

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE CONCENTRATION PERSONNALISÉE  
M. Sc. A

PAR  
Gaël BUVAT

CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION DE TECHNOLOGIES DE  
FABRICATION ADDITIVE EN MILIEU AÉRONAUTIQUE

MONTREAL, LE 27 JUIN 2016



Gaël Buvat, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Yvan Beauregard, directeur de mémoire  
Département de génie de la mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Sylvie Doré, codirectrice de mémoire  
Département de génie de la mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Patrick Terriault, président du jury  
Département de génie de la mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Éric Wagnac, membre du jury  
Département de génie de la mécanique à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 30 MAI 2016**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier M. Yvan Beauregard et Mme Sylvie Doré pour m'avoir soutenu tout au long de cette recherche et d'avoir accepté d'encadrer ce travail. Ils ont fait preuve d'enthousiasme et de disponibilité tout au long du projet. Leurs conseils ont permis d'orienter mes pistes de réflexion et ainsi de converger vers des résultats de qualité. Ils m'ont aidé à construire un projet autour d'idées, à dessiner une vision autour d'un projet et à apprendre une méthode de travail rigoureuse.

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Julien Saulnier et M. Nicola Turcotte pour m'avoir permis de réaliser mon projet de recherche en partenariat avec Bombardier Aéronautique. Leur disponibilité et la mise à disposition de ressources ont permis une première confrontation à la réalité industrielle.

J'aimerais remercier mes amis pour leur soutien au quotidien. Ils sont en partie la raison de cette épopée québécoise et sans aucun doute les fondations de mon bien-être à Montréal.

J'aimerais enfin remercier ma famille, sans laquelle je n'aurais pas eu l'opportunité d'atteindre un tel niveau d'autonomie et de détermination dans mes actions quotidiennes. Pour avoir cru en moi et avoir réussi à me donner une bonne éducation.



# **CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION DE TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE EN MILIEU AÉRONAUTIQUE**

Gaël BUVAT

## **RÉSUMÉ**

La fabrication additive offre une opportunité d'amélioration des méthodes de productions de pièces. Cependant, les technologies de fabrication additive sont diverses, les fournisseurs de services sont multiples et peu de personnel est formé pour opérer sur ces technologies.

L'objectif de cette étude est d'émettre une suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de fabrication additive en milieu aéronautique.

Trois sous-objectifs sont employés. Premièrement, la définition des critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de fabrication additive. Ensuite, l'élaboration d'un cahier des charges de l'outil d'aide à la décision en accord avec les besoins industriels du secteur aéronautique. Et enfin, la suggestion de trois concepts d'outils d'aide à la décision et leur évaluation par comparaison au cahier des charges établi.

Les critères capturés auprès de 11 industriels concernent des critères de coûts, de qualité, de conception et de délai d'obtention. Ensuite, nous avons élaboré un cahier des charges permettant de réunir les besoins des industriels du secteur aéronautique selon trois axes qui constituent la colonne vertébrale des outils d'aide à la décision : une suggestion d'interface utilisateur, une suggestion de bases de données et un moteur de sélection des technologies, des matériaux et des post-traitements de fabrication additive. La convivialité de l'interface utilisateur, l'évaluation de la qualité souhaitée par l'utilisateur et la prise en compte des études de cas réalisées par le moteur de sélection sont exemples de besoins que nous avons identifié au sein de cette étude. Nous avons ensuite transcrit ces besoins en spécifications techniques pour permettre une évaluation du niveau de satisfaction des industriels au travers d'un pointage des trois concepts suggérés.

Ces trois concepts d'outils d'aide à la décision ont été réalisés respectivement grâce à Microsoft Excel<sup>®</sup>, Microsoft Access<sup>®</sup> ainsi qu'une plateforme en ligne associée à l'outil d'apprentissage statistique RapidMiner<sup>®</sup>. Ce dernier outil en ligne a retenu l'attention des ingénieurs qui l'ont évalué principalement du fait de la prise en compte des études de cas dans la suggestion préférentielle de technologies, de matériaux et de post-traitements.

**Mots-clés** : aide à la décision, fabrication additive, fabrication rapide, secteur aéronautique.





# CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION DE TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE EN MILIEU AÉRONAUTIQUE

Gaël BUVAT

## ABSTRACT

Additive manufacturing makes it possible to improve on parts production methods. However, additive manufacturing technologies are diverse, service providers are numerous and very little staff is trained to operate these technologies.

The goal of this study is to suggest concepts for a decision support system, which will provide adapted recommendations relative to the choice of technologies, materials and post-processing for industrials in the aerospace industry.

In order to achieve this design proposition goal, three sub-goals have been determined. Firstly, the definition of additive manufacturing technologies, materials and post-processing decision-making criterias. Secondly, suggested specifications for such a decision support system, in accordance with industrial needs in the aerospace industry. Finally, three suggested decision support systems designs and their evaluation, in comparison with the determined specifications.

The criteria, which have been identified from 11 industrials in this study, concerns cost, quality, design and delay of obtention categories of criterias. The recommendations, which are made for the design of a decision support system, include: a user interface proposition, a suggestion for a database containing the necessary knowledge for decision-making and an additive manufacturing technology, materials and post-processing selection engine. Having a user-friendly interface, being able to evaluate the level of quality needed and using case studies as part of the decision support system selection engine are three examples of needs gathered in this study. Eventually, we were able to convert these needs into technical requirements that permitted the industrials to evaluate the suggested concepts.

We consequently defined three decision support system design suggestions, which were respectively developed using Microsoft Excel<sup>®</sup>, Microsoft Access<sup>®</sup> and an online platform associated to the machine learning software RapidMiner<sup>®</sup>. This third tool particularly caught the engineers' attention who gave it a higher rating based mainly on its factorization of case study data in the determination of suggested preferential technologies, materials and post-processing.

**Keywords:** decision support system, additive manufacturing, rapid manufacturing, aerospace industry.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	5
1.1 Naissance des outils d'aide à la décision .....	5
1.2 Mise en contexte de la fabrication additive .....	6
1.2.1 Les catégories d'applications de fabrication additive .....	6
1.2.2 Les types de technologies de fabrication additive .....	10
Dépôt de matériau et fusion .....	10
Extrusion de matériau .....	11
Fusion sur lit de poudre .....	12
Projection de matériau .....	14
Projection de liant .....	15
Stratification de matériau en feuille .....	17
Photopolymérisation en cuve .....	18
1.3 Inventaire des outils et critères d'aide à la décision .....	20
1.3.1 Interface utilisateur .....	21
1.3.2 Moteur de l'outil .....	22
1.3.3 Inventaire des critères d'aide à la décision .....	25
1.3.4 Les lacunes des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA .....	26
1.4 Techniques de capture des besoins et des critères de sélection .....	28
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE .....	31
2.1 Introduction à la science de la conception .....	31
2.2 Méthodologie en vue de l'identification de critères de décision .....	34
2.2.1 Phase d'étude préliminaire .....	35
2.2.2 Phase d'analyse des critères de décision des industriels .....	36
Collecte des données .....	37
Traitement des données .....	42
Étude de la saturation des critères .....	42
2.2.3 Interprétation .....	43
2.3 Phase d'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision .....	44
2.4 Phase de suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision .....	47
2.5 Choix de solution parmi les concepts d'outils conçus .....	48
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	49
3.1 Inventaire des outils et critères d'aide à la décision issus de la littérature .....	49
3.2 Analyse des critères de décision des industriels .....	50
3.2.1 Étape de collecte de données .....	50
3.2.2 Étape de traitement des données .....	51
3.2.3 Étude de la saturation des critères .....	54

3.3	Élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision .....	58
3.3.1	Identification des besoins des utilisateurs .....	58
3.3.2	Transcription des besoins en spécifications techniques .....	59
3.3.3	Construction d'une maison de la qualité .....	61
3.4	Suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision .....	63
3.4.1	Outil n°1 Microsoft Excel® .....	63
3.4.2	Outil n°2 Microsoft Access® .....	67
3.4.3	Outil n°3 en ligne RapidMiner® .....	69
3.5	Choix de solution parmi les concepts d'outils conçus .....	73
CHAPITRE 4	DISCUSSION .....	79
4.1	Les limitations globales de l'étude .....	79
4.2	Méthodologie de la phase d'analyse des critères de décision industrielle .....	80
4.3	Limitation de conception des outils .....	81
4.3.1	Interface utilisateur .....	81
	La propriété intellectuelle et le contrôle à l'exportation .....	81
4.3.2	Bases de données .....	81
CONCLUSION	.....	83
ANNEXE I	CHRONOLOGIE DES RÉFÉRENCES DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION DE TECHNOLOGIES, DE MATÉRIAUX ET DE POST-TRAITEMENTS DE FA .....	87
ANNEXE II	ENTREVUE 1 – INDUSTRIEL N 1 .....	95
ANNEXE III	ENTREVUE 2 – INDUSTRIEL N 2 .....	103
ANNEXE IV	ENTREVUE 3 - INDUSTRIEL N 3 .....	113
ANNEXE V	ENTREVUE 4 – INDUSTRIEL N 4 .....	115
ANNEXE VI	ENTREVUE 5 – INDUSTRIEL N 5 ET INDUSTRIEL N 6 .....	117
ANNEXE VII	ENTREVUE 6 – INDUSTRIEL N 7 .....	121
ANNEXE VIII	ENTREVUE 7 – INDUSTRIEL N 8 ET INDUSTRIEL N 9 .....	127
ANNEXE IX	ENTREVUE 8 - INDUSTRIEL N 10 .....	133
ANNEXE X	ENTREVUE 9 – INDUSTRIEL N 11 .....	137
ANNEXE XI	CODE SOURCE OUTIL NO1 MICROSOFT EXCEL® .....	141
ANNEXE XII	CODE SOURCE OUTIL NO2 MICROSOFT ACCESS® .....	153

ANNEXE XIII	CODE SOURCE OUTIL NO3 EN LIGNE RAPIDMINER®.....	157
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		173



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Définition des catégories d'applications de FA tirée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996) .....9
Tableau 1.2	Les différents types d'interfaces utilisateurs étudiés .....22
Tableau 1.3	Les deux types d'architecture du moteur des outils d'aide à la décision répertoriés .....22
Tableau 1.4	Méthodes de sélection multicritères étudiées .....23
Tableau 1.5	Critères de sélection des technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour de la FR dans la littérature.....25
Tableau 1.6	Identification de critères de décision et de fonctionnalités manquantes dans la littérature.....27
Tableau 1.7	Caractéristiques du sondage exploratoire tiré de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015) .....28
Tableau 2.1	Livrables et moyens de mise en œuvre de cette étude .....34
Tableau 3.1	Besoins des utilisateurs et importance relative .....59
Tableau 3.2	Liste des spécifications techniques .....60
Tableau 3.3	Barème d'évaluation des spécifications techniques.....74
Tableau 3.4	Pointage des spécifications techniques .....77





## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Classification des applications de FA adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996) .....8
Figure 1.2	Représentation schématique du procédé de dépôt de matériau et fusion avec laser tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015).....11
Figure 1.3	Représentation schématique d'un système d'extrusion de matériau tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015) .....12
Figure 1.4	Représentation schématique du procédé de frittage de poudre sélectif tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015) .....13
Figure 1.5	Représentation schématique de la technologie de fusion par faisceau d'électrons développée par Arcam AB tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015) .....14
Figure 1.6	Principe de fonctionnement de la technologie de jet de matériau de la machine Polyjet de Stratasys tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015) ...15
Figure 1.7	Schéma de principe du procédé de projection de liant tirée de Gebhardt (2012) .....16
Figure 1.8	Représentation schématique du procédé de stratification de matériau en feuille métallique tirée de Obikawa, Yoshino et Shinozuka (1999) .....17
Figure 1.9	Diagrammes schématiques de trois approches du procédé de photopolymérisation en cuve tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)...19
Figure 1.10	Structure commune des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA .....21
Figure 1.11	Méthode SMART intégrée dans un l'outil d'aide à la décision adaptée de Edwards et Barron (1994).....24
Figure 1.12	Étude de l'efficacité des techniques de capture des besoins en fonction du niveau d'innovation du sujet et du niveau de connaissances des utilisateurs tirée de Dahan (1998) .....29
Figure 2.1	Stratégie pour mener une étude scientifique de la science de la conception tirée de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015) .....32

Figure 2.2	Étapes de la démarche de science de la conception tirée de Vaishnavi et Kuechler (2015) .....	33
Figure 2.3	Méthodologie d'identification des critères de décision .....	35
Figure 2.4	Méthodologie de l'étude préliminaire.....	36
Figure 2.5	Les étapes d'analyse des critères de décision des industriels .....	37
Figure 2.6	Méthodologie de collecte des critères de décision des industriels.....	38
Figure 2.7	Avantages et inconvénients des entrevues individuelles adaptée de Griffin et Somermeyer (2007) .....	40
Figure 2.8	Méthodologie de traitement des critères de décision des industriels.....	42
Figure 2.9	Méthodologie d'élaboration du cahier des charges .....	44
Figure 2.10	Maison de la qualité tirée de Bernal et al. (2009).....	46
Figure 2.11	Phase d'itération de conception préconisée par la science de la conception tirée de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015) .....	47
Figure 2.12	Méthodologie de pointage des concepts d'outils conçus.....	48
Figure 3.1	Profil des industriels interrogés .....	50
Figure 3.2	Diagramme des affinités des critères de sélection .....	52
Figure 3.3	Pôles de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements .....	53
Figure 3.4	Évolution du nombre de pôles de décision en fonction du nombre d'entrevues.....	55
Figure 3.5	Évolution du nombre de catégories de critères en fonction du nombre d'entrevues.....	55
Figure 3.6	Évolution du nombre de critères de coût en fonction du nombre d'entrevues.....	56
Figure 3.7	Évolution du nombre de critères de qualité en fonction du nombre d'entrevues.....	56
Figure 3.8	Évolution du nombre de critères de conception en fonction du nombre d'entrevues.....	57

Figure 3.9	Évolution du nombre de critères de temps de conception en fonction du nombre d’entrevues.....	57
Figure 3.10	Maison de la qualité de l’outil d’aide à la décision .....	62
Figure 3.11	Page de connexion des utilisateurs .....	64
Figure 3.12	Page d’enregistrement des utilisateurs.....	64
Figure 3.13	Menu des fonctionnalités utilisateur .....	65
Figure 3.14	Interface utilisateur de l’outil n°1 Microsoft Excel® .....	66
Figure 3.15	Interface utilisateur de l’outil n°2 Microsoft Access® .....	67
Figure 3.16	Interface utilisateur de l’outil en ligne n°3 RapidMiner® .....	69
Figure 3.17	Fonctionnalité de création de formulaires Wufoo® (Inconnu, 2016c).....	70
Figure 3.18	Modèle d’apprentissage statistique RapidMiner® .....	71
Figure 3.19	Page HTML des résultats générée par RapidMiner® .....	72
Figure 3.20	Évolution du pointage des concepts proposés en fonction du temps.....	76
Figure 4.1	Limitations liées à la science de la conception tirée de Vaishnavi et Kuechler (2015) .....	79
Figure 4.2	Modèle trois axes de classement des produits manufacturiers tirée de Conner <i>et al.</i> (2014) .....	82



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

3DP	3 Dimensional Printing
AHP	Analytical Hierarchal Process
AOG	Aircraft On Ground
AMDSS	Additive Manufacturing Decision Support System
AMS	Aerospace Materials Standards
ASTM	American Society for Testing and Materials
BDD	Base de données
CO2	Dioxyde de carbone
CSS	Cascading Style Sheets
DMLS	Direct Melting Laser Sintering
DSS	Decision Support Systems
ÉTS	École de technologie supérieure
FA	Fabrication additive
FDM <sup>TM</sup>	Fused Deposition Modeling <sup>TM</sup>
FEO	Fournisseur d'équipement d'origine
FR	Fabrication rapide
HTML	Hyper Text Markup Language
IRIS	Industrial Research Institute Swinburne
IRPSS	IRIS Rapid Prototyping System Selector
KBS	Knowledge Based System
OR	Outillage rapide
PR	Prototypage rapide

RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
R&D	Recherche et développement
SLA	StereoLithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
SMART	Simple Multi-attribute Rating Technique
SWEBOK	Software Engineering Body of Knowledge
TOPSIS	Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution

## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

h	heure
kV	kilovolt
min	minute
mm	millimètre
MPa	mégapascal
Tc	temps de configuration
Tmaj	temps de mise à jour
Tpm	temps de prise en main





## **INTRODUCTION**

### **Contexte de recherche**

La fabrication additive (FA) est un ensemble de procédés destinés à produire des objets à partir de modèles de données 3D. Cette production d'objets se fait couche par couche par opposition aux méthodes de fabrication soustractives ou par déformation de matière (moulage, forgeage, pliage, etc.). La fabrication additive peut également parfois être nommée procédés additifs, techniques additives, fabrication additive par couche, fabrication couche par couche, ou fabrication libre (Gibson, Rosen et Stucker, 2015).

Initialement la FA, alors appelée prototypage rapide (PR), avait pour but d'accélérer le temps et de réduire le coût de développement de produit du fait de sa capacité à matérialiser dans un temps et à un coût record la forme du produit en développement. Cependant, avec l'amélioration des précisions des procédés et l'amélioration des propriétés des matériaux, les applications obtenues par FA sont sorties du cadre unique du PR pour se diriger vers l'outillage rapide (OR) et la fabrication rapide (FR) (Gibson, Rosen et Stucker, 2015).

Cette opportunité naissante d'utilisation des technologies de FA pour fabriquer de l'outillage et des pièces de production est à l'origine d'un besoin d'informations de la part des industriels. En effet, le choix de ces technologies est en partie rendu complexe, car il existe sept catégories standardisées de technologies de FA qui répondent chacune à des besoins spécifiques (Gibson, Rosen et Stucker, 2015).

### **Problématique et objectifs de recherche**

L'identification de critères de décision en matière de technologies de FA est un enjeu industriel. Grâce à ces critères, les secteurs de la conception et de l'ingénierie seront en mesure de cibler les technologies qui ont les capacités de répondre à leurs besoins. C'est également pour les industriels un apport de connaissances par rapport aux nouvelles technologies dans leur cycle de fabrication, ce qui contribue à assurer leur compétitivité.

Devant ces enjeux, au mois de septembre 2014, l'École de technologie supérieure (ÉTS) a été sollicitée par Bombardier Aéronautique pour lui fournir un outil d'aide à la décision en matière de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA susceptible de soutenir la conversion de pièces d'outillage à la FA. Cependant, nous sommes rapidement arrivés à la conclusion, à la suite d'entrevues individuelles, que l'enjeu majeur de l'industrie aéronautique réside dans la conversion de pièces de production et non pas d'outillage. C'est tout naturellement que ce mémoire s'est focalisé sur la conception d'un outil d'aide à la décision en matière de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des pièces de production en milieu aéronautique.

Depuis une vingtaine d'années, on dénombre une quinzaine d'outils d'aide à la décision en matière de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. Certains de ces outils pourraient répondre aux besoins du secteur aéronautique. Ces études antérieures nous permettent ainsi de concevoir un cahier des charges d'un outil d'aide à la décision en accord avec les critères déjà préétablis. Cependant, certaines de ces études montrent que suite à l'utilisation de ces outils, les utilisateurs interrogés émettaient des réserves sur les critères employés et l'absence de certains critères d'importance tels que le coût et le délai d'obtention de l'application (Ghazy, 2012).

Dans cette étude, nous avons ainsi souhaité identifier les besoins et les critères de décision industriels du secteur aéronautique. L'objectif principal de cette recherche est de fournir un concept d'outil d'aide à la décision en matière de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA en milieu aéronautique. Cet outil est destiné aux industriels souhaitant être sensibilisés à la sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des applications de pièces de production.

Les sous-objectifs de cette recherche sont donc :

- de définir et valider les critères d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour le secteur aéronautique;

- d'élaborer un cahier des charges pour la suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour le secteur aéronautique;
- de proposer et d'évaluer des concepts d'outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements en accord avec les critères de décision et les besoins de conception de cet outil.

Le cadre de cette étude concerne des industriels du secteur aéronautique du fait de la proximité de l'École de technologie supérieure avec les nombreux fournisseurs d'équipement d'origine (FEO) dans le bassin de Montréal (Québec). Cependant, la méthodologie d'identification des critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA est reproductible, quel que soit le secteur d'activité étudié dans un souci d'identification de critères communs entre les différents secteurs industriels.

Voici la structure de cette étude :

- le Chapitre 1 de revue de littérature présente le cadre théorique de cette étude;
- le Chapitre 2 de méthodologie de recherche présente les artéfacts théoriques permettant de collecter des données et d'identifier de potentielles contributions;
- le Chapitre 3 de présentation des résultats présente l'ensemble du travail de cette étude;
- le Chapitre 4 de discussion présente les limitations quant aux choix méthodologiques de cette étude;
- enfin, la conclusion viendra mettre en lumière les contributions, les limitations et les recommandations pour permettre la continuité de cette étude.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Ce chapitre vise à mettre le lecteur en contexte vis-à-vis des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de fabrication additive (FA). Ce chapitre comporte 4 sections :

- une présentation de la naissance des outils d'aide à la décision;
- une mise en contexte de la FA, de ses applications et de ses technologies;
- un inventaire des outils et critères d'aide à la décision;
- une présentation des différentes techniques de capture des besoins et des critères de sélection.

#### **1.1 Naissance des outils d'aide à la décision**

Historiquement, l'aide à la décision reposait sur l'expérience individuelle, le savoir et l'expérience des personnalités reconnues d'autorité au sein d'une organisation. L'opinion et la subjectivité étaient des facteurs importants.

Au XX<sup>e</sup> siècle, des outils mathématiques sont introduits tels que les probabilités, l'analyse de décision, la théorie des graphes, la recherche opérationnelle et les outils de calcul numérique. Les systèmes informatiques d'aide à la décision sont alors apparus et ont pris une place importante dans la prise de décision automatisée.

Ces outils informatiques aident la personne responsable d'une décision à analyser un problème, à lui présenter des solutions et éventuellement à hiérarchiser ces solutions sur la base de règles préétablies (Burstein et Holsapple, 2008).

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes concentrés sur la fabrication additive. La section suivante vise à présenter l'évolution des besoins auxquelles cet ensemble de technologies répond et quel en est leur fonctionnement.

## **1.2 Mise en contexte de la fabrication additive**

Gibson (2002) définit trois problèmes principaux auxquels les outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements peuvent répondre :

- au niveau de la sélection : quelle technologie répond aux besoins de l'utilisateur ?
- au niveau de l'investissement : quelle technologie l'utilisateur de l'outil doit-il acheter pour fabriquer sa pièce ?
- au niveau du choix des paramètres de fabrication : quels sont les paramètres qui doivent être maîtrisés et quel est le processus donnant des résultats optimums ?

Le cadre de cette étude couvre les deux premières questions. La question de la planification n'est pas traitée, car nous avons la vision d'un utilisateur souhaitant confier la fabrication à un sous-traitant ou à une personne spécialisée dans l'opération du procédé ou de la machine retenu(e).

Dans la section suivante, nous allons effectuer une revue des catégories d'applications que les technologies de FA permettent de fabriquer. Pour la suite de cette étude, et pour ne pas confondre une pièce de production, un prototype ou un outillage, nous emploierons le terme « d'application » comme terme générique.

### **1.2.1 Les catégories d'applications de fabrication additive**

Les applications de la FA peuvent être séparées en trois grands types en fonction de l'utilisation faite de celles-ci : le prototypage rapide (PR), l'outillage rapide (OR) et la fabrication rapide (FR) (Gibson, Rosen et Stucker, 2015). Cette catégorisation permet de comprendre l'évolution de la performance de ces technologies et l'élargissement progressif des besoins auxquelles elles répondent.

### **Le prototypage rapide (PR)**

Le terme de PR est apparu à la fin des années 1980 avec l'arrivée d'un besoin de complexification des pièces à réaliser. Ce concept a pu émerger entre autres grâce aux bases mathématiques de la modélisation géométrique 3D développées, à l'apparition de modeleurs, de la conception assistée par ordinateur (CAO) volumique et des travaux de recherche sur la mise en forme des matériaux en couches. Ces prototypes ont pour objectif de valider des aspects du produit final tel que : l'esthétique, la maniabilité, le fonctionnement, etc. En réduisant le cycle de développement de produit par l'utilisation de technologies de FA, le temps de développement et les coûts de développement en sont grandement réduits (Gibson, Rosen et Stucker, 2015).

### **L'outillage rapide (OR)**

Dans les années 2000, le concept d'OR est utilisé pour fabriquer des outillages grâce à des technologies de FA. L'OR est divisé en deux grandes familles : l'OR de courte série et l'OR de production.

Dans le cas de l'OR de courte série, il s'agit d'obtenir un faible nombre de pièces produites grâce à l'OR en quelques jours, à un coût de fabrication réduit et avec peu de procédés de mise en œuvre. L'OR de courte série est généralement produit par outillage indirect. Les technologies de FA sont ainsi utilisées pour fabriquer un motif avant que celui-ci ne soit converti en outils de mise en forme.

L'OR de production vise également à réduire le délai d'obtention et le coût de fabrication par rapport aux procédés conventionnels soustractifs. Cependant, dans le cas de l'OR de production, un des avantages majeurs de la FA réside dans la liberté de conception qui permet d'augmenter le champ des possibilités dans le cas du moulage par injection par exemple. L'OR de production est généralement produit par outillage direct. Les technologies de FA sont ainsi employées directement pour fabriquer des outils de mise en forme (moule, matrice, etc.).

### La fabrication rapide (FR)

La FR est apparue pour répondre à des besoins différents de l'OR. En effet, la FR permet de fabriquer des pièces sans aucun autre procédé de mise en forme outre les opérations de finition. Il s'agit généralement de petites séries de pièces de grande complexité ou personnalisées, ou encore possédant ces deux dernières caractéristiques (Gibson, Rosen et Stucker, 2015).

Cependant, les catégories de PR, d'OR et de FR sont encore trop générales pour permettre l'identification de besoins correctement définis en vue de la conception d'outil d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. Nous avons ainsi identifié dans la littérature, sur la Figure 1.1, les catégories d'applications qui décrivent le PR, l'OR et la FR.

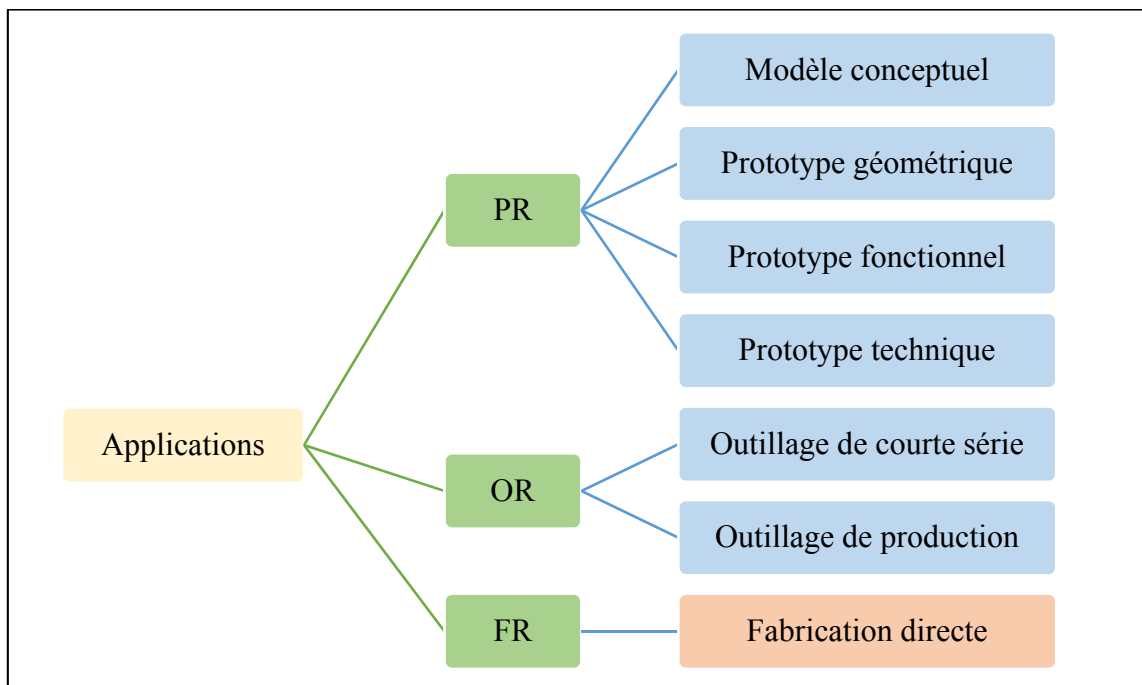


Figure 1.1 Classification des applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)



Le Tableau 1.1 présente la définition de ces catégories d'applications.

Tableau 1.1 Définition des catégories d'applications de FA  
tirée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

Catégorie d'application	Sous-catégorie	Définition
<b>Prototypage rapide</b>	Prototype conceptuel	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre d'applications : 1,</li> <li>matériau de conception de prototypes,</li> <li>validation visuelle et proportionnelle.</li> </ul>
	Prototype géométrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre d'applications : 1,</li> <li>matériau de conception de prototypes,</li> <li>validations géométriques.</li> </ul>
	Prototype fonctionnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre d'applications : entre 2 et 5,</li> <li>matériau : proche de l'application finale,</li> <li>validations fonctionnelles.</li> </ul>
	Prototype technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre d'applications : entre 3 à 20,</li> <li>matériau : proche de l'application finale et procédé de fabrication proche de la production,</li> <li>emploi d'outils proches de la production.</li> </ul>
<b>Outillage rapide</b>	Outillage de courte série	<ul style="list-style-type: none"> <li>nombre d'applications : 1 à 100,</li> <li>application proche du produit final et donc d'un prototype fonctionnel,</li> <li>peut être soumis à des modifications,</li> <li>matériau : pas nécessairement celui de l'outil,</li> <li>généralement produit par des techniques d'outillage indirect.</li> </ul>
	Outillage de production	<ul style="list-style-type: none"> <li>exemples : moules, matrices, etc.,</li> <li>sert à obtenir des pièces de production,</li> <li>matériau : correspondant à l'outil,</li> <li>généralement produit par outillage direct.</li> </ul>
<b>FR</b>	Fabrication directe	<ul style="list-style-type: none"> <li>application possédant les propriétés fonctionnelles et performances mécaniques du produit final.</li> </ul>

Ces catégories représentent la base de réflexions à partir desquelles les entrevues de cette étude ont été conduites. Elles permettent d'une part de positionner les besoins auxquels chaque type d'entreprise interrogée tente de répondre, et d'identifier des critères de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements à partir de ces catégories.

La section 1.2.2 suivante regroupe la définition et le principe de fonctionnement des sept types de technologies de FA.

### **1.2.2 Les types de technologies de fabrication additive**

Dans cette section, une revue des technologies et de leurs principes de fonctionnement d'après la norme AMSTM F2792-12a pour la dénomination des procédés est présentée. Les termes français employés dans cette étude renvoient à la synthèse de la traduction des termes anglophones de Thériault (2014).

#### **Dépôt de matériau et fusion**

##### **Définition**

C'est un procédé pour lequel de l'énergie thermique concentrée (provenant d'un laser, d'un faisceau d'électrons, d'un arc plasma, etc.) est utilisée pour fusionner un matériau au fur et à mesure qu'il est déposé, généralement à l'aide d'une buse. Les matériaux sont généralement des métaux sous forme de filament ou de poudre.

##### **Principe de fonctionnement**

Le procédé de dépôt de matériau et fusion utilise une source de chaleur, généralement un laser ou un faisceau d'électrons pour faire fondre le matériau déposé. À chaque passe, un parcours de matériau solidifié est créé et l'ensemble des pistes adjacentes forme une couche. Pour les formes géométriques complexes, un matériau de support ou une tête de déposition multiaxiale sont utilisés. Une représentation schématique du procédé de dépôt de matériau et fusion est présentée sur la Figure 1.2.

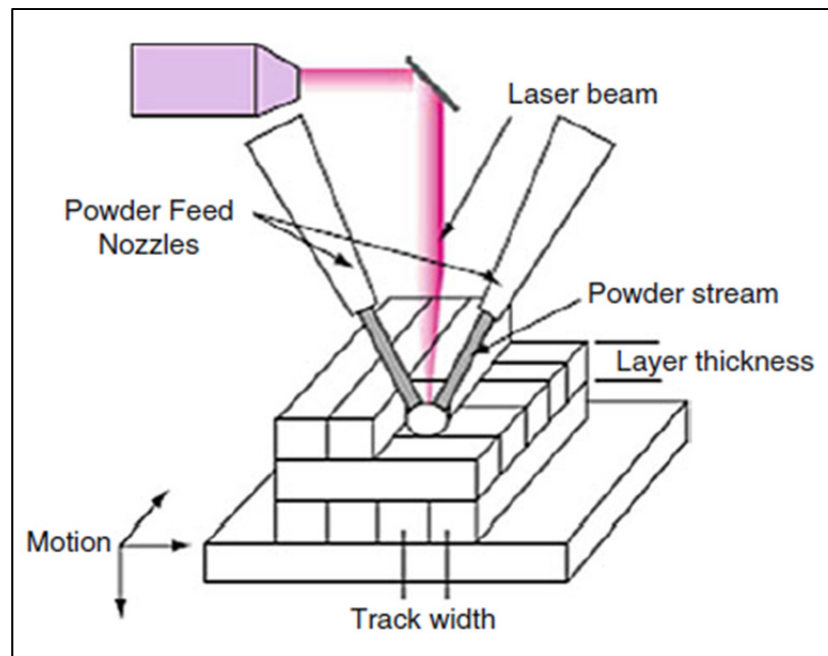


Figure 1.2 Représentation schématique du procédé de dépôt de matériau et fusion avec laser  
tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

## Extrusion de matériau

### Définition

Ce procédé consiste à distribuer sélectivement un matériau à travers une buse ou un orifice. Les matériaux sont disponibles sous forme de filaments de thermoplastiques chargés (de métaux de fibres de carbones, de bois, etc.) ou non.

### Principe de fonctionnement

Les étapes clés communes à toutes les technologies d'extrusion de matière sont :

- le chargement du matériau,
- la liquéfaction du matériau,
- l'application d'une pression afin de faire progresser le matériau dans la buse,
- l'extrusion,
- le traçage d'un chemin prédéfini de façon contrôlée,

- la liaison du matériau à lui-même ou des matériaux de construction secondaires pour former une structure solide,
- l'ajout de structures de support pour permettre de réaliser des géométries complexes.

Les éléments principaux que ce procédé met en œuvre sont décrits sur la Figure 1.3.

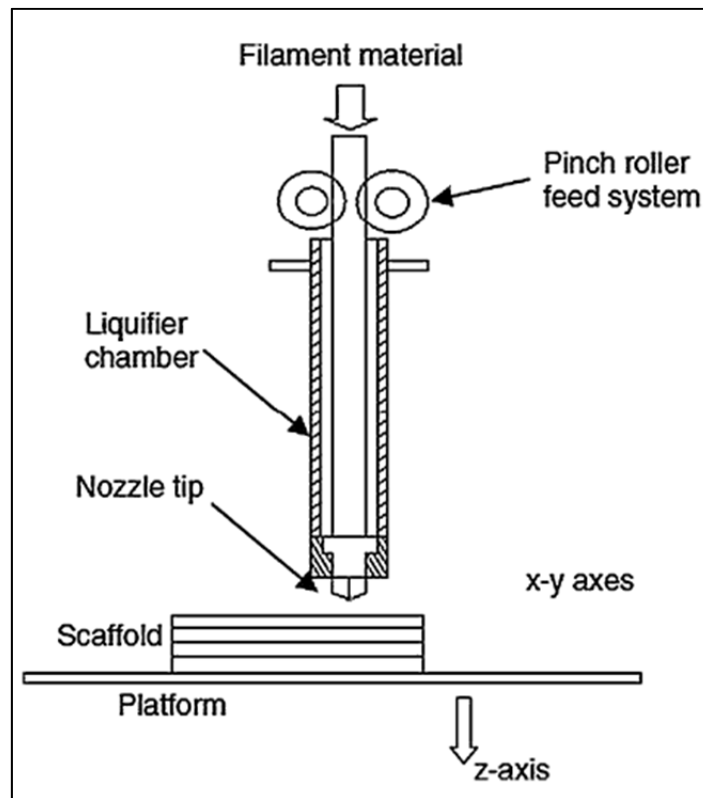


Figure 1.3 Représentation schématique d'un système d'extrusion de matériau  
tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

## Fusion sur lit de poudre

### Définition

La fusion sur lit de poudre est une technologie de fabrication additive qui fait appel à un laser ou à un faisceau d'électrons pour fondre sélectivement des matériaux sous forme de poudre et former des pièces tridimensionnelles prototypiques ou fonctionnelles selon le type de

matériau employé. Les matériaux disponibles sont des poudres de plastiques thermoformables, des sables recouverts de plastiques thermoformables, des métaux.

### Principe de fonctionnement

Toutes les technologies de fusion sur lit de poudre partagent une base de caractéristiques communes. Cette base inclut une ou plusieurs sources de chaleur permettant d'irradier une zone sélectionnée et de provoquer la fusion de la poudre ciblée. Des systèmes mécaniques viennent ensuite ajouter et lisser une couche supplémentaire de poudre à chaque couche. La source d'énergie la plus répandue est le laser pour la fusion sur lit de poudre. La Figure 1.4 décrit le principe du frittage laser sélectif.

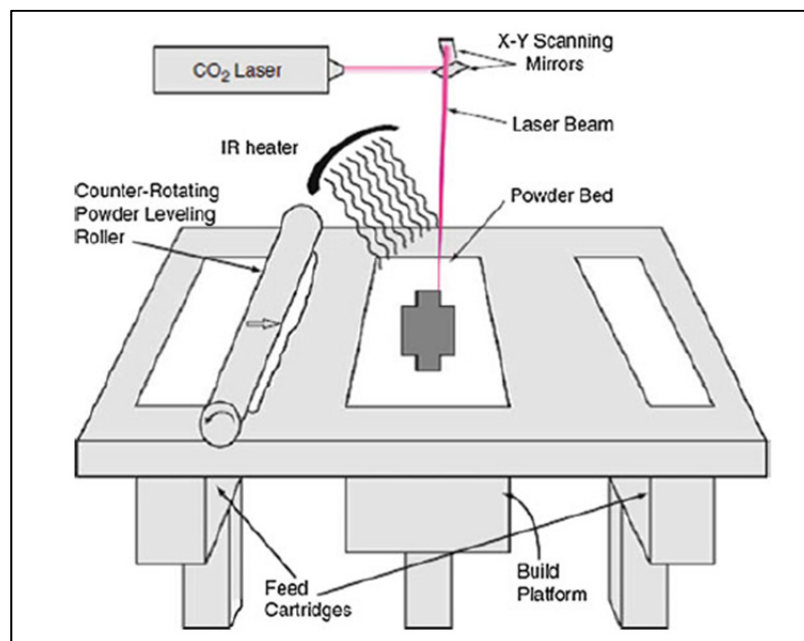


Figure 1.4 Représentation schématique du procédé de frittage de poudre sélectif  
tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

La fusion par faisceau d'électrons est également employée et permet, grâce un faisceau d'électrons de haute énergie, de faire fusionner les particules de poudre métallique. Cette technologie a été développée à l'université de technologie de Chalmers puis commercialisée

par Arcam AB, une entreprise suédoise, en 2001. La Figure 1.5 présente une représentation schématique de la technologie de fusion par faisceau d'électrons développée par Arcam AB.

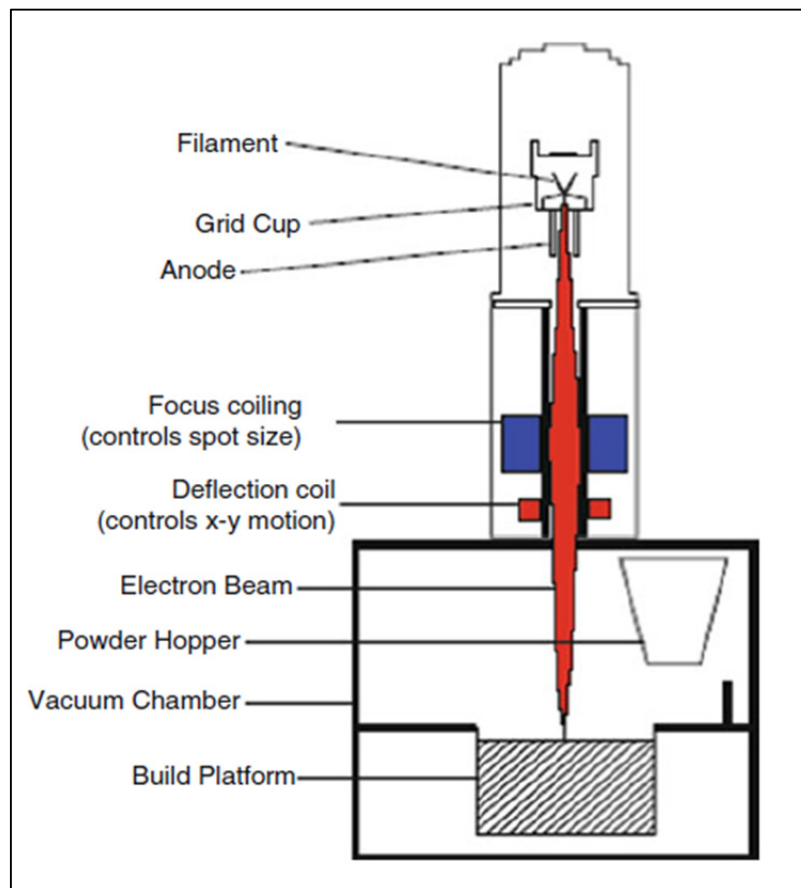


Figure 1.5 Représentation schématique de la technologie de fusion par faisceau d'électrons développée par Arcam AB tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

## Projection de matériau

### Définition

Ce procédé consiste à déposer des gouttelettes de matériau de façon sélective.

### Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de cette famille de systèmes repose sur le dépôt de minuscules gouttelettes de matière. Chacune de ces gouttelettes est déposée l'une à côté de l'autre grâce

au déplacement latéral de la tête de manière à fabriquer la couche en cours. La table élévatrice est ensuite abaissée d'un incrément. La couche suivante peut alors être construite à son tour. Ce principe repose sur l'utilisation du changement de phase des matériaux. On distingue alors deux méthodes de solidification du matériau déposé : la solidification par refroidissement et la photopolymérisation (Barlier et Bernard, 2015). La Figure 1.6 présente un exemple du principe de projection de matériau solidifié par lumière.

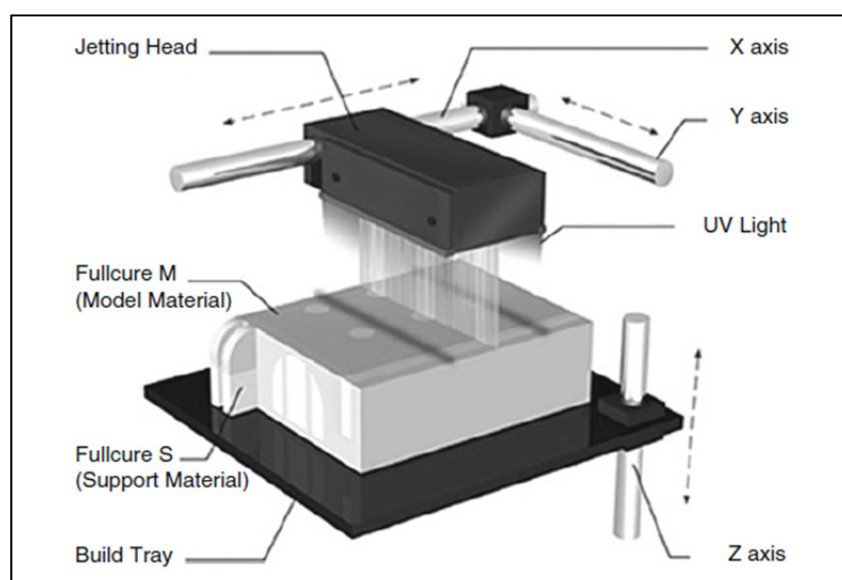


Figure 1.6 Principe de fonctionnement de la technologie de jet de matériau de la machine Polyjet de Stratasys tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

## Projection de liant

### Définition

Ce procédé de fabrication additive par projection de liant est un procédé pour lequel un liquide, agissant comme adhésif, est déposé sélectivement pour lier un matériau sous forme de poudre. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont à base d'amidon, de cellulose, de plâtre, de sable ou de métal.

### Principe de fonctionnement

Une tête d'impression par jet d'encre à canaux multiples vient déposer un liant liquide sur la couche supérieure d'un lit de matériau en poudre dans lequel l'objet est construit. Les particules sont alors liées dans les zones où le liant est déposé formant ainsi une couche de l'objet. Le système est constitué de deux réservoirs. Un premier réservoir d'alimentation qui monte de façon incrémentale tandis qu'un second réservoir de fabrication descend. Cette coordination permet à chaque passe grâce à un racloir la bonne quantité de poudre à chaque couche de fabrication. La Figure 1.7 présente le principe de fonctionnement du procédé de projection de liant.

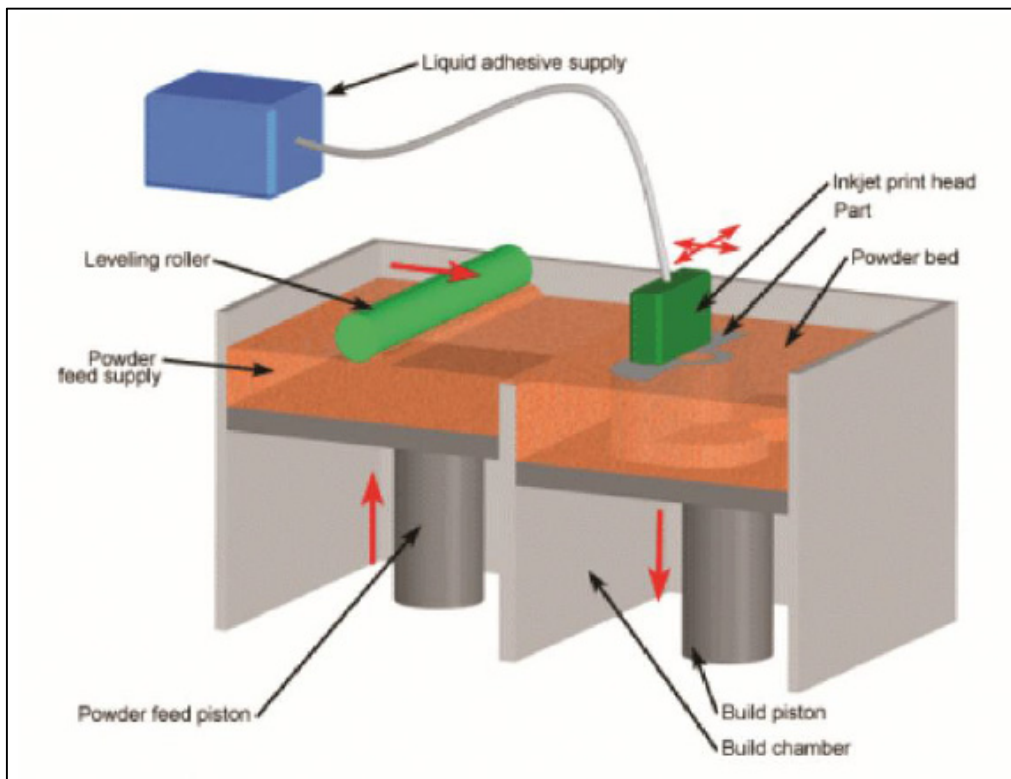


Figure 1.7 Schéma de principe du procédé de projection de liant  
tirée de Gebhardt (2012)



## Stratification de matériau en feuille

### Définition

C'est un procédé pour lequel des feuilles de matériaux sont liées pour former un objet. Ce procédé utilise comme matériaux du métal ou du papier.

### Principe de fonctionnement

Lorsqu'il s'agit de feuilles de papier, les différentes couches sont liées grâce à une colle. S'il s'agit d'une feuille de métal, une des solutions généralement employée est le soudage par ultrasons. Un système de découpe assisté par ordinateur est utilisé pour couper les bords de chaque couche (un laser, un couteau ou une lame de tungstène, par exemple). La Figure 1.8 présente ce procédé pour des feuilles de métal de manière schématique.

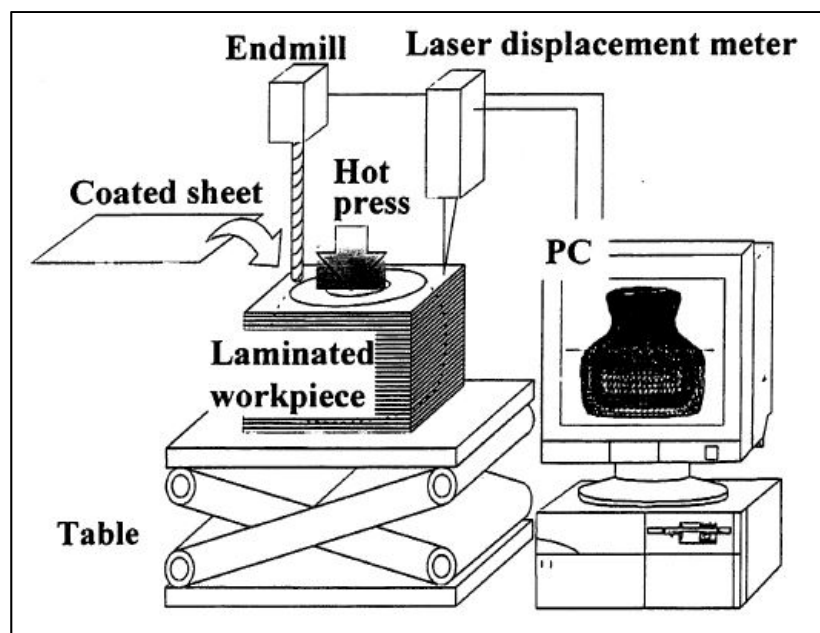


Figure 1.8 Représentation schématique du procédé de stratification de matériau en feuille métallique tirée de Obikawa, Yoshino et Shinozuka (1999)

## **Photopolymérisation en cuve**

### **Définition**

C'est un procédé pour lequel une résine photosensible, présente dans une cuve, est sélectivement polymérisée à l'aide d'une source de lumière. Ce procédé utilise des résines photosensibles.

### **Principe de fonctionnement**

La Figure 1.9 décrit schématiquement trois principes de fonctionnement de la photopolymérisation en cuve :

- le scanner vectoriel est la solution utilisée pour les machines de stéréolithographie (SL) (*Voir Figure 1.9 Configuration a*) ;
- le masque de projection, ou couche par couche, est l'approche où une couche entière est irradiée en une seule fois (*Voir Figure 1.9 Configuration b*) ;
- les deux photons est une approche point par point essentiellement employée pour obtenir un résultat haute résolution (*Voir Figure 1.9 Configuration c*).

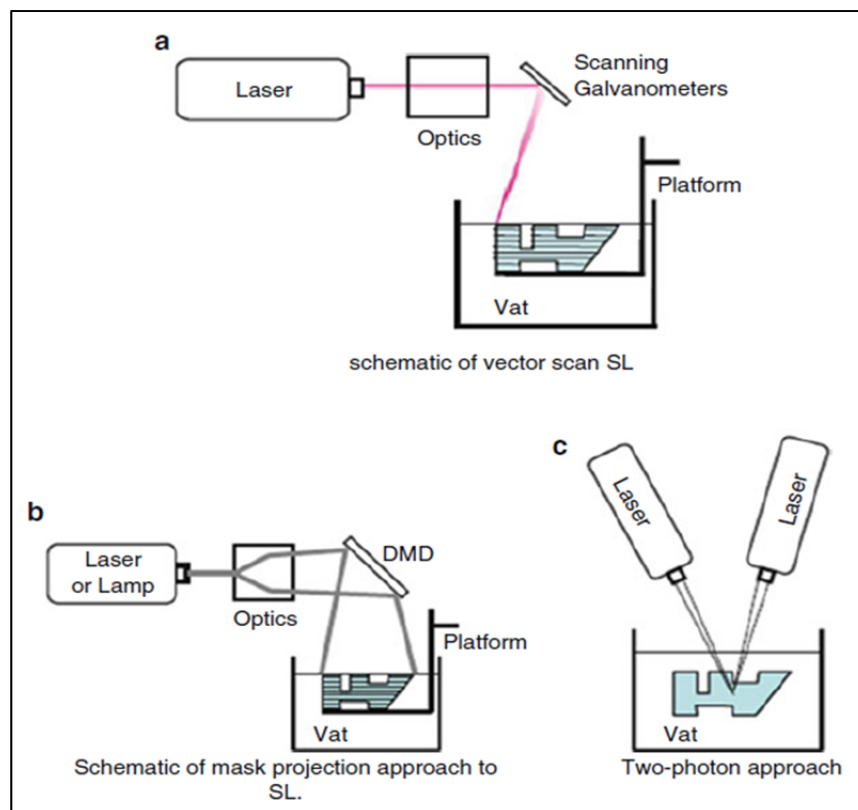


Figure 1.9 Diagrammes schématiques de trois approches du procédé de photopolymérisation en cuve tirée de Gibson, Rosen et Stucker (2015)

Ces technologies présentent donc des caractéristiques très variées qui peuvent être difficiles à comparer pour un utilisateur novice de ces technologies. Nous nous proposons donc d'étudier l'apport de connaissances que permettent les outils d'aide à la décision.

Des outils d'aide à la décision en matière de technologies de fabrication additive ont ainsi été mis en œuvre au cours des vingt dernières années. Ces outils ont pour objectif de guider aussi bien les concepteurs, les experts en fabrication additive, que des novices. Nous en avons fait une revue de littérature pour avoir une vision d'ensemble des critères d'aide à la décision déjà mise en œuvre et ainsi cibler les contributions de la méthodologie développée dans cette étude.

Cette revue de la littérature est le socle des résultats présentés dans le Chapitre 3.

### 1.3 Inventaire des outils et critères d'aide à la décision

Cette étape charnière de la conception d'un outil d'aide à la décision s'inscrit dans un processus lié à la méthodologie de recherche de science de la conception qui est décrit plus en détail sur la Figure 2.2 du Chapitre 2.

#### La stratégie de recherche

La revue de littérature a été effectuée grâce à Compendex<sup>®</sup>, Google Scholar<sup>®</sup> et le site de la bibliothèque de l'ÉTS. Les mots-clés qui ont été utilisés et combinés par des opérations booléennes sont :

- decision support systems (DSS),
- computer aided tool,
- Rapid Prototyping (RP) selector,
- Rapid Tooling (RT) selector,
- Rapid Manufacturing (RM) selector,
- additive manufacturing,
- Knowledge Based System (KBS).

Seuls les articles publiés entre 1990 et 2015 ont été retenus. Le Tableau-A I-1 de l'Annexe I présente ainsi les résultats de ces recherches sous forme d'une liste de 17 références et des besoins auxquelles ces études répondent. Des 17 références repérées, nous en avons sélectionné 5 afin de prendre en compte les études qui portaient sur des outils de fabrication rapide. L'outil en ligne présenté par Smith et Rennie (2008) a été exclu également, car il n'était plus disponible. Ce choix a été effectué sur la base du profil des industriels qu'il a été possible d'interroger. Les treize autres outils ont ainsi été exclus de cette étude, car ils ne correspondaient pas à des outils d'aide à la décision destinés à des applications de fabrication rapide.

De cette revue, une structure commune des outils d'aide à la décision a été identifiée. Cette structure est présentée sur la Figure 1.10.

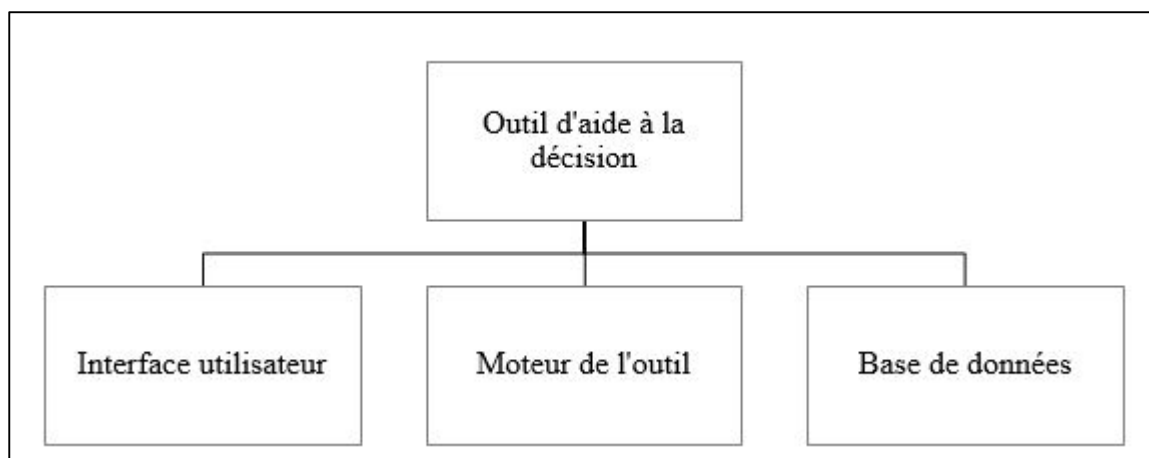


Figure 1.10 Structure commune des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA

La section suivante présente les interfaces utilisateurs qui ont été mises en œuvre dans les outils d'aide à la décision étudiés.

### 1.3.1 Interface utilisateur

Les interfaces utilisateurs dépendent principalement de l'outil de mise en œuvre de la sélection des technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. La boîte de dialogue Matlab® a pour avantage de permettre de profiter de la puissance de calcul de Matlab® et de construire une interface utilisateur agréable. Les outils en ligne, comme celui de IVF (2005) par exemple, permettent une flexibilité de mise à jour et d'avoir une interface utilisateur très conviviale. Le niveau de confidentialité et de condition à l'exportation des informations transmises en ligne est alors le facteur rédhibitoire à l'emploi de ce type d'interface. Le Tableau 1.2 répertorie les différents types d'interface employés dans la revue de littérature.

Tableau 1.2  
Les différents types d'interfaces utilisateurs étudiés

Type d'interface utilisateur	(IVF, 2005)	(Gibson, Rosen et Stucker, 2015) (Chapitre 13.4)	(Munguía et al., 2010)	(Ghazy, 2012)
Boîte de dialogue Matlab®		x	x	x
En ligne	x			

Dans la section suivante, nous avons identifié les types de moteurs de sélection et leurs particularités.

### 1.3.2 Moteur de l'outil

Le Tableau 1.3 présente deux approches permettant de proposer à l'utilisateur une sélection préférentielle de technologies, de matériaux et de post-traitements en accord avec les besoins de l'utilisateur.

Tableau 1.3  
Les deux types d'architecture du moteur des outils d'aide à la décision répertoriés

Types de moteur de l'outil	Avantages	Inconvénients
Apprentissage statistique	Le système apprend des cas d'étude qui sont menées et est donc évolutif.	Il est difficile de tracer le processus de sélection qui est effectué et donc de comprendre pourquoi une solution est proposée plutôt qu'une autre.
Système de base de connaissances	Ce système permet de donner de la flexibilité à l'outil, car des libertés sont données à l'utilisateur dans les variables utilisées et rendent le système plus évolutif.	Le système est fonction des choix du développeur sur le plan de l'architecture de décision. Selon l'architecture que le développeur aura mise en place, le système sera plus ou moins flexible.

Aucun des outils utilisés n'a employé un système d'apprentissage statistique. Le Tableau 1.4 présente les trois méthodes de sélection multicritères qui sont employées dans les outils de sélection étudiés. Il s'agit d'une discrimination « si alors », la normalisation de valeurs à partir de variables linguistiques floues et la méthode simple d'aide à la décision multicritères (*Simple Multi-Attribute Rating Technique SMART*).

Tableau 1.4  
Méthodes de sélection multicritères étudiées

Type de moteur de sélection	(IVF, 2005)	(Gibson, Rosen et Stucker) (Chapitre 13.4 Rosen DW, 2005)	(Munguía <i>et al.</i> , 2010)	(Ghazy, 2012)
Discrimination « si alors »	x	x	x	x
Valeurs normalisées à partir de variables linguistiques floues			x	x
SMART				x

- 1) La méthode appelée discrimination « si alors » désigne la comparaison de critères vis-à-vis des données entrées par l'utilisateur. Cette méthode peut être utilisée à elle seule si tous les critères rentrés par l'utilisateur sont discriminants.
- 2) La normalisation des valeurs à partir de variables linguistiques floues telles que l'état de surface (« bon », « très bon », etc.) permet de donner une valeur à ces critères qualitatifs et ainsi de les comparer aux critères quantitatifs.

Munguía *et al.* (2010) met par exemple en œuvre ces deux précédents moteurs de sélection au cœur de son outil. Cependant, à eux seuls, ces deux types de moteurs de sélection ne permettent pas de rendre compte du niveau d'importance relatif des critères de sélection.

Dans le cas de la sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA, il est préférable de laisser à l'utilisateur le choix des poids donnés aux différents critères. Cela permet de rajouter un niveau de flexibilité à l'outil et ainsi élargir les applications que l'outil peut traiter.

- 3) La méthode employée dans l'outil développé par Ghazy (2012) est une méthode simple d'aide à la décision multicritères (*Simple Multi-Attribute Rating Technique* SMART). Cette méthode est intéressante, car elle met en œuvre une normalisation des critères qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs. Ces critères normalisés sont alors pondérés par des poids normalisés, entrés par l'utilisateur, afin d'obtenir un score global pour chacune des alternatives (Edwards et Barron, 1994). L'utilisateur rentre alors des poids de 1 à 10 à chacun des critères évalués et le système, en fonction des alternatives possibles, propose un classement par ordre préférentiel de ces alternatives. La Figure 1.11 présente la méthode SMART intégrée dans le processus de sélection des alternatives possibles.

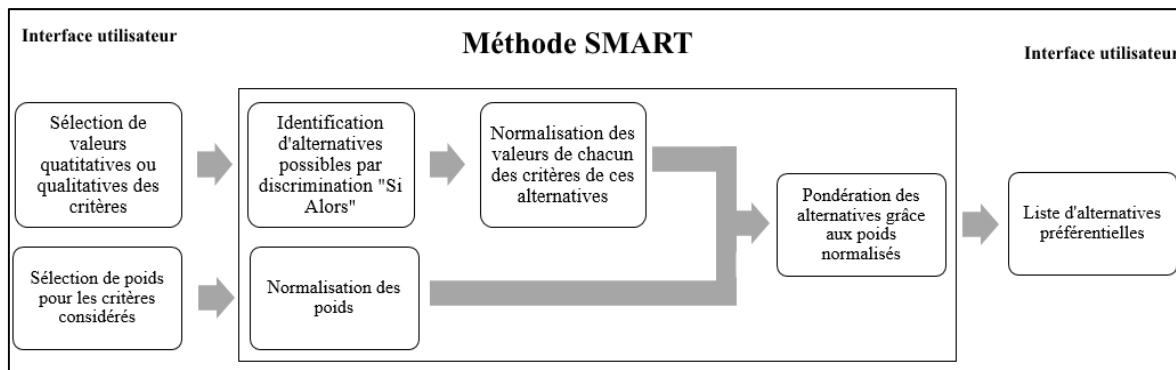


Figure 1.11 Méthode SMART intégrée dans un l'outil d'aide à la décision adaptée de Edwards et Barron (1994)

Tous ces outils possèdent une base de connaissances à partir de laquelle des solutions peuvent être proposées à l'utilisateur. Cette base de connaissances est stockée dans des bases de données qui contiennent les critères d'aide à la décision.



### 1.3.3 Inventaire des critères d'aide à la décision

Le Tableau 1.5 présente les critères de sélection des technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des applications de FR identifiés dans la littérature. Les catégories de critères de coût et de qualité proposées sont issues de Munguía *et al.* (2010).

Tableau 1.5  
Critères de sélection des technologies, de matériaux  
et de post-traitements de FA pour de la FR dans la littérature

		Critères de sélection	(IVF, 2005)	(Gibson, Rosen et Stucker, 2015)	(Munguía <i>et al.</i> , 2010)	(Ghazy, 2012)
Coût		Coût par application	x	x		
		Quantité de pièces		x		
		Dimensions de l'application		x	x	
Qualité	Apparence	Épaisseur minimale de paroi	x	x	x	x
		Résolution		x		
		Précision	x	x		x
		Fini de surface	x	x	x	x
		Tolérance			x	
	Propriétés mécaniques	Résistance mécanique	x	x	x	x
		Dureté		x		x
		Fatigue		x		
		Déflexion thermique				x
		Densité		x		x
		Résistance diélectrique				x
	Performance	Pièce critique			x	
		Requis sanitaires			x	
		Résistance au feu			x	
		Résistance à la corrosion			x	
		Capacité d'absorption			x	
Autre		Flexibilité de personnalisation		x		
		Orientation de la pièce		x		
		Complexité des applications	x	x		
		Nombre de pièces à consolider		x		
		Temps de fabrication	x	x		
		Délai d'obtention de l'application		x		

Les critères répertoriés dans le Tableau 1.5 permettront dans une phase ultérieure de cette étude d'identifier les critères manquants dans la prise de décision d'après les industriels interrogés.

Deux études, Ghazy (2012) et Gibson (2002), présentent des sondages auprès d'utilisateurs des concernant les outils qu'ils ont développés. Ces sondages ont pour but d'obtenir un retour d'informations sur les critères de décision et les fonctionnalités manquantes de ces outils. C'est l'objet de la section suivante.

#### **1.3.4 Les lacunes des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA**

Le Tableau 1.6 présente les lacunes identifiées par ces études dans la revue de littérature. Nous avons pris le soin de catégoriser ces lacunes selon trois catégories :

- des lacunes liées aux critères de décision;
- des lacunes liées aux fonctionnalités des outils conçus;
- et des lacunes liées au processus même de conception de ces outils.

Tableau 1.6  
Identification de critères de décision et de fonctionnalités manquantes  
dans la littérature

	<b>Manques</b>	<b>(Ghazy, 2012)</b>	<b>(Gibson, 2002)</b>
<b>Critères de décision</b>	La sélection des matériaux manque souvent aux outils développés.	x	
	L'utilisateur préfère sélectionner les matériaux par classe et non par propriétés.	x	
	L'utilisateur souhaite l'ajout d'un coût indicatif de fabrication.	x	
	Ajouter des critères permettant de supporter l'investissement.	x	x
	Le manque d'intégration de la chaîne de technologies, de matériaux et de post-traitement.	x	
<b>Fonctionnalités de l'outil</b>	Les utilisateurs préfèrent avoir un outil sous cette forme et dans cet ordre de classement : en ligne, module de conception assistée par ordinateur, autonome.	x	
	Les mises à jour sont un facteur indispensable. Les utilisateurs souhaiteraient ne pas avoir à les faire eux-mêmes.	x	
	Ajouter une librairie de cas d'études répondant à un problème précis afin d'identifier les problèmes similaires.	x	
	Avoir un outil permettant de comparer les technologies de FA aux procédés conventionnels.	x	
	Ajouter une assistance au choix des paramètres de fabrication des technologies.	x	x
<b>Processus de conception de l'outil</b>	L'utilisateur cible n'était pas présent lors du processus de développement des outils.	x	

Pour être en mesure d'émettre une suggestion d'outil d'aide à la décision qui répond à un besoin industriel réel, nous avons étudié différentes techniques de capture des besoins afin de guider nos choix.

#### 1.4 Techniques de capture des besoins et des critères de sélection

Le guide de l'*Open Space Technology* (Owen, 2008) donne les clés de la captation des besoins. Cette méthode est particulièrement adaptée aux phases préliminaires de conception, car elle permet de capturer un large éventail de besoins grâce à l'agilité des moyens qu'elle propose. Ce guide est ainsi la base de la capture des critères d'aide à la décision en industrie qui a été employée dans le Chapitre 2 Méthodologie de recherche.

Pour cela, un sondage exploratoire a été réalisé auprès de l'industrie (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015). Les caractéristiques de ce type de sondage sont présentées dans le Tableau 1.7.

Tableau 1.7 Caractéristiques du sondage exploratoire  
tiré de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015)

Éléments	Sondage exploratoire
Cadre d'étude	Clairement défini
Participants	Représentatif du cadre d'étude
Hypothèses de recherche	Non nécessaire
Critère de sélection de l'échantillon	Par approximation
Taille de l'échantillon	Suffisante pour dégager un phénomène d'intérêt
Questionnaire de prétest	Conduit avec une partie de l'échantillon
Taux de réponse	Aucun minimum
Utilisation d'autres méthodes pour la collecte de données	Méthodes multiples

Dans le cadre de ce sondage exploratoire, différentes méthodes de collectes de données sont possibles. La Figure 1.12 représente un ensemble de techniques de capture des critères avec pour points de comparaisons le niveau d'innovation du sujet traité en abscisses et le niveau de connaissances de ce sujet de la part des participants en ordonnées (Wirthlin, 2000).

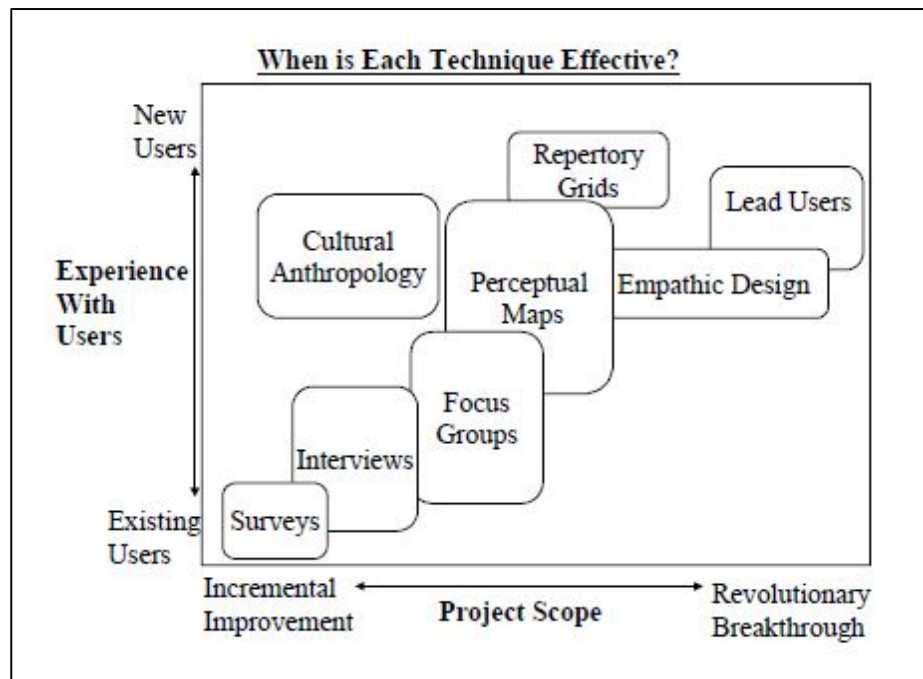


Figure 1.12 Étude de l'efficacité des techniques de capture des besoins en fonction du niveau d'innovation du sujet et du niveau de connaissances des utilisateurs  
tirée de Dahan (1998)

Les sondages visent à évaluer les proportions de différentes caractéristiques d'une population à partir de l'étude d'une partie seulement de cette population. Les entrevues individuelles consistent à interroger directement les sujets de l'étude. À la différence des groupes cibles, elles permettent de collecter plus d'informations de chacun des sujets, mais le format est moins stimulant. La méthode d'anthropologie culturelle quant à elle permet d'étudier les cultures, les opinions, la société, au travers d'entrevues ou de questionnaires très axés sur le langage. L'objectif est de capturer au maximum l'univers de la personne interrogée pour contextualiser toutes les données collectées. La carte perceptuelle permet de cartographier l'expérience utilisateur vis-à-vis d'un produit et ainsi d'améliorer un produit existant ou le développement d'un nouveau. La conception par empathie est une approche de conception qui positionne l'utilisateur cible au cœur de la conception et se concentre sur son ressenti concernant le produit en conception. La méthode dite de l'utilisateur à l'avant-garde (*lead use*) est une méthode de collecte de données auprès d'utilisateurs, de consommateurs, de

clients, d'utilisateurs qui se positionnent comme les premiers à adopter et ainsi permettre d'identifier des orientations pour le développement de produits en innovation de rupture. Enfin, la grille de répertoire est une technique d'entrevue qui emploie le facteur d'analyse pour déterminer une mesure idiographique, c'est-à-dire de compréhension du sens d'un phénomène en lien avec un type de personnalité.

Cette revue de la littérature a permis de mettre en exergue la réalité à laquelle font face les ingénieurs de chez Bombardier aéronautique et plus largement le secteur aéronautique. En effet, sept technologies de fabrication additive répondent à des besoins différents. Les outils d'aide à la décision étudiés, en lien avec la fabrication directe, présentent un ensemble de critères discriminants de ces technologies. Cependant, à la lueur des limitations des outils étudiés, des manques ont été identifiés par des utilisateurs de ces outils. Il s'agit dans cette étude d'identifier les besoins et critères de décision des industriels du secteur aéronautique en matière de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements.

Cette étude vise donc à concevoir un outil d'aide à la décision de technologies fabrication additive pour le milieu aéronautique pour des applications de fabrication directe.

Le chapitre suivant présente la méthodologie employée dans cette étude afin de cadrer les résultats de cette étude.

## **CHAPITRE 2**

### **MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE**

Ce chapitre présente la méthodologie de recherche mise en œuvre pour atteindre les objectifs fixés. Ce chapitre est découpé en cinq sections présentant la méthodologie :

- de science de la conception,
- d'identification des critères d'aide à la décision,
- de l'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision,
- de suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision,
- et de choix de solution parmi les concepts d'outils d'aide à la décision conçus.

La section suivante vise à présenter la méthodologie de recherche qui guide cette étude.

#### **2.1 Introduction à la science de la conception**

La science de la conception consiste à produire des systèmes qui n'existent pas encore ou de les modifier en vue d'obtenir de meilleurs résultats à un problème donné. Cette science se focalise sur trouver des solutions. L'objectif de ce type de recherche est, dans le cadre de cette étude, d'émettre une prescription à un problème donné (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015). La Figure 2.1 présente la stratégie de recherche dans son ensemble.

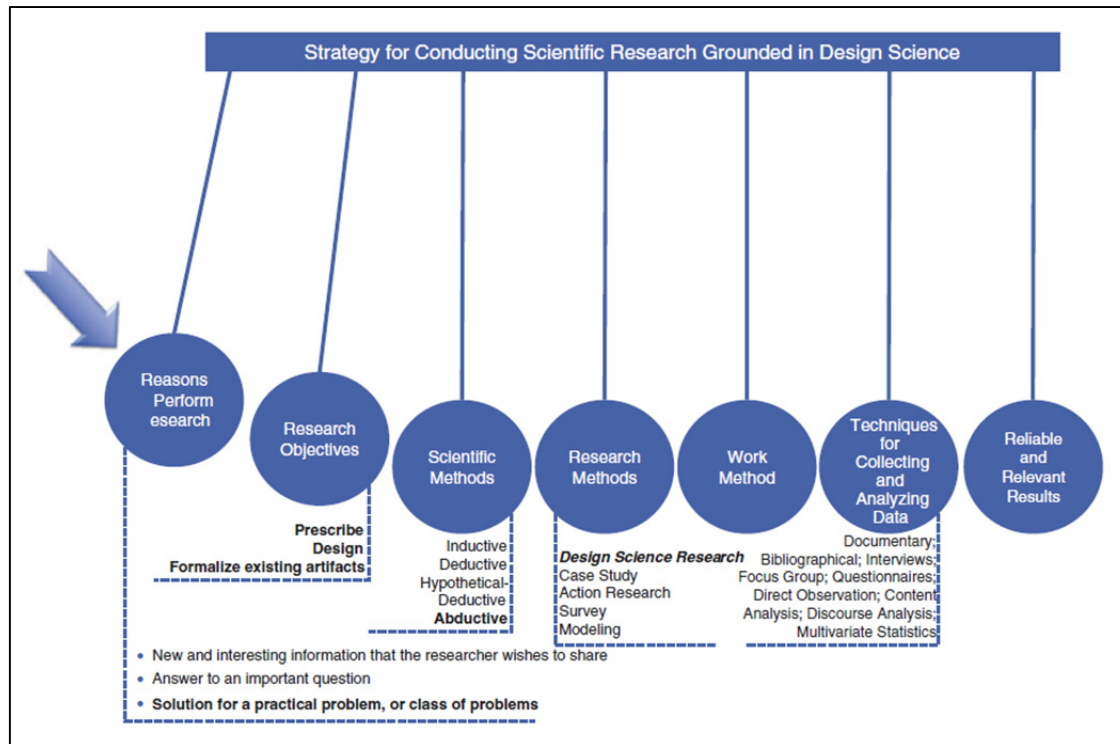


Figure 2.1 Stratégie pour mener une étude scientifique de la science de la conception tirée de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015)

Au regard de la Figure 2.1, cette étude a pour objectif de prescrire une suggestion de solution avec une approche dite *abductive*, en accord avec la science de la conception décrite sur la Figure 2.2 suivante.



Les étapes de la méthode de science de la conception sont présentées sur la Figure 2.2.

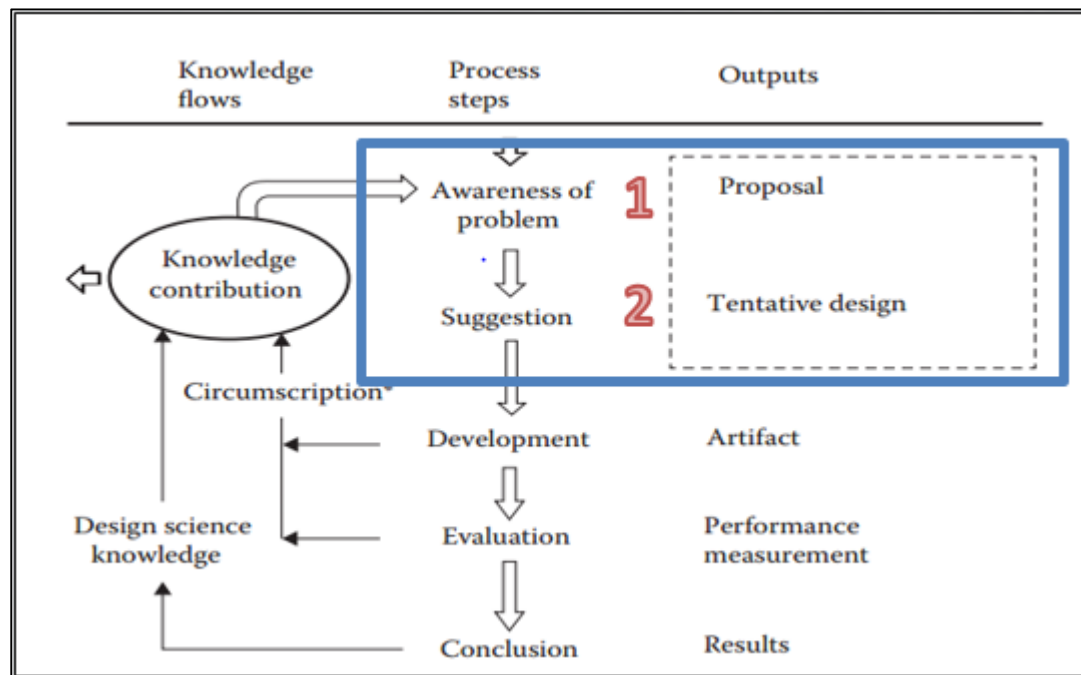


Figure 2.2 Étapes de la démarche de science de la conception  
tirée de Vaishnavi et Kuechler (2015)

Les objectifs de cette étude permettent de couvrir les 2 premières étapes de science de la conception, soient la connaissance du problème et la suggestion de solutions qui prendraient la forme de prototypes conceptuels.

Les livrables et les moyens de mise en œuvre sont présentés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1  
Livrables et moyens de mise en œuvre de cette étude

Étape de la science de la conception	Moyens	Livrables
Connaissance du problème	<ul style="list-style-type: none"> <li>une étude préliminaire des outils conçus dans la littérature,</li> <li>11 entrevues individuelles semi-dirigées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Une liste de critères de décision (Section 3.2)</li> </ul>
	3 ateliers avec des groupes ciblés	Une liste des besoins et des spécifications techniques en vue de la conception d'un outil d'aide à la décision (Section 3.3.1 et 3.3.2)
		Une maison de la qualité (Section 3.3.3)
Suggestion de concepts de solution	<ul style="list-style-type: none"> <li>Microsoft Excel<sup>®</sup>,</li> <li>Microsoft Access<sup>®</sup>,</li> <li>Site internet en HTML5 et CSS3 accompagnés par RapidMiner<sup>®</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 outils d'aide à la décision (Section 3.4).</li> </ul>
	6 ateliers avec des groupes ciblés.	Pointage des différents outils conçus. (Section 3.5)

La méthodologie de la science de la conception est le socle sur lequel cette étude repose. La section suivante présente les outils empruntés de la littérature pour identifier les lacunes entre les connaissances issues la littérature et les besoins industriels en matière de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA.

## 2.2 Méthodologie en vue de l'identification de critères de décision

Le premier sous-objectif de cette étude est de définir les critères de décision concernant le choix des technologies, de matériaux et de post-traitements de FA dans le secteur aéronautique. Pour cela, trois phases présentées sur la Figure 2.3 ont été constituées : une

étude préliminaire, une analyse des critères industriels et une interprétation de deux premières phases.

En premier lieu, dans la phase préliminaire, on dresse un inventaire des critères d'aide à la décision de technologie de FA issus d'outils d'aide à la décision identifiés dans la littérature. Ensuite vient une phase d'analyse des critères de décision des industriels vis-à-vis des technologies, des matériaux et des post-traitements. La dernière phase vise à identifier les lacunes entre les connaissances issues de la littérature et les besoins industriels collectés.

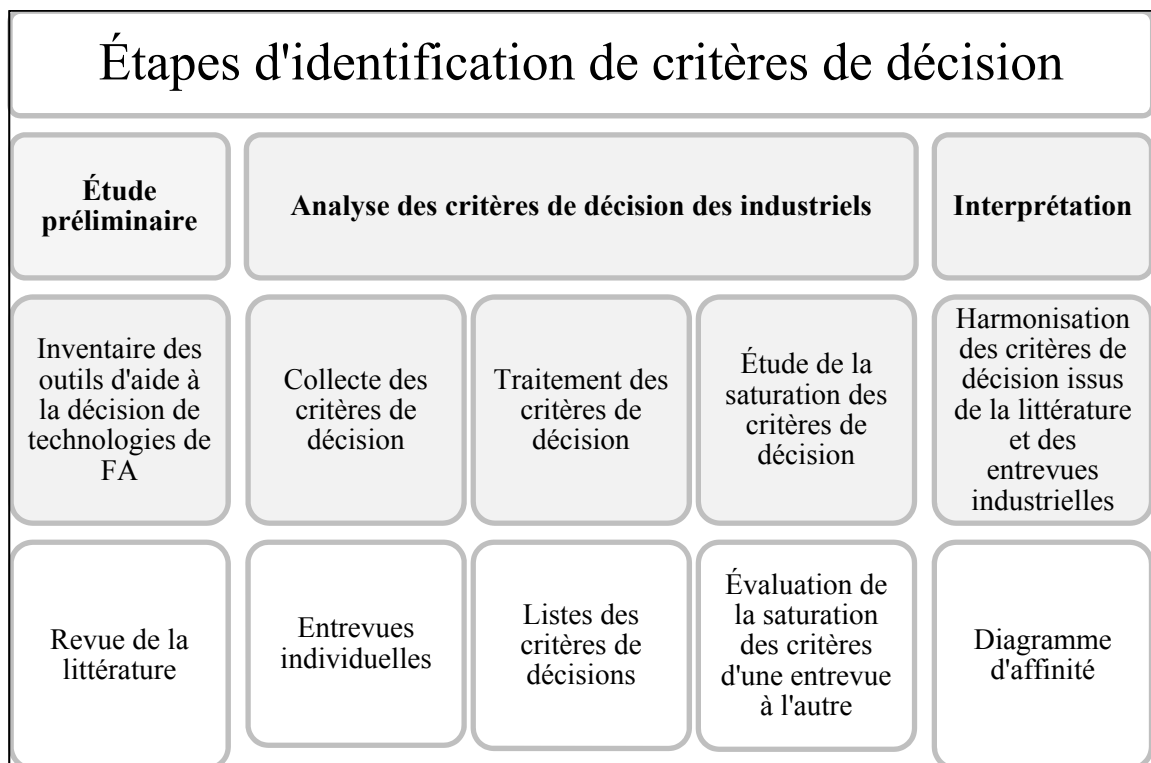


Figure 2.3 Méthodologie d'identification des critères de décision

### 2.2.1 Phase d'étude préliminaire

L'étude préliminaire a pour objectif de répertorier les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA issus de la revue de littérature. Cette étape est en partie garante de la première étape de connaissance du problème de science de la conception.

La méthodologie développée pour positionner la connaissance est présentée sur la Figure 2.4 :

- **identification des outils d'aide à la décision dans la littérature** : la phase d'étude préliminaire se concentre sur des outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des applications de FR;
- **classification de la connaissance en fonction des catégories de critères de sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA** : toute la connaissance capturée au sein de la littérature est alors classée en fonction des catégories de critères de sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA.

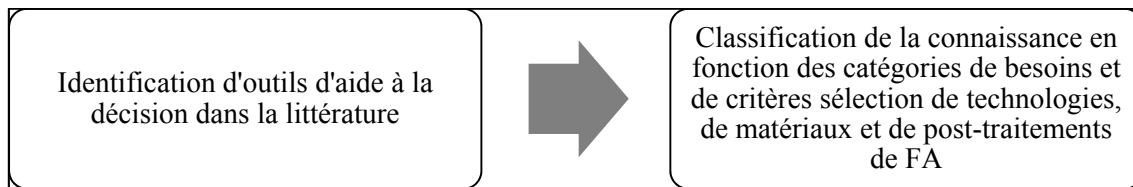


Figure 2.4 Méthodologie de l'étude préliminaire

Une fois cette revue de littérature effectuée, les besoins et les critères de décision antérieurs sont identifiés. Il s'agit d'analyser les critères de décision des industriels afin d'identifier de nouveaux critères de décision ou de confirmer ceux identifiés dans la littérature. Pour cela, une phase d'analyse des critères de décision des industriels a été mise en place.

### 2.2.2 Phase d'analyse des critères de décision des industriels

Cette phase a pour ambition de déterminer les critères d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des applications de FR en milieu aéronautique. La phase d'analyse des critères de décision des industriels s'est effectuée en trois étapes présentées sur la Figure 2.5.

Ces trois sous-phases sont :

- la première sous-phase de collecte des critères de décision des industriels par l'intermédiaire d'entrevues individuelles,
- une seconde sous-phase de traitement des critères de décision des industriels en matière de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA,
- et une troisième et dernière sous-phase d'étude de la saturation des critères d'aide à la décision propre aux industriels interrogés.

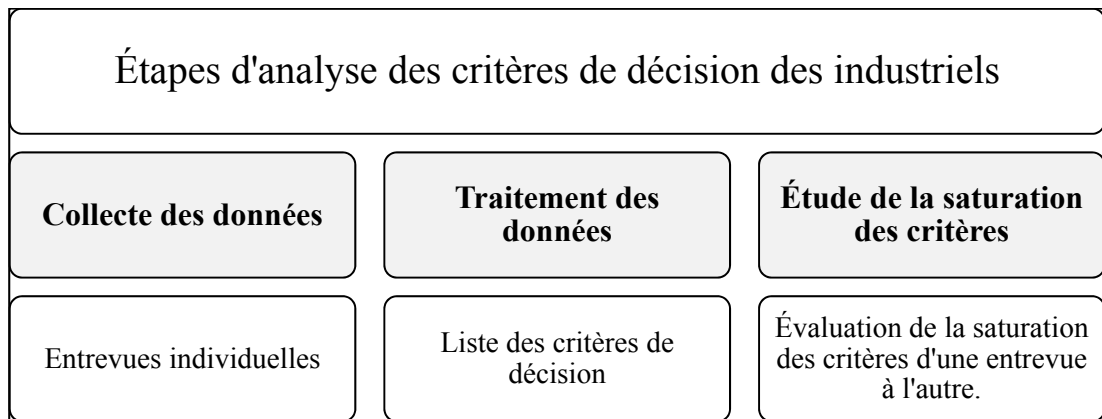


Figure 2.5 Les étapes d'analyse des critères de décision des industriels

### Collecte des données

Un sondage exploratoire a donc été réalisé dans l'objectif de la collecte des critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitement auprès d'industriels du secteur aéronautique. Nous avons présenté les caractéristiques du sondage exploratoire qui a été conduit dans cette étude dans le Tableau 1.7 du Chapitre 1. La Figure 2.6 présente la méthodologie de collecte des critères de décision des industriels.

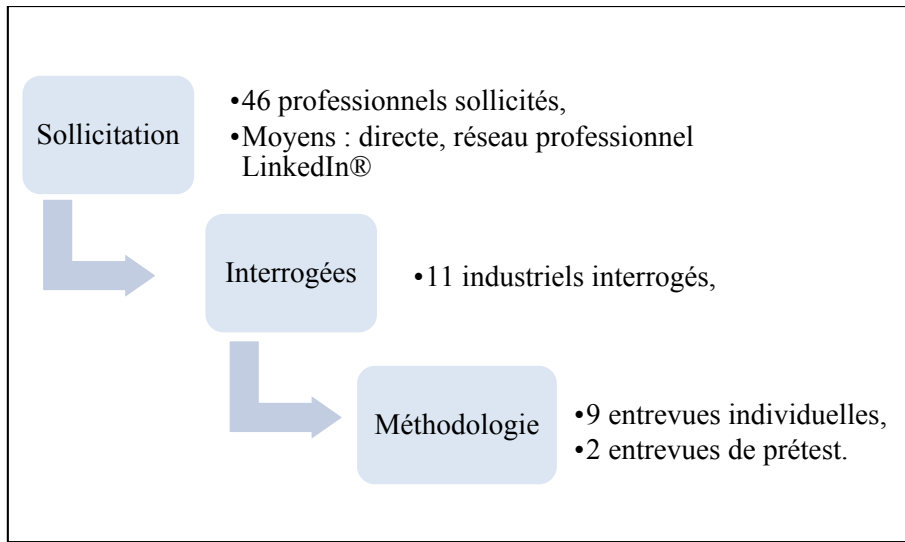


Figure 2.6 Méthodologie de collecte des critères de décision des industriels

**Cadre d'étude :** ce sondage exploratoire est effectué dans l'objectif de capturer les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des industriels du secteur aéronautique.

**Taille de l'échantillon :** l'échantillon de 11 participants résulte de la sollicitation d'une cinquantaine d'industriels grâce aux réseaux professionnels des auteurs de cette étude. La taille de l'échantillon a été déterminée par saturation empirique des données collectées (Fortin, 2016). Ces industriels ciblés ont été sollicités par courriel, cellulaire ainsi que par courriels privés et dans des groupes ciblés sur le site de réseau professionnel LinkedIn®. La sollicitation des industriels par l'intermédiaire du réseau professionnel LinkedIn® s'est par ailleurs avérée efficace, car 3 participants de cette étude ont été trouvés par ce moyen dans un laps de temps de deux semaines après la première sollicitation.

**Choix du profil des participants :** le critère de sollicitation des industriels est lié au domaine aéronautique, car c'est le domaine d'activité de notre partenaire Bombardier Aéronautique. Il résulte de cette sollicitation que le profil des participants est en lien avec de la fabrication de pièces de production en milieu aéronautique. La raison principale est que

l'enjeu pour le secteur aéronautique réside dans la production de pièces. On note que les participants interrogés ont une connaissance des technologies, des matériaux et des post-traitements de FA. Les acteurs de ces entrevues œuvrent aussi bien en tant que concepteurs, ingénieurs de structures, en recherche et développement (R&D) et en conseil aux entreprises pour la FA. La Figure 3.3 du Chapitre 3 présente la répartition des profils qui ont été interrogés pour cette étude.

**Questionnaire de prétest :** cette étape permet de valider que le modèle d'entrevue qui est conduit est pertinent par rapport aux objectifs fixés. Dans cette étude, les deux premières entrevues, présentées en Annexe II et en Annexe III, sont des entrevues de prétest, car elles ont permis de cibler l'objectif auquel ce type d'entrevues pouvait répondre et grâce à quel type de questions. Pour cela, les personnes interrogées ont été placées comme actrices du jugement de la conduite de ces entrevues. Cela signifie que lors des deux premières entrevues, les personnes ont été interrogées sur le format de conduite de l'entrevue, la portée des questions posées. Cela a permis de cibler pour objectifs l'identification et la saturation des critères de décision et non plus l'identification de besoins industriels au travers d'une maison de la qualité.

**Méthode employée pour ce sondage exploratoire :** pour effectuer ce choix, nous nous sommes basés sur la Figure 1.10 du Chapitre 1. Le niveau d'innovation lié aux outils d'aide à la décision qui ont déjà été développés est subjectif. Cependant, aux vues du nombre d'études et d'outils qui ont été développés, l'outil développé lors de cette étude s'inscrit dans une démarche d'amélioration plus que d'avancée de rupture. Concernant le niveau d'expérience des utilisateurs, le public ciblé par l'étude est un public qui connaît peu l'ensemble des technologies disponibles, mais qui a généralement eu l'occasion d'utiliser une technologie de FA. Cela signifie que les personnes interrogées avaient à la fois la capacité de connaître les problèmes auxquelles nos utilisateurs ciblent sont confrontés et d'être en mesure de formuler des réponses à ces problèmes. Les deux techniques semblant les plus adaptées à cette étude sont les entrevues individuelles et les groupes ciblés (Wirthlin, 2000).

Le facteur déterminant dans le choix final est le niveau d'informations nécessaires pour bâtir un cahier des charges. En effet, le choix des entrevues individuelles permet de capter un plus grand nombre d'informations par personne interrogée que par groupe ciblé. Le groupe ciblé répartit le temps de parole et peut d'une part orienter les propos du groupe dans une même direction et d'autre part inhiber la parole de certains des participants. Au contraire, l'entrevue individuelle permet de capturer un grand nombre d'informations, mais demande plus de temps de collecte de données pour interroger le même échantillon de personnes (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015).

Les avantages et inconvénients des entrevues individuelles par rapport aux groupes ciblés sont présentés sur la Figure 2.7. Nous avons ainsi choisi les entrevues individuelles pour des raisons de facilité d'organisation des rencontres et de quantité de données que ce type d'entrevues permet de collecter.

Type d'entrevue	Avantages	Inconvénients
• Individuelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• temps de parole long de 30 minutes à 60 minutes par personne interrogée,</li> <li>• quantité de données qu'il est possible de collecter par personne interrogée,</li> <li>• facilité d'organisation des rencontres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• le format n'est pas stimulant pour les participants,</li> <li>• le temps nécessaire est plus important,</li> <li>• le travail de préparation du modérateur est plus important,</li> <li>• le traitement de l'information est plus long que par groupe ciblés.</li> </ul>

Figure 2.7 Avantages et inconvénients des entrevues individuelles  
adaptée de Griffin et Somermeyer (2007)



Dans un souci d'imputabilité procédurale de cette collecte de données, c'est-à-dire des choix méthodologiques pour recueillir ces données, voici le déroulement de ces entrevues individuelles :

- une mise en contexte,
- une présentation de l'agenda de l'atelier,
- une phase de foisonnement permettant d'identifier des critères d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements. Cette étape a été orchestrée sous forme d'une entrevue semi-dirigée. Le choix de l'entrevue semi-dirigée permet de laisser ouvert l'ordre des questions posées et de s'adapter aux thèmes que le sondé souhaite aborder. A la différence d'une entrevue fermée où les questions sont définies et où le sondé n'a pas le choix de l'orientation de l'entrevue. Ce choix est en accord avec le sondage exploratoire, car il ne faut pas brider les informations délivrées par le participant;
- clôture de l'atelier.

Voici les questions qui ont été posées lors de ces entrevues semi-dirigées :

- Quelles sont les catégories d'applications pour lesquelles la FA a fait ses preuves ?
- Est-ce que ces catégories d'applications et leurs définitions vous semblent claires et permettent de couvrir l'ensemble des applications de FA ?
- Quels sont les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA ?
- Est-ce que les critères identifiés peuvent appartenir à une des catégories identifiées lors des entrevues précédente ? Si non, pourriez-vous proposer une nouvelle catégorie de critères pour les regrouper par affinité ?
- Seriez-vous en mesure d'évaluer le niveau d'importance de chacun de ces critères pour une catégorie d'application de FA spécifique ?
- Comment imagineriez-vous un outil d'aide à la décision de technologies de FA ?

Il s'agit ensuite de traiter des données afin que ces données puissent être analysées, exploitées et comparées entre les différentes entrevues.

## Traitement des données

Le traitement de ces données doit aboutir à un regroupement par classe des données collectées. Pour atteindre cet objectif, des catégories de critères ont été d'abord identifiées dans la littérature. Ensuite, pour les critères qui n'appartiennent pas à ces catégories préexistantes, les participants ont pu suggérer des catégories de critères. Les critères ont ainsi pu être regroupés par « affinité » dans un diagramme d'affinité (Stevenson, Benedetti et Youssef, 2012). La Figure 2.8 présente la méthodologie de traitement des données.

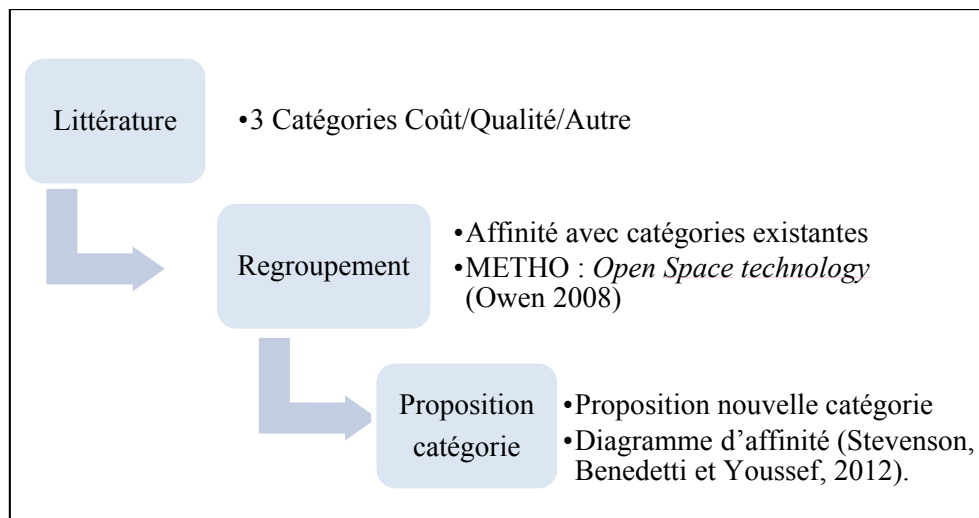


Figure 2.8 Méthodologie de traitement des critères de décision des industriels

## Étude de la saturation des critères

En ce qui concerne la méthodologie, le critère marquant l'arrêt de cette phase de collecte de données est un critère de saturation. Ce principe de saturation permet de mesurer à partir de quelle entrevue plus aucun nouveau critère n'est découvert (Pires, 1997).

La section suivante vise à spécifier comment l'interprétation des critères obtenus lors de l'étude préliminaire et lors des entrevues individuelles a été réalisée et d'identifier des manques entre les deux.

### **2.2.3 Interprétation**

La méthode d'interprétation du résultat de l'étude préliminaire et de l'analyse des critères de décision des industriels est une comparaison des critères présents ou non dans la littérature. Le livrable de cette phase est la Figure 3.2 présentée dans le Chapitre 3.

#### **La crédibilité des données recueillies**

Nous avons travaillé dans cette étude à assurer la crédibilité (validité interne dans la recherche quantitative) des données collectées dans un souci de crédibilité des interprétations qui en découlent. Pour cela, les participants ont été acteurs de ce niveau de validation. Ils ont dans un premier temps été interrogés sur les données collectées lors des entrevues antérieures. Cela a permis à la fois d'harmoniser les terminologies entre les différentes entrevues, mais également d'identifier des critères manquants d'une entrevue à l'autre. Dans un second temps, la retranscription des entrevues a été transmise aux participants afin qu'ils puissent valider la concordance de celle-ci avec les informations qu'ils ont livrées pendant les entrevues.

#### **La transférabilité de l'étude**

La transférabilité de l'étude est réalisée au travers de la mise en contexte des entrevues. La diversité des profils des participants aux entrevues permet de garantir la transférabilité des données collectées aux industriels du secteur aéronautique.

#### **La fidélité des données**

Les données n'ont pas été analysées par un expert externe à l'étude pour vérifier la fidélité de l'interprétation des données. C'est une des limites de cette étude.

#### **La confirmabilité**

La confirmabilité renvoie à l'objectivité dans les données et l'interprétation de celles-ci par le chercheur. Nous avons ainsi retourné la liste des critères d'aide à la décision obtenue à la fin

de la série des entrevues à chacun des participants. Ils ont donc pu confirmer que l'interprétation des données était conforme.

La section suivante présente la méthodologie employée pour l'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision.

### 2.3 Phase d'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision

En accord avec la méthodologie de science de la conception, la méthode scientifique employée dans cette phase est inductive, car on vise à élaborer un cahier des charges d'un outil d'aide à la décision.

Cette phase d'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision est une synthèse de la phase d'analyse préliminaire, et des besoins industriels issus d'une phase d'analyse de ces besoins lors de 3 ateliers avec des groupes ciblés. Le détail du déroulement de cette phase est présenté sur la Figure 2.9.

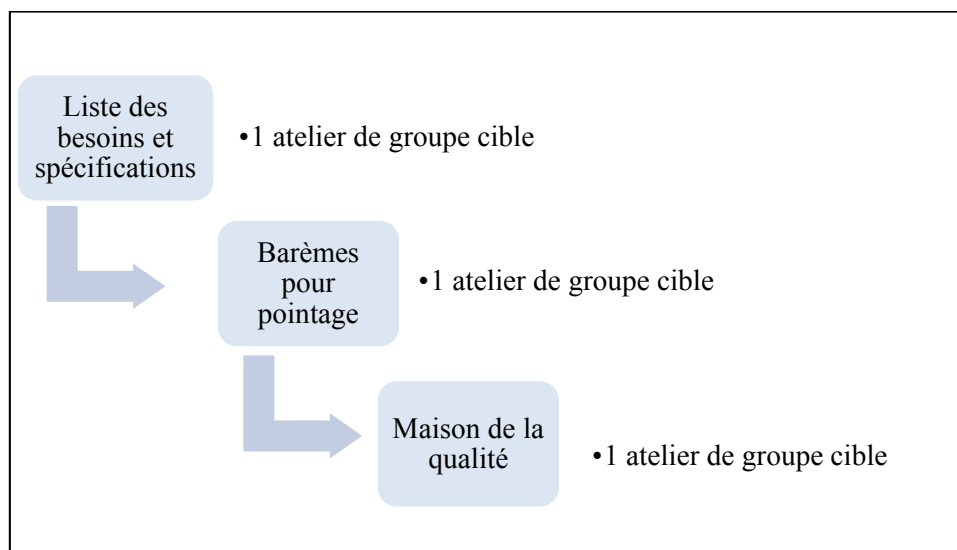


Figure 2.9 Méthodologie d'élaboration du cahier des charges

Pour cela, nous avons réalisé un cahier des charges. Les livrables sont :

- une liste des besoins,
- des spécifications techniques de conception d'un outil d'aide à la décision,
- et une maison de la qualité.

La maison de la qualité permet de focaliser les efforts de conception pour répondre aux besoins des industriels et pour lesquels les spécifications techniques mises en œuvres sont combinables.

La maison de la qualité permet de réunir :

- les besoins de l'utilisateur et leur importance (symbolisée par la section de *Voice Of the Customer VOC* sur la Figure 2.10) ;
- les spécifications techniques de mise en œuvre de l'outil et leurs conflits ou leurs synergies, communément appelées le « toit » de la maison de la qualité (symbolisées par les sections de *design requirements* et *correlation matrix* sur la Figure 2.10) ;
- le cœur de la maison de la qualité est une grille d'évaluation du niveau de relation des spécifications techniques et des besoins de l'utilisateur (symbolisé par la section de *correlation matrix* de la Figure 2.10) ;
- une section présentant l'importance relative des spécifications techniques au regard de l'importance des besoins et de l'influence des spécifications techniques sur ces besoins (symbolisée par la section d'*Importance* sur la Figure 2.10) ;
- il est également possible d'ajouter deux sections de comparaison du produit en cours de conception avec celui des concurrents (symbolisées par les sections de *benchmarking* sur la Figure 2.10).

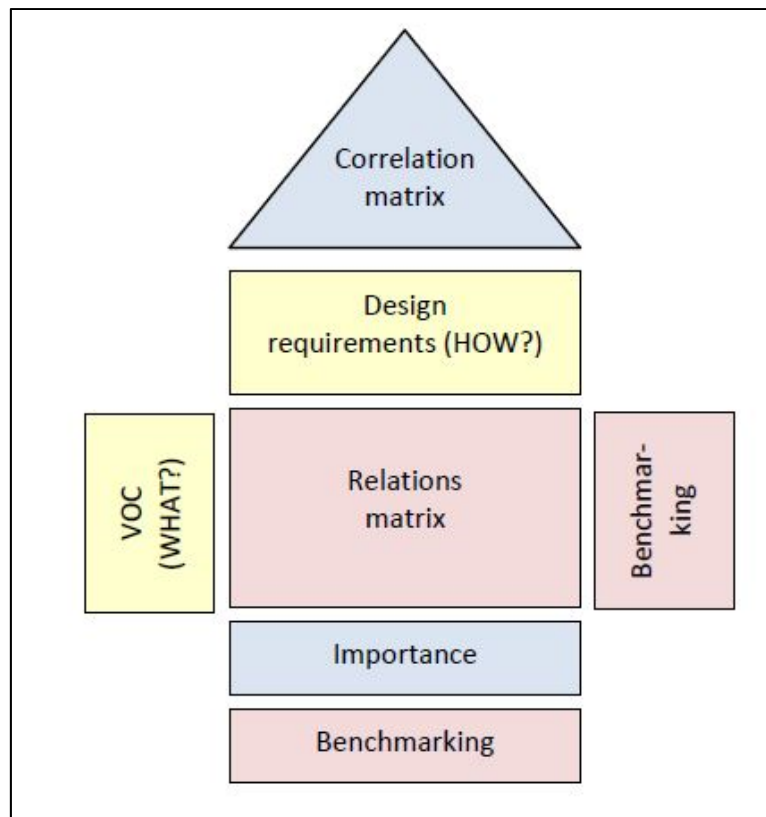


Figure 2.10 Maison de la qualité  
tirée de Bernal et al. (2009)

Cette représentation nous a permis de lister les besoins des utilisateurs, d'évaluer l'impact des spécifications techniques sur ces besoins et d'estimer le niveau d'importance de chacune des spécifications. Les différents besoins ont été identifiés avec quatre ingénieurs de Bombardier Aéronautique au travers de 3 ateliers de groupes ciblés. Il s'agit ensuite de suggérer des options de mise en œuvre de ces spécifications techniques et d'obtenir un retour de potentiels utilisateurs.

La section suivante présente la méthodologie que nous avons employée pour la suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision.

## 2.4 Phase de suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision

Pour cette phase de suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA, nous avons procédé par itération avec une équipe de deux ingénieurs de chez Bombardier Aéronautique.

Cette phase itérative a été effectuée en accord avec la science de la conception qui préconise d'effectuer des cycles de conception avec de potentiels utilisateurs afin d'obtenir un artéfact final le plus proche possible des besoins de l'utilisateur (Weller, 2015). Cette phase d'un point de vue de la méthodologie de science de la conception est *abductive*, car on vise à prescrire une suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015).

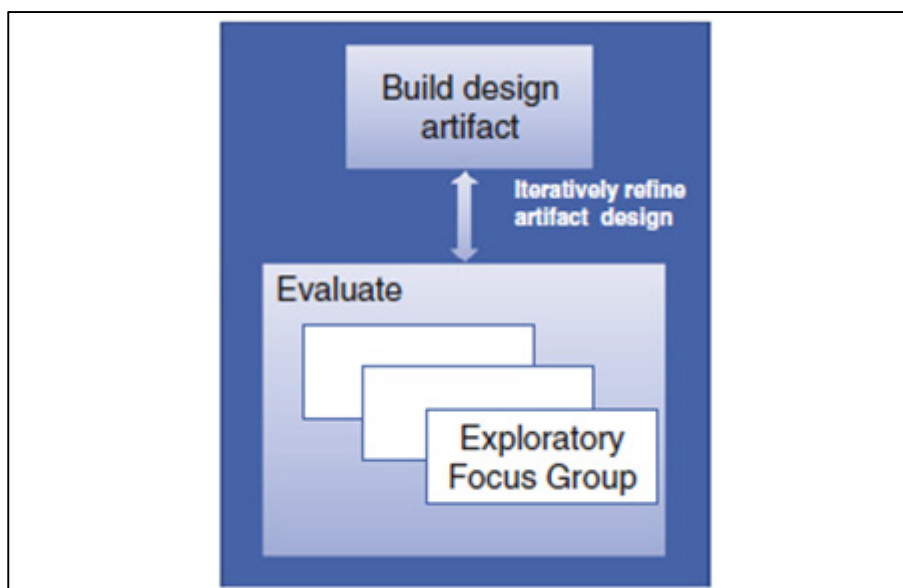


Figure 2.11 Phase d'itération de conception préconisée par la science de la conception tirée de Dresch, Lacerda et Antunes Jr (2015)

Cette phase est orchestrée avec un groupe cible dans le cadre de cette étude exploratoire de conception. L'objectif de cette méthode est de développer rapidement un concept d'outil répondant aux besoins des utilisateurs. Le groupe ciblé est le moyen qui nous a permis

d'obtenir les informations concernant les changements à effectuer sur l'outil pour que celui-ci réponde aux besoins de l'utilisateur cible (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015).

La section suivante présente la méthode de choix de solution parmi les concepts d'outils conçus.

## 2.5 Choix de solution parmi les concepts d'outils conçus

Les industriels impliqués dans ce pointage sont de potentiels utilisateurs de ces outils chez Bombardier Aéronautique. Les spécifications techniques de mise en œuvre des outils sont ainsi passées au crible par ces industriels au cours de 6 ateliers de groupes ciblés (2 ateliers par concept d'outil). Le livrable de ces 6 ateliers avec des groupes ciblés est un pointage des outils présentés. Ce pointage est réalisé grâce à un barème présenté dans le Tableau 3.3 du Chapitre 3. La Figure 2.12 présente par quels moyens les concepts d'outils conçus ont été évalués.

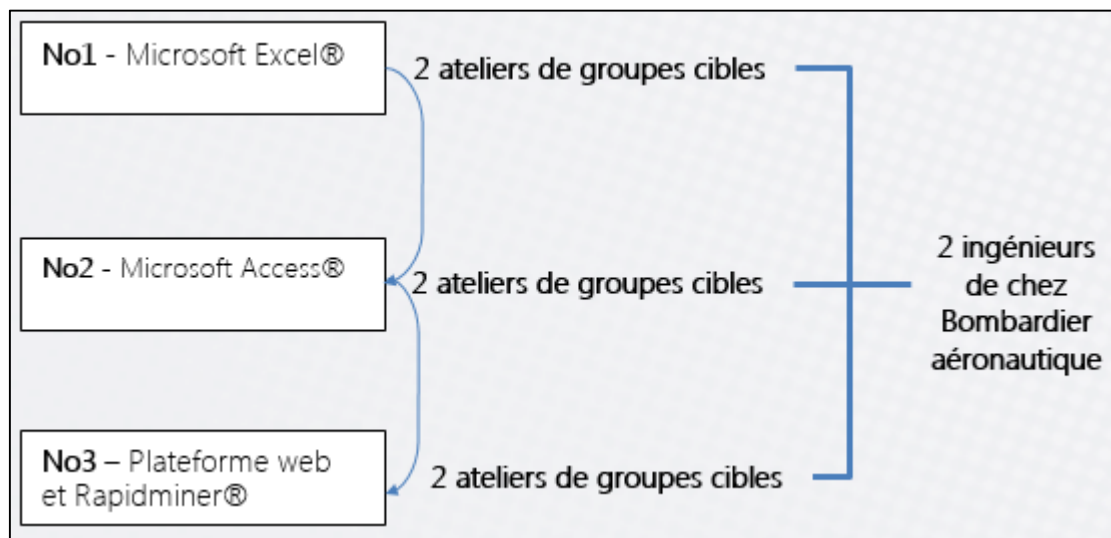


Figure 2.12 Méthodologie de pointage des concepts d'outils conçus

Le chapitre suivant présente les résultats que cette méthode de recherche a permis de capturer.



## **CHAPITRE 3**

### **PRÉSENTATION DES RÉSULTATS**

Ce chapitre est divisé en cinq sections :

- l'inventaire des outils et des critères de décision issus de la littérature,
- l'analyse des critères de décision des industriels,
- la conception du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision,
- la suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision,
- le choix de solution parmi les concepts d'outils conçus.

#### **3.1 Inventaire des outils et critères d'aide à la décision issus de la littérature**

Cette première phase d'inventaire des outils et critères d'aide à la décision issus de la littérature a été effectuée dans le Chapitre 1 de revue de la littérature. L'objectif était de faire un état des critères et des catégories de critères en lien avec des outils d'aide à la décision pour la fabrication rapide compte tenu du positionnement de cette étude. Cette phase nous sert dans la Section 3.2 d'analyse des critères de décision des industriels pour comparer les critères identifier dans la littérature et ceux lors des entrevues individuelles conduites.

Les manques identifiés concernant les critères de décision ont permis d'orienter la phase suivante d'analyse des critères de décision industriels. Les lacunes liées aux fonctionnalités de l'outil nous ont permis d'orienter nos pistes de réflexion lors des ateliers de groupe ciblé de la phase de suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision. Et enfin, la dernière lacune identifiée concerne la place de l'utilisateur au sein du processus de conception de l'outil. C'est pourquoi nous avons décidé de positionner de potentiels utilisateurs de ces outils tout au long du processus de suggestion de concepts d'outil d'aide à la décision.

La section suivante présente le résultat des entrevues individuelles menées pour la collecte des critères d'aide à la décision.

### 3.2 Analyse des critères de décision des industriels

Cette étape a pour objectif d'identifier les critères d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA en milieu aéronautique qu'il est nécessaire d'inclure dans un concept d'outil. Cette étape d'identification a donné lieu à des entrevues dont les résultats sont consultables de l'Annexe II à l'Annexe X. L'intérêt de ces annexes est de comprendre l'évolution des objectifs des entrevues et de la convergence vers un standard d'entrevue de capture des besoins industriels.

#### 3.2.1 Étape de collecte de données

Onze industriels ont été interrogés. Les profils des personnes interrogées sont :

- des concepteurs,
- des ingénieurs des structures pour le choix des critères manufacturiers,
- des ingénieurs en recherche et développement (R&D) pour la performance,
- des ingénieurs conseil en choix de technologies pour les critères de coûts et délais.

Cette diversité des profils a permis de mettre en exergue la complexité de la prise de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA.

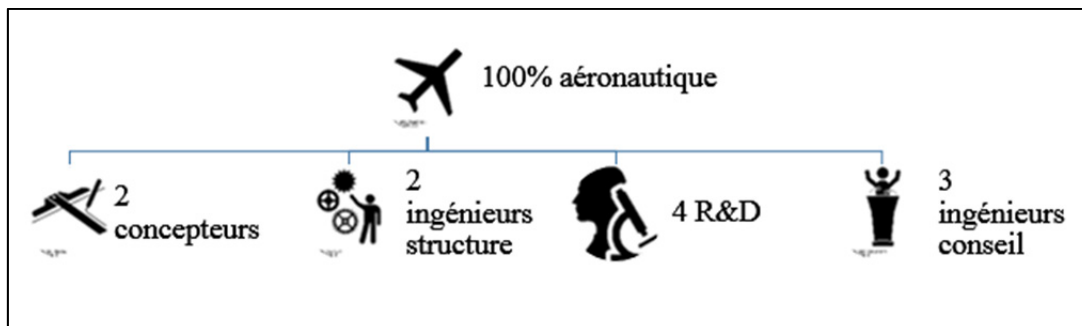


Figure 3.1 Profil des industriels interrogés

La section suivante décrit les étapes de traitement des données.

### 3.2.2 Étape de traitement des données

La Figure 3.2 présente le diagramme d'affinité qui regroupe tous les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements identifiés dans la littérature et lors des entrevues. Voici la légende qui permet d'identifier la provenance des critères :

- les critères de sélection que nous avons uniquement identifiés dans la littérature sont présentés en italique;
- les critères uniquement identifiés lors des entrevues sont présentés en gras;
- et ceux à la fois identifiés dans la littérature et lors des entrevues sont soulignés.

On remarque que 58 critères ont été identifiés au total. Parmi ces 58 critères, 14 sont exclusifs à la littérature et 16 sont communs entre ceux identifiés dans la littérature et lors des entrevues. Les entrevues ont ainsi permis d'identifier 28 critères supplémentaires. Ces critères sont liés principalement à des critères de coût de la pièce fabriquée (17 critères parmi 21) et de qualité (9 critères parmi 24).

Les causes de l'identification de 28 critères supplémentaires dans cette étude peuvent être :

- soit les profils des personnes qui ont conçu les outils dans la littérature sont foncièrement différents des industriels interrogés. Auquel cas, il faudrait réaliser des entrevues avec des industriels issus de secteurs d'activités différents et occupant des postes différents;
- soit le niveau de détail des informations collectées auprès des industriels était différent. En effet, grâce à la représentation du diagramme d'affinité, on distingue un plus ou moins grand nombre de sous-catégories de critères en fonction du niveau de détail qu'il a été possible d'identifier lors des entrevue ou dans la littérature;
- soit de nouveaux critères ont été identifiés lors de ces entrevues en vue de la conception d'outils de FR pour le secteur aéronautique.

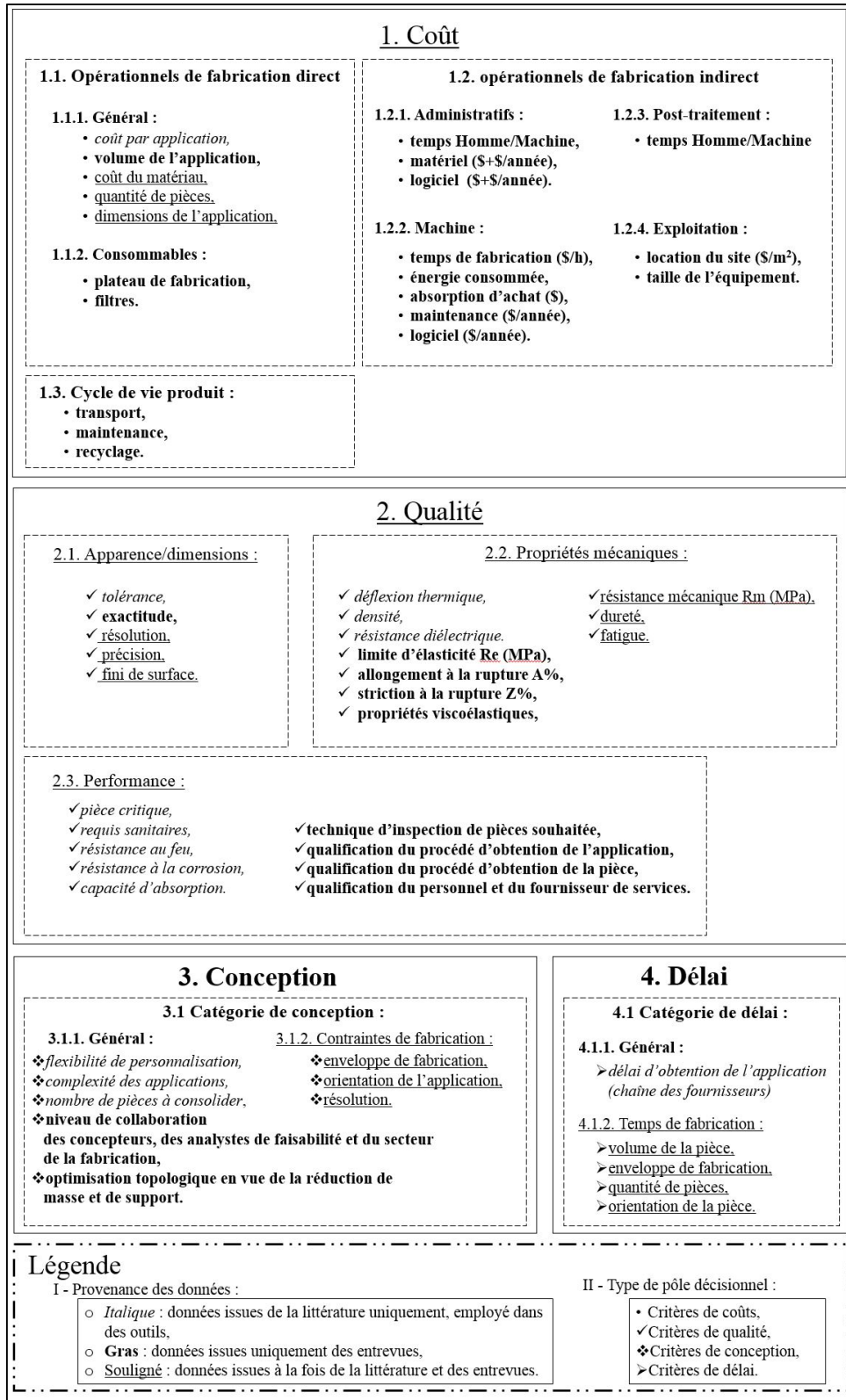


Figure 3.2 Diagramme des affinités des critères de sélection

Le diagramme des affinités, effectué lors des entrevues, a permis d'identifier 4 catégories de critères de niveau 1 : le coût, le délai, la qualité et la conception. Les deux catégories de critères de coût et de qualité sont issues de la littérature et nous avons ainsi identifié deux nouvelles catégories de critères de conception et de délai d'obtention lors de ces entrevues.

Dans cette étude, et en accord avec les participants aux entrevues, nous avons décidé de nommer ces catégories de critères de niveau 1 des « pôles de décision ». Ces pôles décisionnels sont présentés sur la Figure 3.3.

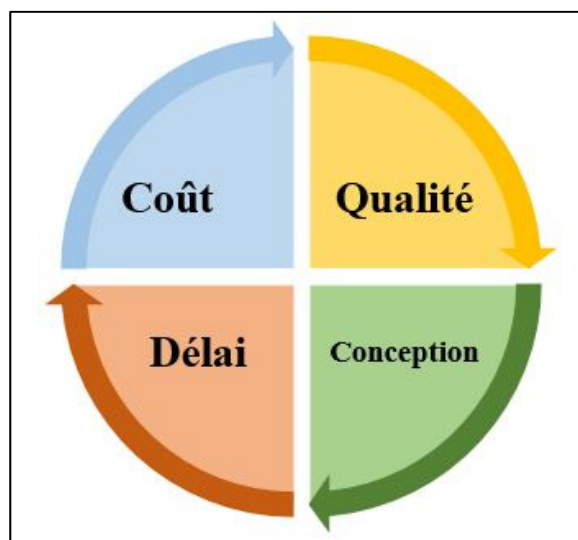


Figure 3.3 Pôles de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements

Ce diagramme d'affinité a également permis d'identifier 8 catégories de critères de sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de niveau 2. Les 8 catégories que nous avons identifiées sont :

1. le coût opérationnel de fabrication direct,
2. le coût opérationnel de fabrication indirect,
3. le coût lié au cycle de vie produit,
4. la qualité liée à l'apparence/dimensions,
5. la qualité liée aux propriétés mécaniques,

6. la qualité liée à la performance,
7. la catégorie de conception,
8. la catégorie de délai.

Nous avons veillé à suivre la saturation des critères de sélection identifiés lors de ces entrevues.

### **3.2.3 Étude de la saturation des critères**

Afin de qualifier les données collectées lors des entrevues, un indicateur a été mis en place. Il s'agit de mesurer le nombre de critères identifiés lors de chacune des entrevues et de le représenter de façon chronologique sur des graphes présentés de la Figure 3.4 à la Figure 3.9. Le fait de représenter sous forme chronologique l'évolution du nombre de critères identifiés entre les entrevues permet d'appliquer un principe de saturation de ces critères. Il est ainsi possible d'identifier quel niveau d'information est confirmé et quelles données demandent encore de sonder l'industrie.

On remarque ainsi que le critère de saturation a été atteint pour :

- les 4 pôles de décision de niveau 1,
- les 8 catégories de critères,
- et pour les 44 critères (28 uniquement issus des entrevues et 16 critères communs entre la littérature et les entrevues) d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements identifiés ou confirmés lors des entrevues individuelles.

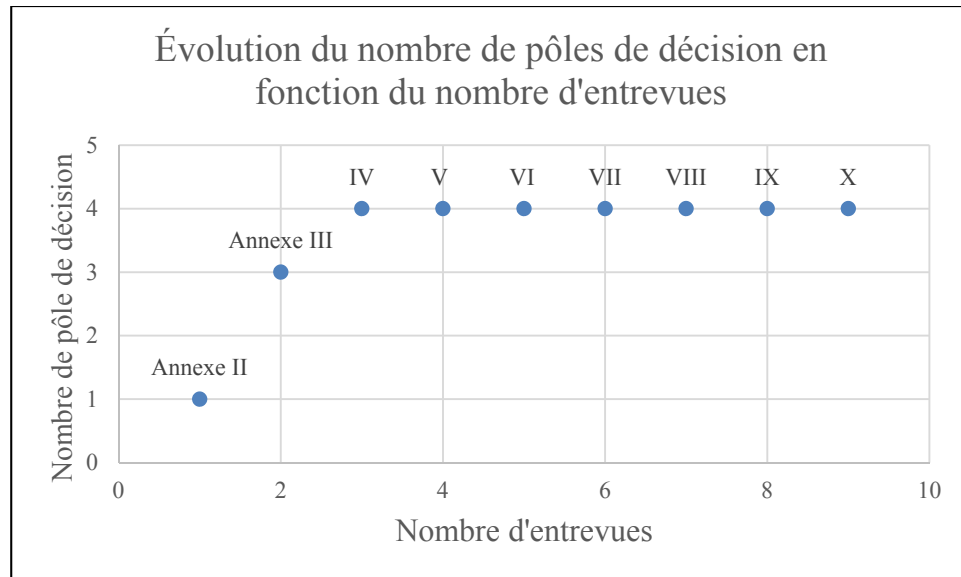


Figure 3.4 Évolution du nombre de pôles de décision en fonction du nombre d'entrevues

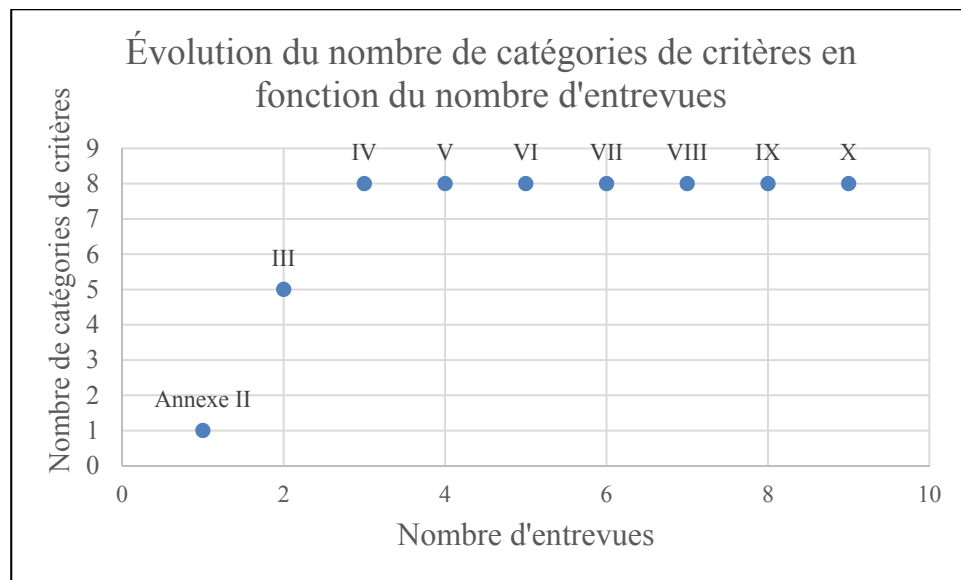


Figure 3.5 Évolution du nombre de catégories de critères en fonction du nombre d'entrevues

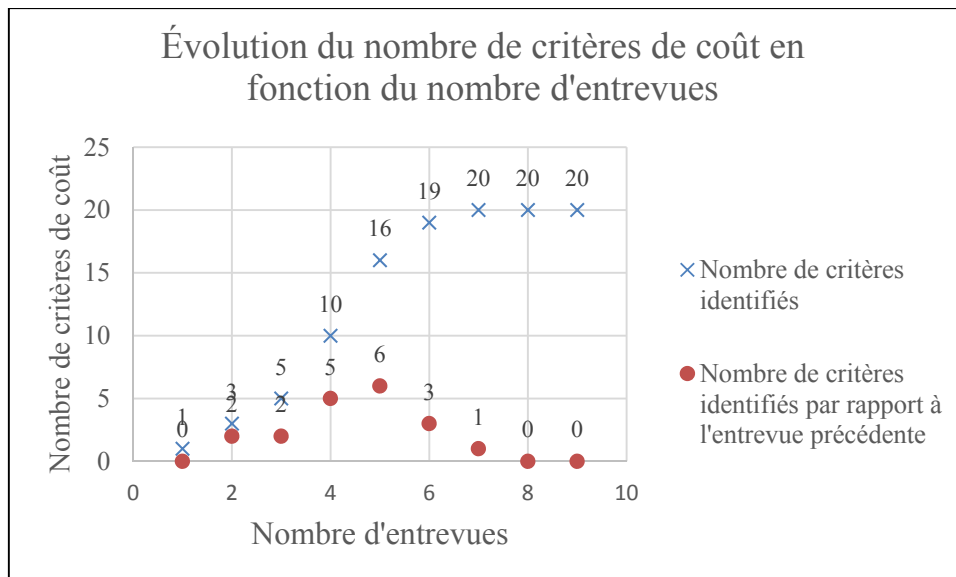


Figure 3.6 Évolution du nombre de critères de coût en fonction du nombre d'entrevues

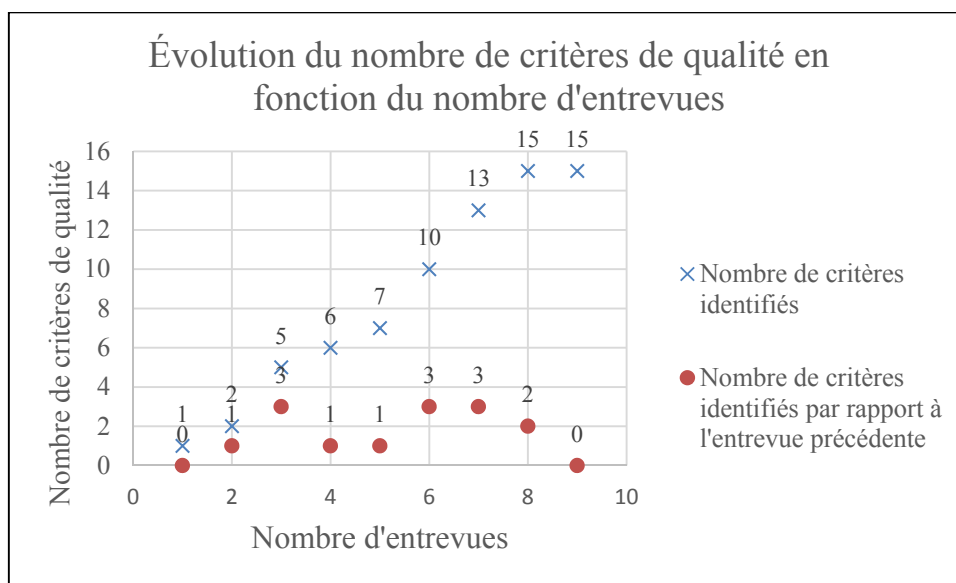


Figure 3.7 Évolution du nombre de critères de qualité en fonction du nombre d'entrevues



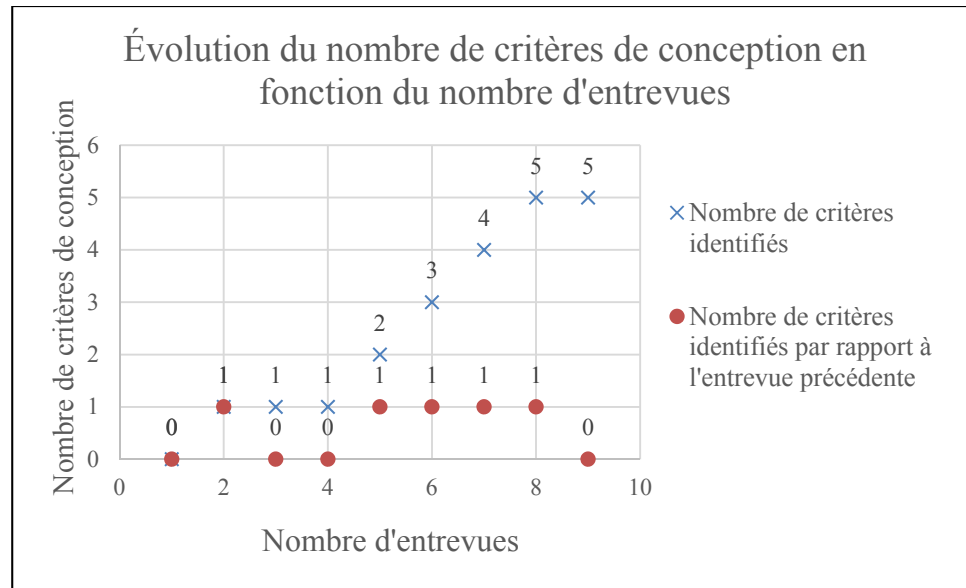


Figure 3.8 Évolution du nombre de critères de conception en fonction du nombre d'entrevues

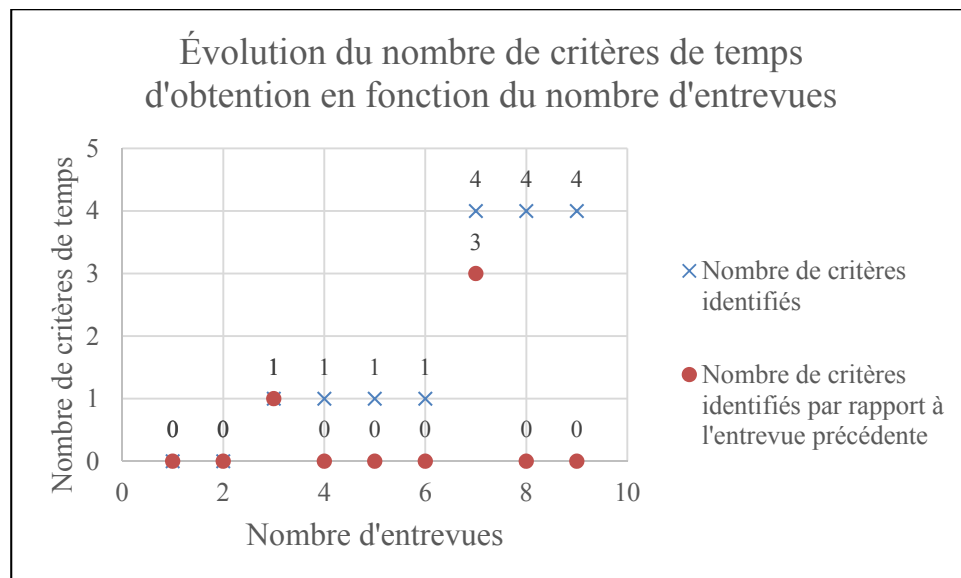


Figure 3.9 Évolution du nombre de critères de temps de conception en fonction du nombre d'entrevues

La section suivante présente la phase d'élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision sous forme d'une maison de la qualité.

### **3.3 Élaboration du cahier des charges de l'outil d'aide à la décision**

Cette phase présente le cahier des charges de l'outil d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. Ceci est un bilan à la fois des recommandations capturées lors de la revue de littérature de la section 1.3 du Chapitre 1 et des besoins d'aide à la décision déterminés lors de 3 ateliers de groupes ciblés réalisés en vue de concevoir une maison de la qualité.

Dans la section suivante, nous détaillons l'identification des besoins des utilisateurs industriels interrogés.

#### **3.3.1 Identification des besoins des utilisateurs**

Pour émettre cette suggestion, nous nous sommes appuyés sur la structure commune à haut niveau des outils d'aide à la décision présentés sur la Figure 1.10. Ils sont composés de trois composants indispensables :

- une interface utilisateur,
- un moteur de sélection,
- et des bases de données (BDD).

Nous avons ainsi réalisé une maison de la qualité au cours des 3 ateliers avec 4 des ingénieurs de Bombardier Aéronautique. Nous avons déterminé au cours de ces ateliers les besoins et leur niveau d'importance présenté dans le Tableau 3.1.

Le niveau d'importance est noté de 1 (pas important) à 5 (extrêmement important). Le détail de l'évaluation de ce niveau d'importance est présenté en légende avec la maison de la qualité.

Tableau 3.1  
Besoins des utilisateurs et importance relative

Catégories de besoins de l'outil	Besoins des utilisateurs	Importance
Interface utilisateur	Convivialité	2
	Facilité d'installation	2
	Facilité de mise à jour	3
Bases de données	Évaluer le coût de revient	5
	Évaluer la qualité	5
	Évaluer le délai d'obtention	5
	Comprendre les règles de conception	4
Moteur de sélection	Apprendre des études de cas	4

Les besoins qui sont extrêmement importants sont : la facilité de mise à jour, l'évaluation du coût de revient, l'évaluation de la qualité et l'évaluation du délai d'obtention de l'application. Ce constat est cohérent, car les besoins liés aux évaluations du coût de revient, de la qualité et du temps d'obtention sont le cœur de l'aide à la décision. Les besoins de compréhension des règles de conception et d'apprentissage des études de cas ont un score élevé de 4, car ces besoins renvoient à un besoin de capitalisation de la connaissance acquise à l'interne. Les trois autres besoins de convivialité, de facilité d'installation et de mise à jour de l'outil sont des besoins secondaires moins importants.

La section suivante présente la transcription de ces besoins industriels en spécifications techniques.

### 3.3.2 Transcription des besoins en spécifications techniques

Nous avons pu, pour faire suite à la création de cette liste de besoins, les transcrire en spécifications techniques présentées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2  
Liste des spécifications techniques

Caractéristiques	Définitions
<b>Besoin 1</b>	<b>Convivialité</b>
<b>Spécification technique 1</b>	Temps de prise en main
<b>Cible 1</b>	1 heure
<b>Remarque 1</b>	Le temps de prise en main permet d'évaluer si toutes les informations sont présentées de telle sorte à ce que l'utilisateur prenne en main facilement l'outil.
<b>Besoin 2</b>	<b>Facilité d'installation</b>
<b>Spécification technique 2</b>	Temps de configuration
<b>Cible 2</b>	1 heure
<b>Remarque 2</b>	Le temps de configuration est garant de la facilité d'installation de l'outil.
<b>Besoin 3</b>	<b>Facilité de mise à jour</b>
<b>Spécification technique 3</b>	Temps de mise à jour
<b>Cible 3</b>	10 minutes
<b>Remarque 3</b>	Le temps de mise à jour permet de savoir si l'utilisateur doit lui-même mettre à jour le système ou si ces mises à jour lui sont suggérées.
<b>Besoin 4</b>	<b>Évaluer le coût de revient</b>
<b>Spécification technique 4</b>	Couverture des catégories du coût de revient
<b>Cible 4</b>	Toutes les catégories de critères de coûts sont prises en compte
<b>Remarque 4</b>	L'évaluation du coût de revient est fonction de la couverture des catégories de critères de coûts que l'outil met en œuvre.
<b>Besoin 5</b>	<b>Évaluer la qualité</b>
<b>Spécification technique 5</b>	Couverture des catégories de la qualité
<b>Cible 5</b>	Toutes les catégories de critères qualité sont prises en compte
<b>Remarque 5</b>	L'évaluation de la qualité est fonction de la couverture des catégories de critères de qualité que l'outil met en œuvre.
<b>Besoin 6</b>	<b>Évaluer le délai d'obtention</b>

Caractéristiques	Définitions
<b>Tableau 3.2 (suite)</b>	
<b>Spécification technique 6</b>	Couverture des catégories de délai d'obtention
<b>Cible 6</b>	Toutes les catégories de critères de délai d'obtention sont prises en compte
<b>Remarque 6</b>	L'évaluation du délai d'obtention est fonction de la couverture des catégories de critères de délai d'obtention que l'outil met en œuvre.
<b>Besoin 7</b>	<b>Comprendre les règles de conception</b>
<b>Spécification technique 7</b>	Couverture des catégories de règles de conception
<b>Cible 7</b>	Analyser l'application à réaliser directement sur le modèle CAO
<b>Remarque 7</b>	La compréhension des règles de conception est fonction du niveau d'information en matière de règles de conception des technologies de FA.
<b>Besoin 8</b>	<b>Apprendre des études de cas</b>
<b>Spécification technique 8</b>	Niveau d'exploitation des études de cas
<b>Cible 8</b>	Les études de cas influent directement dans la prise de décision
<b>Remarque 8</b>	L'apprentissage des études de cas est fonction du niveau d'exploitation des études de cas qui sont capitalisées dans l'outil.

Cette troisième et dernière section présente la maison de la qualité que nous avons bâtie à partir des besoins industriels identifiés et de leurs transcriptions en spécifications techniques.

### 3.3.3 Construction d'une maison de la qualité

À partir de ces deux listes, nous avons été en mesure de construire la maison de la qualité présentée sur la Figure 3.10. On remarque que le niveau d'exploitation des études de cas est la spécification technique la plus importante avec 30% d'importance relative.

On retrouve ensuite les trois spécifications techniques de couverture des catégories du coût de revient, de la qualité et du délai d'obtention des applications avec un score de 13% d'importance relative. On constate que la spécification technique de couverture des

catégories de règles de conception est au cinquième rang avec 11%. Les trois dernières spécifications techniques de temps de mise à jour, de prise en main et de configuration arrivent en six, sept et huitième position avec des scores respectifs de 8%, 6% et 5% d'importance relative.

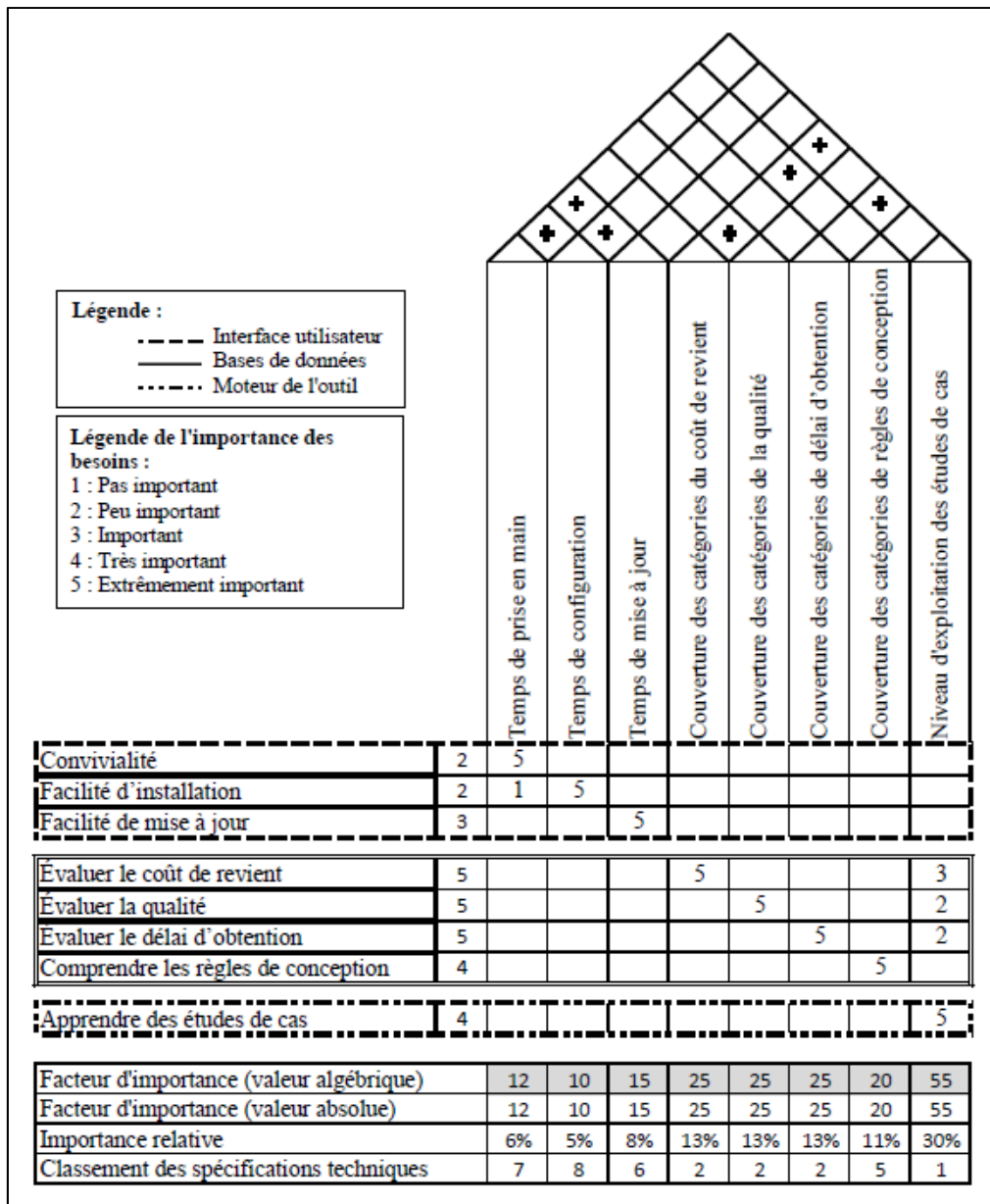


Figure 3.10 Maison de la qualité de l'outil d'aide à la décision

Nous avons encadré différemment les trois catégories de besoins qui structurent les choix de conception des outils : l'interface utilisateur en trait pointillé, les bases de données en double trait et le moteur de l'outil en trait discontinu.

Toutes les suggestions de concepts qui suivent sont en accord avec la maison de la qualité présentée Figure 3.10. Nous avons ainsi mis en œuvre ces spécifications techniques au sein de 3 suggestions de concepts d'outils d'aide à la décision.

### **3.4 Suggestion de concepts d'outils d'aide à la décision**

Nous avons ainsi suggéré trois concepts d'outils d'aide à la décision conformément au cahier des charges établi précédemment. Cette phase a été effectuée conjointement avec 2 ingénieurs de Bombardier Aéronautique qui ont contribué à jalonner le développement des trois outils et de vérifier que ceux-ci est conforme à leurs attentes. Le premier outil est un outil réalisé sous Microsoft Excel<sup>®</sup>. Le second a été réalisé sous Microsoft Access<sup>®</sup>. Et enfin, le dernier outil a été développé comme une plateforme internet, avec un outil de sélection et d'apprentissage statistique nommé RapidMiner<sup>®</sup>.

La structure de ces outils reste conforme aux outils identifiés dans la littérature et respecte donc la structure à haut niveau présenté sur la Figure 1.10 du Chapitre 1.

#### **3.4.1 Outil n°1 Microsoft Excel<sup>®</sup>**

##### **Principe de fonctionnement**

Le premier outil conçu est un outil développé sous Microsoft Excel<sup>®</sup>. Il est présenté en vidéo à cette adresse : <http://opn.to/a/8zEkr>. Cette première version a permis de mettre en lumière les possibilités offertes à l'utilisateur en termes d'aide à la décision discriminante. Afin de comprendre le fonctionnement de cet outil, une étude cas a été réalisée avec la base de données qu'il a été possible de construire à partir des données collectées lors d'un cours de mécanique de l'École de technologie supérieure de Montréal. L'étude cas réalisée correspond au choix par l'utilisateur de technologies dont l'enveloppe ne dépasse pas 100 mm par 100

mm par 100 mm. Le mécanisme de choix préférentiel de technologies correspond à l'élimination tour à tour de façon discriminante, c'est-à-dire par comparaison aux caractéristiques des technologies présentes dans la base de données. L'utilisateur obtient ainsi soit une liste de technologies solutions sans classement préférentiel de ces technologies, soit aucun résultat si la discrimination est trop importante. L'ensemble du code source de cet outil est disponible dans l'Annexe XI.

### Interface utilisateur

Dans un premier temps, l'utilisateur doit se connecter avec son profil d'utilisateur afin que les demandes qui sont effectuées dans l'outil soient associées à son profil. Cela permet par la suite aux autres utilisateurs de savoir qui a utilisé l'outil.

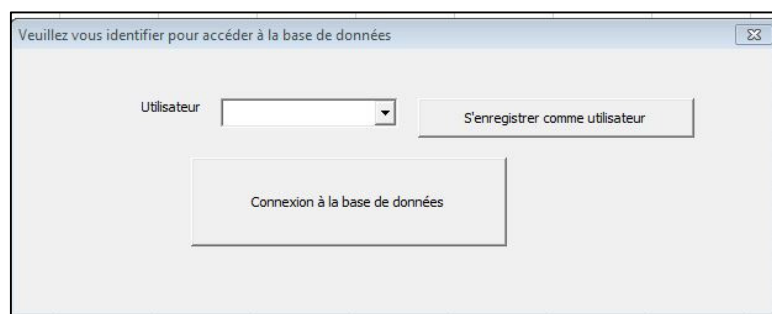
The screenshot shows a window titled "Veuillez vous identifier pour accéder à la base de données". It contains a label "Utilisateur" next to a dropdown menu. To the right of the dropdown is a button labeled "S'enregistrer comme utilisateur". Below these elements is a large button labeled "Connexion à la base de données".

Figure 3.11 Page de connexion des utilisateurs

L'utilisateur peut également s'enregistrer s'il ne fait pas partie de la base de données comme le présente la Figure 3.12.

The screenshot shows a window titled "Ajouter un commanditaire". It contains a label "Nom complet" next to a text input field. Below the input field are two buttons: "S'enregistrer dans la BDD" on the left and "Retour au menu" on the right.

Figure 3.12 Page d'enregistrement des utilisateurs



L'utilisateur accède ensuite à un menu qui lui permet de sélectionner parmi les différentes fonctionnalités offertes par l'outil. En effet, l'utilisateur a le choix entre trouver une technologie, un matériau et un post-traitement adapté à ses besoins, ajouter une technologie, ajouter un matériau ou ajouter un post-traitement.

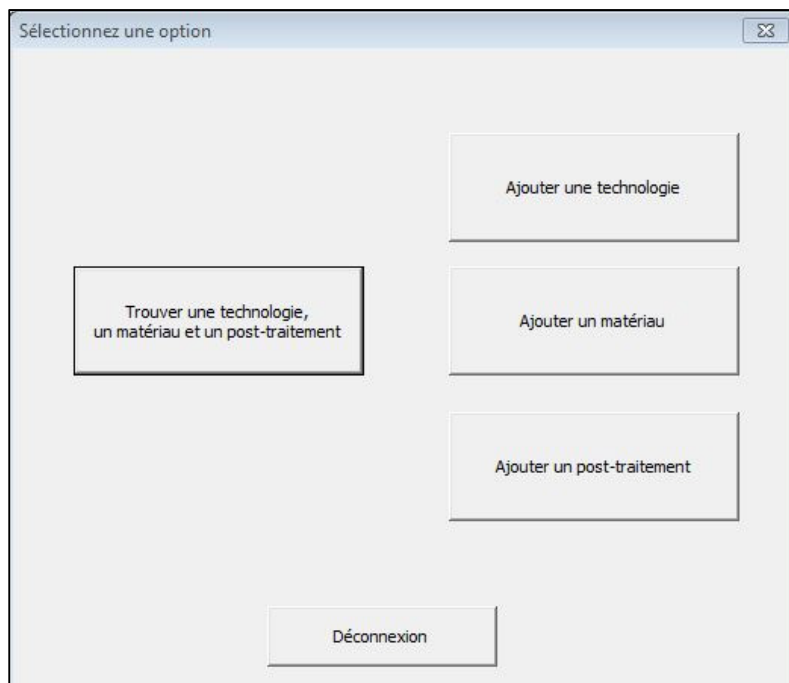


Figure 3.13 Menu des fonctionnalités utilisateur

### Base de données

Les bases de données qui ont été mises en œuvre dans cet outil sont directement liées à des critères de coûts opérationnels directs et indirects, ainsi que de qualité d'apparence de l'application réalisée pour la technologie. Les bases de données de cet outil sont également en lien avec des critères de propriétés mécaniques et de performance en ce qui concerne les matériaux.

The interface is titled "Aide au choix de la technologie de FA". It contains the following sections:

- Type d'application:** A dropdown menu and a button labeled "Ajouter Type Application".
- Technologie:** A dropdown menu.
- Coût (Cost):**
  - Longueur (mm): Text input
  - Largeur (mm): Text input
  - Hauteur (mm): Text input
  - Quantité de pièces: Dropdown menu
  - Post-traitement: Dropdown menu
- Qualité - Apparence (Quality - Appearance):**
  - Résolution (mm): Dropdown menu
  - Précision: Dropdown menu
  - Exactitude: Dropdown menu
  - Fin de surface (um): Dropdown menu
  - Tolérance (um): Dropdown menu
- Matériau (Material):**
  - Qualité - Propriétés mécaniques (Quality - Mechanical Properties):**
    - Résistance mécanique Rm (MPa): Text input
    - Limite d'élasticité Re (MPa): Text input
    - Allongement à la rupture A%: Text input
    - Striction à la rupture Z%: Text input
    - Propriétés viscoélastiques: Dropdown menu
    - Dureté: Text input
    - Fatigue: Text input
    - Déflexion thermique: Text input
    - Densité: Text input
    - Résistance diélectrique: Text input
  - Qualité - Performance (Quality - Performance):**
    - Réquis sanitaires: ☐
    - Résistance au feu: ☐
    - Résistance à la corrosion: ☐
    - Capacité d'absorption: Text input
  - Coût (Cost):**
    - Type de matériau: Dropdown menu
    - Volume de l'application (m3): Text input

Figure 3.14 Interface utilisateur de l'outil n°1 Microsoft Excel®

Lors des deux ateliers de groupes ciblés, des recommandations ont été émises par les ingénieurs de Bombardier Aéronautique pour les études de cas soient capitalisées dans l'outil. Ils ont également émis des réserves quant à l'utilisation de Microsoft Excel® pour la suite de la conception de l'outil d'aide à la décision, car des risques de conflits liés à la fragilité du code ont été constatés.

Le second outil qui a donc été développé grâce à l'outil Microsoft Access®.

### 3.4.2 Outil n°2 Microsoft Access®

#### Interface utilisateur

Par comparaison à l'outil n°1, la fonctionnalité que nous avons rajoutée concerne le « bilan des études de cas » comme retour d'expérience des utilisateurs. Les utilisateurs de l'outil ont la possibilité de retourner dans l'outil après avoir réalisé leur application avec la technologie, le matériau et le post-traitement proposé par l'outil et de livrer un retour d'expérience de cette étude de cas. L'intérêt est d'augmenter le niveau d'informations capitalisées au niveau des études de cas et ainsi de proposer une expérience d'aide à la décision à la fois basée sur des critères de sélection liés aux technologies, aux matériaux et aux post-traitements, mais également aux études de cas déjà réalisées.

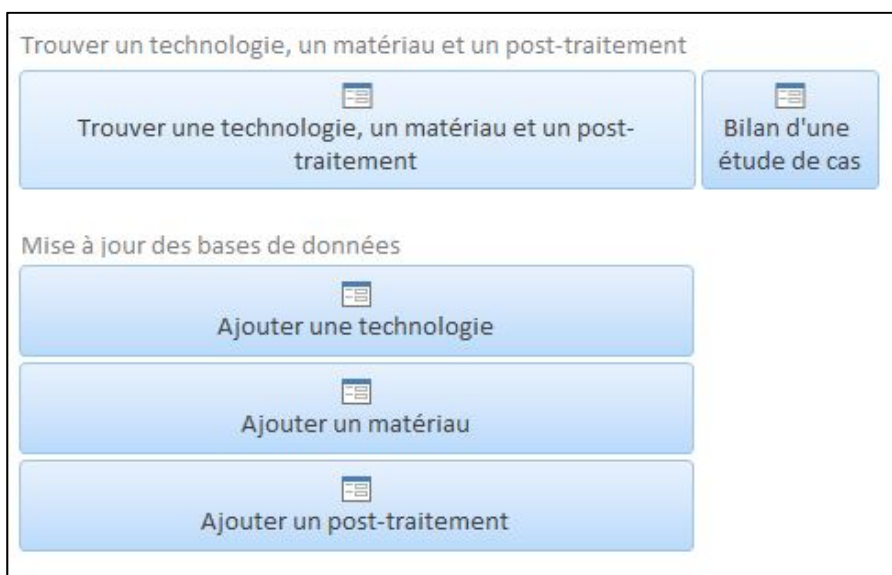


Figure 3.15 Interface utilisateur de l'outil n°2 Microsoft Access®

#### Base de données

La différence concrète par rapport à l'outil n°1 est l'ajout d'une base de données d'études de cas liées au choix de l'utilisateur après la suggestion de triplets de technologies, de matériaux et de post-traitements.

### Principe de fonctionnement

Le second outil développé sous Microsoft Access<sup>®</sup> est présenté dans la vidéo à cette adresse : <http://opn.to/a/e4UEp>. L'étude de cas réalisée dans cet outil est différente. L'utilisateur s'enregistre, il sélectionne ensuite l'option de trouver des technologies, matériaux et post-traitements adaptés. Puis il rentre ses critères de recherche qui sont dans cet exemple l'enveloppe de fabrication de 1000 mm par 1000 mm par 1000 mm. Le résultat du champ des possibles apparaît en temps réel grâce à une requête Microsoft Access<sup>®</sup>. L'utilisateur va ensuite choisir une technologie et réalise son étude de cas à l'interne avec cette technologie. L'outil lui permet dans un second temps de livrer un retour d'expérience grâce à la fonctionnalité « bilan des études de cas ». L'utilisateur rentre alors le nom de la technologie employée, et le succès ou succès mitigé des catégories de critères de coûts, de qualité, de conception et de délai. Cela permet de lier les caractéristiques de la pièce réalisée à la technologie sélectionnée et de capitaliser des études de cas en répertoriant les succès et succès mitigés. L'ensemble du code source de cet outil est disponible en Annexe XII.

Cette proposition a été bien accueillie par les ingénieurs de Bombardier Aéronautique qui ont insisté sur la nécessité d'inclure les études de cas au cœur de l'aide à la décision. En effet, dans la pratique, ils s'appuient sur l'expérience capitalisée lors de leurs études de cas précédentes pour prendre des décisions et un outil leur facilitant cette tâche aurait un grand intérêt pour eux.

Nous avons ainsi souhaité proposer un outil mettant en œuvre un outil d'apprentissage statistique RapidMiner<sup>®</sup>. De plus, nous avons souhaité basculer sur un outil en ligne pour proposer une expérience différente, mais l'interface aurait très bien pu être réalisée à nouveau sous Microsoft Access<sup>®</sup>, en complément du moteur de décision RapidMiner<sup>®</sup>. Cet outil a été sélectionné sur la base de la possibilité d'accès à une license étudiante.

### 3.4.3 Outil n°3 en ligne RapidMiner®

#### Interface utilisateur

Les langages de programmation de HTML5 (*Hyper Text Markup Language*) et CSS3 (*Cascading Style Sheets*) permettent d'obtenir rapidement une interface utilisateur conviviale. Depuis l'invention du langage HTML en 1991 par Tim Berners-Lee et du CSS en 1996, ces deux langages complémentaires, garants pour le premier du contenu à afficher et pour le second de la mise en page de ce contenu, sont devenus la base de conception des sites dits « à contenu adaptable » (Inconnu, 2016a). Cette considération indique que tout le format du contenu s'adapte au format de l'appareil utilisé (téléphone intelligent, tablette, navigateur internet).

Nous avons souhaité proposer cette expérience aux utilisateurs afin d'augmenter la convivialité de l'interface.

Figure 3.16 Interface utilisateur de l'outil en ligne n°3 RapidMiner®

#### Bases de données

Les formulaires qui ont été construits pour la capitalisation des informations ont été réalisés grâce à une solution intégrée de formulaire Wufoo® (Inconnu, 2016c). Cette solution est

intéressante, car elle permet d'intégrer rapidement des champs sans avoir à coder et à créer les liens avec les bases de données comme dans l'outil n°2 sous Microsoft Access®.

Figure 3.17 Fonctionnalité de création de formulaires Wufoo® (Inconnu, 2016c)

### Moteur de l'outil

A la différence des deux premiers outils, cet outil fonctionne non pas uniquement avec des bases de données de connaissance, mais intègre une solution d'apprentissage statistique nommée RapidMiner® (Inconnu, 2016b). Cette solution permet d'interpréter les études de cas qui sont capitalisées dans l'outil et de proposer des choix de technologies, de matériaux et de post-traitements en accord avec le nombre de succès ou de succès mitigés de ces triplets selon l'étude de cas en cours.

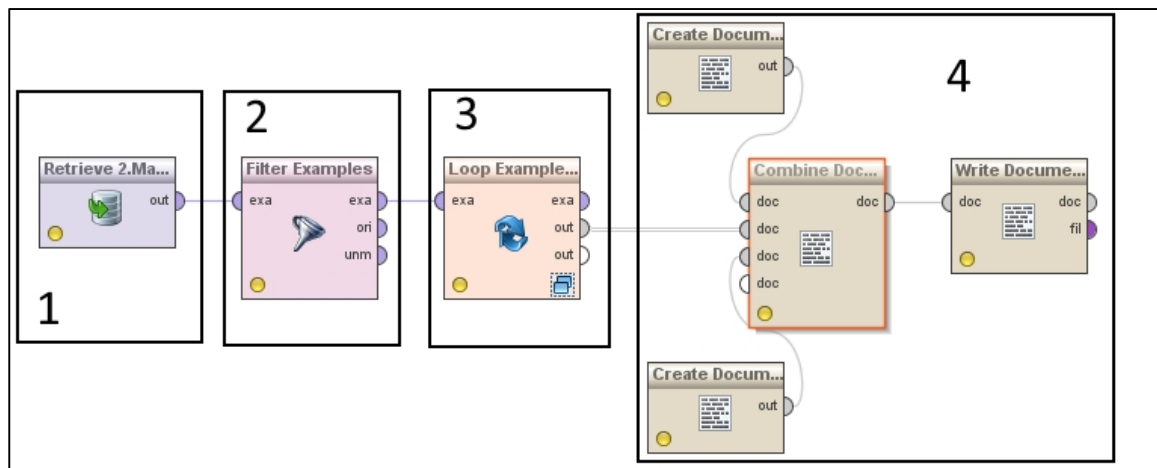


Figure 3.18 Modèle d'apprentissage statistique RapidMiner®

La solution RapidMiner® est ainsi capable :

- 1) de télécharger les bases de données stockées grâce à la fonction *Retrieve* à partir de la plateforme Wufoo®,
- 2) de traiter les demandes des utilisateurs en ligne grâce à la fonction *filter*,
- 3) de sélectionner des paramètres (nom de la technologie, nom des matériaux, caractéristiques techniques, etc.) issus de chacune des possibilités trouvées grâce à la fonction *loop example*,
- 4) et de générer des pages HTML grâce aux fonctions *combine documents*, *create documents* et *write documents*.

Ces pages HTML sont ensuite téléversées sur le serveur du site internet de l'outil en ligne. La Figure 3.19 présente une page internet générée en HTML en lien avec une demande d'un utilisateur. Celle-ci reprend par exemple les machines qui ont été identifiées comme pouvant répondre à des critères tels qu'une enveloppe de fabrication minimale de 350x750x550mm. Cette figure présente le concept de solution de présentation qu'il est possible d'obtenir avec l'outil que nous avons réalisé.

AMDSS - RAPIDMINER

MAKE A DEMAND CONTACT US

MODÈLE : IPRO 9000 XL	MODÈLE : 850-R	MODÈLE : R7200
MACHINE : IPRO	MACHINE : LENS	MACHINE : SONICLAYER
FABRICANT : 3DSYSTEM	FABRICANT : OPTOMECH	FABRICANT : FABRISONIC
PROCESS : SLA	PROCESS : LENS	PROCESS : ?
AVERAGE COST PER PART : ?	AVERAGE COST PER PART : ?	AVERAGE COST PER PART : ?
LENGTH (MM) : 350	LENGTH (MM) : 350	LENGTH (MM) : 350
WIDTH (MM) : 750	WIDTH (MM) : 900	WIDTH (MM) : 1828
HEIGHT (MM) : 550	HEIGHT (MM) : 900	HEIGHT (MM) : 900

Figure 3.19 Page HTML des résultats générée par RapidMiner®

### Principe de fonctionnement

Ce troisième et dernier outil conçu en HTML et sous l'outil d'apprentissage statistique RapidMiner® est présenté dans la vidéo disponible à cette adresse : <http://opn.to/a/cm6RQ>. Pour cet outil la présentation reprend le même principe que les deux premiers. L'utilisateur lance son navigateur internet, il se connecte à la plateforme en ligne (disponible à l'adresse <http://opn.to/a/NcpR3>). Il a ensuite à disposition le formulaire de sélection de critères discriminants en termes de technologies, de matériaux et de post-traitements. Il envoie une requête au serveur. La demande issue du formulaire est ensuite récupérée par l'outil d'apprentissage statistique RapidMiner®. Cet outil vient ensuite identifier des technologies disponibles (car nous n'avons pas implémenté de bases de données de matériaux ni de post-traitements). Une page HTML est alors directement générée par le système par agrégation des caractéristiques de chacune des technologies identifiées comme possible de réponse aux besoins de l'utilisateur. Le champ des possibles est déterminé de façon discriminante à partir des choix des utilisateurs et classé de façon préférentielle en fonction du nombre de succès et succès mitigé des études de cas capitalisées avec ces technologies. L'utilisateur obtient ainsi une page HTML résultante qui lui présente ces technologies. Il peut ainsi en sélectionner une et réaliser son étude de cas avec.



Dans un second temps, il peut revenir sur la plateforme en ligne et livrer un retour d'expérience avec cette technologie. Il peut ainsi indiquer si cette étude de cas avec la technologie qu'il a choisi est un succès ou un succès mitigé. Cela permet à RapidMiner® à la fois de nourrir le moteur de sélection préférentiel de technologies et de capitaliser les études de cas en vue d'analyser les causes de succès et de succès mitigés. Cela pourrait permettre dans un troisième temps d'identifier des technologies pouvant répondre aux besoins des utilisateurs non plus uniquement sur des critères discriminants, mais également, en identifiant des études de cas similaires, d'identifier des technologies qui par le passé ont eu un grand nombre de succès. L'ensemble de l'architecture de cet outil et du code source sont disponibles en Annexe XIII.

Nous avons soumis ces concepts d'outils d'aide à la décision à une série de pointages lors de 6 ateliers de groupes ciblés (2 ateliers pour chaque outil développé). Dans la section suivante, nous présentons l'évaluation de ces trois concepts d'outils au travers d'un barème lié aux spécifications techniques afin de vérifier jusqu'à quel point ces outils répondent aux besoins des utilisateurs.

### **3.5 Choix de solution parmi les concepts d'outils conçus**

Pour réaliser cette évaluation, nous avons mis en place un barème d'évaluation présenté dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3  
Barème d'évaluation des spécifications techniques

Spécifications techniques	Objectif	Cible	Cote	Performance
Temps de prise en main (Tpm)	Diminuer	1h	3	$T_{pm} \leq 1h$
			2	$1h < T_{pm} \leq 4h$
			1	$4h < T_{pm} \leq 1 \text{ jour}$
			0	$1 \text{ jour} < T_{pm}$
Temps de configuration (Tc)	Diminuer	1h	3	$T_c \leq 1h$
			2	$1h < T_c \leq 4h$
			1	$4h < T_c \leq 1 \text{ jour}$
			0	$1 \text{ jour} < T_c$
Temps de mise à jour (Tmaj)	Diminuer	10 min	3	$T_{maj} \leq 10 \text{ min}$
			2	$10 \text{ min} < T_{maj} \leq 30 \text{ min}$
			1	$30 \text{ min} < T_{maj} \leq 2h$
			0	$2h < T_{maj}$
Couverture des catégories de coût de revient	Augmenter	Toutes les catégories de critères de coûts sont couvertes	3	Les catégories de coûts opérationnels directs, indirects et de cycle de vie produit
			2	Les catégories de coûts opérationnels directs et indirects
			1	Seule la catégorie de coûts opérationnels directs
			0	Aucun critère de coût n'est pris en compte
Couverture des catégories de la qualité	Augmenter	Toutes les catégories de critères de qualité sont couvertes	3	Les catégories d'apparence, de propriétés mécaniques, de performance et des retours d'expériences sur les études de cas
			2	Les catégories d'apparence, de propriétés mécaniques et de performance
			1	Les catégories d'apparence et de propriétés mécaniques
			0	Aucune catégorie de qualité

Spécifications techniques	Objectif	Cible	Cote	Performance
<b>Tableau 3.3 (suite)</b>				
Couverture des catégories de délai d'obtention	Augmenter	Toutes les catégories de critères de délai d'obtention sont couvertes	3	Les catégories de délai d'obtention et un retour d'information des études de cas
			2	Les catégories de temps de fabrication et de la chaîne des fournisseurs
			1	La catégorie de temps de fabrication
			0	Aucun critère de délai d'obtention
Couverture des catégories de règles de conception	Augmenter	Analyser l'application à réaliser directement sur le modèle CAO	3	L'outil est directement connecté à un logiciel de CAO qui analyse les difficultés de fabrication de la pièce.
			2	Des études de cas avec retour d'expérience présentent les difficultés de conception
			1	Des règles de conception sont indiquées selon les technologies
			0	Aucune règle de conception
Niveau d'exploitation des études de cas	Augmenter	Les études de cas influent directement dans la prise de décision	3	Les études de cas servent au classement des technologies, des matériaux et des post-traitements.
			2	On peut consulter des études de cas et le retour d'expérience associé
			1	On peut consulter le nom des personnes ayant réalisé des études de cas
			0	Aucune étude de cas présente

Les utilisateurs ont évalué ces spécifications techniques grâce à ce barème dans le Tableau 3.4. On constate alors que l'outil ayant obtenu le pointage le plus important est l'outil n°3 avec un score de 2,73 sur 3. Ceci est principalement dû à l'exploitation des études de cas

capitalisées. En effet, le niveau d'exploitation des études de cas, avec un poids de 30%, était classé au premier rang des spécifications techniques dans la maison de la qualité. On constate également que le faible temps de mise à jour et la convivialité de l'outil sont des spécifications qui ont obtenu le score maximum de 3.

Une des raisons de l'augmentation constante du pointage d'un outil à l'autre est le fait de la chronologie de développement de ces outils dans le temps. En effet, les outils ont été conçus les uns après les autres et dans ce processus itératif, la cote a naturellement augmenté du fait de l'implémentation de fonctionnalités en lien avec les besoins des potentiels utilisateurs interrogés. La Figure 3.20 présente cette chronologie et l'évolution du pointage d'un point de vue temporel.

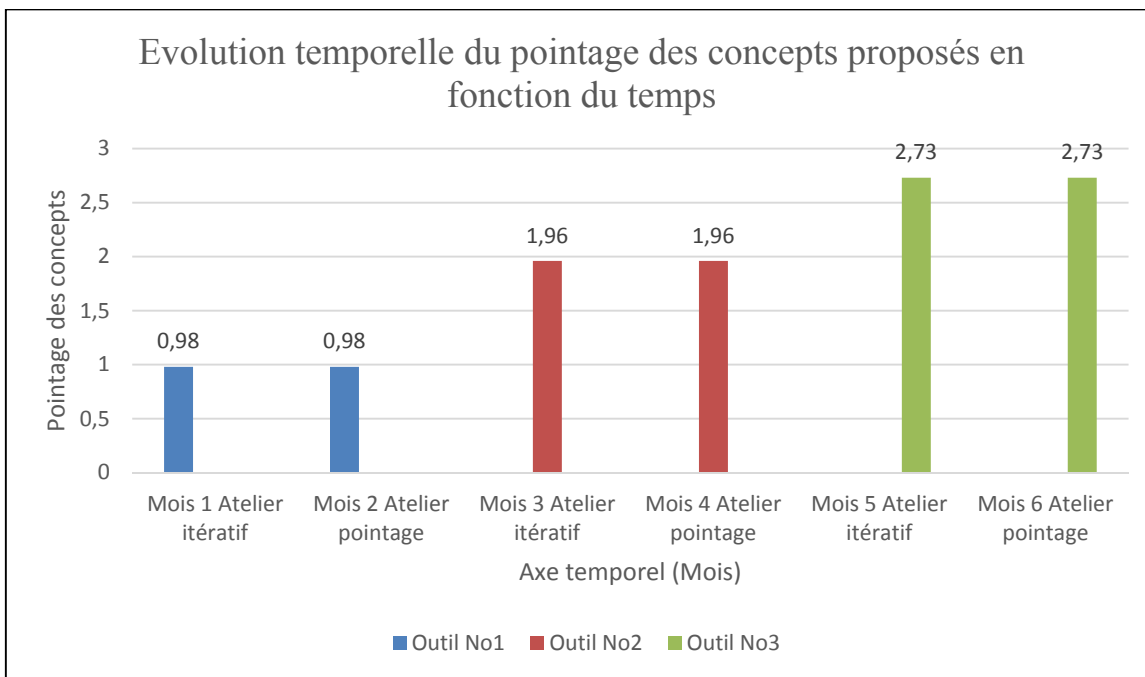


Figure 3.20 Évolution du pointage des concepts proposés en fonction du temps

Le tableau suivant présente l'ensemble du pointage réalisé.

Tableau 3.4  
Pointage des spécifications techniques

Outil d'aide à la décision	Poids	Outil n°1 : Microsoft Excel®	Outil n°2 : Microsoft Access®	Outil en ligne n°3 : RapidMiner®
Temps de prise en main	6%	2	2	3
Temps de configuration	5%	2	2	1
Temps de mise à jour	8%	1	2	3
Couverture des catégories de coût de revient	13%	1	2	3
Couverture des catégories de la qualité	13%	1	2	3
Couverture des catégories de délai d'obtention	13%	1	2	3
Couverture des catégories de règles de conception	11%	0	2	2
Niveau d'exploitation des études de cas	30%	1	2	3
	<b>Total (sur 3)</b>	<b>0,98</b>	<b>1,96</b>	<b>2,73</b>

Le chapitre suivant présente une discussion concernant les résultats qui ont été obtenus dans cette étude.



## CHAPITRE 4

### DISCUSSION

Ce chapitre a pour objectif de discuter des choix de cette étude que ce soit en ce qui concerne la méthodologie ou au niveau des données ciblées et des suggestions de conception qui ont été émises.

Ce chapitre présente des discussions concernant :

- les limitations globales de cette étude,
- la méthodologie de la phase d'analyse des critères de décision industrielle,
- les limitations de la conception des outils.

#### 4.1 Les limitations globales de l'étude

La limitation principale de cette étude est le besoin de validation de la performance des outils développés. En effet, bien qu'un effort d'évaluation au travers d'un pointage des trois outils ait été conduit, cette étude n'a pas eu l'opportunité de développer un outil au complet et de le tester au travers d'études de cas réelles.

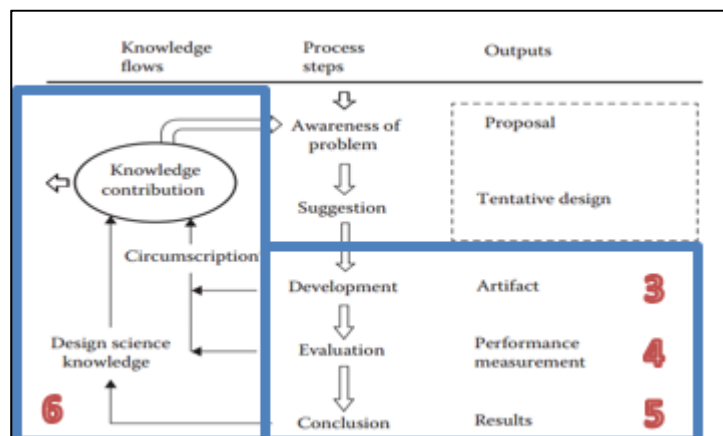


Figure 4.1 Limitations liées à la science de la conception tirée de Vaishnavi et Kuechler (2015)

La limitation induite est que les outils développés restent à l'état de preuve de concept. Le travail restant consiste à repartir du cahier des charges de cette étude, d'utiliser le pointage effectué pour se concentrer sur les spécifications techniques d'importance et créer la structure d'un artefact réunissant tous ces aspects.

#### **4.2 Méthodologie de la phase d'analyse des critères de décision industrielle**

La mise en œuvre d'entrevues individuelles s'est avérée très efficace au début de la phase d'analyse du besoin industriel, car elle a permis de mettre en évidence rapidement un nombre important de critères de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. Cependant, un des biais de l'emploi des entrevues individuelles est que le participant, alors positionné comme expert, livre de l'information sans être en mesure de donner un ordre d'importance des critères livrés.

Pour la suite de cette étude, il est recommandé de collecter les données par le biais de groupes cibles afin de confirmer le niveau d'importance de l'information livrée (calculé à partir de la fréquence d'apparition des critères par exemple). Cela permettra de déterminer le niveau d'importance relatif des informations livrées dans la prise de décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA. Cela permettra également de faciliter le travail de regroupement au sein du diagramme des affinités que nous avons bâti.

De plus, les entrevues semi-dirigées conduites n'ont pas été soumises à une expertise externe, ce qui entache la fiabilité des conclusions émises bien que les participants aient été recontactés a posteriori pour confirmer la retranscription et le résultat des entrevues.

A l'avenir, il serait préférable après chaque entrevue semi-dirigée réalisée, de livrer les données collectées à un expert externe (un professeur de recherche ou expert du domaine par exemple) afin que l'analyse des données ne soit pas biaisée.



### **4.3 Limitation de conception des outils**

On présente ici toutes les limites que les outils développés possèdent du fait des choix de conception de ceux-ci. Une des premières limites est liée la maison de la qualité construite en vue de la conception des outils d'aide à la décision. En effet, celle-ci a été réalisée avec les mêmes industriels que ceux qui ont mené l'évaluation des outils conçus au travers du pointage des outils développés. Cela peut constituer un biais dans le sens où ces utilisateurs s'attendaient à voir les modifications et n'ont pas évalué de façon indépendante les outils réalisés.

#### **4.3.1 Interface utilisateur**

##### **La propriété intellectuelle et le contrôle à l'exportation**

La notion de propriété intellectuelle de l'information transmise à un outil en ligne est le frein principal au choix de l'outil en ligne n°3. En effet, lorsqu'il est question de sécurité de l'information au sein d'une industrie de pointe comme l'aéronautique, la moindre information transmise est soumise à un contrôle afin de protéger la propriété intellectuelle de cette information de la part de l'entreprise. Un tel outil en ligne ne peut donc pas être envisagé en dehors d'un intranet si les informations demandées à l'utilisateur sont trop précises et pourraient laisser la possibilité à un tiers d'intercepter des données au cours de la communication avec le serveur.

#### **4.3.2 Bases de données**

Dans les outils n°2 et n°3, des études de cas peuvent être référencées dans l'outil. Cependant, il faut être en mesure d'évaluer en quoi ces études de cas sont des références vis-à-vis de la FA et être en mesure d'identifier des similitudes avec l'étude de cas que l'utilisateur est en train de mener. Le système de base de connaissance, qui est utilisé dans les outils n°1 et n°2 ne permet pas d'implémenter cette fonctionnalité, car les critères de succès des cas d'étude dans l'industrie sont encore flous ou non divulgués. L'outil n°3 est un concept d'outil

utilisant un système d'apprentissage statistique basé sur l'apprentissage des facteurs de succès ou de succès limités des cas d'étude menés par l'utilisateur de l'outil.

Pour guider l'utilisateur dans le choix de ses études de cas, des modèles permettraient de classer les études de cas réalisées en fonction de critères de classement à haut niveau tel que présenté sur la Figure 4.2. Toutes les applications sont alors classées suivant ces trois axes de complexité, de personnalisation et de quantité de pièces produites.

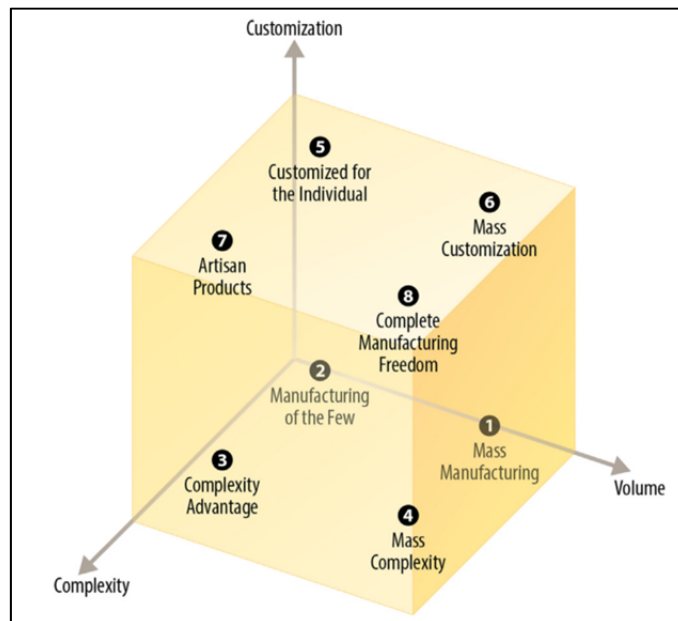


Figure 4.2 Modèle trois axes de classement  
des produits manufacturiers  
tirée de Conner *et al.* (2014)

Ce classement permettrait d'éliminer en amont du processus de sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA les applications pour lesquelles la FA n'a jamais fait ses preuves.

Le chapitre suivant est la conclusion de cette étude. Elle présente le bilan des besoins auxquels cette étude a répondu, les limitations et les recommandations pour des études futures.

## CONCLUSION

Dans le but d'accroître sa compétitivité sur le marché du secteur aéronautique, Bombardier Aéronautique souhaite trouver des technologies, des matériaux et des post-traitements de FA lui permettant de produire des pièces tout en réduisant ses coûts de production, le délai d'obtention des pièces ou en améliorant la conception des pièces produites.

Dans le cadre de cette étude, nous avons élargi ce problème au secteur aéronautique en allant interroger des industriels de diverses compagnies afin d'identifier des critères communs de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA au travers d'entrevues individuelles. La méthodologie proposée a permis d'identifier de nouveaux critères d'aide à la décision de coût, de conception, de qualité et de délais d'obtention qui n'étaient pas présents dans les outils d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA des études antérieures. Les critères identifiés ont été confirmés par les industriels interrogés grâce à un critère de saturation de ces critères et de confirmation a posteriori du déroulement des entrevues.

Nous avons ensuite réalisé un cahier des charges de l'outil d'aide à la décision en accord avec les besoins identifiés lors d'ateliers de groupes ciblés avec des ingénieurs de Bombardier Aéronautique. Nous avons pris le soin de transcrire ces besoins en spécifications techniques que nous avons mis en œuvre dans une maison de la qualité qui est la synthèse de ce cahier des charges.

Nous avons été en mesure de suggérer trois concepts d'outils d'aide à la décision à partir de ce cahier des charges. Le concept d'outil n°1 réalisé sous Microsoft Excel<sup>®</sup> permet d'effectuer une sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements sur la base de critères de sélection. Au travers de l'outil n°2 réalisé sous Microsoft Access<sup>®</sup>, nous avons introduit la capitalisation d'études de cas permettant, grâce à un système de consultation, de prendre des décisions sur l'expérience accumulée. Enfin, le concept d'outil n°3 en ligne associé au logiciel RapidMiner<sup>®</sup> a permis d'augmenter l'aide à la décision liée aux études de

cas capitalisée. En effet, nous avons pu proposer un concept d'outil proposant une sélection préférentiel de technologies, de matériaux et de post-traitements intégrant la notion de succès ou de succès mitigé de ces études de cas. Le processus itératif de suggestion de ces concepts d'outils d'aide à la décision a été réalisé avec les ingénieurs de Bombardier Aéronautique pour diminuer les risques liés aux choix de conception que nous avons effectués.

Enfin, nous avons évalué les concepts d'outils conçus grâce à un pointage résultant de l'évaluation des spécifications techniques issues du cahier des charges. Le concept gagnant, selon les ingénieurs de Bombardier Aéronautique, est le concept d'outil d'aide à la décision n°3 en ligne et employant la solution d'apprentissage statistique RapidMiner®. Ce concept a su se distinguer par le niveau d'exploitation des études de cas capitalisées dans la sélection des technologies, des matériaux et des post-traitements.

### **Les contributions de la recherche**

Cette recherche a permis de générer les contributions suivantes :

- une typologie des critères de choix de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA issus du secteur aéronautique;
- l'élaboration d'un cahier des charges de l'outil d'aide à la décision en accord avec les lacunes des études antérieures (telles que la consultation de potentiel utilisateurs lors de son élaboration et la prise en compte d'études de cas dans le choix des technologies, des matériaux et des post-traitements par exemple) et les critères de décision industriels du secteur aéronautique;
- la suggestion de trois concepts d'outils d'aide à la décision;
- une évaluation des concepts d'outils d'aide à la décision au travers d'un pointage des spécifications techniques issues du cahier des charges conçu.

### **Les limitations de la recherche**

Cette recherche propose une suggestion d'outil d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des pièces de production en milieu aéronautique.

Les propositions suivantes indiquent des limitations de cette étude :

- les entrevues individuelles et les ateliers de groupes ciblés ont été limités à des industriels du secteur aéronautique et majoritairement en relation avec de la production de pièces. Cette étude est donc restreinte à de la suggestion de technologies, de matériaux et de post-traitements pour des industriels du secteur aéronautique en lien avec de la production de pièces;
- les entrevues semi-dirigées conduites n'ont pas été soumises à une expertise externe, ce qui entache la fiabilité des conclusions émises bien que les participants aient été recontactés a posteriori pour confirmer la retranscription et le résultat des entrevues;
- la maison de la qualité construite en vue de la conception des outils d'aide à la décision a été réalisée avec les mêmes industriels que ceux qui ont mené l'évaluation des outils conçus au travers du pointage des outils développés.

### **Les recommandations pour les recherches futures**

Les recommandations sont les suivantes :

- réaliser d'autres entrevues collectives et non plus individuelles avec des industriels du secteur aéronautique en vue de valider le niveau d'importance des critères d'aide à la décision. Cela permettra d'ajouter au critère de saturation une limite liée au niveau d'importance relative des critères d'aide à la décision;
- réaliser des entrevues individuelles et collectives avec des industriels d'autres secteurs d'activité et en lien avec de la fabrication de prototypes et d'outillages afin d'identifier des catégories de critères et des critères de décisions transverses aux différentes catégories d'applications et de domaines d'activité;
- développer un outil d'aide à la décision en accord avec la hiérarchisation de l'importance des critères identifiés lors d'entrevues collectives;
- détailler l'architecture des outils d'aide à la décision développés afin d'être en mesure d'établir des critères de performances des outils;
- évaluer la performance des outils développés au travers d'études de cas réels.



## ANNEXE I

### CHRONOLOGIE DES RÉFÉRENCES DE LA REVUE DE LITTÉRATURE DES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION DE TECHNOLOGIES, DE MATÉRIAUX ET DE POST-TRAITEMENTS DE FA

Cette annexe présente les références identifiées lors de la revue de littérature et présente les outils qui ont été étudiés dans ce mémoire.

Tableau-A I-1  
Revue des outils d'aide à la sélection de technologies, de matériaux  
et de post-traitements de FA

Année	Nom de l'outil	Référence	Prototypage rapide	Outillage rapide	Fabrication rapide	Sélection de procédés	Sélection de matériaux	Sélection de machines
1993	Programme de PR	(Hornberger)	x			x		
1996	Base de données des systèmes de PR	(Campbell et Bernie)	x				x	x
1996	Outil de sélection de PR	(Müller, Bauer et Klingenberg)	x				x	x
1997	Outil de conseil en PR	(Phillipson)	x					x
1999	Outil de sélection de PR	(Bernard et Deglin)	x			x		
2001	Outil de sélection de PR et de FR	(Xu, Wong et Loh)	x		x	x		
2002	Outil de sélection de PR (IRPS)	(Masood et Soo)	x					x

Année	Nom de l'outil	Référence	Prototypage rapide	Outillage rapide	Fabrication rapide	Sélection de procédés	Sélection de matériaux	Sélection de machines
<b>Tableau-A I-1 (suite)</b>								
2003	Outil d'aide à décision pour la sélection de PR	(Mahesh et al.)	x			x		
2005	Outil d'aide à la décision pour la sélection de PR	(Byun et Lee)	x					x
2005	Outil d'aide à la décision pour la sélection de PR	(Lan*, Ding et Hong)	x			x		
2005	Lignes directrices en vue de la sélection de procédés	(Gibson, Rosen et Stucker)	x	x	x			x
2005	Outil d'aide à la décision de PR	(Mahesh et al.)	x			x		
2005	Outil d'aide à la sélection de PR	(IVF)	x	x	x	x		
2007	Outil de sélection de PR	(Rao et Padmanabhan)	x			x		
2008	Outil de sélection de FA d'applications de fabrication directe	(Smith et Rennie)			x		x	x
2010	Outil de conseil en PR	(Munguía <i>et al.</i> )			x		x	x
2012	Outil d'aide à la décision pour AM	(Ghazy)	x	x		x	x	x



La première tentative de développement d'outil d'aide à la sélection a été réalisée par Hornberger (1993). Le programme développé fournissait des informations succinctes sur le prototypage rapide et permettait de guider le choix des utilisateurs en matière de procédés de prototypage rapide.

Campbell et Bernie (1996) ont développé une base de données relationnelle qui représentait les différentes caractéristiques des systèmes de prototypage rapide. Ils ont développé une interface graphique utilisateur dans le but de les aider à rechercher des systèmes de prototypage rapide sur la base des critères d'enveloppe de fabrication, des propriétés des matériaux et des tolérances. Lorsque la recherche est effectuée, l'utilisateur peut ensuite faire une requête pour obtenir l'ensemble des caractéristiques du système de prototypage rapide. Cet outil est plus un outil de recherche de sélection à proprement dit.

Müller, Bauer et Klingenberg (1996) ont développé un outil de sélection de prototypage rapide qui aide les utilisateurs à trouver le meilleur système de prototypage rapide dans le but de fabriquer des prototypes physiques. Ce système est construit à partir d'une base de données relationnelle rassemblant les machines et matériaux disponibles. Le système choisit les meilleures combinaisons entre machines et matériaux disponibles afin de réaliser un prototype à défaut de trouver le procédé le plus adapté à partir de critères de sélection. Pour y parvenir, ils ont utilisé la méthode de l'analyse de la valeur pour évaluer les combinaisons matériaux-machines.

Phillipson (1997) a développé un outil d'aide à la décision appelé outil de conseil en prototypage rapide. Il a utilisé le déploiement de la fonction de qualité afin d'identifier les caractéristiques les plus importantes pour son outil de conseil. Trois critères ont été retenus : le temps, le coût et la qualité. L'outil considère ainsi six machines et utilise la théorie d'optimisation multicritères pour trouver le meilleur procédé. Ce système ne prend cependant pas en compte les matériaux.

Xu, Wong et Loh (2001) a comparé quatre systèmes de prototypage rapide : SLA, SLS, FDM et LOM. Il a développé trois modèles génériques de rugosité de surface, de temps de fabrication et de coût de fabrication. Son travail ne s'est pas limité à ces quatre technologies et a constitué plus une étude des caractéristiques de ces technologies que de la mise en place d'un outil de sélection de celles-ci. Ses expériences sont devenues obsolètes à cause du renouvellement incessant des technologies et des matériaux disponibles.

Masood and Soo *of the Industrial Research Institute Swinburne* (IRIS) ont développé l'idée d'un outil de sélection de technologie de PR basé sur les règles d'experts. Ils ont ainsi conçu *l'IRIS Intelligent RP System Selector* (le système de sélection de technologie de prototypage rapide intelligent IRIS) afin d'aider aussi bien les novices en matière de PR que des personnes d'expérience à sélectionner la technologie de PR la plus appropriée afin de répondre aux exigences industrielles. Ce programme a mis à contribution de nombreux fournisseurs de technologies de PR issues des principaux vendeurs de technologies de PR. Cet outil donne la possibilité à l'utilisateur de choisir parmi quatre modes de sélection : sélection rapide, sélection détaillée, technologie de fabrication ou style de machine (Masood et Soo, 2002). Ce programme de sélection n'a pas été mis en place afin de sélectionner la meilleure technologie de PR qui répond à l'application donnée. L'objectif est de sélectionner la technologie de PR adaptée selon les besoins de l'acheteur. Il est cependant difficile de pondérer les critères de chacune des technologies de PR en utilisant une base de connaissances basée sur des règles « si alors ».

Mahesh et al. (2003) ont proposé d'appliquer la méthode Six Sigma en vue de l'analyse comparative des procédés de prototypage rapide en évaluant la capacité de ces procédés face à leurs potentiels. Ils ont ainsi décrit trois types de références : géométriques, mécaniques et références de processus. Les auteurs ont suggéré que ces références pourraient être stockées dans une base de données qui servirait de base à un outil d'aide à la décision. Ils ont effectué une étude de cas avec la technologie DMLS.

Byun et Lee (2005) ont développé un modèle qui aide les utilisateurs à choisir parmi les procédés de prototypage rapide en mettant en œuvre la méthode de classement TOPSIS (*Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Le problème a ainsi été considéré sous l'angle d'aide à la décision multicritères. Le modèle considère six critères : la précision, le fini de surface, la résistance de traction, l'allongement, le coût de fabrication de la pièce et le temps de fabrication. Pour évaluer l'importance des critères de sélection, un questionnaire a été réalisé pour sonder les utilisateurs. Des nombres flous ont été employés pour évaluer le coût de fabrication et le temps de fabrication des pièces. Une étude de cas a permis de comparer six systèmes de prototypage rapide. Cet outil ne prend pas en compte les procédés de fabrication.

Lan\*, Ding et Hong (2005) ont développé une nouvelle méthode pour sélectionner le système de prototypage rapide le plus adapté grâce à l'intégration d'un système expert et d'une évaluation synthétique floue. Le système s'appuie donc sur quatre modules : une base de données d'experts, une évaluation synthétique floue des bases de données, une interface utilisateur et une interface pour les experts. Cette étude est concentrée sur la méthode d'évaluation synthétique floue, mais ne décrit pas l'ensemble des quatre modules utilisés. Le classement des quatre alternatives (SLA, FDM, SLS et 3DP) a été effectué grâce aux processus d'analyse hiérarchique floue. Les critères considérés sont la précision, la rugosité de surface, les dimensions maximales, la complexité de la pièce, la résistance mécanique, la résistance thermique, le coût de fabrication, le coût de post-traitement, le coût du matériau, le coût de l'équipement, la vitesse d'analyse, le temps de réalisation effectif et le temps de post-traitement. Le système ne permet que de sélectionner des procédés de prototypage rapide. Une des limitations de cet outil est qu'il n'inclue pas la sélection du matériau. De plus, la méthode d'analyse hiérarchique (AHP) ne fait partie des méthodes les plus adaptées lorsqu'il s'agit de comparer un grand nombre d'alternatives (au-delà de sept) ou lorsque les alternatives ont des caractéristiques trop hétérogènes (Giner-Santonja, Aragonés-Beltrán et Niclós-Ferragut, 2012).

Rao et Padmanabhan (2007) ont développé une méthode de sélection de procédés de prototypage rapide qui utilise la théorie des graphes et l'approche matricielle. Un indice est attribué à chaque procédé de prototypage rapide à partir de fonctions des procédés de prototypage rapide qui ont été tracées à partir de leurs critères respectifs sur des graphes. Un graphe est un ensemble de nœuds et de vecteurs où les nœuds représentent des critères des procédés de prototypage rapide et les vecteurs l'importance de ces critères. Les flèches permettent de représenter du moins important au plus important des critères. Le classement est déterminé par les indices calculés. Les critères considérés dans cette étude sont : la précision, le fini de surface, le type de matériau, les propriétés des matériaux, le coût de la pièce, l'enveloppe de fabrication, gamme d'épaisseur de couche, les dimensions de la pièce, les dimensions caractéristiques, la facilité d'emploi et le respect de l'environnement. Les auteurs ont utilisé l'étude de cas réalisée par (Byun et Lee, 2005) qui ont développé la méthode TOPSIS modifiée. La comparaison entre les deux modèles a montré que l'association de la théorie des graphes et de l'approche matricielle est plus performante que la méthode TOPSIS, car elle permet une analyse plus critique du fait que des nombres quantitatifs et qualitatifs peuvent être pris en compte ensemble. Une des limites de cette méthode est qu'elle ne permet que de sélectionner les machines et non les procédés. De plus elle n'est qu'un modèle de décision, elle ne peut pas être mise à jour et elle est complexe dans son utilisation pour les utilisateurs novices.

Ghazy (2012) a développé un outil d'aide à la décision en matière de technologies, de matériaux et de procédés finitions de fabrication additive AMDSS (*Additive Manufacturing Decision Support System*). Celui-ci permet à partir d'un système d'expert et d'une base de données de connaissances d'orienter le choix de l'utilisateur vers des technologies, matériaux et finition adaptés aux besoins de l'utilisateur. Le point fort de cet outil est qu'il a été conçu pour que l'utilisateur puisse être acteur de l'évolution de l'outil d'aide à la décision. En effet, celui-ci peut rajouter des matériaux, des technologies sans perturber la sélection et la robustesse de l'outil. Il est ressorti de cette étude, d'après un sondage fait auprès des utilisateurs, que la virtualisation de l'outil sous forme d'une plateforme web et l'ajout des critères de coûts et de délais d'obtention des pièces auraient été intéressants. Cependant, on

arrive ainsi à une limite de l'outil qui se base sur un système expert pour l'aide à la décision ce qui exclut pour l'instant la possibilité d'estimer le coût et les délais d'obtention du fait de l'absence de modèles de calculs de coûts.



## ANNEXE II

### ENTREVUE 1 – INDUSTRIEL N 1

L'entrevue a donc pour objectif d'identifier des critères d'aide à la décision de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA pour des applications de fabrication directe.

Par soucis d'éthique de la recherche, la confidentialité des répondants est maintenue dans cette étude.

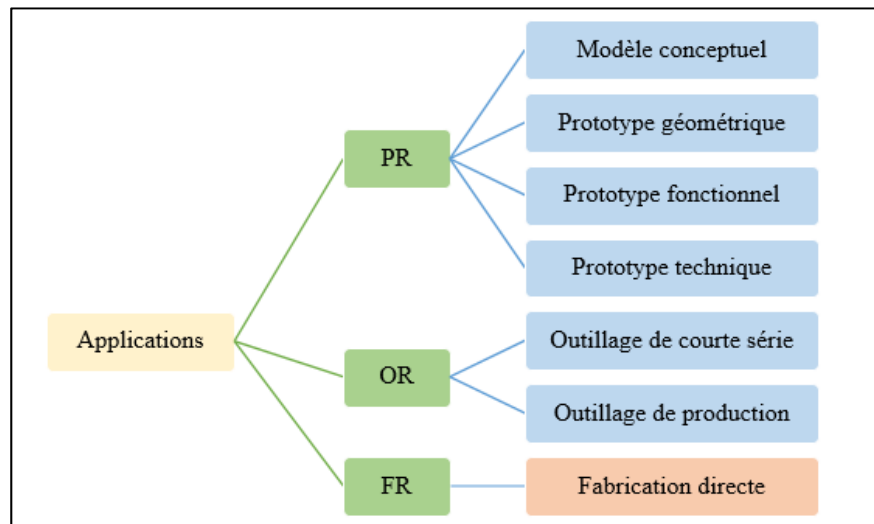


Figure-A II-1 Entrevue 1 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Question 1 :** Verriez-vous un intérêt à l'utilisation d'un outil d'aide à la décision de technologie de fabrication additive pour des entreprises des secteurs de pointes tels que l'aéronautique, le biomédical ?

**Réponse 1 :** Non je ne pense pas que le problème puisse être pris dans ce sens. En effet, la seule possibilité pour ces industries d'intégrer les technologies de fabrication additive dans

leurs moyens de production reste de qualifier les matériaux au travers de chacune de ces technologies.

**Question 2 :** Vous n'envisagez donc pas possible d'employer un outil de sélection de technologies de fabrication additive sans matériaux et sans spécification des matériaux et de procédés certifiés pour des secteurs d'activité.

**Réponse 2 :** Ce n'est possible qu'avec la nuance qu'on ne se concentre que sur des applications de prototypage et non de production de pièce. Un tel outil ne serait donc utile que pour du PR et de l'OR. En aucun cas cela n'est possible pour de la FR. En effet, pour du PR et de l'OR, les applications obtenues ne sont pas soumises à des certifications et ne sont soumises qu'à des notions de rentabilité à petite échelle et sont donc sont évaluables à partir du coût du matériau sans tenir compte du procédé employé. Pour la FR, les contraintes de certifications pour les domaines de pointe sont à prendre en compte ce qui remet en jeu la possibilité de sélectionner des ensembles de technologies et de matériaux non qualifiés. En FR, la technologie et le matériau employé deviennent indissociables.

**Question 3 :** Dans cadre de la FA, comment envisageriez-vous le processus de sélection de ces ensembles de technologies et matériaux ?

**Réponse 3 :** Les spécialistes de procédés et de matériaux doivent être sollicités dans la société qui souhaite intégrer la fabrication additive dans son industrie. Ensuite, une étude sur la qualification des matériaux doit être effectuée sur tous les procédés disponibles afin de qualifier les propriétés matériaux de manière indissociable des procédés. Cela permet dans un troisième temps d'effectuer une comparaison économique en vue par exemple dans le domaine aéronautique de certifier ces ensembles *B-basis*. En somme, en FR, il s'agit de faire passer ces ensembles procédés et matériaux au travers du processus classique de certification afin d'en qualifier ses applications et de vérifier sa rentabilité. C'est un processus qui prend entre cinq à sept années et demande un budget de l'ordre de 10 millions d'euros pour un seul ensemble de technologie et matériau.



**Question 4 :** Afin de définir un cahier des charges fonctionnel d'un tel outil nous avons complété une maison de la qualité en suivant la procédure suivante :

1 – Nous avons identifié des besoins à haut niveau auxquels l'outil devra répondre pour supporter l'aide à la décision de couples technologies et matériaux en vue de la FR. Ceux-ci sont nommés A, B, C, D, E et F.

2 – Nous avons ensuite identifié les requis techniques à haut niveau relatifs à chacun de ces besoins. Ils sont alors notés A-1 par exemple pour le premier requis technique relatif au besoin A.

3 – Nous avons ensuite défini quels requis techniques permettaient d'agir positivement ou négativement en vue de la complétion des besoins. Voici la grille d'évaluation :

Tableau-A II-1  
Évaluation linguistique et évaluation numérique

Évaluation linguistique	Évaluation numérique
Absolument néfaste	-5
Très néfaste	-4
Néfaste	-3
Négatif	-2
Modéré négatif	-1
Neutre	0
Modéré positif	1
Positif	2
Favorable	3
Très favorable	4
Absolument favorable	5

4 – Ensuite, nous sommes passés au travers des besoins et des requis techniques pour déterminer leur importance intrinsèque et définir un niveau de satisfaction client ainsi qu'une priorisation des fonctionnalités attendues dans l'outil. Pour cela nous avons employé la technique du modèle de Kano que nous avons retranscrite dans le Tableau-A II-2.

Tableau-A II-2  
Évaluation linguistique et transcription numérique

Évaluation linguistique	Transcription numérique
Obligatoire	3
Le plus, le meilleur	2
Souhaité	1

**Réponse 4** : Voici le résultat de cette procédure de collecte de données :

### 1 - Les besoins et leurs définitions

Tableau-A II-3  
Besoins identifiés et définitions

Besoins	Définition du besoin
A	Connaître les ensembles technologies-matériaux certifiés.
B	Connaître les certifications nécessaires à qualification d'applications dans chaque domaine.
C	Posséder un personnel en mesure de qualifier les ensembles technologies-matériaux.
D	Évaluer économiquement les gains des applications possibles compte tenu des performances qu'il est possible d'obtenir.
E	Regrouper ces applications dans un lot d'applications viables.
F	Estimer le gain global de l'intégration de cet ensemble technologie-matériau.

## 2 - Les requis techniques et leurs définitions

Tableau-A II-4  
Requis techniques et définitions

Requis techniques	Définition du requis technique
A-1	Base de données (BDD) des matériaux certifiés vis-à-vis de technologies
A-2	Doit pouvoir être mise à jour
B-1	BDD des certifications par domaine et par localisation
C-1	Ingénieurs spécialisés en qualification de technologies et matériaux
D-1	BDD des applications effectuées
E-1	Définir des types d'applications viables avec ces ensembles de technologies-matériaux
F-1	Présenter les informations sous forme d'un bilan permettant d'identifier les applications viables pour l'ensemble technologie-matériau

## 3 - La maison de la qualité

Colonne		1	2	3	4	5	6	7
Importance	Besoins / Requis	A-1	A-2	B-1	C-1	D-1	E-1	F-1
3	A	5	4	1	3	0	0	0
3	B	5	4	5	3	0	0	0
3	C	0	0	0	5	0	0	0
2	D	2	4	0	4	3	3	0
2	E	0	2	3	4	4	5	0
1	F	0	0	0	5	2	3	4
Importance des caractéristiques techniques		34	36	24	54	16	19	4
Abs Importance des spécifications		34	36	24	54	16	19	4
% Importance en valeur absolue		18	19	13	29	9	10	2
Classement Abs. Importance		3	2	4	1	6	5	7
Importance des spécifications		3	3	1	2	2	2	1

Figure-A II-2 Maison de la qualité des besoins et des requis techniques

### Classement des besoins grâce à la méthode de KANO :

Le participant a choisi de rendre obligatoire le besoin d'informations à mettre à disposition des entreprises concernant les couples de technologies et matériaux qui ont été certifiés (A et B). Au même titre qu'il faut dédier du personnel responsable de la qualification de ces technologies et matériaux (C). Sans que ces besoins ne soient assouvis, l'outil ne peut, selon lui, n'avoir d'intérêt pour personne en ce qui concerne la prise de décision pour l'intégration de technologies de FA dans le cadre de la FR. Ensuite, les autres besoins sont de l'ordre du souhait, mais de façon réaliste, l'outil selon le participant ne peut être là qu'en soutien à l'information, mais non pas acteur de l'évaluation des gains apportés par l'emploi de ces couples de technologies et matériaux à comparer avec les procédés conventionnels (D, E et F).

### Classement des requis techniques grâce à la méthode de KANO :

Tableau-A II-5  
Numéro des requis techniques et définitions

N°	Requis techniques
1	C-1 Ingénieurs spécialisés en qualification de technologies et matériaux (T&M).
2	A-2 Doit pouvoir être mise à jour.
3	A-1 Base de données (BDD) des matériaux certifiés vis-à-vis de technologies.
4	B-1 BDD des certifications par domaine et par localisation.
5	E-1 Définir des types d'applications viables avec ces ensembles de technologies-matériaux.
6	D-1 BDD des applications effectuées
7	F-1 Présenter les informations sous forme d'un bilan permettant d'identifier les applications viables pour l'ensemble technologie-matériau.

Nous n'avons pas eu le temps de compléter le toit de la maison de la qualité. Cependant, étant donné le niveau auquel nous avons placé cette identification des requis techniques, ils sont assez indépendants les uns des autres ce qui n'engendre pas de conflits. Il faudra attendre une phase de conception technique d'un outil pour voir apparaître des contraintes au niveau de la mise en œuvre compte tenu des artéfacts logiciels que nous aurons à disposition.

**Notes liées à mise en œuvre et questions générales :**

Lors de l'entrevue, l'interlocuteur a également posé quelques questions liées à la mise en œuvre. Ces questions étaient des questions qui ont conditionné la conception des outils dans la littérature et qui semblent donc incontournables.

**Question 5 :** Pensez-vous qu'un outil devrait :

- A – être en ligne,
- B – un outil indépendant,
- C – un outil lié aux logiciels de conception par ordinateur,
- D – autre.

**Réponse 5 :** Le participant a répondu D dans la mesure où selon lui l'outil ne peut pas être en ligne du fait de la non-divulgaration d'informations telles que les applications effectuées, leurs informations, etc. Cependant, il pense que l'outil devrait être en mesure de se connecter à internet pour permettre aux entreprises qui le souhaitent de mettre à jour les bases de données et ainsi être au courant de l'évolution des certifications des couples de technologies et matériaux. Cela pourrait éventuellement servir de partage des informations liées aux applications effectuées pour les compagnies qui souhaitent partager ces informations publiquement, mais il est sceptique sur cet intérêt-là.

**Question 6 :** Quels seraient les atouts qu'un tel outil devrait être en mesure de démontrer pour être employé dans l'industrie ?

**Réponse 6 :** Simplicité d'usage, critiques envers les sources d'informations, proches des études scientifiques des propriétés des matériaux mis en œuvre par les technologies de FA.

**Question 7 :** Quels seraient les points rédhibitoires qui empêcheraient l'industrie d'utiliser un tel outil ?

**Réponse 7 :** Partage total d'informations, sélection de technologies ou de matériaux sur des critères techniques, outil d'aide à la décision global.

**Question 8 :** Que pensez-vous de la base de données Senvol<sup>®</sup> qui où sont répertoriés les machines et les matériaux disponibles sur le marché accompagné de données techniques issues des fournisseurs de poudre et de machines ?

**Réponse 8 :** Cette option d'aide à la décision aura un intérêt limité tant que l'ensemble de la chaîne des matériaux et des technologies n'auront pas été évaluées par des spécialistes des matériaux et des procédés.

### ANNEXE III

#### ENTREVUE 2 – INDUSTRIEL N 2

L'entrevue a donc pour objectif d'identifier des critères d'aide à la décision de technologie de FA pour des applications de fabrication directe. Elle a également pour objectif d'analyser le nombre de critères supplémentaire identifié par rapport à l'entrevue de l'entrevue précédente.

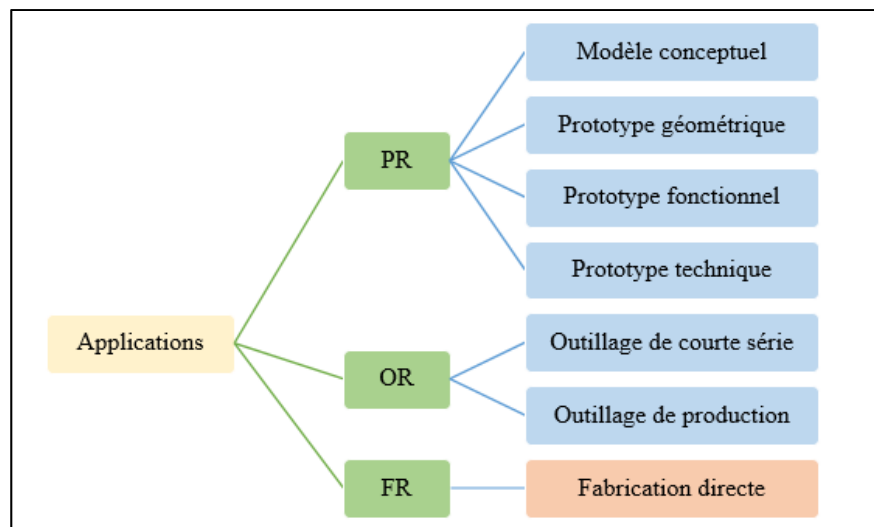


Figure-A III-1 Entrevue 2 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Question 1 :** Quelle approche auriez-vous si vous étiez dans la position de devoir sélectionner une technologie de FA ?

**Réponse 1 :** Je pense que je poserais d'abord la question de savoir si mon besoin de conversion vers la FA est existant. Cela dépend de l'objectif de cette conversion. Par exemple dans le cas du secteur aéronautique, il faudrait d'abord être en mesure d'identifier des candidats pour lesquels des limites d'optimisation topologiques ont été atteintes avec les procédés conventionnels. Ensuite, selon le matériau dans lequel est réalisée l'application, qu'il s'agisse d'un prototype, de l'outillage ou d'une pièce, identifier les technologies

compatibles. Ensuite, il est possible d'évaluer le degré de liberté au niveau de l'optimisation topologique qu'il est possible d'obtenir. Puis nous sommes en mesure de consulter les standards de performance AMS ou ASTM des matériaux avec les différentes options de technologies de FA et de déterminer lesquelles vont pouvoir supporter les contraintes mécaniques appliquées à la pièce considérée. Et enfin, on peut être en mesure, en prenant en compte tous les acteurs nécessaires à la réalisation de l'application en question par fabrication additive, d'évaluer si le gain justifie la conversion de l'application à la FA.

**Question 2 :** Pensez-vous alors qu'il soit possible de sélectionner une technologie de fabrication avant de choisir un matériau ?

**Réponse 2 :** Non je ne pense pas, quel que soit le type d'application souhaitée, du moins pour le domaine industriel, qu'il soit possible d'envisager de procéder dans cet ordre. On pourrait considérer le processus dans cet ordre-là dans le cas d'un nouveau produit pour lequel on pourrait imaginer révolutionner au niveau du procédé de fabrication afin d'obtenir une conception très particulière. Mais encore une fois, je pense que le domaine industriel souhaite être aiguillé, même dans le cas de nouveaux produits à partir d'un matériau dont les performances avec des procédés conventionnels sont connues.



**Question 3 :** Voici une proposition de processus de sélection de technologie. Qu'en pensez-vous ?

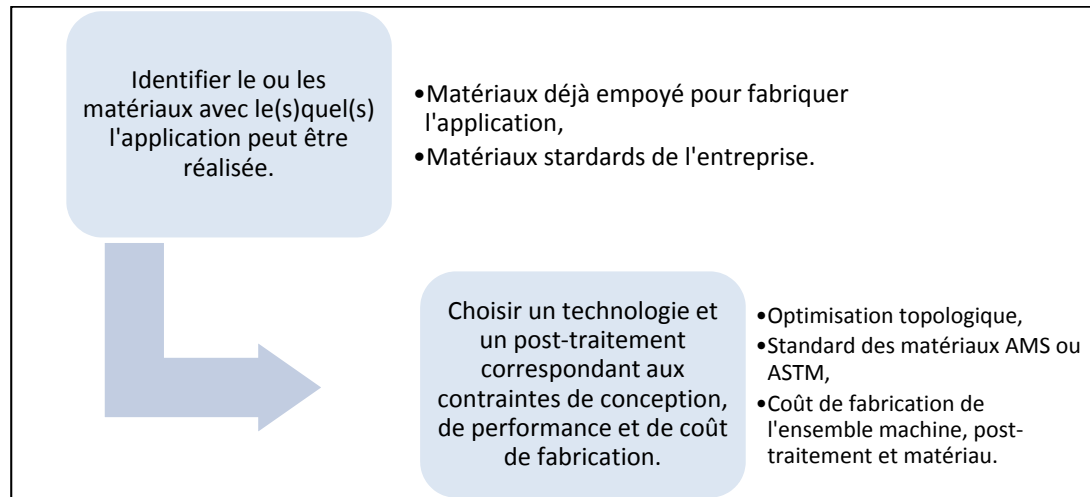


Figure-A III-2  
Modèle de sélection de technologies de FA à haut niveau

**Réponse 3 :** Oui, ces deux phases constituent pour moi les deux étapes essentielles, quel que soit le type d'application que l'on souhaite réaliser.

**Question 4 :** Positionnons-nous maintenant dans le secteur aéronautique. Vous nous avez éclairés sur le fait que la première question à se poser est de savoir quel est le type de gains qui était visé grâce à cette conversion à la fabrication additive. Quels sont ces types de gains recherchés dans ce secteur d'activité ? Et quels sont les critères qui vont permettre à l'utilisateur de choisir un matériau plutôt qu'un autre et une technologie plutôt qu'une autre ?

**Réponse 4 :** Les différents gains peuvent être au niveau du produit ou de la chaîne d'approvisionnement. Si on garde en vue de réaliser un outil d'aide à la décision, je ne pense pas que celui-ci puisse aider à choisir une technologie, car ce n'est pas le critère déterminant sauf dans le cas d'avions au sol pour réparation (*Aircraft On Ground* - AOG) pour lesquels il faudrait des réparer des pièces critiques. Je dirais que l'enjeu majeur, pour l'OR et la FR, réside dans la conception d'applications complexes. On peut bien entendu considérer la

réduction de masse comme un gain visé, mais cela passera nécessairement par un travail de conception complexe étant donné le niveau élevé de conception des applications actuelles.

Dans l'idée d'améliorer la conception des applications actuelles, l'outil doit servir à trouver la technologie qui permettra d'avoir le meilleur rapport entre le degré de liberté au niveau de la conception, le niveau de performance obtenu avec le matériau choisi et le coût de fabrication.

**Question 5 :** Maintenant que le but de l'outil est défini, nous allons faire un travail de conception de cet outil en construisant une maison de la qualité qui représente les besoins auxquels l'outil devra répondre et les critères de mise en œuvre. Quels sont les besoins d'aide à la décision que l'outil devrait supporter ?

**Réponse 5 :** Voici une liste de besoins et leurs définitions qui permettraient de couvrir en partie l'aide à la décision.

Tableau-A III-1  
Besoins identifiés et définitions

Besoins	Définition du besoin
G	Évaluer le niveau de flexibilité de conception des technologies de FA.
H	Connaître les performances des matériaux avec des technologies de FA.
I	Évaluer le coût de fabrication (coût du matériau, coût de fabrication sur une technologie de FA, coût de post-traitement).
J	Doit pouvoir être mis à jour pour éviter l'obsolescence.

**Question 6 :** Lors de la précédente entrevue, nous avons également fait de travail d'identification des besoins et j'aimerais que vous associiez les besoins que vous pensez identiques ou suggériez l'ajout de certains besoins avec commentaires.

**Réponse 6 :** Voici la liste des besoins au complet entre l'entrevue n°1 et l'entrevue n°2 et l'harmonisation des définitions.

Tableau-A III-2  
Liste des besoins de l'entrevue 1 et 2

Besoins	Définition du besoin
A	Connaître les ensembles technologies-matériaux certifiés.
B	Connaître les certifications nécessaires à qualification d'applications dans chaque domaine.
C	Posséder un personnel en mesure de qualifier les ensembles technologies-matériaux.
D	Évaluer économiquement les gains des applications possibles compte tenu des performances qu'il est possible d'obtenir.
E	Regrouper ces applications dans un lot d'applications viables.
F	Estimer le gain global de l'intégration de cet ensemble technologie-matériau.
G	Évaluer le niveau de flexibilité de conception des technologies de FA.
H	Connaître les performances des matériaux avec des technologies de FA.
I	Évaluer le coût de fabrication (coût du matériau, coût de fabrication sur une technologie de FA, coût de post-traitement).
J	Doit pouvoir être mis à jour pour éviter l'obsolescence.

Tableau-A III-3  
Comparaison des besoins entre l'entrevue 1 et 2

Besoins entrevue 1	Besoins entrevue 2	Commentaires
A	H	Identiques
B	H	Cela peut être utile pour les jeunes entreprises qui souhaiteraient rentrer dans un secteur de pointe grâce à la fabrication additive.
C	H	C'est indispensable effectivement dans la prise de décision de la technologie avec laquelle fabrication l'application souhaitée. Ces experts sont certainement ceux qui devraient travailler sur l'outil, conjointement avec les concepteurs, au choix de la technologie.
D	I	À la différence de l'entrevue précédente, je pense qu'il faut préciser à un moment donné dans l'outil quel type de gain est recherché. Cela conditionnera nécessairement le choix des critères de décision des technologies. J'ai choisi le coût de fabrication, car je pense que les opportunités de conversion se trouvent dans la liberté de conception plus que dans la réduction de masse.
E	Oui	Je valide ce besoin, car effectivement, le choix de la technologie sera conditionné par le nombre d'applications viables grâce à cette technologie.
F	Non	Cela relève plus du critère que tu besoin en lui-même. Être en mesure d'estimer le gain global n'est que le bilan de l'identification de l'ensemble des opportunités. On peut considérer que E est un sous besoin de F.
	G	Si le gain est axé sur la complexité de conception, ce besoin doit être évalué pour déterminer quelle technologie offre le plus grand nombre de libertés de conception. La réduction de masse est incluse dans les gains obtenus par ce processus, car une réduction de masse, sans changer de matériau de fabrication, nécessitera un niveau de complexité de conception supérieur.
	J	Ce besoin est purement lié à l'obsolescence de l'outil. Sans lui, l'outil ne sera pas capable d'évoluer au fil du temps.

**Question 7 :** Quelle est la liste des besoins harmonisée avec l’entrevue n°1 selon vous ?

**Réponse 7 :** Voici la liste des besoins harmonisée pour la conception de l’outil dédié au secteur industriel aéronautique.

Tableau-A III-4  
Liste harmonisée des besoins et définitions

Besoins	Définition du besoin
A	Connaître les ensembles technologies-matériaux certifiés.
B	Connaître les certifications nécessaires à qualification d’applications dans chaque domaine.
C	Posséder un personnel en mesure de qualifier les ensembles technologies-matériaux.
D <sub>bis</sub>	Évaluer coût de fabrication (coût du matériau, coût de fabrication sur une technologie de FA, coût de post-traitement) des applications possibles compte tenu des performances qu’il est possible d’obtenir.
F <sub>bis</sub>	Estimer le potentiel de conversion vers la FA en fonction de l’ensemble des applications viables avec un couple de technologie-matériau.
G	Évaluer le niveau de flexibilité de conception des technologies de FA.
J	Doit pouvoir être mis à jour pour éviter l’obsolescence.

**Question 8 :** Quelles sont les spécifications techniques permettant de répondre à ces besoins ?

**Réponse 8 :** Voici la liste des spécifications techniques qui permettent de supporter ces besoins.

Tableau-A III-5  
Requis techniques identifiés et définitions

<b>Requis techniques</b>	<b>Définitions des spécifications techniques</b>
A-1	BDD des standards ASM pour les matériaux qualifiés sur des procédés conventionnels.
A-2	BDD des standards ASTM pour les matériaux qualifiés sur des technologies de FA.
B-1	BDD des certifications par domaine et par localisation.
C-1	Ingénieurs spécialisés en qualification de technologies et matériaux (T & M).
D <sub>bis</sub> -1	BDD coût des matériaux.
D <sub>bis</sub> -2	Modèles de coût de fabrication avec les technologies de FA (formes géométriques standards par exemple).
D <sub>bis</sub> -3	Modèles de coût de post-traitement.
F <sub>bis</sub> -1	Nombre d'applications qui pourraient être converties à la FA avec ce matériau.
G-1	Support de matière.
G-2	Degré de liberté des formes possibles.
J-1	Type d'outil (en ligne, un outil indépendant, un outil lié aux logiciels de conception par ordinateur ou autre).

Figure-A III-3  
Maison de la qualité des besoins et requis techniques





## ANNEXE IV

### ENTREVUE 3 - INDUSTRIEL N 3

**Question 1 :** Parmi l'ensemble de ces types d'applications, où pensez-vous vous situer en ce qui concerne l'aide à la décision de technologie de FA ?

**Réponse 1 :** Dans notre centre d'expertise technique, nous travaillons à aider les entreprises à aborder les technologies de FA par l'apprentissage et par l'analyse des besoins industriels. Nous analysons en premier lieu. Trois types d'applications se dégagent : la réparation, les ensembles de pièces assemblées complexes et les pièces pouvant subir une reconception. On peut alors se positionner dans le type d'applications de la fabrication directe. La différence majeure se situe dans le nombre de critères qu'on souhaite atteindre en ce qui concerne de caractéristiques et de fonctionnalités de l'application finale.

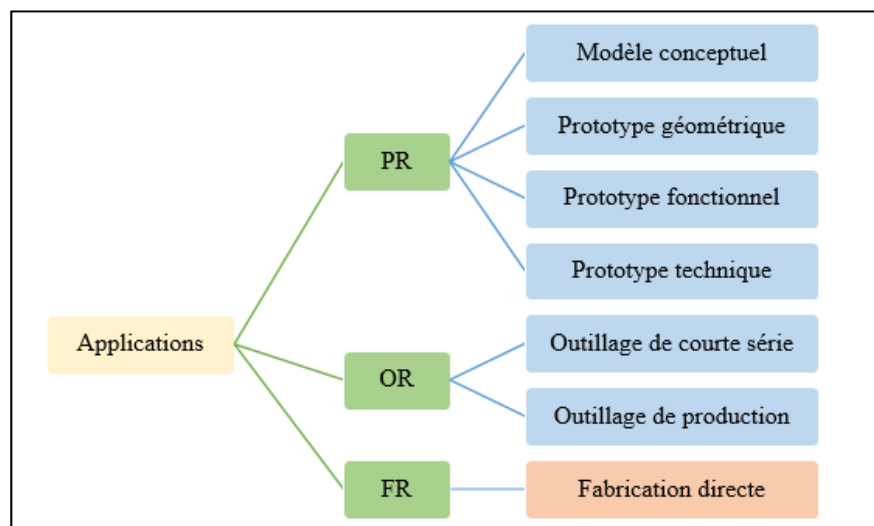


Figure-A IV-1 Entrevue 3 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Question 2 :** Quels sont les critères déterminants dans la sélection de technologies, de matériaux et de post-traitements de FA ?

**Réponse 2 :** Les catégories de critères identifiés lors de l’entrevue précédente ont été validées par le participant. L’utilisateur ne procède pas directement à son choix par l’intermédiaire de ces critères de sélection. Il procède au cas par cas selon le type d’applications en jeu et les contraintes fixées par le client.

**Question 3 :** Quelles sont les catégories d’applications pour lesquelles la FA a fait ses preuves ? Et pour lesquelles seriez-vous en mesure de répondre aux besoins du client ?

**Réponse 3 :** Voici les catégories pour lesquelles la FA fait ses preuves à l’interne et pour lesquelles nous avons des technologies adaptées. Cependant, chaque cas d’étude est différent. En effet, selon si le client souhaite une résistance à la corrosion, à l’usure ou des propriétés particulières, cela conditionne le choix des alliages et donc des procédés avec lesquels travailler.

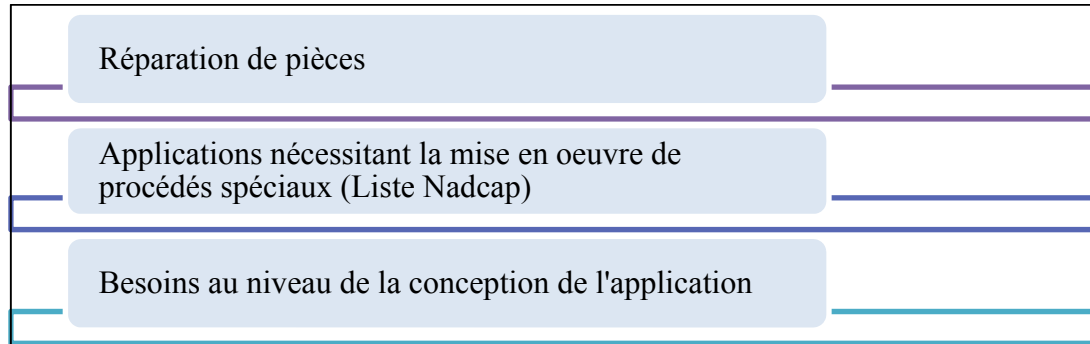


Figure-A IV-2 Opportunités de conversion à la FA

## ANNEXE V

### ENTREVUE 4 – INDUSTRIEL N 4

**Question 1 :** Quels sont les types d'applications pour lesquels la fabrication additive a fait ses preuves selon vous ?

**Réponse 1 :** Il n'y a pas de types d'application miracle. Il y aurait quatre pôles de décision qui sont le coût, la qualité, le temps d'obtention et les règles de conception. C'est nécessairement une combinaison de ces quatre grandes catégories critères qui mène à la sélection d'une technologie, d'un matériau et de post-traitements particuliers.

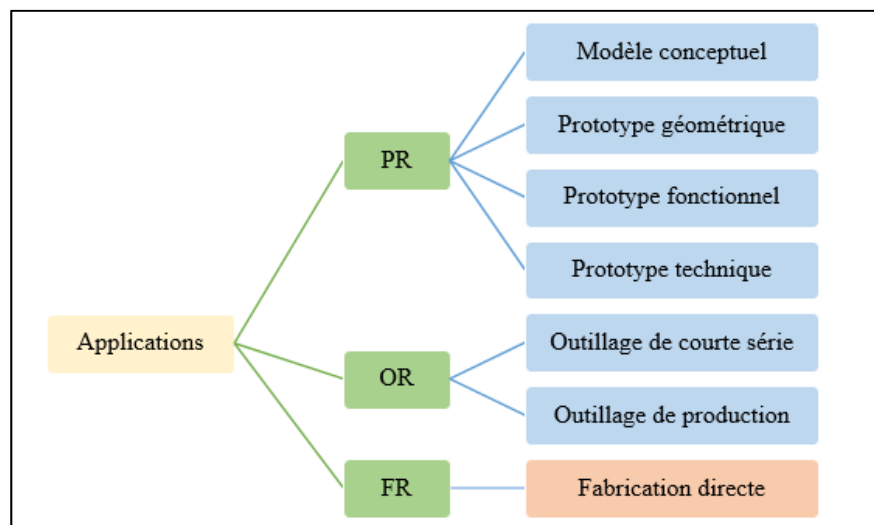


Figure-A V-1  
Critères de sélections à haut niveau des technologies de FA

Plus le niveau de qualité demandé est important et plus le niveau de maîtrise de la conception de l'application sera nécessaire en amont. Cela signifie que pour des applications de haute performance, il est nécessaire de connaître les règles de conception de la FA. Il faut sortir du paradigme de la conception soustractive qui n'est pas adaptée aux technologies de FA par la façon même de penser la conception de l'application.

**Question 2 :** Pensez-vous alors qu'on puisse évaluer toutes les catégories d'applications identifiées en fonction de ces quatre pôles ?

**Réponse 2 :** On peut alors effectivement imaginer évaluer ces quatre critères pour caractériser chacune des différentes catégories de FA.

Les quatre pôles de décision de haut niveau que sont le coût, la qualité, la conception et le temps d'obtention servent de socle à la sélection, car grâce à ces quatre curseurs de décision client, on est en mesure d'attribuer des poids aux différents critères de sélection des technologies, des matériaux et des post-traitements.

Voici les catégories d'applications identifiées pour préciser la catégorie de fabrication directe :

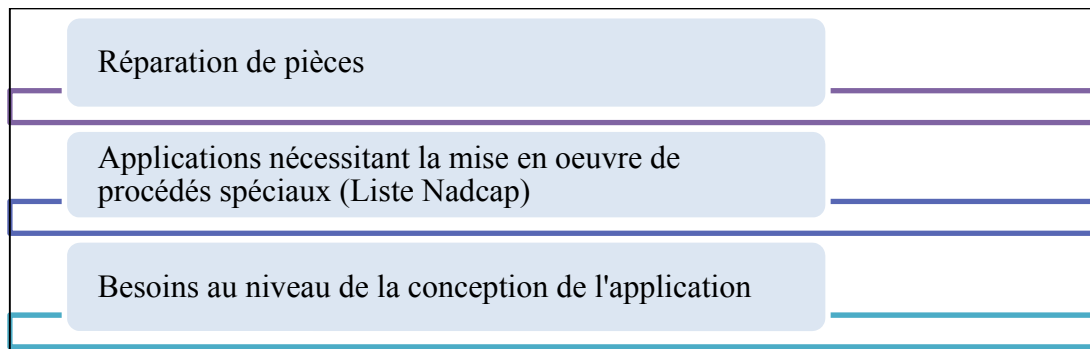


Figure-A V-2 Opportunités de conversion à la FA

## ANNEXE VI

### ENTREVUE 5 – INDUSTRIEL N 5 ET INDUSTRIEL N 6

Cette entrevue s'est positionnée dans le cadre de l'étude des applications de fabrication directe.

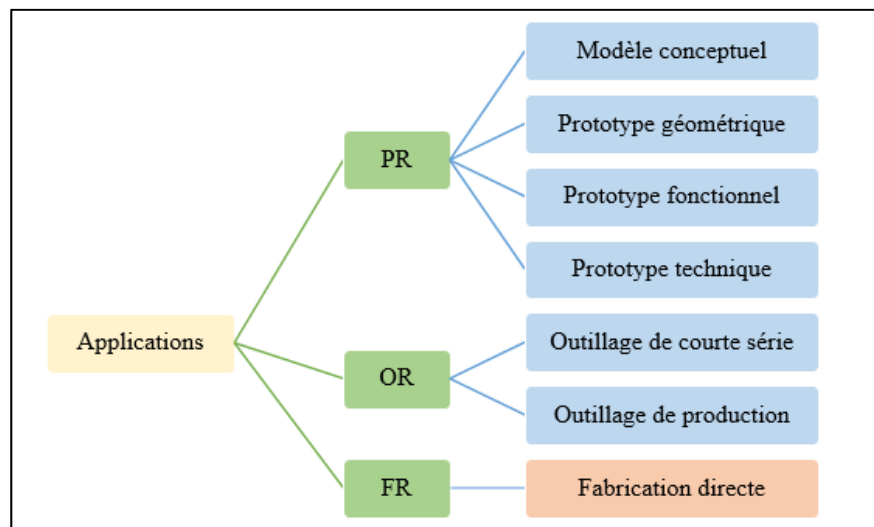


Figure-A VI-1 Entrevue 5 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

Lors de l'atelier, nous n'avons pas identifié de catégories de plus haut niveau que les catégories d'applications. Nous nous sommes donc placés dans l'univers des applications de fabrication directe pour cette étude dans le secteur aéronautique.

Nous avons ensuite travaillé sur la notion des critères de décisions de fabrication de ces prototypes par FA. Les quatre critères à haut niveau de coût, de conception et de qualité et de temps de fabrication ont été validés par les concepteurs lors de cette entrevue. Un des participants a soulevé la possibilité que le temps d'obtention soit un paramètre primordial dans la sélection de la technologie dans le cadre de prototypage d'outillage. Cependant, nous

avons inclus ce paramètre par la suite dans les coûts comme nous le verrons en détail plus loin.

Voici les sous-critères validés lors de l'entrevue, classés selon s'ils ont une influence sur le coût, la conception ou la qualité.

<b>Coût</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Direct,</li><li>•Indirect.</li></ul>
<b>Conception</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Niveau de personnalisation,</li><li>•Niveau de complexité.</li></ul>
<b>Qualité</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Apparence de l'application,</li><li>•Propriétés mécaniques,</li><li>•Fonction.</li></ul>

Figure-A VI-2  
Critères définissant les notions de coûts, de conception et de qualité

Voici les définitions des différents critères énumérés.

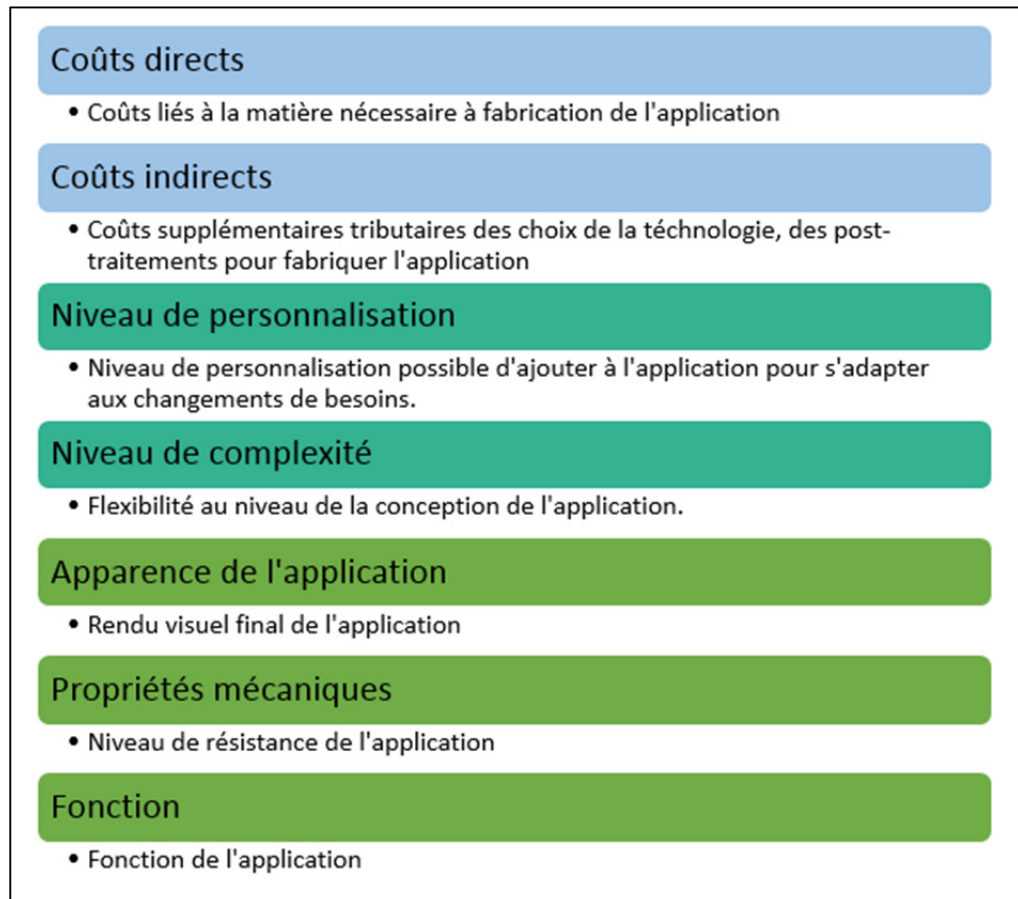


Figure-A VI-3 Définitions des critères d'aide à la décision de technologies de FA

L'objectif suivant de la rencontre a été compte tenu de la liste des critères disponibles des technologies, des matériaux et des post-traitements possibles de définir quels sont les critères permettant d'estimer le coût direct, le coût indirect, les propriétés mécaniques, etc.

<b>Coûts directs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût du matériau (\$/kg),</li> <li>• Perte de matière (% de matière perdu pendant la fabrication),</li> <li>• Quantité d'applications à effectuer.</li> </ul>
<b>Coûts indirects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps de fabrication (Temps Homme/Machine),</li> <li>• Temps de post-traitement (Temps Homme/Machine).</li> </ul>
<b>Niveau de personnalisation</b>	
<b>Niveau de complexité</b>	
<b>Apparence</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fini de surface,</li> <li>• Résolution.</li> </ul>
<b>Propriétés mécaniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureté,</li> <li>• Résistance mécanique,</li> <li>• Propriétés d'assemblage.</li> </ul>
<b>Fonction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etanchéité : Densité</li> </ul>

Figure-A VI-4 Critères d'aide à la sélection de triplets de technologies, de matériaux et de post-traitement

Les critères ont un poids laissé libre à l'utilisateur qui devra les répartir afin d'indiquer une importance relative de chacun de ces critères. Laisser le libre des choix des poids à l'utilisateur est important pour pallier la diversité des cas d'étude auxquels font face les concepteurs.



## ANNEXE VII

### ENTREVUE 6 – INDUSTRIEL N 7

**Question 1 :** Est-ce que ces catégories d'applications et leurs définitions présentées vous semblent claires et suffisantes pour couvrir l'ensemble des applications de FA ?

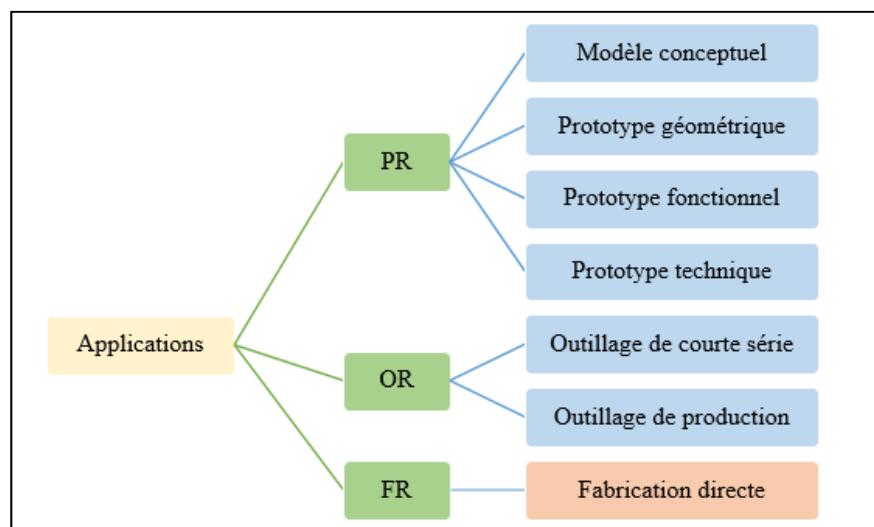


Figure-A VII-1 Entrevue 6 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Réponse 1 :** Ces catégories sont claires, mais sont trop générales et demandent un découpage plus spécifique pour être étudiées de façon distincte. Je pense surtout aux catégories de fabrication directe et d'outillage de production.

**Question 2 :** Dans le cadre de la fabrication rapide, est-ce que ce découpage des applications selon les sous-catégories déjà identifiées vous semble pertinent ou incomplet ?

**Réponse 2 :** Cet ensemble d'application me semble complet, car il permet de distinguer des problématiques différentes effectivement. Cependant, la sous-catégorie de besoin en conception demande à être précisée. Et également, je ne pense pas que vous puissiez prendre

en compte dans votre outil des applications liées à la réparation, car le critère primordial dans ce cas précis est le temps d'obtention de l'application et sa qualité. Ces applications sont tributaires de la chaîne de fournisseurs au complet et non plus qu'au temps de fabrication de la pièce.

**Question 3 :** Comment la préciseriez-vous ?

**Réponse 3 :** La figure suivante présente les sous-catégories d'applications au sein des besoins au niveau de la conception de l'application.

<b>Personnalisation de conception</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositifs médicaux et orthèses personnalisées,</li> <li>• Des pièces de remplacement pour la fin de vie du produit,</li> <li>• Des biens de consommation personnalisés.</li> </ul>
<b>Complexification de conception</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau d'épaisseur de paroi variable,</li> <li>• Structures alvéolaires complexes,</li> <li>• Trous non-linéaires,</li> <li>• Structures complexes en filigrane,</li> <li>• Structures organiques.</li> </ul>

Figure-A VII-2  
Sous-catégories des applications liées  
à un besoin de conception

Lors de l'entrevue, nous sommes positionnés sur des applications ayant pour un gain au niveau de la complexification de conception de l'application pour la FA. De plus, nous avons travaillé en vue de répondre à des besoins du secteur aéronautique.

**Question 4 :** Est-ce que les critères d'évaluation de la qualité vous semblent correctement définis ? La liste est-elle incomplète ?

**Réponse 4 :** Les critères d'apparence, de propriétés mécaniques et de fonction de l'application me semblent valables. Je rajouterais par ailleurs, du fait que nous travaillons en milieu aéronautique, deux facteurs qui seraient le niveau de performance renvoyant à la notion de qualifications des matériaux sur les différentes technologies. J'ajouterais aussi dans cette notion de performance la qualification des fournisseurs de service dans le cas d'un traitement à l'externe. Il faut aussi au-delà de la performance rajouter un critère de qualification du personnel en ce qui concerne la fabrication de l'application afin de maîtriser tous les acteurs de la qualité du produit fini.

**Question 5 :** Quels sont les critères de coût à prendre en compte pour de la fabrication directe d'application dont la conception est complexe en milieu aéronautique ?

**Réponse 5 :** Il faut à la fois prendre en compte les coûts opérationnels de fabrication de l'application et les coûts liés au cycle de vie du produit.

**Question 6 :** On va se positionner uniquement dans le cas de l'évaluation des coûts opérationnels de fabrication et j'aimerais savoir si cette liste de critères est suffisante et quels sont les critères d'importance d'évaluation des coûts selon vous.

**Réponse 6 :** Je pense qu'il faut compléter cette liste en rajoutant les coûts liés à la chaîne logistique dans le cas d'une coopération avec un fournisseur de services. En effet, on observe de grandes possibilités de réduction de coûts de production au niveau de la chaîne logistique. Dans cette étude étant donné que l'on considère qu'il est possible de fabriquer avec n'importe quelles technologies, matériaux et procédés de post-traitement il n'est pas nécessaire de l'inclure dans l'étude, mais il faut le mentionner comme étant un facteur important de la prise de décision.

Coûts directs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût du matériau (\$/kg)</li> <li>• Perte de matière à la fabrication (%)</li> <li>• Quantité d'applications fabriquées</li> </ul>
Coûts indirects
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Exploitation</b> : Location du site (\$/m<sup>2</sup>), Taille de l'équipement, énergie consommée.</li> <li>• <b>Travail de fabrication post-traitement inclus</b> : Temps Homme/Machine</li> <li>• <b>Administratifs</b> : Temps Homme/Machine, Matériel (\$ + \$/année), Logiciel (\$ + \$/année), Achats consommables</li> <li>• <b>Machine</b> : Temps de fabrication (\$/h), Absorption d'achat (\$), Maintenance (\$/année), Logiciel (\$ + \$/année)</li> <li>• <b>Chaîne logistique</b></li> </ul>

Figure-A VII-3 Critères d'évaluation du coût opérationnel de fabrication

Voici la liste complétée des critères avec leur définition :

<b>Coûts opérationnels de fabrication directs</b>
• Coûts liés à la matière nécessaire à fabrication de l'application.
<b>Coûts opérationnels de fabrication directs</b>
• Coûts supplémentaires tributaires des choix de la technologie, des post-traitements pour fabriquer l'application.
<b>Coûts liés au cycle de vie du produit</b>
• Coûts liés à l'accompagnement de l'application jusqu'à la fin de vie produit.
<b>Niveau de personnalisation</b>
• Dispositifs médicaux et orthèses personnalisées, • Des pièces de remplacement pour la fin de vie du produit, • Des biens de consommation personnalisés.
<b>Niveau de complexité</b>
• Niveau d'épaisseur de paroi variable, • Structures alvéolaires complexes, • Trous non-linéaires, • Structures complexes en filigrane, • Structures organiques.
<b>Apparence de l'application</b>
• Rendu visuel final de l'application.
<b>Propriétés mécaniques</b>
• Niveau de résistance de l'application.
<b>Performance</b>
• Fonction de l'application, • Qualification des matériaux sur les machines, • Qualification du personnel ou du fournisseur de service sur les machines.

Figure-A VII-4 Harmonisation des définitions des critères décisionnels des triplets de technologies, des matériaux et de post-traitements

**Question 7 :** Seriez-vous en mesure d'évaluer un niveau d'importance de chacun des critères pour les différentes sous-catégories d'application.

**Réponse 7 :** Non je ne pense pas que cela soit possible d'aborder le problème de cette manière. L'utilisateur de l'outil doit avoir les champs libres, car selon le cas de figure il ne donnera pas la priorité au même critère. Par exemple, dans le cas de l'injecteur de carburant (*Leap fuel nozzle*) de la compagnie General Electric, le niveau de complexité d'assemblage a été un critère déterminant dans le choix de la FA. En effet, cela a permis de réduire drastiquement les coûts opérationnels de fabrication de la pièce. Dans le cas d'un avion au sol pour réparation (*Aircraft On Ground*) militaire par exemple, il y a l'urgence de la situation et le critère de coût n'a plus d'importance. Il faut réduire au minimum le délai d'obtention de la pièce. Ce sont les deux extrêmes que j'ai en tête.

## ANNEXE VIII

### ENTREVUE 7 – INDUSTRIEL N 8 ET INDUSTRIEL N 9

Présentation des différents types d'applications identifiés : Lors de cette première phase de contextualisation de l'entrevue, l'ensemble des catégories a été validé comme étant représentatif. Un seul point a été soulevé. Le terme de « rapide » est employé lorsqu'il s'agit de nommer les grands segments de types d'application de la FA. Ce terme de « rapide » est problématique dans le sens où il renvoie à la fois à la notion de rapidité d'obtention de l'application ce qui est faux dans de nombreux cas de figure. Il renvoie à la notion de FA pour le distinguer de l'univers de la fabrication soustractive. Ce terme a été ajouté aux termes prototypage, outillage et fabrication afin de promouvoir la FA. Il serait donc plus judicieux d'enlever le terme de « rapide » et de préciser « par FA » à la place.

**Question 1 :** En amont de ces catégories d'applications, il y a des raisons qui peuvent conduire l'utilisateur de l'outil à se tourner vers la FA. La présente les cas de figure où la FA peut être une piste à explorer comme procédé de fabrication. Pensez-vous que ces cas de figure identifient bien les cas où la FA fait ses preuves ?

**Réponse 1 :** Voici la liste harmonisée des cas de figure pour le milieu aéronautique où la FA a fait ses preuves :

<b>Réparation de pièces</b>
•Le temps d'obtention des pièces de rechange pour réduire le temps de AOG.
<b>Mise en oeuvre de procédés spéciaux</b>
•Consolidation de pièces pour des assemblages complexes, •Consolidation fonctionnel pour l'ajout de fonctionnalité directement lors de la fabrication.
<b>Optimisation de la conception</b>
•Optimisation topologique de pièces.

Figure-A VIII-1 Compétitivité de la FA comparée à la fabrication soustractive

Nous avons positionné notre étude parmi les catégories d'applications de fabrication directe.

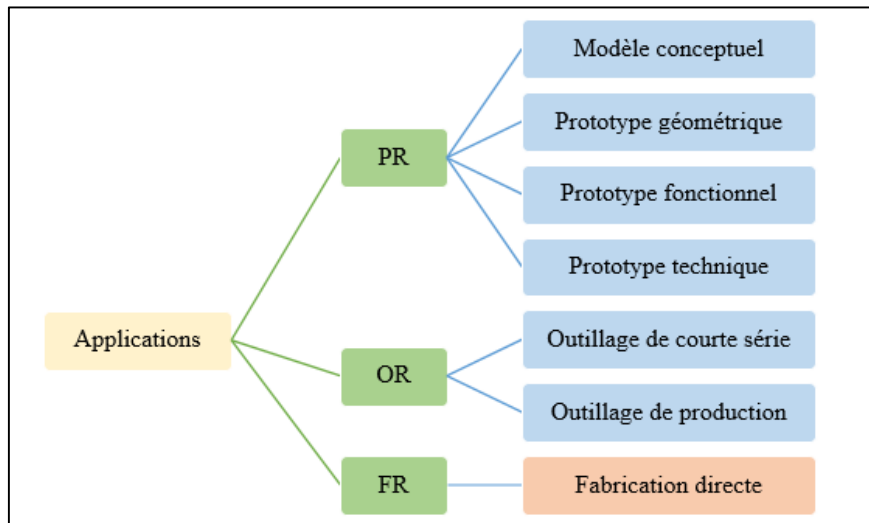


Figure-A VIII-2 Entrevue 7 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Question 2 :** Quels sont selon vous les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitement pour des applications de fabrication directe en milieu aéronautique ?

**Réponse 2 :** Les catégories d'outillage par FA et de prototypage par FA demandent de prendre en compte dans la prise de décision le coût de fabrication, l'effort de conception et le niveau de qualité atteignable. La fabrication directe est différente en cela que le temps d'obtention de l'application fait partie intégrante de la prise décision du moyen de production. Une des raisons est liée à la mesure de criticité des applications et donc du délai d'obtention de l'application dans des situations critiques où les seuls critères de décision sont le temps d'obtention et si la barre de niveau qualité minimale est atteignable.



La Figure-A VIII-3 présente ces quatre critères de décision pour des applications de fabrication directe en milieu aéronautique.

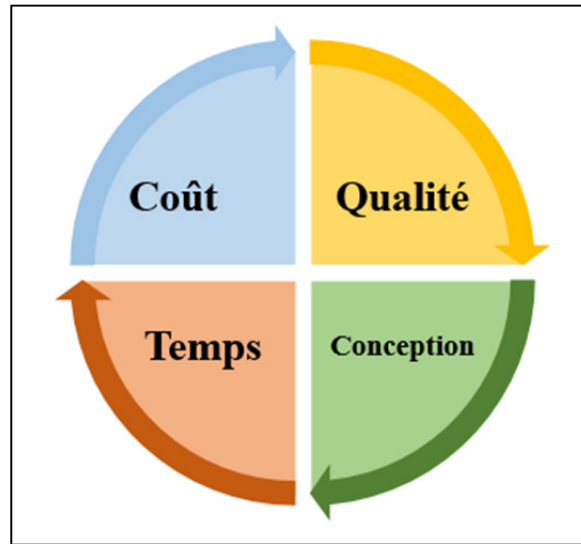


Figure-A VIII-3 Critères hauts niveaux de prise de décision de procédés de FA pour des applications en milieu aéronautique

**Question 3 :** Quels sont donc les critères permettant d'évaluer ces différents critères de décision ?

**Réponse 3 :** Voici la liste harmonisée par rapport aux entrevues précédentes des critères d'évaluation du coût, du temps d'obtention de l'application, de la qualité et de la conception.



Figure-A VIII-4 Liste harmonisée des critères de sélection de technologies, de matériaux et de post-traitement pour des applications en milieu aéronautique

**Question 4 :** Quels sont les critères liés aux technologies, aux matériaux et aux post-traitements disponibles qui permettent d'évaluer les catégories de critères ?

**Réponse 4 :** La Figure-A VIII-5 présente, par catégories, des paramètres issus des technologies, des matériaux et des procédés de post-traitement qui permettent d'évaluer les différents critères de prise de décision.

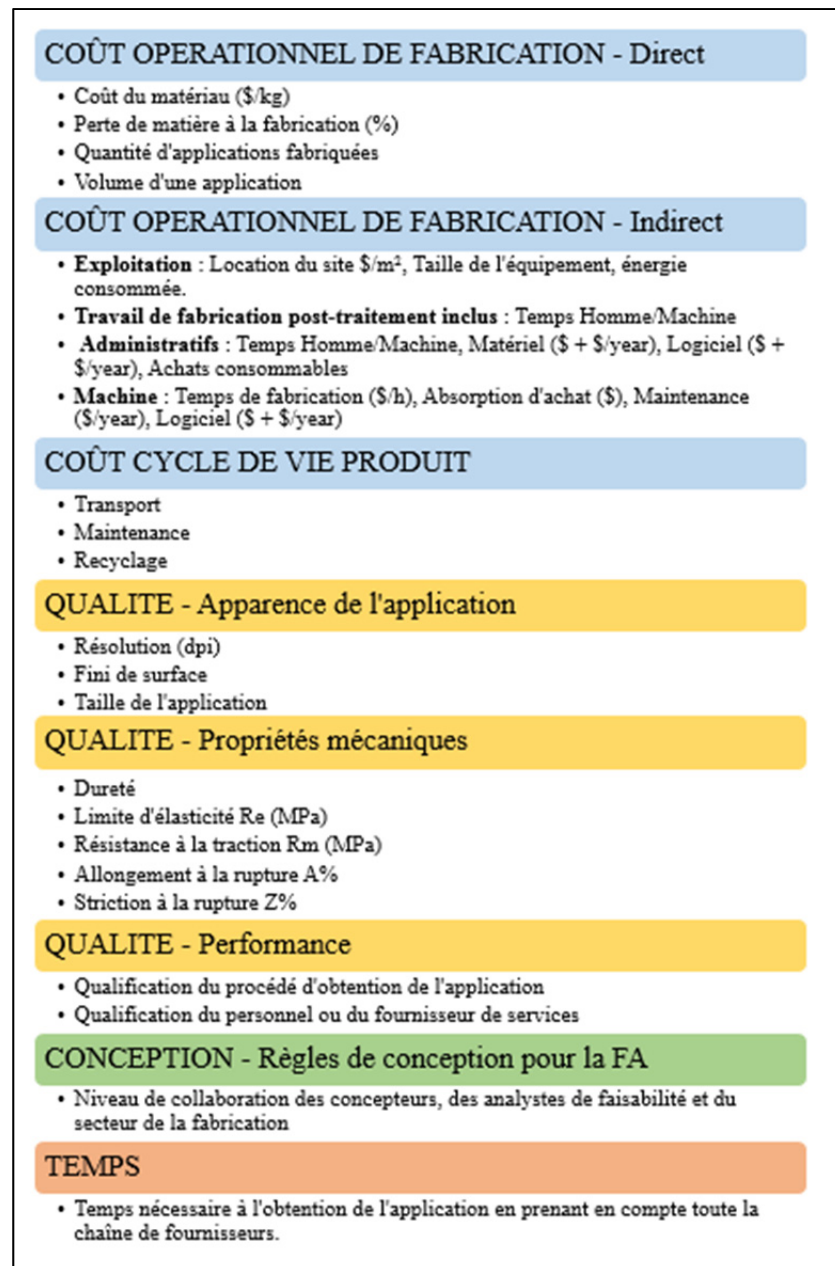


Figure-A VIII-5 Liste des critères d'évaluation des critères de décisions pour la fabrication rapide en milieu aéronautique



## ANNEXE IX

### ENTREVUE 8 - INDUSTRIEL N 10

L'étude que nous avons menée lors de l'entrevue individuelle s'est concentrée sur la validation des catégories d'applications, des pôles de décision et les catégories de critères d'évaluation de ces pôles de décision pour des applications de fabrication directe.

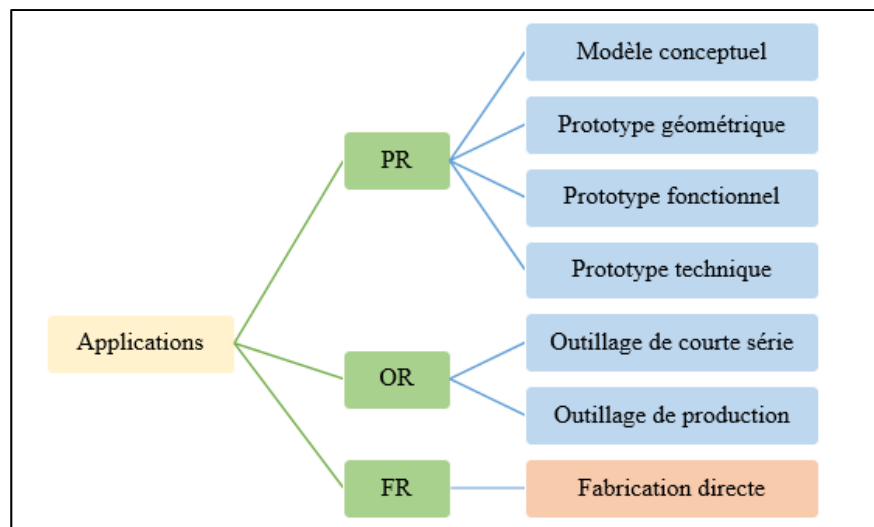


Figure-A IX-1 Entrevue 8 - Positionnement dans l'univers des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

L'entrevue s'est positionnée sur l'étude des besoins industriels du secteur aéronautique en vue de la fabrication d'applications de fabrication directe.

**Question 1 :** En amont de ces catégories d'applications, il y a des raisons qui peuvent conduire l'utilisateur de l'outil à se tourner vers la FA. La présente les cas de figure où la FA peut être une piste à explorer comme procédé de fabrication. Pensez-vous que ces cas de figure identifient bien les cas où la FA fait ses preuves ?

**Réponse 1 :** Oui, ces cas de figure pour lesquels la FA a fait ses preuves me semblent cohérents.

**Question 2 :** Quels sont selon vous les critères de décision de technologies, de matériaux et de post-traitement pour des applications de fabrication directe en milieu aéronautique ?

**Réponse 2 :** Les quatre critères de décision à prendre en compte pour choisir une technologie, un matériau et un post-traitement sont bien des critères de coût, de qualité, de conception et de temps de fabrication.

**Question 3 :** Quels sont donc les critères permettant d'évaluer ces différents critères de décision ?

**Réponse 3 :** La liste des catégories des critères hauts niveaux permettant d'évaluer les critères de décision de coût, de qualité, de conception et de temps me semble complète.

**Question 4 :** Quels sont les critères liés aux technologies, aux matériaux et aux post-traitements disponibles qui permettent d'évaluer ces catégories de critères ?

**Réponse 4 :** Les trois figures suivantes présentent les listes harmonisées des critères d'évaluation du coût, de la qualité, de la conception et du temps d'obtention d'une application.

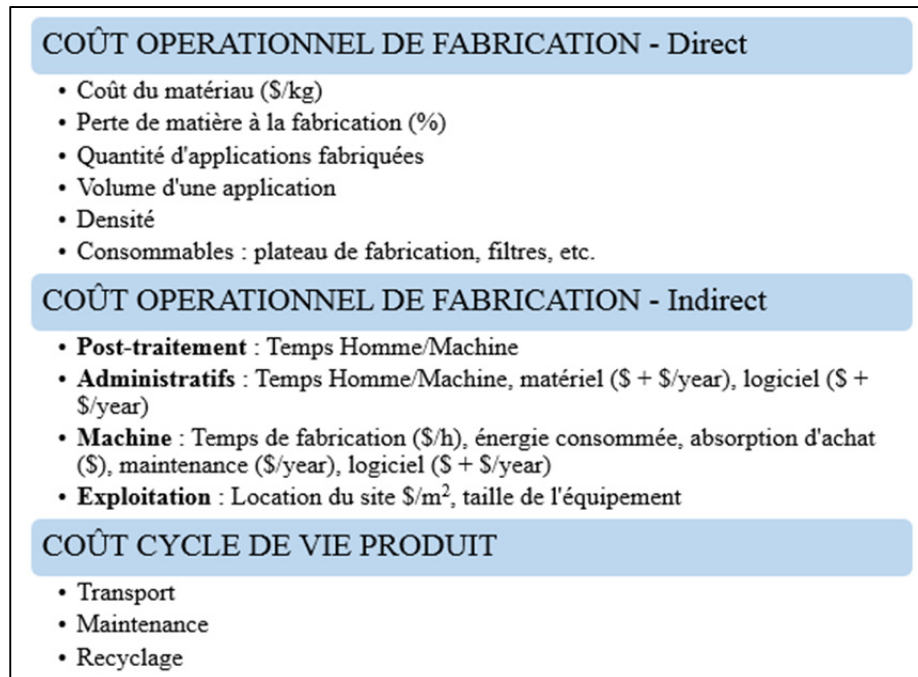


Figure-A IX-2 Critères d'évaluation du coût

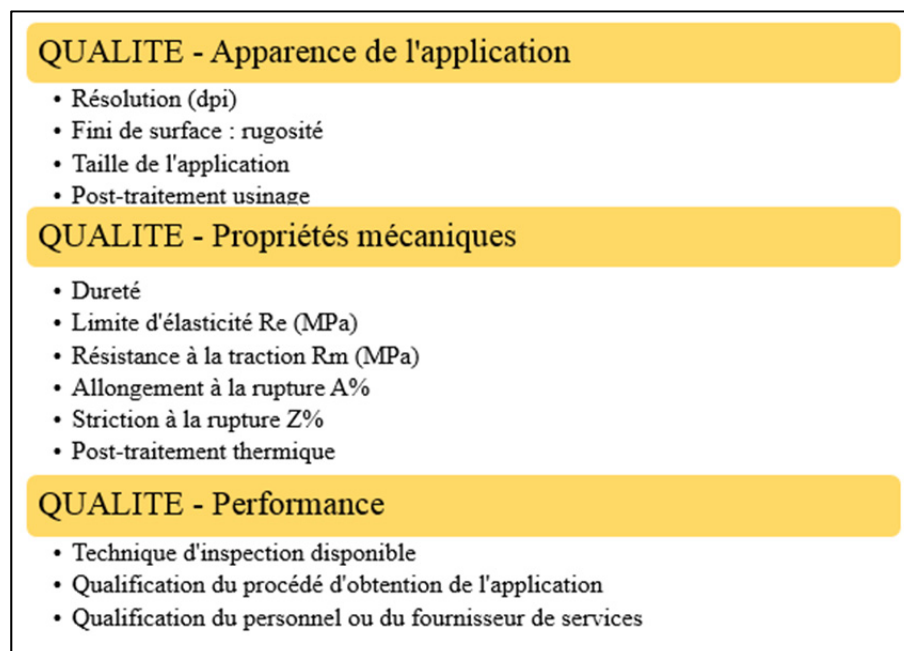


Figure-A IX-3 Critères d'évaluation de la qualité

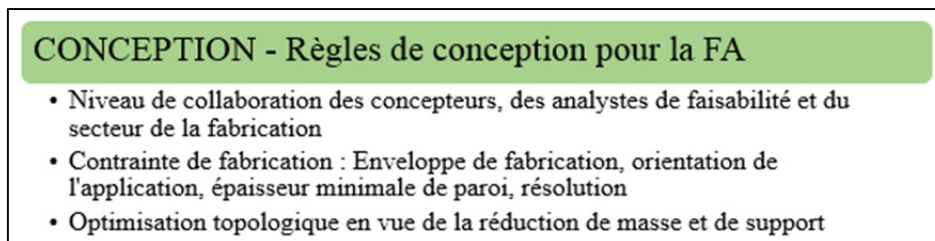


Figure-A IX-4 Critères d'évaluation de la conception

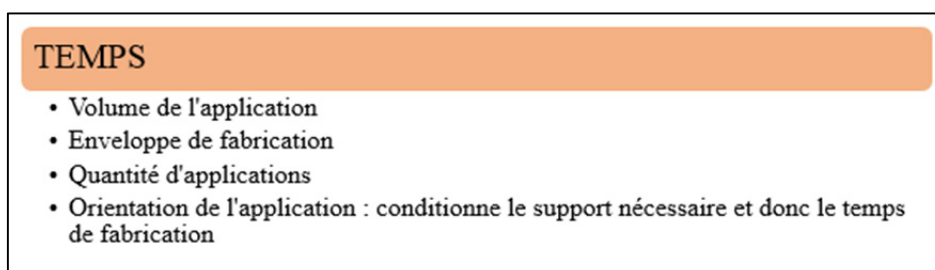


Figure-A IX-5 Critères d'évaluation du temps



## ANNEXE X

### ENTREVUE 9 – INDUSTRIEL N 11

L'étude que nous avons menée lors de l'entrevue individuelle s'est concentrée sur la validation des catégories d'applications, des pôles de décision et les catégories de critères d'évaluation de ces pôles de décision pour des applications de fabrication directe.

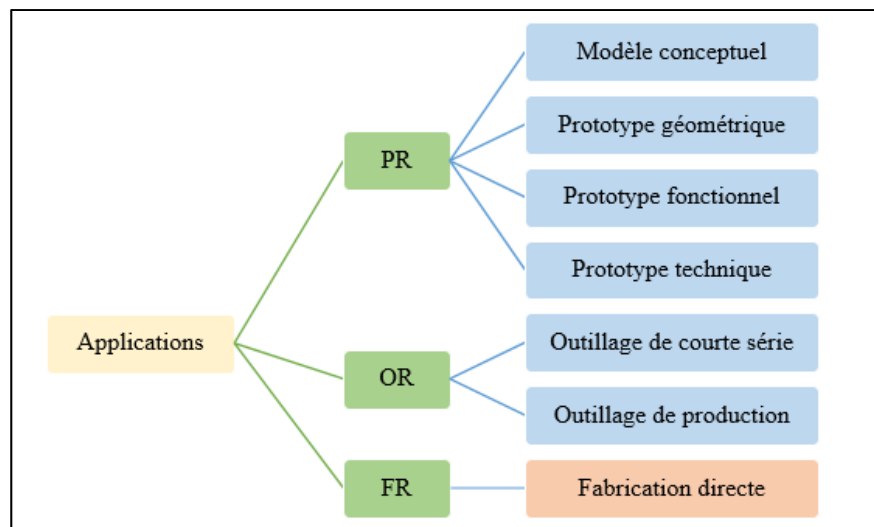


Figure-A X-1 Positionnement dans l'univers  
des types d'applications de FA  
adaptée de Gebhardt (2012) et Inconnu (1996)

**Question 1 :** Selon vous, ces catégories d'applications permettent-elles de classer les applications réalisées par FA ?

**Réponse 1 :** Je ne pense pas qu'on puisse approcher le problème de cette manière. En effet, la première question à se poser est de savoir si les applications que l'on souhaite convertir à la FA sont de bons candidats pour la FA.

**Question 2 :** Alors en partant du principe que le candidat est propice à la FA, ces catégories permettraient-elles de catégoriser les applications de FA ?

**Réponse 2 :** Je pense que oui ces catégories d'applications le permettraient, mais il ne faut pas perdre de vue qu'un produit lors de son développement va passer par la plupart de ces catégories et qu'il faut alors réfléchir au cas d'étude qu'on est en train de conduire au complet. En effet, si le client n'est pas en mesure de se positionner dans la bonne catégorie d'application, l'outil ne lui donnera pas des solutions adaptées à son besoin.

**Question 3 :** Est-ce que les définitions des catégories d'applications que nous avons données dans cette étude vous semblent explicites et permettent d'aiguiller correctement l'utilisateur au départ ?

**Réponse 3 :** Je pense qu'il faudrait préciser ces catégories avec des critères liés aux besoins du client. En effet, je pense que les définitions générales comme elles sont présentées sont encore trop vagues pour que l'utilisateur soit certain de la catégorie d'application à laquelle il fait face.

**Question 4 :** Compte tenu du profil de votre entreprise, je vous propose de positionner notre étude aujourd'hui dans la catégorie de la fabrication rapide et plus précisément de la fabrication directe. Pensez-vous que les pôles décisionnels qui ont été identifiés dans cette étude sont propices à l'évaluation des besoins de l'utilisateur.

**Réponse 4 :** Oui, je pense que ces pôles décisionnels de coût, de qualité, de conception et de délai d'obtention couvrent la prise de décision. Cependant, ils sont difficilement évaluable au sein d'un outil.

**Question 5 :** Pensez-vous que la liste des catégories de critères et leurs définitions sont complètes et permettent d'évaluer les pôles décisionnels ?

**Réponse 5 :** Cette liste présentée sur la figure suivante me semble adéquate. Cependant au niveau de la définition de ces catégories de critères je pense que certaines précisions s'imposent. En effet, la qualification du procédé d'obtention de la pièce ne me semble pas

une bonne définition de la performance. En effet, les normes qui sont, ou qui vont être mises en place pour la qualification des procédés et des matériaux ne correspondent pas à la réalité. Ces normes sont trop restrictives et les clients généralement soumettent leurs propres normes de qualification à respecter.

<b>COÛT OPERATIONNEL DE FABRICATION - Direct</b>
• Coûts liés aux besoins matériels nécessaires à fabrication de l'application.
<b>COÛT OPERATIONNEL DE FABRICATION - Indirect</b>
• Coûts supplémentaires tributaires des choix de la technologie, des post-traitements pour fabriquer l'application.
<b>COÛT CYCLE DE VIE PRODUIT</b>
• Coûts liés à l'accompagnement de l'application jusqu'à la fin de vie produit.
<b>QUALITE - Apparence de l'application</b>
• Rendu visuel final de l'application.
<b>QUALITE - Propriétés mécaniques</b>
• Niveau de résistance de l'application.
<b>QUALITE - Performance</b>
• Fonction de l'application, • Qualification du procédé d'obtention de l'application, • Qualification du personnel ou du fournisseur de service.
<b>CONCEPTION - Règles de conception pour la FA</b>
• Toutes les règles de conception par FA qui conditionnent l'obtention de l'application.
<b>TEMPS - Temps de fabrication</b>
• Temps nécessaire à l'obtention de l'application.

Figure-A X-2 Catégories de critères d'évaluation des pôles décisionnels

**Question 6 :** Quelles recommandations feriez-vous pour que cet outil permette à l'utilisateur de se positionner dans la bonne catégorie d'applications et qu'il soit en mesure d'identifier les bonnes technologies, matériaux et de post-traitements ?

**Réponse 6 :** Je pense que l'outil devrait présenter des cas concrets à l'utilisateur, lui montrer comment l'outil fonctionne au travers de ces cas d'étude. Ces exemples permettraient à la

fois à l'utilisateur de comprendre quels sont les types d'applications pour lesquelles la FA propose une réelle alternative aux procédés de fabrication conventionnels.

## ANNEXE XI

### CODE SOURCE OUTIL NO1 MICROSOFT EXCEL®

La vidéo de présentation du fonctionnement de cet outil consultable à cette adresse :

<http://opn.to/a/8zEkr>.

Voici l'ensemble des interfaces utilisateurs développées et le code VBA associé.

#### Page de connexion utilisateur

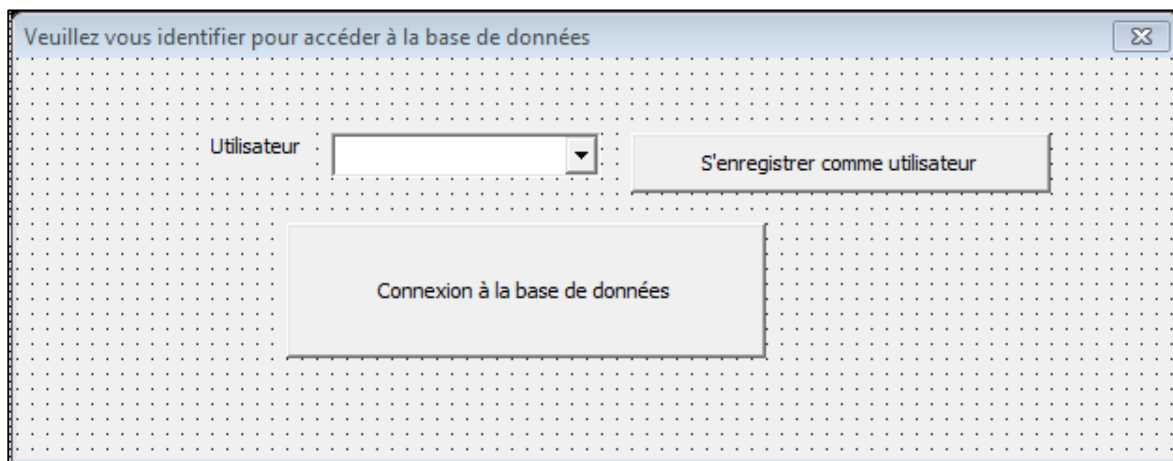


Figure-A XI-1 Page de connexion de l'utilisateur

```
Private Sub Ajouter_Commanditaire_Click()
```

```
    Userform_Connexion.Hide
```

```
    Userform_Ajout_Commanditaire.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Select_Connexion_Click()
```

```
    Userform_Connexion.Hide
```

```
    Userform_Menu_Utilisateur.Show
```

```
End Sub
```

*Private Sub UserForm\_Activate()*

*Dim Nb\_Commanditaire As Long*

*Nb\_Commanditaire = 1*

*Do While Not IsEmpty(Sheets("Interface utilisateur").Range("A" & Nb\_Commanditaire))*

*Nb\_Commanditaire = Nb\_Commanditaire + 1*

*Loop*

*Nb\_Commanditaire = Nb\_Commanditaire - 1*

*Select\_Commanditaire.List() = Sheets("Interface utilisateur").Range("A2:A" & Nb\_Commanditaire).Value*

*End Sub*

### Page de menu utilisateur

Le menu utilisateur est le lieu du choix de la fonctionnalité que l'utilisateur souhaite explorer. Il a la possibilité de mettre à jour les bases de données. Il a également la possibilité de trouver la technologies, le matériau et le post-traitement qui lui correspond.

Technologie	Fabricant	Machine	Modèle	Procédé	Enveloppe X	Enveloppe Y	Enveloppe Z
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Objet	Objet 24		234,4	192,7	148,6
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Objet	Objet 30 Pro		294	192	148,6
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 250	HQ		250	250	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 250	HS		250	250	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 500V	HQ		490	390	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 500V	HS		490	390	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	HQ		255	252	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	HS		255	252	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	DM		255	252	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	HQ		490	390	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	HS		490	390	200
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	DM		490	390	200

Figure-A XI-2 Base de données de technologies

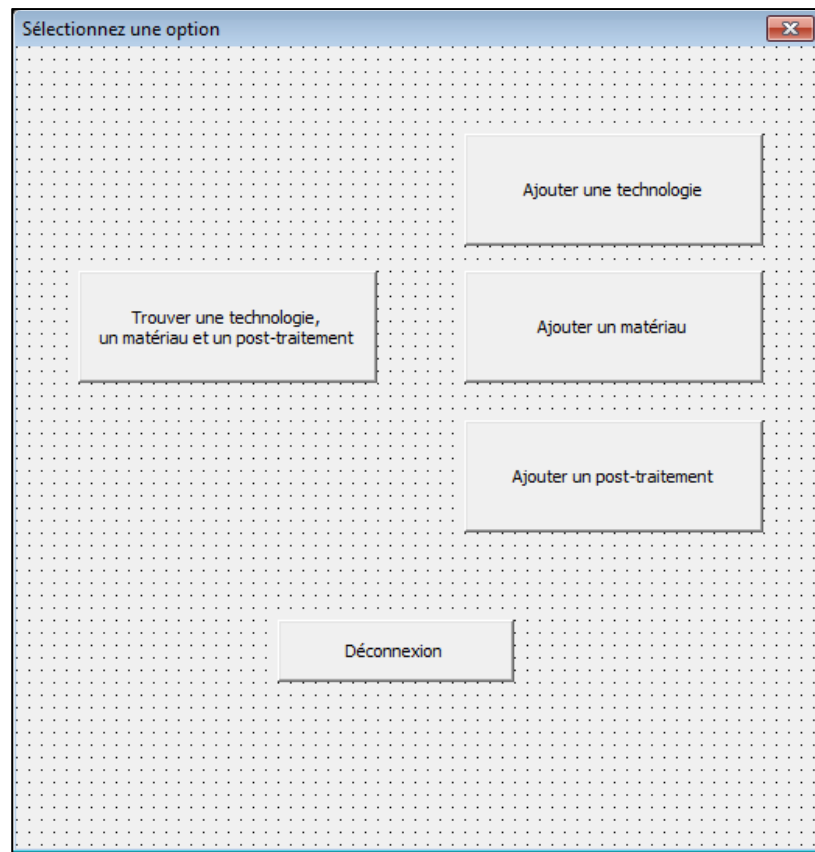


Figure-A XI-3 Page de menu utilisateur

```
Private Sub Ajout_Machine_Click()
    Userform_Menu_Utilisateur.Hide
    Userform_Ajout_Machine.Show
End Sub
```

```
Private Sub Deconnexion_Click()
    Userform_Menu_Utilisateur.Hide
    Userform_Connexion.Show
End Sub
```

```
Private Sub Select_Procede_Click()
    Userform_Menu_Utilisateur.Hide
```

*Userform\_Menu.Show*

*End Sub*

L'utilisateur peut ensuite trouver la technologie en fonction de ses besoins. C'est derrière l'interface de cette page de choix de technologie que se trouve le cœur du moteur de sélection.

### Page de choix de technologies

The screenshot shows a software window titled "Aide au choix de la technologie de FA". It contains the following sections and controls:

- Type d'application:** A dropdown menu and a button labeled "Ajouter Type Application".
- Technologie:** A dropdown menu.
- Coût (Cost):** A sub-section containing:
  - Longueur (mm): Text input field.
  - Largeur (mm): Text input field.
  - Hauteur (mm): Text input field.
  - Quantité de pièces: Dropdown menu.
  - Post-traitement: Dropdown menu.
- Qualité - Apparence (Quality - Appearance):** A sub-section containing:
  - Epaisseur minimale de paroi (mm): Text input field.
  - Résolution (mm): Text input field.
  - Précision: Text input field.
  - Exactitude: Text input field.
  - Fini de surface (um): Text input field.
  - Tolérance (um): Text input field.
- Matériau (Material):** A sub-section divided into two parts:
  - Qualité - Propriétés mécaniques (Quality - Mechanical Properties):**
    - Résistance mécanique Rm (MPa): Text input field.
    - Limite d'élasticité Re (MPa): Text input field.
    - Allongement à la rupture A%: Text input field.
    - Striction à la rupture Z%: Text input field.
    - Propriétés viscoélastiques: Dropdown menu.
    - Dureté: Text input field.
    - Fatigue: Text input field.
    - Déflexion thermique: Text input field.
    - Densité: Text input field.
    - Résistance diélectrique: Text input field.
  - Qualité - Performance (Quality - Performance):**
    - Réquis sanitaires: Check box.
    - Résistance au feu: Check box.
    - Résistance à la corrosion: Check box.
    - Capacité d'absorption: Text input field.
- Coût (Cost):** A sub-section at the bottom right containing:
  - Type de matériau: Dropdown menu.
  - Volume de l'application (m3): Text input field.
- Buttons at the bottom:** "Valeur par défaut", "Trouver un procédé adapté", and "Retour au Menu".

Figure-A XI-4 Page de choix de technologies



*Private Sub Ajouter\_Application\_Click()*

*Userform\_Menu.Hide*

*Userform\_Ajout\_Application.Show*

*End Sub*

*Private Sub Ajouter\_Commanditaire\_Click()*

*Userform\_Menu.Hide*

*Userform\_Ajout\_Commanditaire.Show*

*End Sub*

*Private Sub Epaisseur\_Click()*

*End Sub*

*Private Sub Fermer\_Click()*

*Userform\_Menu.Hide*

*Userform\_Menu\_Utilisateur.Show*

*End Sub*

*Private Sub Trouver\_Procede\_Click()*

*Dim Nb\_Machine As Long*

*Nb\_Machine = 1 'première ligne à vérifier*

*Do While Not IsEmpty(Sheets("Base de données").Range("A" & Nb\_Machine))*

*Nb\_Machine = Nb\_Machine + 1*

*Loop*

*Nb\_Machine = Nb\_Machine - 1*

*'Phase de sélection en fonction de l'épaisseur minimale*

*'On initialise les valeurs minimales et maximales pour la sélection de machines*

*If Select\_Epaisseur.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C2")*

*Then*

*Epaisseur\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D2").Value*

*Epaisseur\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E2").Value*

*ElseIf Select\_Epaisseur.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C3").Value Then*

*Epaisseur\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D3")*

*Epaisseur\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E3")*

*ElseIf Select\_Epaisseur.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C4").Value Then*

*Epaisseur\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D4")*

*Epaisseur\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E4")*

*End If*

*If Select\_Fini\_Surface.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C8")*

*Then*

*Fini\_Surface\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D8").Value*

*Fini\_Surface\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E8").Value*

*ElseIf Select\_Fini\_Surface.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C9").Value Then*

*Fini\_Surface\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D9").Value*

*Fini\_Surface\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E9").Value*

*ElseIf Select\_Fini\_Surface.Value = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C10").Value Then*

*Fini\_Surface\_Mini = Sheets("Système de base de connaissance").Range("D10").Value*

*Fini\_Surface\_Maxi = Sheets("Système de base de connaissance").Range("E10").Value*

*End If*

*j = 2*

*i = 2*

*For i = 2 To Nb\_Machine*

*If Sheets("Base de données").Range("J" & i) >= Epaisseur\_Mini And Sheets("Base de données").Range("K" & i) <= Epaisseur\_Maxi And Select\_Epaisseur.Value <> "" Then*

*Sheets("Base de données").Activate*

*Sheets("Base de données").Rows(i).Select*

*Selection.Copy*

*Sheets("Sélection").Activate*

*Sheets("Sélection").Range("A" & j).Select*

*Selection.PasteSpecial*

*j = j + 1*

*End If*

*Next*

*Dim Nb\_Selection As Long*

*Nb\_Selection = 1 'première ligne à vérifier*

*Do While Not IsEmpty(Sheets("Sélection").Range("A" & Nb\_Selection))*

*Nb\_Selection = Nb\_Selection + 1*

*Loop*

*Nb\_Selection = Nb\_Selection - 1*

*For i = 2 To Nb\_Selection*

*If Sheets("Sélection").Range("A" & i) <> Select\_Technologie And Select\_Technologie <> "" And Sheets("Sélection").Range("A" & i) <> "" Then*

*Worksheets("Sélection").Activate 'Activation de la feuille*

*ActiveSheet.Rows(i).Select 'Sélection de la plage*

*Selection.Delete Shift:=xlUp 'Action sur la plage sélectionnée*

*'c'est parce qu'on diminue le nombre de ligne de 1 donc il ne faut pas en sauter une*

*i = i - 1*

*End If*

*Next*

*Nb\_Selection = 1 'première ligne à vérifier*

*Do While Not IsEmpty(Sheets("Sélection").Range("A" & Nb\_Selection))*

*Nb\_Selection = Nb\_Selection + 1*

*Loop*

*Nb\_Selection = Nb\_Selection - 1*

*'Initialisation des variable au cas où l'utilisateur ne rentre aucune valeur*

*If Select\_Longueur = "" Then*

*Select\_Longueur = "1"*

*End If*

*If Select\_Largeur = "" Then*

*Select\_Largeur = "1"*

*End If*

*If Select\_Hauteur = "" Then*

*Select\_Hauteur = "1"*

*End If*

*For i = 2 To Nb\_Selection*

*If CDbl(Sheets("Sélection").Range("F" & i)) < CDbl(Select\_Longueur) And*

*CDbl(Sheets("Sélection").Range("F" & i)) <> 0 Then*

*Worksheets("Sélection").Activate 'Activation de la feuille*  
*ActiveSheet.Rows(i).Select 'Sélection de la plage*  
*Selection.Delete Shift:=xlUp 'Action sur la plage sélectionnée*

*'c'est parce qu'on diminue le nombre de ligne de 1 donc il ne faut pas en sauter une*  
*i = i - 1*

*ElseIf CDBl(Sheets("Sélection").Range("G" & i)) < CDBl(Select\_Largeur) And*  
*CDBl(Sheets("Sélection").Range("G" & i)) <> 0 Then*

*Worksheets("Sélection").Activate 'Activation de la feuille*  
*ActiveSheet.Rows(i).Select 'Sélection de la plage*  
*Selection.Delete Shift:=xlUp 'Action sur la plage sélectionnée*

*'c'est parce qu'on diminue le nombre de ligne de 1 donc il ne faut pas en sauter une*  
*i = i - 1*

*ElseIf CDBl(Sheets("Sélection").Range("H" & i)) < CDBl(Select\_Hauteur) And*  
*CDBl(Sheets("Sélection").Range("H" & i)) <> 0 Then*

*Worksheets("Sélection").Activate 'Activation de la feuille*  
*ActiveSheet.Rows(i).Select 'Sélection de la plage*  
*Selection.Delete Shift:=xlUp 'Action sur la plage sélectionnée*

*'c'est parce qu'on diminue le nombre de ligne de 1 donc il ne faut pas en sauter une*  
*i = i - 1*

*End If*  
*Next*

*End Sub*

*Private Sub UserForm\_Activate()*

*Dim Nb\_Application As Long*

*Nb\_Application = 1*

*Do While Not IsEmpty(Sheets("Système de base de connaissance").Range("G" & Nb\_Application))*

*Nb\_Application = Nb\_Application + 1*

*Loop*

*Nb\_Application = Nb\_Application - 1*

*Select\_Application.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("G2:G" & Nb\_Application).Value*

*Select\_Technologie.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C18:C24").Value*

*Select\_Epaisseur.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C2:C4").Value*

*Select\_Resolution.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C5:C7").Value*

*Select\_Fini\_Surface.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C8:C10").Value*

*Select\_Nb\_Pieces.List() = Sheets("Système de base de connaissance").Range("C11:C14").Value*

*End Sub*

La Figure-A XI-4 présente le paramétrage choisi pour l'évaluation qualitative des critères d'aide à la décision. Il est possible de changer le paramétrage en changeant les valeurs ou en rajouter dans possibilité directement dans les cases ou les colonnes correspondantes. Cela permet de rajouter un niveau de flexibilité à l'outil et d'éviter de devoir retourner dans le code VBA présenté précédemment.

Niveau	Min	Max		Application	Secteur	Technologie
Très fin		0,005		gabarit	mécanique	Dépôt de matériau et fusion
Moyen	0,005	0,02		pièce	expérimental	Extrusion de matériau
Epais	0,02	1000000		outil manuel	conception	Photopolymérisation en cuve
						Fusion sur lit de poudre
						Projection de matière
						Stratification de matériau en feuille
Excellent		0,0032				Projection de liant
Bon	0,0032	0,0125				
Brut	0,0125	100000				
One		1				
Faible	2	20				
Moyen	20	50				
Important	50	20000000				

Figure-A XI-5 Système de base de connaissances





## ANNEXE XII

### CODE SOURCE OUTIL NO2 MICROSOFT ACCESS®

Le second outil conçu est présenté dans la vidéo à cette adresse : <http://opn.to/a/e4UEp>.

Etant donné que tout est sous Microsoft Access®, nous allons présenter l'ensemble de l'interface utilisateur ainsi que la table des bases de données réalisée. Il n'y a pas de code VBA, si ce n'est quelques macro qui ont été introduite entre les pages de l'outil pour faciliter l'enregistrement et la mise à jour des bases données présentes.

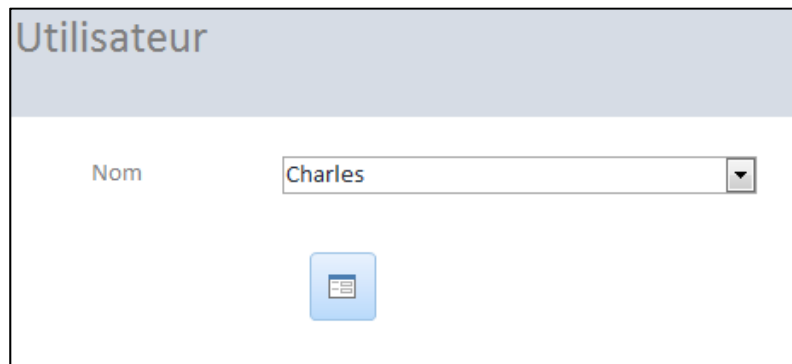


Figure-A XII-1 Page de connexion utilisateur

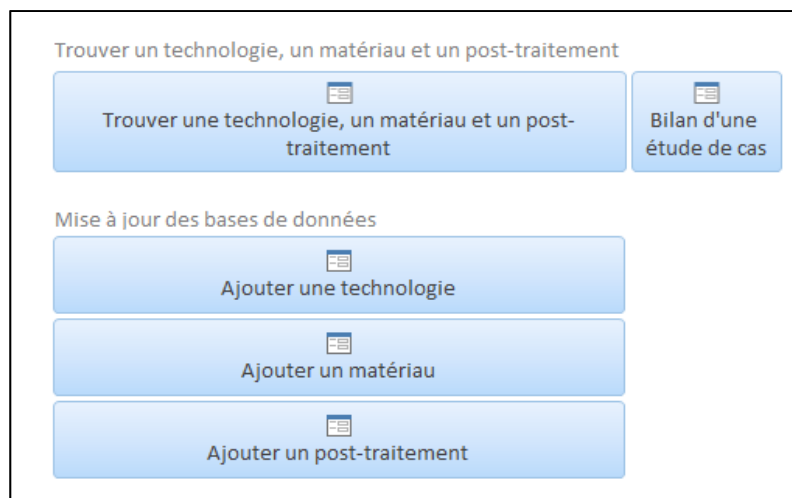


Figure-A XII-2 Menu utilisateur

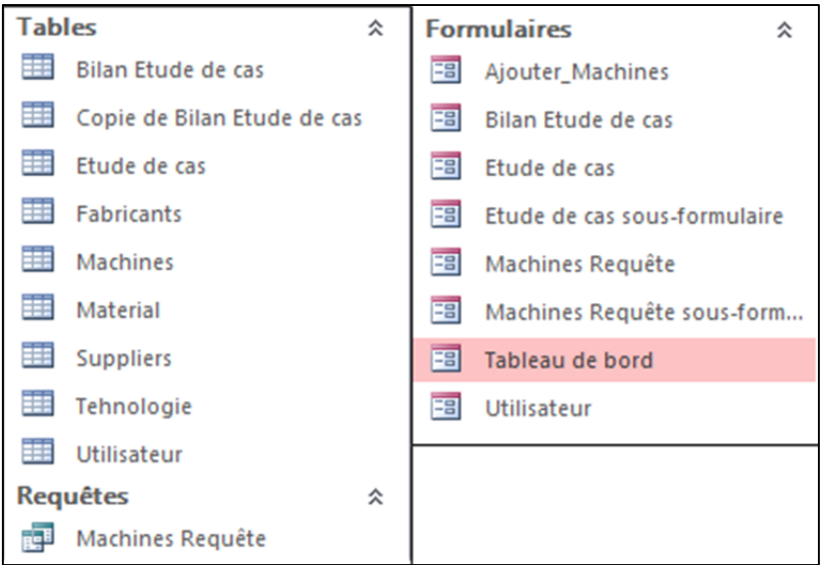


Figure-A XII-3 Tables formulaires et requêtes

Technologie **Matériau**

Type de technologie: 0

**Coût**

Longueur (mm): 100

Largeur (mm): 100

Hauteur (mm): 100

Quantité de p: 0

Post-traitement: 0

**Qualité - Apparence**

Epaisseur minimale de paroi (mm): 100

Résolution (mm): 100

Précision: 100

Exactitude: 0

Fini de surface (um): 0

Tolérance (um): 0

Figure-A XII-4 Trouver une technologie, un matériau et un post-traitement

Technologie	Fabricant	Machine	Modèle	Enveloppe X	Enveloppe Y	Enveloppe Z	Epaisseur
Fusion sur lit de poudre	Stratasys	Objet	Objet 24	234	193	149	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Objet	Objet 30 Pro	294	192	149	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 250	HQ	250	250	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 250	HS	250	250	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 500V	HQ	490	390	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Eden 500V	HS	490	390	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	HQ	255	252	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	HS	255	252	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 260	DM	255	252	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	HQ	490	390	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	HS	490	390	200	
Dépôt de matériau et fusion	Stratasys	Connex 500	DM	490	390	200	
Dépôt de matériau et fusion	SolidScape	D76 Plus	D76 Plus	152	152	102	
Dépôt de matériau et fusion	3DSystem	SD 3500	HD	298	185	203	
Dépôt de matériau et fusion	3DSystem	SD 3501	UHD	298	185	203	

Enr : 6 sur 86    Aucun filtre    Rechercher    4

Figure-A XII-5 Résultat du choix utilisateur en temps réel

Utilisateur	<input type="text"/>		
N° Etude de cas	<input type="text"/>		
Technologie	<input type="text"/>		
Longueur	<input type="text"/>	Coût	Succès <input type="text"/>
Largeur	<input type="text"/>	Qualité	Echec <input type="text"/>
Hauteur	<input type="text"/>	Bilan Global	Succès <input type="text"/>
épaisseur minimale de paroi	<input type="text"/>		<input type="button" value="Rechercher"/>

Figure-A XII-6 Bilan des études de cas



## ANNEXE XIII

### CODE SOURCE OUTIL NO3 EN LIGNE RAPIDMINER®

Ce troisième et dernier outil conçu en ligne associé à RapidMiner® est présenté dans la vidéo disponible à cette adresse : <http://opn.to/a/cm6RQ>.

#### Processus de sélection de technologies

Le premier processus développé sous RapidMiner® est un processus de sélection des technologies. Ce processus s'étale sur trois niveaux. Le premier niveau présenté sur la Figure-A XIII-1 correspond à la collecte des demandes des utilisateurs issus de la plateforme en ligne (<http://opn.to/a/NcpR3>). Dans un second temps, les données sont vérifiées grâce à un filtre. Cela permet d'éliminer les demandes où les utilisateurs auraient pu glisser de mauvaises informations qui pourraient bloquer le moteur de sélection.

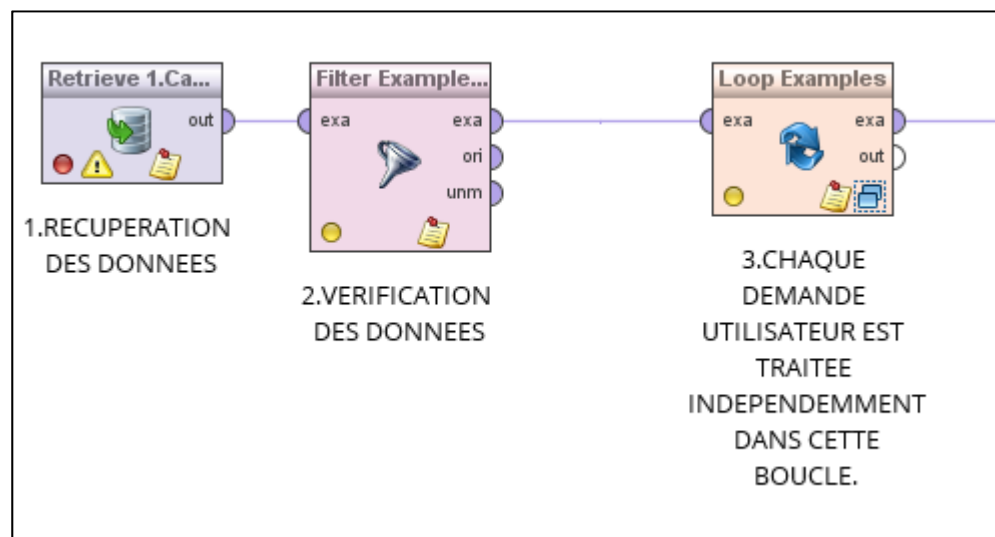


Figure-A XIII-1 Niveau 1 de récupération des demandes utilisateurs en ligne

Dans un second temps et à un second niveau, le processus de sélection entre dans une première boucle pour traiter individuellement chacune des demandes des utilisateurs en ligne.

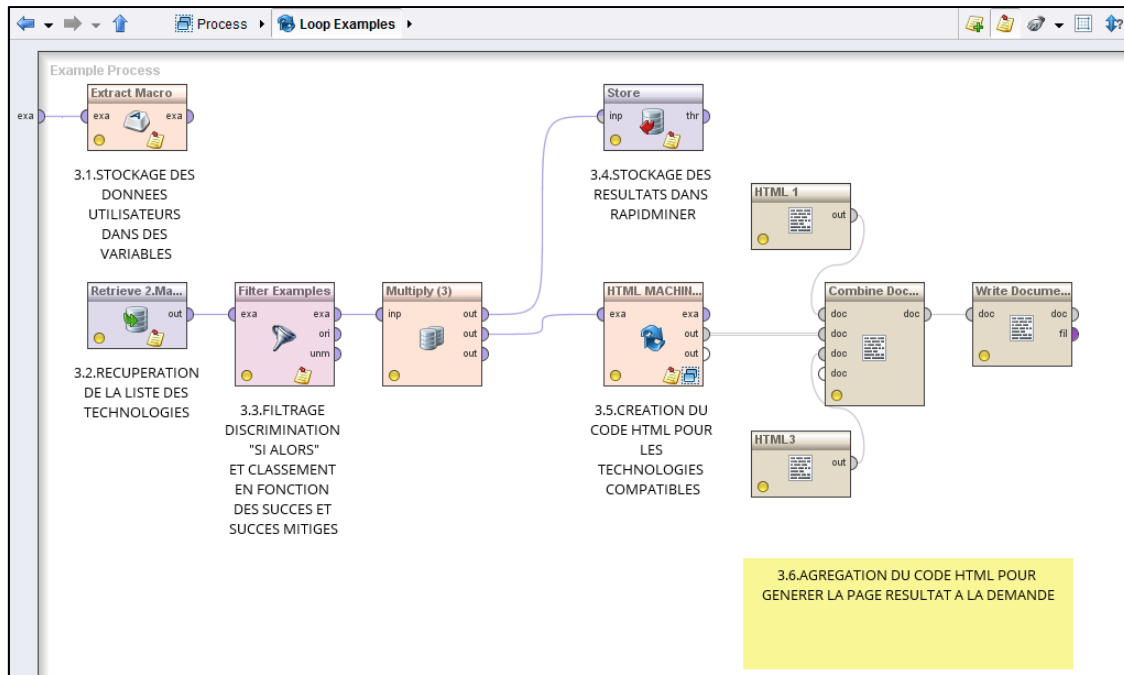


Figure-A XIII-2 Niveau 2 du processus de sélection des technologies

RapidMiner<sup>®</sup> extrait les variables issues des demandes utilisateurs et les stocke en 3.1 dans des variables temporaires. Ensuite, RapidMiner<sup>®</sup> récupère les technologies issues de la base de données en 3.2 et vient filtrer les technologies de façon discriminantes en 3.3. Dans la base de données les technologies possèdent une côte de succès et de succès mitigé du fait des études de cas capitalisées. Voici l'exemple du code qui a été testé dans cet outil pour la discrimination au niveau de l'enveloppe de fabrication des technologies.

### Filter examples

```
[Length (mm)]>=eval(%{Length})&&[Width (mm)]>=eval(%{Width})&&[Height (mm)]>=eval(%{Height})
```

Cela permet dans un troisième temps de rentrer dans la phase de création d'une page HTML de résultat des technologies possibles. Pour cela, on agrège le haut du code HTML de la page grâce au code HTML1, de l'ensemble du code HTML généré dans la boucle *HTML*

*MACHINES* et du code HTML de fin de la page présent dans HTML2. L'ensemble de ce code est ici.

## HTML1

```
<!DOCTYPE html>

<!--[if IE 8]> <html lang="en" class="ie8"> <![endif]-->
<!--[if IE 9]> <html lang="en" class="ie9"> <![endif]-->
<!--[if !IE]><!--> <html lang="en"> <!--<![endif]-->

<head>
  <title>AMDSS RapidMiner</title>

  <!-- Meta -->
  <meta charset="utf-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <meta name="description" content="">
  <meta name="author" content="">

  <!-- Favicon -->
  <link rel="shortcut icon" href="favicon.ico">

  <!-- Web Fonts -->
  <link rel='stylesheet' type='text/css'
href="//fonts.googleapis.com/css?family=Open+Sans:400,300,600&subset=cyrillic,latin">

  <!-- CSS Global Compulsory -->
  <link rel="stylesheet" href="assets/plugins/bootstrap/css/bootstrap.min.css">
  <link rel="stylesheet" href="assets/css/style.css">

  <!-- CSS Header and Footer -->
```

```

<link rel="stylesheet" href="assets/css/headers/header-v6.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/css/footers/footer-default.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/css/headers/header-v2.css">

<!-- CSS Implementing Plugins -->
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/animate.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/line-icons/line-icons.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/font-awesome/css/font-awesome.min.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/revolution-slider/rs-plugin/css/settings.css"
type="text/css" media="screen">
<!--[if lt IE 9]><link rel="stylesheet" href="assets/plugins/revolution-slider/rs-
plugin/css/settings-ie8.css" type="text/css" media="screen"><![endif]-->
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/cube-
portfolio/cubeportfolio/css/cubeportfolio.min.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/cube-portfolio/cubeportfolio/custom/custom-
cubeportfolio.css">
<link rel="stylesheet" href="assets/plugins/owl-carousel/owl-carousel/owl.carousel.css">

<!--Pour le bouton descendre en haut de page -->
<link rel="stylesheet" href="assets/css/pages/page_job_inner.css">

<!-- CSS Customization -->
<link rel="stylesheet" href="assets/css/custom.css">

<!-- CSS pour l'actu chaude -->
<link rel="stylesheet" href="assets/css/pages/shortcode_timeline2.css">

</head>

<body class="header-fixed">

```



```

<!--=== Script d'initialisation FB ===-->
<div id="fb-root"></div>
<script>(function(d, s, id) {
  var js, fjs = d.getElementsByTagName(s)[0];
  if (d.getElementById(id)) return;
  js = d.createElement(s); js.id = id;
  js.src = "//connect.facebook.net/en_US/sdk.js#xfbml=1&version=v2.4";
  fjs.parentNode.insertBefore(js, fjs);
}(document, 'script', 'facebook-jssdk'));</script>
<!--=== End Script d'initialisation FB ===-->

<div class="wrapper">

  <!--=== Header v2 ===-->
  <div class="header-v6 header-white-transparent header-sticky">
    <!-- Navbar -->
    <div class="navbar navbar-default mega-menu" role="navigation">
      <div class="navbar-header">
        <ul class="nav navbar-nav">
          <li><a href="index.html"><b>AMDSS - RapidMiner</b></a></li>
        </ul>
      </div>
    </div>

    <div class="container container-space">
      <!-- Brand and toggle get grouped for better mobile display -->
      <div class="navbar-header">
        <button type="button" class="navbar-toggle" data-toggle="collapse" data-
target=".navbar-responsive-collapse">
          <span class="sr-only">Toggle navigation</span>
          <span class="fa fa-bars"></span>

```

```

        </button>
    </div>
    <!-- Collect the nav links, forms, and other content for toggling -->
    <div class="collapse navbar-collapse">
        <ul class="nav navbar-nav">
            <!-- Home -->
            <li><a href="index.html#Form">Make a demand</a></li>
        <li><a href="Contact.html">Contact Us</a></li>
        <li><a href="#French">Français</a></li>
        </ul>
    </div><!--/navbar-collapse-->
</div>
<!-- End Navbar -->
</div>
<!--==== End Header v2 ====-->

<!--==== Image Gradient ====-->
<div class="interactive-slider-v3 parallaxBg">
    <div class="container">
        <h1>Results Demand n°%{Loop_Case_Studies}</h1>
        <p>These are the possible supplier, process, materials that corresponds to your needs.
        Select your preference. </p>
        <a href="#Form"><p><span class="item"><i class="fa fa-angle-double-
        down"></i></span></p></a>
    </div>
</div>
<!--==== End Image Gradient ====-->

<!--==== Form ====-->

```

```

<div id="Form" class="service-info margin-bottom-20">
<!-- Content Part -->
<div class="container content">
<div id="wufoo-x1crbhr40gvapvj">
Fill out my <a href="https://gaelbuvat.wufoo.com/forms/x1crbhr40gvapvj">online
form</a>.
</div>
<script type="text/javascript">var x1crbhr40gvapvj;(function(d, t) {
var s = d.createElement(t), options = {
'userName':'gaelbuvat',
'formHash':'x1crbhr40gvapvj',
'autoResize':true,
'height':'440',
'async':true,
'host':'wufoo.com',
'header':'show',
'ssl':true};
s.src = ('https:' == d.location.protocol ? 'https://' : 'http://') +
'www.wufoo.com/scripts/embed/form.js';
s.onload = s.onreadystatechange = function() {
var rs = this.readyState; if (rs) if (rs != 'complete') if (rs != 'loaded') return;
try { x1crbhr40gvapvj = new
WufooForm();x1crbhr40gvapvj.initialize(options);x1crbhr40gvapvj.display(); } catch (e)
{};
var scr = d.getElementsByTagName(t)[0], par = scr.parentNode; par.insertBefore(s, scr);
})(document, 'script');</script>
</div>
</div>
<!--=== End Form ===-->

```

```

<!--=== Cube-Portfolio ===-->
<div class="cube-portfolio container margin-bottom-60">
  <div class="content-xs">
    <div id="filters-container" class="cbp-l-filters-text content-xs">
      <div data-filter="*" class="cbp-filter-item-active cbp-filter-item"> All </div> |
      <div data-filter=".identity" class="cbp-filter-item"> Cost </div> |
      <div data-filter=".web-design" class="cbp-filter-item"> Quality </div> |
      <div data-filter=".graphic" class="cbp-filter-item"> Delai </div> |
      <div data-filter=".logos" class="cbp-filter-item"> Quantity of datas </div>
    </div><!--/end Filters Container-->
  </div>

  <div id="grid-container" class="cbp-l-grid-agency">

```

## HTML MACHINES

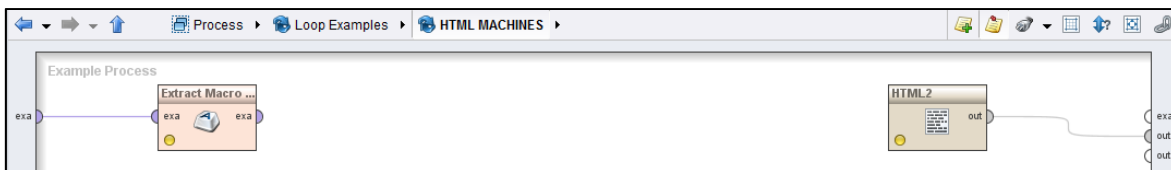


Figure-A XIII-3 Niveau 3 de génération du code HTML propre aux technologies solutions

```

<div class="cbp-item web-design graphic">
  <div class="cbp-caption margin-bottom-20">
    <div class="cbp-caption-defaultWrap">
      
    </div>
    <div class="cbp-caption-activeWrap">
      <div class="cbp-l-caption-alignCenter">
        <div class="cbp-l-caption-body">
          <ul class="link-captions no-bottom-space">

```

```

        <li><a href="portfolio_single_item.html"><i class="rounded-x fa
fa-link"></i></a></li>
        <li><a href="assets/img/Machines/%{Machine_Id}.jpg" class="cbp-
lightbox" data-title="Design Object"><i class="rounded-x fa fa-search"></i></a></li>
    </ul>
</div>
</div>
</div>
</div>
<div class="cbp-title-dark">
<div class="cbp-l-grid-agency-title"><b>Modèle :</b> %{Model}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Machine :</b> %{Machine}</div>
    <div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Fabricant :</b> %{Fabricant}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Process :</b> %{Process}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Average Cost per part :</b>
%{Average_Cost}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Length (mm) :</b> %{Length}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Width (mm) :</b> %{Width}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Height (mm) :</b> %{Height}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Min Wall thickness (mm) :</b>
%{Min_Wall_Thickness}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Accuracy (um) :</b> %{Accuracy}</div>
<div class="cbp-l-grid-agency-desc"><b>Machine Cost (k$) :</b>
%{Machine_Cost}</div>
    </div>
</div>

```

**HTML2**

```

</div><!--/end Grid Container-->

</div>

<!--==== End Cube-Portfdlio ====-->

<!--==== Footer ====-->

<div id="footer-default" class="footer-default">
  <div class="footer">
    <div class="container">
      <div class="row">
        <div class="col-md-4 md-margin-bottom-40">
          <!-- Contact Us -->
          <h2>Contact Us</h2>
          <address class="md-margin-bottom-40">
            Montreal, QC <br />
            <b>Email:</b> gael.buvat.1 at ens.etsmtl.ca <br />
            <b>Phone:</b> +1-514-549-5136 <br />
          </address>
          <!-- End Contact Us -->
        </div><!--/col-md-4-->

        <div class="col-md-8">

          </div><!--/col-md-4-->
        </div>
      </div>
    </div><!--/footer-->

    <div class="copyright">
      <div class="container">
        <div class="row">

```

```

        <p>
            2015 &copy; Ecole de Technologie Supérieure Inc. ALL Rights Reserved.
            <a href="#">Privacy Policy</a> | <a href="TOS.html">Terms of
Service</a>
        </p>

    </div>
</div>
</div><!--/copyright-->
</div>
<!--=== End Footer ===-->
</div><!--/wrapper-->

<!-- JS Global Compulsory -->
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/jquery/jquery.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/jquery/jquery-migrate.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/bootstrap/js/bootstrap.min.js"></script>
<!-- JS Implementing Plugins -->
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/back-to-top.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/smoothScroll.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/jquery.parallax.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/counter/waypoints.min.js"></script>
<script type="text/javascript"
src="assets/plugins/counter/jquery.counterup.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/revolution-slider/rs-
plugin/js/jquery.themepunch.tools.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/revolution-slider/rs-
plugin/js/jquery.themepunch.revolution.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/cube-
portfolio/cubeportfolio/js/jquery.cubeportfolio.min.js"></script>

```

```
<script type="text/javascript" src="assets/plugins/owl-carousel/owl-
carousel/owl.carousel.js"></script>
```

```
<!-- JS Customization -->
```

```
<script type="text/javascript" src="assets/js/custom.js"></script>
```

```
<script type="text/javascript" src="assets/js/plugins/cube-portfolio/cube-portfolio-
3.js"></script>
```

```
<script type="text/javascript" src="assets/js/plugins/owl-carousel.js"></script>
```

```
<!-- JS Page Level -->
```

```
<script type="text/javascript" src="assets/js/app.js"></script>
```

```
<script type="text/javascript" src="assets/js/plugins/revolution-slider.js"></script>
```

```
<script type="text/javascript">
```

```
    jQuery(document).ready(function() {
        App.init();
        App.initCounter();
        App.initParallaxBg();
        OwlCarousel.initOwlCarousel();
        RevolutionSlider.initRSfullScreenOffset();
    });
```

```
</script>
```

```
<script src="js/grayscale.js"></script>
```

```
<!--[if lt IE 9]>
```

```
    <script src="assets/plugins/respond.js"></script>
```

```
    <script src="assets/plugins/html5shiv.js"></script>
```

```
    <script src="assets/plugins/placeholder-IE-fixes.js"></script>
```

```
<![endif]-->
```

```
</body>
```

```
</html>
```



Dans un second temps, nous avons imaginé créer un modèle de succès à partir d'une base de données des retours des études de cas capitalisées. Cela permettrait de créer un modèle de succès et de succès mitigé à partir de toutes ces études de cas. L'utilisateur aurait ainsi accès à des critères décisifs de succès et de succès mitigés. Voici le processus qui a été créé en vue de cela.

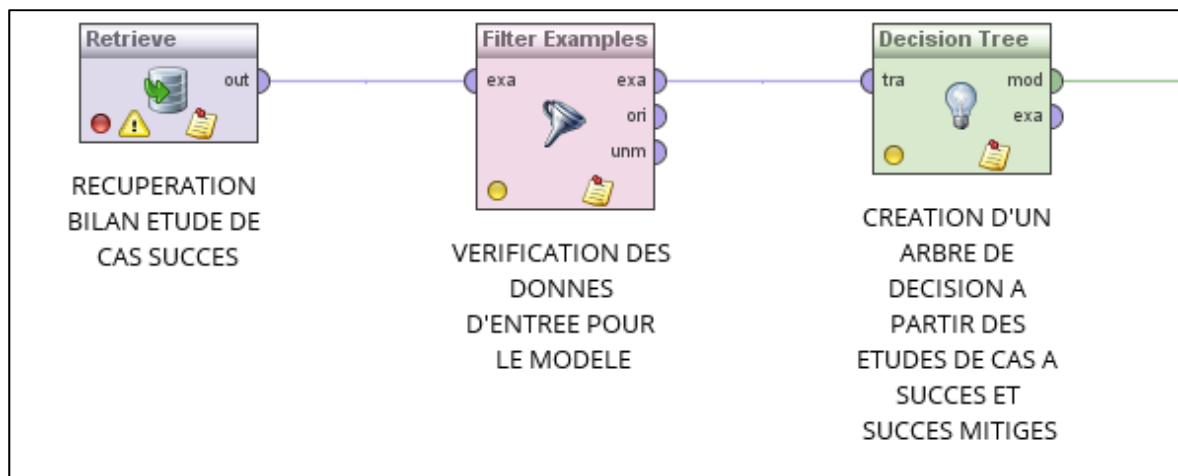


Figure-A XIII-4 Création d'un modèle de succès

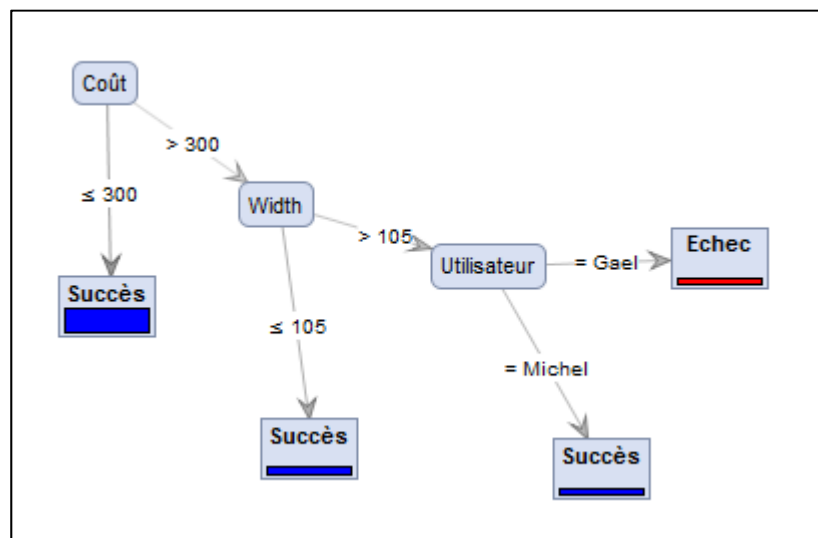


Figure-A XIII-5 Exemple d'arbre de la décision de succès

Dans un désir d'exploiter les études de cas capitalisées, nous avons également souhaité développer un processus de création de modèle de choix de technologies à partir des études de cas à succès livrées par les utilisateurs. Cela permettrait de créer un modèle d'orientation vers des technologies non seulement basé sur les critères discriminants livrés par l'utilisateur, mais également sur ce modèle de succès. Ce modèle pourrait étudier l'étude de cas en cours, identifier des cas similaires et identifier des technologies qui ont eu un grand succès par le passé.

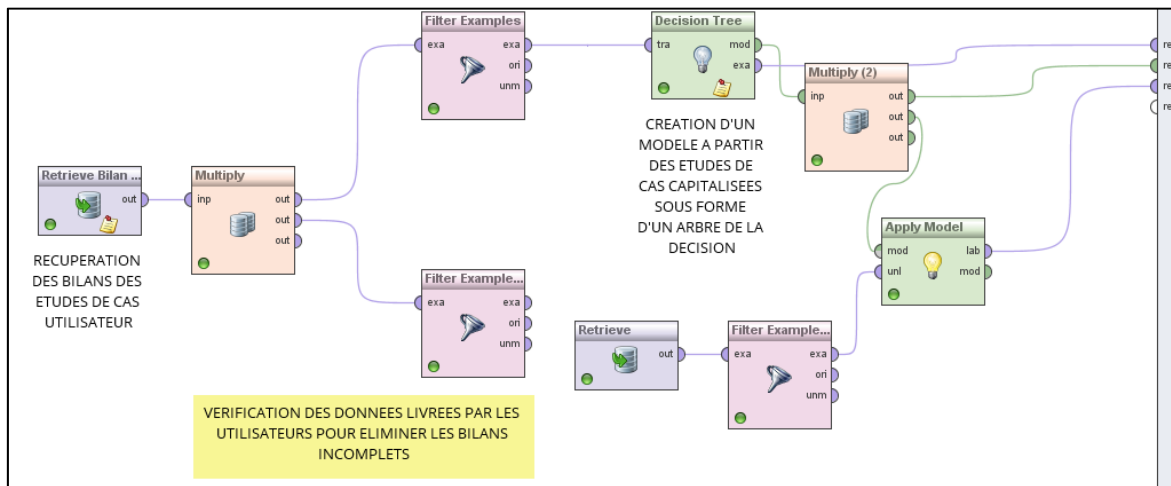


Figure-A XIII-6 Processus de création d'identification de technologies basé sur un arbre de la décision

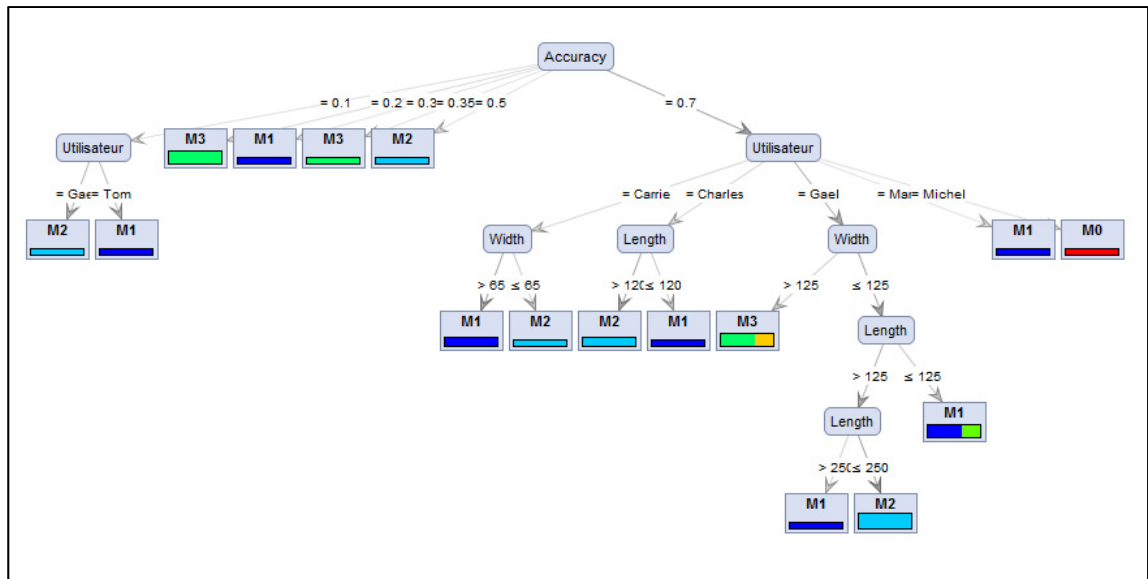


Figure-A XIII-7 Exemple de modèle de sélection de technologies préférentiel basé sur un arbre de la décision



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barlier, Claude, et Alain Bernard. 2015. *Fabrication additive: Du Prototypage Rapide à l'impression 3D*. Paris: Dunod, 400 p.
- Bernal, Luis, Utz Donberger, Alfredo Suvelza et Trevor Byrnes. 2009. *Quality Function Deployment (QFD) for Services*. Coll. « Handbook International SEPT Program ». Leipzig: Universitat Leipzig, 25 p.
- Bernard, A, et A Deglin. 1999. « Knowledge-based system for the choice of rapid prototyping process ». In *Proceedings of the 10th Solid Freeform Fabrication Symposium*. (University of Texas), p. 39-46.
- Burstein, Frada, et Clyde Holsapple (886). 2008. *Handbook on Decision Support Systems 1 Basic Themes* (2008). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Byun, H. S., et K. H. Lee. 2005. « A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, n° 11, p. 1338-1347.
- Campbell, R. I., et M. R. N. Bernie. 1996. « Creating a database of rapid prototyping system capabilities ». *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 61, n° 1, p. 163-167.
- Conner, Brett P., Guha P. Manogharan, Ashley N. Martof, Lauren M. Rodomsky, Caitlyn M. Rodomsky, Dakesha C. Jordan et James W. Limperos. 2014. « Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services ». *Additive Manufacturing*, vol. 1-4, p. 64-76.
- Dahan, Ely. 1998. « Listening to the customer ». *Teaching note. John R. Hauser. The virtual customer: Communication, conceptualization, and computation.* .
- Dresch, Aline, Daniel Pacheco Lacerda et José Antônio Valle Antunes Jr. 2015. *Design Science Research : A Method for Science and Technology Advancement* (2015). Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 1 ressource en ligne (XVIII, 161 p.) p.
- Edwards, Ward, et F. Hutton Barron. 1994. « SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement ». *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 60, n° 3, p. 306-325.
- Gebhardt, Andreas. 2012. « Understanding additive manufacturing rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing ». In. (Munich, Cincinnati, 2012), p. 164. Hanser

- Publishers. En ligne. < <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpUAMRPRT5> >. Consulté le 12 mars 2016.
- Ghazy, Mootaz Mamdouh Sayed Ahmed. 2012. « Development of an additive manufacturing decision support system (AMDSS) ». Newcastle University, 245 p.
- Gibson, Ian (380). 2002. *Software solutions for rapid prototyping* (2002). London: Professional Engineering Pub.
- Gibson, Ian, David Rosen et Brent Stucker. 2015. *Additive Manufacturing Technologies : 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (2015), 2nd ed. 2015. New York, NY: Springer New York : Imprint: Springer, 498 p.
- Giner-Santonja, Germán, Pablo Aragonés-Beltrán et Joaquín Niclós-Ferragut. 2012. « The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques ». *Journal of cleaner production*, vol. 25, p. 86-95.
- Griffin, Abbie, et Stephen Somermeyer. 2007. *The PDMA toolbook 3 for new product development* (2007). Hoboken, N.J.: John Wiley, 520 p.
- Hornberger, LE. 1993. « Rapid prototyping program ». *Santa Clara University, California*, p. 10.
- Inconnu, Auteur. 1996. « Manufacturing Excellence: The Competitive Edge. ». *International Journal of Production Research*, vol. 34, n° 6, p. 1773-1774.
- Inconnu, Auteur. 2016a. « Hypertext Markup Language ». En ligne. < [https://www.wikiwand.com/fr/Hypertext\\_Markup\\_Language](https://www.wikiwand.com/fr/Hypertext_Markup_Language) >. Consulté le 21 mars 2016.
- Inconnu, Auteur. 2016b. « RapidMiner Studio ». En ligne. < <http://docs.rapidminer.com/studio/> >. Consulté le 5 avril 2016.
- Inconnu, Auteur. 2016c. « Site internet de gestion de formulaires en ligne ». En ligne. < <http://www.wufoo.com/> >. Consulté le 10 mars 2016.
- IVF. 2005. « RP Selector ». En ligne. < <http://extra.ivf.se/rp-selector/> >. Consulté le 12 février 2016.
- Lan\*, H, Y Ding et J Hong. 2005. « Decision support system for rapid prototyping process selection through integration of fuzzy synthetic evaluation and an expert system ». *International Journal of Production Research*, vol. 43, n° 1, p. 169-194.

- Mahesh, M, HT Loh, YS Wong et JYH Fuh. 2003. « Integrated Decision Support System for Selection of RP Processes ». In *The fourteenth Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. (Texas), p. 174-185.
- Mahesh, Mani, Jerry YH Fuh, YS Wong et Han Tong Loh. 2005. « Benchmarking for decision making in rapid prototyping systems ». In *Automation Science and Engineering, 2005. IEEE International Conference on*. p. 19-24. IEEE.
- Masood, SH, et A Soo. 2002. « A rule based expert system for rapid prototyping system selection ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 18, n° 3, p. 267-274.
- Müller, H, J Bauer et HH Klingenberg. 1996. « Computerbased rapid prototyping system selection and support ». In *Proceedings of Time Compression Technologies 1996*. (Warwickshire, England), p. 124-136.
- Munguía, Javier, Joaquim Lloveras, Sonia Llorens et Tahar Laoui. 2010. « Development of an AI-based Rapid Manufacturing Advice System ». *International Journal of Production Research*, vol. 48, n° 8, p. 2261-2278.
- Obikawa, T., M. Yoshino et J. Shinozuka. 1999. « Sheet steel lamination for rapid manufacturing ». *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 89, p. 171-176.
- Owen, Harrison (200). 2008. *Open space technology: A user's guide*. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers.
- Phillipson, Darrell K. 1997. « Rapid Prototyping Machine Selection Program ». Arizona, Arizona State University, 199 p.
- Pires, Alvaro P. 1997. « Échantillonnage et recherche qualitative: essai théorique et méthodologique ». *La recherche qualitative. Enjeux épistémologiques et méthodologiques*, p. 113-169.
- Rao, R Venkata, et KK Padmanabhan. 2007. « Rapid prototyping process selection using graph theory and matrix approach ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 194, n° 1, p. 81-88.
- Smith, Paul, et Allan Rennie. 2008. « Development of an Additive Layer Manufacturing (ALM) selection tool for direct manufacture of products ». In *Solid Freeform Fabrication Symposium 2008*. (Austin), p. 507-518. University of Texas.
- Stevenson, William J., Claudio Benedetti et Youssef Abdou Youssef. 2012. *La gestion des opérations : produits et services* (2012), 3e éd. Montréal: Chenelière-McGraw-Hill, 784 p.

- Thériault, Louise. 2014. « La fabrication additive : un casse-tête terminologique 3D ». En ligne. < <http://www.circuitmagazine.org/chroniques-2/des-mots/la-fabrication-additive-un-casse-tete-terminologique-3d> >. Consulté le 20 janvier 2016.
- Vaishnavi, Vijay, et William Kuechler. 2015. *Design science research methods and patterns : innovating information and communication technology* (2015), Second edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 373 p.
- Weller, Nathan B. 2015. « The Top Rapid Prototyping Programs And Techniques For Designers ». En ligne. < <https://www.elegantthemes.com/blog/resources/the-top-rapid-prototyping-programs-and-techniques-for-designers> >. Consulté le 31 mars 2016.
- Wirthlin, Joseph R. 2000. « Best practices in user needs/requirements generation ». Boston, Massachusetts Institute of Technology, 299 p.
- Xu, F., Y. S. Wong et H. T. Loh. 2001. « Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing ». *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 19, n° 5, p. 283-296.



