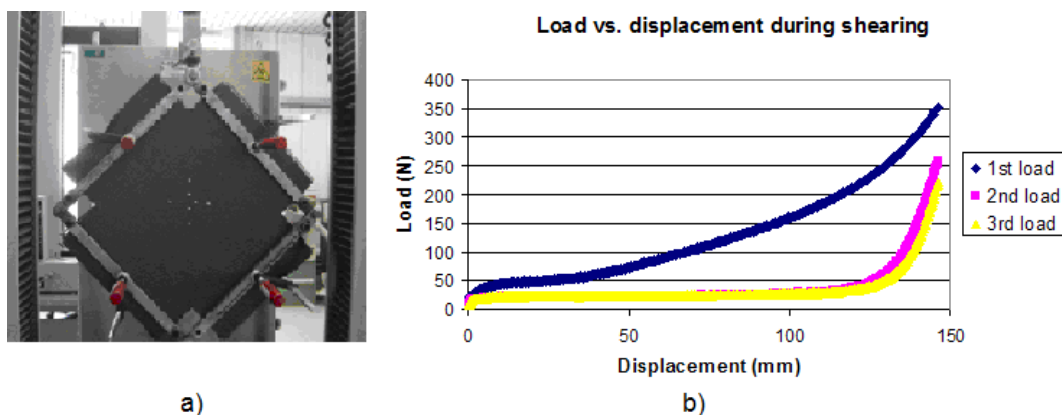


Figure 2-18 a) dispositif de cisaillement; b) courbes effort-déplacement correspondant à une éprouvette cisailée [Mihaluta 2009]

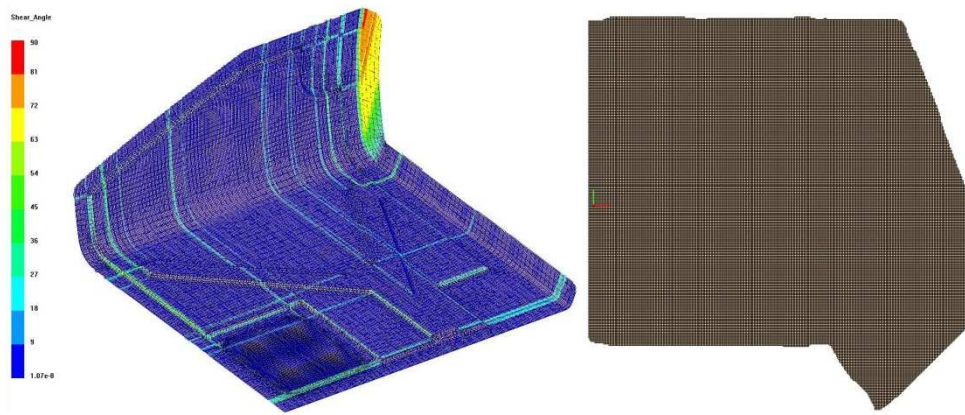


Figure 2-19 Déformation du pli lors du moulage et géométrie du patron correspondant

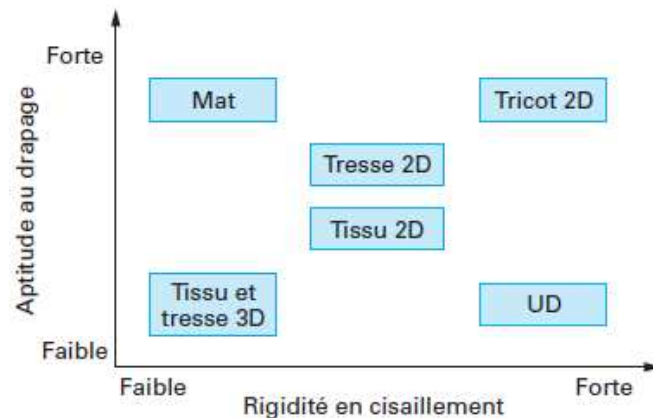


Figure 2-20 Comparaison des renforts fibreux en fonction de leur aptitude au formage [Binétruy]

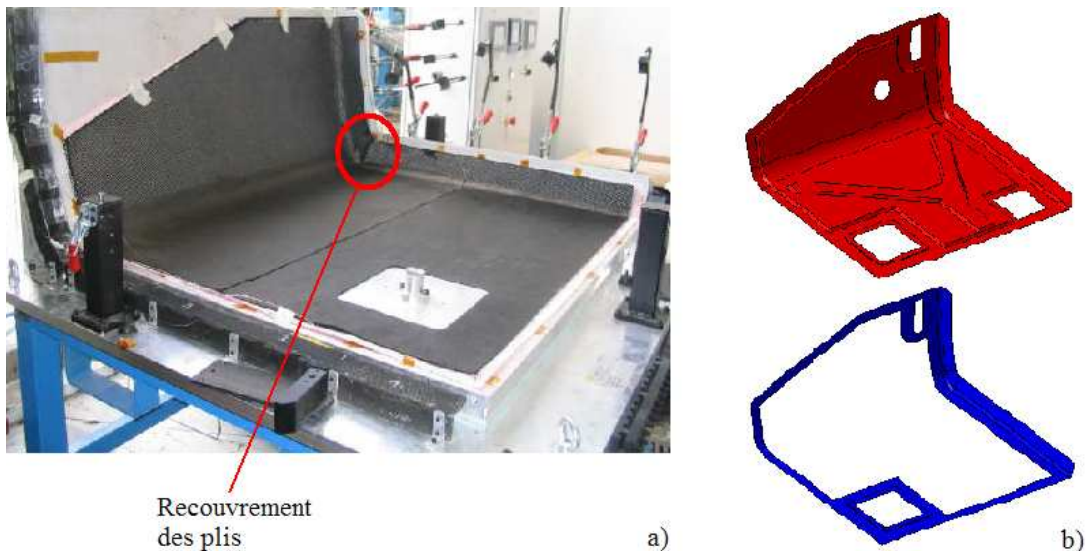


Figure 2-21 a) Découpe et recouvrement des plis dans une zone critique (Photo PPE); b) Réconception des patrons de découpe afin d'éviter les plissements induits par la géométrie de la zone sandwich centrale

Différents essais de perméabilité sont disponibles pour la mesure de ce paramètre caractérisant la préforme. Les plus répandus sont ceux qui permettent d'étudier l'avancement du front de résine dans les directions du plan. Afin de finaliser l'étude de perméabilité, on introduit les essais qui permettent de mesurer la perméabilité dans la direction de l'épaisseur de la pièce. Le principe de ces essais est d'imposer un gradient de pression constant et de mesurer le débit de fluide ou bien d'imposer un débit du fluide test et de mesurer la variation

de la pression dans le dispositif d'essai. La mesure de la perméabilité dans les directions du plan est présentée dans la **Figure 2-22**. Les deux techniques employées habituellement sont :

- la mesure linéaire de la perméabilité
- la mesure radiale de la perméabilité

Dans le cas de la **mesure linéaire de la perméabilité**, le renfort à analyser est introduit dans un dispositif d'essai fermé prévu d'une arrivée du fluide test disposée prêt d'un bord du dispositif. Le fluide injecté à débit constant par cette arrivée avance et rencontre un certain nombre de capteurs de pression disposés le long de la direction d'avance du front. Le gradient de pression diminue avec l'avancement du front ainsi que la vitesse d'avancement du front. Les mesures démarrent lorsque l'avancement du front de fluide se stabilise. On peut ainsi déterminer la différence de pression entre 2 capteurs de pression successifs. La perméabilité moyenne (k) du renfort est déterminée à partir de la forme unidimensionnelle de la loi de Darcy :

$$Q = \frac{kA}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (2.12)$$

Avec : Q – le débit du fluide test ; A – superficie de la section transversale de la cavité logeant le renfort à caractériser ; μ – la viscosité du fluide ; $\Delta p/\Delta x$ – le gradient de pression.

Le désavantage de cette méthode est qu'elle permet la mesure de la perméabilité dans une seule direction. Pour déterminer la perméabilité dans la direction perpendiculaire il faut procéder à un deuxième essai. **La mesure radiale de la perméabilité** permet de s'affranchir de cet inconvénient. Par l'intermédiaire de cet essai on mesure simultanément les perméabilités dans les deux directions perpendiculaires du plan. Ainsi, les perméabilités k_1 et k_2 peuvent être déterminées à l'aide des formules suivantes [Hirt 1987] :

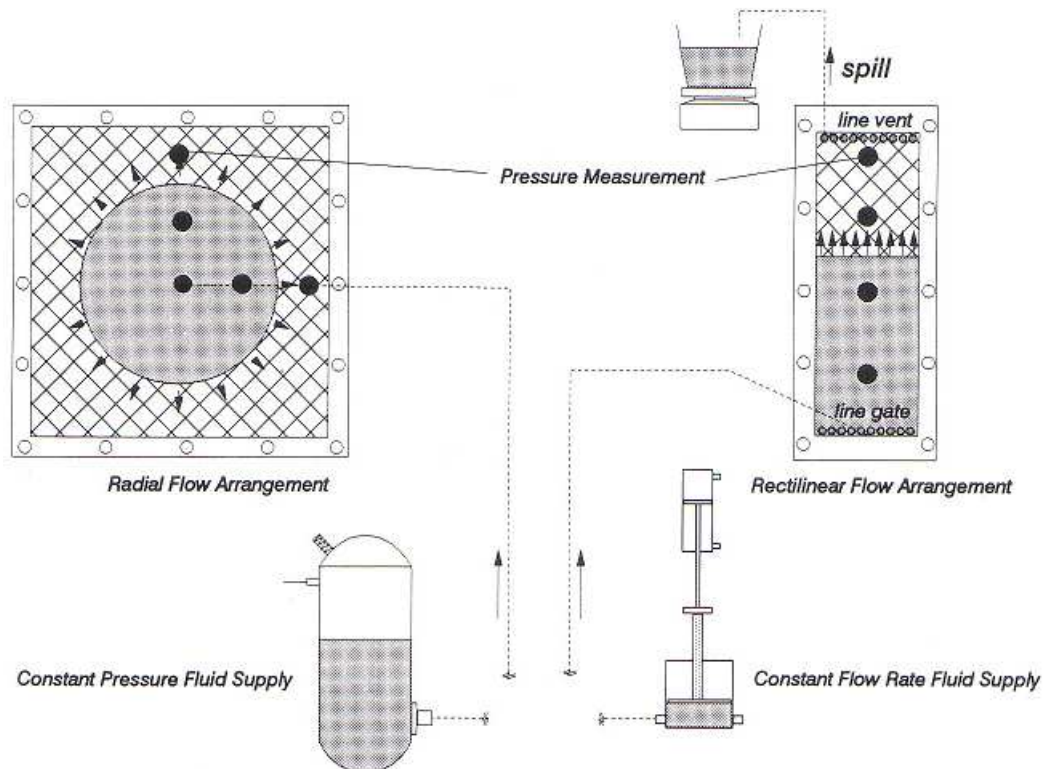


Figure 2-22 Schémas de principe des mesures linéaire et radiale de la perméabilité d'un renfort

$$\frac{d\xi_{f1}}{dt} = \frac{k_1(p_0 - p_r)}{\phi\mu R_0^2} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f1} - \xi_0) \cos^2 \xi_{f1}} \quad (2.13)$$

$$\frac{d\xi_{f2}}{dt} = \frac{k_1(p_0 - p_r)}{\phi\mu R_0^2} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \frac{1}{(\xi_{f2} - \xi_0) \cos^2 \xi_{f2}} \quad (2.14)$$

Avec : ϕ – porosité de la préforme ; R_0 – rayon du trou d'arrivée de fluide ;

2.7.3 Définition des moyens de mise en œuvre du moulage de la pièce

La mise en œuvre industrielle de la phase de moulage consiste dans la définition des méthodes et des outils requis par l'étape de validation industrielle du processus préliminaire de moulage.

Tableau 2-3 Mise en œuvre industrielle du processus de moulage

Processus type	Procédés de fabrication	Ressources	Conditions de mise en œuvre	Etats des produits
Moulage des preregs	Drapage des plis de tissu préimprégné	Outillage	Drapage manuel en salle blanche	Peaux moulées, pièce cuite avec peaux additionnelles moulées
Infusion de résine liquide	Préformage de la plaque et des singularités	Outillage, noyaux solubles, outillages spécifiques aux singularités	Drapage manuel en salle blanche	Plaque et singularités préformées

Cela consiste dans la définition d'un certain nombre de paramètres dirigeant le processus de moulage tenant en compte les contraintes liées à la présentation des renforts, des caractéristiques technologiques attendues de la préforme à réaliser (perméabilité, drapabilité) et des propriétés mécaniques du produit fini. Les principales étapes de l'activité de définition des moyens de mise en œuvre industrielle du processus de moulage sont résumées dans le **Tableau 2-3**.

2.7.4 Validation industrielle et quantification du processus de moulage

L'intérêt du développement d'une méthodologie de sélection des procédés de préformage est celui d'offrir des indications sur les capacités des moyens et des procédés au décideur impliqué dans la définition de l'industrialisation du processus de fabrication. Plusieurs possibilités s'offrent aux décideurs, notamment en termes de présentation de la matière première pour la réalisation des préformes et des outillages de préformage. L'utilisation des tissus poudrés permette d'offrir une rigidité à la préforme suite à un chauffage préliminaire avant de poursuivre l'activité de préformage. Egalement, dans le cas de préformes ayant des géométries complexes, des opérations de préformage sont nécessaires pour fabriquer des parties de la préforme avant de passer à l'assemblage de ces dernières pour construire la géométrie finale pour une imprégnation « dans un seul coup ».

La validation et la quantification de la phase de moulage fait appel à un ensemble de solutions de simulation et d'expérimentation. Ces démarches de validation ont été présentées dans la section 2.7.2 et elles sont spécifiques à chaque problématique identifiée lors de l'analyse de l'opération de moulage :

- l'estimation des propriétés mécaniques du produit fini,
- la drapabilité des renforts,
- la perméabilité de la préforme.

2.7.5 Sources de défauts

Généralement, les défauts issus lors de l'opération de drapage sont liés au non-respect des instructions de drapage par l'opérateur. On peut citer comme causes : une formation insuffisante ou bien une erreur ponctuelle. Cela n'est pas lié au procédé en lui-même et l'apparition de ce type de défauts peut se limiter facilement par la mise en place des méthodes préventives soit dans la façon de conception des instructions de drapage ou bien dans l'aménagement du poste et l'intégration des indicateurs dans la matière première.

Le non respect des conditions de mise en forme des préformes peut avoir un impact sur la qualité de la pièce issue des opérations ultérieures. Cela signifie que des défauts de santé matière peuvent survenir plus tard dans le cycle de fabrication à cause des écarts par rapport aux spécifications de la perméabilité de la préforme. On peut ainsi retrouver des zones sèches dans le produit fini ou bien des zones dans lesquelles le TVF demandé n'a pas été atteint.

2.8 La consolidation

2.8.1 Généralités

La consolidation est l'étape qui permet d'avoir la cohésion la plus importante entre les couches de renfort. La consolidation peut se réaliser en plusieurs étapes pour le procédé d'infusion de résine. La pression exercée par l'atmosphère ambiante sur la surface de la pièce permet de garder le bon compactage du renfort avant la solidification de la pièce. Pour plus de performance, des tissus contenant des fines particules de résine (tissus poudrés) peuvent être utilisés. Parfois, la pression atmosphérique n'est pas suffisante pour réaliser un bon compactage de la pièce dans des zones ayant une géométrie critique (rayons de raccordement). Dans cette situation on doit faire appel à un compactage mécanique réalisé par un outillage auxiliaire. Une étape de polymérisation partielle permet de garder une rigidité accrue de la préforme entre les différentes phases de fabrication.

Dans le cas de la projection simultanée, la consolidation est réalisée par l'intermédiaire d'une roulette grâce à laquelle l'ensemble projeté est compacté. Le même système employant une roulette peut servir au compactage préliminaire avant la mise sous vide dans le cas du drapage manuel. Ensuite, la pression ambiante joue son rôle pour réaliser le compactage de la pièce. Ce compactage est continué une fois la pièce introduite dans l'autoclave grâce à la pression exercée sur la pièce pendant la cuisson.

La **Figure 2-23** présente les principales activités liées à la démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape de consolidation et qui seront développées dans les paragraphes suivants.

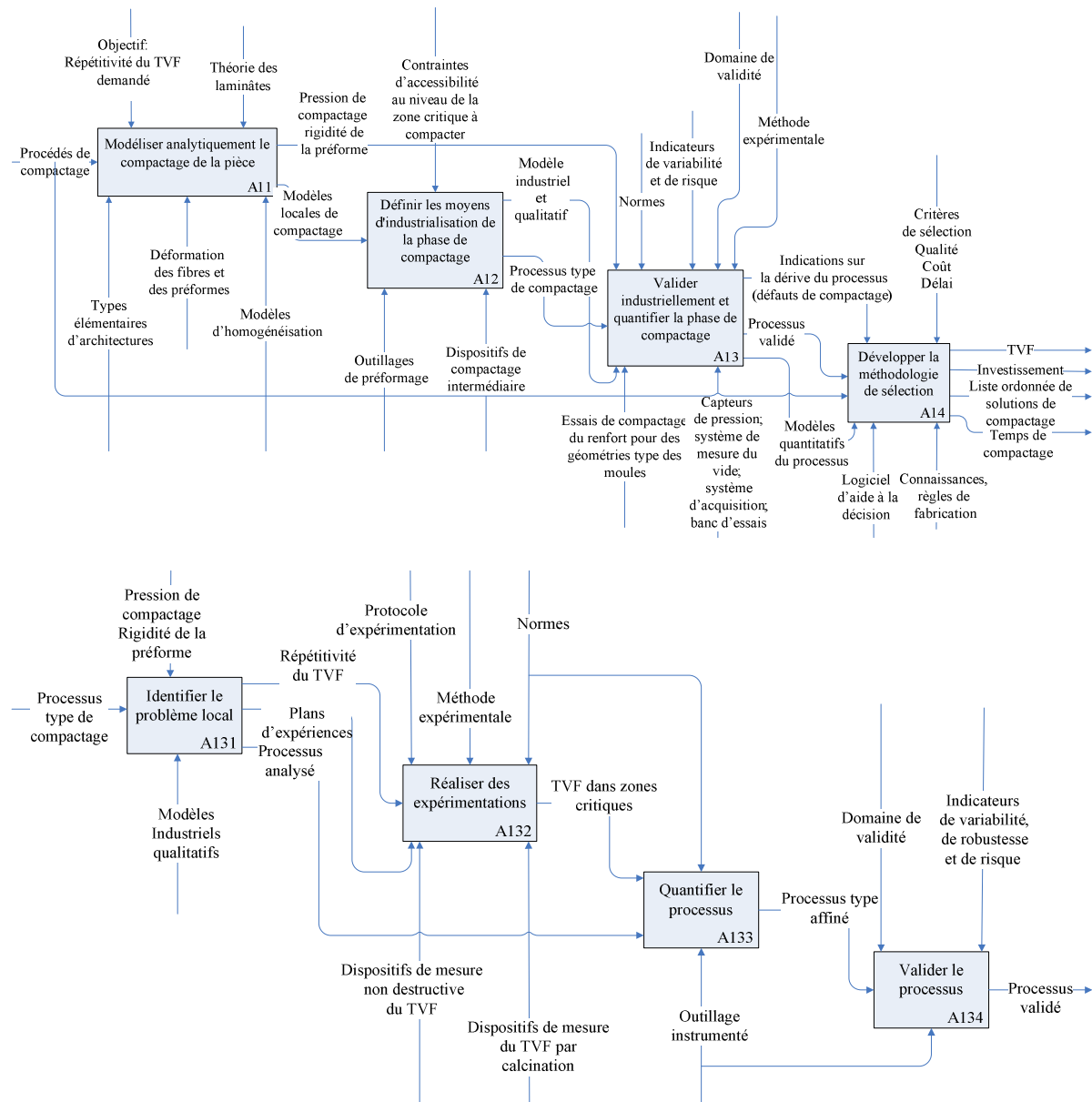


Figure 2-23 Démarche d'intégration des connaissances liées au compactage

2.8.2 Modélisation de la phase de consolidation

Le principal objectif de cette étape est d'assurer la santé matière de la pièce en chassant les bulles d'air qui sont emprisonnées pendant les étapes précédentes à l'intérieur de la pièce. On assure également l'obtention du taux volumique de fibre demandé dans le cahier des charges. Il est clair qu'en fonction du procédé de mise en forme utilisée un compactage spécifique à chaque procédé est obtenu, d'où l'intérêt de la sélection du bon procédé de fabrication. Un mauvais compactage peut résulter dans l'obtention des pièces comportant des défauts telles que les bulles d'air ou les zones sèches.

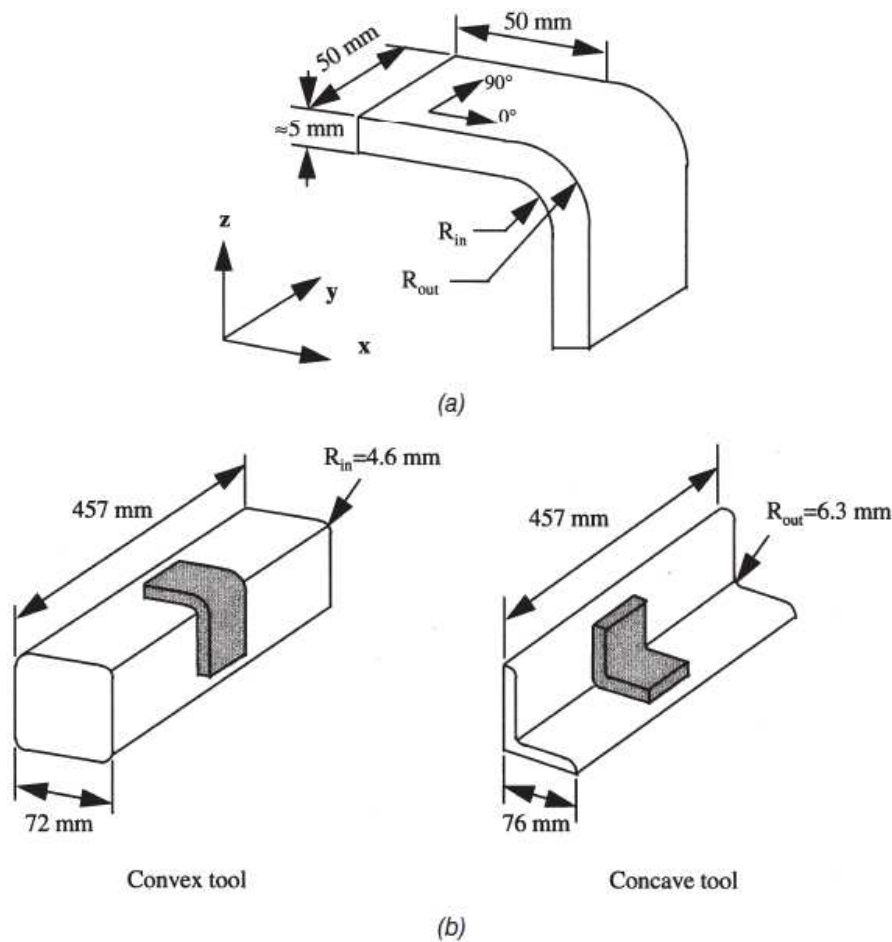


Figure 2-24 Expérimentation pour l'évaluation du compactage sur outillage en angle : a) définition des préformes ; b) dimensions des outillages [Hubert 2001]

Selon la complexité géométrique de la pièce à réaliser le comportement de l'ensemble préforme-matrice pendant la phase de compactage est différent et peut impacter considérablement la qualité de la pièce finie. Ainsi, on a identifié des formes de base qui constituent la géométrie du moule et qui peuvent induire des défauts au niveau de la pièce finie en fonction de la mise en forme des matières premières. Il s'agit notamment des formes convexes et concaves caractérisées par des faibles rayons de raccordement. A ce niveau, suite à la déformation du renfort pendant l'opération de moulage, on rencontre une diminution de l'épaisseur de la préforme (formes convexes) ou une agglomération de fibres (formes concaves). Des études ont été réalisées afin de corroborer les paramètres liés aux matériaux, aux caractéristiques géométriques des outillages et aux conditions opératoires. La variation de l'épaisseur, de la masse et du TVF a été analysée pendant la fabrication des composites en carbone et résine époxyde. On a constaté également l'importance de la variation de la viscosité de la résine et celles des équipements de mise sous vide [Hubert 2001].

La conclusion générale des expérimentations (**Figure 2-24**) montre une tendance d'apparition des défauts dans les situations suivantes :

- utilisation d'un outillage concave,
- résine de faible viscosité,
- utilisation des systèmes d'accélération du front de résine,
- disposition des plis dans une seule direction par rapport à une orientation quasi-isotrope (90°, 0°, +45°, -45°).

2.8.3 Définition des moyens de mise en œuvre de la consolidation de la pièce

La mise en œuvre industrielle de la phase de consolidation consiste dans la définition des méthodes et des outils requis par l'étape de validation industrielle du processus préliminaire de compactage. Cela consiste dans la définition d'un certain nombre de paramètres dirigeant le processus de consolidation tenant en compte les contraintes liées aux méthodes et dispositifs d'application de la pression après le moulage de la pièce afin d'obtenir le TVF demandé et afin de chasser l'air emprisonné à l'intérieur de la préforme. Les principales étapes de l'activité de définition des moyens de mise en œuvre industrielle du processus de consolidation sont résumées dans le **Tableau 2-4**.

Tableau 2-4 Mise en œuvre industrielle du processus de consolidation

Processus type	Procédés de fabrication	Ressources	Conditions de mise en œuvre	Etats des produits
Moulage des preregs	Consolidation pendant moulage (manuelle) et sous vide	Outillage, opérateur, système de vide atelier, kit de mise sous vide	Niveau de vide : 0,7bar	Pièce consolidée
Infusion de résine liquide	Compactage intermédiaire et auxiliaire (mécanique pendant le cycle entier)	Outillage, noyaux solubles, outillages spécifiques aux singularités	Température : 120°C Niveau de vide : 10-60mbar	Plaque et singularités compactées

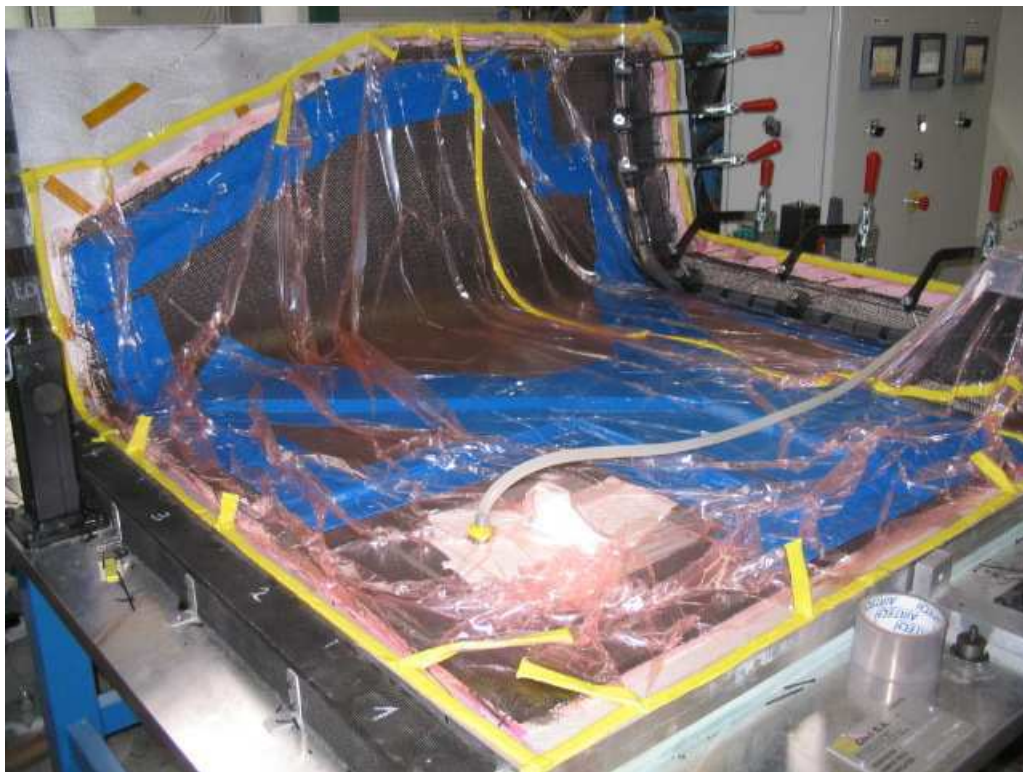


Figure 2-25 Préformage intermédiaire et utilisation d'un dispositif de compactage mécanique dans les zones à forme concave de l'outillage d'infusion (Photo PPE)

2.8.4 Validation industrielle et quantification du processus de consolidation

Afin d'éliminer l'apparition des défauts dues à un mauvais compactage plusieurs solutions peuvent être employées. Néanmoins, l'impact économique et celui sur le déroulement du processus de fabrication reste à étudier afin de sélectionner un processus de fabrication robuste et compétitif. Les solutions d'industrialisation retenues pour la fabrication du démonstrateur (**Figure 2-25**) sont les suivantes :

- introduction de plusieurs opérations intermédiaires de préformage. Cela impacte la mise en œuvre du procédé notamment en terme de durée de fabrication.
- utilisation des dispositifs qui permettent d'assurer la consolidation de la pièce dans les zones critiques. La complexité de l'outillage augmente ainsi, ayant des répercussions sur le coût de l'outillage mais aussi sur la durée de préparation.

2.8.5 Sources de défauts

Une mauvaise consolidation peut être la cause de l'apparition de différents défauts qui se traduisent par une mauvaise santé de la matière et par la non-conformité du produit avec les performances mécaniques spécifiées. En fonction du processus type employé, les défauts rencontrés diffèrent comme suit :

- moulage des préimprégnés : manque d'adhésion entre les plis de tissu prepreg à cause des bulles d'air emprisonnées dans la pièce. Le résultat est l'apparition des délaminages du fait que l'air emprisonné empêche la réalisation de l'interface entre deux plis en contact.
- infusion de résine liquide : déplacement relatif des plis lors de l'imprégnation et même avant la polymérisation complète de la pièce. Cela se traduit par l'apparition des plis traversant la pièce dans toute son épaisseur.

Dans tous les cas, un mauvais compactage signifie la fabrication d'une pièce qui n'est pas conforme en termes de TVF.

2.9 La solidification

2.9.1 Généralités

La solidification est une étape qui nécessite une longue durée de fabrication qui peut aller jusqu'à 12 heures pour les résine thermodurcissables. Cette étape peut s'allonger en durée en fonction des paliers de montée et de descente en température assurés par l'outillage. Dans le cas des matrices thermodurcissables l'effet de la chaleur appliquée permet de déclencher le phénomène de polymérisation de la résine qui consiste dans la création des chaînes des macromolécules de polymères. Les températures de polymérisation dépendent du type de résine utilisée. Ainsi, pour les applications nécessitant des produits avec une forte tenue mécanique comme l'aéronautique, les résines époxydes sont utilisées. Elles nécessitent des températures de cuisson d'approximativement 180°C. Le procédé de projection simultané permet de réaliser des produits pour des applications qui ne demandent pas une grande résistance mécanique. Ainsi, la polymérisation peut se réaliser même à température ambiante.

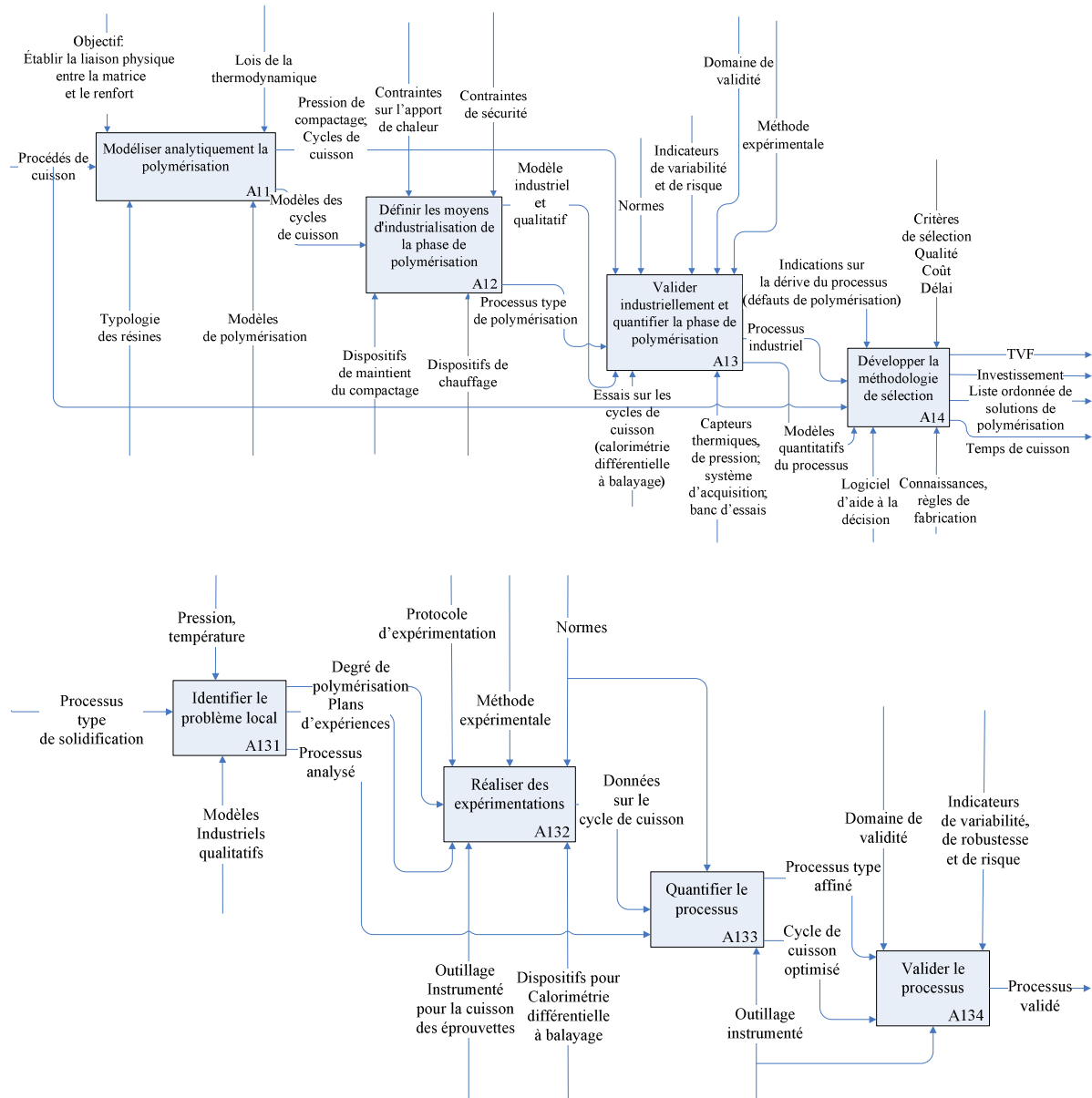


Figure 2-26 Démarche d'intégration des connaissances liées à la solidification de la pièce

L'objectif de cette étape est de donner la cohésion finale entre la matrice et le renfort grâce à la polymérisation de la résine qui constitue pour la plupart des produits l'élément de transfert de la charge entre les différentes couches de renfort.

La **Figure 2-26** présente les principales activités liées à la démarche d'intégration des connaissances liées à l'étape de solidification et qui seront développées dans les paragraphes suivants.

2.9.2 Modélisation de la solidification de la pièce

La modélisation de l'étape de solidification de la pièce se fait en se rapportant aux modèles de cinétique de polymérisation de la matrice. Ainsi, le taux de polymérisation est défini à l'aide de l'équation suivante [Lee 1982] :

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(T, \alpha)(1 - \alpha)^n \quad (2.15)$$

Avec : $d\alpha/dt$ étant le taux de polymérisation,
 T – la température de la résine, α - le degré de polymérisation,
 $f(T,\alpha)$ – une fonction qui dépend du type de réaction et
 n – un facteur déterminé expérimentalement.

2.9.3 Définition des moyens de mise en œuvre de la solidification de la pièce

La mise en œuvre industrielle de la phase de solidification consiste dans la définition des méthodes et des outils requis par l'étape de validation industrielle du processus préliminaire de polymérisation. Cela consiste dans la définition d'un certain nombre de paramètres dirigeant le processus de solidification tenant en compte les contraintes liées aux cycles de cuisson de l'ensemble renfort-matrice et des conditions opératoires utilisées. Les principales étapes de l'activité de définition des moyens de mise en œuvre industrielle du processus de solidification sont résumées dans le **Tableau 2-5**.

Tableau 2-5 Mise en œuvre industrielle du processus de solidification

Processus type	Procédés de fabrication	Ressources	Conditions de mise en œuvre	Etats des produits
Moulage des preregs	Polymérisation en autoclave	Outillage, autoclave	Niveau de vide : 0,7bar Température 180°C Pression : 5bar	Pièce polymérisée
Infusion de résine liquide	Polymérisation en outillage auto chauffé	Outillage auto chauffé	Température : 180°C Niveau de vide : 10-60mbar	Pièce polymérisée

2.9.4 Validation industrielle et quantification du processus de solidification

La quantification expérimentale de la polymérisation de la pièce est une étape essentielle dans la phase d'industrialisation d'un produit composite. Suite à la corroboration d'un ensemble de données généralement apportées par les fournisseurs de résines et celles obtenues suite à des expérimentations additionnelles le cycle de polymérisation d'une pièce peut être optimisé. On emploie habituellement des mesures de l'impédance diélectrique de la résine relevée pendant le cycle de cuisson par l'intermédiaire de la Calorimétrie Différentielle à Balayage.

2.9.5 Sources de défauts

Les principaux défauts liés à la polymérisation sont ceux déterminés par le retrait de la résine. Ces défauts se manifestent par :

- manque de cohésion entre les couches,
- micro ou macro fissures.

[Chekanov 1995] fait référence à l'effet de la température à laquelle la polymérisation s'effectue sur l'apparition des défauts de retrait de la résine.

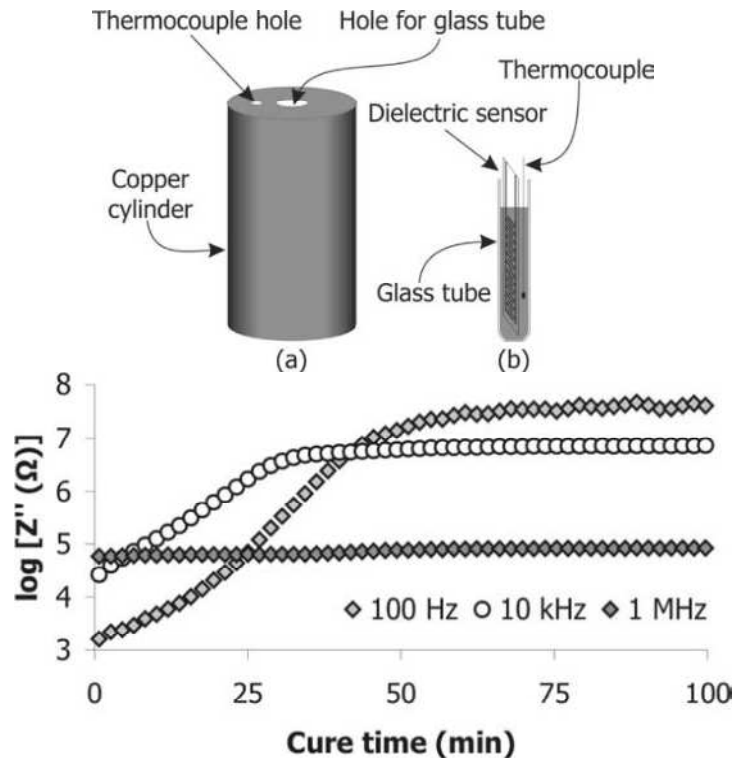


Figure 2-27 Dispositif expérimental pour les essais diélectriques et variation de l'impédance pendant la cuisson de la résine RTM6 [Kazilas 2005]

3. Contraintes liées aux flux et aux coûts

3.1 Généralités

On a présenté les aspects technologiques des deux procédés. L'industrialisation nécessite la prise en compte simultanée des aspects logistiques et de coût. C'est l'objectif de cette section.

Un produit composite passe par différents états intermédiaires pendant sa fabrication. Ces états intermédiaires sont essentiels pour la modélisation des interactions rencontrées au niveau du tryptique Produit-Procédé-Ressource. La majorité des états intermédiaires sont identifiés au niveau des quatre principales étapes de la fabrication des composites traités amplement dans la littérature (Figure 2-28, rectangles colorés en gris). Néanmoins, le choix d'un groupe de procédés de mise en forme ne s'explique pas uniquement par les phénomènes physiques rencontrés lors de l'appel des quatre étapes citées. Les procédés de mise en forme des matériaux composites offrent des grandes possibilités d'intégration de fonctions dès les premiers états du produit. Cette intégration de fonctions nécessite la prise en compte simultanée des contraintes issues de l'analyse des procédés et des flux physiques définis dès le lancement en fabrication et jusqu'à la fin de la fabrication. L'impact des choix au niveau du parachèvement de la pièce sur le processus de fabrication n'est pas suffisamment pris en compte.

Etant donné que les contraintes à considérer lors de la phase de sélection des procédés de fabrication influent considérablement sur le parachèvement de la pièce, des états intermédiaires sont à définir pour les opérations suivant la phase de solidification de la pièce. Nous proposons de compléter les états intermédiaires identifiés au niveau des quatre grandes étapes de la fabrication par deux groupes distincts d'états intermédiaires (Figure 2-28, rectangles colorés en vert):

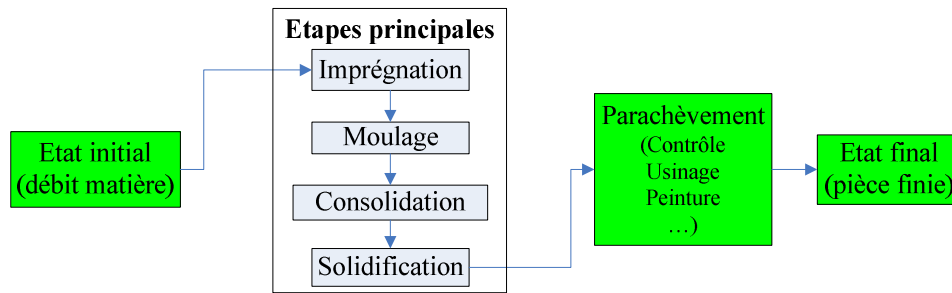


Figure 2-28 Grandes étapes de la fabrication d'un composite et étapes de caractérisation du processus

- Etats intermédiaires de validation (état initial et état final), nécessaires pour l'implémentation de la méthodologie de sélection des processus proposée et qui imposent des contraintes supplémentaires (durée de vie de la matière);
- Etats intermédiaires pour le parachèvement, nécessaires pour définir les états pris par la pièce pendant les opérations : d'usinage, de contrôle, de peinture *etc.*

3.2 Paramètres clés liés aux flux

On connaît le produit en termes de géométrie et des fonctions associées aux différentes entités et qui impactent le choix des procédés et du processus de fabrication. Un ensemble de paramètres liés aux flux seront identifiés.

L'infusion de résine offre plus de possibilités d'intégration de fonctions et de composants que le moulage de préimprégnés. Cela permet de réduire le cycle de fabrication grâce à la suppression d'un certain nombre d'opérations (assemblage). La fabrication est plus flexible dans le cas de l'infusion. La préforme qui est réalisée à part, parfois en plusieurs composants, facilite la mise en forme et la fabrication dite « d'un seul coup ». La mise en production sera caractérisée par les contraintes issues de l'aptitude d'intégration de fonctions et de composants, et imposées par des paramètres influant directement les flux et le coût de fabrication. Ces paramètres seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

La taille de la série est un paramètre important pour la sélection des moyens de fabrication et elle intervient également dans le développement des différents modèles de coût utilisés pour analyser la performance économique d'un processus de fabrication. S'agissant de la fabrication des produits composites pour l'aéronautique, en fonction de la taille de la pièce, on retrouve des séries de faible volume par rapport à l'industrie de l'automobile. Cela impacte sur l'amortissement des coûts des outillages. Il est intéressant dans ce cas de s'orienter vers des outillages à faible coût afin de minimiser le coût unitaire des produits.

La dimension d'une pièce a une grande influence sur la définition des capacités des outillages. Si le processus de moulage des préimprégnés est tributaire de la capacité de chargement de l'autoclave, l'infusion de résine fait appel à un outillage autonome qui permet de s'affranchir de cette contrainte qui limite la productivité. La production devient plus flexible dans cette situation dans laquelle on concentre la fabrication dans un seul ilot limitant les transports ainsi que les croisements des flux et les délais supplémentaires engendrés. Néanmoins, une grande pièce peut être facile à fabriquer. On rajoute **la complexité** de la pièce comme paramètre relevant de la fabrication. Une pièce plus complexe peut introduire des contraintes au niveau de l'accessibilité à la pièce qui impactent sur les durées opératoires. C'est surtout le cas de ces procédés qui font appel à des nombreuses opérations manuelles pour lesquelles le temps de fabrication dépend de la complexité du produit.

Un autre paramètre à considérer est la présence des **postes goulots d'étranglement**. Ces postes diminuent la performance globale du système de production. Habituellement,

L'autoclave agit comme un poste goulot dans un atelier de fabrication basé sur le procédé de moulage des préimprégnés. Cela est lié à la capacité de l'autoclave et à la compatibilité des recettes de polymérisation des différentes références de pièces. Dans la majorité des cas plusieurs types de pièces peuvent être chargées dans l'autoclave afin d'optimiser le chargement. Ce n'est pas toujours le cas. Pour des recettes incompatibles, des files d'attente vont se créer devant le poste de polymérisation en attendant la cuisson de chaque pièce. En plus, l'autoclave peut travailler à chargement incomplet, ce qui produit une augmentation des coûts d'opération. En fonction de la quantité de pièces à fabriquer définie par le programme et le nombre d'outillage du même type disponibles dans l'atelier on peut trouver un deuxième poste goulot. Il s'agit de l'outillage dans le cas de la fabrication par moulage de préimprégnés. Deux problématiques locales sont la cause de la transformation de l'outillage en poste goulot. Premièrement, un outillage est immobilisé pendant une grande partie du processus de fabrication d'une seule pièce. Un nombre insuffisant d'outillages peut transférer le goulot à ce niveau. Deuxièmement, les produits complexes nécessitent plusieurs passages en autoclaves pour des polymérisations intermédiaires. Ces opérations ne peuvent pas s'effectuer en parallèle, donc la durée d'immobilisation de l'outillage accroît. Toutes ces caractéristiques diminuent également la flexibilité d'une ligne de fabrication basée sur le moulage des prepreps.

L'influence conjointe de ces paramètres a été étudiée par l'intermédiaire de la simulation des flux de production [Mihaluta 2010]. Le logiciel DELMIA QUEST a été employé pour modéliser deux ateliers de fabrication (**Figure 2-29**) : l'un basé sur le moulage des prepreps et l'autre sur l'infusion de résine liquide. Plusieurs scénarii ont été définis afin d'étudier l'influence sur la productivité des paramètres liés aux flux de fabrication : nombre d'outillages disponibles, taille de la série, postes goulots.

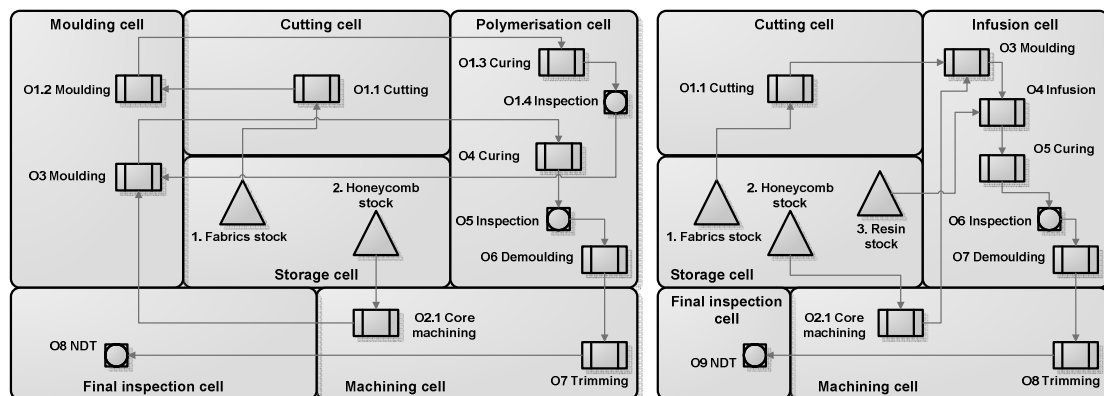


Figure 2-29 Diagrammes de flux utilisés comme support d'implémentation des deux ateliers de fabrication [Mihaluta 2010]

Le coût est un indicateur qui se retrouve d'une manière ou d'une autre dans le calcul à partir des inducteurs identifiés jusqu'à ce point. Il sera détaillé dans les chapitres suivants.

3.3 Critères et verrous rencontrés dans la mise en œuvre industrielle

La mise en œuvre industrielle nécessite de soulever les verrous technologiques et scientifiques présents au niveau des procédés et des flux. Les critères permettant d'évaluer la performance des solutions proposées sont également à définir. L'ensemble de critères et de verrous identifiés au niveau des grandes étapes des processus de moulage des préimprégnés (**Figure 2-30**) et du processus d'infusion de résine liquide (**Figure 2-31**) ont été identifiés.

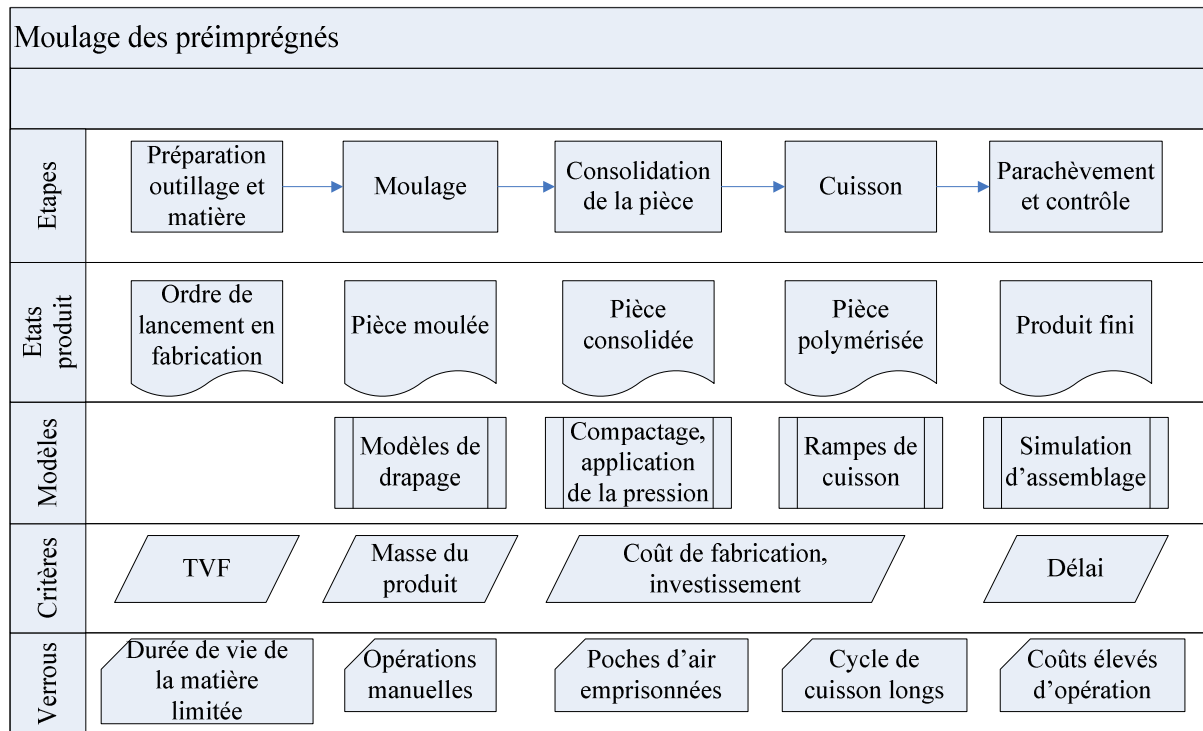


Figure 2-30 Critères d'évaluation et verrous identifiés au niveau des grandes étapes de la fabrication par moulage des préimprégnés

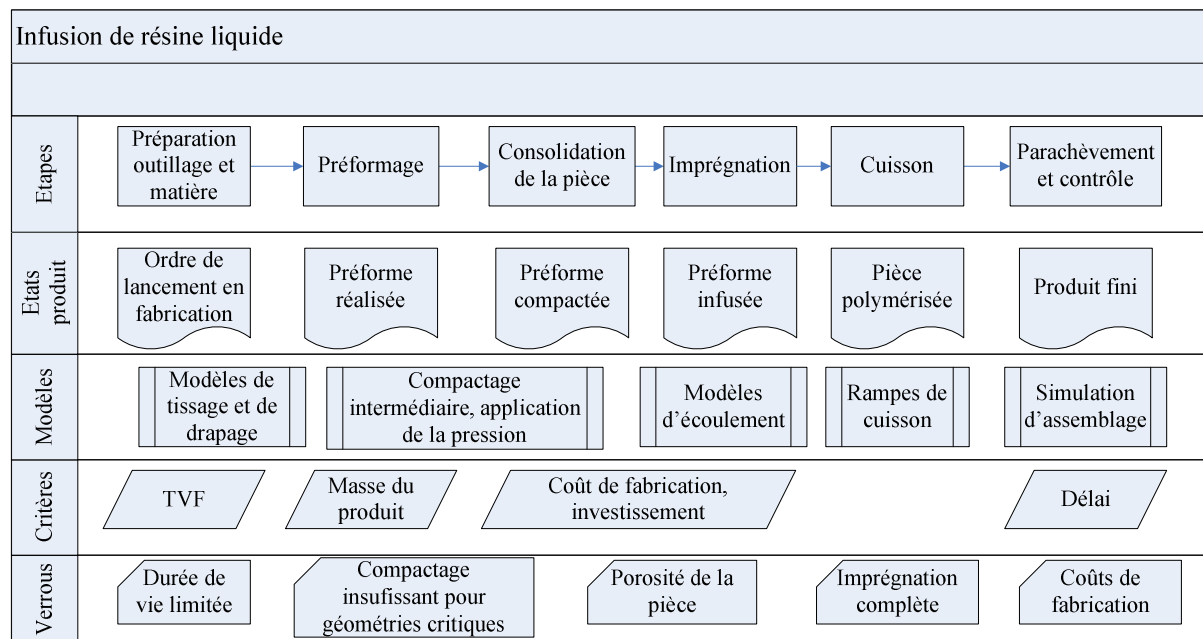


Figure 2-31 Critères d'évaluation et verrous identifiés au niveau des grandes étapes de la fabrication par infusion de résine liquide

Bien que des verrous et les modèles correspondants puissent être identifiés pour chaque grande étape de la fabrication, les mêmes critères d'évaluation sont utilisés d'une étape à l'autre vu qu'il y a interaction entre les problématiques impactant sur la quantification de ces critères.

Comme le procédé de moulage des préimprégnés est utilisé depuis plus d'une trentaine d'années dans l'industrie aéronautique, les principaux verrous liés au procédé ont été levés au fur et à mesure de son exploitation. Ainsi, on s'intéresse plutôt aux verrous du procédé

d'infusion de résine qui débute dans la fabrication des pièces hautes-performances et aux quelques verrous technologiques du procédé de moulage des préimprégnés le pénalisant par rapport à celui émergeant dans ce secteur.

4. Conclusion

On constate l'importance d'une analyse multicritère afin d'améliorer le processus de décision lors de la sélection des procédés de mise en forme et de l'industrialisation des processus définis. Dans le cas de la fabrication des produits composites pour des applications aéronautiques le critère principal de sélection est le rapport entre la performance mécanique et la masse du produit. Etant donné le degré d'avancement des procédés de fabrication des composites renforcés de fibres, une large panoplie de procédés de fabrication permettant l'obtention des performances similaires s'offre au décideur. Il est intéressant d'intégrer des critères liés aux coûts afin de faciliter cette tâche de décision. Le temps de fabrication s'avère être un critère de sélection important. Effectivement, la présence d'opérations manuelles, les durées importantes des cycles de polymérisation des résines époxydes, ainsi que d'autres paramètres liés à la mise en production font du temps de fabrication un critère à ne pas négliger.

Nous proposons dans les chapitres qui suivent une méthodologie de structuration, capitalisation et exploitation des connaissances liées à la fabrication des composites renforcés de fibres de carbone pour des applications aéronautiques afin d'aboutir à une hiérarchisation multicritères des solutions d'industrialisation de ces produits. Cette évaluation multicritère est basée, ainsi, sur les interactions du tryptique Qualité-Coût-Délai (**Figure 2-32**).

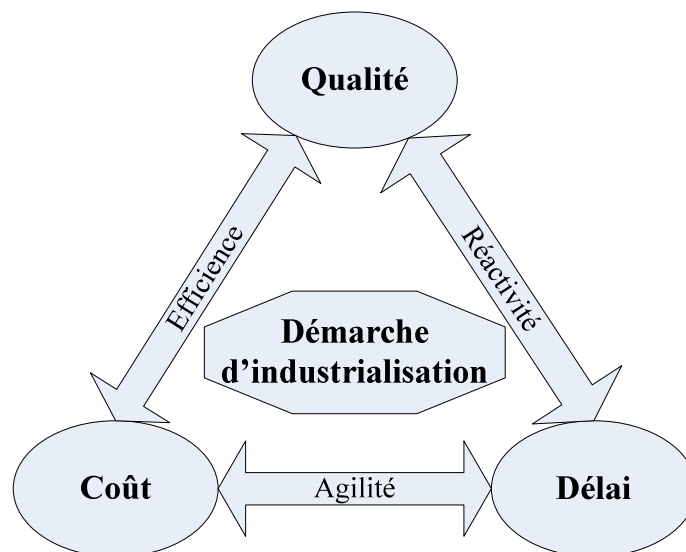


Figure 2-32 Interactions au niveau du tryptique Qualité-Coûts-Délais

Chapitre 3 Structuration, capitalisation et gestion des connaissances d'industrialisation des composites

1. Introduction

Nous avons pu voir dans le deuxième chapitre de ce travail un ensemble de démarches pour la mise en œuvre industrielle des produits composites. Suite au déploiement de ces démarches on génère des connaissances diverses sur les produits à fabriquer et les processus et ressources auxquels on fait appel. La nature des connaissances est souvent différente et les données traitées sont de types variés. Ces informations issues des diverses phases de l'industrialisation sont présentées aux concepteurs sur des supports variés et elles ne sont pas toujours présentées selon le même formalisme. Elles se présentent sous forme de schémas, de texte, de formules, d'abaques, *etc.*

De ce fait, il est nécessaire de proposer un formalisme qui permet de capitaliser le patrimoine de connaissances de l'entreprise. Il est également nécessaire de prévoir la réutilisation des connaissances capitalisées dans le but de faciliter la prise de décision pendant les diverses activités de l'entreprise. Ainsi, le formalisme à proposer doit être développé selon des contraintes liées à la nature des variables traitées et des objectifs de ce traitement. Dans notre cas il s'agit du développement d'une méthodologie qui permet de structurer les connaissances liées à la fabrication des produits composites selon le contexte fixé par l'entreprise SLCA. Les paramètres liés au triptyque PPR seront structurés en vue de réaliser un traitement selon l'objectif fixé : définir les processus de fabrication correspondant aux produits analysés et évaluer leur performance industrielle.

Ce chapitre a l'objectif d'introduire des notions liées à la gestion des connaissances et à la modélisation des objets d'entreprise. On présente ainsi les différentes méthodes de gestion des connaissances industrielles et les modèles proposés dans la littérature dans des études similaires à notre travail. Après le positionnement de notre travail par rapport aux modèles existants nous allons proposer les modèles et outils supports de notre méthodologie réalisés selon le contexte spécifié. Ces modèles et outils portent sur la structuration et la capitalisation des connaissances industrielles du domaine des composites. Ils seront illustrés afin de mieux justifier nos choix.

2. Gestion des connaissances d'entreprise

Selon [Grundstein 1995], l'entreprise est aussi une unité de production de connaissances à part d'être une unité de production de biens et de services. L'objet de la gestion des connaissances d'entreprise est d'identifier le savoir technique et le savoir-faire de l'entreprise afin de capitaliser les connaissances pertinentes en vue d'une réutilisation. [Ermine 2003] indique que la gestion des connaissances fait partie du management stratégique de l'entreprise et considère la connaissance comme une nouvelle ressource de l'entreprise. Il identifie trois objectifs pour la gestion des connaissances :

- la capitalisation des connaissances – il s'agit de stocker de la connaissance, mais seulement celle qui apporte de la valeur à l'entreprise ;
- le partage des connaissances – il s'agit de faire transmettre la connaissance et d'impliquer les émetteurs et récepteurs des informations dans une démarche de définition d'une intelligence collective ;

- la création des connaissances – c'est une notion liée à l'innovation permanente mise en place afin d'offrir à l'entreprise des avantages concurrentiels.

[Dieng-Kuntz 2001] indique plusieurs motivations pour la gestion des connaissances, motivations articulées autour des trois objectifs précédemment explicités :

- éviter la perte du savoir-faire des hommes lorsqu'ils quittent l'organisation ;
- exploiter l'expérience et la cartographie des compétences de l'entreprise ;
- améliorer la circulation des informations et l'apprentissage des employés ;
- capitaliser le savoir-faire dans une connaissance collective et l'harmoniser ;
- améliorer les procédés et aider l'innovation.

Avant de poursuivre avec l'explication de notions issues de la gestion des connaissances, il est nécessaire d'introduire une terminologie appliquée aux sciences de l'information afin d'éclairer certains concepts.

2.1 Terminologie appliquée aux sciences de l'information

Les sciences de l'information et les outils développés sont basés sur des concepts auxquels on fait appel. Ils doivent être définis avant de poursuivre cette étude. Ces concepts semblent déduits d'un récit¹ du poète T.S. Eliot qui réalise une première hiérarchisation de la connaissance et des notions connexes :

« Where is the Life we have lost in living?
Where is the wisdom we have lost in knowledge?
Where is the knowledge we have lost in information? »

On retrouve ce type d'hiérarchisation pyramidale dans la littérature consacrée à la gestion des connaissances. Les concepts employés couramment sont : les données, les informations et les connaissances. On fait appel parfois à une quatrième notion : la sagesse. C'est le cas du modèle d'hiérarchisation DIKW (Data, Information, Knowledge, Wisdom) [Ackoff 1989].

Nous allons présenter dans la suite les définitions des différents concepts retrouvés dans la littérature. Ces concepts seront explicités par des exemples du contexte de la fabrication des produits composites.

- Les documents, les images – il s'agit des supports de données et des moyens de représentation. Ils peuvent prendre la forme de schémas, d'esquisses, des plans détaillés, etc. *Un diagramme Température-Temps pour le cycle de cuisson d'une résine époxyde représenté sur une fiche d'instruction peut être considéré un document.*
- Les données – il s'agit des faits bruts. Les données permettent de stocker des valeurs ou des observations. Une donnée peut signifier plusieurs notions. Il est donc nécessaire de leur attribuer un contexte pour pouvoir les exploiter correctement. *Dans le même diagramme qui représente les paliers de cuisson on peut lire un enchaînement de chaînes de caractères : « maintien », « 15min », « température »,*

¹ Extrait de la pièce de théâtre Le Roc (The Rock) écrite en 1934 par Thomas Stearns Eliot (26 septembre 1888 – 4 janvier 1965)

« 180°C ». il s'agit dans ce cas des données. Elles peuvent avoir différentes significations qui, à cet état de la définition, ne peuvent pas être exploitées correctement.

- Les informations – il s'agit d'une mise en relation cohérente des données. En répondant à un certain nombre de questions (Qui ?, Quoi ?, Quand ?, Où ?) on place les données concernées dans leur contexte. Les informations permettent la transmission des données et de leurs connexions d'une manière structurée. *La mise en relation de ces chaînes de caractères constitue une information. On obtient ainsi une information sur un palier de cuisson dans le cycle de fabrication : « Maintien à une température de 180°C pendant 15min ». Néanmoins, il n'est pas certain que le résultat des actions entreprises lors de l'obtention de cette information par deux personnes différentes soit le même.*
- Les connaissances – elles permettent de placer les informations dans le système de référence du récepteur. Ainsi, les informations peuvent être expliquées de manière différente selon la base de connaissances de celui qui les reçoit. Les connaissances permettront de répondre à la question suivante: « Comment ? ». *L'information sur le palier de cuisson peut mener au résultat attendu (programmation d'un autoclave) seulement si elle est corroborée avec d'autres informations ayant un même référentiel, et ce référentiel sera spécifique à un opérateur d'un atelier de fabrication des composites.*
- Le savoir – un ensemble de connaissances représentent le savoir. *En prenant le même exemple, l'opérateur concerné peut mener à bien la fabrication du produit s'il détient plusieurs connaissances du métier, donc le savoir relatif à la fabrication. Ce savoir est obtenu suite à l'expérience et/ou la formation. Cela ne signifie pas que la personne en cause peut expliquer les phénomènes dirigeant les processus.*
- La sagesse – il s'agit d'une notion perçue différemment, parfois de manière contradictoire, dans le milieu académique. Elle est similaire à la connaissance mais, selon certains chercheurs, la sagesse comporte une notion de compréhension et de projection dans le temps afin de retrouver la notion de finalité. Elle permettrait de répondre à la question : « Pourquoi ? ». on pourrait assimiler la sagesse au savoir-faire. *Des expérimentations complexes sont à réaliser afin d'expliquer les phénomènes qui dirigent les procédés de mise en forme des différents produits. C'est uniquement après avoir accumulé du savoir et d'avoir expliqué ce savoir qu'on peut dire être propriétaires du savoir-faire.*

Lors du processus de création de connaissances dans une entreprise [Nonaka 1995] fait la distinction entre deux types de connaissances : les connaissances tacites qui sont propres aux personnes qui les détiennent (elles sont difficilement exprimées d'une manière formelle) et les connaissances explicites qui sont contenues par des documents, des archives (elles sont structurées, donc leur communication formelle est aisée). Une cartographie des modes de création et de transmission des connaissances dans une entreprise a été proposée (**Figure 3-1**). Cette cartographie permet de mettre en relation le concept de connaissances tacites et explicites avec celui de connaissance individuelle et collective afin de déterminer les quatre modes de transmission des connaissances : socialisation, externalisation, internalisation combinaison.

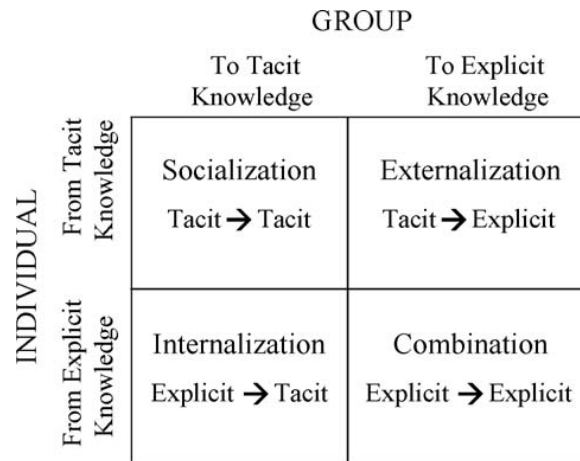


Figure 3-1 Les mécanismes de la création des connaissances [Nonaka 1995]

On peut également s'appuyer sur une typologie des connaissances exprimé dans le cas du processus d'industrialisation d'un nouveau processus de fabrication :

- Connaissances déclaratives – constituent le savoir-faire, des faits et des règles expertes liées à la technologie ou bien des lois dirigeant les phénomènes physiques qui caractérisent les procédés employés.
- Connaissances procédurales – représentent le savoir (connaissances et formalisme). Elles sont issues de l'expérience de l'entreprise. La mise au point des procédés par la pratique d'un enchainement d'activités permet de développer les règles de fabrication et d'explicitier ainsi les relations existant entre les connaissances déclaratives.
- Connaissances conditionnelles – permettent de statuer le contexte de l'utilisation des deux types de connaissances précédemment expliquées. Elles vont indiquer à quel moment on doit faire appel à ces connaissances identifiées et, donc, de définir le processus de fabrication d'un produit.

2.2 Création et gestion de connaissances de l'entreprise

Une entreprise génère des connaissances par ses activités. Ces connaissances sont généralement liées aux hommes qui les emploient. Afin d'assurer la pérennité des connaissances de l'entreprise, Il est nécessaire de constituer une mémoire de l'entreprise en employant des méthodes issues de la gestion des connaissances. [Dieng-Kuntz 2001] propose la définition suivante pour le concept de mémoire d'entreprise : « représentation persistante, explicite, désincarnée, des connaissances et des informations dans une organisation, afin de faciliter leur accès, leur partage et leur réutilisation par les membres adéquats de l'organisation dans le cadre de leurs tâches ». Cette définition prend en compte les différents concepts et motivations de la gestion des connaissances que nous avons citées dans les sections précédentes.

Dans le même esprit, celui de proposer les méthodes et les outils pour la création d'une mémoire d'entreprise, [Grundstein 1995] propose un modèle pour le cycle de vie de la gestion des connaissances qui contient les actions menées dans une démarche analogue à l'amélioration continue (Figure 3-2).

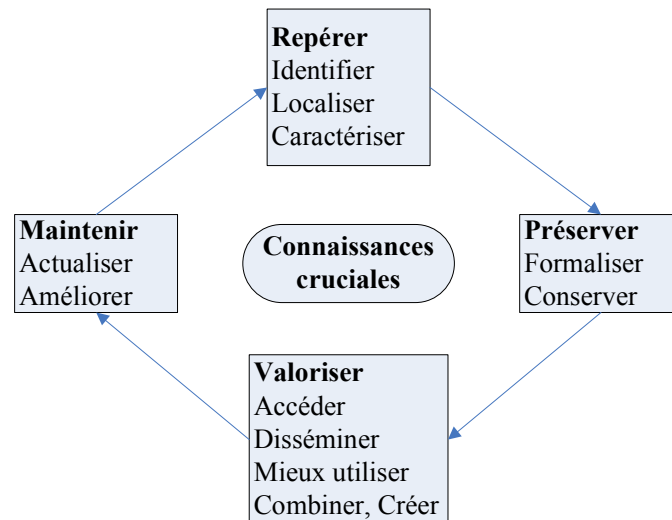


Figure 3-2 Construction d'une mémoire d'entreprise – modèle de Grundstein [Grundstein 1995]

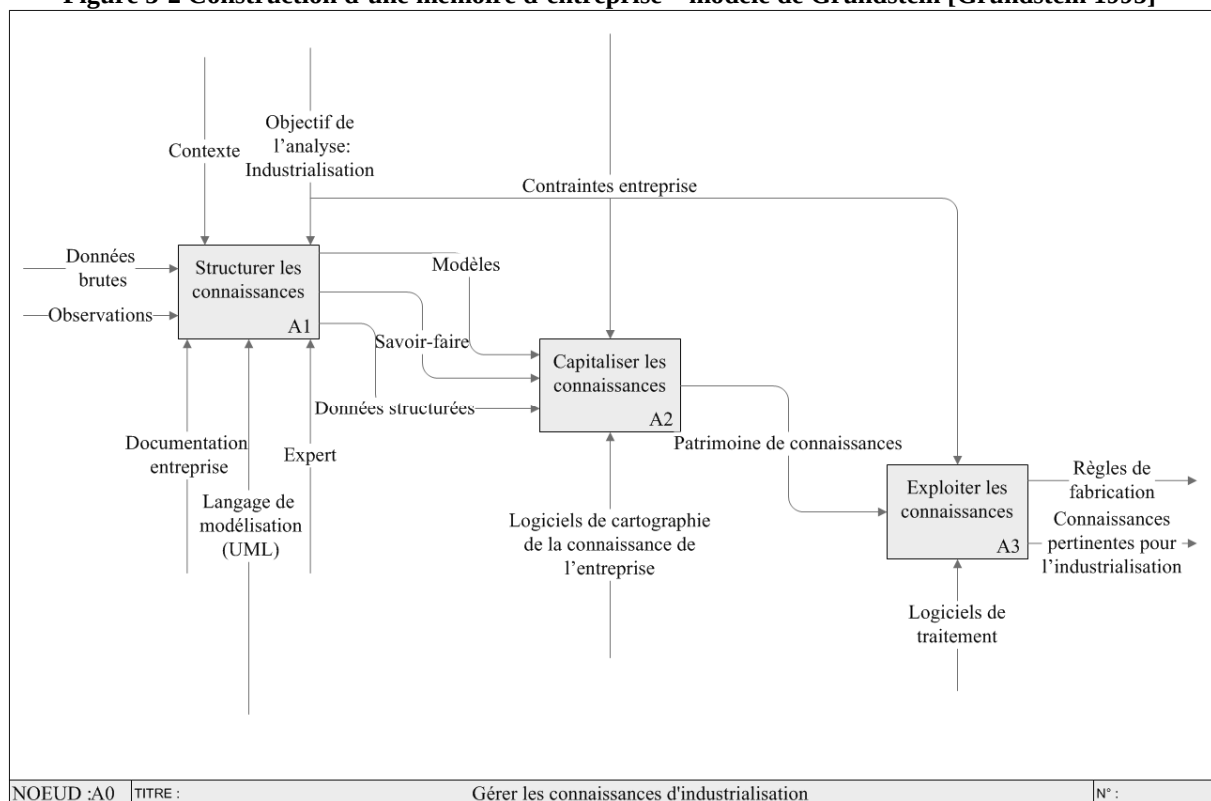


Figure 3-3 Diagramme SADT, activité A0 : démarche de gestion des connaissances pour l'industrialisation des composites

Dans ce travail on se place dans ce contexte : de fournir une méthodologie et les outils support pour la création d'une mémoire d'entreprise propre au domaine de la fabrication de produits composites par l'entreprise SLCA. Nous proposons un diagramme de référence (

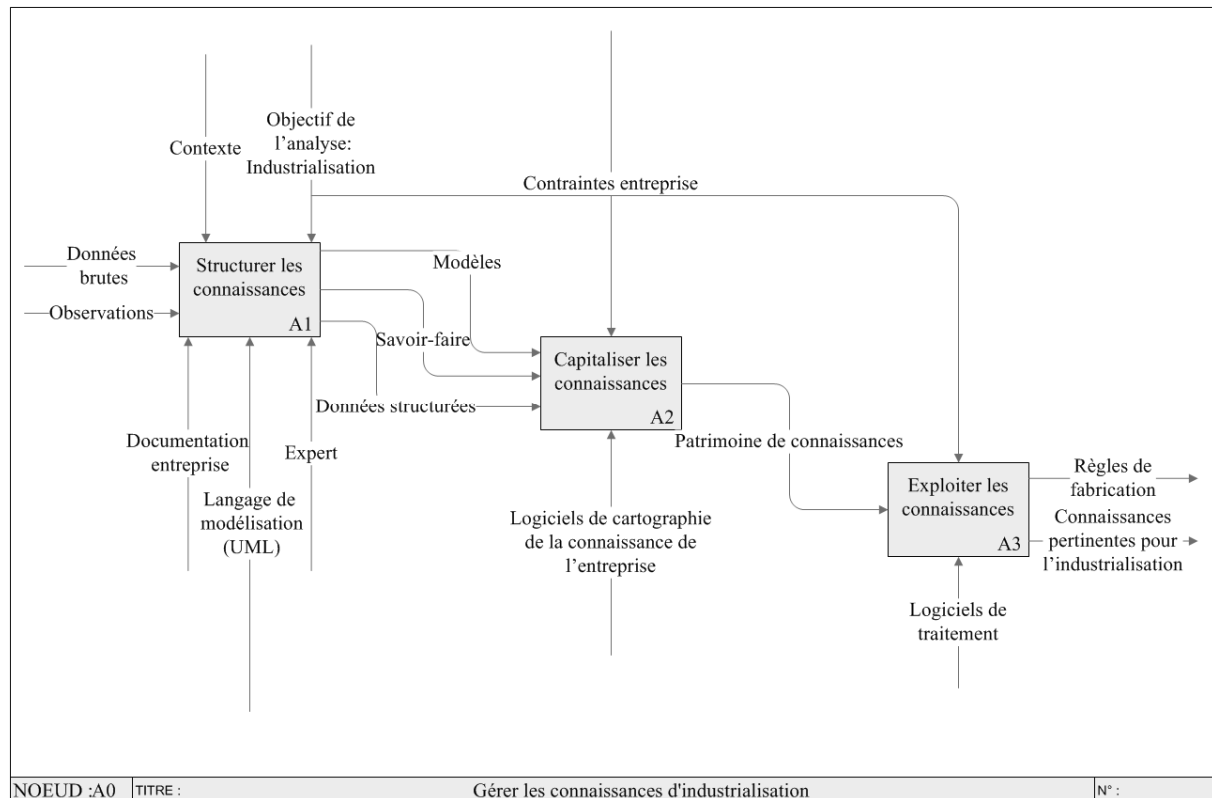


Figure 3-3 Diagramme SADT, activité A0 : démarche de gestion des connaissances pour l'industrialisation des composites

) de la gestion des connaissances pour synthétiser les grandes étapes de ce travail. Les principales activités identifiées sont liées à :

- La structuration des connaissances – on se propose de présenter d'une façon formelle les connaissances pertinentes au domaine étudié ;
- La capitalisation des connaissances – on se propose de fournir les outils nécessaires pour capturer et conserver ces connaissances ;
- L'exploitation des connaissances – on se propose de développer une méthode de traitement des données pertinentes en vue d'évaluer la performance industrielle des processus de fabrication.

Les notions de structuration et de capitalisation des connaissances seront traitées dans les sections 3 et 4. L'exploitation des connaissances fait l'objet du 4^{ème} chapitre.

2.3 Gestion de l'incertitude et de l'imprécision

Après avoir analysé les concepts liés à la connaissance (passage des données vers les savoirs) on constate l'apparition d'une autre problématique liée à la gestion des connaissances. Il s'agit de l'incertitude et de l'imprécision des données traitées.

L'incertitude est liée d'une part au contexte associé aux données et de l'autre des méthodes et des outils mis en œuvre pour la quantification des variables caractérisant les divers paramètres employés par les connaissances. Effectivement, selon le référentiel de celui qui exploite les informations, celles-ci se prêtent à des interprétations différentes. Ainsi, on est amené à évaluer les variables traitées et selon la complétude des statistiques desquelles on dispose des

approximations sont faites. Ainsi, la prise de décision est caractérisée par les risques issus de cette incertitude. Afin de mener à bien un processus de décision on doit agir aussi sur ces risques de manière à :

- Identifier et évaluer les risques – cette évaluation est souvent subjective ;
- Identifier les sources et les activités de l'entreprise sur lesquelles les risques ont le plus d'impact ;
- Identifier les moyens de contrôle des risques et les mesures correctives – afin de pouvoir déployer cette étape les risques doivent être bien entendu quantifiables et ce n'est pas dans tous les cas une tâche aisée.

Un des moyens qui permet de diminuer l'effet de l'incertitude sur les connaissances est l'emploi des ontologies. Les ontologies permettent de créer un vocabulaire propre aux utilisateurs et aux services d'une entreprise [Tixier 2001].

L'imprécision est due à l'incomplétude des données et du niveau de détail choisi pour les décrire. [Labrousse 2004] conclue que l'imprécision est due à la prise de décision dans le contexte des informations partielles selon deux situations distinctes :

- 1) certaines activités sont dépendantes entre elles, et
- 2) certaines activités se chevauchent dans le but de raccourcir les projets (Ingénierie Simultanée). De ce fait, la maîtrise des inducteurs au niveau du processus de décision n'est pas suffisante.

On conclut que la validation par les experts du domaine traité des modèles proposés se voit nécessaire afin de diminuer l'impact sur le processus de décision des risques et de la granularité de la description des connaissances.

3. Structuration des connaissances

3.1 Objectifs de la structuration des connaissances

Un premier objectif d'un système d'aide à la décision est celui de mettre à la disposition du décideur les données dont il a besoin et de les présenter d'une manière structurée. Afin de faciliter la prise de décision, les données qui existent dans l'entreprise doivent être représentées dans une manière formalisée avant de pouvoir être exploitées. Ainsi, on doit passer des concepts abstraits et des connaissances déclaratives vers des modèles structurées qui explicitent les relations existant entre ces données.

Pour mettre en œuvre une méthodologie de formalisation des données technologiques pour l'industrialisation des procédés de fabrication on doit se rapporter à des étapes basiques liées à la structuration de l'information, caractéristiques de la gestion des connaissances. Ces principales étapes sont les suivantes :

- Identifier les paramètres pertinents. Des données diverses peuvent être utilisées pour caractériser un procédé mais d'abord leurs pertinence doit être analysée.
- Spécifier le contexte. La manière dont les connaissances seront utilisées dépend du domaine de compétence des décideurs. Ainsi, il ne suffit pas uniquement de fournir

aux décideurs des informations formalisées mais on doit également associer un contexte d'utilisation à ces données. Un système d'aide à la décision fait appel, donc, à des connaissances conditionnelles et il impose un cadre d'utilisation des données pertinentes, facilitant ainsi l'identification du contexte d'utilisation du savoir-faire en concordance avec l'objectif spécifié.

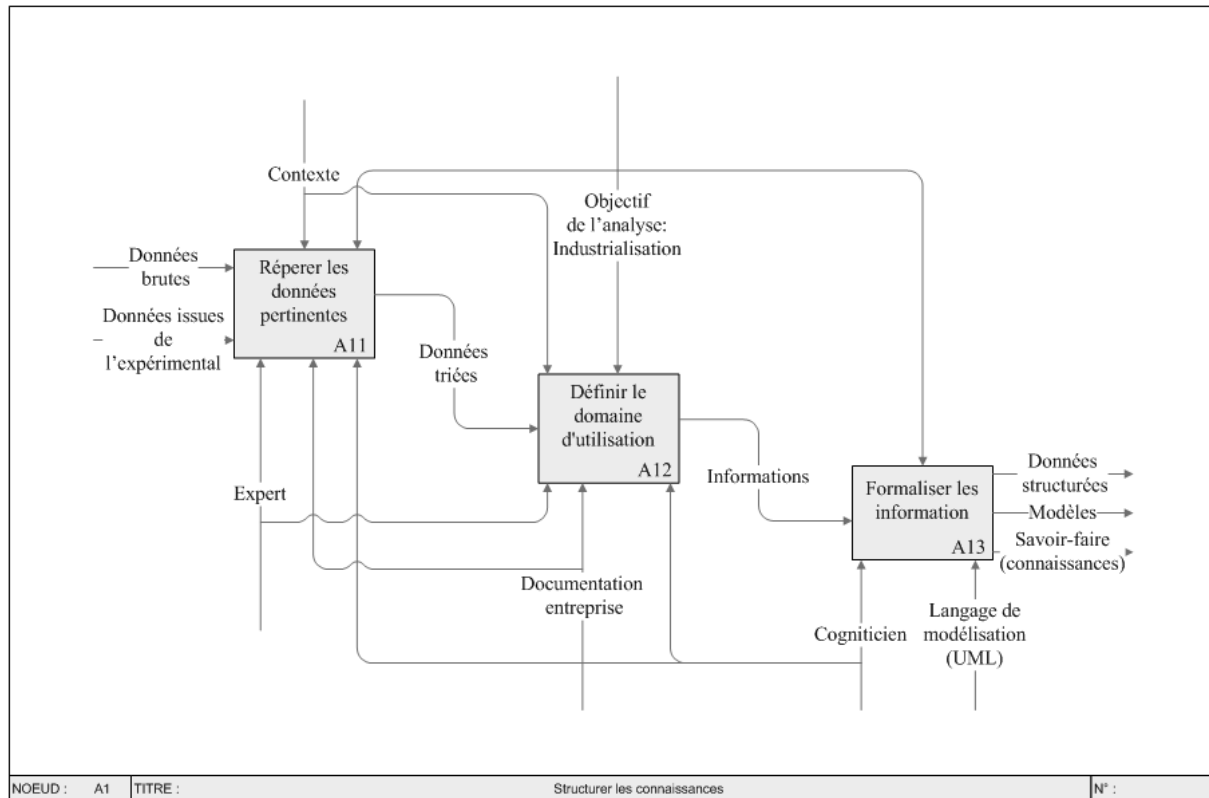


Figure 3-4 Diagramme SADT, Activité A1 : « structurer les connaissances »

- Identifier l'objectif de la modélisation. La représentation formelle des connaissances et l'analyse de leur pertinence doit se faire en accord avec l'objectif exprimé. On doit ainsi expliciter le domaine traité et le degré de précision nécessaire pour l'analyse.
- Transmettre les connaissances. Une fois les données formalisées, elles doivent être transmises à l'aide des langages unifiés pour faciliter la compréhension des modèles. Cette transmission se fera d'une manière différente en fonction des émetteurs et des récepteurs de l'information, que ce soit entre différents départements de l'entreprise ou entre les différents modules du système d'aide à la décision.

3.2 Les méthodes de modélisation des informations et des connaissances

La représentation formelle des informations doit se faire en accord avec les modes d'exploitation de celles-ci. Ainsi, différentes solution de représentation des connaissances existent selon les types de données employés.

La taxinomie, science longtemps utilisée dans la description des organismes vivants, a été employée avec succès dans le domaine de la gestion des connaissances afin de faciliter la classification des informations et leur représentation d'une manière structurée.

Selon le contexte d'utilisation des données et de leur nature on fait appel à une représentation formelle des informations en identifiant :

- Les objets conceptuels ;
- Les graphes et les procédures caractérisant les procédés.

Il existe plusieurs méthodes développées pour la modélisation des connaissances de l'entreprise. Nous faisons référence à ces méthodologies parce qu'elles introduisent un ensemble de concepts employés également par les méthodes de modélisation de type PPR. Les méthodes les plus citées dans la littérature sont expliquées brièvement comme suit :

REX (Retour d'Expérience) – méthode développée dans le cadre du projet ACCORE dans le but de fournir les outils pour la capitalisation de l'expérience acquise pendant les activités de l'entreprise afin d'éviter la perte du savoir-faire. Cette méthode se base sur des Eléments de Connaissance pour construire une mémoire d'expérience. On emploie un ensemble de procédures prévues pour la capitalisation de l'expérience, de l'analyse et de l'évolution de la mémoire créée. Selon [Tixier 2001] cette méthode a une faible capacité de formalisation. Elle se résume à « une ontologie du domaine et une simple structuration des éléments d'expérience sous forme de fiches ».

MKSM (Method for Knowledge System Management) - il s'agit d'une méthodologie conçue pour la capitalisation des connaissances d'entreprise dans une optique globale. Cette méthode est désormais connue sous le nom de MASK suite aux évolutions apportées dans le cadre des travaux de recherche de l'Université de Troyes. Les concepts qui nous attirent l'attention sont issus de la phase de modélisation de la méthode MKSM. Ainsi, nous retenons : *le système de référence, le modèle du domaine, le modèle d'activité, le modèle de concept, et le modèle de tâche*. Selon [Tixier 2001] la méthode MKSM est caractérisée par une capacité moyenne de formalisation, son principal inconvénient étant la difficulté d'opérationnalisation.

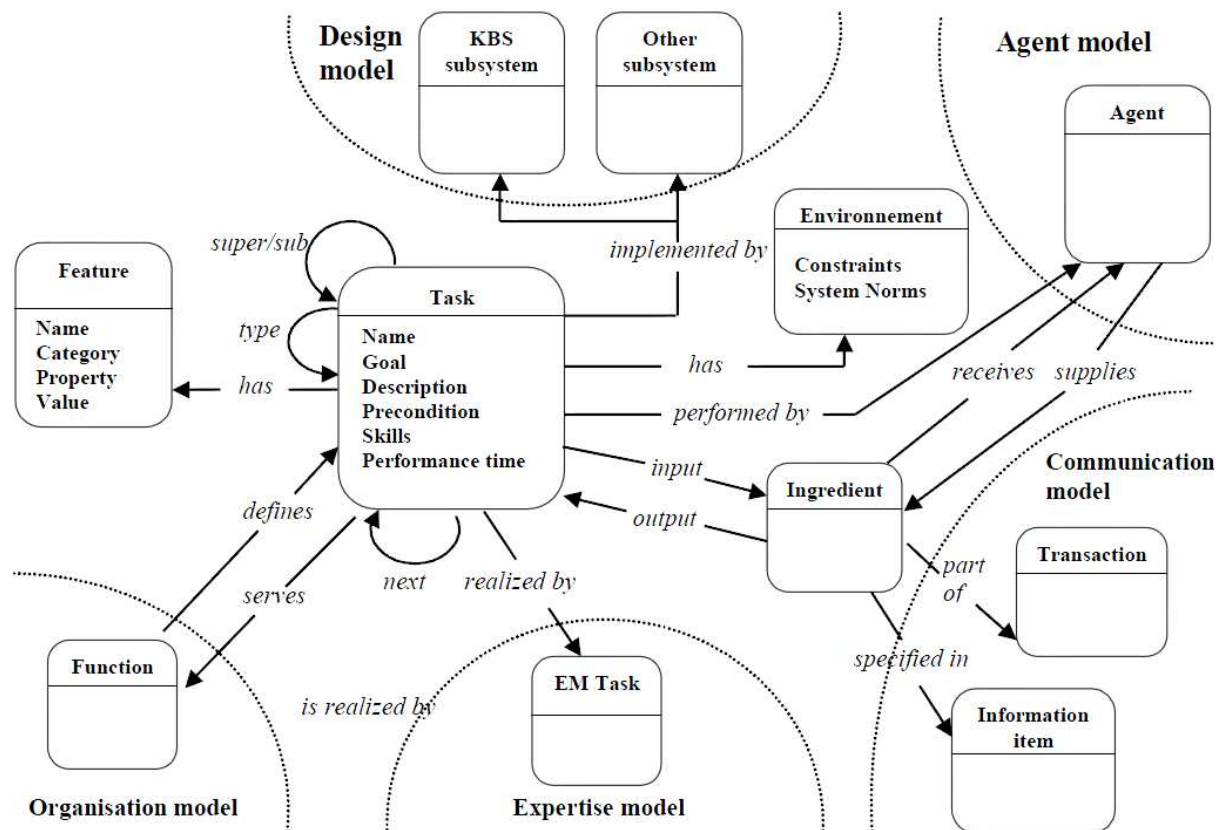


Figure 3-5 Modèle contenant les concepts spécifiques à la méthode CommonKADS

CommonKADS (Knowledge Analysis and Design Support) – cette méthode est une évolution de la méthode KADS développée dans le cadre du projet ESPRIT I dans le but d'offrir une méthodologie de capitalisation des connaissances pour la réalisation des systèmes d'aide à la décision à base de connaissances. Cette méthodologie semble proposer les concepts permettant une modélisation la plus complète de l'entreprise. Elle repose sur la modélisation de : *l'organisation, de la tâche, de l'agent, de l'expertise, de la communication et de la conception* (Figure 3-5).

3.3 Représentation formelle des objets d'entreprise

Une entreprise dispose des connaissances sur la fabrication des produits qui, comme nous l'avons déjà présenté, sont représentées de manière différente, leurs formalisation étant plus ou moins compliquée. On peut structurer ces connaissances, afin de pouvoir les exploiter par la suite, par rapport aux objets d'entreprise concernées. Généralement, ces objets font référence aux produits, aux processus et aux ressources de l'entreprise (triplyque PPR).

Différentes approches ont été proposées pour la modélisation des objets d'entreprise suivant les concepts issus du triptyque PPR. Ces approches proposent des modèles plus ou moins complets qui permettent de capturer les informations et leurs interactions liées aux produits réalisées par l'entreprise en mettant en œuvre des processus spécifiques à leur activité et en faisant appel aux différents types de ressources.

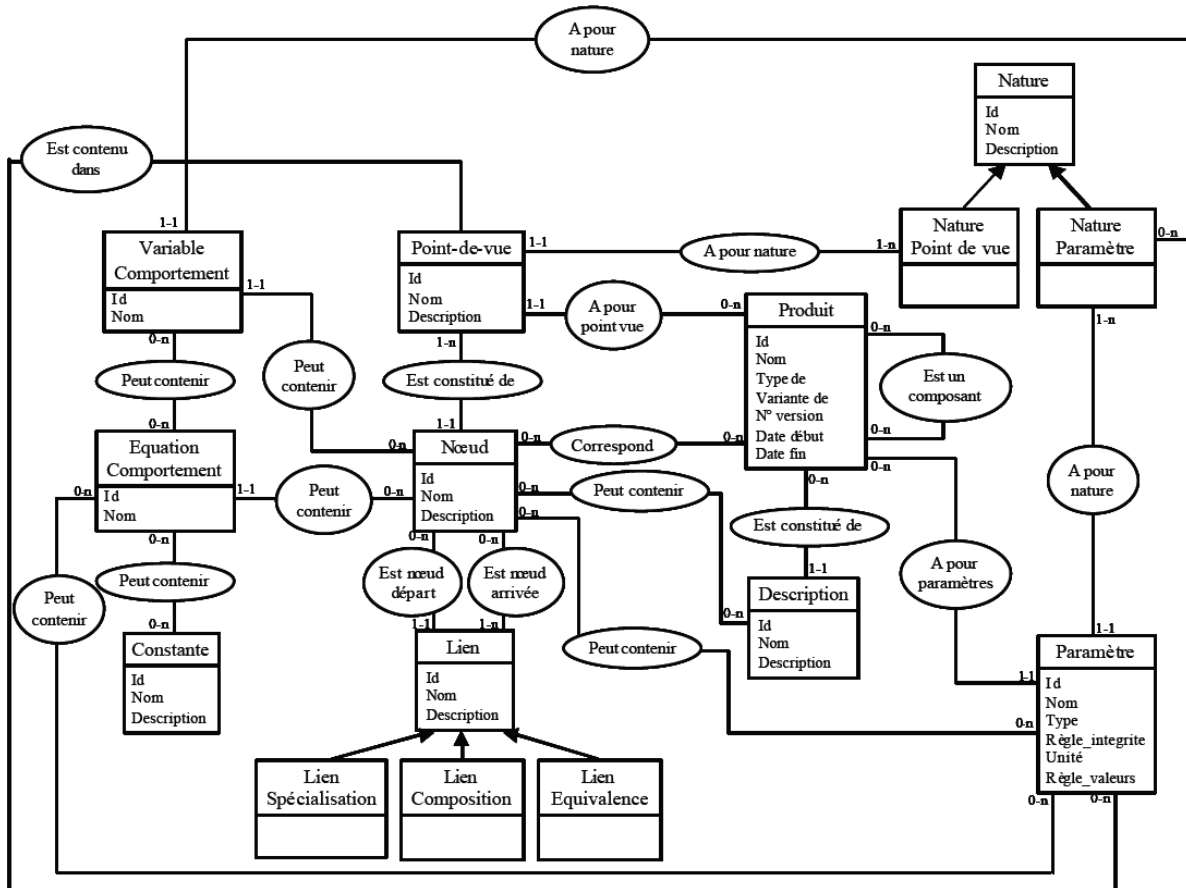


Figure 3-6 Méta-modélisation du modèle de Produit [Harani 1997]

[Harani 1997] propose un modèle générique comme support de la description formelle du produit et de son processus de fabrication. Le modèle produit fait appel à un concept de base pour la modélisation objet : les multipoints de vue qui permettent de capturer les différentes perceptions du produit par rapport aux bases des connaissances des concepteurs. On propose les trois points de vue de base : fonctionnel, relatif à l'utilité du produit, structurel, relatif aux composants du produit, comportemental, relatif aux états pris par le produit à des instants spécifiques. Dans ce travail on mentionne la possibilité d'ajouter une description plus fine du point de vue structurel par l'intermédiaire du concept de « Features » (Caractéristiques), concept qui ne sera pas intégré dans le modèle produit (Figure 3-6).

Même si dans ce travail nous nous intéressons au processus du point de vue fabrication du produit et non pas du point de vue conception comme c'est le cas de [Harani 1997], nous faisons référence au modèle de processus de conception ayant en tête l'analogie et la réutilisation de certains concepts proposés. Ainsi, les concepts introduits par le modèle de Processus de Conception (Figure 3-7) sont les suivants :

- La tâche – modélise une étape du processus de conception et elle peut être composée d'autres tâches élémentaires. Par analogie, dans le modèle du processus de fabrication une tâche peut correspondre à une activité. Les activités peuvent être divisées en activités élémentaires (opérations).

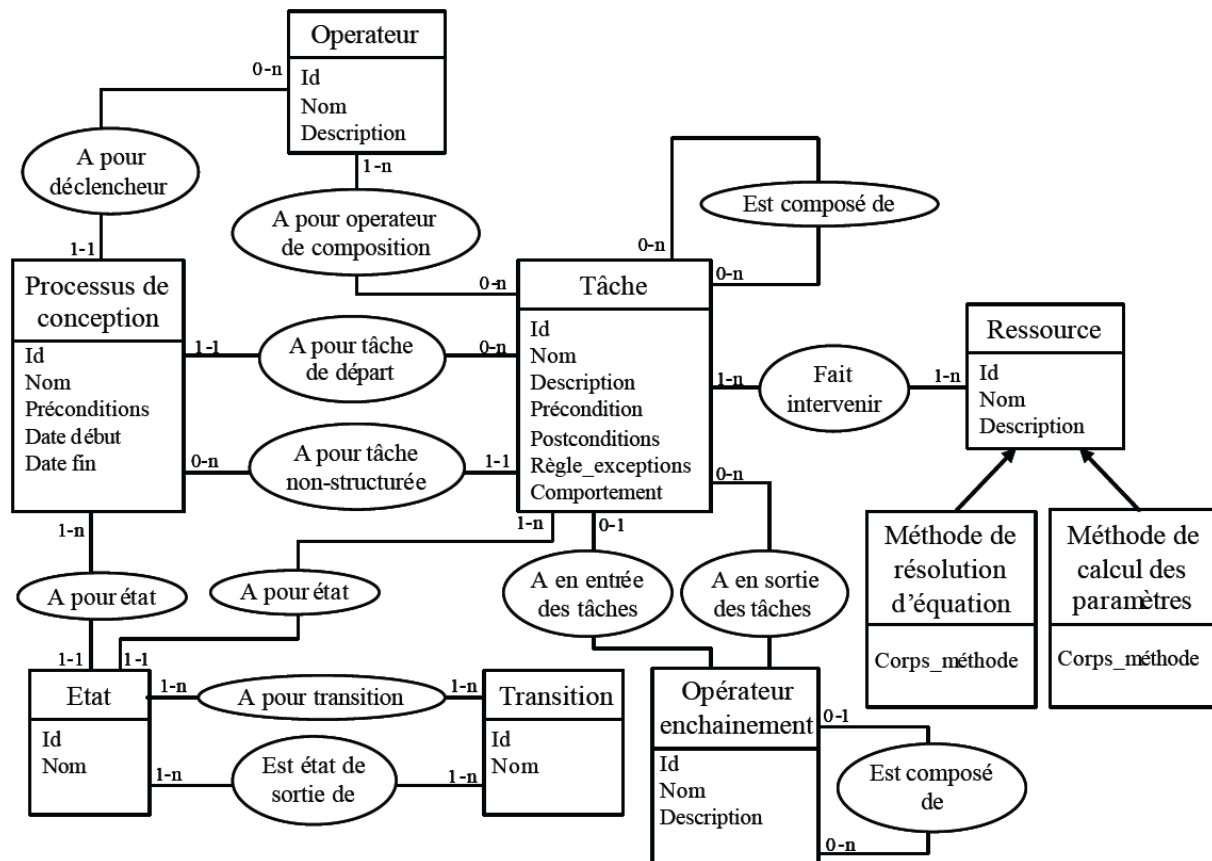


Figure 3-7 Méta-modélisation du modèle de Processus de Conception [Harani 1997]

- L'état – modélise les états principaux par lesquels le processus, les tâches et les produits passent. Il permet d'assurer la traçabilité des décisions pendant le processus de conception et l'évolution du produit. Dans le cas du modèle du processus de fabrication, cette évolution est capturée par les états intermédiaires du produit.
- La ressource – modélise les intervenants dans le processus de conception. Le processus de fabrication fait également appel à des ressources propres à l'entreprise ou externes (sous-traitance).
- L'opérateur d'enchaînement – permet de structurer les tâches dans le processus de conception. Ils sont inspirés des opérateurs IDEF3 [Mayer 1992]. Afin de réaliser les enchaînements des activités pour établir les processus de fabrication, des opérateurs spécifiques seront proposés dans ce chapitre (section 3.8).

Les relations entre les deux modèles sont établies à partir des concepts qui appartiennent aux deux modèles sous forme de liens.

D'autres approches traitant le processus de conception ont été développées. Le processus de conception innovante a été modélisé dans la perspective de développement d'environnements collaboratifs. C'est l'objet du modèle PPO (Produit-Processus-Organisation) [Girard 2005] issu des travaux du projet IPPOP (Intégration Produit Processus Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie). La modélisation du processus de conception fait appel à des concepts de base énoncés comme suit [Roucoules 2007] :

- Le produit – structure les informations du produit et de son cycle de vie global ;
- L'activité – intègre l'enchaînement logique des tâches ;

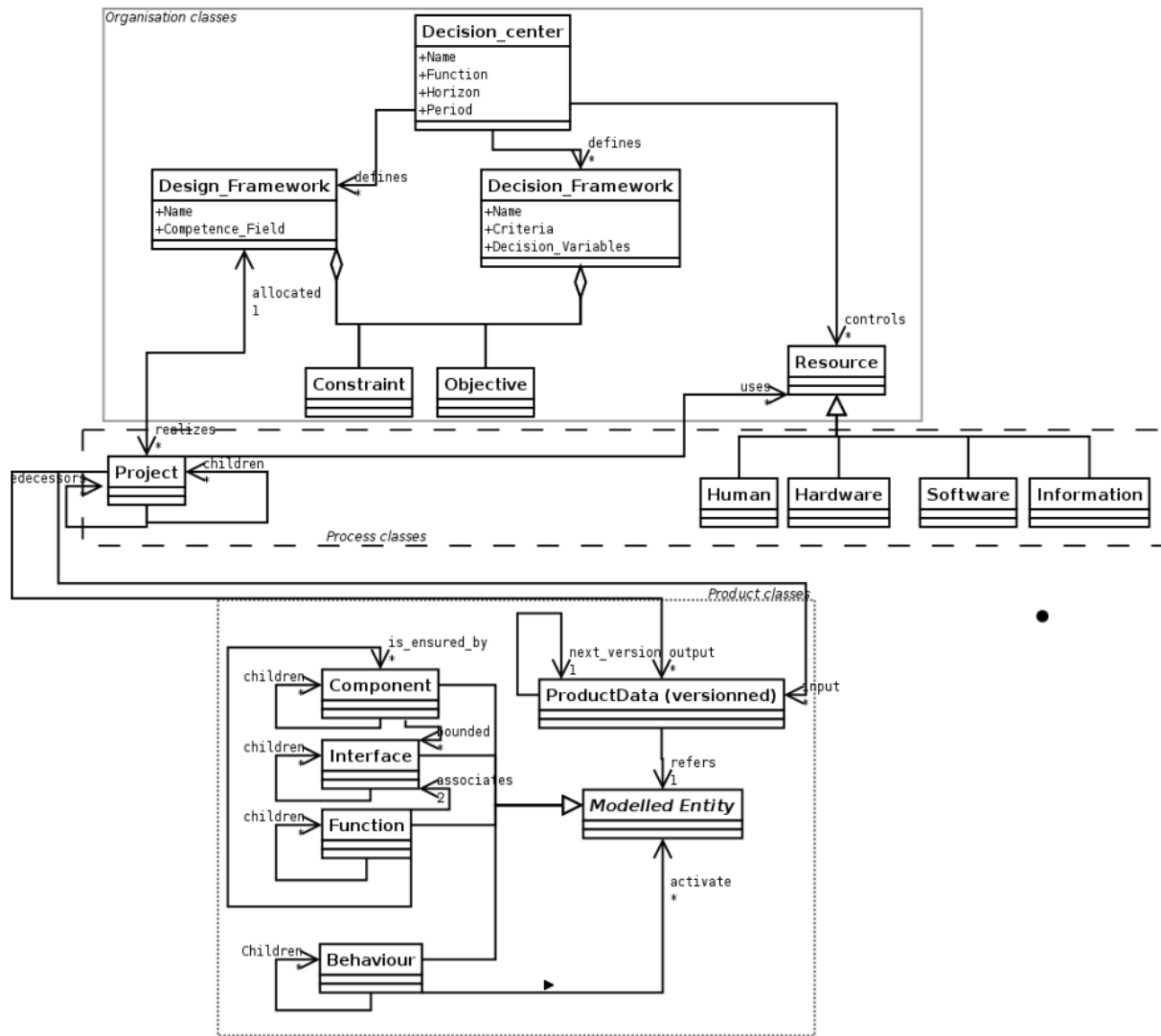


Figure 3-8 Diagramme UML pour le modèle PPO [Noël 2008]

- La ressource – symbolise le modèle d'organisation de l'entreprise. Son objectif est de faire le passage d'une structure statique vers une dynamique prévue pour l'affectation dynamique des ressources selon le pilotage de l'organisation et les indicateurs de performance.

Le modèle PPO (Figure 3-8) est structuré autour des classes qui spécifient la fonction, le comportement et les constituants du produit. Une liaison est identifiée entre le produit et le projet lui étant attribué afin d'identifier les ressources décisionnelles de la phase de conception innovante.

Un autre modèle proposée pour la modélisation des objets d'entreprise est le modèle FBS-PPRE [Labrousse 2004]. On s'intéresse ici aux vues classiques Produit, Processus et Ressource auxquelles on ajoute une quatrième : la vue Effet externe. Ce modèle (Figure 3-9) fait référence aux concepts de fonction et de structure de l'objet modélisé. Ils sont plus détaillés et englobent le concept de « Feature » qui n'était pas pris en compte dans le modèle de Harani. Le comportement modélise les états des objets d'entreprise. Il introduit ainsi une notion de temporalité par l'intermédiaire de la classe *Entrée/Sortie* qui peut faire état de processus.

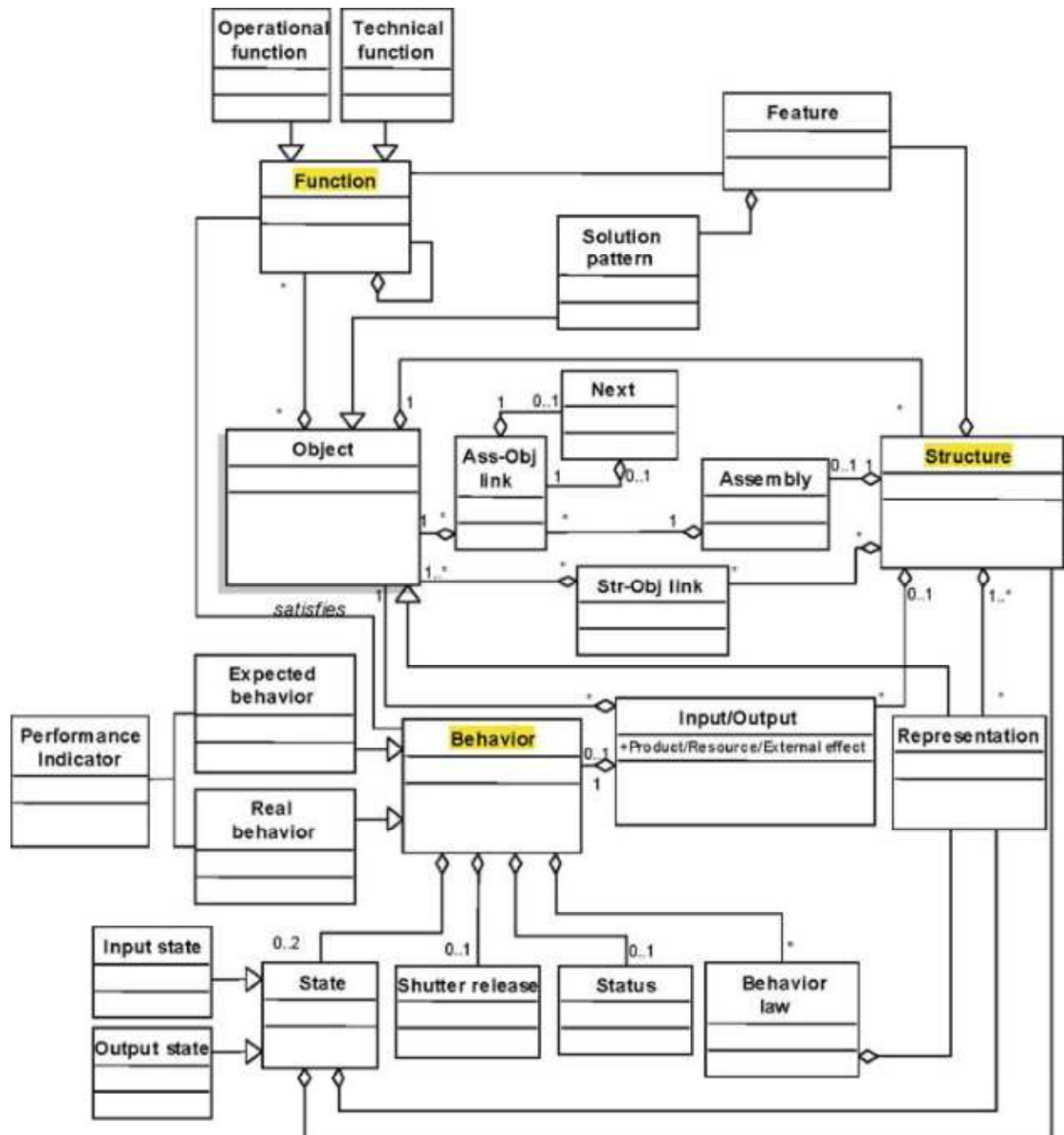


Figure 3-9 Diagramme de classes UML du modèle FBS-PPRE [Labrousse 2008]

Deux notions nouvelles sont introduites : le comportement attendu et le comportement réalisé afin de pouvoir évaluer la performance du processus par l'intermédiaire des indicateurs de performance. Etant un modèle générique, la classe objet sert d'instance pour le produit (l'objet est le résultat du processus), pour la ressource (l'objet est un intervenant au processus) et pour l'effet externe (l'objet est une contrainte pour le processus).

Des concepts supplémentaires sont ajoutés au modèle FBS-PPRE afin de modéliser encore plus loin les objets d'entreprise (Figure 3-10). Les objets peuvent être décomposés afin d'avoir un détail de leur structure par l'intermédiaire des liens de décomposition. Les objets temporels sont enchainés par l'intermédiaire des opérateurs d'assemblage et de séquençement.

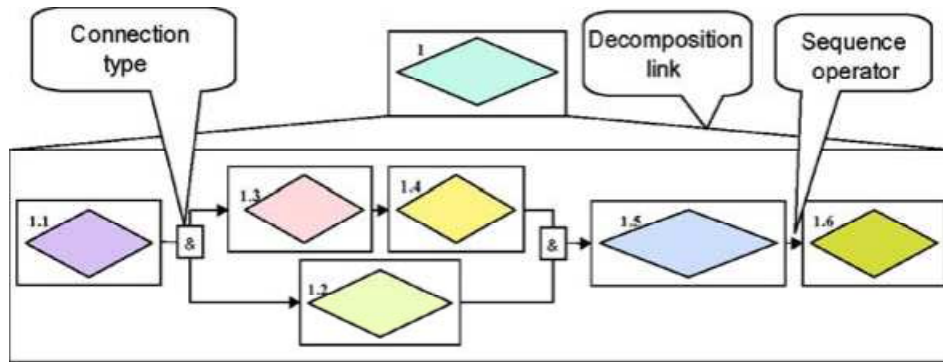


Figure 3-10 Représentation des liens entre les objets temporels [Labrousse 2008]

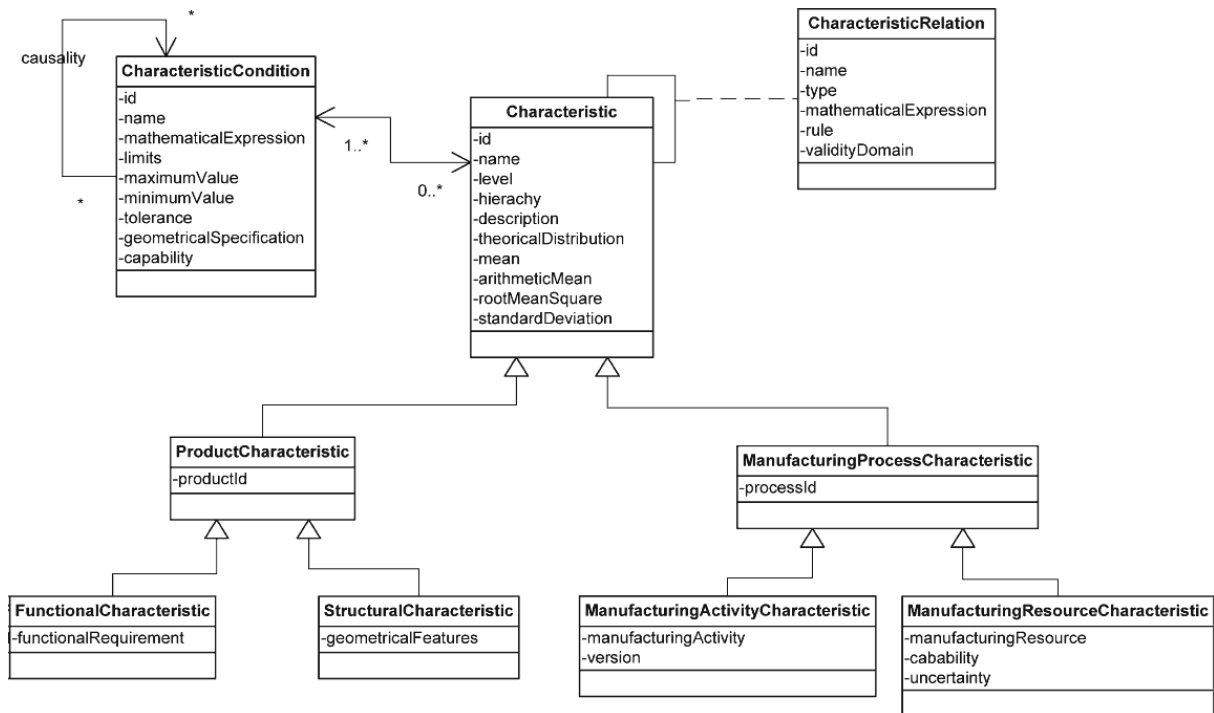


Figure 3-11 Taxinomie des Caractéristiques Clés [Dantan 2006]

On a vu une première approche pour l'évaluation de la performance des processus par l'intermédiaire des indicateurs de performance dans le cas du modèle FBS-PPRE liés au comportement des objets d'entreprise. D'autres concepts ont été employés pour évaluer les valeurs de certains paramètres des produits et des processus de fabrication. Il s'agit notamment du concept de Caractéristique Clé dans lequel on considère la variation par rapport à la valeur nominale des paramètres spécifiques au triptyque PPR. [Thornton 1999] propose la définition suivante des Caractéristiques Clés : « *the product, subassembly, part, and process features that significantly impact the final cost, performance, or safety of a product when the KC vary from the nominal. Special control should be applied to those KCs where the cost of variation justifies the cost of control* ». Selon [Dantan 2006] les Caractéristiques Clés sont spécifiques aux produits (vue structurelle et vue fonctionnelle) et aux processus (vue activité et vue ressource) (Figure 3-11).

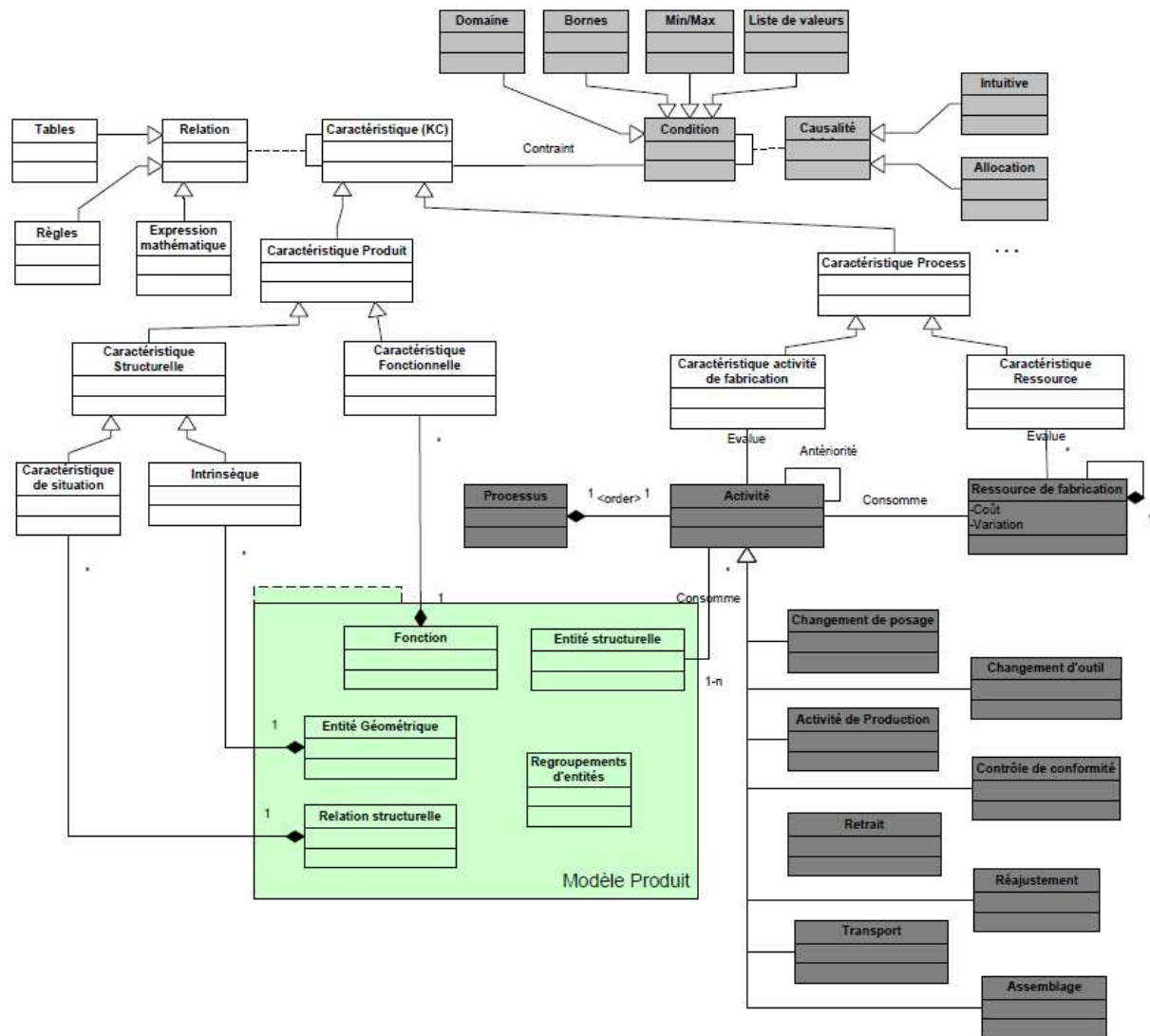


Figure 3-12 Modèle UML pour le Caractéristiques clés enrichi des objets issus du modèle PPR [Etienne 2007]

[Etienne 2007] intègre le modèle des Caractéristiques Clés aux certains objets propres à la modélisation PPR afin de proposer un modèle pour l'intégration des connaissances dans le domaine de l'usinage et de l'optimisation de l'allocation des tolérances obtenues suite à l'emploi des processus de fabrication de ce domaine (Figure 3-12).

3.4 Bilan sur les modèles existants

Dans la section précédente nous avons passé en revue une liste non-exhaustive de modèles proposés dans la littérature pour la formalisation des connaissances liées aux produits, aux processus et aux ressources. Les modèles présentés offrent des démarches plus ou moins intégrées et qui gravitent autour du triptyque PPR pour la modélisation des objets d'entreprise dans le but d'aider les concepteurs à structurer et exploiter les données spécifiques au contexte traité. Globalement, ces modèles capturent les concepts liés aux :

- Points de vue du produit : aspect structurel, physique, de représentation et fonctionnel ;

- Gestion de la temporalité : états du produit ou du processus, opérateurs d'enchaînement ;
- Ressources utilisées : intervenants dans les différents processus ;
- Liens entre les méta-modèles : relations entre les objets contenus par les méta-modèles du produit, du processus et de la ressource ;
- Exploitation éventuelle des données : introduction des indicateurs de performance et des paramètres spécifiques.

Dans l'étude réalisée, [Labrousse 2004] conclue sur le fait que les modèles existants manquent d'universalité mais ils se comportent très bien dans les domaines pour lesquels ils ont été développés. Dans le même esprit, nous voulons rappeler l'objectif de notre étude qui est celui de définir les modèles PPR support pour la capitalisation des connaissances d'un champ d'application précis : la fabrication des produits composites réalisés par deux procédés de fabrication distincts : le moulage des préimprégnés et l'infusion de résine liquide. Ainsi, les modèles qui seront proposés par la suite n'ont pas l'objectif d'être génériques, mais, au contraire, de répondre à des besoins spécifiques soulevés dans le cadre du projet CAPSAIRTM donc de présenter les points importants plus en détail. Les modèles que nous proposons sont développés dans l'esprit des modèles PPR. Le domaine de fabrication des composites ne dispose pas de modèles spécifiques, nous nous proposons d'enrichir les modèles classiques PPR par des objets spécifiques.

Afin de proposer une analyse pertinente, il est nécessaire que le produit soit suffisamment décrit. En informatique on parle de granularité pour définir la taille minimale pouvant être manipulé par un système et qui permet de mesurer l'efficacité et la performance d'un programme. Par analogie, on peut dire qu'il est nécessaire de définir une granularité pour le modèle des objets d'entreprise pour assurer la pertinence de la description. On a vu que les modèles présentées faisaient appel aux concepts de structure du produit et de *Caractéristique*. Bien que les deux modèles présentés mentionnent le concept de Caractéristique, nous allons introduire le concept de Caractéristique Technologique afin de détailler la structure du produit. Par l'intermédiaire de cette structuration on intègre également les inducteurs de coût et des informations logistiques.

Un autre point délicat de la modélisation des objets d'entreprise caractérise le méta-modèle du processus. Vu que les modèles proposés serviront de base pour une exploitation automatique des données capitalisées, la réalisation des modèles du processus doit être attentivement analysée afin de disposer d'un niveau de détail permettant une génération aisée et pertinente des processus de fabrication. [Thibault 2008] montre l'importance du type de formalisation choisi dans la génération ultérieure du processus de fabrication. Il montre les difficultés qui peuvent apparaître lors d'une formalisation de type technologie de groupe à cause de la prise en compte difficile des relations entre les caractéristiques du produit et du processus de fabrication associé. Ainsi, la cohérence des processus obtenus est mise en cause, plusieurs processus pourront être attribués à une même famille sans pour autant être pertinents pour cela. La prolifération des familles de pièces est un deuxième désavantage qui peut amener à alourdir la tâche de définition de la totalité des familles de pièces. La complétude de la base de données ne sera pas assurée.

On propose dans ce travail [Thibault 2008] un compromis inspiré de la technologie de groupe associé à une base de règles. En gros, dans cette approche les pièces sont classées selon la similitude de leurs processus de fabrication. La prolifération des familles de pièces est réduite dans ce cas grâce au regroupement des processus de fabrication dans un seul s'ils présentent peu de différences.

Afin de faciliter la définition du processus de fabrication et éviter une partie des inconvénients relevées dans l'étude précédente nous allons décrire dans les sections suivantes des nouveaux concepts basés sur de Processus intermédiaires types en relation avec les Caractéristiques technologiques développées. Les modèles proposés sont prévus pour faciliter le déploiement des systèmes d'informations relatifs au triptyque PPR en vue de les exploiter suivant une approche de type Activity Based Costing (ABC).

3.5 Le modèle PPR de référence

Nous allons introduire dans cette section le modèle PPR (**Figure 3-13**) qui sert de base pour notre travail et qui sera explicité par la suite. Le cadre d'étude est également rappelé par rapport à la nécessité et l'utilité des modèles à développer. Le modèle PPR de référence présente les principaux objets modélisés dans cette étude (produit, processus, ressource) et le moyen de représentation des relations par l'intermédiaire du concept de Carte de Visite expliqué dans la section 4.2.

Les hypothèses qui guident notre démarche de modélisation sont expliquées dans le paragraphe qui suit. Elles sont dictées par le champ d'application du futur système d'aide à la décision basé sur ces modèles. Le contexte est celui de l'industrialisation des produits et au niveau du cycle de vie du produit on se situe à l'étape de définition des processus de fabrication. On suppose que la définition géométrique et structurelle du produit a été réalisée, il reste à faire le choix entre plusieurs solutions d'industrialisation disponibles (gamme de fabrication et ressources). Les hypothèses sont les suivantes :

- *Point de vue* : le produit est décrit du point de vue structurel. Vu que la définition de la géométrie et de la structure du produit a été réalisée selon les contraintes fonctionnelles, il nous reste à proposer les objets nécessaires pour la formalisation des connaissances liées à la structure du produit afin de préparer la définition du processus de fabrication. Nous allons introduire le concept de Caractéristique Technologique afin de pouvoir assurer le niveau de détail de la structure du produit requis par notre démarche d'industrialisation (section 3.6).
- *Gestion de la temporalité* : les modèles développés sont conformes à notre approche par activité en vue d'évaluer localement la performance des processus selon la méthode ABC. On retrouve le concept d'état intermédiaire qui permet de modéliser l'enchaînement des étapes du processus (section 3.6). Des opérateurs seront introduits pour faciliter la mise en œuvre de l'enchaînement des activités et des processus type (section 3.8).
- *Liens entre les méta-modèles* : les relations entre les objets modélisés et leurs paramètres sont matérialisées grâce au concept de Carte de Visite.

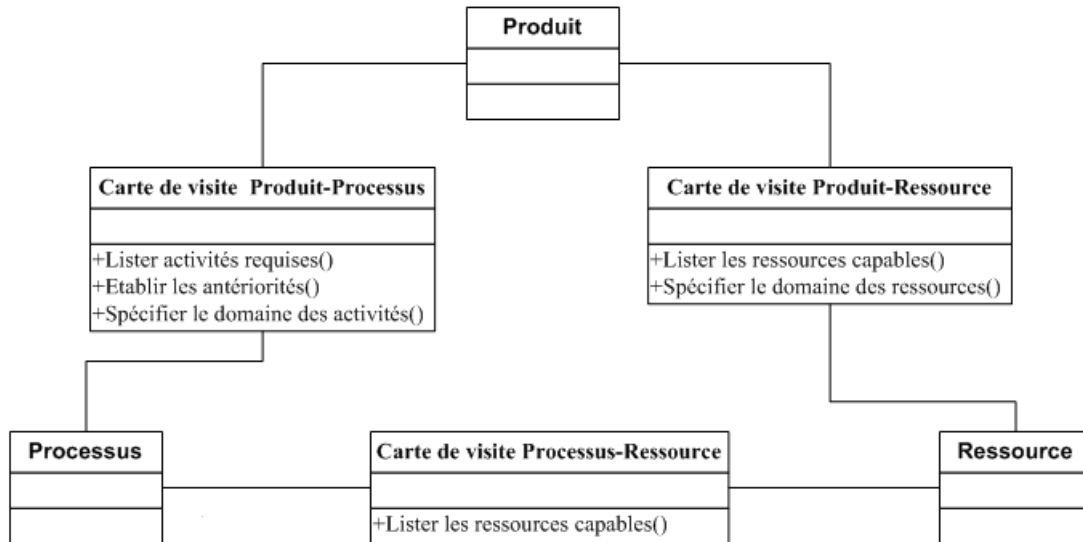


Figure 3-13 Modèle PPR de référence

- *Exploitation des modèles* : Ces modèles sont développés en vue d'une exploitation qui implique une génération des processus de fabrication et analyse multicritère de la performance selon des indicateurs et des critères spécifiques à notre cadre d'étude.

3.6 Le modèle Produit

Le modèle Produit a comme objectif la structuration des informations relatives aux produits à fabriquer. Cette structuration doit permettre la description détaillée du produit selon :

- un ensemble d'*objets* modélisés qui permettront de définir plusieurs niveaux de détail ;
- *les attributs* spécifiques à chaque objet identifiés selon les consignes des experts connaissant le contexte de l'entreprise.

La **Figure 3-14** montre le modèle du produit proposé. Il contient des objets modélisant deux concepts prévus à définir le détail de la structure du produit. Il s'agit des concepts de **Caractéristique Technologique (CT)** et d'**Etat intermédiaire (EI)**.

On définit une **Caractéristique Technologique** comme étant *l'association d'un composant structurel de base du produit, issue d'une fonction attendue du produit et spécifiée par le Cahier des Charges Fonctionnel, associée à un couple ressource-processus type. Une caractéristique technologique ne peut plus être divisée en d'autres entités technologiques sans compromettre la faisabilité de la fabrication et la structure du produit. L'hypothèse que les CT sont indépendantes du point de vue structurel est faite.*

On retrouve dans la littérature des mentions à des décompositions des produits composites dans des composants de base. Néanmoins, les objectif de ces études ne portent pas sur la structuration de cette décomposition, il s'agit plutôt de l'utilisation isolée de certains types de composants pour des applications spécifiques. C'est le cas de [Kassapoglou 1997] qui propose une étude d'optimisation du coût et du poids des produits en matériaux composites pour lesquels la tenue mécanique est améliorée à l'aide de raidisseurs. Cette étude porte sur l'analyse de 7 types de raidisseurs (**Figure 3-15**) communément utilisés dans la conception de structures.

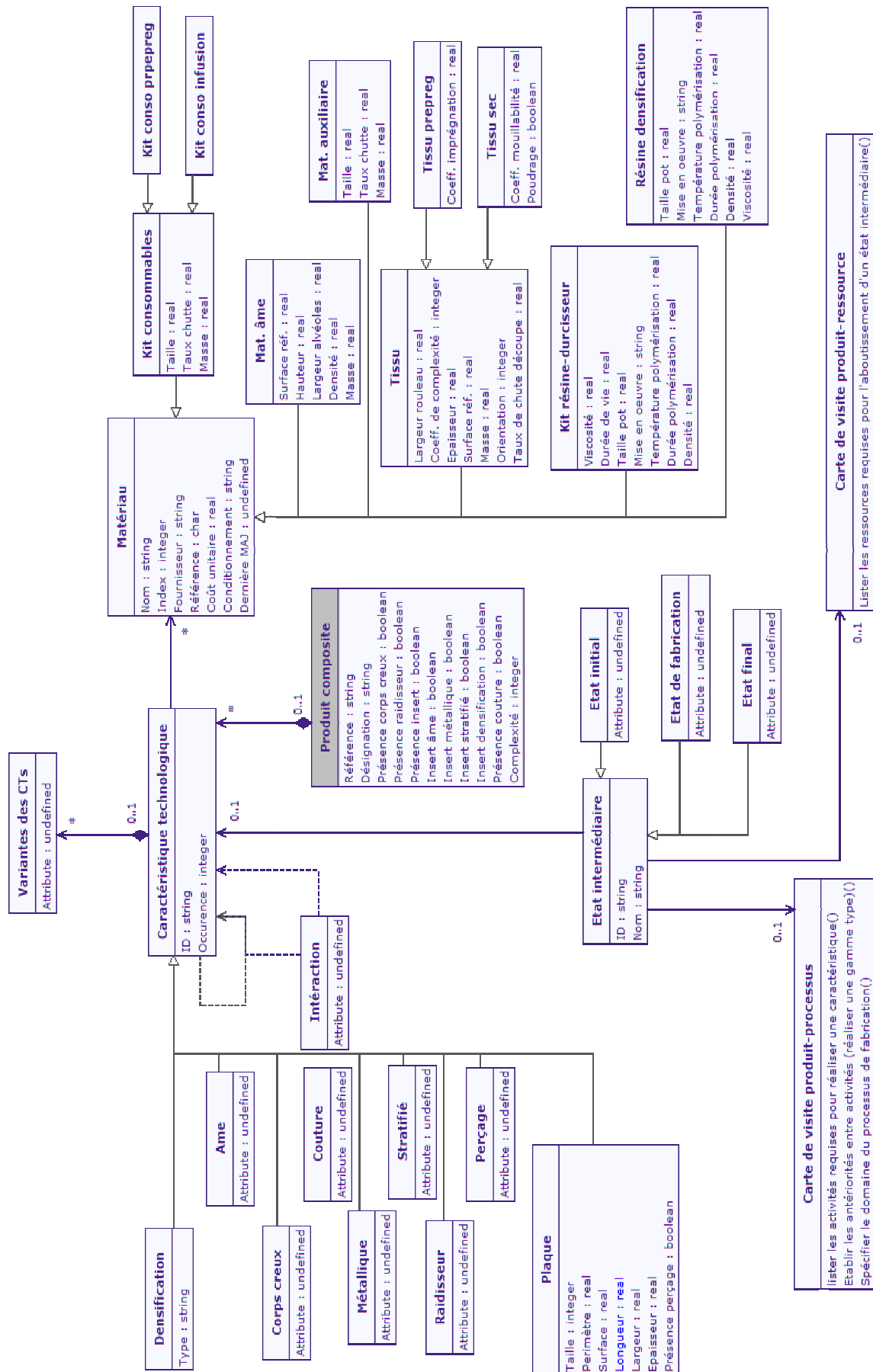


Figure 3-14 Diagramme de classes UML pour la vue Produit

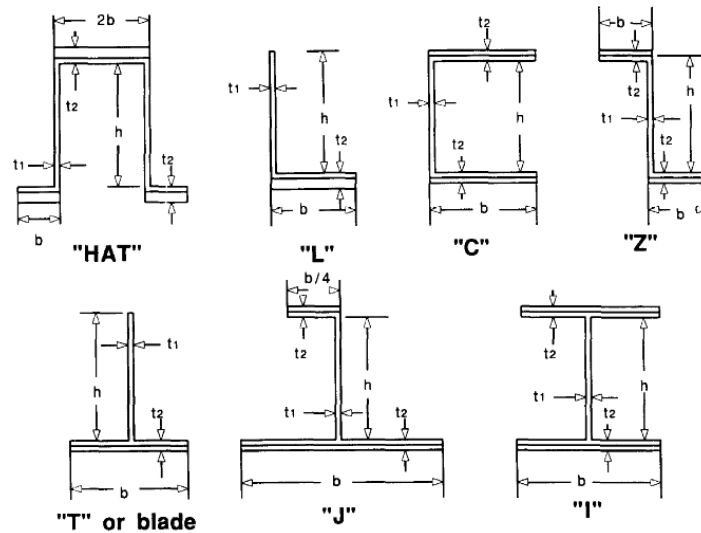


Figure 3-15 Types de raidisseurs qui servent à améliorer la rigidité d'une structure composite [Kassapoglou 1997]

L'ensemble de CTs identifiées dans le cadre du projet CAPSAIRTM ont été intégrées dans le modèle du produit et elles sont explicitées comme suit :

- **la plaque** – il s'agit d'une pièce élémentaire qui comporte uniquement des plis de tissus dans sa structure. C'est la seule CT qui peut prendre la forme d'une pièce réelle et qui peut être utilisée dans l'état, donc considérée comme produit. Dans la pratique ce genre de produit est rarement employé dans l'état mais plutôt dans un ensemble réalisé par l'association de plusieurs CTs.
- **le stratifié** – il s'agit des éléments ajoutés aux pièces afin de constituer des zones de renfort dans les parties nécessitant une résistance mécanique plus importante. Les zones stratifiées sont constituées d'un empilement d'un faible nombre de plis. Cette CT est dénommée « Stratifié » dans les modèles UML.
- **le raidisseur** – il s'agit d'éléments ayant la fonction d'apporter plus de rigidité au produit.
- **l'âme** – il s'agit des composants utilisés dans le but de réaliser de zones sandwich, en nid d'abeille généralement, qui ont l'avantage d'assurer une bonne résistance à la flexion pour un poids assez faible.
- **la densification** – il s'agit du remplissage des cellules du nid d'abeille avec une résine de densification afin de créer une partie solide prête à accueillir des inserts ou des trous réalisés en fin de fabrication.
- **l'insert métallique** – il s'agit généralement d'inserts métalliques intégrés dans la pièce lors de sa fabrication ajoutant au produit diverses fonctions (vis, trous taraudés, etc.). dans le diagramme de classes cet objet est représenté par la classe « Métallique ».
- **le corps creux** – il s'agit d'un objet permettant de modéliser les parties creuses d'un produit. Ces parties peuvent être fermées ou ouvertes.
- **le perçage** – il s'agit d'une caractéristique retrouvée dans la plupart des produits composites réalisée en fin de fabrication sur la pièce solidifiée afin de prévoir des fentes qui pourront accueillir des fixations (CT également appelée « Perçage » dans les modèles de classes).

- **la couture** – il s'agit d'une caractéristique qui permet soit de faciliter la manipulation de la préforme, donc de solidariser plusieurs CTs entre elles, ou d'augmenter localement les propriétés mécaniques en services des unions de différentes CTs (plaque et raidisseur par exemple).
- **la gouttière** – il s'agit d'une singularité qui, sur les pièces des aéronefs, ont la fonction de servir de support pour un joint d'étanchéité. Ces composants peuvent être intégrés dans la fabrication de la pièce soit en assemblage à partir de pièces métalliques ou composites ou bien lors de la réalisation de la préforme de la pièce dans le cas du procédé d'infusion de résine.

L'intérêt de développer ces Caractéristiques Technologiques réside dans le fait que selon le processus type de fabrication employé, la gamme de fabrication du produit sera complètement différente. Ainsi, des processus intermédiaires différents seront associés à la même CT afin de définir le processus final de fabrication. Cela nous permet d'évaluer localement la performance industrielle selon les critères imposés. Prenons l'exemple d'un panneau composite disposant entre autres d'une CT de type gouttière. Cette partie du produit sert à loger un joint d'étanchéité. La gouttière peut être réalisée en même temps que la pièce par infusion de résine liquide. Par contre, dans le cas du processus de moulage des préimprégnés, fabriquer la gouttière ne permet pas d'obtenir un produit répondant au cahier des charges. Cette partie du produit sera réalisé par l'assemblage du produit avec une pièce métallique rapporté. Dans cet exemple les gammes de fabrication comportent une différence importante qui va jouer sur la performance des processus définis.

On reprend la liste des CTs en annexe (Annexe 1) afin d'explicitier cette structuration par les modèles géométriques correspondant à chaque CT ainsi que les paramètres clés les caractérisant.

Un produit est réalisé par « l'assemblage » de plusieurs caractéristiques technologiques en vue de répondre aux spécifications du cahier des charges. Pour plus de détail, l'objet *Variantes des CTs* est ajouté au modèle. Il s'agit dans ce cas de décliner une CT en plusieurs variantes du point de vue géométrique. Ainsi, une CT de type plaque peut se retrouver sous forme de plaque plane, galbée ou d'une pièce cylindrique selon la complexité géométrique du produit.

Pour faciliter la génération des processus de fabrication des produits analysés nous allons utiliser le concept de *processus de fabrication intermédiaires* qui représentent un enchainement d'activités nécessaires pour la réalisation des CTs. L'union de ces processus intermédiaires permet de définir le processus de fabrication du produit. Afin de définir ces processus intermédiaires les CTs sont décrites à l'aide des états intermédiaires. Les états intermédiaires modélisent les différentes phases prises par une CT pendant le déploiement du processus intermédiaire. Nous avons identifié trois EI nécessaires à la modélisation de l'évolution d'une CT :

- état initial – il permet de modéliser le lancement d'un processus intermédiaire. C'est la condition nécessaire pour le déploiement du processus intermédiaire.
- état de fabrication – il permet de modéliser la transformation d'un état d'une CT en faisant appel à une activité et à un ensemble de ressources.

- état final – il permet de modéliser l'aboutissement de la fabrication d'une CT donnée. C'est la condition d'arrêt du déploiement du processus intermédiaire.

Une autre hypothèse faite dans le cadre de cette modélisation consiste à supposer que la Caractéristique Technologique *Plaque* tient place de *Pièce* à fabriquer. Cela signifie que la Plaque sert de support physique aux autres CTs. On suppose qu'une fois une CT associée à la plaque, elle constitue une caractéristique unitaire. Cela nous évite d'ajouter un CT de type pièce qui ne serait pas cohérent avec le niveau de modélisation choisi pour les CTs identifiées. Le processus intermédiaire de la plaque représente également l'enchaînement des activités de le début de fabrication de la plaque jusqu'à l'activité finale, celle correspondante à l'aboutissement du produit.

On associe également une classe *Matériau* à une CT. Cela permet de structurer les données liées à la matière première à employer et les paramètres de base utilisés dans l'algorithme d'évaluation.

Les relations entre le modèle du Produit et les modèles du Processus et de la Ressource sont modélisées par l'intermédiaire des objets Cartes de Visite. La CV Produit-Processus permet d'établir une liaison entre l'état intermédiaire et l'activité composant le processus intermédiaire. Cette CV permet également de spécifier le domaine du processus de fabrication (on connaît ainsi s'il s'agit d'une activité appartenant au processus de moulage des préimprégnés ou au processus d'infusion de résine liquide). On établit également les antériorités entre les états intermédiaires, on ajoute donc la notion de temporalité. La CV Produit-Ressource permet de modéliser la relation entre l'EI et la ressource. On liste ainsi les ressources capables de réaliser l'état concerné.

3.7 Le modèle Ressource

L'objectif du modèle Ressource est de structurer les informations relatives aux intervenants dans les processus de fabrication. Les activités font appel à un ensemble de ressources comme support de la transformation de la matière et de l'achèvement des états intermédiaires des CTs. Le modèle Ressource est représenté dans la **Figure 3-16**.

On associe un point de vue à la classe ressources afin de modéliser les deux manières de classification de ressources employées dans ce travail. Il s'agit du :

- point de vue *intervenant* – selon ce point de vue on retrouve une classification classique des supports des activités de l'entreprise : les ressources humaines qui apportent leurs compétences au système de production, les machines utilisés par les activités de transformation de la matière première et les ressources auxiliaires qui servent d'aide au déploiement des autres ressources.
- point de vue *entreprise* – il est courant qu'une entreprise de fabrication de produits composites soustraie une partie des activités de fabrication due à la complexité et au grand nombre des tâches. Quand l'entreprise ne dispose pas des compétences spécifiques à une activité du processus de fabrication celle-ci est externalisée. Ce point de vue nous permettra de modéliser cette situation et d'analyser la rentabilité de l'accomplissement d'une activité en interne ou suite à une sous-traitance.

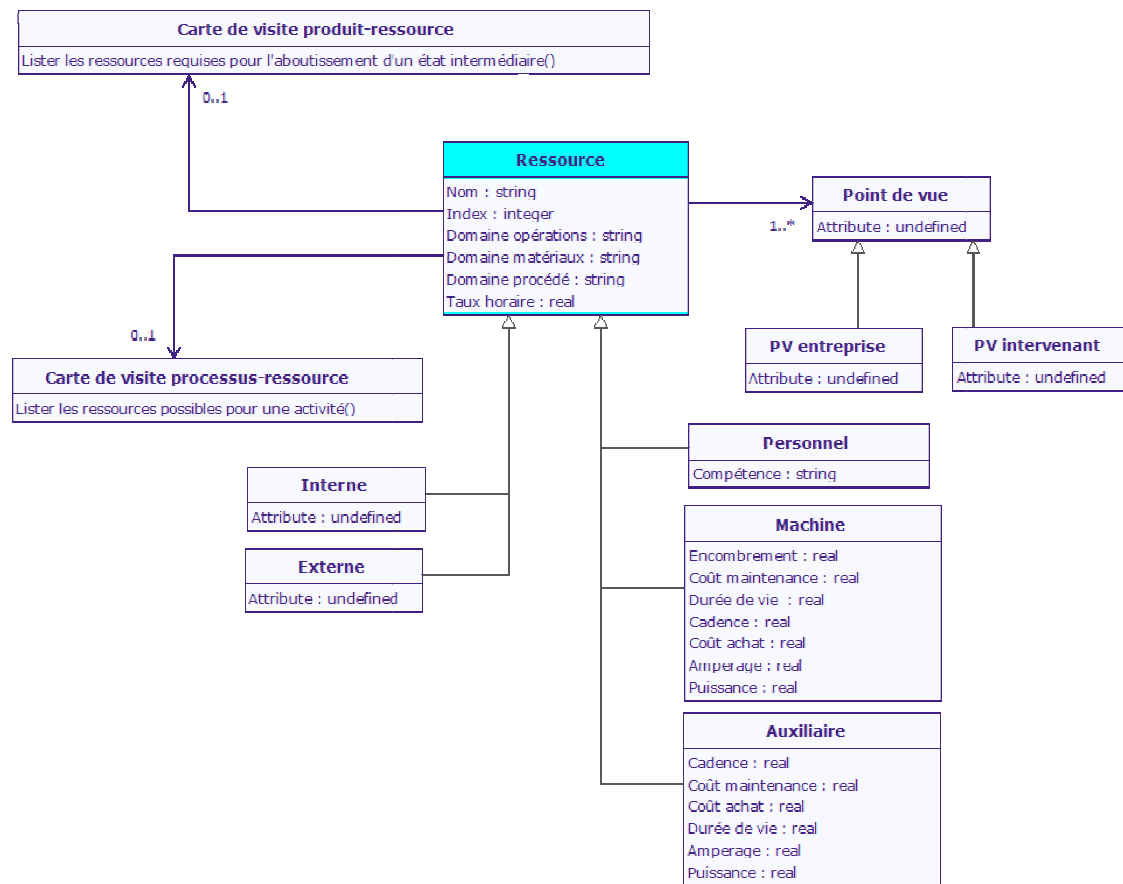


Figure 3-16 Diagramme de classes UML pour la vue Ressource

Dans le cas de ce modèle nous employons également les cartes de visite afin de modéliser les relations entre les objets du modèle Ressource et les modèles Produit et Processus. La CV Processus-Ressource permet de lier l'objet *Ressource* à l'objet *Activité* du modèle du Processus. On liste ainsi les ressources capables de répondre à l'appel d'une activité. La CV Produit-Ressource a été décrite dans la section précédente.

3.8 Le modèle Processus

Le modèle du Processus permet de structurer les informations requises par la phase de définition des processus de fabrication correspondant aux produits analysés. Rappelons les hypothèses et les contraintes qui ont guidé le développement des modèles permettant la formalisation des connaissances relatives au processus de fabrication :

- Les processus type permettent de définir le domaine de travail. Il s'agit des processus faisant appel au procédés de moulage des préimprégnés et d'infusion de résine liquide. Ainsi le regroupement se fait selon le domaine précisé afin d'éviter l'enchaînement des activités incompatibles.
- Les processus seront définis par un enchaînement linéaire d'activités déterminés par les contraintes de précédence entre les états intermédiaires des CTs. Une notion d'exécution des tâches en parallèle est intégrée grâce à des opérateurs d'enchaînement. Le travail en parallèle a comme objectif de modéliser le travail des activités sur plusieurs CTs en même temps et non pas de servir de support pour la planification.

- Deux points de vue des processus sont à définir : statique et dynamique. Le point de vue statique permet de structurer les informations requises pour la définition des processus. Le point de vue dynamique a comme objectif d'introduire la notion de temporalité au niveau des Processus intermédiaires.

La **Figure 3-17** présente la vue statique qui modélise le processus de fabrication. Selon ce diagramme de classe, le processus de fabrication est composé des processus intermédiaires de fabrication correspondant à la fabrication des CTs. A leur tour, les processus intermédiaires sont composés d'activités qui représentent les tâches élémentaires du processus de fabrication. Nous faisons la distinction entre les activités contribuant à la transformation directe de la matière et celle qui servent de support à la validation de l'aboutissement des états intermédiaires. On distingue ainsi les activités :

- directes – ces activités correspondent aux opérations de transformation de la matière. Chaque activité fait appel à un procédé de fabrication.
- indirectes – ces activités correspondent aux actions support des activités directes qui permettent de valider les états intermédiaires. Il ne s'agit pas d'une distinction en fonction de la valeur ajoutée. Certaines activités indirectes peuvent ajouter de la valeur au produit fabriqué (par exemple : les attentes pour la consolidation de la pièce, le contrôles de la santé matière du produit demandés par le client, etc.)

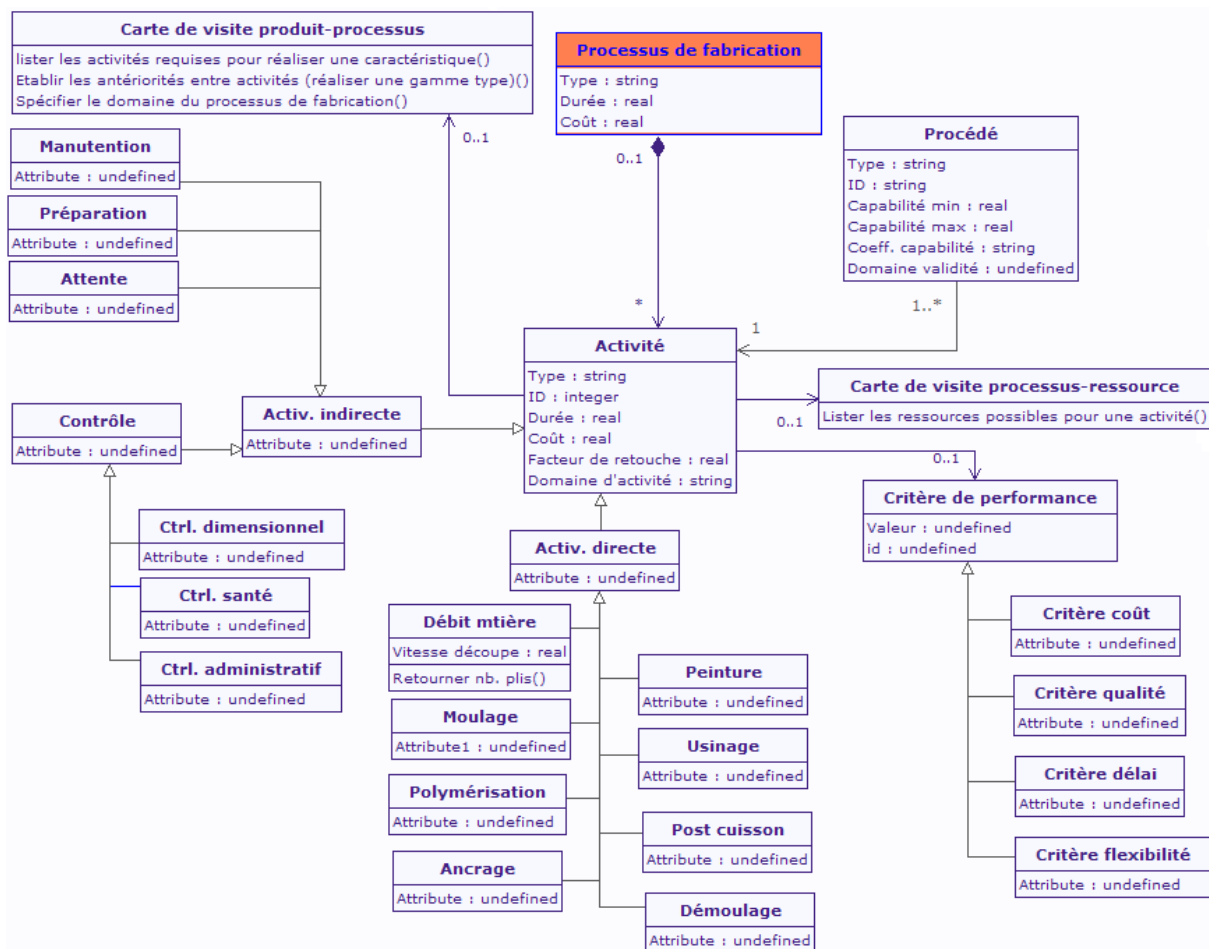


Figure 3-17 Diagramme de classes UML pour la vue Processus (point de vue statique)

Les relations avec les autres modèles proposés se font par l'intermédiaire des cartes de visite explicitées dans les sections précédentes. Nous associons des critères de performance à chaque activité en vue d'évaluer l'apport de chaque activité dans le calcul de la valeur finale des critères d'évaluation.

Les états intermédiaires d'une CT sont caractérisés par les antériorités qui permettent d'indiquer l'ordre des activités de fabrication. Les 3 types d'états sont :

- *l'état initial*, caractérisé uniquement par une sortie (une CT ne peut pas être obtenue d'une autre). Une activité est nécessaire pour déclencher la fabrication.
- *l'état de fabrication*, caractérisé par une entrée (l'état précédant) et une sortie (l'état dans lequel l'état se transforme). Une activité permet de transformer l'état entrant.
- *l'état final*, caractérisé uniquement par une entrée dans le cas des CTs de type « plaque »². Lors de la fusion d'une singularité dans la plaque, l'état final est intégré par l'état concerné de la plaque. Cela est modélisé par une sortie au niveau de l'état final de la singularité qui fait la liaison avec l'état concerné de la plaque par l'intermédiaire d'une liaison d'assemblage.

Plusieurs opérateurs doivent être définis afin de pouvoir mettre en œuvre l'enchaînement des activités et des processus intermédiaires. Il s'agit des opérateurs de :

- parallélisme des flux – permet d'indiquer la possibilité de réaliser plusieurs Caractéristiques Technologiques en même temps ;
- fusion – indique l'intersection de plusieurs processus intermédiaires. On travaille alors sur plusieurs CTs en même temps. Tous les processus entrants sont assimilés par celui de la plaque qui est le seul à poursuivre l'enchaînement des activités. Pour donner un exemple, on considère le cas d'une pièce à réaliser en infusion qui matérialise un panneau qui comporte un composant creux. La préforme de la partie creuse sera réalisée à part de la préforme de la plaque. Assemblées, les deux préformes seront infusées en une seule fois ;
- de séquençement – indique une suite d'activités, matérialisée par une chaîne d'états intermédiaires.

Afin d'assurer la représentation formelle des objets temporels (états intermédiaires des CTs, processus intermédiaires et activités) nous faisons appel à la méthode IDEF3. Cela nous laisse la possibilité d'intégrer une vue objet et une vue orientée processus afin d'assurer la gestion de la temporalité. La **Figure 3-18** présente les objets nécessaires à la gestion de la temporalité, les supports de la modélisation dynamique du processus. Ces objets sont repris de la méthode IDEF3 ou adaptés à partir des objets existants afin de symboliser nos concepts. Il s'agit des objets représentant le produit et sa déclinaison structurelle en Caractéristiques Technologiques, les états intermédiaires, le processus intermédiaire correspondant à la fabrication d'une CT, les activités le constituant ainsi que les types de liaisons, et finalement les opérateurs d'enchaînement qui servent à mettre en relation les processus intermédiaires. Les symboles de la méthode IDEF3 sont présentés en annexe (Annexe 2). Un code couleur est adopté pour différencier les types d'états intermédiaires (version informatique du document).

² Cela s'explique par le fait qu'à une CT de type plaque on associe un processus enveloppe (voir génération des processus dans le Chapitre 4)

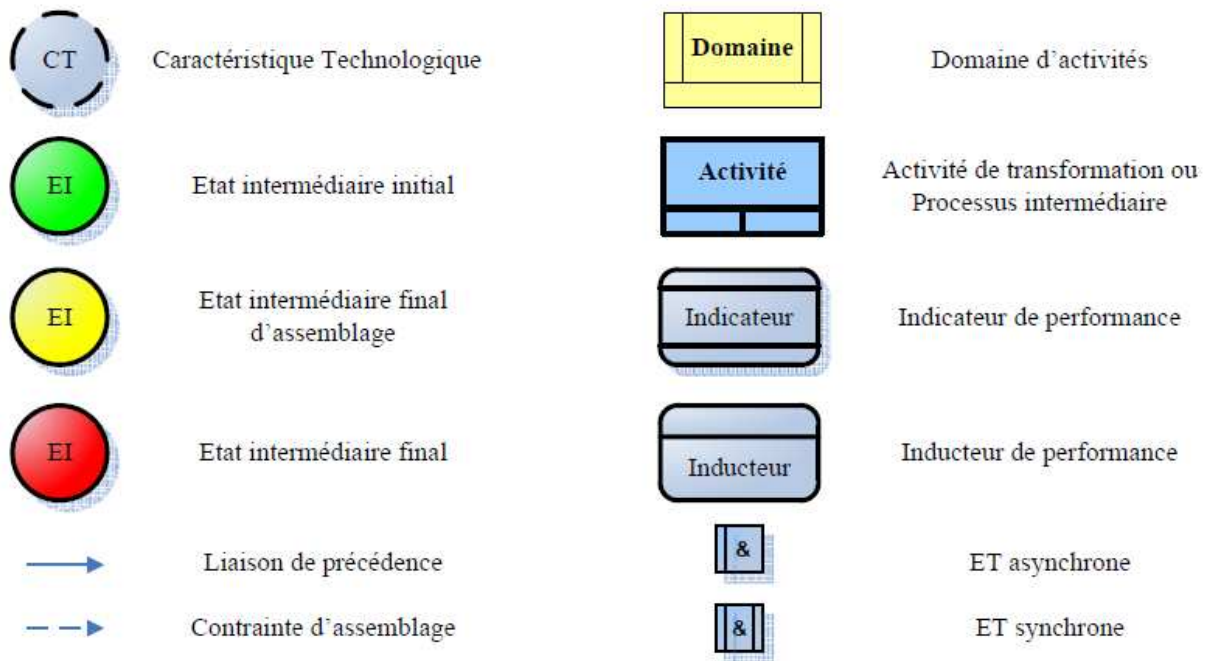


Figure 3-18 Types d'objets et opérateurs d'enchaînement utilisés dans le modèle dynamique du processus

La Figure 3-19 présente un exemple de déploiement de la méthode IDEF3 dans le but de structurer les notions liées aux transitions caractérisant un processus intermédiaire d'un point de vue orienté objet, donc l'enchaînement des états intermédiaires. Plusieurs activités faisant partie d'un même domaine d'activité peuvent intervenir lors de la transition entre deux états d'une pièce.

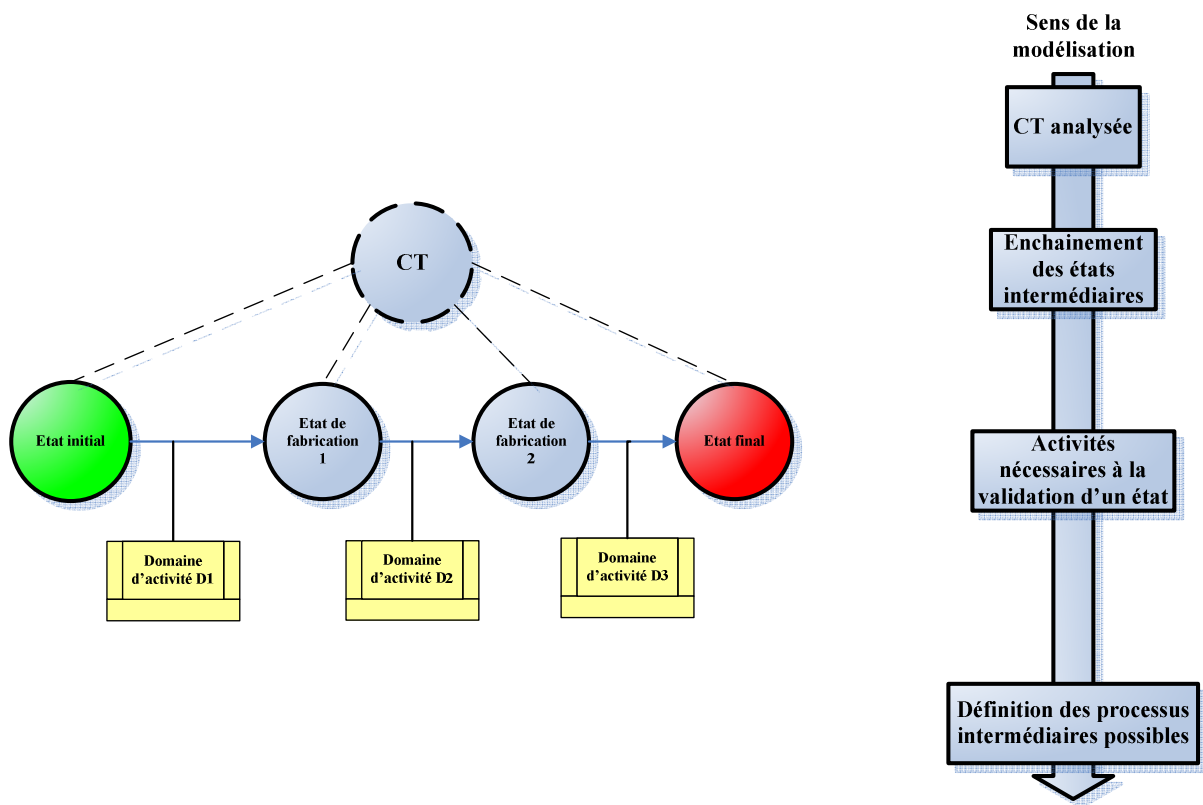


Figure 3-19 Vue dynamique processus

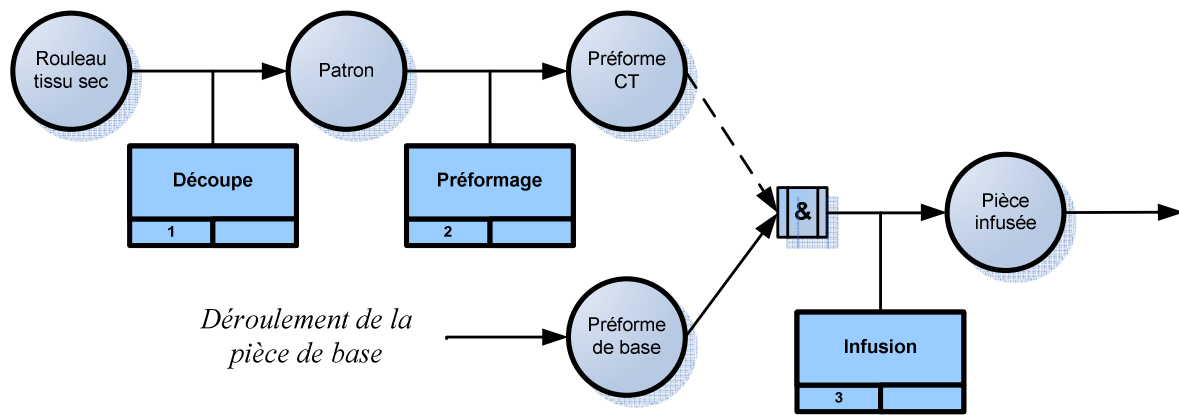


Figure 3-20 Vue dynamique du processus de type infusion de résine liquide

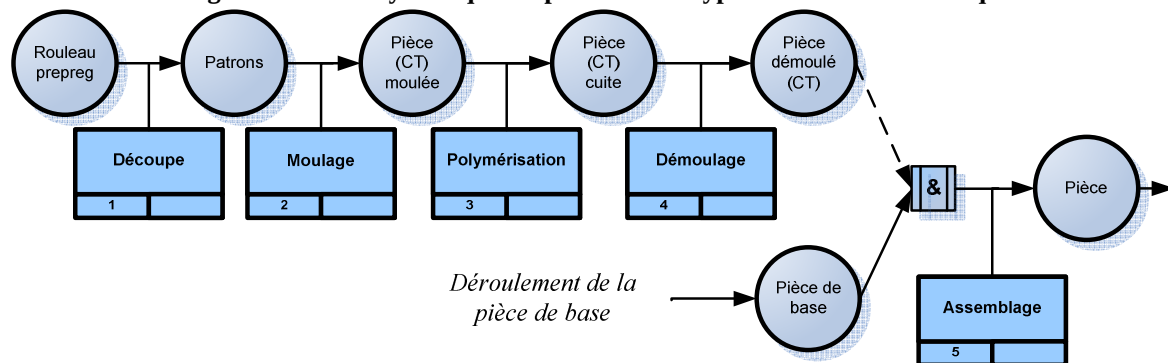


Figure 3-21 Vue dynamique du processus de type moulage de préimprégnés

En employant des règles de fabrication, on peut déterminer le schéma du processus de fabrication du produit. Ainsi, les processus intermédiaires ayant été déterminés pour chaque CT sont mis en relation afin de décrire le schéma final du processus de fabrication. Dans la Figure 3-20 et la Figure 3-21 on présente des schémas génériques pour le processus d'infusion de résine liquide et de moulage de préimprégnés, respectivement.

On fait les remarques suivantes sur les schémas des processus type :

- lors de la définition du processus de fabrication par infusion, donc de l'enchaînement des activités, on constate la convergence des processus intermédiaire vers une même activité. Cela correspond en réalité au fait que tous les composants sont préformés soit directement sur l'outillage soit sur des outillages spécifiques. Ces préformes sont assemblées par la suite pour permettre l'infusion de la pièce en une seule opération. On obtient ainsi une pièce qui se rapproche de la géométrie finale après infusion et polymérisation de la résine.
- Le modèle dynamique du processus de moulage des préimprégnés se caractérise par un enchaînement séquentiel des processus intermédiaires. Cela est dû au fait que la pièce est construite en plusieurs étapes. Ainsi, la peau interne de la pièce (coté outillage) est la première à être réalisée suite à une première cuisson, le matériau d'âme est ensuite ancré à la peau interne, la peau externe étant la dernière à être moulée est polymérisée dans une deuxième étape de cuisson. Les éventuels composants qui n'ont pas pu être réalisés lors des étapes précédentes sont assemblés à la pièce solidifiée. Ils peuvent être fabriqués en interne s'il s'agit des pièces composites ou achetés dans le cas des composants métalliques.

La section suivante présente le déploiement des modèles proposés dans le cas de la fabrication d'un panneau composite.

3.9 Illustration

Le dessin de définition de la pièce traitée dans cette illustration est présenté en annexe (Annexe 3). Il s'agit d'un panneau sandwich similaire aux portes d'accès à des chambres d'équipements électriques présentes dans le fuselage des avions. Cette pièce présente une complexité moyenne due à la géométrie galbée du panneau et aux divers composants intégrés. Une zone sandwich en nid d'abeille sert à rigidifier le panneau. Une deuxième zone sandwich est disposée sur le sandwich principal. A son niveau, un insert métallique fileté est intégré dans la peau externe. Le sandwich de base est densifié afin d'accueillir dans ces zones des perçages qui pourront accueillir des fixations en vue d'y attacher par la suite un autre produit. Le panneau est pourvu d'une gouttière qui sert à accueillir un support de joint d'étanchéité. Ces Caractéristiques Technologiques, les états intermédiaires identifiés et les matériaux à utiliser sont illustrés dans la Figure 3-22. Par souci d'affichage nous avons choisi de montrer dans ce diagramme de classes uniquement une partie des états intermédiaires identifiés.

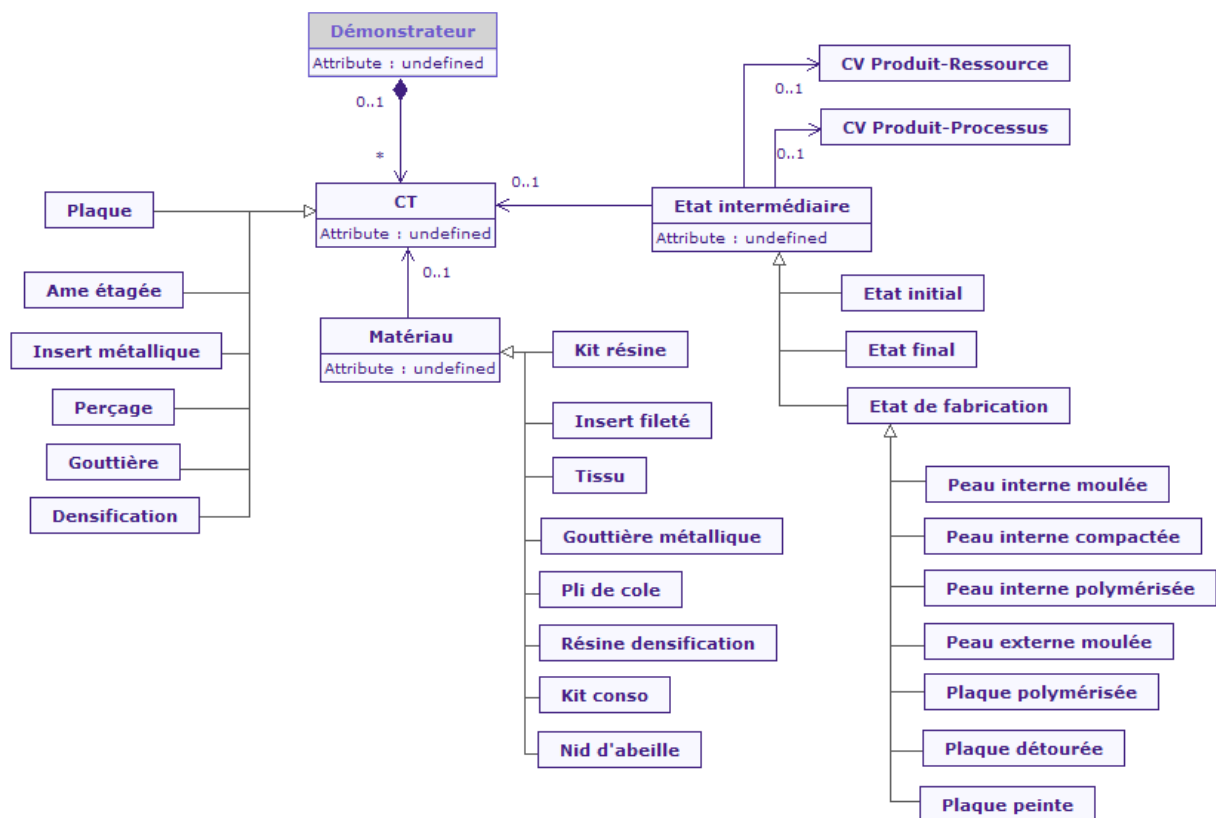


Figure 3-22 Modèle produit pour le démonstrateur traité

La réalisation du démonstrateur par infusion de résine liquide suit un ensemble d'étapes que nous décrivons comme suit. La peau interne est moulée dans un outillage métallique à partir des plis de tissu de carbone poudrés. Cette peau est ensuite couverte d'une bâche à vide afin de la compacter pendant un maintien à température élevée (120°C pour une durée d'une heure). Ensuite, le matériau d'âme (nid d'abeille) est densifié dans les zones prévues et il est positionné dans l'outillage afin de le chauffer et lui donner la forme finale. Après formage de l'âme, celle-ci est couverte entièrement par des plis de colle afin de la rendre étanche. La peau externe est ajoutée par moulage des plis restants. L'insert métallique est intégré entre les plis de la peau externe. L'ensemble est couvert à nouveau par la bâche à vide pour une autre étape

de chauffage dans le but de polymériser la colle d'étanchéité et de compacter la peau externe. En parallèle la gouttière est réalisée par moulage des plis dans un outillage spécifique, compactée suite à une opération de chauffage en étuve. La préforme de la gouttière est assemblée à la préforme de la plaque. Un dispositif doit être employé pour le maintien en position de la gouttière qui est simplement posée sur la préforme de la plaque. L'ensemble est fermé définitivement par la bâche à vide et il est infusé. La résine est ensuite polymérisée. Après solidification, la pièce est démoulée et elle est acheminée vers l'atelier d'usinage pour le détourage et le perçage des trous au niveau du sandwich. La pièce est finalement peinte. Des opérations de contrôle intermédiaire sont prévues.

Pour le processus type infusion, les états intermédiaires ainsi que les domaines des activités sont illustrés par la vue dynamique du processus considéré (Figure 3-23). Afin de simplifier le diagramme, les états intermédiaires des CTs *Densification* et *Trou* ont été assimilés par d'autres CTs.

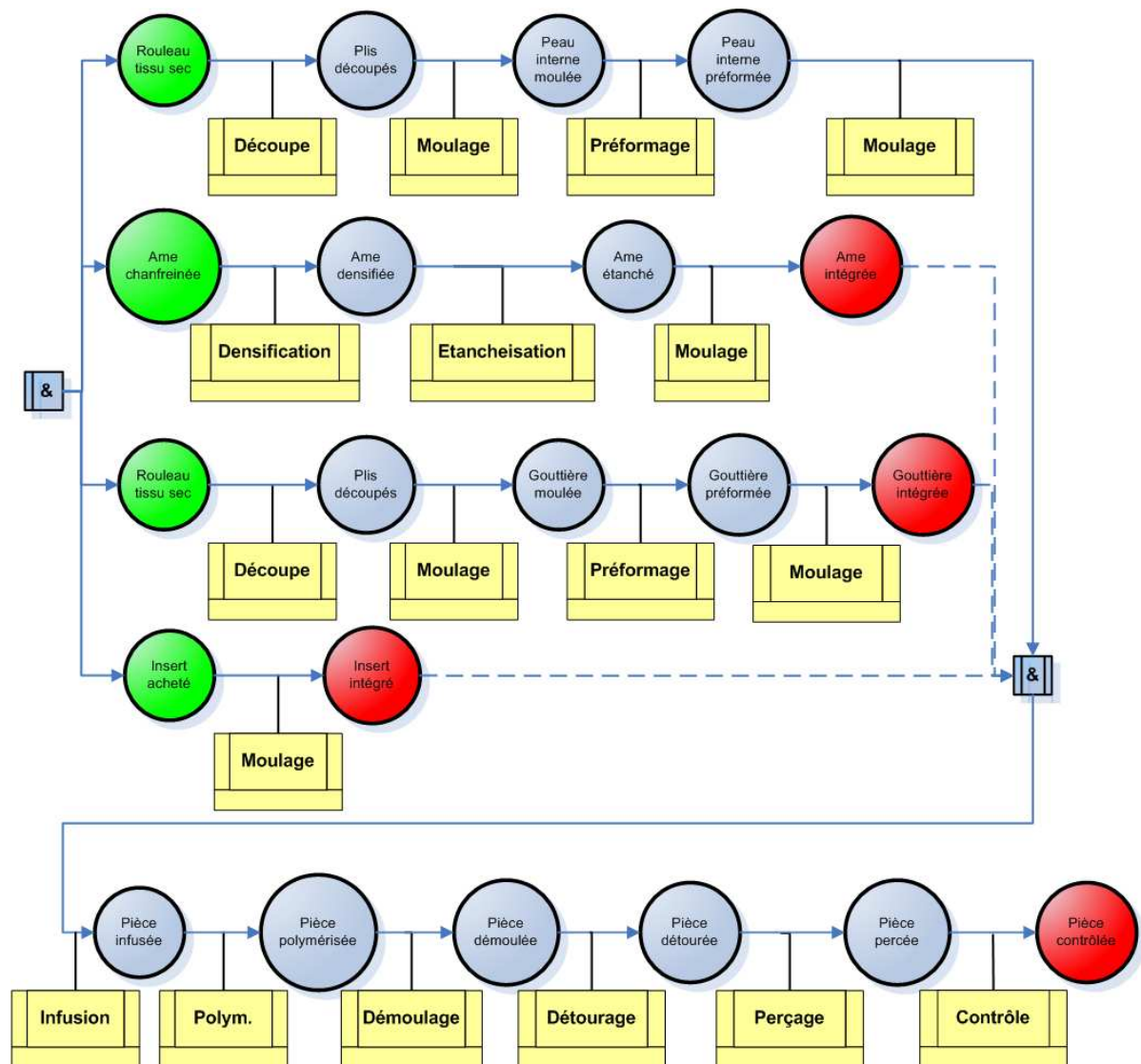


Figure 3-23 Vue dynamique du processus d'infusion correspondant au démonstrateur traité

La même pièce suit un mode opératoire différent dans le cas du procédé de moulage de préimprégnés. On commence d'abord par le moulage des plis préimprégnés découpés afin de

réaliser la peau interne. Cette peau est ensuite polymérisée. Le nid d'abeille est ensuite ajouté de la même manière que pour la pièce infusée. On ajoute également les plis de colle, non pas pour des soucis d'étanchéité mais plutôt pour coller l'âme aux plis car ils ne sont pas autocollants dans le cas étudié. Les plis de carbone restants sont ajoutés par-dessus afin de mouler la peau externe. L'ensemble suit une deuxième étape de chauffage en autoclave pour polymériser la pièce. La pièce est démoulée et les opérations de détourage, peinture suivront. En assemblage on ajoute la gouttière qui est une pièce achetée en matière métallique. Dans le cas de ce processus type la pièce subit deux opérations de chauffage. Cela implique une mise sous vide avant chaque polymérisation et une étape d'enlèvement de la bache après la première cuisson. Ces opérations additionnelles vont augmenter le temps de production de la pièce. Ce déroulement est présenté dans la **Figure 3-24**.

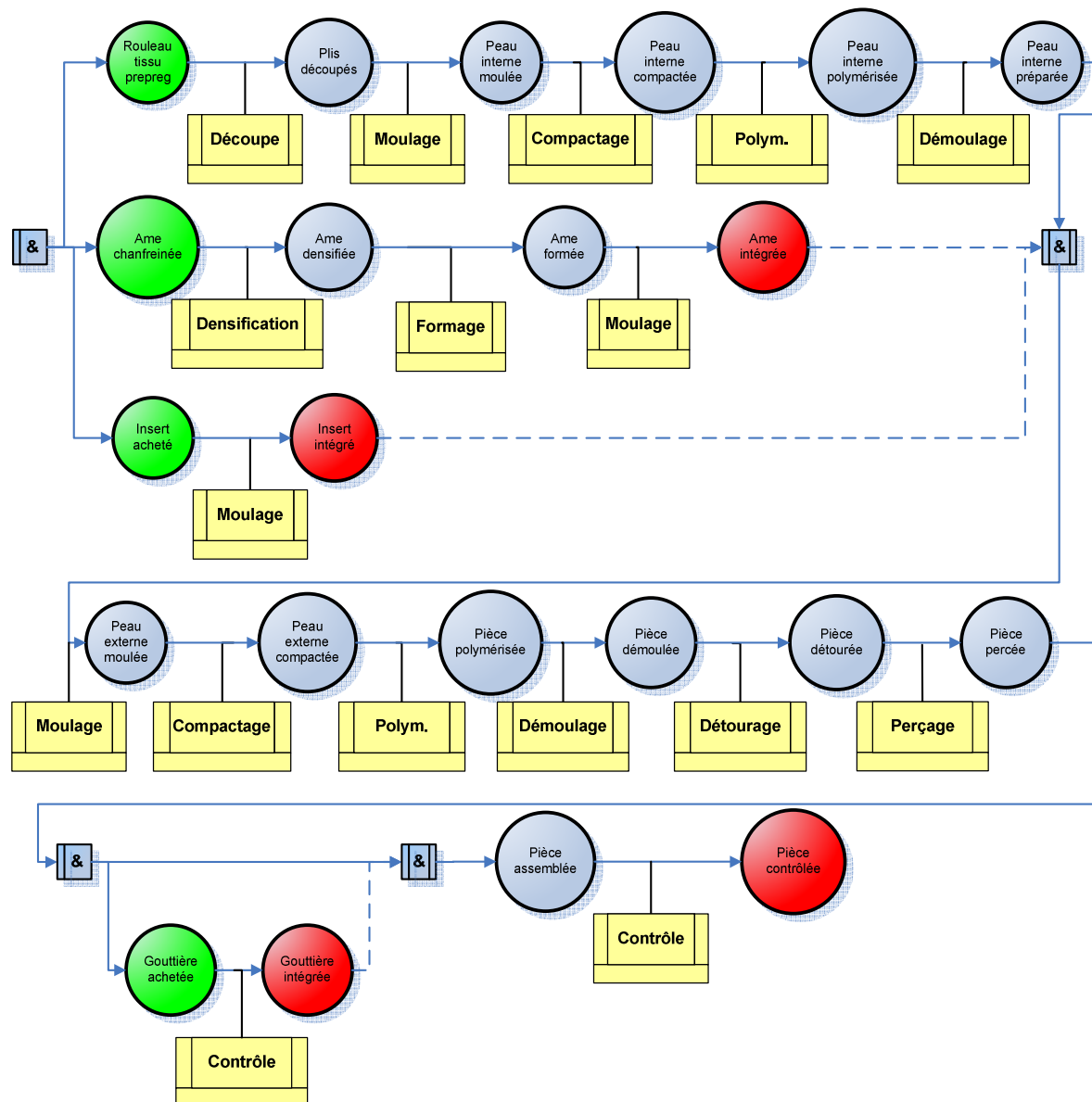


Figure 3-24 Vue dynamique du processus de moulage de préimprégnés correspondant au démonstrateur traité

4. La capitalisation des connaissances

Jusqu'à présent nous avons présenté des modèles de représentation des objets d'entreprise. Cette section traite de la capitalisation des connaissances intrinsèques aux relations entre ces objets.

4.1 Objectifs de la capitalisation des connaissances

L'entreprise dispose généralement des connaissances reparties entre les procédures écrites et l'expertise de ses acteurs. Les procédures écrites sont finalement une représentation plus ou moins structurée de l'expertise de ses acteurs. En faisant ces remarques on retrouve l'objectif de l'entreprise en termes de capitalisation des connaissances :

- Représentation dans une manière structurée des connaissances non explicitées de ses experts en vue de les pérenniser ;
- Réutilisation des connaissances durant son activité.

Ces idées sont capturées dans la **Figure 3-25**.

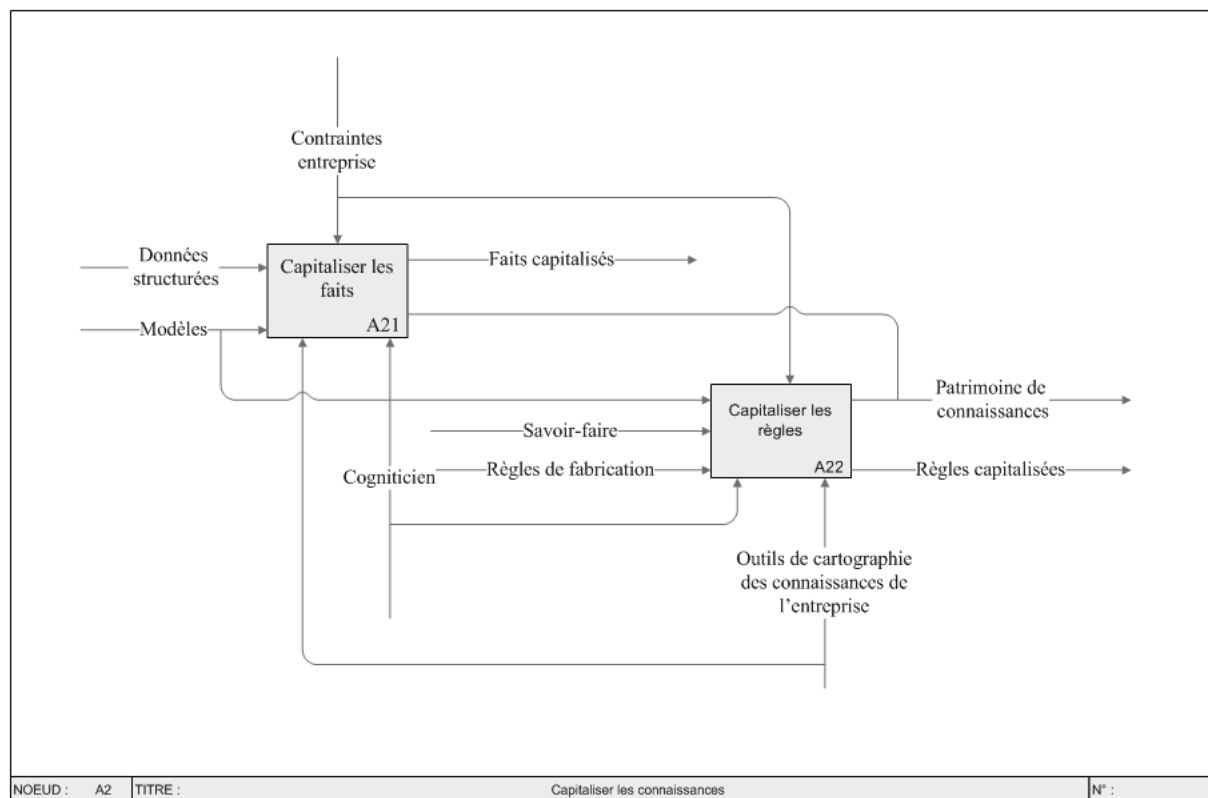


Figure 3-25 Diagramme SADT, Activité A2 : « capitaliser les connaissances »

Pour notre travail le besoin en capitalisation est clair. D'une part, des nouvelles connaissances ont été générées le long du projet CAPSAIRTM. Ensemble avec les connaissances existantes sur les procédés de fabrication les nouvelles connaissances doivent être intégrées dans un mémoire d'entreprise. D'autre part, nous nous proposons d'utiliser les connaissances par un traitement automatique afin de générer les processus de fabrication possibles pour les produits à analyser. La collecte des informations et des connaissances des

experts a été effectuée sous forme d'entretiens pendant lesquels les experts exprimaient leur savoir autour du tryptique PPR pour le domaine des composites.

Souvent les faits exprimés par les experts ne suivent pas un patron rendant leur capitalisation aisée. Cela est notamment lié à l'incapacité des experts d'exprimer de manière formelle des règles de fabrication. Il a fallu suivre une procédure afin de structurer les faits exprimés par les experts en vue de les adapter au traitement à suivre. Pour cela nous nous sommes inspirés du concept de Carte de Visite, développé par François Villeneuve dans le domaine d'usinage [Villeneuve 2003], afin de réaliser un outil qui permette de mettre en forme de manière structurée les connaissances et de guider les entretiens.

4.2 Les Cartes de Visite

Une carte de visite, présentée généralement sous forme de table (**Figure 3-26**), est un outil permettant de structurer les connaissances liées aux entités d'usinage. Ces outils capturent les connaissances des experts sous forme d'attributs des entités d'usinage à obtenir et de l'état brut de l'entité. Une séquence d'usinage décrit la capacité d'un outil à réaliser les attributs définissant une entité. La mise en œuvre de ces outils permet de réaliser une génération ascendante du processus de fabrication car en partant de l'état fini de la pièce et en montant vers l'état brut, les cartes de visite associées aux états intermédiaires sont analysées afin de déterminer les séquences possibles pour la réalisation d'une entité.

Dans notre cas d'étude, nous comptons utiliser ces outils afin de structurer et de capitaliser les règles de fabrication du domaine des composites réalisés par procédés de moulage de préimprégnés et d'infusion de résine liquide. Ces règles permettent de matérialiser les liens entre le Produit, les Ressources et les Activités en vue de les exploiter de manière automatique.

Une analyse de chaque Caractéristique Technologique est nécessaire afin d'intégrer ces relations entre les objets du tryptique PPR. Pour chacun des états intermédiaires d'une CT nous intégrons dans ces outils les informations suivantes :

- Les données de description du produit : la taille et les dimensions de la CT, la variante de la CT ainsi que le type de matière première utilisée ;
- Les données sur les états intermédiaires : le type d'état intermédiaire (initial, de fabrication, final) et les contraintes de précédence et d'antériorité. Il est à noter qu'on entend par contrainte de précédence l'information sur l'enchaînement des états intermédiaires et par contrainte d'antériorité l'information indiquant qu'un état intermédiaire d'une caractéristique technologique doit être réalisé avant l'état intermédiaire indiqué d'une pièce de base ;
- Les domaines d'application : on spécifie ainsi pour un processus type les domaines des activités permettant la transformation d'un état dans un autre et les domaines des ressources capables de réaliser cette transformation.

<i>Informations générales</i>	
.....	La dénomination du type d'outil
.....	Le ou les cycles utilisés
Entr	Les types d'entités d'usinage concernées
Mu	Les matières usinables
Enta	Les types d'entités d'usinage antérieures acceptables
Do	Le ou les diamètres d'outils
Lo	La ou les longueurs d'outils
<i>Données réalisables</i>	
Dr	Diamètres réalisables
ITDr	IT réalisables sur le diamètre
RaDr	Etats de surface réalisables sur le diamètre
Ffr	Formes du fond réalisables
Lr	Longueurs réalisables
Δ Lr	Δ l de positions du fond réalisables
RaLr	Etats de surface sur le fond réalisables
$\oplus_r$	Tolérances de position réalisables
Er	Formes d'entrée réalisables
Cr	Formes de coin réalisables
Sr	Formes de sortie réalisables
Ddn	Diamètres débouchants nécessaires
Ldn	Longueurs débouchantes nécessaires
<i>Caractéristiques de l'état antérieur</i>	
ar	Passe radiale
h	Hauteur d'usinage
aa	Passe axiale
ITDa	IT sur le diamètre antérieur
RaDa	Etat de surface sur le diamètre antérieur
Δ La	Δ l de position du fond antérieur
RaLa	Etat de surface sur le fond antérieur
$\oplus_a$	Tolérance de position antérieure
Ffa	Forme du fond antérieure acceptable
Ea	Forme d'entrée antérieure
<i>Informations complémentaires</i>	
CVSa	C.V.S. à scruter pour l'état antérieur
FsD	Peut on réaliser le fond sans la partie cylindrique?
DsF	Peut on réaliser la partie cylindrique sans le fond?

Figure 3-26 Données contenues dans une carte de visite séquence pour une entité alésage [Villeneuve]

La carte de visite est ainsi un outil employé dans notre travail afin de répondre à deux aspects de la phase de capitalisation :

- Validation des entretiens des experts : les connaissances exprimées lors des entretiens sont structurées afin d'analyser la complétude des informations recueillies. Elles sont présentées ensuite aux experts pour validation ou comme base de travail si des compléments d'informations sont nécessaires.
- Capitalisation des connaissances : les connaissances représentées de manière formelle sont maintenant disponibles au traitement prévu. Les cartes de visite permettent ainsi d'établir des règles de fabrication

La notion de règle de fabrication est expliquée dans la section suivante.

A part la phase de capitalisation des connaissances des experts, effectuée pendant le travail de thèse et prévue come étape préparatoire à l'exploitation, nous intégrons à notre méthodologie

une approche d'enrichissement de la base de connaissances. Effectivement, après cette étape préparatoire l'existant est modélisé et les connaissances sur la fabrication des composites sont capitalisées à l'aide des cartes de visites. De cette manière un nombre restreint de processus de fabrication possibles des Caractéristiques Technologiques est capitalisé. Les alternatives couvrent l'ensemble de modes opératoires connus et appliqués dans l'entreprise même si leur nombre est faible. L'enrichissement dont on parle consiste dans une procédure de définition des nouvelles alternatives, si un nouveau mode opératoire non-renseigné est maîtrisé par l'entreprise, à l'aide des cartes de visite et son enregistrement dans la base d'alternatives. Cette procédure est expliquée par le logigramme présenté dans la **Figure 3-27**. On appelle cette procédure capitalisation continue des connaissances. Même si son nom pourrait l'indiquer, cette procédure n'est pas automatisée. A ce stade de la recherche il revient à l'administrateur de la base d'identifier le besoin du renseignement et l'enregistrement du nouveau processus.

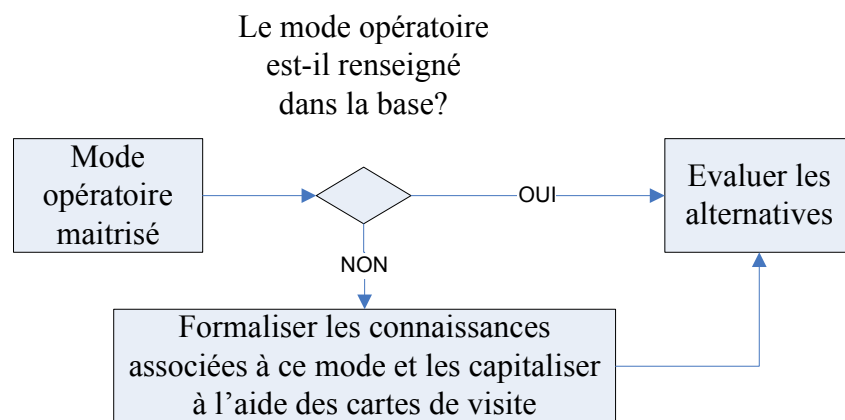


Figure 3-27 Procédure de capitalisation continue

4.3 Les règles de fabrication

Généralement, l'implémentation des cartes de visite se fait à l'aide de règles utilisées par un moteur d'inférence. La représentation des connaissances sous forme de règles a été employée dans différentes application issues de l'intelligence artificielle. Les langages utilisés pour cette implémentation sont des langages déclaratifs, tel que PROLOG qui utilise des prédicats du premier ordre.

Une règle est exprimée dans le langage PROLOG de la manière suivante :

*SI <conjonction de prédicats queue>
ALORS <prédicat tête>*

La représentation des connaissances sous forme de règles de fabrication est un moyen de capitalisation permettant de formaliser le savoir-faire des experts et d'entamer l'étape de préparation de la connaissance au traitement automatique. Même si ce type de représentation de la connaissance permet de disposer d'une mémoire d'entreprise dynamique, qui ne se résume pas à une vue statique du savoir mais qui permet la déduction de nouveaux faits, elle reste limitée à l'expression précise des actions à entreprendre à cause de l'ambiguïté liée souvent à l'incapacité des experts de décrire le domaine au niveau de ses frontières.

Une classification des règles que l'on emploie dans ce travail est présentée dans le **Tableau 3-1**.

Tableau 3-1 Types de règles de fabrication utilisées dans ce travail

Type de règle	Variante de règle	Exemple
Validité	Produit - Ressource	SI (<Caractéristique Technologique> ET <Type matériau>) ALORS <Ressource>
	Procédé - Ressource	SI <Domaine Activités> ALORS <Ressource>
	Processus - Procédé	SI <Domaine Processus Type> ALORS <Domaine Activités>
	Produit - Procédé	SI <Etat intermédiaire> ALORS <Activité>
Séquencement	Antériorité	SI (<EI actuel = Etat initial> OU <EI actuel = Etat de transformation>) ALORS <Continuer Génération> SINON <Sélectionner le Processus Intermédiaire>
	Précédence (Assemblage)	SI (<EI actuel> ET <Contrainte de précédence>) ALORS <Générer route parallèle>

Cette classification comprend deux types de règles : de validité et de production. Les règles de validité permettent, par l'intermédiaire des cartes de visite, de spécifier les relations de validité du tryptique PPR. Ainsi, on spécifie des règles pour les couples identifiés :

- Produit – Ressource : on indique quelles ressources ont la capacité de réaliser une CT en fonction de la matière première utilisée ;
- Processus – Ressource : on indique les ressources capables selon les domaines d'activité identifiés ;
- Processus – Procédé : on indique les domaines d'activités spécifiques à un processus type renseigné ;
- Produit – Procédé : on indique les activités ayant la capacité de transformer un état intermédiaire en un autre.

Les règles de production sont utilisées pour décrire l'enchaînement des états intermédiaires des caractéristiques technologiques. Cette base de règle servira à la génération des processus intermédiaires et à leur intégration dans les processus enveloppe. Deux variantes existent selon les contraintes d'enchaînement des EI :

- Précédence : ces règles définissent la succession des EI spécifiques à une CT. Elles sont utilisés pour générer les processus intermédiaires de la CT et de déclencher l'allocation des activités et des ressources ;
- Antériorité : ces règles spécifient à quel moment le processus intermédiaire d'une CT doit être intégré dans le processus de fabrication de la pièce.

Ces règles sont capitalisées dans une base de règles constituée des classes de règles issues des relations entre les objets des couples du tryptique PPR.

L'utilisation des règles est rappelée dans le quatrième chapitre (section 2).

4.4 Illustration

Nous donnons des exemples de règles de fabrication employées pour capitaliser les connaissances et préparer le traitement en se basant sur la pièce d'illustration introduite dans la section 3.9.

En ce qui concerne les règles Produit – Ressource les règles données comme exemple concernent la découpe des tissus secs et préimprégnés.

*SI (<CT = Plaque> ET <Matériau = tissu préimprégné>)
ALORS <Ressource = Machine découpe jet d'eau>*

*SI (<CT = Plaque> ET <Matériau = tissu sec>)
ALORS <Ressource = Machine découpe mécanique>*

Ainsi, pour la découpe du tissu préimprégné une machine de découpe au jet d'eau est capable d'assurer cette opération. La même machine n'est plus capable dans le cas du tissu sec car celui-ci nécessiterait une étape de séchage et la qualité de la découpe serait inférieure à celle obtenue par procédé de découpe mécanique. En utilisant ces règles une liaison entre les divers paramètres des objets ressource et CT sont appelés afin de calculer les valeurs des indicateurs de performance.

Nous présentons ci-après des règles Procédé – Ressource pour la définition des ressources capables selon un domaine d'activité. Comme dans le cas de la fabrication des produits composites l'ensemble pièce outillage passe par plusieurs étapes, il est nécessaire de définir l'utilisation d'une ressource pour chaque domaine qui pourrait l'utiliser.

*SI <Domaine Activités = Densification>
ALORS <Ressource = Pistolet densification & Opérateur composites & Masque densification>*

*SI <Domaine Activités = Polymérisation préimprégné>
ALORS <Ressource = Moule & Opérateur composite & Autoclave>*

Afin de pouvoir mettre en œuvre la règle précédente, il faut au préalable avoir défini des règles prévues à capitaliser les connaissances sur le couple Processus – Procédé afin de déterminer les domaines d'activité selon le processus type.

*SI <Domaine Processus = Préimprégné>
ALORS <Domaine activités = Liste Domaines Activité Préimprégné (Découpe, Moulage, Compactage, Polymérisation, Contrôle, Démoulage, Détourage, Perçage, Peinture, Assemblage, Densification, Formage)>*

*SI <Domaine Processus = Infusion>
ALORS <Domaine activités = Liste Domaines Activité Infusion (Découpe, Moulage, Préformage, Infusion, Polymérisation, Contrôle, Démoulage, Détourage, Perçage, Peinture, Assemblage, Densification, Etanchéisation, Formage)>*

Les domaines d'activités étant connus, pour chaque état intermédiaire l'activité permettant la transformation sont à définir. Si plusieurs règles existent pour une même transformation, un processus intermédiaire sera déduit pour chacune des règles. En voici un exemple :

*SI <Etat intermédiaire = Tissu>
ALORS <Activité = Découpe>*

Les règles de production sont vérifiées pour chaque état intermédiaire et ses attributs sont évalués. Ainsi, si l'état intermédiaire traité est un état initial ou un état de transformation, la génération du processus intermédiaire consiste à ajouter à la liste d'opérations les activités requises par la transformation selon les attributs de précédence. Un attribut booléen est

associé pour montrer si l'activité du processus intermédiaire doit se réaliser en parallèle ou comme succession des activités du processus de la pièce de base. Cela revient à vérifier si une contrainte d'antériorité existe. Quand l'état traité est un état final, la génération du processus prend fin.

On obtient par l'application des règles une liste d'activités correspondant aux diagrammes IDEF3 dans la section 3.9.

5. Conclusions

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre aux concepts de la gestion des connaissances afin de faire un état des méthodes et des outils disponibles pour notre problématique. Nous avons constaté l'existence d'un grand nombre de modèles développés pour formaliser les objets d'entreprise. Nous avons choisi d'adapter ces modèles à notre cadre d'étude et de les enrichir par des concepts nous permettant de modéliser le domaine des composites. Nous avons introduit le concept de Caractéristique Technologique afin de représenter de manière structurée les paramètres liés à la description structurelle et fonctionnelle des composants de base des produits composites. En se basant sur la méthode IDEF3 la vue dynamique du processus a été modélisée dans le but de représenter les processus de fabrication.

Le concept de Carte de Visite a été utilisé pour la structuration des règles de fabrication en vue de les capitaliser pour un traitement. Ces outils nous ont permis également de guider le travail de recueil des connaissances des experts et de validation de leur représentation formelle.

Ce chapitre a traité la représentation formelle de la connaissance et des objets d'entreprise et leur capitalisation. Il s'agit d'une étape préparatoire à l'exploitation des connaissances. Le chapitre suivant porte sur le traitement de ces connaissances en vue de générer les processus de fabrication et d'évaluer leur performance.

Chapitre 4 Exploitation des connaissances pour l'industrialisation

1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous nous sommes intéressés à la représentation formelle des connaissances du domaine traité en vue de préparer les informations pertinentes liées au tryptique Produit-Processus-Ressource à la capitalisation. Cette étape de capitalisation, tel qu'elle a été présentée dans le chapitre 3, sert à établir une mémoire d'entreprise qui contient les connaissances auxquels les experts font appel lors de l'étude de l'industrialisation des nouveaux produits. Notre prochain objectif est de présenter la façon dont nous avons décidé de traiter ces données en vue de simuler le raisonnement de l'expert lors de cette étape d'analyse. Il s'agit plus précisément de l'étape de définition du processus de fabrication et de son automatisisation.

Cette étape est la dernière proposée afin de soutenir notre démarche globale (Chapitre 2, section 2.4) et elle concerne l'activité A4 appelée dans la **Figure 4-1**.

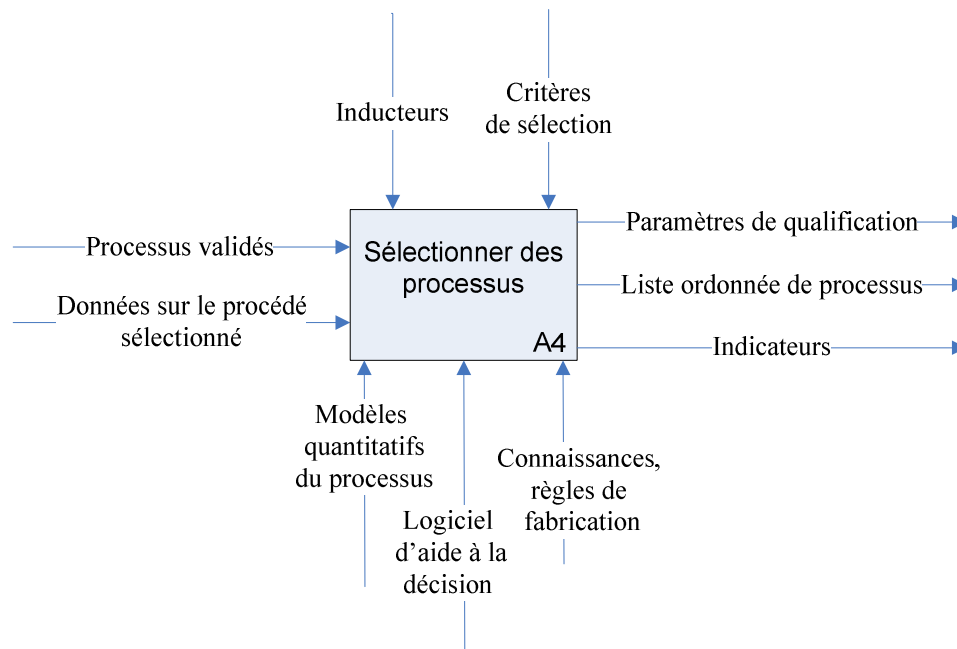


Figure 4-1 Activité A4 – Sélectionner des processus

Ce chapitre est divisé en deux grandes parties. La première partie a comme objectif de présenter des notions de nature générale sur la génération des processus ainsi que notre approche de construction d'une gamme de fabrication. Une fois les alternatives générées, il est nécessaire d'évaluer leur performance selon des critères imposés. C'est l'objectif de la deuxième partie de ce chapitre qui porte sur la présentation des méthodes de classement en général et de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) en détail. Des illustrations autour des approches proposées seront également présentées. Ces illustrations se basent sur la pièce d'étude introduite dans le troisième chapitre du document.

2. Génération des processus de fabrication

[Villeneuve 2003] définit l'activité de génération des processus de fabrication comme étant l'activité du gammiste qui consiste à identifier et à définir les valeurs des paramètres à

prendre en compte pour élaborer le processus en utilisant des modèles comportementaux et expérimentaux. Dans cette démarche le gammiste fait appel à des connaissances acquises, empiriques et intuitives appropriées pendant une période assez longue. Pendant cette démarche on peut faire appel aux systèmes informatiques pour faciliter l'activité du gammiste et pour diminuer le temps de définition du processus. Ce type de génération de processus est appelé fabrication assistée par l'ordinateur (FAO).

Bien que le milieu scientifique se soit intéressé à ces problématiques très tôt, des références existent même avant les années 1970, ce domaine paraît peu avancé comme [Villeneuve 2003] le montre. Deux principales causes sont présentées dans ces travaux. Dans un premier temps, les connaissances auxquels les ingénieurs font appel sont exprimées sous forme de savoirs et de savoir-faire. Cette nature plus abstraite des connaissances induit une difficulté dans l'exploitation des faits peu formalisés. Dans un deuxième temps, la diversité des procédés employés par les très nombreux secteurs de l'industrie ainsi que les clauses de confidentialité, offrant un accès restreint à la panoplie de connaissances, font que les applications développées sont appliquées à des contextes spécifiques. De ces faits, la généricité d'une application demanderait un travail énorme et continu de capitalisation afin de suivre les avancées technologiques de chaque domaine et de garder la validité de l'application et son conformité avec la réalité.

La phase de génération des processus de fabrication ne se résume pas uniquement à la génération des listes ordonnées d'activités. Il faut également spécifier les informations liées à la matière première transformée, au séquençement des opérations et aux ressources disponibles ainsi qu'à leur capacité. Cette activité se base sur la mise en commun de l'expérience des bureaux d'études et de méthodes [Halevi 1995]. Ainsi, la sélection d'un processus de fabrication viable d'un point de vue économique repose directement sur la pertinence des informations fournies à ces acteurs et sur leur décision.

L'étape de génération automatique de gammes est argumentée dans des nombreux travaux axés notamment sur le domaine des procédés d'enlèvement de matière regroupés sous le nom de procédés d'usinage. Le terme anglais correspondant à cette notion est couramment employé dans le domaine : *Computer Aided Process Planning (CAPP)*. Un tel système, basé sur la génération des processus de fabrication d'usinage et assisté par l'informatique, doit pouvoir mettre en œuvre un ensemble de tâches [Alting 1989] :

- Interprétation du dessin de la pièce (papier ou CAO) ;
- Sélection des procédés de fabrication ;
- Sélection des machines-outils ;
- Détermination des surfaces d'appui et des bridages ;
- Détermination et séquençement des opérations ;
- Détermination de la cotation de fabrication ;
- Détermination des conditions de coupe ;
- Calcul des temps et des coûts ;
- Génération des feuilles de gamme, d'opération, des programmes CN.

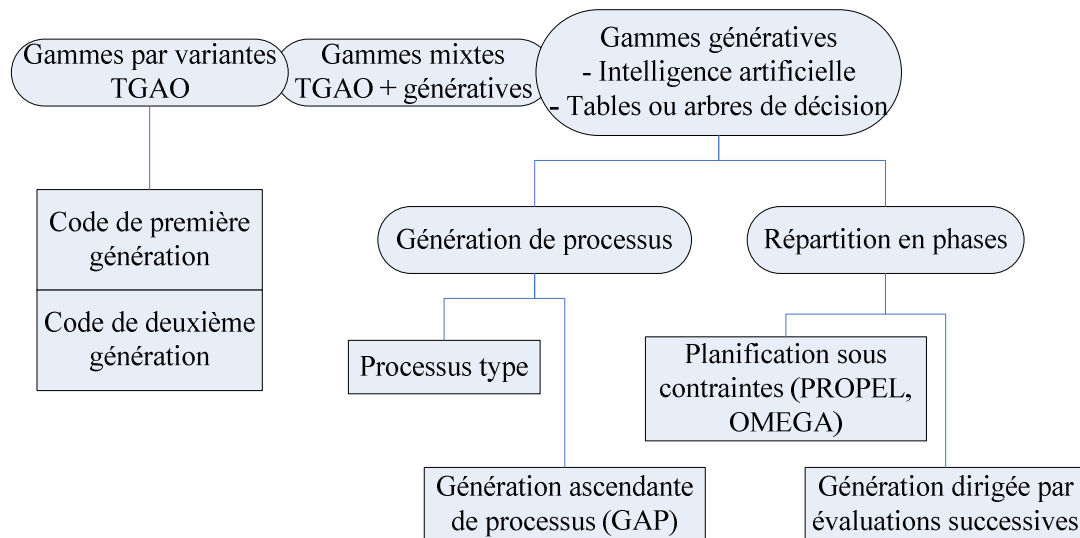


Figure 4-2 Les approches de génération automatique de gammes (adapté de [Villeneuve 2003])

Un système CAPP est une solution permettant d'intégrer les spécifications issues des différents départements, tel que défini par le concept d'ingénierie simultanée. On se base généralement sur deux principales approches : *approches par variantes* et *approches génératives*. Une troisième approche a été introduite dans les travaux récents. Elle consiste dans une *approche mixte* faisant appel aux concepts issus des deux approches de base. Les travaux du groupe Gama [Gama 1990] présentent une synthèse de ces approches (Figure 4-2).

Les principaux concepts des approches de génération de gamme introduits seront détaillés dans les sections suivantes.

2.1 Les approches par variantes

Les premiers systèmes de génération automatique de gammes ont été basés sur l'approche par variantes. Une des méthodes employée par les ingénieurs pour la définition de la gamme de fabrication d'un nouveau produit consiste à analyser les gammes des pièces existantes et de trouver des similitudes entre leur fabrication. Ensuite, la nouvelle gamme est créée à partir des modèles de séquences d'opérations issues des gammes existantes. La génération par variantes se base sur ce type de raisonnement. Une codification est mise en place afin de pouvoir classer les pièces dans des classes morpho-dimensionnelles. Lors de l'analyse d'un nouveau produit, une recherche est effectuée afin d'associer au code de la pièce des gammes existantes dans une base de gammes.

Les systèmes basés sur l'approche par variantes sont également appelés systèmes TGAO (technologie de groupe assistée par ordinateur) ou, selon le correspondant anglais : CAGT (Computer Aided Group Technology) [Mutel 1988]. Cette approche est facile à employer pour tous types de pièces une fois les typologies et le codage réalisés. Néanmoins, l'approche est limitée dès qu'une gamme est à générer pour une pièce qui ne se retrouve pas parmi les variantes existantes. Elle se heurte également à des contraintes liées à la pertinence des données rassemblées et à la durée de développement. Effectivement, [Noel 1990] indique que la durée nécessaire pour la mise en place d'un tel système est assez longue (5-7 années).

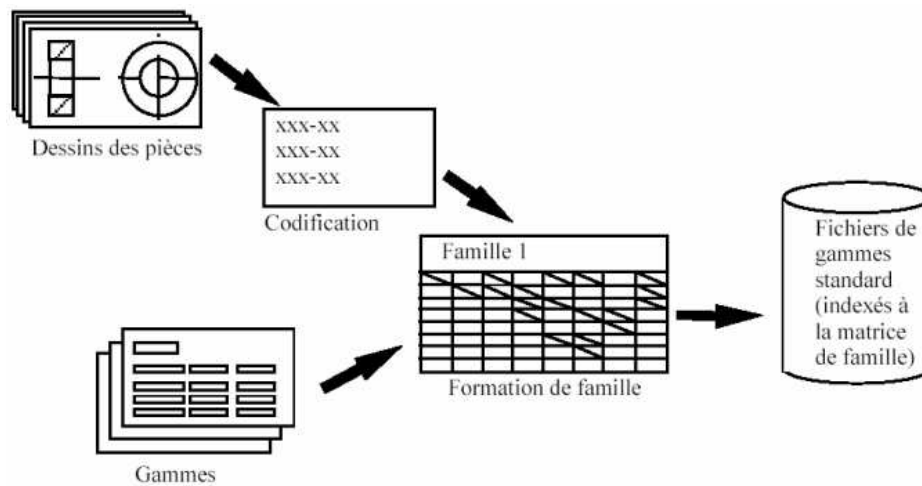


Figure 4-3 Etape préparatoire de la TGAO [Chang 1990]

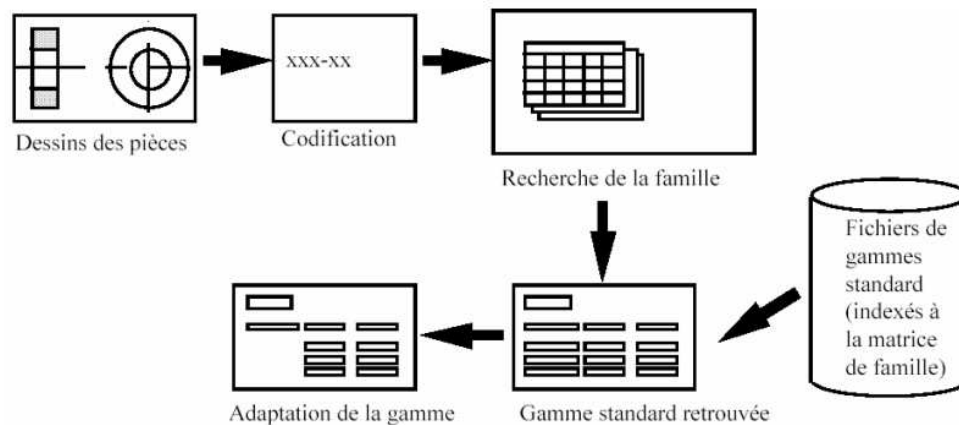


Figure 4-4 Etape productive de la TGAO [Chang 1990]

Selon [Chang 1990], deux principales étapes sont requises pour la mise en œuvre d'une approche par variantes :

- *Etape préparatoire.* Les pièces connues de l'entreprise sont regroupées par familles de pièces représentatives auxquelles on associe un code morpho-dimensionnel. Les gammes de fabrication similaires d'une même pièce sont regroupées en une gamme type. Les codes morpho-dimensionnels des gammes types sont présentés d'une manière matricielle (Figure 4-3). La démarche de codification ainsi qu'un outil permettant d'intégrer les phases de l'étape productive (CAGTIS) sont présentées dans [Mutel 1988].
- *Etape productive.* Pour un nouveau produit, une étape d'analyse est nécessaire afin d'y associer un code. Le système de génération cherche la gamme type qui correspond au code renseigné. La gamme nécessite alors des modifications de la part du gammiste afin de la rendre conforme au déroulé opératoire exigé par le produit (Figure 4-4).

Une évolution de la TGAO réside dans l'utilisation des techniques issues de l'Intelligence Artificielle. Le raisonnement à base de cas (Case-Based Reasoning) peut être employé dans la génération par variantes. Cette méthode consiste à utiliser des cas d'étude existants lors de l'analyse d'un nouveau problème. Appliquée à la génération de processus, cette technique consiste à choisir parmi les gammes existantes celles qui sont conformes à la réalisation de la

caractéristique du produit concerné. Lorsqu'un cas est validé, il est automatiquement sauvegardé dans la base de cas et il pourra être utilisé dans les analyses futures.

Les principales étapes du raisonnement à base de cas sont résumées dans [Slade 1991] :

- *Associer des index.* Les caractéristiques clefs d'un nouveau problème sont renseignées comme des index qui caractérisent le problème.
- *Rechercher.* Les index sont utilisés pour récupérer des cas existants qui contiennent les solutions trouvées lors des études précédentes.
- *Modifier.* L'ancienne solution est adaptée afin qu'elle soit conforme au problème traité.
- *Evaluer.* La solution proposée est testée afin de décider si elle aboutit à un résultat viable ou pas.
- *Attribuer et garder.* Si la solution passe le test, on lui attribue un nouvel index et la solution est sauvegardée dans la base de cas pour les analyses futures.
- *Expliquer, réparer et évaluer.* Si la solution ne passe pas le test, l'échec doit être expliqué, une révision de la solution est réalisée et la solution est testée à nouveau.

Pour conclure, la génération des processus de fabrication basée sur l'approche par variante est utilisable dans les cas où une similitude des pièces fabriquées existe. Ainsi, on peut associer une gamme type de fabrication à des produits présentant une morphologie quasiment identique. Ces systèmes nécessitent une phase de préparation assez importante en termes d'investissement humain. Ils seront utilisés dans les études préliminaires car les processus de fabrication générés demandent une étape supplémentaire d'adaptation et de validation avant la mise en production.

2.2 Les approches génératives

Les approches génératives sont apparues après celles basées par variantes et elles ont été développées surtout pour répondre aux points bloquants des systèmes de type TGAO. Elles reposent sur le principe de création d'une nouvelle gamme pour un nouveau produit selon l'expertise du gammiste. Dans ce cas les règles décrivant la démarche de construction de la gamme du produit sont capitalisées et non plus des cas type.

Dans [Gama 1998] et [Villeneuve 2003] on recense deux grandes approches génératives :

- Approche algorithmique, basée sur les tables ou les arbres de décision ;
- Approche faisant appel aux techniques issues de l'Intelligence Artificielle.

Dans le cas des **approches algorithmiques** on essaie de formaliser le savoir-faire du gammiste afin de le renseigner dans le système d'une manière procédurale. Cette tâche est difficile à mettre en œuvre. A cause de cette caractéristique, les approches algorithmiques ciblent des domaines très spécifiques et restreints en termes de couverture des objets formalisés. Elles couvrent généralement des procédés d'usinage (fraisage, tournage *etc.*) et elles nécessitent des bases de données très riches sur les conditions opératoires, les machines-outils, les outils et les porte-outils.

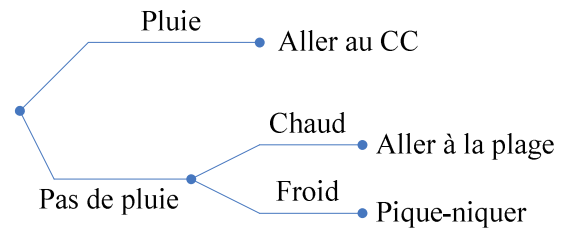
[Chang 1990] illustre l'utilisation des tables et des arbres de décision comme moyen d'expression des connaissances dans le cas des systèmes algorithmiques. L'exemple proposé concerne le choix d'une activité pour un week-end. Il exprime les alternatives comme suit :

- « s'il pleut, j'irai au centre commercial et je jouerai à des jeux vidéo » ;
- « s'il ne pleut pas et qu'il fait chaud, j'irai à la plage » ;
- « s'il ne pleut pas et qu'il fait froid, je ferai un pique-nique avec mes amis ».

Ces alternatives sont représentées à l'aide d'une table de décision et d'un arbre de décision (Figure 4-5) :

Pluie	Vrai	Faux	Faux
Chaleur		Vrai	Faux
Aller au CC	X		
Aller à la plage		X	
Pique-niquer			X

Table de décision



Arbre de décision

Figure 4-5 Connaissances exprimées sous forme de table et arbre de décision

Comme exemple d'implémentation de cette méthodologie on peut citer les travaux effectués dans LURPA-TOUR [Anselmetti 1994], [Chep 1992] (Figure 4-6). Ces développements concernent la fabrication de pièces de révolution par procédé de tournage.

Les approches algorithmiques sont adaptées à la génération des processus dans le cas des productions en faible série de nombreuses références de produits très différents. Les inconvénients de ces approches résident dans la formalisation difficile de l'expertise des gammiste et dans les capacités restreintes d'évolution des algorithmes développés.

Les approches génératives s'appuyant sur les techniques issues de **l'Intelligence Artificielle** sont généralement appelés systèmes experts. Inspirés des techniques de la Cognitique, science du traitement automatique de la connaissance, leur objectif est de modéliser et de simuler le raisonnement des experts à l'aide des ordinateurs en vue de générer les processus de fabrication. On peut citer, dans l'ordre chronologique de leur développement, les systèmes suivants s'appuyant sur ces approches : GARI [Descotte 1981], PROPEL [Tsang 1988] et GAGMAT [Durand 1990].

Les approches génératives peuvent être classées en trois catégories :

- *Ascendantes*. La génération du processus de fabrication consiste dans ce cas à considérer l'état final du produit comme point de départ et de remonter à partir de celui-ci jusqu'à l'état brut de la pièce.
- *Descendantes*. Il s'agit de la démarche inverse. On part de l'état brut de la pièce et on analyse les opérations qui permettent de réaliser le produit fini.
- *Mixtes*. Dans ce cas, le processus de génération de la gamme fait appel aux deux techniques : ascendante et descendante.

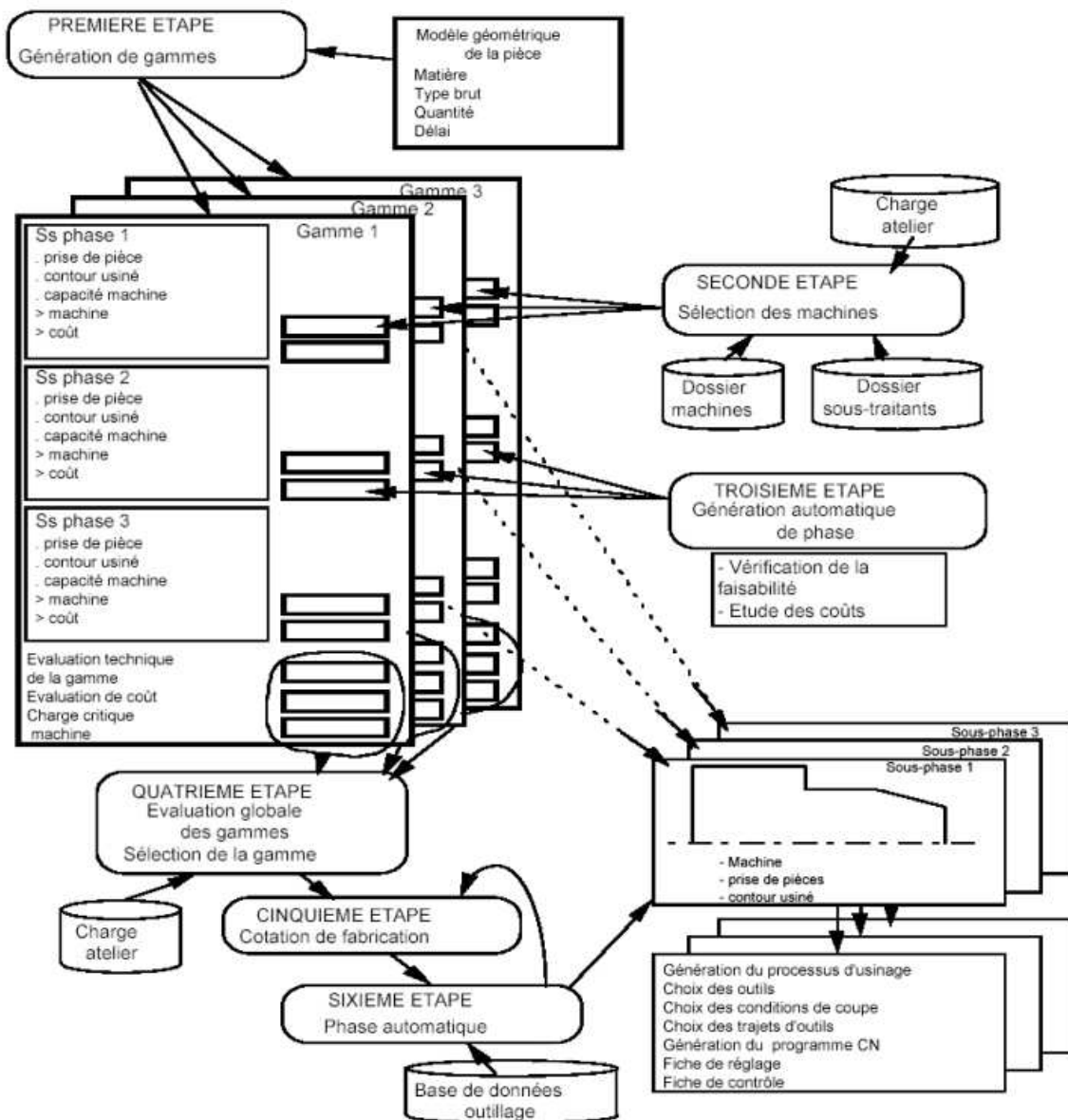


Figure 4-6 Génération de gamme par approche algorithmique (LURPA-TOUR)

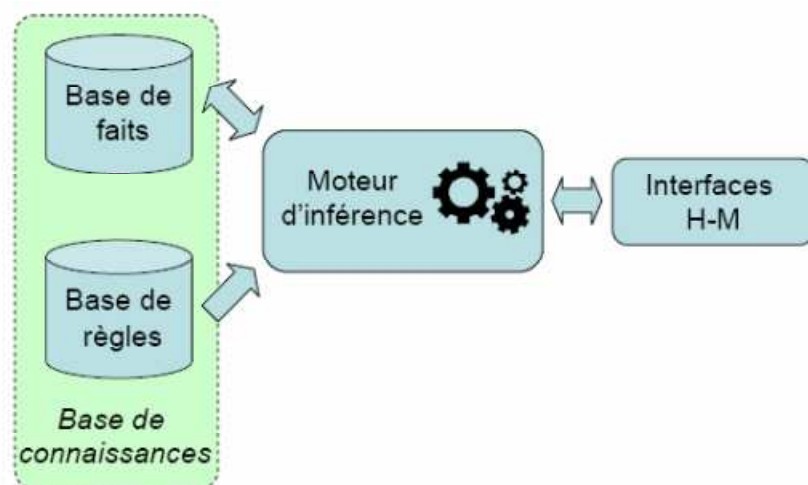


Figure 4-7 Principe de fonctionnement d'un système expert [Karkan 1993]

Un système expert est composé, comme présenté dans la **Figure 4-7**, de deux principaux éléments [Karkan 1993] :

- Une base de connaissances, constituée à son tour d'une base de faits et d'une base de règles ;
- Un moteur d'inférence.

La base de faits comporte l'ensemble de variables d'initialisation du système, les faits initiaux, ainsi que les faits générés par le moteur d'inférence. La base de règles contient les règles modélisant le processus de sélection des actions. Ces règles sont exprimées comme *règles de production* (SI (condition) ALORS (action)) ou comme *frames* (sous forme de tableaux contenant des attributs d'association et des restrictions).

Le moteur d'inférence permet de lancer le raisonnement logique et de déduire des nouveaux faits à partir de ceux existant dans la base de connaissances en employant les règles enregistrées. Ce processus de déduction de nouvelles règles et de nouveaux faits s'appelle chaînage. Trois types de chaînages existent :

- *Chaînage arrière*. A partir des faits recherchés par le problème, le moteur d'inférence déclenche les règles et tente de remonter aux faits connus qui rendent vrai les faits recherchés.
- *Chaînage avant*. A partir des faits connus et des règles de la base de connaissance, le moteur d'inférence tente de déterminer les faits recherchés du problème.
- *Chaînage mixte*. Le moteur d'inférence fonctionne dans ce cas par combinaison des deux premiers types : chaînage avant et arrière.

La majorité des systèmes experts sont écrits dans des langages déclaratifs, tels que LISP ou PROLOG. Leurs implémentation dans le milieu industriel n'est pas aisée et la majorité des approches génératives sous forme de système expert restent au stade de recherche.

Enfin, comme présenté dans la **Figure 4-2**, une troisième approche de génération des processus de fabrication existe. Il s'agit d'une approche mixte qui fait appel aux concepts et aux techniques issues de la génération par variantes et de l'approche générative.

2.3 Notre approche

L'utilisation des approches générative reste confinée aux procédés d'usinage pour lesquels un ample travail de formalisation a été effectué. L'utilisation d'une décomposition des pièces en entités élémentaires facilite l'implémentation des règles de fabrication. On ne peut pas faire les mêmes remarques pour le cas des procédés de fabrication des produits composites. La conception des pièces composites et de leurs processus de fabrication sont des phases qui sont traitées de manière globale et les connaissances manipulées ne sont pas suffisamment formalisées pour une approche générative de la définition du processus de fabrication.

Bien que les solutions de génération de processus dans le domaine d'usinage soient nombreuses, la génération des processus dans le domaine de la fabrication des composites est très limitée, voir inabordable. On peut citer comme verrous au développement de ces techniques dans le domaine des composites :

- La complexité des processus de fabrication, liée au fait que des nombreux procédés de mise en forme issus de domaines différents sont utilisés.
- Le manque de connaissances formalisées ou bien des modèles existants mais inadaptés à la problématique de génération des processus.

Les processus que nous analysons ne présentent pas un degré élevé de variation au niveau des choix dans le déroulement opératoire comme c'est le cas des processus d'usinage où des nombreuses combinaisons des posages et de l'ordonnancement des opérations sont possibles. Dans le cas des processus de fabrication des produits composites le séquençement des activités suit une disposition linéaire.

De ce fait, nous avons choisi de développer une application de génération de processus de fabrication basée sur une approche hybride inspirée des approches de technologie de groupe et de génération descendante de processus. Notre approche est plutôt algorithmique mais elle fait appel à des concepts relatifs aux systèmes issus de l'Intelligence Artificielle. Cet algorithme a été implémenté à l'aide du langage Visual Basic.

Pour résumer (voir la **Figure 4-8**), nous nous basons sur un regroupement des pièces en familles définies en fonction des coefficients de complexité du déroulement opératoire qui caractérise le processus de fabrication des produits analysés. Cette complexité du déroulement opératoire est directement liée au degré de complexité de la forme et de la structure du produit. Grâce à ces coefficients de complexité, pour un produit donné, on peut rechercher *les processus enveloppe* compatibles. Ensuite, en fonction de la possibilité de décomposition du produit en entités élémentaires (Caractéristiques Technologiques voir le Chapitre 3, section 3.6), on enrichit *le processus enveloppe* au niveau des *Activités d'Assemblage* par l'ajout des *Processus Intermédiaires* spécifiques à chaque CT. De manière descendante, on cherche les ressources possibles pour chaque activité à partir des états bruts jusqu'à l'état final du produit.

Les alternatives d'industrialisation (processus définis par l'ensemble de couples activités-ressources) apparaissent à plusieurs niveaux :

- Un processus enveloppe doit exister pour chaque processus type analysé. Dans notre cas deux processus type sont traités: un premier défini autour du procédé de moulage de préimprégnés et un deuxième défini autour du procédé d'infusion de résine liquide. Comme l'objectif principal de ce travail est de fournir une application de sélection des processus de fabrication basés sur le procédé classique, maîtrisé par l'industriel, et celui mis au point dans le cadre du projet CAPSAIRTM Des processus génériques additionnels peuvent être définis, si nécessaire ;
- Deux processus enveloppe sont définis pour chaque processus type. Ces deux classes ont été définies afin de pouvoir répartir les pièces selon leur complexité du déroulement opératoire. Suite aux entretiens avec les experts nous avons constaté qu'en fonction de la complexité de ces déroulements dans le cas du procédé de moulage des préimprégnés les pièces nécessitent une ou deux cuissons. Une cuisson est effectuée dans le cas d'une pièce de faible complexité et deux sont nécessaires pour les pièces complexes (existence d'une courbure et des composants intégrés tels que des âmes). De même, dans le cas du procédé d'infusion une pièce nécessite ou pas une étape de compactage supplémentaire. Cette étape de compactage est nécessaire dans le cas des pièces complexes afin d'assurer une stabilité dimensionnelle de la

pièce pendant le processus de fabrication et d'assurer l'obtention du taux de fibres requis.

- Plusieurs Processus Intermédiaires peuvent exister pour la fabrication d'une même Caractéristique Technologique.
- En théorie, lors de l'étape d'allocation des ressources on peut disposer d'une liste de ressources capables d'effectuer l'opération concernée. En pratique, les opérations constituant les processus de fabrication des composites utilisent des ressources spécifiques et on rencontre rarement ce type de choix. Néanmoins, dans le cas où ce choix existerait, les ressources doivent être comparées selon des indicateurs de capabilité.

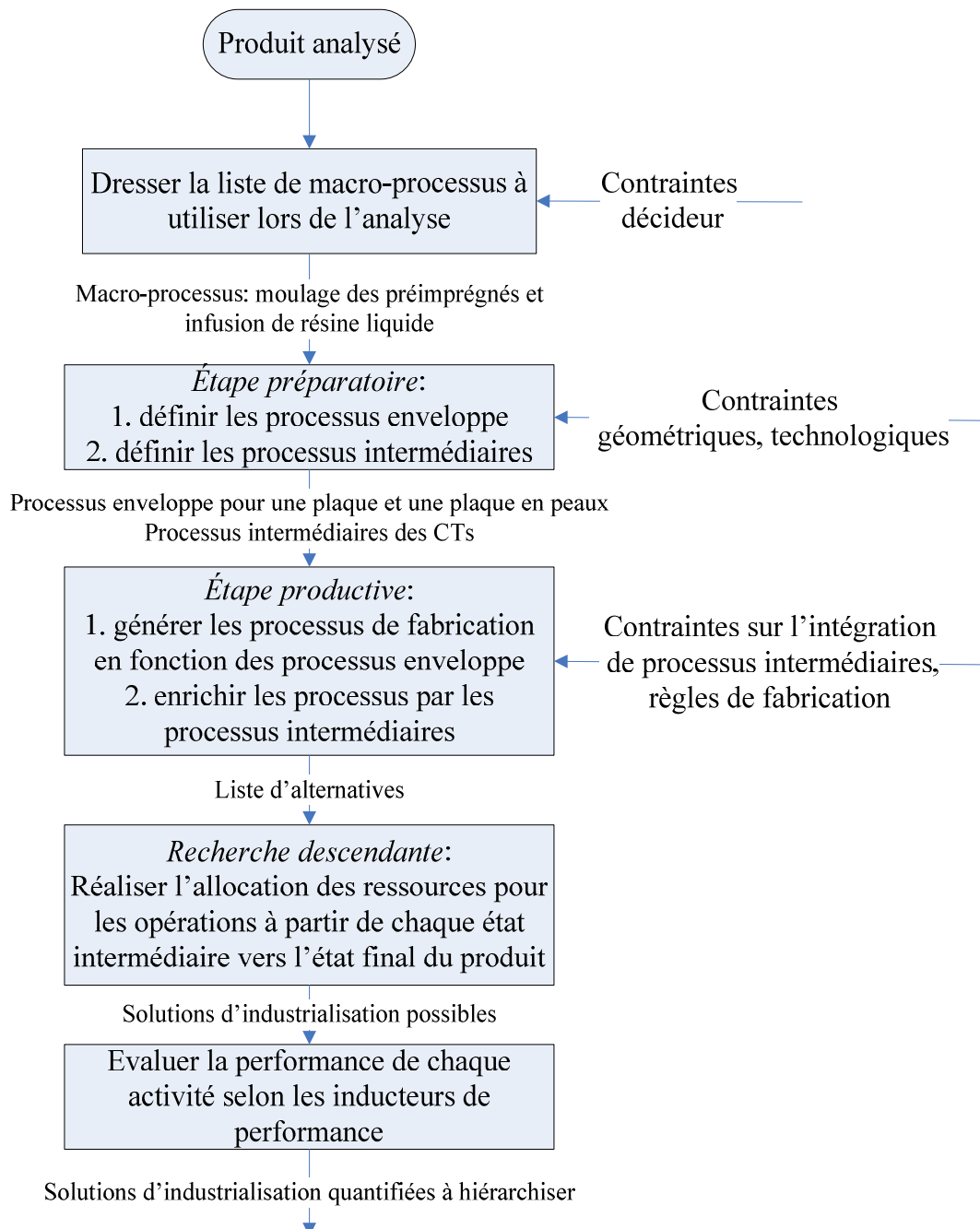


Figure 4-8 Démarche globale de génération de processus

Les sections suivantes décrivent en détail les principales étapes de notre approche.

2.3.1 Etape préparatoire

Cette étape est la première dans une approche de TG. Elle consiste à définir les familles de pièces dans lesquels on classe les pièces de l'entreprise selon des similarités morpho-dimensionnelles. L'objectif est de disposer d'une représentation formelle qui permettra de lancer un traitement informatique afin de générer le processus enveloppe de la pièce.

Dans notre cas, cette étape consiste à préparer les processus enveloppe des produits et les processus intermédiaires des Caractéristiques Technologiques. Une analyse de la structure géométrique du produit est à faire au préalable afin d'identifier les entités élémentaires auxquelles les processus intermédiaires seront associés. Cette étape n'est pas automatisée. Elle se déroule comme suit :

- *Les processus enveloppe* sont définis par l'expert et ils sont renseignés dans la base de processus enveloppe du logiciel. Ces processus sont constitués de l'enchaînement des principales étapes de fabrication du produit. La règle qui régit la définition de ces processus enveloppe est qu'en appliquant un tel processus on doit être capable de réaliser le produit de son état brut jusqu'à l'état final.
- *Les processus intermédiaires* sont définis également par l'expert. Un processus intermédiaire décrit une méthode de réalisation d'une entité élémentaire. Il est constitué de l'enchaînement des activités requises pour la fabrication de la CT concernée dès son état initial et jusqu'à l'état final. La définition des processus intermédiaires se fait d'abord en définissant l'ensemble d'états intermédiaires par lesquels la CT passe. Les passages d'un état à un autre définissent des domaines d'activités nécessaires à la transformation. L'enchaînement des domaines d'activités créent ainsi les processus intermédiaires.

Les processus intermédiaires symbolisent le passage de la CT par l'ensemble d'états intermédiaires : de l'état brut à celui qui impose une intégration au niveau du processus enveloppe. Les CTs sont regroupées dans des familles de pièces caractérisée par un même déroulé opératoire. Ce type de regroupement a été déjà utilisé dans le domaine de la forge [Thibault 2008] où des schémas de processus de fabrication sont utilisés pour caractériser des pièces similaires en termes de fabrication. Cette étape préparatoire est appuyée par des interfaces de capitalisation inspirées du concept de Carte de Visite (voir Chapitre 3, section 3.6). Ces cartes de visite sont utilisées d'abord pour renseigner les états intermédiaires de la CT et ensuite pour définir les activités et les ressources capables de réaliser la transformation d'un état en un autre. On obtient ainsi les processus intermédiaires possibles. Cette liste de processus intermédiaires possibles est renseignée sous forme de tables d'opération et de ressources.

Les processus enveloppe sont définis dans la même manière que les processus intermédiaires. A l'aide des cartes de visite les états intermédiaires sont définis comme une séquence d'états. Les activités et les ressources y sont associées. La seule différence est qu'on ne définit plus un ensemble d'activités possibles et plusieurs ressources pour une transformation d'état.

Selon les coefficients de complexité du déroulement opératoire, les processus enveloppe sont définis pour chaque processus type connu. De manière générale, la définition des processus enveloppe suit un ensemble d'étapes hiérarchisées comme schématisé dans la **Figure 4-9**.

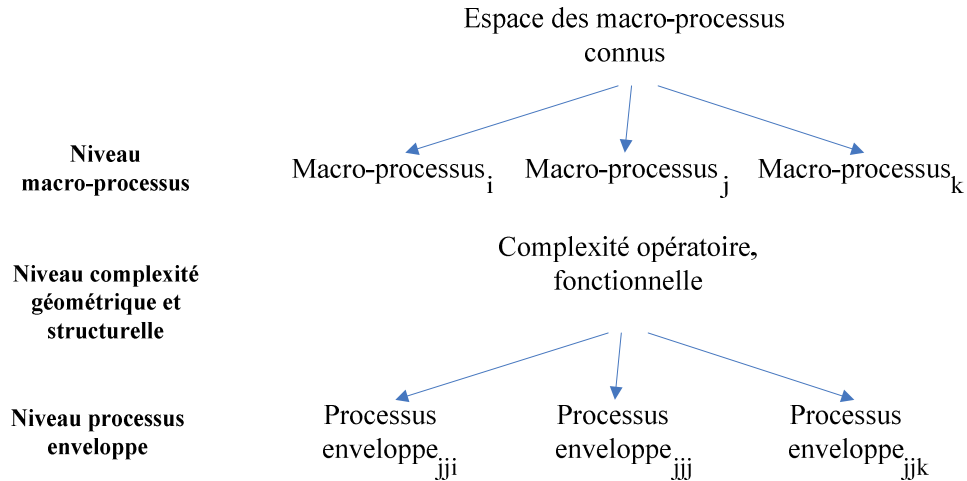


Figure 4-9 Définition des processus enveloppe

Dans la pratique, l'algorithme développé demande en entrée de renseigner le niveau de complexité du processus. C'est au décideur de choisir la complexité du déroulement opératoire car même si une pièce peut être classée dans une des deux classes de complexité, certains clients peuvent imposer un déroulement qu'on n'aurait pas choisi par défaut.

Remarques sur la définition de la complexité du produit

Pour la majorité des pièces mécaniques, la complexité est évaluée de manière qualitative sur une échelle d'évaluation verbale : complexité faible, moyenne, grande. Des formules ont été proposées dans certains domaines de fabrication afin de quantifier la complexité de la pièce et d'établir ainsi une relation avec le coût de fabrication.

Dans le domaine de la forge la relation la plus connue est le ratio de Von Spies :

$$S = \frac{M_f}{M_{of}} \quad (4.1)$$

Où : M_f représente la masse de la pièce forgée et M_{of} la masse du volume enveloppe de cette pièce.

Dans [Ou-Yang 1997] on montre une approche d'estimation des coûts d'usinage des pièces métalliques. Cette approche est basée sur le concept d'entité d'usinage et elle considère dans l'estimation du coût l'influence du couple complexité-état de surface de la pièce.

Ces approches peuvent constituer un point de départ pour notre cas d'étude mais la manière d'expression de la complexité du produit ne peut pas être utilisée dans l'état. Cela est notamment lié au fait que l'approximation de la dépendance du coût de la complexité du produit est considéré comme une fonction continue dans ces domaines qui n'est pas conforme à notre problématique.

[Kerbrat 2009] s'intéresse à la complexité de fabrication du point de vue des paramètres de conception qui en influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation pour un procédé donné. Des indices de complexité de fabrication calculés à partir de ces paramètres de conception permettent de la mesurer.

Dans notre travail nous avons besoin d'une relation entre la complexité de la forme et de la structure du produit et le déroulement opératoire requis par la fabrication de la pièce. L'estimation de cette relation par une fonction continue signifierait que pour une valeur quelconque de la complexité faisant partie d'un intervalle un déroulement existerait, ce qui n'a pas de sens.

Comme nous l'avons déjà précisé, dans ce travail nous considérons que la complexité est une donnée d'entrée sélectionnée par l'utilisateur à partir d'une liste de caractères ayant une signification pour l'expert du domaine des composites. Néanmoins nous nous proposons d'avancer quelques notions qui pourront servir de départ pour la définition des coefficients de complexité à utiliser de manière automatique. Il est à noter que dans le milieu aéronautique, fortement dirigé par les consignes des clients, les relations théoriques entre la complexité et le déroulement peuvent être contournés si le client l'exige. Ceci complique la tâche de formalisation.

Nous préconisons l'utilisation des tables qui permettent d'expliquer la relation entre la complexité du produit et le déroulement opératoire à suivre. Les paramètres du produit agissant sur la complexité peuvent être liés à sa forme et à sa structure mais aussi aux interactions complexes des cas de base. L'évaluation de la complexité nécessite des études complémentaires qui n'ont pas été abordées dans ce travail.

Les principales activités de transformation composant les processus enveloppe et les processus intermédiaires selon les morphologies des pièces sont regroupées dans des tables (Annexe 4 et Annexe 5). En analysant les pratiques de l'entreprise on peut dire qu'une pièce étant caractérisée par un déroulement opératoire simple peut être fabriquée en suivant le processus (**Figure 4-10**) :

Moulage de préimprégnés	Infusion de résine liquide
<i>1. Découpe plis</i>	<i>1. Découpe plis</i>
<i>2. Moulage plis</i>	<i>2. Moulage plis</i>
<i>3. Compactage pièce</i>	<i>3. Infusion pièce</i>
<i>4. Polymérisation pièce</i>	<i>4. Polymérisation pièce</i>
<i>5. Contrôle de la cuisson</i>	<i>5. Contrôle de la cuisson</i>
<i>6. Démoulage pièce</i>	<i>6. Démoulage pièce</i>
<i>7. Parachèvement</i>	<i>7. Parachèvement</i>
<i>8. Peinture</i>	<i>8. Peinture</i>
<i>9. Assemblage</i>	<i>9. Assemblage</i>
<i>10. Contrôle final</i>	<i>10. Contrôle final</i>

Figure 4-10 Processus enveloppe à déroulement simple

Plusieurs contraintes doivent être respectées dans cette phase type :

- Un compactage des plis drapés doit être ajouté avant cuisson pour chasser l'air emprisonné ;
- La polymérisation de la pièce doit être suivie par une étape de contrôle afin de décider si des retouches sont nécessaires ou non avant de poursuivre les étapes de fabrication restantes afin de minimiser les risques et les coûts liés à la non-qualité.

Une pièce complexe sera réalisée en suivant le processus enveloppe présenté dans la **Figure 4-11**. A part les contraintes présentées pour une pièce simple, cette phase doit assurer en plus les contraintes suivantes :

- Regroupement des opérations de découpe en une seule afin de débiter la panoplie dans une seule étape ;
- Séparation de l'empilement en peau externe et peau interne pour lesquelles des cycles consécutifs de cuisson (préimprégné) et une étape de préformage (infusion) sont définis

Moulage de préimprégnés	Infusion de résine liquide
1. Découpe plis	1. Découpe plis
2. Moulage peau externe	2. Moulage peau externe
3. Compactage peau externe	3. Préformage peau externe
4. Polymérisation peau externe	4. Moulage peau interne
5. Contrôle de la cuisson	5. Infusion pièce
6. Moulage peau interne	6. Polymérisation pièce
7. Compactage peau interne	7. Contrôle de la cuisson
8. Polymérisation pièce	8. Démoulage pièce
9. Contrôle de la cuisson	9. Parachèvement
10. Démoulage pièce	10. Peinture
11. Parachèvement	11. Assemblage
12. Peinture	12. Contrôle final
13. Assemblage	
14. Contrôle final	

Figure 4-11 Processus enveloppe d'une pièce complexe

Certaines pièces peuvent se situer à la frontière de deux classes. Dans ces situations, quand le décideur ne peut pas placer avec précision une pièce dans une classe ou une autre, on lui laisse la possibilité de lancer une analyse qui fait appel à l'ensemble de processus enveloppes issus des différentes classes définies. Ainsi, le décideur peut disposer d'une analyse de la performance de tous les processus afin de disposer de résultats comparatifs sans avoir à opérer des modifications de l'algorithme.

Le déroulement de l'étape préparatoire est résumé dans la **Figure 4-12**.

Ayant exprimé et capitalisé l'ensemble de processus enveloppe, caractérisant la totalité des pièces de l'entreprise, ainsi que les processus intermédiaires, caractérisant les étapes de fabrication des composants élémentaires des produits, on peut passer à l'étape suivante de l'algorithme qui consiste à générer les solutions d'industrialisation.

2.3.2 Etape productive enrichie par une génération descendante

Cette étape de l'algorithme a comme objectif d'exploiter les processus enveloppe ainsi que les processus intermédiaires afin de générer le déroulé opératoire de la fabrication du produit et de définir les solutions d'industrialisation en réalisant une allocation des ressources. Cette étape dispose des informations structurées en entrée et suite à l'application des procédures de l'algorithme une mise en relation logique de ces listes d'activités est réalisée.

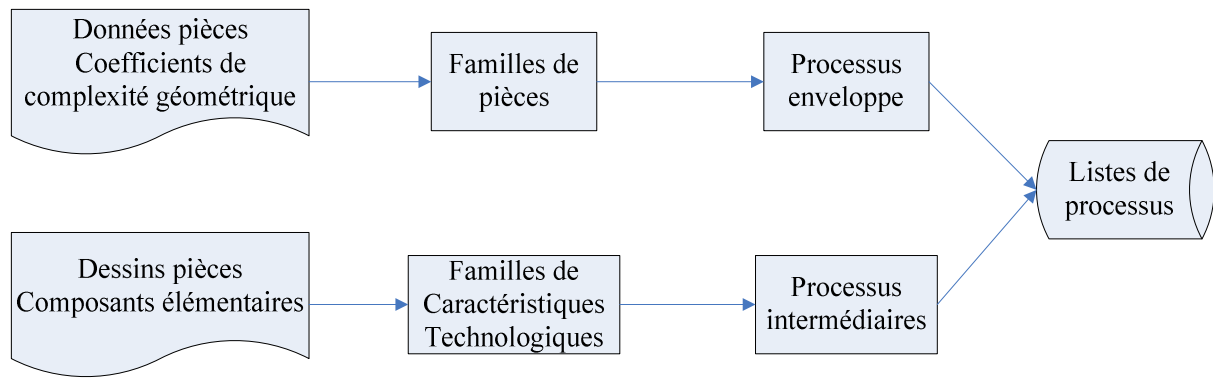


Figure 4-12 Déroulement de la phase préparatoire

Le logigramme qui explique le déroulement de l'étape productive est décrit dans la **Figure 4-13**.

Cette phase de la génération de processus de fabrication est composée des étapes suivantes :

1. En partant des données de description du produit, pour chaque processus type renseigné, une recherche parmi les processus enveloppe existants est réalisée. Les processus enveloppe correspondant aux processus type sont sélectionnés selon les coefficients de complexité du déroulement opératoire.
2. Une analyse de la structure du produit est réalisée. Si le produit est décrit uniquement par une des Caractéristiques Technologiques : *Plaque* ou *Plaque en peaux*, alors le processus enveloppe sera utilisé dans l'état, pas d'enrichissement de celui-ci étant nécessaire. Au contraire, si des composants élémentaires existent, autres que les deux mentionnés, un enrichissement du processus enveloppe par les processus intermédiaires est requis.

L'enrichissement des processus enveloppe se résume à analyser les contraintes d'antériorité entre les états intermédiaires du processus enveloppe et ceux des processus intermédiaires. Ces contraintes d'antériorité sont renseignées dès la phase préparatoire à l'aide des Cartes de Visite. Une recherche descendante est réalisée afin de vérifier la présence de ces contraintes à partir de l'état brut de la CT et jusqu'à son état final. On rappelle que cet état final de la CT représente un état d'assemblage imposé qui modélise le point du processus de fabrication à partir duquel la pièce de base et le composant élémentaire subissent ensemble des transformations. A partir de ce point on ne fait plus de distinction entre les deux pièces, il s'agit d'un assemblage ou d'une fusion du composant avec la pièce de base.

Ainsi, deux situations sont possibles :

- Toutes les activités du processus intermédiaire peuvent se dérouler en parallèle de celles du processus enveloppe. Dans ce cas c'est l'état final de la CT qui est caractérisé par une contrainte d'assemblage avec un des états liés au processus enveloppe.
- Une partie des activités du processus intermédiaire peuvent se dérouler en parallèle de celles du processus enveloppe et l'achèvement synchrone des branches en parallèle est nécessaire. Dans ce cas, c'est un des états intermédiaires de la CT qui est caractérisé par la contrainte d'assemblage et l'ensemble d'états restant jusqu'à l'état final sera intercalé selon une contrainte de précédence défini au niveau de l'état final de la CT.

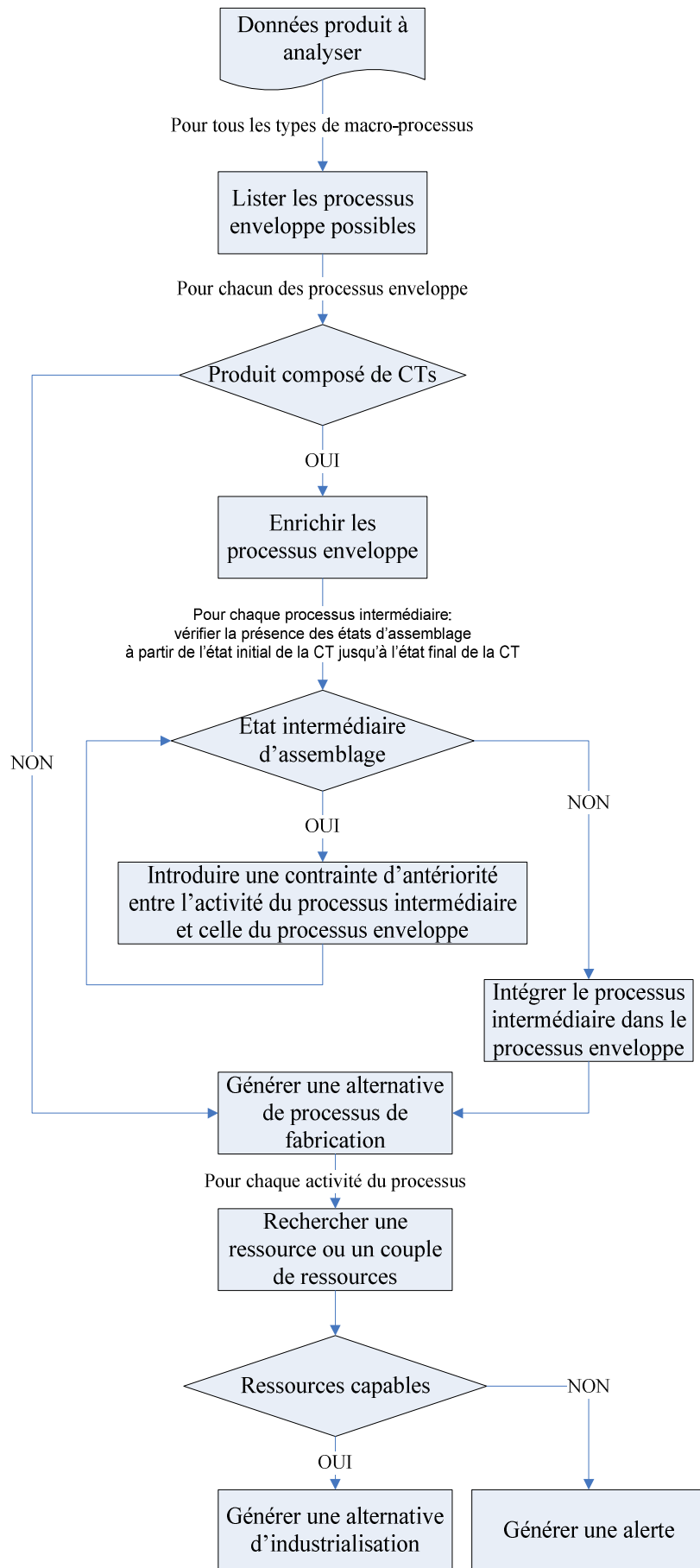


Figure 4-13 Logigramme décrivant le déroulement de l'étape productive

Après avoir parcouru l'ensemble de processus intermédiaires, l'état final associé au processus enveloppe impose l'arrêt de la recherche. A ce moment une alternative d'un processus de fabrication est disponible.

3. L'allocation des ressources s'effectue pour une alternative de processus de fabrication. Selon les activités contenues par le processus, les ressources capables sont associées à chaque activité selon des contraintes de validité qui expliquent l'appartenance d'une ressource à un domaine d'activités.

On retient une solution d'industrialisation uniquement si toutes les activités du processus généré disposent d'au moins une ressource. Des alertes sont générées dans le cas contraire afin que l'utilisateur puisse actualiser la base de ressources.

Le déroulement de l'étape productive est présenté dans la **Figure 4-14**. Il s'agit d'un enrichissement du déroulement de l'étape préparatoire.

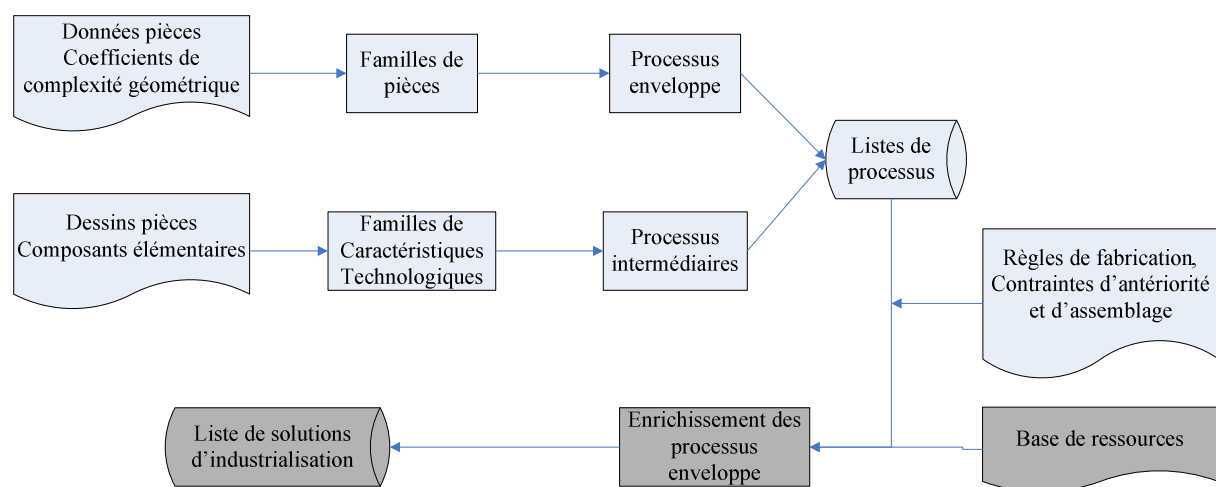


Figure 4-14 Déroulement de la phase productive

2.4 Illustration

On illustre cette étape de notre méthodologie en analysant le processus de génération pour le produit du cas d'étude introduit dans le Chapitre 3. Cette pièce d'étude ainsi que ces entités élémentaires sont présentées dans la **Figure 4-15**. Il s'agit d'un panneau sandwich qui est une pièce que l'on qualifie comme étant complexe car la présence de l'âme étagée galbée nécessite une étape supplémentaire d'ancrage du nid d'abeille entre deux cuissons de la peau externe et de celle interne pour le préimprégné. Afin d'obtenir un bon compactage dans la zone de raccordement de la peau externe, on ajoutera une étape de compactage intermédiaire. On souhaite disposer des indications sur la performance d'un processus d'infusion sans compactage intermédiaire. Ainsi, nous allons utiliser les deux gammes enveloppe comme si la pièce était classée dans les deux classes morphologique *plaque* et *plaque en peaux*.

Ce panneau est composé d'une âme étagée, en nid d'abeille dans laquelle des inserts métalliques taraudés seront intégrés. Cela nécessite implicitement l'ajout d'une CT de type densification. Un insert métallique fileté est disposé entre les plis de la peau interne. Le dernier élément intégré dans ce produit est une gouttière prévue à accueillir un support de

joint. Dans le cas du procédé de moulage de préimprégnés la gouttière est une pièce métallique rapportée sur le produit composite. Elle peut être réalisée en matériau composite dans le cas du processus d'infusion ; elle sera intégrée avant l'infusion de la pièce.

La **Figure 4-16** présente le résultat de la phase préparatoire suite à l'utilisation de l'algorithme proposé. Nous avons choisi de représenter les processus de fabrication générés à l'aide du formalisme proposé dans la méthode de modélisation de processus IDEF3. On y trouve les 3 processus possibles et les activités les composant. En jaune (couleur claire) sont figurées les activités qui résultent en premier. Elles représentent les activités contenues par les processus enveloppe. Les processus enveloppe seront enrichis par les activités imposées par les processus intermédiaires, figurées en bleu (couleur foncé), en fonction des Caractéristiques Technologiques composant la pièce.

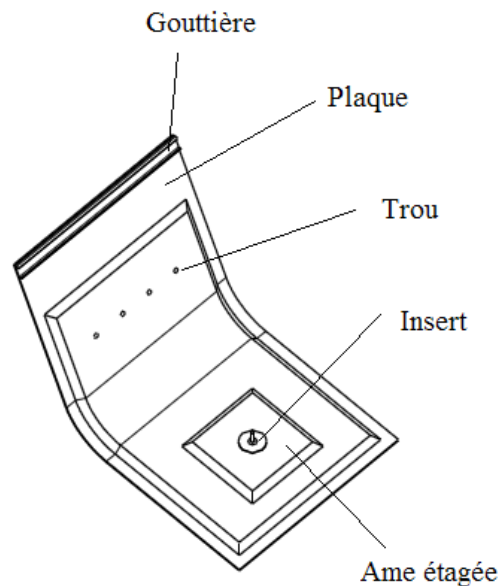


Figure 4-15 Panneau sandwich – Caractéristiques Technologiques

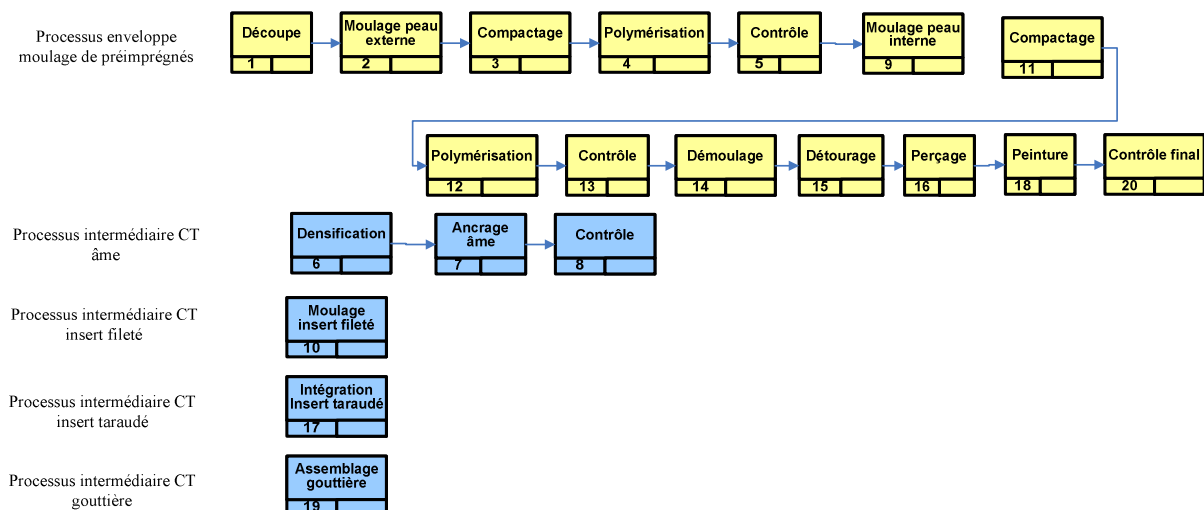


Figure 4-16 Résultat de l'étape préparatoire

Suite à l'étape productive on obtient les processus de fabrication par l'enrichissement des processus enveloppe en faisant appel aux processus intermédiaires selon les contraintes d'antériorités (**Figure 4-17**).

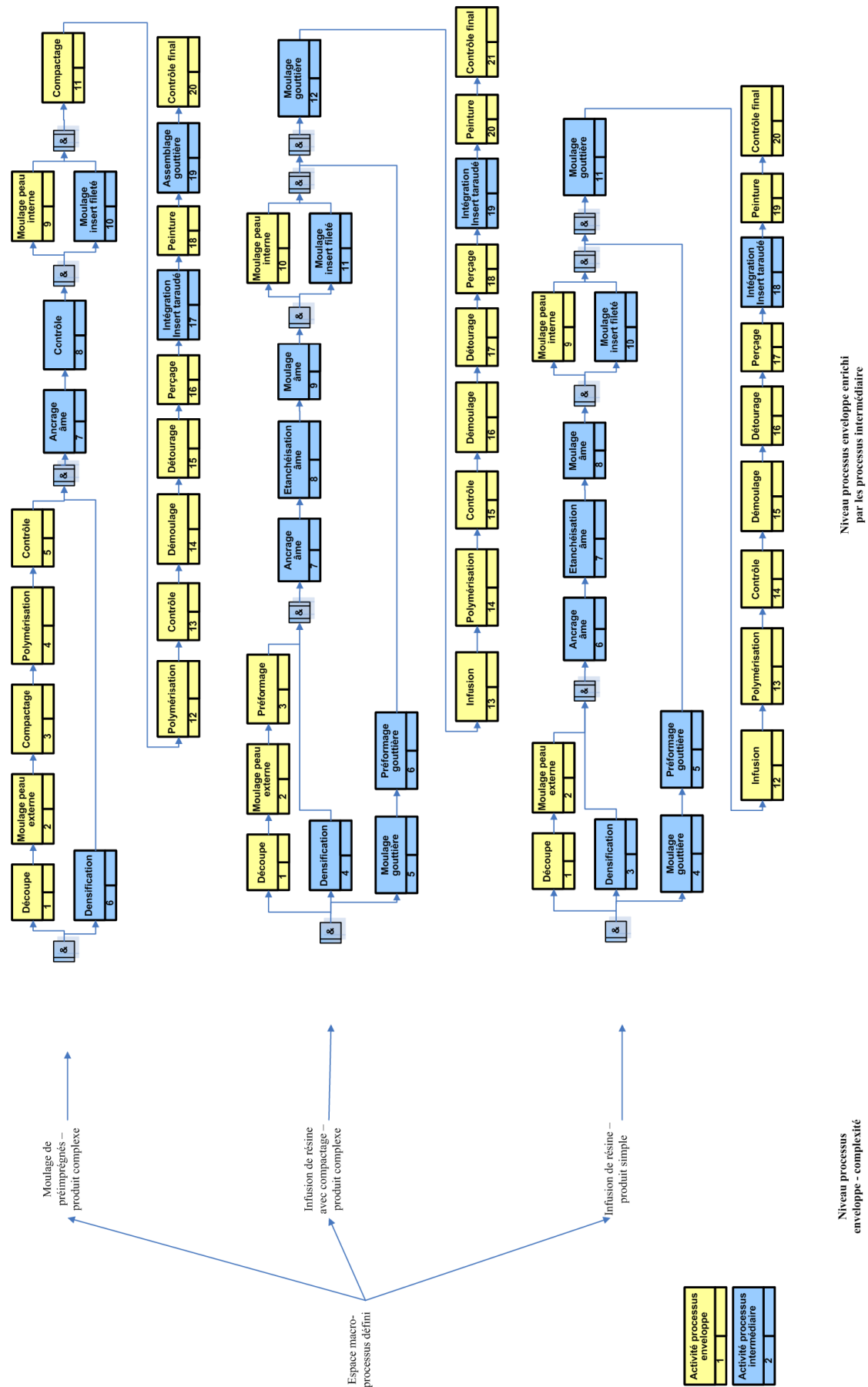


Figure 4-17 Exemple de génération : processus enveloppe enrichis par les processus intermédiaires

3. Les indicateurs de performance

Nous avons introduit dans la section précédente l'approche utilisée pour la génération des solutions d'industrialisation des produits composites (ensemble de processus de fabrication et de ressources capables de réaliser le produit analysé). Revenons à un des objectifs de notre travail : évaluation des solutions d'industrialisation. Ayant considéré deux processus type comme cadre de définition des solutions d'industrialisation, il est évident que plusieurs alternatives peuvent être proposées aux ingénieurs concernés par la conception préliminaire du processus de fabrication et de son environnement.

Afin de faciliter le processus de décision, une analyse de la performance des alternatives possibles doit être effectuée. Comme ce processus fait souvent appel à des multiples critères, nous devons identifier les indicateurs de performance selon lesquels les alternatives seront évaluées.

L'objet des sections suivantes est de présenter un ensemble de méthodes existantes articulées autour de l'estimation des coûts. Nous allons également introduire les indicateurs de performance considérés dans notre étude pour quantifier la performance des alternatives afin de les évaluer selon les mêmes critères de décision.

3.1 Notions générales

Un produit composite, comme tout autre produit fabriqué, est qualifié selon sa qualité (souvent sa performance mécanique et sa légèreté) et le coût de fabrication associé. Ces performances des produits sont influencées par les procédés utilisés pour la mise en œuvre des matières premières et par les ressources employées. En pratique, on fait souvent appel aux temps opératoires et aux coûts induits pour décider si un processus est viable ou pas. Il est également courant dans l'entreprise de fabrication de produits composites de faire appel à des approches d'estimation des coûts qui se basent sur des centres de coûts au risque de limiter la visibilité sur les entités élémentaires du processus et sur leurs influence de la valeur du produit. Ces approches offrent une vue globale mais parfois incomplète de la performance d'un processus.

Afin d'assurer une complétude de l'analyse de la performance d'un processus de fabrication d'un produit composite, nous allons chercher à identifier et à exprimer les indicateurs de performance pertinents pour aider la décision. Les domaines de ces indicateurs sont brièvement exprimés :

- **Qualité** : il s'agit d'une estimation du Taux Volumiques de Fibres et de la Masse du produit qu'un processus de fabrication permet d'obtenir.
- **Coûts** : une estimation des coûts de la matière première, des investissements à réaliser et des coûts des opérations du processus.
- **Délai** : il s'agit de disposer des estimations des temps de mise en œuvre de la matière au niveau de chaque opération.
- **Flexibilité** : il s'agit ici d'estimer l'efficacité de l'atelier et de fournir des indications sur sa capacité de pouvoir palier rapidement aux variations de la charge de l'usine dues aux variations des commandes des clients le long de la durée du programme.

En parcourant les méthodes d'estimation des coûts et de la performance des indicateurs nous allons choisir une qui sera adaptée aux besoins de quantification de ces critères. L'objectif est de disposer d'une approche de caractérisation et de quantification de la performance de chaque alternative pour établir une hiérarchie des solutions et aider leur sélection.

3.2 Les méthodes d'estimation des coûts

L'analyse des coûts d'un produit concerne l'ensemble d'étapes du cycle de vie du produit. Néanmoins, la majeure partie de ces coûts est connue dès les premières phases de la définition du produit. Ils sont déterminés en employant diverses méthodes d'estimation des coûts qui nécessitent plus ou moins de variables dans les calculs.

[Duverlie 1999] présente une classification des méthodes d'estimation des coûts comme suit :

- Méthodes paramétriques ;
- Méthodes analogiques ;
- Méthodes analytiques.

Les méthodes paramétriques se basent sur des caractéristiques physiques et sur des variables liées aux entités élémentaires (caractéristiques techniques et physiques) composant le produit final. Elles font appel à des relations mathématiques pour le calcul des coûts.

Selon [Duverlie 1999], trois méthodes se distinguent dans la littérature :

- *Les méthodes des barèmes* qui consistent à déterminer le paramètre technique le plus pertinent d'une activité afin d'estimer le coût.
- *Les modèles statistiques* utilisent des relations statistiques caractérisant l'ensemble d'activités de fabrication du produit et qui font appel à des données de description technique, à des relations mathématiques et à des constantes.
- *Les formules d'estimation de coût* qui font appel à des relations mathématiques faisant le passage entre une caractéristique d'un produit et un coût de réalisation.

Ces méthodes sont rapides à exécuter mais on peut lui reprocher le fait qu'elle n'est plus performante dans les analyses préliminaire quand tous les paramètres ne sont pas connus ou ils ne sont pas suffisamment explicités.

Les méthodes analogiques se basent sur des cas déjà traités afin d'y soustraire des indications sur les coûts et d'établir une estimation des coûts du projet analysé. Ces méthodes sont principalement axées sur la Technologie de Groupe et le Raisonnement à base de cas.

Selon [Duverlie 1999], les quatre principales étapes de mise en œuvre d'une méthode analogique sont :

- L'analyse du projet ou du produit : déterminer les paramètres pertinents de description ;
- La description du projet : traduire les paramètres pertinents dans le langage de description ;
- La recherche de projets ou de produits similaires : identifier les cas passés similaires à celui analysé ;

- La comparaison et le chiffrage : estimer le coût du produit selon les ressemblances et les différences du projet analysé par rapport au cas similaires.

Par rapport aux méthodes précédentes, celles analogiques permettent de s'affranchir de l'incomplétude des données. A partir des cas déjà traités, le système peut proposer des scénarios dans lesquels on évalue des valeurs arbitraires pour les données inconnues.

Les méthodes analytiques consistent à décomposer le processus de fabrication en étapes élémentaires et d'évaluer ensuite le coût de chacune d'entre elles.

Parmi les méthodes analytiques, nous avons fait le choix de traiter en détail la méthode ABC/M (Activity Based Costing/Management) [Kaplan 1992] à laquelle nous faisons appel pour mettre en œuvre notre méthodologie d'estimation des coûts. Cette méthode a été développée pour palier aux inconvénients des méthodes classiques d'estimation de coût appuyées sur des approches financières et qui associent un coût directement à un produit. La méthode ABC est basée sur le concept que les coûts peuvent être associés à des ressources consommées par des activités, elles mêmes consommées par des processus. On améliore ainsi la visibilité des coûts afin d'identifier la répartition des coûts et de faire ressortir ces activités qui n'apportent pas de valeur ajoutée

Cette méthode se base sur le concept d'inducteur de coût qui représente un événement associé à une activité et qui déclenche l'utilisation d'une ressource [Babad 1993]. Les principales étapes de la méthode ABC sont [Cokins 1993] :

- Identifier les ressources (les objets utilisés pour effectuer une étape d'un processus);
- Identifier les inducteurs des ressources (les entités qui établissent la liaison entre le coût des ressources et les activités)
- Identifier les activités (les étapes d'un processus ou les opérations de fabrication au sens restreint);

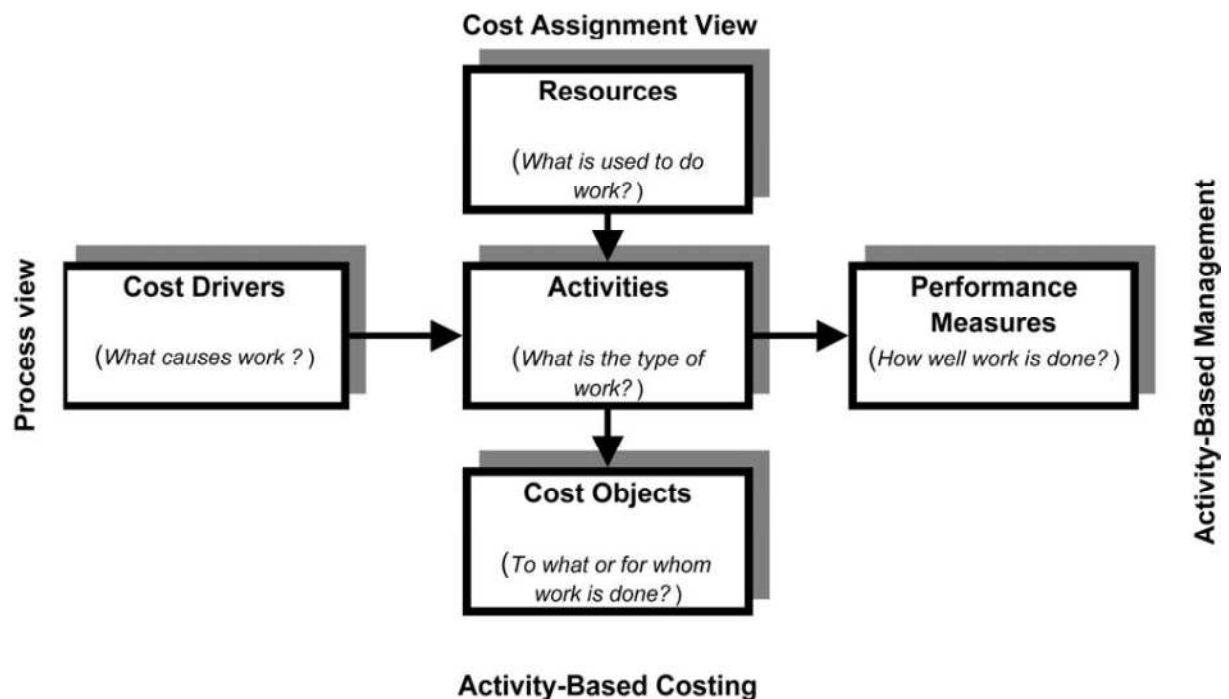


Figure 4-18 Système d'informations pour la méthode ABC/M [Gupta 2003]

- Identifier les inducteurs des activités (les entités qui permettent d'établir la liaison entre le coût des activités et le produit);
- Identifier les objets de coûts (ce qui est analysé : produit, processus, département *etc.*).

La différence entre la méthode ABC et la méthode ABM consiste à dire grossièrement que la méthode ABM représente la mise en œuvre de la méthode ABC. Cette mise en œuvre est caractérisée par la mise en place et par l'évaluation des indicateurs de performance du processus. La méthode ABC est une description détaillée et précise des coûts des activités de l'entreprise. La méthode ABM ajoute des mesures de la performance et une analyse de la valeur en vue d'aider la décision.

La **Figure 4-18** résume ces concepts. Il s'agit d'une adaptation [Gupta 2003] d'un modèle de représentation d'un système ABC/M proposé par Peter Turney qui symbolise l'articulation de cette méthode autour des activités ainsi que le passage de la technique ABC vers la technique ABM.

Dans le domaine des composites renforcés de fibres, la majorité des approches d'estimation des coûts se basent sur des méthodes paramétriques. Nous allons citer quelques exemples afin d'analyser les tendances du domaine, même si certains d'entre eux ne sont pas directement liés aux procédés traités dans ce travail et au domaine aéronautique.

Une étude de la fabrication d'une pale d'éolienne par procédé d'infusion de résine [Schubel 2010] est réalisée selon une approche paramétrique dans le but d'identifier les principales sources des coûts. Dans cette étude on s'intéresse à plusieurs scénarios de fabrication de cette pièce de grande taille. On fait varier dans ces scénarios les matières premières, les outillages, les équipements et la main d'œuvre. Dans cette étude on raisonne par centres de coûts :

- Taux d'intérêt et dépréciation ;
- Maintenance ;
- Utilités ;
- Encombrement et immobilier ;
- Outillages ;
- Main d'œuvre ;
- Matières premières.

Une autre étude [Verrey 2006] traite de l'analyse des coûts de fabrication selon la même méthode d'estimation des coûts cette fois ci appliquée à la production des planchers d'automobile selon le procédé Resin Transfer Moulding (RTM). Deux systèmes de résine sont analysés ainsi que les processus de mise en œuvre correspondants : un système époxyde (thermodurcissable) et un système polyamide réactive (thermoplastique). Un aperçu du modèle de coûts employé dans cette étude est présenté dans la **Figure 4-19**.

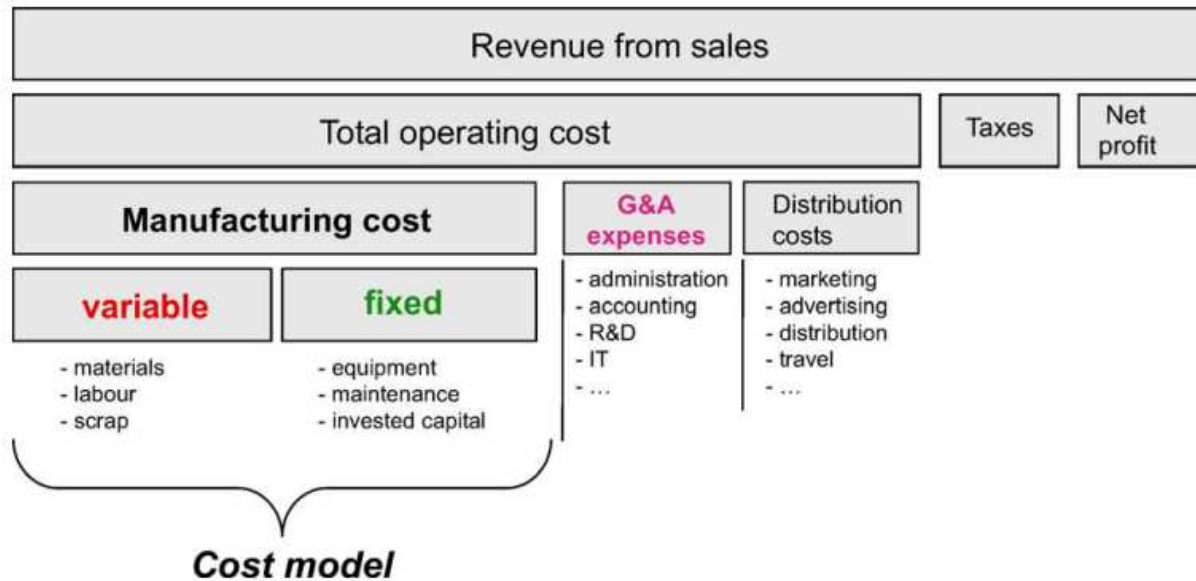
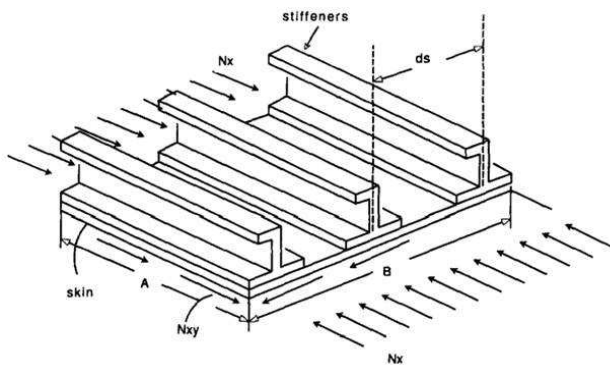


Figure 4-19 Décomposition des coûts pour la fabrication d'un plancher automobile [Verrey 2006]

Dans les deux études précédentes, à part l'estimation des coûts, ces méthodes ont été également déployées afin d'analyser la sensibilité des coûts aux variations des valeurs des variables considérées.

Dans un autre travail [Kassapoglou 1997] on vise à optimiser le coût et le poids d'un panneau composite auto-raidi. On vise à minimiser le coût et le poids de la pièce en fonction de différentes géométries. Les formules utilisées pour estimer les coûts de fabrication se basent sur les temps opératoires et sur des coefficients de complexité des produits (Figure 4-20). Les temps sont calculés en fonction des paramètres du produit (longueur, surface, périmètre) pour différentes étapes de l'opération de moulage.



$$C_p = k_1 A_r + k_2 P$$

$$C_o = k_3 L$$

$$C_i = k_4 L'$$

$$C_s = [C_1 AB + C_2 (A + B)] t / t_{ply}$$

$$C_{st} = [C_3 A_s + C_4 t_1 + C_5 t_2 + C_6 t_1^2] A / t_{ply}$$

Figure 4-20 Panneau auto-raidi et modèle d'estimation de coût [Kassapoglou 1997]

D'autres travaux font appel aux méthodes paramétriques d'estimation des coûts de fabrication dans le domaine des composites. [Akermo 2000] présente une étude du procédé de moulage par compression des thermoplastiques pour réaliser des panneaux et des pièces sandwich. [Apostolopoulos 2002] présente un travail dans lequel on s'intéresse à la minimisation du coût de fabrication des panneaux composites selon des formules basées sur les dimensions des pièces et des coefficients de complexité.

Dans [Eaglesham 1998] on propose un système d'aide à la décision pour l'estimation des coûts de fabrication des produits composites pour l'aéronautique. On s'intéresse dans ce

travail à l'application des techniques ABC/M pour estimer les coûts d'un processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés. Le champ d'application de ces méthodes est assez large pouvant toucher les différentes phases du cycle de vie d'un produit composite : conception, planification de la production, approvisionnements, assemblage et d'autres activités support de ces étapes. L'analyse de ces activités permettrait d'identifier les phases qui ajoutent de la valeur au produit.

Appliquée à notre travail, la technique ABC/M permet de développer les indicateurs de performance selon lesquels les processus de fabrication seront classés. Comme nous avons choisi de développer une méthodologie de génération des processus de fabrication employant un ensemble d'activités disponibles reliés par des règles de fabrication aux composants élémentaires du produit, cette technique d'estimation de coûts peut facilement être mise en œuvre. On remonte jusqu'aux solutions d'industrialisation en ajoutant les ressources consommées par chaque activité. L'ensemble de cette démarche est supportée par la mise en place des inducteurs au niveau des activités et des ressources qui permettent de finaliser l'évaluation par une estimation des coûts selon une décomposition détaillée des objets de coûts.

3.3 Indicateurs et inducteurs de performance utilisés dans notre étude

Nous nous basons sur une méthode analytique pour la définition des indicateurs de performance. Ils seront évalués pour chaque activité dans la majorité des cas. Certains indicateurs, tel que le Taux Volumique de Fibres, sont estimés pour un processus car leur évaluation au niveau des activités est difficile.

3.1.1 Evaluation de la qualité du produit

La qualité du produit est un critère important dans la sélection des processus de fabrication dans le domaine aéronautique. Des critères d'acceptation très sévères les caractérisent. Sachant que les procédés utilisés pour la mise en œuvre de ces matériaux sont très variables en termes de propriétés obtenues, il est important d'analyser, au moins d'une manière estimative, la performance des processus.

Nous avons choisi de considérer deux critères pour évaluer la qualité pouvant être obtenue par les processus de fabrication traités.

Le premier critère de qualité est le *Taux Volumique de Fibres (TVF)*. De cette valeur dépend directement les propriétés mécaniques des produits. Le processus de moulage des préimprégnés permet d'obtenir des TVF élevés grâce à l'utilisation de l'autoclave qui permet d'exercer une pression importante tout au long de la cuisson du produit. Dans le cas du processus d'infusion, vu que la mise en œuvre s'effectue à pression ambiante, le TVF obtenu est légèrement inférieur et des solutions complémentaires doivent être employées afin d'améliorer ce paramètre (bâches de compactage en silicone, étapes de compactage intermédiaire). Ce critère peut être estimé à partir des caractéristiques du renfort et de la matrice :

$$TVF = \frac{V_f}{V_f + V_m} \quad (4.2)$$

Des données précises doivent être utilisées dans le calcul du TVF. A l'étape à laquelle nous nous intéressons (définition préliminaire du processus), ces données peuvent être incomplètes. Ainsi, cette valeur sera une donnée d'entrée de l'analyse. Elle est soit récupérée à partir des cas déjà étudiés pour lesquels on connaît le TVF soit imposée par le décideur.

Le deuxième critère employé pour l'évaluation de la qualité est la *Masse du produit*. Il s'agit d'un critère couramment employé dans l'industrie aéronautique pour évaluer la qualité des produits fabriqués car la réduction du poids est un point très convoité. La légèreté des aéronefs implique des coûts d'exploitation réduits des appareils qui se traduit souvent par la possibilité de loger plus de passagers ou plus d'équipements. La masse du produits est estimée à partir de la masse des différents composants réalisés depuis l'état brut du produit et jusqu'à l'état final. Ainsi, on retrouve dans la masse finale la masse des composants suivants :

- Renfort et matrice ;
- Ame et plis de colle utilisés pour l'ancrage ;
- Inserts divers ;
- Les éventuels perçages doivent être pris en compte afin de déduire leur masse de la masse totale.

La masse des composants peut être exprimée soit en fonction de la masse surfacique (σ) et de la surface des composants (S), soit en fonction de la densité (ρ) et du volume des composants (V). Un volume enveloppe est défini pour pouvoir calculer la masse enlevée par perçage. La masse M est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot S_i + \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot V_j - \sum_{k=1}^n \rho_k \cdot V_k \quad (4.3)$$

Ces paramètres sont utilisés dans l'état comme indicateurs de performance et sont traduits en critères de sélection. Ils constituent la première famille d'indicateurs de performance. Ils interviennent également, en tant qu'inducteurs, dans le calcul des indicateurs de coût et de temps.

L'indicateur *TVF* est une des exceptions à la méthodologie d'estimation car il n'est pas calculé pour chaque activité mais il est estimé pour un processus de fabrication.

L'indicateur *Masse* est associé uniquement aux opérations qui appartiennent au domaine de moulage. C'est à ce niveau qu'en pratique la matière est ajoutée donc on considère judicieux de calculer la valeur de cet indicateur lors du déclenchement de ces activités. Les activités de perçage sont également concernées par l'association de cet indicateur.

L'indicateur *Masse* est l'indicateur principal utilisé pour la sélection des processus de fabrication. Quand un ingénieur est confronté au choix entre plusieurs technologies il basera son choix d'abord selon le poids du produit réalisé. A poids égal, d'autres indicateurs doivent être employés afin de clarifier le processus de décision.

3.1.2 Evaluation du délai d'obtention du produit

Le temps de fabrication est un critère additionnel utilisé dans le milieu industriel aéronautique pour départager plusieurs processus de fabrication. Cela résulte de l'existence de nombreuses opérations manuelles et des temps de cycle longs caractérisant la majorité des activités de mise en forme de la matière. Ainsi, un processus permettant de diminuer la durée de certaines étapes, ou bien d'intégrer la réalisation de plusieurs étapes en une seule, peut s'avérer plus viable industriellement. Cela permet d'immobiliser moins longtemps les ressources dans l'objectif de réduire les coûts de fabrication et d'augmenter la fluidité des flux.

Le temps total de fabrication correspondant à une activité (t_i) comprend le temps nécessaire à la préparation du poste (t_p) et le temps de transformation d'un état intermédiaire du produit en un autre (t_{tf}) :

$$t_i = t_p + t_{tf} \quad (4.4)$$

Le temps total de fabrication du produit (T_t) peut être calculé comme étant la somme des temps de chacune des activités nécessaires pour passer de l'état initial du produit à son état final :

$$T_t = \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.5)$$

Le temps de préparation est souvent une constante associée aux activités. Il correspond par exemple au temps nécessaire à la programmation de l'autoclave avant cuisson qui sera toujours une valeur invariante d'un lancement à un autre. Pour d'autres opérations ce temps doit être calculé en fonction des paramètres liés à la taille de la pièce. C'est le cas de l'opération de moulage qui nécessite une étape de préparation de la surface du moule. Cette étape préparatoire dépend ainsi de :

- La surface du moule, directement liée à la surface de la pièce ;
- Le type du produit de nettoyage et du produit démoulant à appliquer qui, selon les consignes du fabricant, impose un nombre de couches à appliquer et une durée d'attente entre le séchage de chaque couche.

Le temps de transformation est spécifique à chaque domaine d'activités et il dépend du procédé utilisé, de la ressource employée, du coefficient de complexité du produit *etc.* de manière générale, on peut calculer le temps de transformation selon :

- un coefficient de complexité (C_c) qui dépend de la difficulté de mise en œuvre de la matière selon la géométrie du produit ;
- la vitesse du procédé (v) liée au type de la matière première mise en forme et à la ressource utilisée ;
- la quantité de matière première (q) déterminée en fonction des paramètres de définition du produit.

Le temps de transformation d'une activité se calcule comme suit :

$$t_{tfi} = C_{ci} \cdot q_i / v_i \quad (4.6)$$

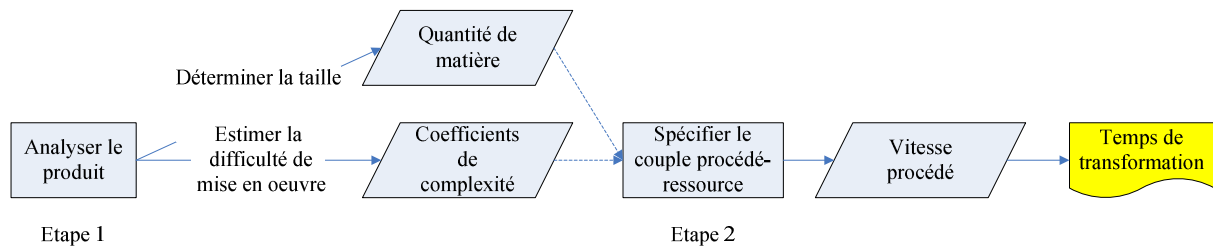


Figure 4-21 Représentation schématique de l'étape de calcul du temps de transformation

La **Figure 4-21** schématise l'étape d'identification des inducteurs nécessaires au calcul des temps de transformation.

Tableau 4-1 Inducteurs utilisés dans le calcul du temps par domaine d'activité

Domaine d'activités	Inducteurs utilisés pour déterminer la quantité	Unité de mesure de la quantité	Inducteurs utilisés pour déterminer la vitesse	Unité de mesure de la vitesse
Découpe	Surface pièce	m ²		m ² /min
Moulage	Surface pièce Nombre de plis	m ²		m ² /min
Infusion	Volume pièce Nombre de points d'injection	m ³		m ³ /min
Polymérisation	-	pièce	Nombre de paliers de cuisson Température de chaque palier Vitesse de montée en température Vitesse de refroidissement	pièces/min
Démoulage	Surface pièce	m ²		m ² /min
Détourage	Périmètre pièce Nombre de trous Pas des trous	m		m/min trous/min

Le **Tableau 4-1** résume les principaux inducteurs utilisés dans le calcul du temps de transformation pour les principaux domaines d'activités. Ces inducteurs concernent l'étape d'identification des variables de quantité utilisées en entrée et déterminées selon la définition du produit. Des inducteurs imposent, selon la matrice choisie, le temps de polymérisation. Dans ce cas, le temps de cuisson est un temps composé des durées de montée en température pour atteindre les paliers de maintien, la durée de chaque palier et la durée de refroidissement du produit.

Le temps total de fabrication sera utilisé en tant qu'indicateur de performance pour évaluer la performance de plusieurs processus de fabrication. Il sera également utilisé pour calculer le

coût d'opération selon les taux horaires spécifiques aux activités appelées par le processus de fabrication.

Des règles de fabrication issues de l'expertise des industriels sont utilisées afin de décider quelles opérations peuvent être réalisées en parallèle afin de pouvoir calculer un *temps de cycle* pour un produit. Ce temps sera utilisé dans l'estimation de la performance de l'atelier de fabrication associé à un processus.

3.1.3 Evaluation des coûts de fabrication

Les critères associés aux coûts de fabrication deviennent de plus en plus importants dans un processus de sélection des processus de fabrication. Les avancées technologiques font que des produits similaires en termes de performances mécaniques puissent être fabriqués en employant de nombreux procédés de fabrication. Le choix peut être ainsi aidé par l'utilisation d'une méthode d'estimation des coûts.

En employant une technique d'estimation des coûts, on cherche également à avoir un aperçu sur la répartition des coûts afin d'identifier quels points influent le plus sur le coût final. On s'intéresse également à avoir une vision sur les points qui permettent l'apport des solutions d'amélioration en vue de réduire localement les coûts. Ainsi, nous nous basons sur une technique ABC afin d'estimer les coûts suivants :

- Les coûts matières, liées aux types de matériaux imposés par l'architecture du produit ;
- Les coûts d'investissement, liés aux équipements utilisés ;
- Les coûts d'opération, spécifiques à chaque activité ;
- Les coûts de la sous-traitance.

Les coûts matières

Le coût matières se calcule comme suit :

$$C_m = t\% \cdot q \cdot P_u \quad (4.7)$$

Il s'agit de tenir compte de la quantité de matière (q) première utilisée à chaque étape. Pour chaque type de matériau utilisé lors de la définition des composants élémentaires du produit, on récupère le prix unitaire (P_u) correspondant. Certaines quantités doivent être augmentées afin de prendre en compte non seulement la quantité qui constitue le produit mais aussi la quantité perdue lors des étapes de débit. Cette augmentation est une estimation par rapport à la quantité de matière constituant le produit. Elle apparaît dans le coût matière sous la forme d'un pourcentage représentant le taux de chute (t%). La **Figure 4-22** résume cette étape.

Le taux de chute est associé à plusieurs étapes de fabrication. Pour l'opération de découpe il s'agit d'associer au coût du produit le coût de la matière perdue à cause de la manière de disposition des plis par rapport à la surface du rouleau de tissu. L'opération d'infusion fait également apparaître un taux de chute. Dans ce cas, il s'agit d'estimer la quantité de résine perdue après l'infusion de la pièce à cause de la matière restant dans les tuyaux constituant le système d'infusion et dans les différents composants du kit de mise sous vide de la pièce.

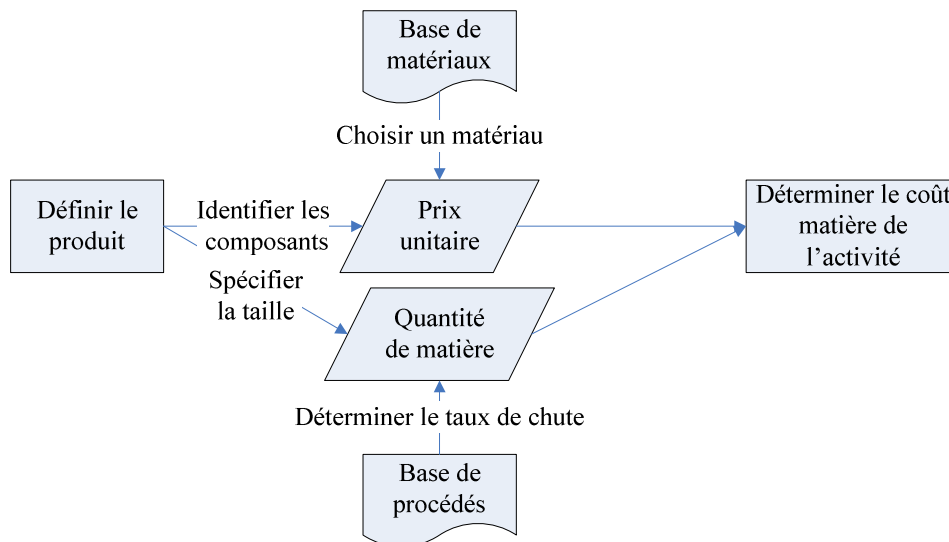


Figure 4-22 Schéma de principe de l'étape de calcul du coût matières

Tableau 4-2 Variables utilisées pour déterminer la quantité de matière première

Type de matériau	Quantité utilisé dans le calcul du coût matières	Unité de mesure	Variables utilisés pour déterminer la quantité	Unité de mesure
Tissus	Surface	m ²	Nombre de plis Surface pièce	m ²
Matériau d'âme	Surface	m ²	Surface âme	m ²
Plis de colle	Surface	m ²	Nombre de plis Surface âme	m ²
Résine	Volume	l	Epaisseur pièce Surface pièce Taux de fibres Densité de la résine	mm m ² kg/m ³
Kit de marouflage	Surface	m ²	Surface pièce	m ²
Résine densification	Volume	l	Nombre de zones densifiées Surface densifiée Hauteur de l'âme Densité de la résine	m ² mm kg/m ³
Produits achetés	Pièce		Nombre de composants	Pièces

Le **Tableau 4-2** résume les variables utilisées pour le calcul des quantités de la matière première utilisée dans le calcul du coût matière d'une activité. Dans le cas des composants assemblés au produit, le prix unitaire du composant acheté est utilisé dans le calcul du coût matière de l'activité.

Les coûts d'investissement

Le coût d'investissement est un indicateur de performance prévu à estimer les charges de l'entreprise liées à l'acquisition et à la maintenance des ressources inanimées. Ce coût se calcule en fonction des deux composants :

$$C_I = \left(\frac{P_a}{U} + M \right) \cdot \frac{1}{\text{taille de série} [\text{nb. de pièces / an}]} \cdot p\% \quad (4.8)$$

Où : C_I représente le coût d'investissement d'une ressource consommée par une activité ;

P_a est le prix d'achat de l'équipement ;

U représente le nombre d'années d'utilisation de l'équipement (la durée sur laquelle l'équipement sera amorti) ;

M symbolise le coût de maintenance par année ;

$p\%$ est un coefficient prévu à estimer le taux d'utilisation d'un équipement ;

Comme indiqué par l'équation 4.8, le coût de possession est calculé en supposant une dépréciation linéaire de l'équipement. Pour simplifier les calculs, ce coût ne tient pas compte des intérêts associés aux éventuels crédits souscrits pour l'acquisition de la ressource.

Dans le cas des outillages de moulage, une estimation du coût peut être réalisée en fonction de la surface de la pièce ou du volume de la pièce à réaliser. Ces estimations sont basées sur l'expertise conjointe de l'entreprise (expertise basée sur la similarité entre la pièce à analyser et des pièces fabriquées précédemment) et du fournisseur d'outillages (expertise basée sur la division des coûts de réalisation des outillages : matières, conception, réalisation).

Dans notre cas de figure, nous avons intégré les connaissances du fabricant d'outillage³ afin de disposer d'une estimation des coûts d'acquisition des outillages en fonction de la définition du produit.

Les coûts d'opération

Le coût d'opération permet d'estimer le coût associé à l'utilisation d'une ressource par une activité. Le coût d'opération (C_o) est composé du coût de la main d'œuvre (C_{mo}) et du coût des ressources physiques (C_r) :

$$C_o = C_{mo} + C_r \quad (4.9)$$

Le coût de main d'œuvre est déterminé en fonction du temps total d'une activité (t), du nombre d'opérateurs (N) nécessaires à effectuer cette activité et du taux horaire (TH) spécifique au niveau de qualification de l'opérateur sélectionné :

$$C_{mo} = t \cdot N \cdot TH \quad (4.10)$$

Le temps de main d'œuvre est caractérisé par une variabilité importante. Il est clair que le temps opérateur tient compte du temps passé à maîtriser le procédé et à améliorer sa vitesse de travail. Ainsi, au cours d'un programme de fabrication, cette durée peut diminuer. Dans la

³ Connaissances intégrées à partir de l'expertise de l'entreprise : Ateliers CINI SA, Tomblaine, partenaire dans le cadre du projet CAPSAIRTM

pratique industrielle, les courbes d'apprentissage sont utilisées afin d'estimer cette réduction des temps de main d'œuvre. Les courbes d'expérience peuvent être également employées en vue d'avoir une analyse plus globale sur l'effet de l'utilisation des tâches routinières sur les coûts de fabrication. Il est admis qu'en doublant la quantité de produits fabriqués les coûts de fabrication diminuent de manière prévisible et ces réductions peuvent atteindre la valeur de 30%.

Le modèle le plus usité est celui de Wright [Wright 1936] :

$$T_{2i} = kT_i \quad (4.11)$$

Où : T_i et T_{2i} représentent les temps de fabrication de la pièce i et de la pièce $2i$ respectivement ;

k est un coefficient d'apprentissage global.

Le temps de la pièce i peut être calculé en fonction du temps de fabrication de la première pièce (T_1) comme suit :

$$T_i = T_1 k^{\frac{\ln i}{\ln 2}} \quad (4.12)$$

La valeur du coefficient d'apprentissage est, dans le cas de la fabrication en matériaux non conventionnels, égal à 0,95 [Bellut 1991].

Comme la planification n'est pas l'objectif principal de ce travail, les temps de fabrication liés à la main d'œuvre sont considérés constants dans le temps. Pour des analyses complémentaires, le décideur peut effectivement prendre en compte ce type de modèle afin d'estimer la variation du coût de la main d'œuvre.

Le coût d'une ressource se calcule en fonction de la consommation d'énergie et des frais d'immobilisation de la ressource en cause. Ces quantités sont traduites sous forme de taux horaire. Le temps total de l'activité intervient dans le calcul du coût d'opération d'un équipement. Comme certains équipements peuvent travailler en même temps sur plusieurs pièces, le coût est reparti entre ces pièces grâce à un coefficient de répartition (c_r) :

$$C_r = t \cdot TH \cdot c_r \quad (4.13)$$

Comme parfois les données liées à la consommation énergétique des ressources ne sont pas déterminées avec précision, un taux horaire global est utilisé en entreprise afin d'estimer la charge d'un atelier spécifique. Nous laissons le choix à l'utilisateur de définir le mode de calcul des coûts d'opération. Dans le cas où un taux global est utilisé, on fait abstraction du nombre total de ressources employées par les activités et on se fie uniquement au temps de l'activité et au taux horaire de l'atelier.

Les coûts de la sous-traitance

En général, une entreprise peut faire appel à une activité de sous-traitance dans les cas suivants :

- l'entreprise ne dispose pas de compétences ou d'équipements nécessaires à la réalisation d'une opération de fabrication ;

- l'entreprise ne dispose pas d'assez de capacité pour répondre aux carnets de commandes ;
- l'entreprise n'est pas rentable pour une opération considérée et la sous-traitance permettraient de diminuer les coûts des activités concernées.

Dans ces situations les coûts sont calculés pour l'activité considérée comme s'ils étaient associés à des composants achetés. Il s'agit donc de considérer le coût de l'activité sous-traitée en tant que coût matières.

3.1.4 Evaluation de la performance de l'atelier de fabrication

Un indicateur est introduit afin d'évaluer la performance de l'atelier associé à un processus de fabrication possible. On l'appelle indicateur de flexibilité car on essaye d'évaluer la capacité de réponse du système de production aux fluctuations de la demande. Il est clair que dans le cas du processus basé sur le procédé de moulage des préimprégnés l'atelier est contraint par une ressource à capacité limitée (autoclave). On arrive à s'affranchir de ce problème lors de la mise en place d'un atelier d'infusion car l'outillage est autonome, la production étant limitée uniquement par le nombre d'outillages ou bien par des contraintes externes.

Cette notion n'est pas développée en détail dans ce travail. Comme les données sur la configuration de l'atelier futur sont imprécises à ce stade de conception préliminaire des processus, nous basons l'analyse de la performance de l'atelier sur des estimations. La performance de l'atelier peut être évaluée en utilisant un indice de fluidité associé au flux des matières dans un cas précis d'organisation de l'atelier. Cet indice peut se calculer de la manière suivante :

$$I_f = \frac{T_p}{T_{em}} = \frac{T_p \cdot C}{nb. \text{ moyen de pièces en en - cours}} \quad (4.14)$$

Où : I_f est l'indice de fluidité ;

T_p représente le temps de production d'une pièce ;

T_{em} est le temps d'écoulement moyen ;

C représente la capacité de l'atelier (pièces/heure).

Il est trop tôt pour s'intéresser à ce stade de l'analyse à ces inducteurs de performance qui entrent dans la définition de l'indice de fluidité. Le décideur peut même considérer que ces données ne soient pas suffisamment décrites et pas assez pertinentes pour cette phase d'estimation. Nous nous résumons dans ce travail à calculer l'indicateur de flexibilité comme étant le rapport entre le temps de production d'une pièce et le temps total de fabrication. De cette manière nous pouvons estimer la performance d'un processus du point de vue organisationnel. Ainsi, un processus permettant l'intégration de plusieurs étapes de fabrication en une seule sera favorisé car le temps de production sera plus faible que dans le cas d'un processus caractérisé par une succession de postes élémentaires. L'outillage devient disponible plus tard dans le dernier cas. Plus de valeur ajoutée est associée aux activités permettant cette intégration. Cet apport de valeur ajoutée se traduit également par la réduction des phases de préparation. Nous calculons l'indicateur de flexibilité (I_F) comme suit :

$$I_F = \frac{T_p}{T_t} \quad (4.15)$$

Cet indicateur est une mesure globale de la performance du processus. Dans notre analyse, la valeur obtenue pour cet indicateur est transformée dans une échelle numérique afin de pouvoir l'exploiter lors de la hiérarchisation des alternatives de fabrication (section 5.2).

4. Le classement des processus de fabrication

Nous avons présenté dans la section 2 de ce chapitre notre approche pour la génération des processus de fabrication pour le domaine abordé : fabrication des pièces aéronautiques par le procédé de moulage des préimprégnés et par le procédé d'infusion de résine. Une fois les alternatives des gammes de fabrication générées lors de cette phase d'étude préparatoire à l'industrialisation des produits, l'ingénieur doit faire un choix à partir de la liste de processus possibles. Notre objectif est d'apporter une méthodologie et des indicateurs comme aide au processus de décision. Dans les sections qui suivent, nous allons passer en revue les méthodes de classement et nous allons présenter en détail une méthode (choisie parmi celles présentées) permettant d'établir une hiérarchie des alternatives et de donner les indications support de la décision de l'utilisateur chargé de l'analyse d'industrialisation des produits considérés.

On établit un classement en vue de faciliter le choix du décideur. La plupart des travaux concernant la sélection d'un procédé de fabrication se limitent à l'étude d'un seul critère de performance, que se soit un paramètre économique ou bien un lié à la performance mécanique du produit. En réalité, le processus de sélection d'un procédé est rarement assujéti à un niveau de performance évalué par l'intermédiaire d'un seul critère. Si on va plus loin et que l'on s'intéresse à la sélection d'une solution d'un processus de fabrication d'un produit complexe ou bien de la solution d'industrialisation correspondante, le niveau de complexité de la phase de décision augmente. Cette complexité est liée en grande partie à l'existence de multiples critères à prendre en compte, critères souvent contradictoires et explicités de manière quantitative et/ou qualitative.

De ces faits, nous avons décidé de nous intéresser aux méthodes de classement multicritères afin de sélectionner une parmi une liste non-exhaustive présentée dans les sections suivantes.

4.1 Les méthodes de classement multicritères

L'analyse multicritère ou les méthodes d'aide à la décision multicritères sont composées d'un ensemble de méthodes permettant d'agréger plusieurs critères avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs alternatives ou solutions. L'objectif de ces outils est d'intervenir dans la phase de prise de décision et d'apporter un support au décideur quand il est confronté à plusieurs points de vue exprimés sous forme de critères qualitatifs ou quantitatifs et qui caractérisent la performance des alternatives. Souvent, on ne cherche pas une solution optimale mais un ensemble d'alternatives au problème spécifié.

Les principales étapes rencontrées lors de la mise en œuvre d'une telle démarche sont :

- L'identification de l'objectif global ;

- L'établissement d'une liste d'actions possibles ou d'alternatives ;
- L'identification des critères pertinents pour la prise de décision ;
- L'évaluation de la performance de chaque alternative par rapport à chaque critère ;
- L'intégration des indications obtenues à l'aide de chacun des critères afin de dresser un classement des alternatives et de choisir éventuellement une satisfaisant au problème traité.

Généralement, l'utilité d'une alternative en fonction d'un critère spécifique est définie comme un poids dans la majorité des méthodes de classement. Toutes les méthodes suivent les quatre premières étapes de la même manière. La différence entre les méthodes se fait au moment de la mise en œuvre de la dernière étape. C'est le raisonnement effectué lors de l'intégration des indicateurs en vue d'établir une hiérarchie qui est spécifique à chaque méthode.

Selon [Scharlig 1999], qui dresse un panorama des méthodes d'aide à la décision multicritères, on peut classer ces méthodes en trois grandes familles :

- *Méthodes d'agrégation complète.* Si n critères sont pris en compte lors de l'analyse, les valeurs de tous les critères sont intégrées en une seule représentant la performance globale de l'alternative.
- *Méthodes d'agrégation partielle.* On cherche à établir des comparaisons binaires des performances de chaque alternative par rapport à un seul critère et d'établir des relations de surclassement entre les alternatives.
- *Méthodes d'agrégation locale.* Il faut d'abord déterminer une solution de départ aussi bonne que possible. Ensuite, d'une manière itérative, il faut explorer l'espace de cette alternative afin de trouver une meilleure solution.

Nous allons dresser une liste des méthodes existantes et expliciter leurs principales caractéristiques dans les sections suivantes.

4.1.1 Les méthodes d'agrégation complète

Dans le cas de ces méthodes on commence par définir des fonctions de valeur partielle pour chaque critère. Les valeurs partielles sont agrégées ensemble avec les préférences entre chaque critère afin de déterminer la performance globale d'une alternative. Les principales méthodes de d'agrégation complète sont les suivantes :

La méthode de la somme pondérée (WSM – Weighted Sum Method)

Il s'agit d'une méthode facile à mettre en œuvre. Le décideur doit accorder d'abord des poids à chacun des critères. Il note ensuite chaque alternative pour évaluer leur performance par rapport à chaque critère considéré. Une somme pondérée indique la performance globale de l'alternative.

Ainsi, pour un problème d'analyse multicritères caractérisé par m alternatives évaluées par rapport à n critères, le classement s'effectue comme suit :

- *Pour des critères de bénéfice* (plus les valeurs des critères sont grandes, meilleure est l'alternative)

$$A_i = \max \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j, i = 1..m \quad (4.16)$$

- *Pour des critères de coût* (moins les valeurs des critères sont grandes, meilleure est l'alternative)

$$A_i = \min \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j, i = 1..m \quad (4.17)$$

Où : A_i représente la performance globale de l'alternative i ,
 a_{ij} est la valeur de la performance de l'alternative A_i évaluée par rapport au critère j ,
 w_j est le poids du critère j .

La méthode du produit pondéré (WPM – Weighted Product Method)

Il s'agit d'une méthode similaire à la précédente. Chaque alternative est comparée aux autres afin d'établir des ratios totaux selon les produits des ratios de chaque critère. Chaque ratio est élevé à la puissance donnée par le poids relatif du critère concerné.

Ainsi, pour un problème d'analyse multicritères caractérisé par m alternatives évaluées par rapport à n critères de bénéfice, le classement s'effectue comme suit :

$$R\left(\frac{A_K}{A_L}\right) = \prod_{j=1}^n \left(\frac{a_{Kj}}{a_{Lj}}\right)^{w_j}, K, L = 1..m \quad (4.18)$$

Où : $R\left(\frac{A_K}{A_L}\right)$ représente le ratio de la comparaison de l'alternative A_K par rapport à l'alternative A_L . Si ce ratio est supérieur à 1, le ratio R montre que l'alternative A_K est plus performante que l'alternative A_L .
 a_{ij} est la valeur de la performance de l'alternative A_i évaluée par rapport au critère j ,
 w_j est le poids du critère j .

La méthode AHP (Analytic hierarchy process)

La méthode AHP [Saaty 1980] consiste à décomposer le problème analysé en une hiérarchie à plusieurs niveaux contenant les critères d'évaluation ainsi que les alternatives. Une fois la hiérarchie établie, des comparaisons binaires sont effectuées à chaque niveau afin d'établir la préférence relative entre les éléments comparés. On renseigne de cette manière un ensemble de matrices de jugement qui permettent de remonter par normalisation à la performance d'une alternative.

Dans le cas d'une analyse multicritères basé sur la méthode AHP, le calcul des performances des alternatives se fait selon le modèle global suivant. Le raisonnement sera développé dans la suite du document.

$$A_i = \max \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j, i = 1..m \quad (4.19)$$

La méthode MAUT (Multi Attribute Utility Theory)

Cette méthode [Keeney 1976] se base sur l'évaluation des alternatives selon leur utilité. L'utilité totale est calculée en fonction des utilités dégagées par chaque critère pour les actions considérées. Ces utilités sont déterminées suite à une enquête réalisée auprès du décideur afin de déterminer l'utilité partielle par rapport à chaque critère.

L'utilité totale d'une action ($U_a(x_1, x_2, \dots, x_n)$) est calculée comme suit :

$$U_a(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot u_i(x_i(a)), i = 1..n \quad (4.20)$$

Où : p_i représente le poids du critère i et $u_i(x_i(a))$ l'utilité par rapport au critère i de l'alternative a supposant qu'elle a la performance x_i .

4.1.2 Les méthodes d'agrégation partielle

Les méthodes d'agrégation partielle sont également connues sous le nom de méthodes de surclassement. Elles utilisent toujours des poids pour le classement des alternatives mais le poids a une autre signification que dans le cas des méthodes d'agrégation complète. Il ne s'agit plus d'un compromis entre les scores des critères mais plutôt des combinaisons des importances relatives sur une échelle normalisée de 0 à 1. Les méthodes les plus connues sont :

Les méthodes Electre

Il s'agit des méthodes basées sur une comparaison binaire des actions. Le classement se base ainsi sur une comparaison entre des alternatives et le processus ne nécessite pas de valeurs exactes sur la performance de chaque alternative.

Dans le cas de la méthode *Electre I* [Roy 1968], le décideur doit d'abord fixer les critères d'évaluation. Des poids doivent être associés aux critères selon un classement de ceux-ci en trois catégories de poids : *fort*, *moyen* et *faible*. Les alternatives sont évaluées par rapport à chaque critère en attribuant un poids selon la catégorie de poids des critères. Les notes que l'on peut associer aux alternatives sont présentées dans le **Tableau 4-3**:

Tableau 4-3 Poids des critères selon les 3 catégories de poids

Catégorie de poids	Fort	Moyen	Faible
Notes	10	8	7
	7,5	6,5	6
	5	5	5
	2,5	3,5	4
	0	2	3

Avec ces poids on construit une matrice d'évaluation à partir de laquelle il faut déterminer un indice de concordance et un indice de discordance. L'indice de concordance montre la confiance de la préférence d'une alternative par rapport à une autre. L'indice de discordance quantifie le regret d'avoir obtenu la préférence d'une alternative par rapport à une autre.

On fixe ensuite un seuil d'acceptabilité à partir duquel il faut retenir toutes les paires ordonnées issues des évaluations de toutes les alternatives. Il faut chercher les solutions qui ne sont pas surclassées par d'autres afin de définir un sous-ensemble d'actions préférables.

Par exemple : soit 3 alternatives (A, B et C) à classer selon 3 critères : *Masse* et *Coût* de poids « fort » et *Délai* de poids « moyen ». Les poids accordés aux critères sont les suivants : 7 pour *Masse*, 5 pour *Coût* et 3 pour *Délai*. La performance de chaque alternative selon les critères doit être évaluée à l'aide des poids issus des catégories de poids associées aux critères (Tableau 4-4).

Tableau 4-4 Poids des alternatives

	Masse	Coût	Délai
Alternative A	5	2.5	2
Alternative B	7.5	5	8
Alternative C	2.5	2.5	5

Il faut s'intéresser maintenant à des comparaisons binaires. Ainsi, pour l'évaluation A surclasse B il faut calculer l'indice de concordance et celui de discordance. Pour calculer l'indice de concordance de ce classement il faut identifier les critères pour lesquels l'alternative A surclasse l'alternative B. La somme des poids de ces critères divisée par la somme totale des poids donne l'indice de concordance. Dans le cas de la première comparaison, l'indice de concordance vaut 0,47. L'indice de discordance se calcule en identifiant le critère pour lequel l'alternative A ne surclasse pas l'alternative B et pour lequel l'écart entre les notes des alternatives et le plus grand. Cet écart est divisé par la largeur de l'échelle la plus grande pour donner l'indice de discordance. Dans le cas considéré cet indice vaut 0,6.

La suite de l'analyse consiste à fixer des seuils pour les indices de concordance et de discordance. Ainsi, A surclasse B uniquement si la valeur calculée pour l'indice de concordance est supérieure au seuil de concordance et si la valeur calculée pour l'indice de discordance est inférieure au seuil de discordance. Si une des deux conditions n'est pas vérifiée les alternatives sont indifférentes.

Pour toutes les comparaisons binaires possibles un ensemble de solutions, contenant les alternatives qui ne sont pas surclassées par d'autres, peut être défini.

Des évolutions de cette méthode ont été réalisées. Elles ont permis d'élaborer les méthodes Electre II, Electre III et Electre IV.

4.1.3 Les méthodes d'agrégation locale

La méthode du Goal Programming

Cette méthode est basée sur la création d'une matrice de jugements. Chaque critère prend la valeur de la performance désirée et on calcule par la suite la performance réelle de chaque alternative par rapport à chaque critère. On évalue par la suite l'écart entre la performance calculée et la valeur de l'objectif. La solution la plus performante est celle pour laquelle l'écart est le plus faible.

4.1.4 Sélection d'une méthode

Avant de réaliser un choix parmi les méthodes de classement en vue d'instrumenter l'outil informatique d'analyse de la performance industrielle des produits composites, il est nécessaire de rappeler la nature du problème de décision traité dans nos travaux.

Un choix est à réaliser à partir d'une liste d'alternatives de processus de fabrication. Ces alternatives sont imposées par la prise en compte de deux processus type basés sur les procédés de moulage de préimprégnés et d'infusion de résine liquide. Ces alternatives sont enrichies par les éventuelles solutions générées à partir de chaque processus type en fonction du nombre de processus intermédiaires possibles pour la fabrication d'une Caractéristique Technologique et de l'existence de différentes ressources capables à réaliser une opération donnée. L'existence de processus intermédiaires alternatifs est également liée à la possibilité de réaliser l'intégration de la fabrication de plusieurs Caractéristiques Technologiques en une seule opération très tôt dans la chronologie d'exécution des opérations ou bien de les ajouter en étapes, par assemblage en fin de fabrication du produit.

En remontant à une solution d'industrialisation d'un produit il faut considérer les caractéristiques liées au flux de matières dans l'atelier correspondant. Deux architectures d'atelier sont à prendre en compte. Un atelier basé sur le procédé de moulage des préimprégnés est construit selon le type « Flow shop ». Il est caractérisé par l'existence d'une ressource goulot qui est l'autoclave. Ce fait limite la flexibilité de l'atelier et diminue la fluidité de la production. Au contraire, un atelier basé sur le procédé d'infusion est articulé autour d'une architecture de type « Job shop ». Il est caractérisé par un niveau de flexibilité plus élevé. A part les critères classiques de performance (qualité, coût, délai) une estimation de la flexibilité doit être réalisée afin de disposer d'un indicateur supplémentaire. Cet indicateur peut être calculé mais dans certaines situations, quand les données sur les flux sont incomplètes ou incertaines, une estimation verbale doit être effectuée.

Ainsi, le processus de décision se base sur des multiples critères qui dirigent l'évaluation de la performance des processus. Il faut envisager différents points de vue afin de caractériser les alternatives selon les vues : qualité, coût et délai. Souvent, ces critères sont quantifiés aisément mais parfois une approche qualitative reste le seul moyen d'évaluation de la performance des alternatives. A part cette typologie de points de vue on peut identifier une deuxième qui est liée à l'interprétation différente de l'importance des critères au sein de l'entreprise selon les différents départements. Ainsi, des intérêts conflictuels sont exprimés.

De son implémentation aisée, nous avons décidé de choisir la méthode AHP comme méthode de classement des alternatives d'industrialisation. Cette méthode nous permet d'utiliser des critères de performance calculés à partir des indicateurs de performance déduits au niveau de chaque activité mais aussi d'employer des critères évalués d'une manière qualitative à partir du savoir-faire des experts ou des résultats de simulation. Dans le cas de l'utilisation des jugements afin d'évaluer la performance des alternatives par rapport à un critère spécifique, la méthode AHP propose une analyse de la cohérence des jugements réalisés par l'expert en vue de lui apporter une indication sur la pertinence de l'analyse.

Les sections qui suivent sont dédiées à la présentation en détail des principales étapes de la méthode AHP. En s'appuyant sur l'étude de cas utilisée comme illustration de la partie génération de processus, un exemple d'implémentation de la méthode est donné en fin de chapitre.

5. La méthode AHP

La méthode AHP a été développée en 1971 par Thomas L. Saaty [Saaty 1980]. Ses champs d'utilisation sont très diversifiés.

Comme toute méthode de classement, elle dispose d'un mécanisme spécifique de détermination des poids des critères. À chaque niveau de la hiérarchie établie, des poids sont identifiés par combinaison binaire des éléments par rapport aux éléments de niveau supérieur afin d'établir leur priorité.

Les raisons de son utilisation fréquente lors des analyses multicritères sont liées à des multiples avantages. La méthode permet de s'intéresser aux paramètres quantitatifs et qualitatifs pour établir les priorités. Une meilleure visibilité sur le problème analysé est possible grâce à l'expression du problème sous forme de hiérarchie et d'exprimer ainsi l'interdépendance des éléments du système analysé. Des jugements sur une échelle verbale ou numérique peuvent être pris en compte lors de la déduction des priorités. Une analyse de la consistance de ces jugements est possible.

Voici les principales étapes de la méthode AHP :

- Description du problème sous la forme d'une structure hiérarchique ;
 - On spécifie l'objectif ;
 - On spécifie les critères de décision ;
 - On identifie les alternatives.
- Déduction de l'importance relative de chaque critère ;
- Evaluation de la performance de chaque alternative par rapport à chaque critère ;
- Evaluation de la cohérence ;
- Hiérarchisation des alternatives.

Ces étapes sont explicitées dans la suite du document.

Cette méthode a été déjà utilisée dans le domaine des composites. On peut citer le travail [El-Mikawi 1996] dans lequel on s'intéresse à l'utilisation des matériaux composites avancés dans le domaine d'ingénierie civile. Des composants de structure employant des matériaux composites sont comparés en termes de performance aux mêmes solutions en matériaux métalliques.

5.1 Hiérarchisation du problème

La première étape consiste à décomposer le problème traité et de positionner par niveau les composants du problème. Ainsi, le *Niveau 0* contient l'objectif de l'analyse, le *Niveau 1*

regroupe les critères de performance et le Niveau 2 regroupe les alternatives. Le Niveau 1 peut être divisé en plusieurs niveaux si une granularité plus importante de la description des critères est nécessaire et si à ces nouveaux niveaux des préférences sont à ajouter. Saaty a fait une recommandation concernant le nombre de critères et d'alternatives. Il faut limiter leur nombre à 7 au plus.

La Figure 4-23 montre schématiquement la décomposition de notre problème par niveaux :

- L'objectif est de choisir une solution d'industrialisation pour un produit analysé ;
- Les critères sont définis selon 4 points de vue :
 - Qualitatif : le Taux Volumique de Fibres d'un produit qui peut être atteint en employant un processus spécifique et le Poids de la pièce.
 - Economique : les coûts matière, d'investissement et d'opération.
 - Délai : le temps de fabrication total d'un produit.
 - Organisationnel : la flexibilité de l'atelier correspondant aux processus.
- Les alternatives sont composées des processus générés.

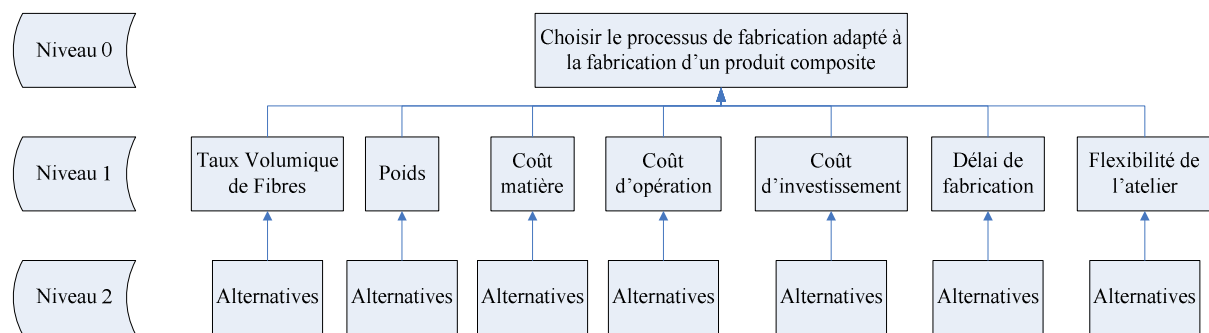


Figure 4-23 Représentation hiérarchique du problème de sélection des processus

5.2 Comparaisons binaires

Par niveaux, les éléments sont comparés un à un afin de définir la préférence relative par rapport à un élément du niveau supérieur. Les résultats des comparaisons binaires sont renseignés dans des matrices antisymétriques :

$$A = (a_{ij}), a_{jj} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, i, j = 1..n \quad (4.21)$$

Où : A représente la matrice de comparaisons binaires des éléments d'un niveau par rapport à un élément d'un niveau supérieur de la hiérarchie.

a_{ij} représente l'importance de l'élément i par rapport à l'élément j ,

n est le nombre d'éléments du niveau contenant les éléments comparés. Si $a_{ij} > 1$, alors l'élément i est préféré à l'élément j .

L'expression de la préférence d'un élément d'un niveau par rapport à un autre se fait sur une échelle verbale. Par exemple : l'élément i est absolument plus important que l'élément j .

Saaty propose une échelle pour transformer cette évaluation verbale en valeurs numériques qui seront attribués aux éléments a_{ij} (Tableau 4-5).

Tableau 4-5 Echelle de notation des préférences

Échelle numérique	Échelle verbale
1.0	Importance égale des deux éléments
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Dans notre cas, l'importance relative des critères de décision (niveau 1) par rapport à l'objectif global (niveau 0) se fait en utilisant l'échelle numérique de Saaty. L'importance relative des alternatives (niveau 2) par rapport aux critères de décision (niveau 1) se fait selon deux approches différentes en fonction de la manière dont on peut obtenir les valeurs de la performance de chaque alternative :

- Si la performance des alternatives par rapport à un critère donné ne peut pas être calculée à partir des inducteurs, au niveau de chaque activité, afin d'obtenir une valeur pour l'indicateur concerné, l'importance relative des alternatives pour ce critère se détermine suite à des comparaisons binaires. Ces comparaisons sont effectuées par questionnement de l'expert qui devra renseigner la matrice avec les valeurs issues de l'échelle numérique de Saaty.
- Si la performance des alternatives peut être calculée à partir des inducteurs, on dispose alors d'une matrice à une colonne contenant les valeurs des indicateurs calculées pour chaque alternative. Dans ce cas, ces valeurs doivent être transformées afin que leur importance soit exprimée sur l'échelle de Saaty.

Dans le deuxième cas, on peut faire appel à une relation simple issue de la géométrie afin de transformer de manière linéaire les valeurs calculées exprimant la performance de chaque alternative de leur échelle originale dans l'échelle numérique de Saaty (1..9) :

$$S_t = \frac{LS_t - LI_t}{LS_i - LI_i} (S_i - LI_i) + LI_t \quad (4.22)$$

Où : S_t représente le nouveau score (la valeur transformée dans l'échelle de Saaty) ;
 LS_t et LI_t représentent la nouvelle limite supérieure (égale à 1) et la nouvelle limite inférieure (égale à 9), respectivement ;

LS_i et LI_i représentent la limite supérieure de l'échelle initiale (égale à la valeur maximale calculée) et la limite inférieure de l'échelle initiale (égale à la valeur minimale calculée), respectivement ;

S_i représente le score initial (la valeur que l'on veut transformer dans l'échelle de Saaty).

La comparaison binaire a_{ij} , montrant la préférence du critère i par rapport au critère j , devient dans le cas des critères de bénéfice :

$$a_{ij} = \frac{S_{ti}}{S_{tj}}, i, j = 1..n, \quad (4.23)$$

ou dans le cas des critères de coûts :

$$a_{ij} = \frac{S_{tj}}{S_{ti}}, i, j = 1..n. \quad (4.24)$$

Où : S_{ti} et S_{tj} représentent les valeurs des scores des alternatives i et j dans l'échelle de Saaty.

Par exemple : si l'on calcule le coût matière d'un produit et que l'on obtient pour trois alternatives les valeurs présentées dans le **Tableau 4-6**, la matrice des jugements des priorités des alternatives est symbolisée alors par les valeurs rassemblées dans le **Tableau 4-7**. Ces valeurs ont été obtenues après avoir transformé les valeurs des coûts dans l'échelle de Saaty selon l'équation 4.22. En utilisant les équations 4.23 et 4.24, les comparaisons binaires s'effectuent et la matrice est remplie en fonction des valeurs obtenues sur une échelle de 1 à 9.

Tableau 4-6 Coût de la matière première pour les alternatives de processus de fabrication

Alternative	A1	A2	A3
Coût matière (€)	125	159	155

Tableau 4-7 Tableau des jugements des alternative par rapport au coût matière

Matrice de jugement	Alternative A1	Alternative A2	Alternative A3
Alternative A1	1	9	8,06
Alternative A2	0,11	1	0,9
Alternative A3	0,12	1,12	1

5.3 Calcul des priorités

Les priorités des éléments se calculent à partir des matrices de comparaisons binaires en déterminant les vecteurs propres de ces dernières. Le vecteur propre normalisé exprime l'importance relative de chaque élément.

Afin de déterminer le vecteur propre, on peut raisonner de la manière suivante :

- Tout d'abord, on détermine à partir de la matrice de jugements A une matrice B contenant les valeurs des préférences normalisées ;

$$B = (b_{ij}), b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1..n \quad (4.25)$$

- Ensuite, on peut calculer le vecteur propre v comme suit :

$$v = (c_{i1}), c_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n}, i, j = 1..n \quad (4.26)$$

Le vecteur propre est une matrice à une colonne. Il représente le vecteur des priorités relatives des éléments comparés.

Nous devons calculer par la suite la valeur propre principale (λ_{max}) à laquelle le vecteur propre v , que l'on vient de calculer, correspond. Ce paramètre sera utilisé pour vérifier la consistance des jugements contenus dans la matrice A (section 5.2). La valeur propre principale peut se calculer en utilisant la formule représentée par l'équation 4.27. Cette équation signifie que la valeur propre principale est égale à la somme des produits entre les valeurs des éléments du vecteur propre et les valeurs des sommes des colonnes de la matrice A .

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left(c_{i1} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \right), i, j = 1..n \quad (4.27)$$

Reprenons l'exemple traité dans la section précédente. La matrice des préférences normalisées (B) devient :

$$B = \begin{pmatrix} 0,81 & 0,81 & 0,81 \\ 0,09 & 0,09 & 0,09 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

Le vecteur exprimant les priorités des alternatives par rapport au critère coût matière et la valeur propre à laquelle il correspond sont les suivants :

$$v = \begin{pmatrix} 0,81 \\ 0,09 \\ 0,1 \end{pmatrix}, \lambda_{max} = 3 \quad (4.29)$$

Afin de vérifier l'exactitude de cette méthode de calcul des vecteurs propres et des valeurs propres, nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus avec le logiciel *Wolfram Mathematica*. Nous avons calculé ces valeurs pour la matrice de départ (matrice de jugement symbolisée par le **Tableau 4-7**) en utilisant les fonctions *Eigenvalues[A]* et *Eigenvectors[A]*. Les écarts obtenus entre les valeurs calculées comme présenté dans les paragraphes précédents et celles proposées par le logiciel sont très faibles. On peut dire que la méthode proposée pour le calcul des priorités est fiable. Cette comparaison est présentée dans le **Tableau 4-8**. Comme une différence est visible qu'après la cinquième décimale, nous avons choisi de présenter dans ce tableau les valeurs avec 7 chiffres après la virgule.

Tableau 4-8 Ecart entre les méthodes de calcul des vecteurs et des valeurs propres

Calcul approximatif		Wolfram Mathematica			Ecart (%)	
Vecteur propre	Valeur propre	Vecteur propre	Vecteur propre normalisé	Valeur propre	Vecteur propre	Valeur propre
0,8095863	3	0,98641	0,8095859	3	5,32E-05	0
0,0899540		0,109601	0,0899539		1,55E-04	
0,1004596		0,122402	0,1004602		5,67E-04	

Les écarts dans le cas d'une matrice remplie par l'expert suivant ses préférences (le cas d'une évaluation verbale de la préférence) sont supérieurs en valeur par rapport à ceux présentés auparavant (dans le cas d'une matrice remplie à partir des valeurs obtenues par calcul et transformées dans une échelle de 1 à 9). Les écarts, en pourcentage, peuvent atteindre la valeur de 4% pour le vecteur des priorités et de 1,5% pour la valeur propre. Comme nous faisons rarement appel à ce type d'évaluation (uniquement dans le cas de l'expression des préférences des critères) et comme les valeurs concernées sont de faible grandeur (inférieures à 1), nous pouvons accepter ce degré d'erreur.

5.4 Analyse de consistance

La méthode AHP se base sur des jugements subjectifs réalisés par l'expert afin d'exprimer sa préférence pour une alternative par rapport à une autre. Le jugement le plus simple à faire est dans le cas où seulement deux alternatives existent. C'est rarement le cas dans la pratique. Dès que des nombreuses alternatives doivent être comparées, l'expert peut mal exprimer ses préférences lors du renseignement de la matrice des comparaisons binaires. De plus, les jugements effectués doivent être transposés d'une échelle verbale en une numérique. C'est là que l'on rencontre la difficulté majeure : la quantification d'une préférence établie d'un point de vue subjectif et abstrait.

Afin de ne pas se retrouver dans ce type d'expression des préférences : $A > B$, $B > C$, $C > A$, une mesure de la consistance des jugements de l'expert doit être définie. Saaty propose d'utiliser des ratios qui permettent d'évaluer la consistance d'une matrice de jugement. Ces ratios se basent sur la probabilité que l'expert ait rempli de manière aléatoire la matrice de jugement. Selon Saaty, la valeur propre principale (λ_{max}) est égale à la taille de la matrice dans le cas d'un jugement consistant.

On calcule dans un premier temps un Indice de Consistance (IC) en fonction de la valeur propre principale (λ_{max}) obtenue à l'étape précédente et du nombre d'éléments comparés (n) :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.30)$$

Cet indice doit être comparé à une valeur déterminée expérimentalement appelée Indice Aléatoire (IA) afin d'établir un Ratio de Consistance (RC) :

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (4.31)$$

La valeur de l'Indice Aléatoire est déterminée en fonction du nombre d'éléments comparés à partir du **Tableau 4-9**.

Tableau 4-9 Valeurs prises par l'Indice Aléatoire

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Pour juger une matrice consistante, le Ratio de Consistance doit respecter la condition :

$$RC < 10\% \quad (4.32)$$

Dans l'exemple considéré, la matrice contenant les comparaisons binaires des alternatives par rapport au coût matière est consistante. Le Ratio de Consistance est nul car $\lambda_{max} = n = 3$.

Une fois les priorités calculées à chaque niveau de la hiérarchie, les poids finaux des alternatives par rapport à l'objectif global peuvent être déterminés. Ces poids sont calculés en fonction des valeurs contenues par le vecteur de priorités des critères par rapport à l'objectif et de celles contenues par les vecteurs de priorités des alternatives par rapport aux critères.

Supposons que la matrice $C = (c_{il})$ de type (m,1) (m lignes et 1 colonne) rassemble les priorités des critères par rapport à l'objectif. Supposons également que la matrice $D = (d_{ij})$ de type (n,n) rassemble sur la colonne j , $j = 1..n$, les valeurs des priorités des alternatives par rapport au critère j . On peut alors calculer le produits des matrices C et D comme étant la matrice $E = (e_{il})$ de type (n,1) (équations 4.33 et 4.34).

$$E = DC \quad (4.33)$$

$$\forall i : e_{il} = \sum_{k=1}^n d_{ik} \cdot c_{kl} \quad (4.34)$$

La matrice colonne E contient alors les poids finaux des alternatives ou bien les priorités des alternatives par rapport à l'objectif.

5.5 Illustration de la hiérarchisation des alternatives avec la méthode AHP

Nous allons présenter dans cette section l'établissement d'une hiérarchie entre plusieurs processus de fabrication en utilisant la méthode d'analyse multicritères AHP. Les processus de fabrication obtenus au début du chapitre (section 2.4) comme solutions d'industrialisation possibles pour la pièce d'étude introduite dans le Chapitre 3 doivent être classés selon un ensemble de critères pertinents pour le décideur.

Rappelons que la pièce d'étude peut être fabriquée selon 3 processus de fabrication que nous allons codifier, afin de faciliter la lisibilité, comme suit :

- *Alternative 1 (A1)*. Processus basé sur le procédé de moulage de préimprégnés et polymérisation en autoclave.

- *Alternative 2 (A2)*. Processus basé sur le procédé d'infusion de résine liquide et contenant une étape supplémentaire de compactage de la peau externe.
- *Alternative 3 (A3)*. Processus basé sur le procédé d'infusion de résine liquide sans compactage de la peau externe.

Les valeurs des indicateurs montrant la performance de chaque alternative selon les points de vue présentés dans la section 5.1 sont affichées dans le **Tableau 4-10**.

Tableau 4-10 Valeurs des indicateurs calculées pour chaque alternative

	TVF [%]	Masse [g]	Coût matière [€]	Coût d'opération [€]	Coût d'investissement [€]	Délai [min]	Flexibilité
A1	57	1075	125	1224	21,41	910	0,1
A2	55	1333	159	1089	19,17	727	0,4
A3	50	1373	162	945	19,11	617	0,5
Type critère ⁴	Bénéfice	Coût	Coût	Coût	Coût	Coût	Bénéfice

Le **Tableau 4-11** présente les comparaisons des critères qui expriment l'utilité que l'expert accorde à un critère envers l'objectif global ainsi que le vecteur des priorités obtenu après calcul du vecteur propre de la matrice des jugements. On peut constater qu'on accorde le plus de poids aux critères de qualité.

Tableau 4-11 Pondération des critères de sélection par rapport à l'objectif global.

	TVF	Masse	Coût matière	Coût d'opération	Coût d'investissement	Délai	Flexibilité	Priorité
TVF	1	1	4	4	4	8	8	0,31
Masse	1	1	4	4	4	8	8	0,31
C. matière	0,25	0,25	1	1	1	5	5	0,1
C. d'opération	0,25	0,25	1	1	3	5	5	0,12
C. d'investissement	0,25	0,25	1	0,33	1	5	5	0,09
Délai	0,13	0,13	0,2	0,2	0,2	1	1	0,03
Flexibilité	0,13	0,13	0,2	0,2	0,2	1	1	0,03

Le Ratio de Consistance de cette matrice est de : $6,23\% < 10\%$; on peut dire que les jugements faits sont consistants.

L'étape suivante consiste à établir les comparaisons binaires des alternatives par rapport à chaque critère de sélection. Généralement, ces comparaisons s'effectuent selon des jugements verbaux transformés ensuite sur l'échelle numérique de Saaty. Nous n'avons pas besoin d'évaluer les alternatives de cette manière car nous disposons des valeurs des performances de chaque alternative estimées lors de la génération de la gamme. Il nous reste à transformer ces valeurs dans l'échelle 1 à 9. Après calcul, on obtient 7 vecteurs contenant les priorités de chaque alternative par rapport à un des 7 critères de sélection (**Tableau 4-12**).

⁴ Voir section 5.2

Tableau 4-12 Vecteurs des priorités des alternatives par rapport aux critères de sélection

	TVF	Masse	Coût matière	Coût d'opération	Coût d'investissement	Délai	Flexibilité
A1	0,54	0,81	0,81	0,085	0,057	0,08	0,06
A2	0,4	0,1	0,1	0,149	0,427	0,18	0,41
A3	0,06	0,09	0,09	0,766	0,516	0,74	0,53

Le Ratio de Consistance est nul (donc inférieur au seuil imposé de 10%) dans le cas des matrices de jugement des priorités des alternatives par rapport aux critères de sélection car il y a cohérence dans le remplissage des matrices à partir des valeurs calculées.

On rappelle la hiérarchie établie au départ par le graphe présenté dans la **Figure 4-24** qui regroupe par niveau les valeurs des priorités.

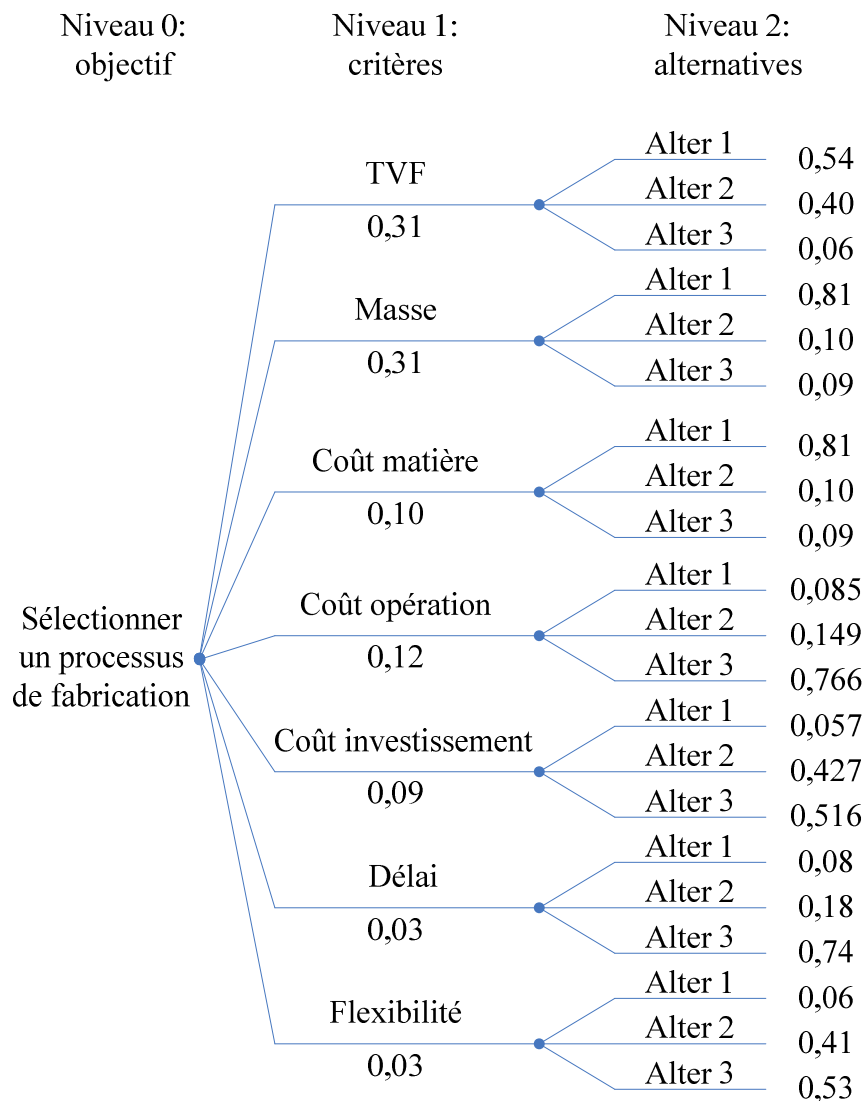


Figure 4-24 Hiérarchie du problème récapitulant les priorités par niveaux

En calculant le poids final de chaque alternative (**Tableau 4-13**), on constate que l'alternative A1 est la plus performante. Notons que ce résultat correspond à l'allocation d'un poids plus important aux critères liés à la qualité du produit. Si plus de poids serait accordé aux critères

caractérisant la production (coûts de fabrication et d'investissement, délai et flexibilité) les alternatives symbolisant un processus basé sur le procédé d'infusion auraient surclassé la première basée sur le procédé de moulage de préimprégnés.

Tableau 4-13 Poids finaux des alternatives

Alternative	Poids
Alternative A1	0,52
Alternative A2	0,24
Alternative A3	0,24

6. Analyse de sensibilité

Comme nous l'avons présenté dans la section précédente, un changement dans la valeur d'une priorité peut entraîner une modification de la hiérarchie. Il est intéressant d'offrir au décideur des indications relatives à la robustesse de la hiérarchie obtenue suite à l'analyse multicritères. Ainsi, il disposera d'une appréciation de la stabilité du résultat par rapport à une variation éventuelle de la performance d'une alternative ou bien par rapport à un mauvais jugement des priorités des critères. Ces indications peuvent être apportées en faisant appel à une analyse de sensibilité. Cette analyse permet d'avoir une indication sur la mesure dans laquelle le classement peut être influencé par la variation de certains paramètres.

Nous avons identifié trois cas concrets dans lesquels une analyse de sensibilité peut enrichir le processus de décision :

- L'existence d'un degré de variabilité des inducteurs utilisés pour le calcul des indicateurs de performance des alternatives. Effectivement, des nombreuses causes aléatoires ou assignables peuvent faire varier les inducteurs. Comme la performance d'une alternative est estimé à partir des données souvent incomplètes, il est plus judicieux d'estimer cette performance non pas par une valeur discrète mais plutôt par un intervalle.
- L'existence d'une difficulté dans l'expression des jugements des préférences et de leur transposition vers une échelle numérique. Il s'agit dans ce cas de faire varier dans un intervalle une des valeurs des priorités des critères de sélection et de vérifier l'influence du changement des poids sur la hiérarchie.
- L'existence de scénarios type au niveau du jugement des préférences. C'est souvent le cas où plusieurs décideurs apprécient différemment l'importance relative des critères selon leurs points de vue et leur contexte ou référentiels. Dans ce cas on peut définir des scénarios d'évaluation de l'importance relative des critères par rapport à l'objectif selon des départements de l'entreprise et même selon les points de vue des acteurs extérieurs de l'entreprise.

6.1 Analyse de sensibilité pour l'évaluation de l'influence de la variabilité

L'objectif de cette première étude est de vérifier dans quelle mesure le classement des alternatives peut être influencé par la variation des valeurs des performances des alternatives. Ainsi, nous allons nous intéresser aux variations des priorités des alternatives par rapport à l'objectif et induites par les variations des valeurs des inducteurs.

Nous évaluons les inducteurs de performance sur un intervalle défini par des limites maximales et des limites minimales autour d'une valeur nominale estimée (il s'agit des valeurs des inducteurs de performance calculées pour chaque activité afin d'estimer les valeurs des sept indicateurs de performance).

Les sources de variation dans le cas de la fabrication des composites sont nombreuses. Nous dressons une liste non-exhaustive de ses sources afin de justifier l'intérêt de l'analyse de sensibilité. Voici ces sources de variation classées selon les 7 critères de sélection :

- *TVF* : le taux volumique de fibres est assujéti à des variations notamment dans le cas des procédés faisant appel à des opérations manuelles. Des variations peuvent également intervenir à cause d'un mauvais compactage de la pièce due à une variation de la pression exercée sur la pièce.
- *Masse* : les variations de la masse du produit peuvent être liées à la mise en œuvre de la matière première. La capabilité du procédé de découpe peut engendrer une légère variabilité dans la taille des plis découpés. Un mauvais drainage de la résine peut être aussi une cause de variation. De même, un écart dans le taux de fibre peut induire une variation locale de la masse à cause des zones riches de résine ou, au contraire, des zones sèches.
- *Coût matière* : on rencontre rarement une variation du coût de la matière. On peut citer comme sources de ces variations la finesse de réalisation des modèles d'estimation des coûts ou bien des variations des prix d'achat de la matière dues aux modifications dans le contexte socio-économique. Dans le calcul de la quantité de matière première nécessaire on doit également prendre en compte les chutes lors de l'optimisation des patrons de découpe. La finesse des modèles de découpe, estimant la quantité de matière première nécessaire, est une cause de variation indirecte du coût matière.
- *Coût d'opération* : la variation du coût d'opération est due au fait que les taux horaires sont estimés, certains postes ne disposant pas d'indicateurs précis permettant le calcul exact de ces taux. Les variations des temps de fabrication sont également une source de variation du coût d'opération.
- *Coût d'investissement* : généralement, le coût d'investissement est connu. On peut néanmoins rencontrer des variations dues à une mauvaise connaissance des coûts liés à la maintenance des équipements.
- *Délai* : comme les opérations auxquelles les processus de fabrication des composites font appel sont souvent manuelles, les variations des durées opératoires sont importantes. Egalement, les cycles de cuisson des autoclaves sont fixés à des durées non-optimales pour certaines pièces (afin d'optimiser le chargement des autoclaves avec de pièces caractérisées par des recettes de cuisson similaires). Ces variations des temps sont dues aussi à l'inertie thermique des masses d'outillages présentes dans l'enceinte.
- *Flexibilité* : l'estimation de ce critère reste subjective, d'où une variation éventuelle de cet indicateur.

Ce cas sera illustré à l'aide d'une analyse de la pièce d'étude. Pour ce faire les performances des 3 processus possibles suivant les 7 critères de sélection ont été déterminés en fonction des variations au niveau de chaque activité. Cela permet de déterminer l'intervalle dans lequel un

indicateur de performance donné peut prendre des valeurs. Les valeurs minimales et maximales de ces intervalles sont présentées dans le **Tableau 4-14**.

Tableau 4-14 Intervalles de variation des valeurs des indicateurs de performance

		TVF [%]	Masse [g]	Coût matière [€]	Coût d'opération [€]	Coût d'investissement [€]	Délai [min]	Flexibilité
A1	Min	54	1070	122	1173	20,76	901	0,1
	Max	60	1080	128	1248	22,05	960	0,1
A2	Min	52	1326	156	1078	18,59	719	0,4
	Max	58	1340	162	1100	19,74	734	0,4
A3	Min	47	1366	160	936	18,54	610	0,5
	Max	53	1380	163	955	19,69	623	0,5

Le **Tableau 4-15** montre l'influence des variations possibles sur les priorités finales des alternatives par rapport à l'objectif. On constate que leur influence est infime et qu'il n'y a pas de changement de rang dans les hiérarchies établies à partir des valeurs limite des intervalles de variation par rapport à la hiérarchie nominale.

Tableau 4-15 Notes obtenues par les alternatives suite aux variations des valeurs des inducteurs

	Note nominale	Note inférieure (selon limites inférieures)	Note supérieure (selon limites supérieures)
Alternative A1	0,52230	0,52221	0,52255
Alternative A2	0,24214	0,24109	0,24340
Alternative A3	0,23556	0,23669	0,23405

6.2 Analyse de sensibilité pour l'évaluation de l'influence de la variation de la valeur d'une priorité d'un critère de sélection

Cette deuxième étude porte sur l'analyse de la sensibilité de la hiérarchie par rapport à la variation de la priorité d'un critère de sélection. Afin de mettre en œuvre cette étude nous faisons varier chacune des priorités des 7 critères de sélection. Ainsi, une priorité varie dans un intervalle et les priorités des 6 critères restants sont recalculées afin d'adapter leur valeur à celle de la première tout en gardant leurs pondération relative de départ. Les priorités des alternatives par rapport à chacun des critères restent inchangées car on ne fait pas varier les valeurs des indicateurs de performance.

Le **Tableau 4-16** regroupe les limites des intervalles de variation des valeurs des priorités des critères de sélection.

Tableau 4-16 Intervalles de variation des priorités des 7 critères de sélection

	C1 : TVF	C2 : Masse	C3 : Coût matière	C4 : Coût d'opération	C5 : Coût d'investissement	C6 : Délai	C7 : Flexibilité
Valeur de base	0,31	0,31	0,1	0,12	0,09	0,03	0,03
Limite inférieure	0,11	0,11	0,05	0,05	0,05	-	-

Limite supérieure	0,51	0,51	0,4	0,42	0,39	0,33	0,33
-------------------	------	------	-----	------	------	------	------

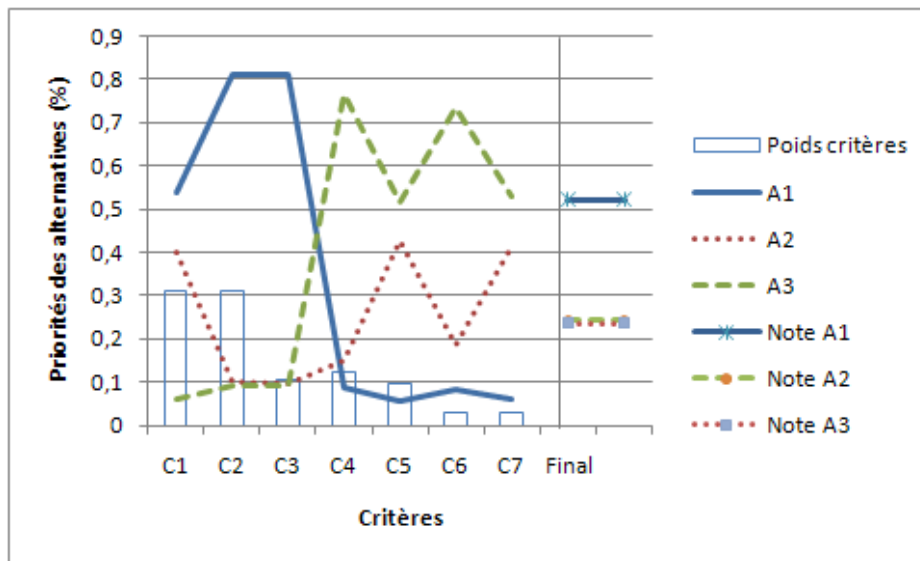


Figure 4-25 Hiérarchie établie selon les priorités de base des critères de sélection

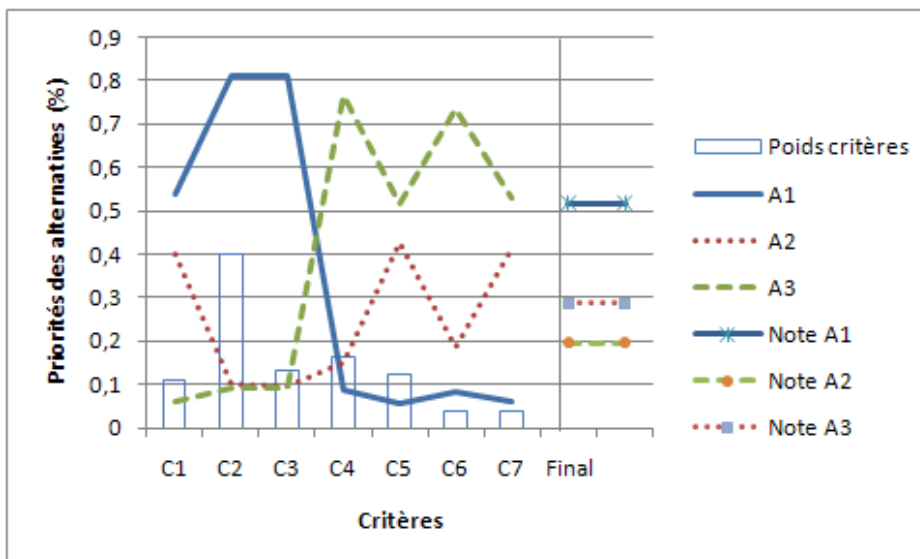


Figure 4-26 Variation du critère TVF (priorité fixée à 0,11)

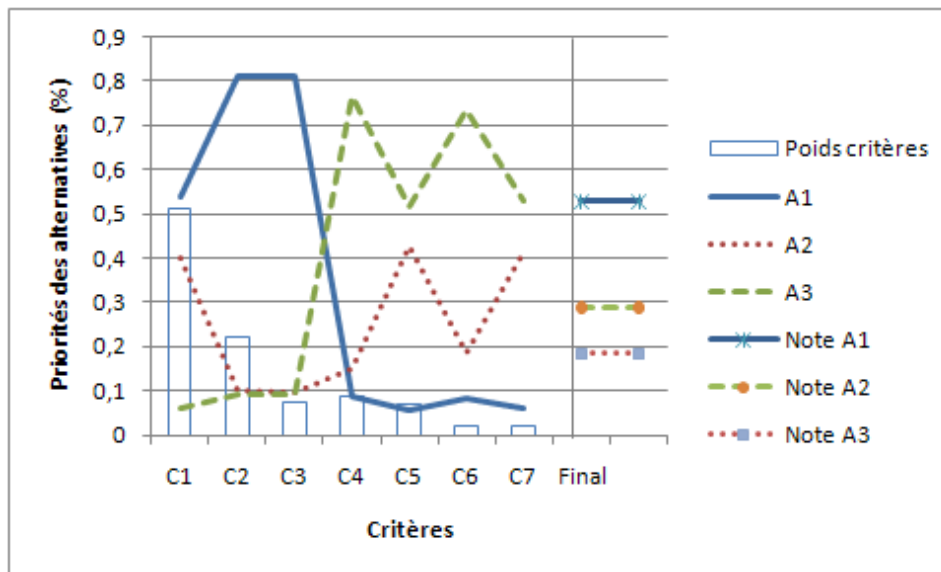


Figure 4-27 Variation du critère TVF (priorité fixée à 0,51)

L'analyse de sensibilité pour le critère *TVF* consiste à diminuer la valeur de sa priorité de 20 unités (Figure 4-26) et de l'augmenter de 20 unités (Figure 4-27) afin d'analyser l'effet de cette variation sur le classement des alternatives. Ces graphes contiennent les courbes qui caractérisent les priorités normalisées de chaque alternative en fonction de chaque critère de sélection. On y ajoute également à la suite des séries de valeurs normalisées la valeur de la priorité finale de chaque alternative. Les histogrammes caractérisent les valeurs des priorités des critères de sélection.

Par rapport à la hiérarchie de base (Figure 4-25), on constate qu'en faisant varier le critère *TVF* à l'intérieur de l'intervalle $[0,11;0,51]$ il n'y a pas d'influence sur le rang de l'alternative A1 la première classée. Par contre, dans le même intervalle de variation on constate un changement de préférence entre les processus classés sur les deux dernières places. Effectivement, si moins d'importance est accordée à la valeur du taux volumique de fibres, le processus d'infusion sans compactage intermédiaire devient plus intéressant. Une recherche itérative dans l'intervalle de variation de la préférence du critère *TVF* peut donner une indication sur la valeur à partir de laquelle le changement des rangs apparaît. Cette valeur correspond approximativement à une priorité du critère *TVF* de 0,3.

Les graphes représentant l'analyse de sensibilité effectuée pour chacun des 6 critères restants sont présentés en annexe (Annexe 6). On présente dans les paragraphes suivants uniquement les conclusions issues de ces analyses.

La variation du critère *Masse* dans l'intervalle $[0,11;0,51]$ n'induit pas de changement du classement des alternatives. La diminution ou l'augmentation de sa priorité fait uniquement diminuer ou augmenter l'écart entre les priorités finales de la première alternative par rapport aux deux dernières. Comme la différence en termes de masse du produit entre les deux processus d'infusion est faible, l'écart entre les priorités de ces deux alternatives reste quasiment inchangé.

La variation du critère *Coût matière* dans l'intervalle $[0,05;0,4]$ n'induit pas de changement du classement des alternatives. La distribution des priorités est similaire à celle rencontrée pour l'analyse du critère *Masse*.

Suite à l'analyse de sensibilité réalisée pour le critère *Coût d'opération* dans l'intervalle $[0,05;0,42]$, on constate que le classement est très sensible à ces variations et des changements des rangs des alternatives apparaissent plusieurs fois. Ainsi, pour une priorité de ce critère de 0,13 la troisième alternative (*A3*) surclasse la deuxième (*A2*) ; le processus basé sur le procédé de moulage des préimprégnés reste le meilleur. Un deuxième changement des rangs apparaît à partir de la valeur de 0,38 pour la priorité du critère *Coût d'opération*. La meilleure alternative devient la troisième. Le processus d'infusion sans compactage devient meilleur que le préimprégné.

La variation du critère *Coût d'investissement* dans l'intervalle $[0,05;0,39]$ fait réduire l'écart entre les priorités finales des alternatives lors de l'augmentation de la priorité du critère analysé. On constate également un changement de la hiérarchie. L'alternative *A3* devient meilleure que l'alternative *A2* lorsque la priorité du critère *Coût d'investissement* dépasse la valeur de 0,15 unités.

En pratiquant une analyse de sensibilité pour le critère *Délai* afin d'évaluer l'influence de la variation de sa valeur en augmentant sa valeur à 0,33 on peut constater un renversement du classement des alternatives. Ainsi, l'alternative *A3* surclasse successivement l'alternative *A2*, pour un critère ayant la priorité de 0,05, et l'alternative *A1*, pour un critère ayant la priorité de 0,32.

La hiérarchie est moins sensible à la variation de la priorité du critère *Flexibilité*. Néanmoins, un changement des rangs des alternatives apparaît lors de l'augmentation de cette priorité. L'alternative *A3* surclasse l'alternative *A2* dès que la priorité du critère *Flexibilité* dépasse 0,08 unités. En augmentant encore plus cette priorité on peut envisager d'autres modifications dans la hiérarchie car l'écart entre les priorités des alternatives a diminué dans l'intervalle choisi pour l'analyse de sensibilité.

Suite à ce type d'analyse on peut conclure qu'une attention particulière doit être accordée à l'expression des jugements des priorités des critères de sélection car, comme nous l'avons démontré, des renversements des rangs des alternatives apparaissent assez souvent lors de la variation des valeurs considérées. Ainsi, la hiérarchie proposée au décideur doit être appuyée par des indicateurs additionnels afin d'aider le décideur dans son processus de sélection d'une solution d'industrialisation.

6.3 Analyse de sensibilité pour évaluer les variations dues à plusieurs points de vue de jugement

Souvent, les décideurs issus des départements différents de l'entreprise jugent différemment la priorité des critères de sélection. Afin d'évaluer l'influence des différents points de vue nous avons défini 4 scénarios selon lesquels nous allons analyser la robustesse de la hiérarchie par l'intermédiaire de l'analyse de sensibilité. Dans le cas des scénarios on s'intéresse à la

variation de plusieurs valeurs des priorités des critères en même temps. Ainsi, les quatre scénarios sont définis comme suit selon l'appartenance du décideur :

- Bureau d'études. Le bureau d'études accorde plus de poids à la qualité du produit et aux fonctions implicitement comprises dans ce critère. Moins d'importance est accordée aux délais, à la configuration de l'atelier et aux coûts engendrés par leurs décisions ;
- Bureau des méthodes. Le bureau des méthodes est concerné par la fabrication du produit en respectant les contraintes de temps et de qualité. Ainsi, le plus de poids est accordé au délai. Nous estimons une répartition égale des poids entre les critères de qualité et de production. Le moins d'importance est accordée aux coûts ;
- Service financier. Ce service accorde plus de priorité aux critères économiques. La qualité est aussi un critère important car une mauvaise qualité des produits peut se traduire par des coûts supplémentaires de la non qualité ou bien des commandes perdues. Moins d'importance est accordé aux délais et à la flexibilité de l'atelier ;
- Client : le client est intéressé plutôt par le prix payé pour acquérir le produit, par sa qualité et par le délai. Il est moins intéressé par la manière dans laquelle l'entreprise arrive à ce but. Un autre point de vue du client peut être analysé : celui dans lequel on favorise le délai. Cela correspond bien au domaine aéronautique car souvent les clients qui achètent des pièces composites font partie d'une entreprise étendue et ils sont eux-mêmes contraints par des délais de livraison.

Les pourcentages de l'importance des critères imposés pour chaque point de vue selon les jugements des décideurs sont rassemblés dans le **Tableau 4-17**. A partir de ces pourcentages nous pouvons déduire les priorités de chaque critère afin d'établir les quatre scénarios.

Tableau 4-17 Pondération des points de vue (QCD et flexibilité) selon les quatre profils des décideurs

	Qualité	Coût	Délai	Flexibilité
Bureau d'études	40%	10%	30%	20%
Bureau des méthodes	30%	10%	40%	20%
Service financier	20%	50%	20%	10%
Client	30%	50%	10%	10%

Le **Tableau 4-18** montre les priorités définies pour les critères de sélection afin d'établir les quatre scénarios de l'analyse de sensibilité.

Tableau 4-18 Scénarios d'allocation des priorités des critères

	Bureau d'études	Bureau des méthodes	Service financier	Client
TVF	0,28	0,22	0,08	0,13
Masse	0,28	0,22	0,08	0,13
Coût matière	0,04	0,04	0,24	0,23
Coût d'opération	0,04	0,04	0,24	0,23
Coût d'investissement	0,04	0,04	0,24	0,23
Délai	0,2	0,3	0,08	0,03
Flexibilité	0,12	0,13	0,03	0,03
Ratio de consistance	0	0	0	0

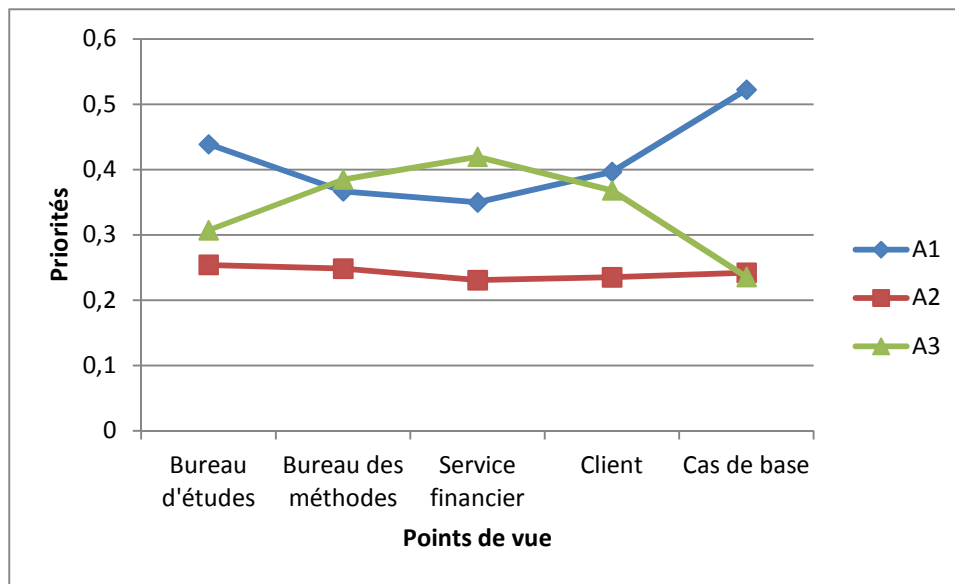


Figure 4-28 Analyse de sensibilité selon les 4 points de vue

Comme on s'attendait suite aux constatations de l'approche précédente, la variation de l'ensemble de priorités des critères par rapport à l'objectif entraîne des modifications dans la hiérarchisation des alternatives selon les points de vue de l'analyse multicritères. Les priorités finales des alternatives obtenues selon chaque scénario sont comparées à celles obtenues selon le jugement initial (Figure 4-28).

En conclusion, ayant employée les trois approches d'analyse de sensibilité on peut constater que la variabilité intrinsèque aux procédés et aux valeurs estimées des indicateurs de performance n'influe pas sur la hiérarchisation. Au contraire, une attention accrue doit être apportée au jugement des priorités des critères car l'analyse de sensibilité montre que leurs variations peuvent entraîner des changements dans les rangs des alternatives.

Une combinaison des trois approches peut être réalisée afin d'atteindre des niveaux de précision de l'analyse plus élevés selon les besoins des décideurs.

Ces variations dans le classement des processus de fabrication des composites nous laissent affirmer que la performance du procédé d'infusion est égale et elle surclasse celle du procédé de moulage de préimprégnés en fonction des points de vue de l'analyse. On constate que dans le cas où les critères les plus favorisés concernent les aspects de production et financiers, donc liés à l'industrialisation des produits composites, l'infusion de résine montre des avantages par rapport au procédé classique de fabrication des produits composites.

7. Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales techniques de génération de processus afin d'évaluer leur adaptabilité à notre travail. A partir de cette étude nous avons décidé de profiter des avantages des techniques basées sur des approches par variantes et sur des approches génératives en utilisant une approche mixte de génération de processus. Notre approche se base sur une classification des pièces en familles selon la complexité du

déroulement opératoire caractérisant leurs processus de fabrication. En se basant sur des règles de fabrication et en utilisant le concept de Carte de Visite, les processus enveloppe sont enrichis par des processus intermédiaires regroupant les activités nécessaires à la transformation des états intermédiaires des composants élémentaires des produits.

Les processus de fabrication étant générés, nous avons besoin des mesures de leurs performances afin de les hiérarchiser. Ces mesures sont déterminées à l'aide des indicateurs de performance présentés dans les sections de ce chapitre. On se base sur une approche paramétrique d'estimation de la performance d'une partie des critères. Ces critères qui peuvent être évaluées au niveau des activités sont développés selon une technique ABC/M. les inducteurs permettant de déterminer les indicateurs de performance ont été explicités.

L'hiérarchisation des solutions d'industrialisation (couples processus – ressources définis selon les informations produit) s'effectue utilisant une analyse multicritères. Nous avons dressé une liste des méthodes existantes dans le domaine de prise de décision suivant des critères multiples et nous avons fait le choix d'employer la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP). Cette méthode fait appel aux valeurs des indicateurs de performance afin d'évaluer les priorités des alternatives selon des critères de sélection déterminés. Les alternatives sont classées selon les préférences des critères et des priorités obtenues.

Dans le chapitre suivant nous allons nous intéresser au déploiement de cette méthodologie à l'aide d'un logiciel développé dans le cadre de ce travail. L'illustration de la mise en œuvre de cette méthodologie est réalisée à l'aide d'un exemple basé sur une pièce de démonstration réalisée dans le cadre du projet CAPSAIRTM.

Chapitre 5 Utilisation d'un cas d'étude pour la validation de la méthodologie proposée

1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons abordé la problématique de la structuration des connaissances du domaine des pièces en matériaux composites pour l'aéronautique en vue de capitaliser le savoir-faire de l'entreprise SLCA. Ce savoir-faire est enrichi par des informations liées au procédé d'infusion de résine liquide développées tout au long du projet CAPSAIRTM.

L'étape de capitalisation est suivie par une phase d'exploitation des connaissances existantes. Le traitement appliqué aux informations concerne la mise en relation des données du tryptique Produit-Processus-Ressource afin de générer les processus de fabrication possibles pour la réalisation d'une pièce. A ce traitement s'ajoute une hiérarchisation des alternatives basée sur une approche multicritères.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la maquette informatique développée comme support de la méthodologie proposée. A l'aide d'une étude de cas, les principales fonctionnalités de cet outil seront présentées dans les sections suivantes.

2. Présentation du cas d'étude

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'application de la méthodologie proposée à l'étude d'une pièce de démonstration réalisée dans le cadre du projet CAPSAIRTM. L'objectif de cette étude est de passer en revue les différentes étapes de la méthodologie proposée et de récapituler sa mise en œuvre.

La pièce considérée représente un panneau multifonctions conçu afin de valider le nouveau procédé d'infusion de résine liquide développé dans le cadre du projet. Cette pièce est un panneau sandwich courbé similaire aux pièces d'extérieur utilisées dans la fabrication des hélicoptères (capots moteurs) ou des avions (trappes, portes d'accès). La conception de ce produit a été réalisée de manière à ce que la majorité des fonctions rencontrées sur des pièces réelles y soit associées.

La **Figure 5-1** montre le dessin de définition du démonstrateur utilisé ici comme cas d'étude. On y retrouve également une image issue du modèle CAO de l'outillage permettant la fabrication de la pièce par le procédé d'infusion de résine liquide. Il est à noter que la pièce équivalente en préimprégnés n'a pas été réalisée. L'outillage présenté dans la **Figure 5-1** est complexe car il permet la réalisation de l'ensemble d'étapes de fabrication de la pièce : moulage, préformage, infusion et polymérisation. Le dessin de définition de la pièce est donné en annexe (Annexe 7).

L'outillage contient également le système de mise en position des différents composants élémentaires du produit (raidisseurs, âme *etc.*). Dans le cas du procédé de moulage de préimprégnés l'outillage serait plus simple mais d'autres ressources devraient être employées afin de permettre la fabrication du produit en sa totalité. L'outillage d'infusion est autonome car il est pourvu d'un système de chauffage par résistances électriques.

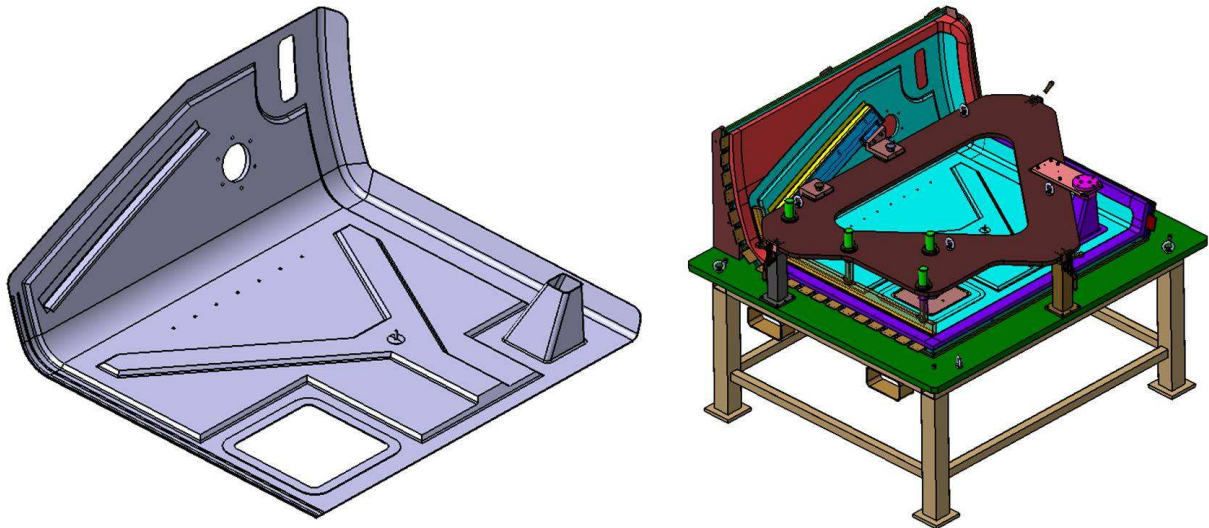


Figure 5-1 Pièce d'étude et outillage de fabrication associé

Le panneau est constitué de plusieurs composants élémentaires. Ainsi, en se basant sur le concept de Caractéristique Technologique (Chapitre 3, section 3.6) introduit dans ce travail, nous pouvons dresser une liste des composants élémentaires du produit analysé comme suit :

- Une plaque réalisée en deux peaux : peau externe et peau interne. Cette plaque est courbée et elle est constituée d'une partie plane et d'une partie galbée. L'angle entre ces deux parties est approximativement 120° . La plaque nécessite deux cuissons, de chaque peau, dans le processus préimprégné. Le processus d'infusion fait appel à une opération de préformage de la peau interne ;
- Une zone sandwich étagée en nid d'abeille Nomex. La partie inférieure du sandwich couvre la majeure partie de la surface de la pièce. Une deuxième âme, en Y, vient s'ajouter par-dessus. Elle agit comme renfort de la pièce dans la partie plane. Dans le processus préimprégné l'âme nécessite une opération de formage et d'ancrage. Le processus d'infusion impose une étanchéisation de l'âme ;
- Un raidisseur galbé en forme de J est disposé sur le sandwich. Le raidisseur est une pièce métallique achetée dans le cas du processus préimprégné. Ce composant est préformé à partir de plis de carbone et infusé en même temps que la pièce pour le deuxième processus ;
- D'un côté de la pièce, le bord est prévu avec une gouttière. Ce composant a la fonction d'accueillir un joint d'étanchéité. Une gouttière métallique est assemblée à la pièce dans le cas du processus préimprégné. Pour l'infusion, la fabrication se fait de la même manière que pour le raidisseur ;
- Des zones de densification sont prévues dans le nid d'abeille. Ces zones de densification sont soit imposées par la nécessité d'y intégrer des inserts métalliques taraudés, soit par l'existence d'un trou dans la pièce. Ce trou est réalisé par perçage lors de l'étape de parachèvement de la pièce ;
- Un corps creux est disposé sur la pièce. Ce composant sert de zone d'emplacement des équipements électriques et des câblages. Cette pièce n'est pas démoulable car son fond et les parois sont réalisés avec les mêmes plis de carbone. Il est nécessaire d'utiliser un noyau soluble afin d'assurer le compactage de ce composant. Dans le cas du processus préimprégné cette pièce est réalisée à part et assemblée au produit final.

Dans le processus d'infusion, le corps creux est préformé à part et il est infusé en même temps que la pièce ;

- Des inserts métalliques sont intégrés dans les zones densifiées de la pièce et dans la peau ;
- Une zone fenêtre est ajoutée à la plaque, cette partie est réalisée lors de l'étape de découpe des plis de carbone. Cette fonction de la pièce concerne la contrainte d'accessibilité à l'intérieur de l'appareil par l'intermédiaire d'une zone d'aération. Ainsi, cette région de la pièce loge un filtre à particules.

L'analyse préliminaire de la fabrication de ce produit se fait en considérant deux processus type uniquement (basés sur le moulage de préimprégnés et l'infusion de résine liquide). Ainsi, on définit deux processus enveloppe selon lesquels les processus détaillés seront obtenus. Ces processus enveloppe sont définis pour un déroulement opératoire complexe. Cela est imposé par la complexité géométrique du produit et les contraintes de qualité inhérentes au cahier des charges.

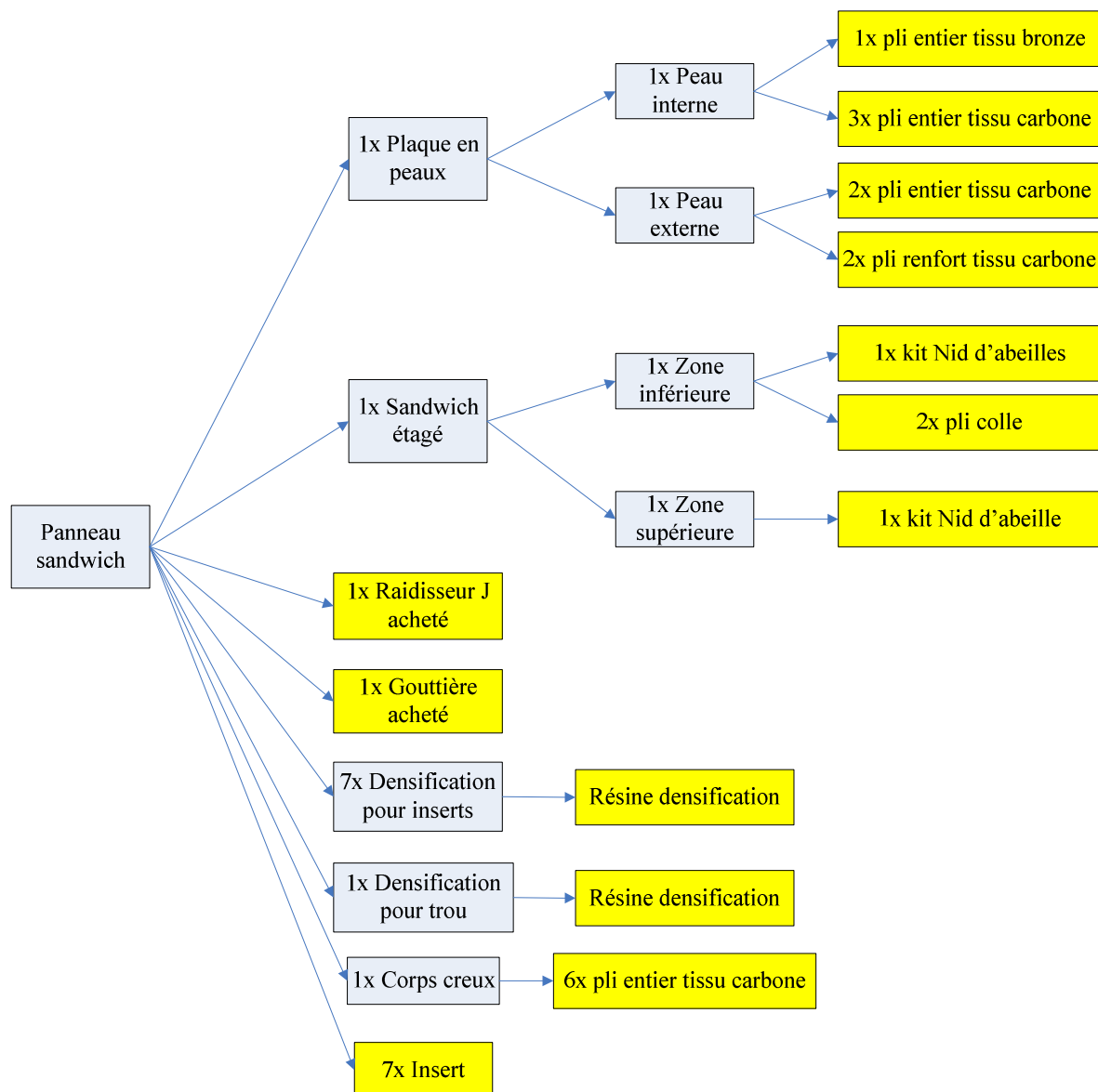


Figure 5-2 Schéma de nomenclature du panneau selon la fabrication en tissus préimprégnés

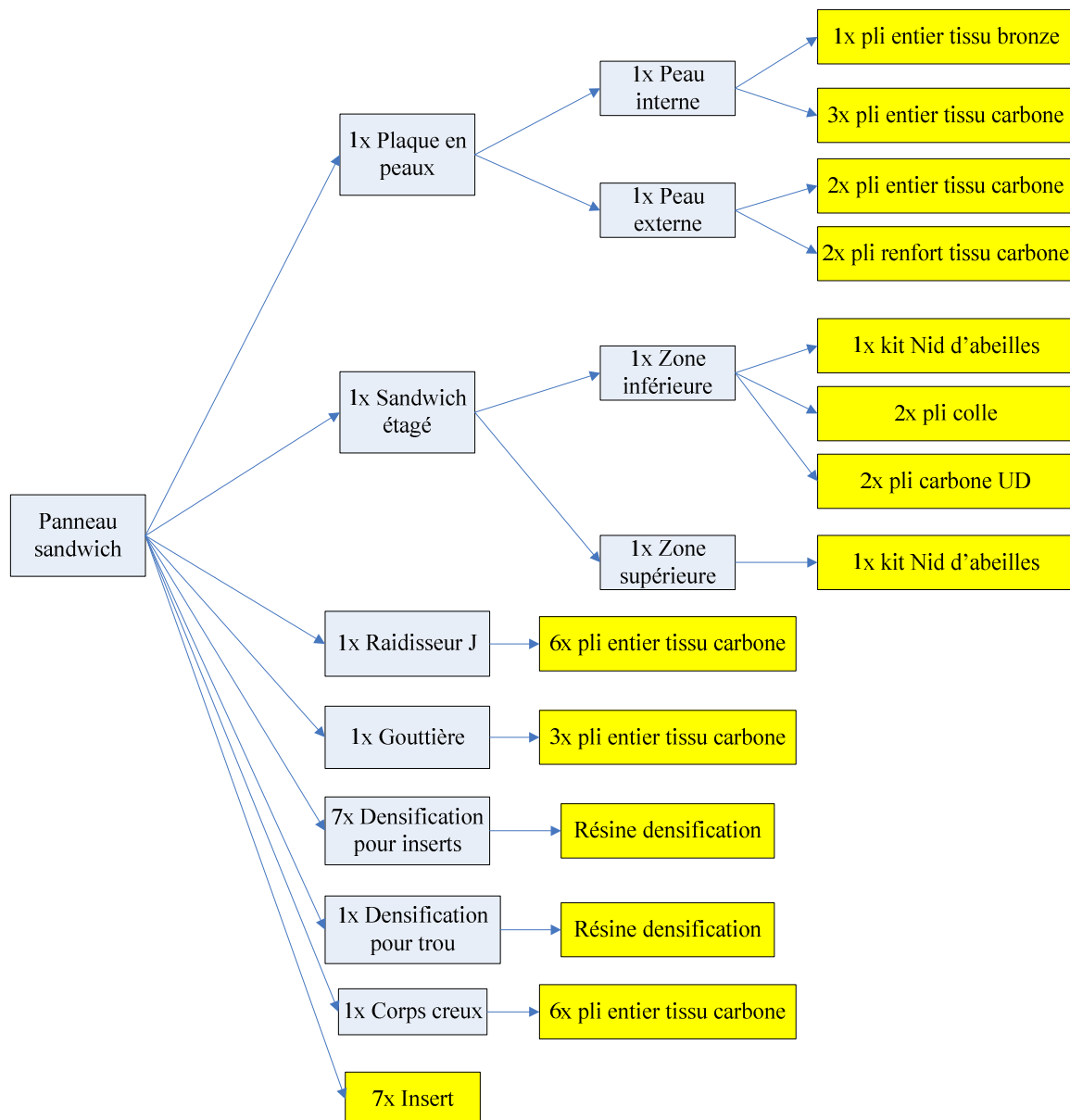


Figure 5-3 Schéma de nomenclature du panneau selon la fabrication par infusion

Les schémas de nomenclature du panneau analysé sont présentés dans la **Figure 5-2** pour le processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés et dans la **Figure 5-3** pour le processus basé sur le procédé d'infusion de résine.

La **Figure 5-4** montre le processus de fabrication détaillé selon le procédé préimprégné. Quant au processus de fabrication basé sur le procédé d'infusion de résine, il est présenté dans la **Figure 5-5**.

Les diagrammes IDEF3 sont la représentation formalisée des processus de fabrication possibles pour la pièce considérée. Ces alternatives sont obtenues selon les connaissances des experts capitalisées sous forme de règles de fabrication. Ces listes ordonnées d'activités sont obtenues en fonction des enchainements des états intermédiaires définis pour chaque caractéristique technologique. En ce qui concerne les activités, nous avons adopté un code de couleur pour représenter les activités correspondant aux processus enveloppe en jaune et celles correspondant aux processus intermédiaires des CT en bleu.

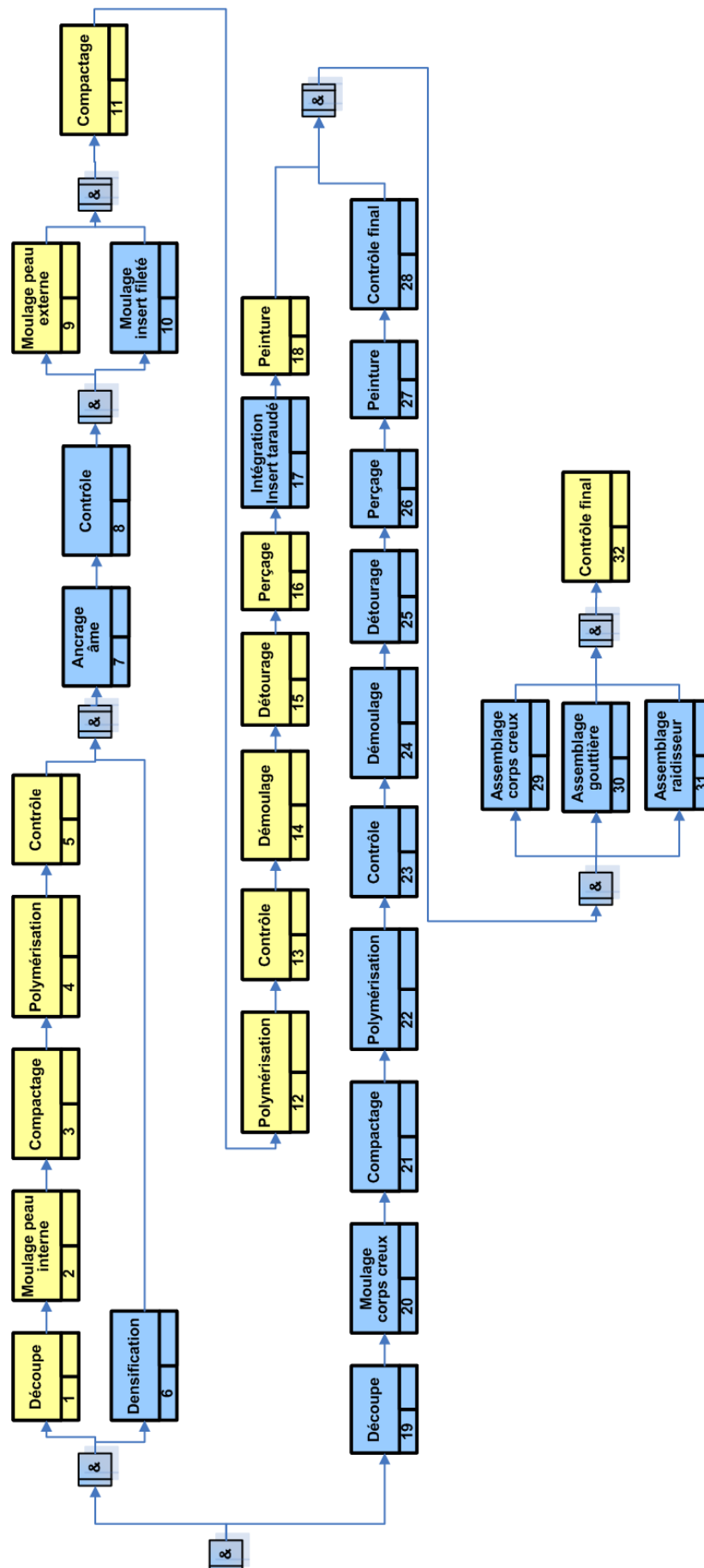


Figure 5-4 Processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés

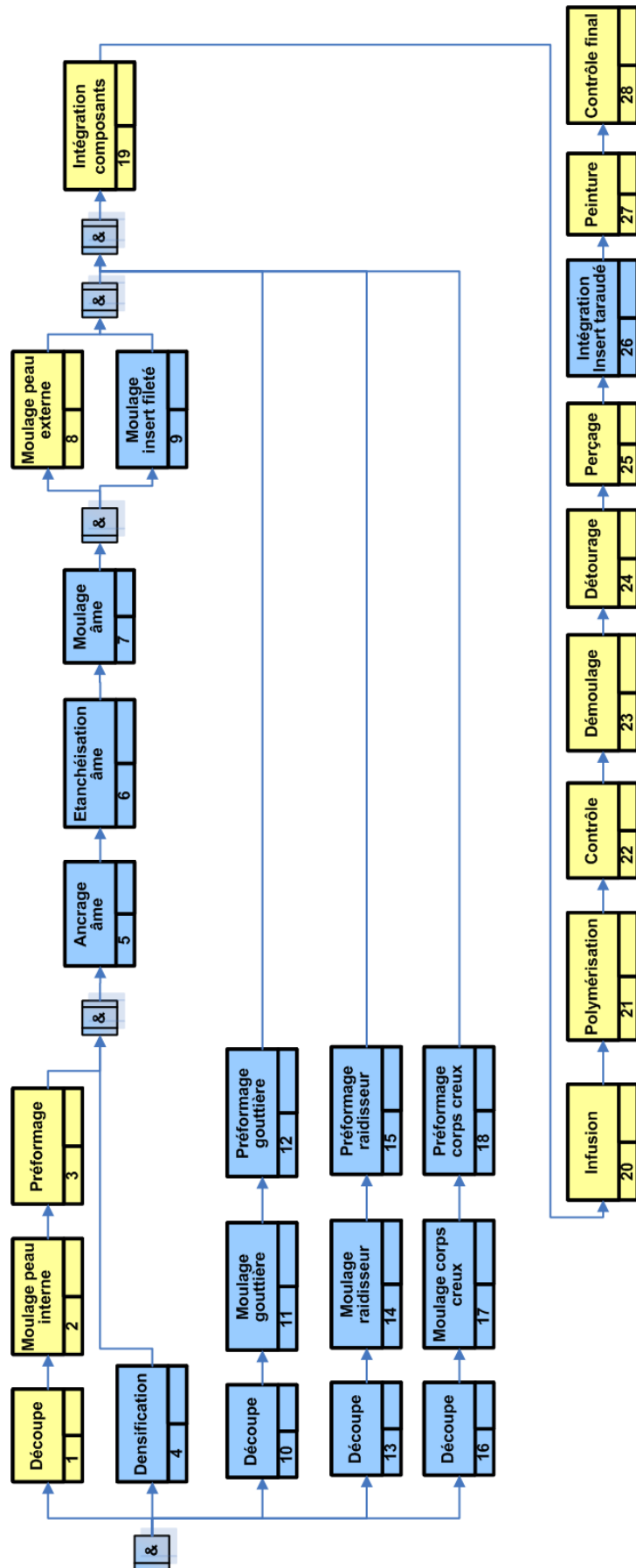


Figure 5-5 Processus de fabrication basé sur le procédé d'infusion de résine

3. Le logiciel support de la méthodologie proposée : CAPSAIR™-SOFT

Une application informatique dénommée CAPSAIR™-SOFT a été développée afin de mettre en œuvre la méthodologie proposée dans ces travaux de recherche. Le logiciel a été développé en Visual Basic en utilisant le logiciel Visual Studio 2008.

Les principales fonctionnalités de l'outil sont :

- *La capitalisation des connaissances et des données à utiliser pour les traitements.* Cela consiste à intégrer les données et les règles capitalisées à l'issue des entretiens avec les experts. Dans ce but, nous proposons à l'utilisateur des interfaces pour la saisie et la sauvegarde de manière structurée des données sur la matière première, les ressources et les activités existantes dans l'entreprise. Ces données sont contenues dans des bases de données accessibles à tout moment de l'analyse. On y rajoute également des interfaces de capitalisation des processus de fabrication enveloppe pour les types de pièces existantes et des processus de fabrication intermédiaires correspondant à la fabrication des composants élémentaires des produits.
- *La définition du produit.* Une description détaillée du produit est réalisée afin d'initialiser l'analyse avec les données produit structurées à l'aide des modèles de classes basés sur le concept de Caractéristique Technologique. Des interfaces sont proposées pour guider l'utilisateur dans l'étape initiale de l'analyse d'un produit. Ces interfaces contiennent un masque de saisie des principaux paramètres utilisés dans l'entreprise pour la description du produit. Afin de disposer d'une granularité suffisante de la description du produit, des interfaces spécifiques sont prévues pour la saisie des valeurs des paramètres spécifiques à chaque Caractéristique Technologique.
- *La génération de processus de fabrication.* On se base sur l'approche de génération de processus de fabrication définie dans le Chapitre 4, section 2.3 qui consiste à utiliser des techniques issues de la technologie de groupe (processus enveloppe) et de l'intelligence artificielle (génération descendante du processus). Une interface permet à l'utilisateur de lancer la génération des processus de fabrication possibles pour le produit analysé. Les processus sont affichés sous forme de liste ordonnée d'activités. La valeur de chacun des indicateurs de performance, calculée au préalable, est affichée pour chaque activité.
- *Le classement des alternatives.* Un module d'analyse multicritères basée sur la méthode Analytic Hierarchy Process (Chapitre 4, section 5) est intégré afin de compléter l'analyse des solutions d'industrialisation. Ce module permet de définir les priorités des critères de sélection. Ces critères sont au nombre de 7 et ils sont imposés dans cette version de l'outil informatique. Un classement est réalisé selon la performance des alternatives par rapport à chaque critère de sélection. Un module d'analyse de sensibilité est ajouté afin d'étudier la possibilité d'avoir un renversement des rangs de la hiérarchie établie.
- *La génération de rapports.* Un module de mise en forme des résultats et des indicateurs proposés au décideur existe. Ce module consiste à récupérer les valeurs des indicateurs de performance de chaque activité et de les présenter dans un fichier Excel suivant un modèle standardisé de présentation des données spécifique à l'entreprise. L'objectif est de fournir aux différents départements de l'entreprise une

base commune afin de réaliser des analyses plus pointues à partir des données obtenues.

Nous allons donner un exemple des fonctionnalités explicités ci-dessus par l'intermédiaire de l'étude de cas proposé au début de ce chapitre. Les différentes interfaces auxquelles l'utilisateur fait appel sont présentées et expliquées brièvement.

3.1 Les interfaces de capitalisation

Ces interfaces sont prévues soit pour faciliter l'accès aux valeurs des paramètres contenus dans les bases de données, soit pour renseigner les règles de fabrication liées aux états intermédiaires des produits.

On présente dans la **Figure 5-6** l'interface qui propose un masque de saisie des données spécifiques à la matière première. Les principaux éléments de cette interface sont :

1. Une liste de choix des types de matériaux ;
2. Les paramètres généraux de la définition d'un matériau. Ces paramètres sont communs à tous les types de matériaux existants ;
3. Les paramètres spécifiques à chaque classe de matériau. Un masque de saisie de ces paramètres est proposé à l'utilisateur en fonction du choix effectué à l'étape n°1 ;
4. Un récapitulatif de tous les matériaux renseignés dans la base de données.

Une fois les paramètres renseignés, on peut sauvegarder les modifications apportées à la base de données pour une utilisation ultérieure. Cette base sera chargée à chaque ouverture du logiciel.

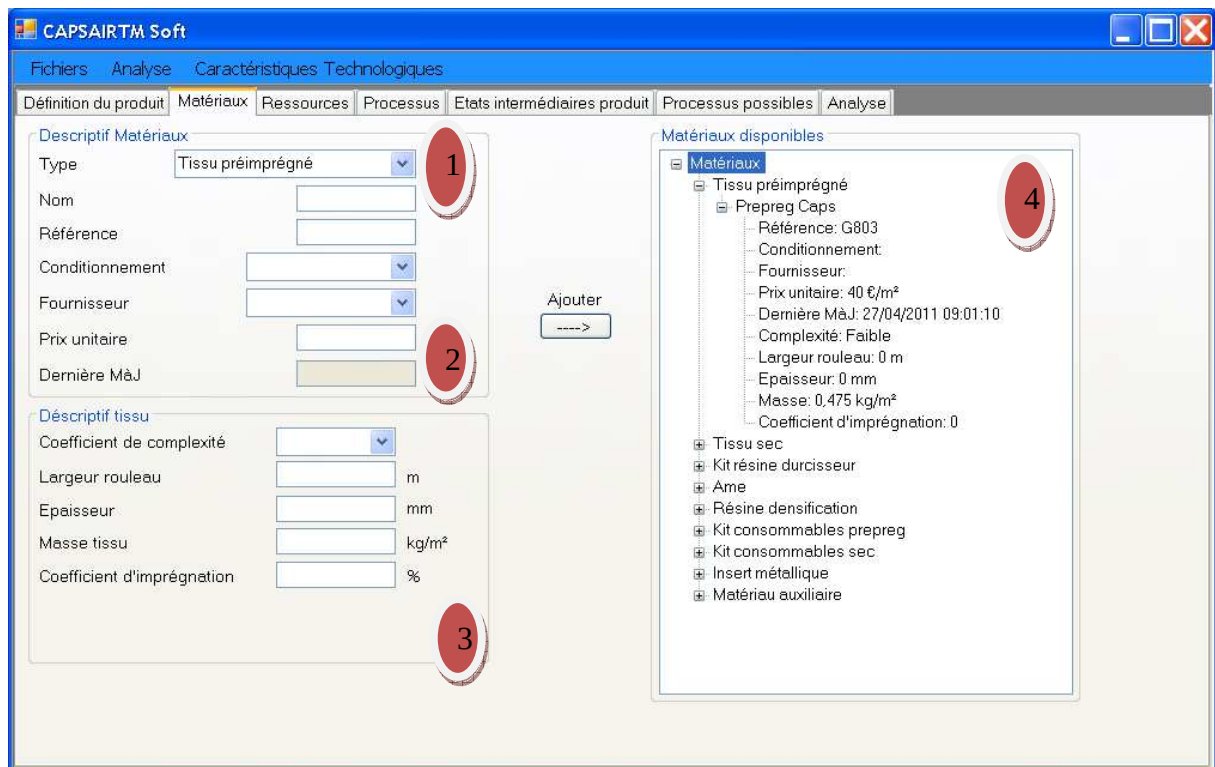


Figure 5-6 Interface d'accès à la base de données sur la matière première

The image displays two side-by-side screenshots of the CAPSAIRTM Soft software interface. Both windows have a blue title bar with the text 'CAPSAIRTM Soft' and a menu bar with 'Fichiers', 'Analyse', and 'Caractéristiques Technologiques'. The left window is on the 'Ressources' tab, showing a 'Descriptif ressources' section with dropdown menus for 'Type' (set to 'Machine'), 'Domaine processus', 'Domaine opération', and 'Domaine matériaux'. Below these are input fields for 'Nom', 'Encombrement' (m²), 'Cadence' (m²/heure), 'Coût achat' (€), 'Coût maintenance' (€/an), 'Utilisation prévue' (années), and 'Dispersion' (%). A 'Coût de fonctionnement' section includes checkboxes for 'Puissance/Amperage' (kW/A) and 'Taux horaire' (€/h), with a 'Vider tous les champs' button at the bottom. The right window is on the 'Processus' tab, showing a 'Type processus' dropdown, a 'Nom' field, a 'Domaine d'activité' dropdown, a 'Vitesse procédé' field (u/min), a 'Sous-traitée' checkbox, and a list of 'Caractéristiques technologiques réalisables' including 'Plaque', 'Ame', 'Métallique', 'Stratifié', 'Couture', 'Densification', 'Corps creux', 'Raidisseur', and 'Gouttière'.

Figure 5-7 Interfaces de renseignement des paramètres des ressources et des opérations

De la même manière les ressources et les opérations disponibles sont ajoutées aux bases de données les concernant (Figure 5-7). Trois types de ressources avec des paramétrages spécifiques sont disponibles : ressources humaines, machines/outillages et équipements. Chaque ressource demande une définition au préalable des domaines des processus type, des opérations et des matériaux auxquels elles peuvent être associées. Une sélection multiple est possible afin de pouvoir indiquer qu'une ressource est capable de travailler sur plusieurs matériaux, par exemple. Une liaison avec le coût d'opération est effectuée par l'intermédiaire des paramètres liés à la consommation énergétique ou à un taux horaire global (centre de coûts).

Une opération est représentée par une activité. Chaque activité renseignée est associée à un processus et elle sera intégrée à un des principaux domaines d'opérations : découpe, moulage, infusion, polymérisation, parachèvement. On renseigne également sur quelles Caractéristiques Technologiques l'activité peut agir. Le paramètre principal associé à une activité est la vitesse du procédé nécessaire au calcul du temps de transformation.

La fonction de capitalisation est supportée par une interface qui concerne l'étape préparatoire de la méthodologie (Figure 5-8). Il s'agit d'assurer les fonctions suivantes :

1. *Détailler la description du produit.* Cette fonction consiste à dresser la liste des Caractéristiques Technologiques connues ainsi que leurs variantes (instances de la classe CT). Une variante de même nom sera associée à chaque processus type car

l'outil nécessite la spécification de la manière dans laquelle les composants du produit seront réalisés dans le cas de chaque processus.

2. *Définir les états intermédiaires d'une variante.* Une liste ordonnée des états intermédiaires nécessaires à la réalisation d'un composant dès son état brut jusqu'à l'état fini du produit (pour les CTs de type plaque) ou jusqu'à l'état d'un composant symbolisant l'intégration à la pièce afin de modéliser leur fabrication en même temps.
3. *Capitaliser les états intermédiaires.* Les listes composées des états intermédiaires sont sauvegardées. En partant de ces listes on associe à l'aide des interfaces de capitalisation les activités qui permettent de réaliser le passage d'un état à un autre. On obtient ainsi les processus enveloppe à partir des états intermédiaires des caractéristiques *Plaque* et *Plaque en peaux*. Les listes d'activités obtenues à partir des états intermédiaires des autres composants représentent les processus intermédiaires qui viendront enrichir les processus enveloppe.

Cette étape est réalisée une seule fois, lors de l'implémentation de l'outil informatique en entreprise. L'objectif principal est de disposer à chaque instant des processus enveloppe et des processus intermédiaires afin de pouvoir les utiliser de manière automatique lors de chaque analyse. L'enrichissement de cette base de processus se fait manuellement en ajoutant les processus non-renseignés dans la base mais qui sont demandés par une nouvelle analyse. Ainsi, dès qu'une nouvelle technique est maîtrisée par l'entreprise, elle peut être ajoutée à la base de processus afin de l'enrichir et de fournir une nouvelle alternative.

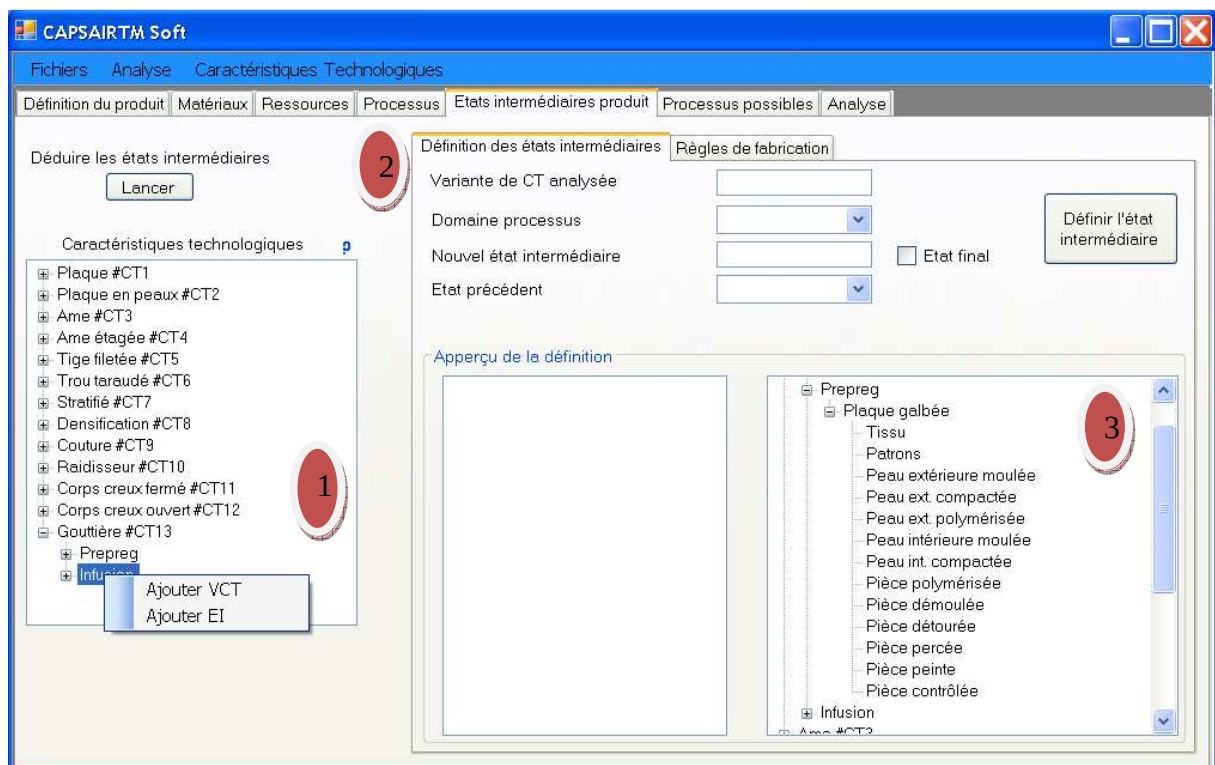


Figure 5-8 Interface de définition de renseignement des états intermédiaires

3.2 Les interfaces de description du produit

Une des contraintes liée au développement du logiciel a été la facilité de lancement d'une analyse. Cela nécessite la réduction du nombre de champs à renseigner par l'utilisateur et l'intégration des traitements automatiques permettant de simuler les démarches de l'ingénieur lors d'une analyse préliminaire du processus de fabrication du produit.

Ainsi, l'interface présentée dans cette section et représentée dans la **Figure 5-9** est la seule à laquelle l'utilisateur doit faire appel pour initialiser l'analyse. Il s'agit d'une interface qui regroupe :

1. les paramètres de description générale du produit portant notamment sur la constitution du produit fini. On y retrouve la liste de Caractéristiques Technologiques prédéfinies. La sélection d'un composant permet d'accéder à son onglet de description détaillée ;
2. des onglets contenant les paramètres pertinents caractérisant chacune des CTs. Par défaut l'utilisateur a accès à la description de la Plaque qui symbolise la pièce la plus basique à laquelle le processus enveloppe est associé. Afin de donner un exemple sur les onglets employés pour réaliser la description d'un composant élémentaire nous présentons l'interface utilisée pour renseigner les paramètres liés à une CT de type raidisseur (**Figure 5-10**).

Ces interfaces permettent non seulement de renseigner les paramètres spécifiques à chaque composant du produit mais aussi de faire la liaison avec la base de données sur les matériaux. Une recherche selon le nom ou la référence du matériau est possible. Un tri est déjà effectué afin de mettre à la disposition de l'utilisateur les données pertinentes sur les matériaux correspondant à chaque type de caractéristique technologique.

Figure 5-9 Interface de saisie des données générales du produit et de la CT « Plaque »

Figure 5-10 Masque de saisie des données caractérisant le raidisseur de type J

3.3 L'interface d'affichage du résultat de la génération de processus

Après la définition du produit à analyser l'utilisateur peut passer à l'étape de génération des processus de fabrication possibles. L'outil dispose pour cela des données d'entrée définies à l'étape précédente (dimensions produit, matériaux sélectionnés à partir de la base de donnée correspondante). L'utilisateur doit spécifier un type de déroulement opératoire en fonction de son expertise sur l'estimation de la complexité du produit. Cela indique à l'outil quel processus enveloppe sera utilisé comme base pour la création des solutions d'industrialisation possibles. En fonction des CT technologiques spécifiées dans la page de description du produit, les processus enveloppe sont enrichis par les processus intermédiaires relatifs à chaque CT. Cela est possible car, comme nous l'avons présenté, l'outil dispose d'une base de processus enveloppe et de processus intermédiaires déduits à partir des états intermédiaires des produits.

La création de la gamme de fabrication consiste donc à rechercher de manière itérative :

- Les processus enveloppe, sélectionnés selon le déroulement opératoire spécifié par l'utilisateur ;
- Les modes opératoires possibles pour la réalisation de chaque CT qui viendront enrichir le processus enveloppe.

N° phase	Activité	CT	TVF	Masse (g)	C. Matière	C. Opération	C. Investissement	Temps de fabrication (min)	Flexibilité
190	Moulage	Insert taraudé		35	21	109,6199...	0	84	
200	Peinture	Plaque		600	66,67	82,108	1,71	78	
210	Assemblage	Raidisseur J		242,1900...	50	21	0,5	20	
220	Découpe	Corps creux ...		46,3125	5,07	0,254475	0	0,195	
230	Moulage	Corps creux ...		0	0,5	39,15	0	30	
240	Compactage	Corps creux ...		0	0	26,09999...	0	20	
250	Polymérisation	Corps creux ...		0	0	280,575	0	215	
260	Contrôle	Corps creux ...		0	0	12,3175	0	15	
270	Démoulage	Corps creux ...		0	0	39,15	0	30	
280	Détournage	Corps creux ...		0	0	31,5	0	30	
290	Peinture	Corps creux ...		29,25	3,25	34,04324	1,71	32,34	
300	Assemblage	Corps creux ...		0	0	21	0,5	20	
310	Assemblage	Gouttière		195,05	30	21	0,5	20	
320	Contrôle	Plaque		0	0	12,3175	0	15	
0				0	0	0	0	0	
0	TOTAL		55	8143,67	930,93	1880,24	15,12	1517,04	2
0	Temps de cy...		0	0	0	0	0	16743,843636...	0

Figure 5-11 Interface proposant un aperçu du processus de fabrication basé sur le procédé de moulage de préimprégnés

Pour chaque activité tous les indicateurs de performance sont évalués. Le résultat de cette étape est représenté dans la **Figure 5-11**. Cette interface regroupe sous la forme d'un tableau les activités de chaque processus de fabrication généré. Pour chaque activité les valeurs des indicateurs de performances y sont ajoutées.

Remarque : après les entretiens avec les experts de l'entreprise, nous avons identifié le cas particulier dans lequel l'utilisateur nécessiterait des indications sur les deux déroulements opératoires car parfois les clients peuvent imposer un processus de fabrication. Nous laissons le choix à l'utilisateur de réaliser une analyse en utilisant l'ensemble de processus enveloppe.

3.4 Les interfaces d'analyse multicritères

Après avoir réalisé la génération des alternatives et le calcul des performances de chaque alternative par rapport aux indicateurs de performance choisis, l'utilisateur peut se servir de l'ensemble de données pour des analyses complémentaires. Les données peuvent être transmises sous format Excel aux différents départements de l'entreprise afin d'évaluer les solutions par Analyse de la Valeur, analyse de la variation des taux horaires, analyses des variations des quantités commandées etc.

Nous proposons à l'utilisateur un module d'analyse multicritères basée sur la méthode AHP afin de lui fournir une hiérarchisation des processus possibles selon les poids qu'il considère comme pertinents par rapport à son objectif. Ainsi, ce module est intégré au logiciel et il comporte les interfaces suivantes :

- Une interface de spécification des priorités des critères de sélection. A partir des comparaisons binaires entre les critères, une matrice est réalisée à partir de laquelle les poids des critères seront calculés ;
- Une interface permettant de lancer le calcul en vue d'établir la hiérarchie (**Figure 5-12**). Cette interface contient également une représentation graphique des poids des alternatives par rapport à chaque critère et de leur poids final ;
- Une interface permettant de réaliser des analyses de sensibilité (**Figure 5-13**). Pour cet exemple nous avons choisi de représenter uniquement l'analyse de sensibilité réalisée pour étudier l'influence du changement des priorités des critères. Cette variation de la priorité est due à des points de vue différents symbolisant les acteurs : Bureau d'Etudes (favorise les indicateurs de qualité), Bureau des Méthodes (favorise la flexibilité et les coûts dans un deuxième temps), Service Financier (plus de poids est accordé aux coûts) et Client (favorise le délai, on se situe dans le cas où le client est contraint par des délais de livraison et nécessite tous les produits rapidement).

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures antérieures concernant l'étude du démonstrateur multifonctions introduit en début de chapitre. Après avoir réalisé l'analyse multicritères sur les deux processus de fabrication possibles nous constatons que les performances des deux processus sont similaires. Ainsi, le processus basé sur le procédé d'infusion de résine peut concurrencer le processus habituellement utilisé dans l'industrie aéronautique à des coûts légèrement inférieurs. Même si le processus basé sur le procédé de moulage de préimprégnés surclasse l'infusion, l'écart n'est pas important.

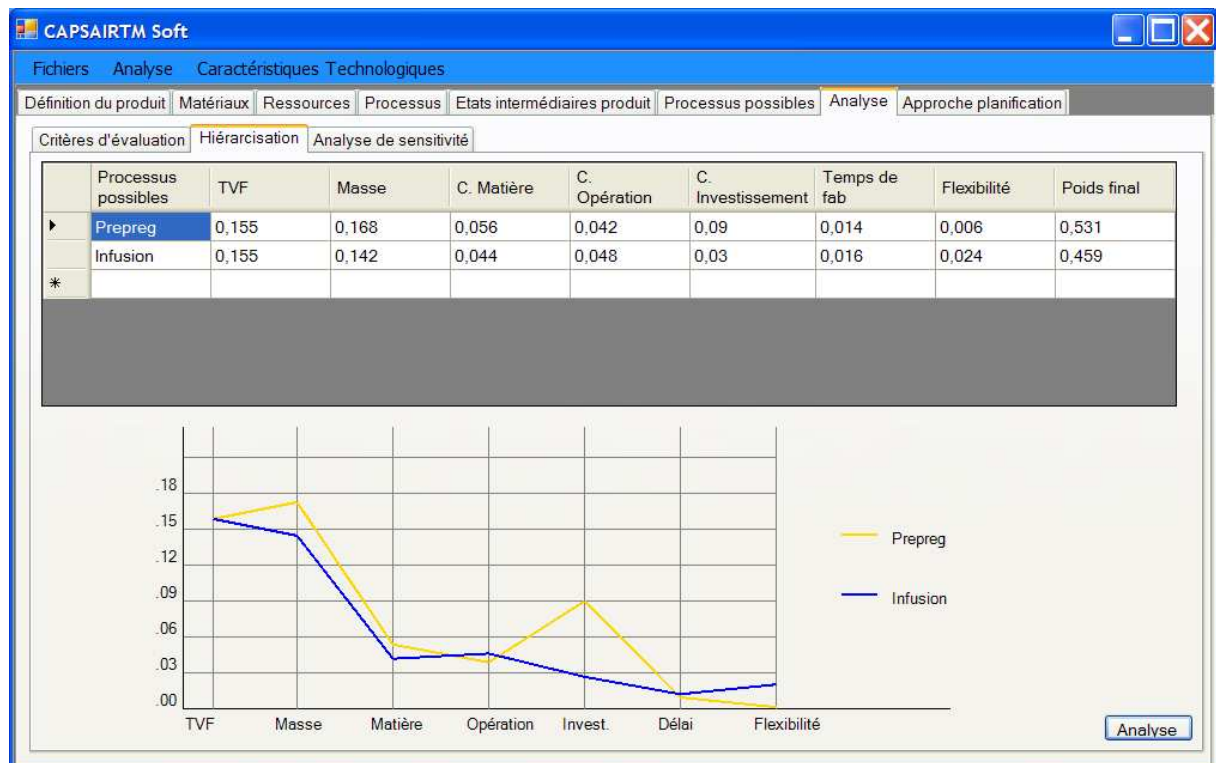


Figure 5-12 Résultat de l'analyse multicritères

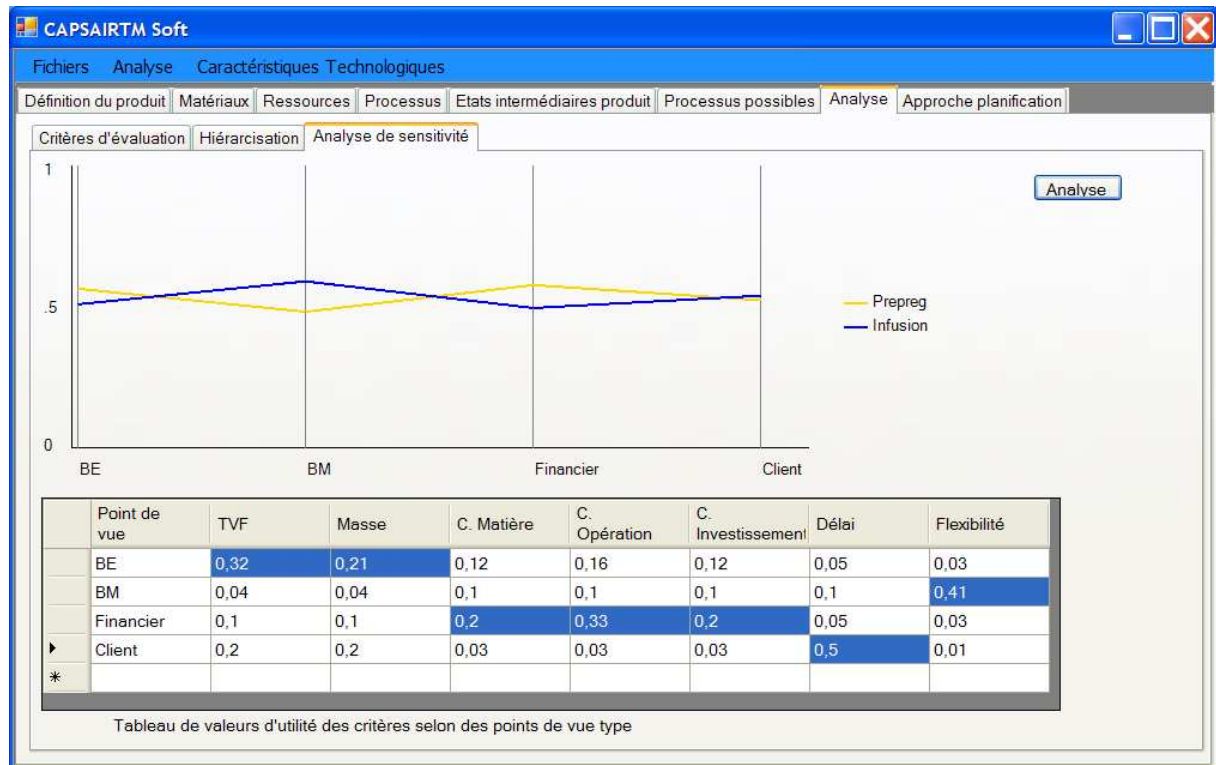


Figure 5-13 Analyse de sensibilité selon différents points de vue des décideurs

Comme on peut le constater suite à l'analyse de sensibilité, selon les points de vue, l'infusion peut surclasser le moulage des préimprégnés. Cela arrive pour les points de vue suivants :

- BM pour lequel plus de poids est associé à la flexibilité de l'atelier ;
- Client pour lequel une priorité plus grande est attribuée au délai de fabrication.

Il est clair que des analyses complémentaires sont à apporter afin de supporter la décision lors de la sélection d'un processus de fabrication basé sur les procédés mentionnés.

4. Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre un cas d'études basé sur une pièce de démonstration réalisée dans le cadre du projet CAPSAIRTM dans le but de récapituler et de valider la méthodologie proposée.

A travers l'analyse de cette pièce, nous avons également présenté les principales fonctionnalités de l'outil informatique développé pour la mise en œuvre de la méthodologie proposée.

Il est à noter que des résultats très proches avec les données caractérisant la pièce réelle ont été obtenus en utilisant l'outil informatique. D'autres cas d'études sont en cours de réalisation avec la SLCA en vue de mieux calibrer l'algorithme d'évaluation par rapport aux estimations réalisées par le Bureau des Méthodes.

Conclusion
générale et
perspectives

Le marché des produits composites pour l'aéronautique est très concurrentiel et les entreprises manufacturières y exerçant leurs activités sont amenées à adopter des démarches innovantes afin de toujours proposer des produits performants, en particulier au niveau des produits de structure. De plus, elles sont obligées à analyser les coûts de fabrication des produits afin d'optimiser en termes de coûts, productivité et flexibilité leur système de production dans le but de répondre avec succès aux appels d'offres des clients et de disposer des avantages concurrentiels pour pouvoir argumenter, face aux clients, leurs capacités de réalisation des produits demandés à des rapports qualité-coût-délai compétitifs.

Ce secteur de l'industrie est caractérisé par une multitude de procédés de fabrication permettant, en utilisant des modes opératoires différents, de fabriquer des produits conformes aux cahiers des charges des clients. Nous avons présenté, le long de cette étude, le fait que l'analyse pointue de la performance du produit fait apparaître des facettes souvent en opposition. L'augmentation de la performance mécanique du produit peut impliquer l'utilisation des matériaux nécessitant un mode opératoire qui augmente les coûts de fabrication. Ainsi, la prise en compte simultanée des paramètres gravitant autour du tryptique Produit-Processus-Ressource dès l'étape de conception préliminaire du processus de fabrication est essentielle pour guider l'industrialisation du produit.

Nous avons également pu voir que le décideur concerné par l'analyse de l'industrialisation d'un produit, par la définition des processus de fabrication et par la sélection d'une solution d'industrialisation viable est confronté à des multiples points de vue caractérisant la performance d'un produit. Il est également confronté à des multiples critères définissant ce niveau de performance. Ces critères sont souvent contradictoires et leur quantification n'est pas toujours une tâche aisée. De plus, l'importance accordée aux critères de sélection est souvent différentes en fonction des points de vue spécifiques à un acteur décrivant le niveau de performance du produit.

Nous avons essayé par l'intermédiaire de ce travail de recherche de proposer une méthodologie répondant aux problématiques de cette étape d'analyse décrite dans les paragraphes précédents. Les points clés abordés par cette méthodologie sont liés à :

- L'identification et l'intégration des paramètres pertinents et de leurs relations issues du tryptique Produit-Processus-Ressource ;
- La structuration des connaissances (données et traitement) du domaine abordé et leur exploitation lors de la phase de conception préliminaire du processus de fabrication ;
- Le développement d'une maquette informatique mettant en œuvre la méthodologie d'élaboration des processus de fabrication viables ;
- Le choix des indicateurs permettant d'évaluer la performance industrielle des processus de fabrication possibles ;
- L'utilisation des critères de sélection afin d'établir la hiérarchie des solutions et d'aider l'utilisateur lors de l'analyse de décision multicritères.

Le premier chapitre a introduit le domaine des produits composites auxquels nous nous intéressons. Nous avons pu présenter les caractéristiques et les spécificités de ces produits ensemble avec les nombreux procédés de fabrication et de leurs variantes permettant leur

réalisation. Dans ce travail nous nous sommes limités aux produits composites constitués d'un renfort en fibre longues, d'une matrice organique thermdurcissable et des éventuels composants additionnels entrant dans l'architecture des pièces traitées. Cette brève partie introductive a servi de structuration des problématiques rencontrées dans ce type d'environnement industriel.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés aux paramètres spécifiques aux principales étapes de fabrication des produits composites. Les deux procédés considérés dans ce travail, le moulage de préimprégnés et l'infusion de résine liquide, ont été abordés afin d'étudier du point de vue de la mise en œuvre industrielle des étapes de : moulage, imprégnation, consolidation et solidification. Cela a permis également d'identifier les paramètres clés à prendre en compte lors d'une analyse de la phase d'industrialisation. Elle a servi également d'étude préparatoire au développement de notre méthodologie car les paramètres pertinents impactant la conception préliminaire du processus de fabrication y sont expliqués.

A partir de ces premières études on a montré l'intérêt d'orienter l'analyse de la performance des processus basée sur les activités. Cette manière d'analyser la performance offre un meilleur détail sur les inducteurs de chacune des activités impactant sur la performance finale du processus de fabrication. En se basant sur une technique analytique, cela permet de disposer d'une approche plus précise que les techniques paramétriques habituellement utilisées dans le domaine. Néanmoins, ce type d'approche reste assujéti à la complétude et à la pertinence des données existantes.

L'étude des interactions du tryptique PPR relevées lors de l'étape d'analyse de l'industrialisation des produits composites a fait ressortir la possibilité de classement des paramètres en familles. Néanmoins, les paramètres et les savoirs ne sont pas représentés de manière structurée dans l'entreprise. L'étude des compléments bibliographiques issus des travaux du domaine a montré également que l'on s'est intéressé très peu dans ce secteur à la représentation formelle des connaissances. Ces premières constatations nous ont amenées à orienter notre démarche dans un premier temps vers la structuration des connaissances et leur représentation formelle à l'aide des langages de modélisation objet.

L'objectif du troisième chapitre a été de s'intéresser aux modèles d'informations développés dans les travaux existants afin de représenter les produits, les processus, les ressources et leurs interactions afin d'évaluer leur éventuelle applicabilité à notre problématique. Ce que nous avons constaté après cette étude a été que des nombreux modèles ont été développés pour représenter formellement les objets d'entreprise. Il n'était pas nécessaire de développer des nouveaux modèles mais plutôt de les adapter à notre contexte.

Nous avons ainsi introduit le concept de Caractéristique Technologique nécessaire pour assurer une granularité suffisante de la description du produit. Ce concept permet de capturer les principaux paramètres liés aux composants élémentaires d'un produit composites. Nous avons enrichi le modèle du processus par le concept de Processus Intermédiaire qui est directement lié aux Caractéristiques Technologiques. Un tel objet permet de structurer les connaissances des acteurs du projet sur les modes opératoires disponibles pour réaliser le composant élémentaire du produit. Une partie de notre travail a été constitué par

L'identification des Caractéristiques Technologiques et de leurs Processus Intermédiaires suite aux entretiens avec les experts. Suite à ces entretiens, une base a été créée afin de regrouper les informations issues de l'expérience des acteurs de l'entreprise sur les composants élémentaires des produits à partir des pièces traitées dans le passé.

Dans le troisième chapitre nous avons aussi abordé la notion de capitalisation des connaissances. Pour cela un ensemble de règles de fabrication ont été introduites afin de capturer les connaissances sur la technologie de fabrication des composites. Ces règles modélisent les liens entre les objets d'entreprise. Elles permettent dans un premier temps de formaliser les relations entre les activités d'un processus et, dans un deuxième, de spécifier les domaines de validité des activités et des ressources connues par l'entreprise afin d'exprimer leurs capacités.

Les démarches regroupées dans le troisième chapitre constituent la phase de préparation de la connaissance pour l'exploitation. Le traitement prévu concerne deux aspects :

- La génération automatique du processus de fabrication ;
- L'analyse de la performance d'un processus.

L'objet du quatrième chapitre a été de s'intéresser aux deux aspects de l'exploitation des connaissances. D'abord nous avons étudié les techniques existantes de génération des processus de fabrication par une analyse comparative. Nous avons choisi de mettre en œuvre une technique mixte basée sur des concepts issus de la technologie de groupe et de l'intelligence artificielle. La technique proposée consiste à utiliser des processus enveloppe pour modéliser le déroulement opératoire définis pour des familles de pièces. Ces familles ont été identifiées à l'aide des experts et elles ont été établies à partir des pièces de base qui permettent de capturer dans une liste ordonnée d'activités les principales étapes de fabrication. Ces processus sont enrichis par la suite en intégrant les Processus Intermédiaires. Cette intégration est facilitée par la description des Caractéristiques Technologiques à l'aide des états intermédiaires et par les règles de fabrication associées.

Dans le même chapitre les indicateurs de performance sont expliqués. Ils sont issus du tryptique Qualité-Coût-Délai et leur implémentation est facilitée par l'approche basée sur l'estimation analytique des performances des activités. L'objectif a été de disposer des mesures de la performance de chaque processus de fabrication possible en vue d'établir une hiérarchie des alternatives. Cette hiérarchisation a été mise en œuvre en faisant appel à une analyse multicritères du groupe des méthodes d'agrégation complète : Analytic Hierarchy Process.

Cette démarche permet de fournir à l'utilisateur des indications établies à partir des mesures quantitatives et qualitatives de la performance des processus de fabrication possibles afin d'aider son jugement lors du choix d'une solution d'industrialisation d'un produit. La robustesse de l'analyse est évaluée à l'aide d'une analyse de sensibilité montrant le degré de sensibilité des notes obtenues par les processus par rapport à la variation d'un certain nombre de facteurs.

Dans le cinquième chapitre nous introduisons une pièce d'étude qui nous a permis de valider la mise en œuvre de la méthodologie et d'introduire l'outil informatique développé pour

supporter notre démarche. Bien qu'appliqué uniquement au domaine fixé au début de cette étude, l'outil informatique pourrait être adapté à d'autres domaines. On peut faire une analogie entre l'outil proposé dans ce travail et les outils existants dans le domaine d'usinage basés sur les entités d'usinage.

La poursuite du travail consiste à finaliser l'étape de validation de l'outil en entreprise. A ce stade de la rédaction la phase de validation a été démarrée en utilisant des pièces fabriquées afin de comparer les résultats obtenus avec l'outil proposé et les résultats obtenus par les moyens habituellement employés au sein du Bureau des Méthodes. Des améliorations sont à apporter à l'interface de l'outil suite aux remarques faites par les utilisateurs de l'outil lors des études menées en entreprise.

On note également au niveau des perspectives de ce travail l'approfondissement d'un certain nombre de concepts abordés. Il s'agit de l'étude de la capacité de ressources affectées aux activités. Dans le cadre de notre travail les ressources sont considérées comme capables d'effectuer une transformation dans un domaine fixé. Cela a été considéré car la plupart des équipements sont conçus et prévus pour être utilisés pour un programme de fabrication spécifique. Néanmoins, dans certaines situations la même ressource peut être utilisée pour la transformation des matériaux différents avec des résultats différents en termes de qualité. Un niveau de capacité est à définir dans le futur afin d'évaluer cet aspect lors de l'allocation des ressources, en particulier pour répondre aux objectifs de flexibilité.

Dans notre étude nous nous limitons à l'estimation de la performance d'un processus de fabrication à l'aide des indicateurs de production et de qualité pour la phase de conception préliminaire du processus de fabrication. Une étude plus globale devra être intégrée afin de prendre en compte les critères d'analyse de l'ensemble d'étapes du cycle de vie du produit ainsi que les contraintes environnementales. Egalement, des aspects organisationnels comme des liens avec les autres outils informatiques de l'entreprise pourraient y être intégrés.

La complexité de la géométrie et de la structure du produit a été utilisée dans la définition des processus enveloppe. Dans la méthodologie proposée la complexité d'un produit à analyser est évaluée sur une échelle verbale par l'utilisateur et le choix est manuel. En perspective, des coefficients de complexité identifiés à partir d'une analyse de la pièce pourront faire l'objet d'une étude complémentaire afin de rendre automatique ce traitement.

[Références]

- [Ackoff 1989] **Ackoff R.L.**, *From Data to Wisdom*, Journal of Applied Systems Analysis, Volume 16, 1989, pp. 3-9
- [Akermo 2000] **Akermo, M., Astrom, B.T.**, *Modelling component cost in compression moulding of thermoplastic composite and sandwich components*, Composites: Part A, 31, 2000, pp. 319-333
- [Alting 1989] **Alting, L., Zhang, H.**, *Computer Aided Process Planning : the state-of-the-art survey*, International Journal of Production Research, vol. 27, n° 4, 1989, pp. 553-585
- [Anselmetti 1994] **Anselmetti, B.**, *Génération automatique de gammes de tournage et contribution à la gestion d'une cellule de production*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy I, LURPA, janvier 1994
- [Apostolopoulos 2002] **Apostolopoulos, P., Kassapoglou, C.**, *Recurring cost minimization of composite laminated structures – optimum part size as a function of learning curve effects and assembly*, Journal of Composite Materials, Vol. 36, N°04, 2002, pp. 501-518
- [Ashby 2001] **Ashby M.F., Bréchet Y., Salvo L.**, 20. *Sélection des matériaux et des procédés de mise en œuvre*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001, ISBN 2-88074-473-3
- [Babad 1993] **Babad, Y.M., Balachandran, B.V.**, *Cost driver optimization in activity-based costing*, The Accounting Review, 68, 1993, pp. 563-575
- [Bellut 1991] **Bellut, S.**, *La compétitivité par la maîtrise des coûts*, AFNOR, 1991
- [Berbain] **Berbain, F., Chevalier, A.**, *Mise en œuvre des composites. Méthodes et matériels*. Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites, A 3720
- [Binétruy] **Binétruy C.**, *Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques*, Techniques de l'ingénieur, AM 3718
- [CES 2007] CES EDUPACK 2007, Granta Material Intelligence
- [Chang 1990] **Chang, T.C.**, *Expert Process Planning for Manufacturing*, Addison-Welsey, 1990
- [Chekanov 1995] **Chekanov Yu.A., Korotkov, V.N., Rozenberg, B.A., Dzhavvadyan, E.A., Bogdanova, L.M.**, *Cure shrinkage defects in epoxy resins*, Polymer, Volume 36, Number 10, 1995, pp. 2013-2017
- [Chep 1992] **Chep, A.**, *Modèle de représentation et d'utilisation des connaissances nécessaires à la conception d'un processus de fabrication: application à la génération automatique de gamme d'usinage en tournage*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, LURPA, 1992

- [Cinquin] **Cinquin, J.**, *Les composites en aérospatiale*, Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites, AM 5645
- [Cokins 1993] **Cokins, G., Stratton, A., Helbling, J.**, *An ABC manager's primer: Straight talk on activity-based costing*, Institute of Management Accountants, ISBN 978-0866412209, 1993
- [Danisman 2007] **Danisman M., Tuncol, G., Kaynar, A., Murat Sozer, A.**, *Monitoring of resin flow in the resin transfer moulding (RTM) process using point-voltage sensors*, Composites Science and Technology 67, 2007, pp. 367-379
- [Dantan 2006] **Dantan J.Y., Hassan, A., Etienne, A., Siadat, A., Martin, P.**, *Information modeling for variation management during the product and manufacturing process design*, IJIDEM, 2008, 2, pp. 107-118
- [Descotte 1981] **Descotte, Y., Latombe, J.C.**, *GARI: A problem solver that plans how to machine mechanical parts*, Proceedings of the 7th International Joint Conference on AI, Vancouver, Canada, 1981
- [Dieng-Kuntz 2001] **Dieng-Kuntz R., Corby, O., Gandon, F., Giboin, A., Golebiowska, J., Matta, N., Ribière, M.**, *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances*, 2^{ème} édition, Paris, Dunod, 2001, ISBN 2 10 006300 6
- [DUNOD 2008] *Pratique des plastiques et composites. Choix, contrôle, production, qualité*, Les référentiels DUNOD, DUNOD, dernière mise à jour : 2008
- [Durand 1990] **Durand, P.**, *GAGMAT: un système de génération automatique de gammes d'usinage intégré dans une chaîne complète de CFAO*, dans La gamme automatique en usinage, Hermès, Paris, 1990
- [Duverlie 1999] **Duverlie, P., Castelain, J.-M., Farineau, T.**, *Estimation des coûts en production mécanique*, Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, 10 juillet 1999.
- [Eaglesham 1998] **Eaglesham, M.A.**, *A decision support system for advanced composites manufacturing cost estimation*, PhD. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1998
- [El Hage 2006] **El Hage C.**, *Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel*, Thèse soutenue le 27 octobre 2006 à l'Université Technologique de Compiègne
- [El-Mikawi 1996] **El-Mikawi, M.**, *A methodology for evaluation of the use of advanced composites in structural civil engineering applications*, Composites: Part B, 27B, 1996, pp. 203-215
- [Ermine 2003] **Ermine J.-L.**, *La gestion des connaissances*, Paris, Lavoisier, 2003, ISBN 2-7462-0660-9

- [Etienne 2006] **Etienne, A., Dantan, J.Y., Siadat, A., Martin, P.,** *An improved approach for automatic process plan generation of complex borings*, Computers in Industry, 57, 2006, pp. 663-675
- [Etienne 2007] **Etienne A.,** *Intégration Produit/Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés – application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques*, Thèse Arts et Métiers ParisTech et Université Paul Verlaine, Metz, 15 octobre 2007
- [Fibersonixx 2010] <http://www.fibersonixx.com/Composites%20101.htm>, dernière consultation: 30/09/2010
- [Gama 1990] **Groupe Gama,** *La gamme automatique en usinage*, recueil de textes du séminaire GAMA réunis par Bourdet P. et Villeneuve F., Editions Hermes, 1990, ISBN 2-86601-255-0
- [Gama 1998] **Groupe Gama,** *Modélisation des contraintes de fabrication en conception (DFM)*, chapitre dans l'ouvrage : Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils, sous la direction de : Michel Tollenaere, ISBN 2-86601-694-7, Editions Hermès, Paris, France, 1998
- [Girard 2005] **Girard P.,** *La conception : satisfaction des spécifications vs conduite des activités humaines*, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, 2005
- [Grundstein 1995] **Grundstein M.,** *La capitalisation des connaissances de l'entreprise, système de production de connaissances. L'entreprise apprenante et les Sciences de la Complexité*, Aix-en-Provence, mai 1995
- [Gupta 2003] **Gupta, M., Galloway, K.,** *Activity-based costing/management and its implications for operations management*, Technovations, 23, 2003, pp. 131-138
- [Halevi 1995] **Halevi, G., Weil, R.,** *Principles of Process Planning*, ISBN 0-412-54360-5, 1995, Chapman & Hall, London, England
- [Harani 1997] **Harani Y.,** *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Metz, 19 novembre 1997
- [Hirt 1987] **Hirt D.E., Adams, K.L., Prud'homme, R.K., Rebenfeld, L.,** *In-plane Radial Fluid Flow Characterisation of Fibrous Materials*, Journal of Thermal Insulation, vol. 10, 1987, pp. 153-173
- [Hubert 2001] **Hubert P., Poursartip A.,** *Aspects of the Compaction of Composite Angle Laminates: An Experimental Investigation*, Journal of Composite Materials, Vol. 35, 2001
- [Kaplan 1992] **Kaplan, R.S.,** *In defense of activity-based cost-management*, Management Accounting, 74 (5), 1992, pp. 58-63

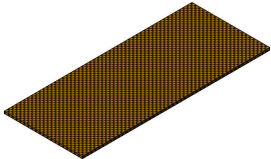
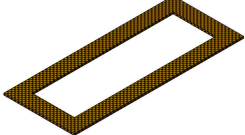
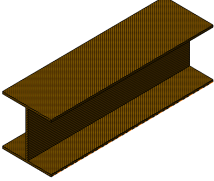
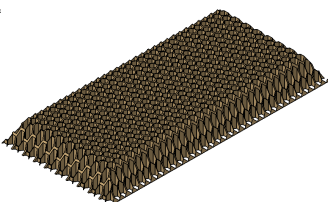
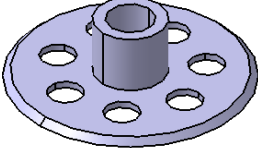
- [Karkan 1993] **Karkan, J.M., Tjoen, G.**, *Systèmes experts – un nouvel outil d’aide à la décision*, ISBN 978-2-225-84196-5, Masson, Office international de librairie, 1993
- [Kassapoglou 1997] **Kassapoglou C.**, *Simultaneous cost and weight minimization of composite-stiffened panels under compression and shear*, Composites Part A, 28A, 1997, pp. 419- 435
- [Kazilas 2005] **Kazilas M.C., Partridge I.K.**, *Exploring equivalence of information from dielectric and calorimetric measurements of thermoset cure—a model for the relationship between curing temperature, degree of cure and electrical impedance*, Polymer, 46, 2005, pp. 5868-5878
- [Keeney 1976] **Keeney, R.L., Raiffa, H.**, *Decision with multiple objectives : preferences and value tradeoffs*, J. Wiley, New York 1976
- [Kerbrat 2009] **Kerbrat, O.**, *Méthodologie de conception d’outillages modulaires hybrides basée sur l’évaluation quantitative de la complexité de fabrication*, Thèse soutenue à l’ENS Cachan antenne de Bretagne, 22 octobre 2009
- [Krenchel 1964] **Krenchel H.**, *Fiber reinforcement*, Copenhagen, Akademisk Forlag, 1964
- [Labrousse 2004] **Labrousse M.**, *Proposition d’un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d’entreprise*, Thèse de l’Ecole Centrale de Nantes et de l’Université de Nantes, Nantes, 13 juillet 2004
- [Labrousse 2008] **Labrousse M., Bernard A.**, *FBS-PPRE, an Enterprise Knowledge Lifecycle Model*, Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management, DOI: 10.1007/978-3-540-78431-9_16, Springer, 2008, pp. 285-305
- [Lawrence 2009] **Lawrence J.M., Neacsu V., Advani S.G.**, *Modeling the impact of capillary pressure and air entrapment on fiber tow saturation during resin infusion in LCM*, Composites: Part A 40, 2009, pp. 1053-1064
- [Lee 1982] **Lee W.I., Loos A.C., Springer G.S.**, *Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin*, Journal of Composite Materials, 16, 1982, pp. 510-520
- [Marco 1950] *Marco method*, US Patent no. 2495640, 24/01/1950
- [Martin 2011] **Martin P., Dantan J.-Y., D’Acunto A.**, *Virtual manufacturing: prediction of work piece geometric quality by considering machine and set-up accuracy*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 24, Issue 7, 2011, pp. 610-626
- [Mayer 1992] **Mayer R.J., Menzel, C.P., Painter, M.K., de Witte, P.S., Blinn, T., Perakath, B.**, *Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method Report*, Interim Technical Report for Period February 1991 – April 1992, AL-TR-1992-0057

- [Mazumdar 2002] **Mazumdar S.K.**, *Composites manufacturing : materials, product and process engineering*, CRC Press, 2002, ISBN 978-0-8493-0585-6
- [Michaud 2000] **Michaud V., Mortensen A.**, *Infiltration processing of fibre reinforced composites: governing phenomena*, *Composites: Part A* 32, 2001, pp. 981-996
- [Mihaluta 2009] **Mihaluta M., Martin P., Perrin, H.F., D'Acunto, A.**, *Identification of relevant indicators for preforming process selection*, Conférence PPE2009, 22-23 octobre 2009, Galati, Roumanie
- [Mihaluta 2010] **Mihaluta M., Martin P.**, *Application of Discrete Event Simulation to the Design of a Composite Manufacturing Facility*, CIRP ICME'10 International Conference, ISBN 978-88-95028-65-1, Capri, 23-25 June 2010
- [Mutel 1988] **Mutel, B.**, *Computer-Aided Group Technology Integrated System*, *Annals of the CIRP*, vol. 37/1, 1988, pp. 425-428
- [Negrier] **Negrier, A., Rigal, J.-C.**, *Présentation des matériaux composites*, *Techniques de l'ingénieur*, traité Généralités, AM 7790
- [Noel 1990] **Noel, G., Brzakowski, S.**, *A la recherche du temps à gagner, pourquoi la technologie de groupe ?*, chapitre dans l'ouvrage : *La gamme automatique en usinage*, recueil de textes du séminaire GAMA réunis par Bourdet P. et Villeneuve F., Editions Hermes, 1990, ISBN 2-86601-255-0
- [Noël 2008] **Noël F., Roucoules L.**, *The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle*, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Volume 21, Issue 2, 2008, pp. 139-145
- [Nonaka 1995] **Nonaka I., Takeuchi H.**, *The Knowledge-Creating Company*, Oxford University Press, 1995, ISBN 0-19-509-269-4
- [Roucoules 2007] **Roucoules L.**, *Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2007
- [Roy 1968] **Roy B.**, *Classement et choix en présence de points de vue multiples*, *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, tome 2, n° VI, 1968, pp. 57-75
- [Rozant 2000] **Rozant O., Bourban P.-E., Manson J.-A.E.**, *Drapability of dry textile fabrics for stampable thermoplastic preforms*, *Composites: Part A*, 31, 2000, p. 1167-1177
- [Rudd 1997] **Rudd C.D., Long, A.C., Kendall, K.N., Mangin, C.G.E.**, *Liquid moulding technologies. Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques*, Woodhead Publishing Limited, 1997, ISBN 1 85573 242 4

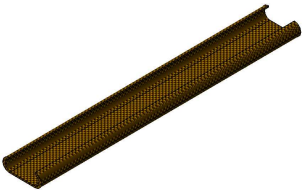
- [Saaty 1980] **Saaty, T.L.**, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill, New York, 1980
- [Scharlig 1999] **Scharlig, A.**, *Décider sur plusieurs critères*, ISBN 978-2-88074-073-3, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1999
- [Slade 1991] **Slade, S.**, *Case-based reasoning : a research paradigm*, AI Magazine, vol. 12, n° 1, pp. 42-55, 1991
- [Schubel 2010] **Schubel, P.J.**, *Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade produced by vacuum infusion (VI)*, Renewable Energy, 35, 2010, pp. 183-189
- [Thibault 2008] **Thibault, A.**, *Contribution à l'intégration Produit-Processus de fabrication, application au domaine de la forge*, Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech centre de Metz, juin 2008
- [Thornton 1999] **Thornton A.C.**, *A mathematical framework for the key characteristic process*, Research in engineering design, 11, 1999, pp.145-157
- [Thuis 1999] **Thuis, H.G.S.J.**, *Development of a composite cargo door for an aircraft*, Composite Structures, 47, 1999, pp. 813-819
- [Tixier 2001] **Tixier B.**, La problématique de la gestion des connaissances. Le cas d'une entreprise de développement informatique bancaire, IRIN, Université de Nantes, Rapport de recherche N°01.9, septembre 2001, http://www.cndwebzine.hcp.ma/IMG/pdf/La_problematique_de_la_gestion_des_connaissances_le_cas_d_une_entreprise_de_developpement_informatique_bancaire.pdf, dernière consultation 03/01/2011
- [Tsang 1988] **Tsang, J.P.**, *The PROPEL Process Planner*, Proceedings of the 19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, vol. 17, n°2, 1988, pp. 115-153
- [Verrey 2006] **Verrey, J., Wakeman, M.D., Michaud, V., Manson, J.-A.E.**, *Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan*, Composites: Part A, 37, 2006, pp. 9-22
- [Villeneuve 2003] **Villeneuve, F.**, *Génération automatique des processus de fabrication*, chapitre dans l'ouvrage : Fabrication assistée par ordinateur, sous la direction de : Alain Bernard, ISBN 2-7462-0618-8, Lavoisier, Paris, France, 2003
- [Wang 2009] **Wang P., Molimard, J., Drapier, S., Vautrin, A., Henrat, P.**, *Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués*, Comptes Rendus des JNC 16, Toulouse, 2009
- [Wright 1936] **Wright, T.P.**, *Factors affecting the cost of airplanes*, Journal of Aeronautical Sciences, 3(4), 1936, pp. 122-128

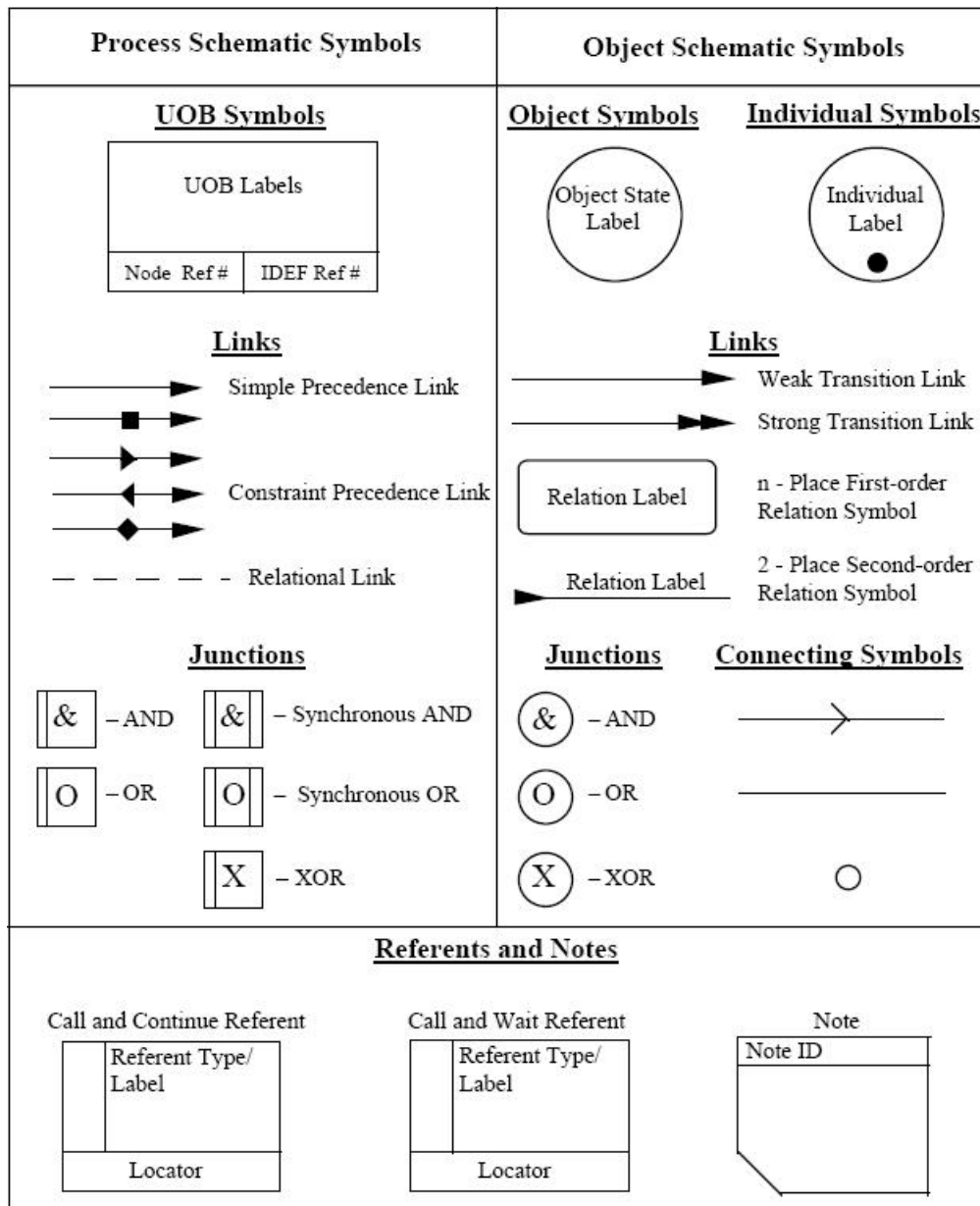
[Annexes]

Annexe 1 Liste des Caractéristiques Technologiques proposées

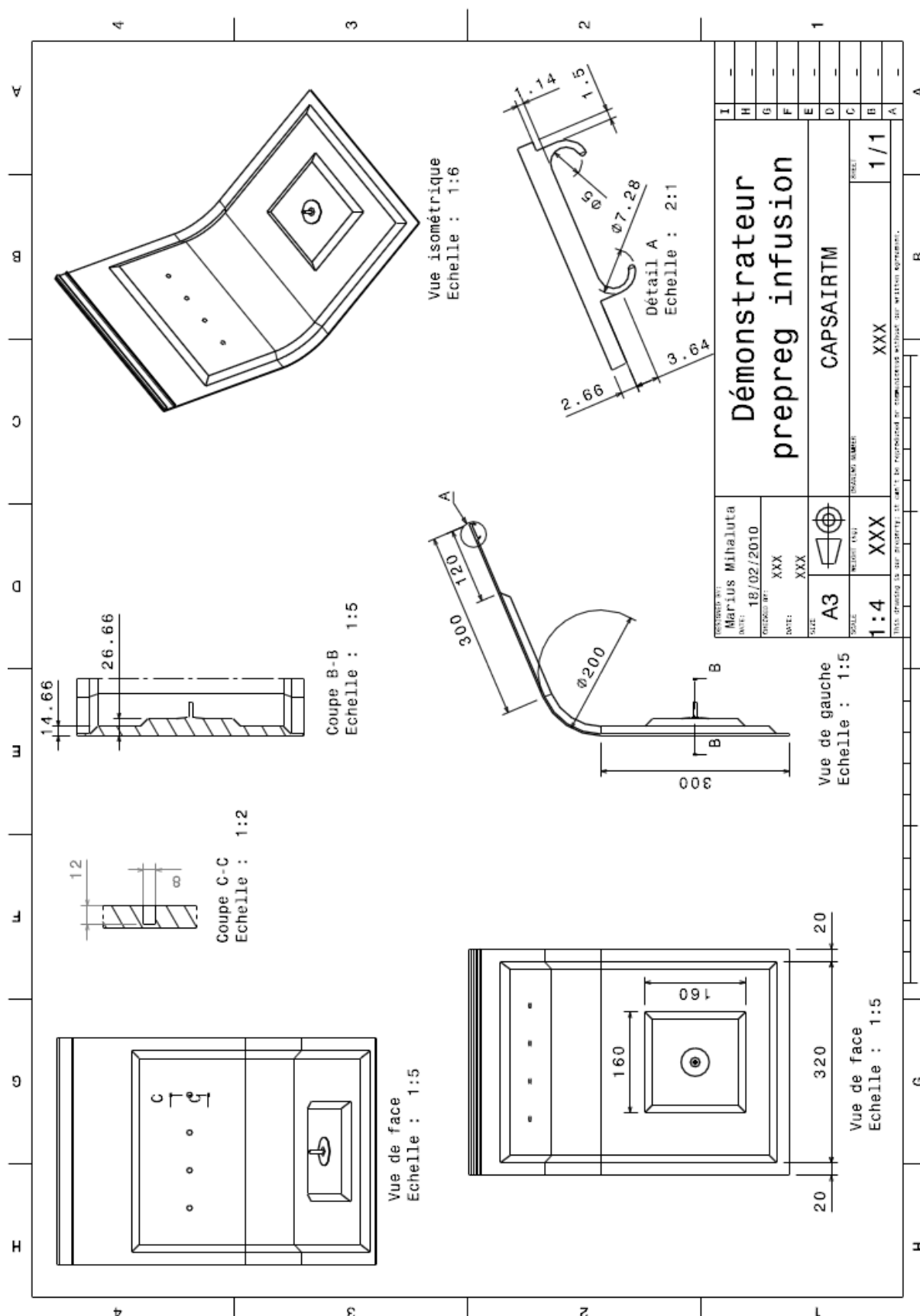
CT	Modèle Géométrique	Variantes	Paramètres clés
Plaque		Plaque plane Plaque galbée Pièce cylindrique	Référence tissu sec Référence tissu prepreg Référence kit résine Taille Périmètre Surface Longueur Largeur Epaisseur
Plaque réalisée en 2 peaux		Plaque plane Plaque galbée Pièce cylindrique	
Renfort		Renfort plan Renfort galbé	
Raidisseur		Raidisseur droit Raidisseur galbé	
Ame		Ame simple Ame étagée	Taille alvéoles (Nid d'abeilles) Référence matériau d'âme Angle de chanfrein Périmètre Surface Hauteur
Densification	-	Densification pour insert Densification pour perçage	Nb. zones Surface moyenne Référence résine densification
Insert		Insert intégré dans la peau Insert intégré dans l'âme	Nombre Positionnement Référence pièce

Annexe 1 (suite)

CT	Modèle Géométrique	Variantes	Paramètres clés
Corps creux		Corps creux ouvert Corps creux fermé	Référence tissu sec Référence tissu prepreg Référence kit résine Démoulable Taille Nombre Surface plis
Trou	-	Trou percé	Nombre Pas
Couture	-	Couture	Pas Longueur Epaisseur Référence fil
Gouttière		Gouttière droite Gouttière galbée	Référence tissu sec Référence tissu prepreg Référence kit résine Longueur Largeur Epaisseur

Annexe 2 Méthode IDEF3 – symboles utilisés pour schématiser les processus et les objets

Annexe 3 Dessin de définition du produit exemple utilisé pour illustrer les concepts proposés



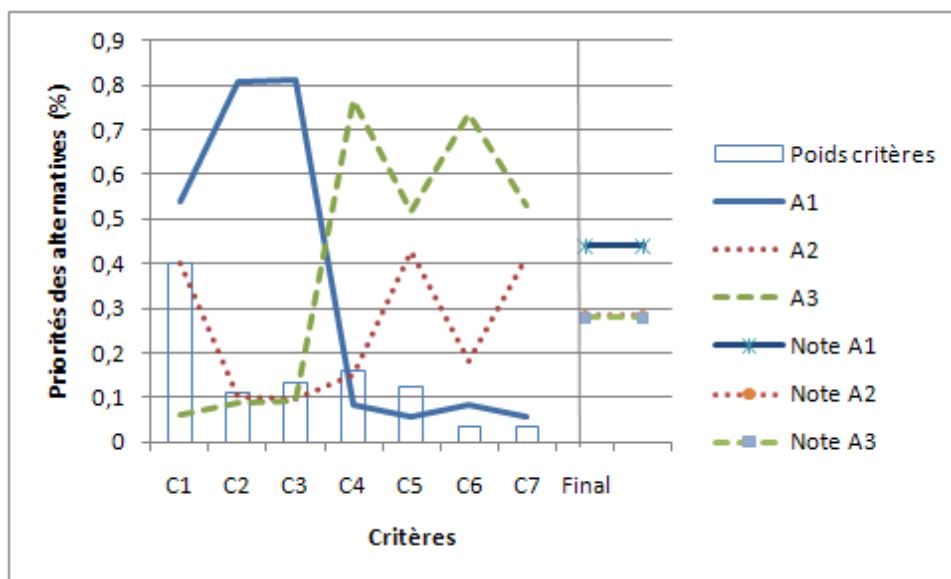
Annexe 4 : Exemple d'étapes entrant dans la composition des processus selon la morphologie du produit et de ses composants → *Processus basé sur le procédé de moulage de préimprégnés*

		Caractéristiques Technologiques											
		Plaque	Plaque en peaux	Ame	Ame étagée	Insert	Renfort	Densification	Couture	Raidisseur	Gouttière	Corps creux démoulable	Corps creux nondémoulable
					-			-	-			-	
Activités de transformation	Achat composant									x	x		
	Découpe	x	x	x	x		x					x	x
	Réalisation noyau soluble												x
	Moulage	x		x	x		x					x	x
	Moulage peau externe		x										
	Compactage	x	x									x	x
	Polymérisation	x	x									x	x
	Contrôle	x	x									x	x
	Moulage peau interne		x										
	Compactage		x										
	Polymérisation		x										
	Contrôle		x										
	Démoulage	x	x									x	x
	Détourage	x	x									x	x
	Parachèvement	x	x									x	x
	Peinture	x	x									x	x
	Assemblage	x	x							x	x	x	x
	Contrôle final	x	x									x	x
	Formage âme			x	x								
	Intégration					x							
	Densification							x					
Type processus		Enveloppe			Intermédiaire								

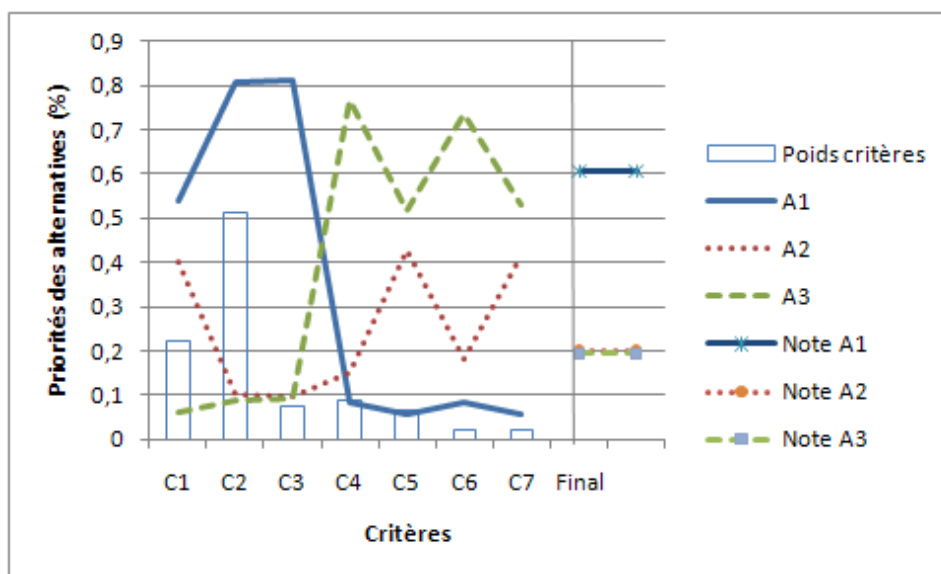
Annexe 5 : Exemple d'étapes entrant dans la composition des processus selon la morphologie du produit et de ses composants → *Processus basé sur le procédé d'infusion de résine*

		Caractéristiques Technologiques											
		Plaque	Plaque en peaux	Ame	Ame étagée	Insert	Renfort	Densification	Couture	Raidisseur	Gouttière	Corps creux démontable	Corps creux nondémontable
					-			-	-			-	
Activités de transformation	Achat composant												
	Découpe	x	x	x	x		x			x	x	x	x
	Réalisation noyau soluble												x
	Etanchéisation âme			x	x								
	Moulage	x		x	x		x			x	x	x	x
	Moulage peau externe		x										
	Préformage		x							x	x	x	x
	Infusion	x											
	Polymérisation	x											
	Contrôle	x											
	Moulage peau interne		x										
	Infusion		x										
	Polymérisation		x										
	Contrôle		x										
	Démoulage	x	x										
	Détourage	x	x										
	Parachèvement	x	x										
	Peinture	x	x										
	Assemblage	x	x							x	x		
	Contrôle final	x	x										
	Formage âme												
	Intégration					x							
	Densification							x					
Type processus		Enveloppe			Intermédiaire								

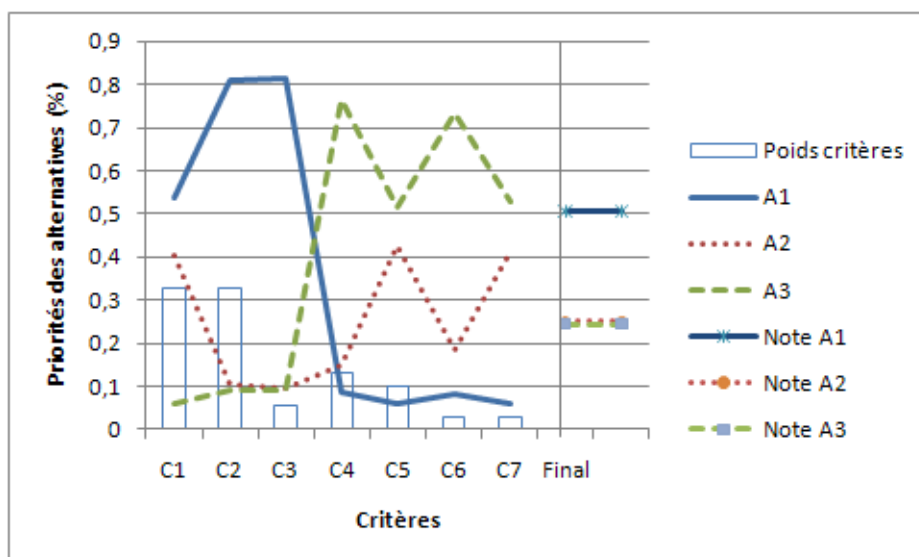
Annexe 6 : Analyse de sensibilité pour l'évaluation de la variation des priorités finales des alternatives lors de la variation de la priorité d'un seul critère



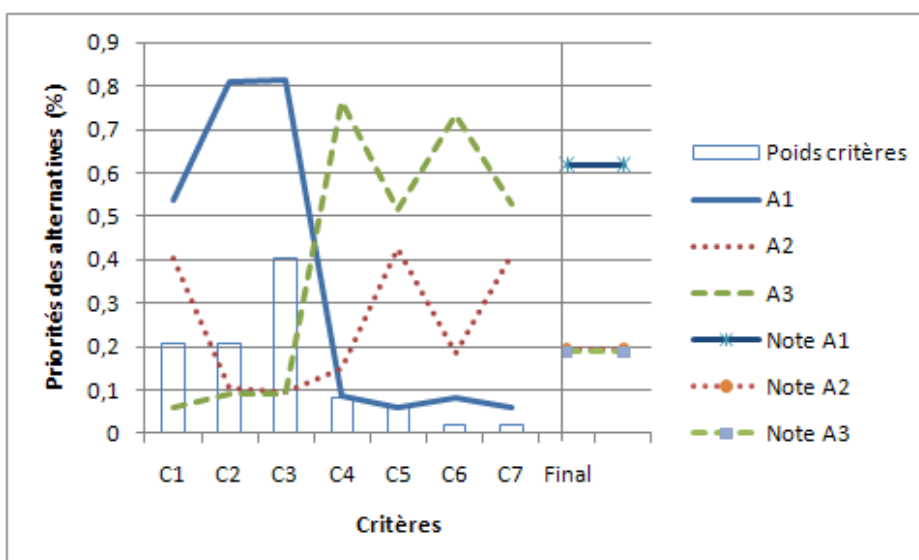
Variation du critère C2 : Masse (priorité fixée à 0,11)



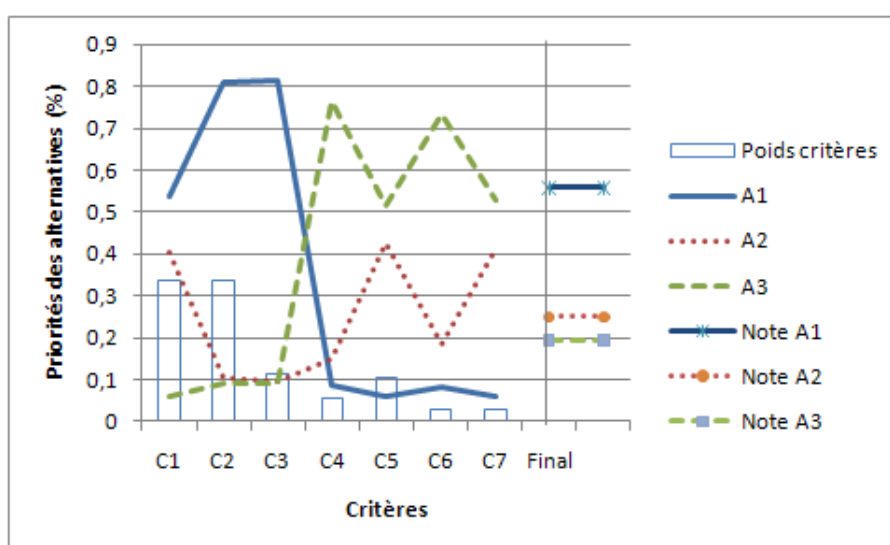
Variation du critère C2 : Masse (priorité fixée à 0,51)



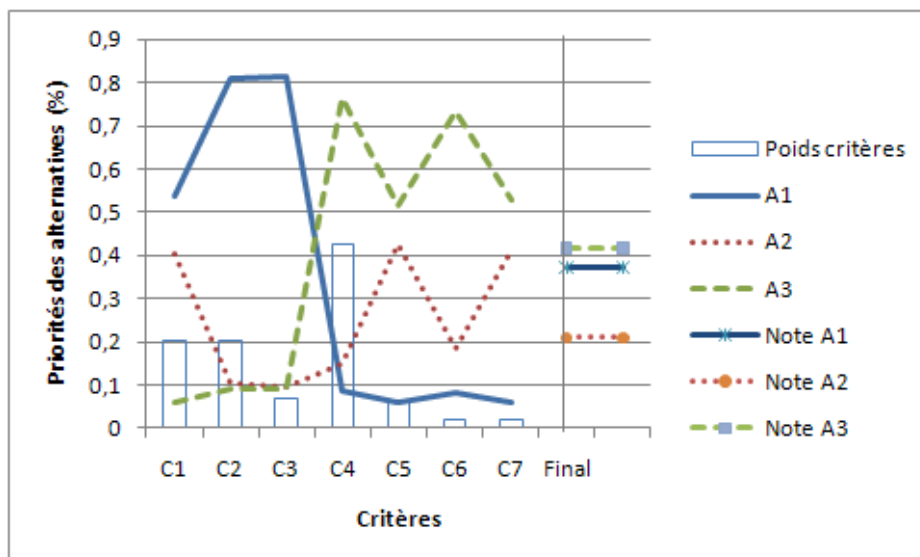
Variation du critère C3 : Coût matière (priorité fixée à 0,05)



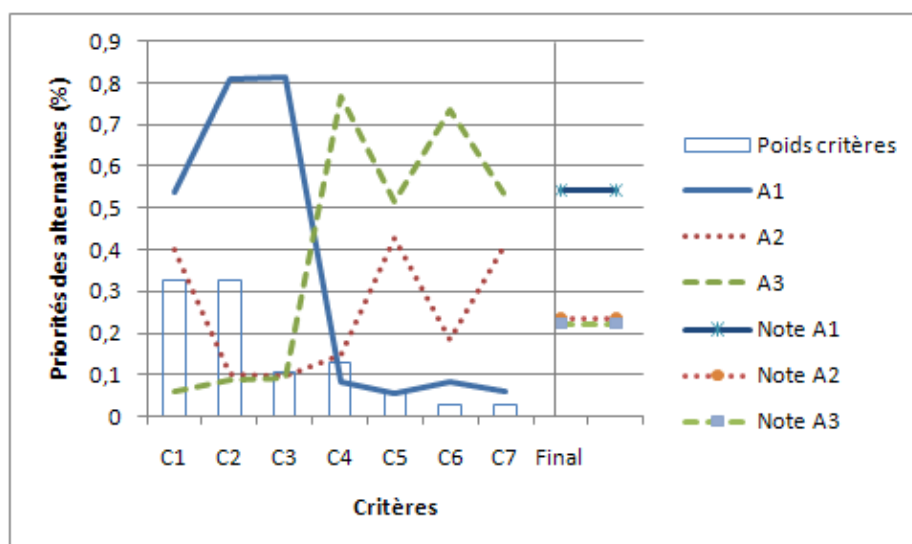
Variation du critère C3 : Coût matière (priorité fixée à 0,4)



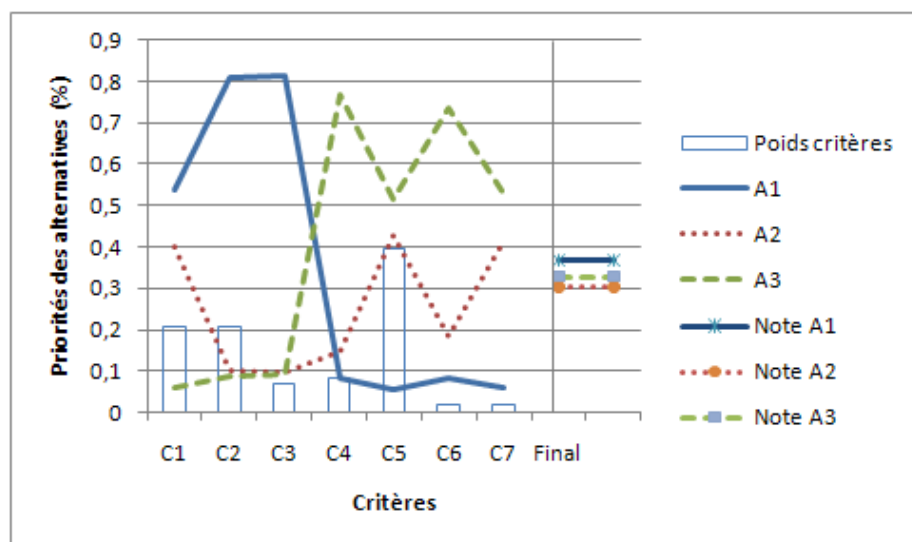
Variation du critère C4 : Coût d'opération (priorité fixée à 0,05)



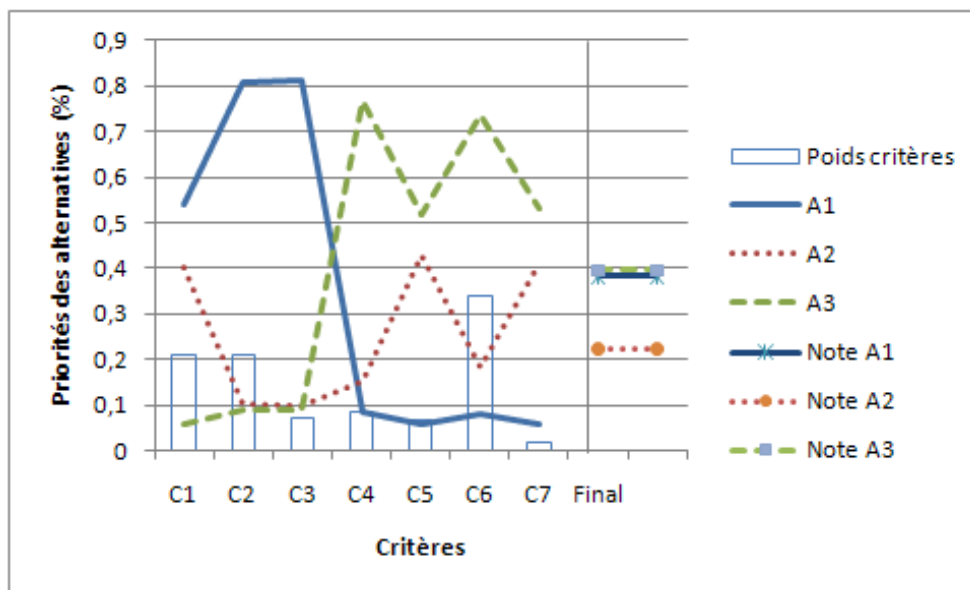
Variation du critère C4 : Coût d'opération (priorité fixée à 0,42)



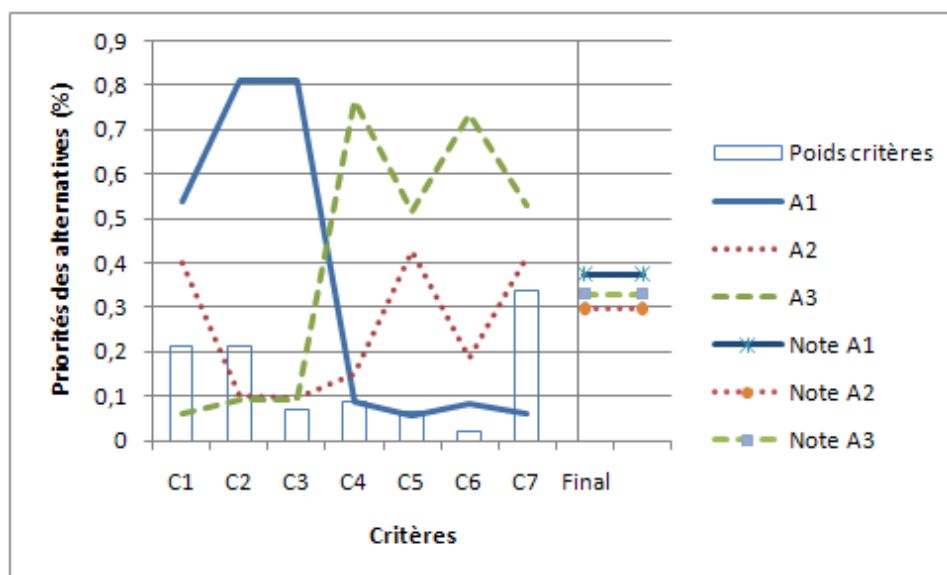
Variation du critère C5 : Coût d'investissement (priorité fixée à 0,05)



Variation du critère C5 : Coût d'investissement (priorité fixée à 0,39)



Variation du critère C6 : Délai (priorité fixée à 0,33)



Variation du critère C5 : Flexibilité (priorité fixée à 0,33)

ETUDE DE LA MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE D'UN NOUVEAU PROCEDE DE MISE EN FORME DE PRODUITS COMPOSITES

RESUME : L'infusion de résine liquide est un procédé de mise en forme des produits composites dit à bas coût. Grâce aux avancées technologiques dans le domaine, l'industrie aéronautique commence à s'intéresser de plus en plus à ce type de procédé afin de s'affranchir des contraintes liées au procédé classique de moulage en autoclave, caractérisé par des coûts d'exploitation élevés. La littérature montre l'existence d'un nombre limité d'approches de représentation structurée des connaissances du domaine des composites. Notre méthodologie vise à identifier les paramètres pertinents du triptyque Produit-Processus-Ressource impactant sur l'industrialisation des produits. Une modélisation UML a été adoptée pour représenter les objets d'entreprise dans le cadre d'une collaboration industrielle. Une approche algorithmique a été employée pour générer les gammes de fabrication possibles par le traitement des connaissances capitalisées. Une approche multicritères a été utilisée pour évaluer les activités afin d'évaluer les alternatives selon des indicateurs de performance de type : Qualité, Coût, Délai en vue d'aider la prise de décision lors de l'industrialisation des nouveaux produits. Une maquette informatique a été développée comme support de la méthodologie proposée.

Mots clés : Industrialisation, Composites renforcés de fibres, Aide à la décision, Ingénierie simultanée.

STUDY ON THE INDUSTRIALISATION OF A NEW MANUFACTURING PROCESS FOR THE FABRICATION OF FIBRE REINFORCED COMPOSITES

ABSTRACT : Liquid resin infusion is a low cost manufacturing process for composite parts. Due to technological improvements in the field, the aeronautics industry has begun to focus on this type of manufacturing process in order to overcome the main constraints of the autoclave molding process that are related to high manufacturing costs. Our literature review shows that few approaches on the formal representation of manufacturing knowledge exist. Our methodology aims to identify the relevant parameters with a high impact on the industrialization of composite products related to the Product-Process-Resource group. UML models have been developed to address the structured representation of enterprise objects in the frame of an industrial partnership. An algorithmic technique has been used to generate alternative manufacturing routes according to the capitalized knowledge. A multicriteria technique has been adopted to assess the manufacturing activities based on Quality, Cost, and Lead Time performance indicators in order to support the decision process during product industrialization. A software application has been developed to support the proposed methodology.

Keywords : Industrialization, Fiber reinforced composites, Decision support systems, Concurrent engineering

