



HAL
open science

Conception et pilotage d'un atelier intégrant la fabrication additive

Anne-Lise Antomarchi

► **To cite this version:**

Anne-Lise Antomarchi. Conception et pilotage d'un atelier intégrant la fabrication additive. Automatique. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2019. Français. NNT: 2019CLFAC035 . tel-02457935

HAL Id: tel-02457935

<https://theses.hal.science/tel-02457935>

Submitted on 28 Jan 2020

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

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

UNIVERSITE - CLERMONT FERRAND

Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Clermont Ferrand

Thèse

Présentée par :

Anne-Lise Antomarchi

Pour obtenir le grade de :

Docteur d'université
Spécialité : Informatique

Conception et pilotage d'un atelier intégrant la fabrication additive

Soutenue publiquement le vendredi 27 septembre 2019

Devant le jury :

Pr. Jacques Lamothe	Ecole des Mines d'Albi	Rapporteur
Pr. Samir Lamouri	Arts et Métiers ParisTech	Rapporteur
Pr. Michel Gourgand	LIMOS	Examineur
Pr. Patrick Burlat	Ecole des Mines de Saint-Etienne	Examineur
Pr. Caroline Thierry	Université Toulouse 2	Examineur
Dr. Romain Guillaume	Université Toulouse 2	Examineur
Dr. Séverine Durieux	SIGMA Clermont	Encadrante
Pr. Emmanuel Duc	SIGMA Clermont	Directeur de thèse
M. Gérard Brunel	Fondation SIGMA	Invité
Dr. Florian Galliano	MBDA	Invité
M. Loïc Lèbre	AddUp	Invité

REMERCIEMENTS

« La vie est une histoire de rencontres. » Isabel Allende

Cette idée résume bien le chemin qui m'a menée jusqu'à l'accomplissement de cette thèse.

Je remercie tout d'abord Jacques et Samir d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Je les remercie pour leurs commentaires, leurs remarques et leurs conseils pour la suite. Merci Jacques pour l'ensemble des conseils et des échanges, parfois déstabilisants mais toujours bienveillants et constructifs qui nous ont aidé à avancer dans ces travaux.

Je tiens à remercier Michel qui nous a fait l'honneur de présider ce jury. Sa présence était importante pour nous. Je remercie également Caroline et Romain pour leur accueil lors de nos passages à Toulouse ainsi que pour leur soutien et leur accompagnement tout au long de la thèse. Un grand merci pour cette belle collaboration. Et enfin, je remercie Patrick d'être présent aujourd'hui. Je le remercie pour sa confiance, c'est avec lui que l'aventure continue désormais.

Je remercie la Fondation SIGMA pour le financement de ces travaux de recherche. C'était une grande première et j'espère que de nombreuses thèses suivront. Merci à Gérard Brunel pour son soutien depuis son arrivée.

Merci également à AddUp, représenté par Loïc Lèbre, pour leur collaboration.

Je voudrais remercier Florian Galliano pour le temps précieux qu'il nous a accordés pendant ces trois ans, pour tous ses conseils et pour tous les échanges que nous avons pu avoir et qui ont permis de faire avancer ces travaux.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour leur présence et leur bienveillance. Soutenir devant toutes les belles rencontres faites pendant ces années de thèse est un bel accomplissement.

Merci également à l'ensemble du personnel et des enseignants de Sigma qui m'ont accompagnée que ce soit en tant qu'élève-ingénieur ou en tant que doctorante. Merci pour leur confiance et leur soutien pendant ces six années.

Il y a des rencontres qui changent le cours des choses... Un immense merci à Séverine sans qui je n'aurais jamais pris le chemin de la recherche. Elle a été présente à chaque étape, de la découverte de la recherche sur les bancs de l'école jusqu'à l'encadrement de la thèse en passant par le master recherche. Elle m'a suivie avec bienveillance et m'a aidée à cheminer. Je lui dois énormément. Je remercie très sincèrement Emmanuel et Séverine pour leur bienveillance, leur accompagnement, leur soutien, leurs conseils et pour tout ce qu'ils m'ont apportée pendant ces trois années, la liste serait bien trop longue. Ils m'ont énormément appris que ce soit sur la partie scientifique, la partie enseignement ou la partie personnelle. Ils ont fait de ces trois années, une belle aventure professionnelle et surtout humaine. Grâce à eux, cette thèse a été remplie de belles rencontres et de belles expériences. Ils m'ont permis de m'épanouir dans ce milieu que je ne connaissais pas. Merci pour tout... La soutenance marque la fin de la thèse mais sûrement pas la fin de notre collaboration.

Certaines rencontres nous permettent de parcourir un bon bout de chemin et nous font grandir. Merci Karine pour tout le chemin parcouru ensemble ! Je remercie également Marianne pour sa présence et son soutien sans faille.

D'autres rencontres deviennent des amis. Merci Bastien, Marie, Anthony, Chix, Manon et Daniel pour votre soutien pendant ces trois années. Nos week-ends jeux, sport et découverte font toujours du bien ! Anthony, Bastien et Daniel, nous nous sommes lancés tous les 4 dans la recherche. Nous avons partagé les bons moments de nos thèses comme les moments un peu plus difficiles. Anthony, te voilà docteur également, bien joué ! Bastien, c'est bientôt à toi de rédiger et de soutenir. Daniel, tu peux compter sur nous pour cette aventure qui commence pour toi.

Puis il y a ceux qui nous accueillent et qui nous aident à nous construire, à nous épanouir : je remercie toute ma famille et les amis, qui deviennent la famille, pour leur accompagnement et leurs encouragements. Ils ont toujours cru en moi. Leur présence lors de la soutenance ou leurs messages est le témoin de leur soutien indéfectible. Cette thèse a été une belle aventure familiale. J'adresse un merci tout particulier à mes parents et à mes frères sans qui je n'en serai jamais arrivée là ! Ils m'ont toujours soutenue dans mes choix, ils ont cru en moi et ils m'ont accompagnée à chaque étape. Je leur dois tout. Je remercie également mon frère et ma belle-sœur, ils m'ont permis de faire deux magnifiques rencontres qui m'ont élevée aux précieux grades de marraine et de tatie. Leur affection et leurs sourires ont illuminé ces trois années.

J'ai gardé ma plus belle rencontre pour la fin. Il a partagé les bons moments, il a écouté les doutes, il m'a accompagnée, il m'a toujours soutenue, il a cru en moi jusqu'au bout. Il a fait partie intégrante de cette thèse... Un immense merci à Damien ! La thèse a été la première aventure dans laquelle nous nous sommes lancés ensemble, il s'agit de la première d'une longue série, à nous d'écrire la suite.

RESUME

La fabrication additive est un domaine en plein essor. Cependant, les industriels sont aujourd'hui dans une phase d'interrogation sur l'utilisation de ce procédé dans le cadre d'une production de masse. La problématique posée dans le cadre de ces travaux de recherche est : *Comment rendre viable, industriellement, le procédé de fusion sur lit de poudre ?*

Nos travaux abordent la conception et le pilotage d'ateliers intégrant la fabrication additive et le processus complet d'obtention de la pièce selon les trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnel. D'un point de vue stratégique, des décisions fortes d'investissement, de sélection de machines et de choix d'organisation sont à prendre avec des enjeux économiques importants. L'objectif est de définir une méthode d'optimisation multicritère pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines, optimale sur le long terme et sur le court terme. D'un point de vue tactique, toutes les pièces ne sont pas forcément des candidates pertinentes pour la fabrication additive. Dans ces travaux, nous avons développé un outil d'aide à la décision qui évalue la pertinence ou non de la fabrication additive pour l'obtention des pièces dans une approche globale des coûts. Au niveau opérationnel, nous proposons un outil basé sur la simulation de flux qui permet de passer des commandes aux ordres de fabrication et leur ordonnancement de manière à garantir l'efficacité de l'atelier.

Ces travaux de recherche sont développés en lien avec des acteurs du monde industriel : AddUp, MBDA et Dassault qui alimentent nos travaux et nous permettent de confronter nos outils à une réalité industrielle.

Mots clefs : Aide à la décision, incertain, optimisation multicritère, planification stratégique, modèle de coûts, simulation, ordonnancement, bin packing

Design and management of a workshop integrating additive manufacturing

The additive manufacturing is a field on the rise. However, companies wonder about the use of additive manufacturing for mass production. The problem raised in the context of this thesis is: *How to make the process of sintering laser melting industrially viable?*

Our work focuses on the design and on the management of workshops integrating the additive manufacturing and of the complete process to obtain part according to three levels of decision: strategic, tactic and operational. About the strategic level, strong decisions of investment, machines selection and organization choice are taken with important economic issues. The aim is to define a multicriteria optimization method for the modular design of a production system integrating the additive manufacturing in the presence of uncertain data, optimal in the long term and the short term. From a tactical point of view, not all parts are necessarily relevant candidates for additive manufacturing. In this work, we developed a decision support tool that evaluates the relevance or not of additive manufacturing to obtain parts in a global cost approach. At the operational level, we offer a tool based on flow simulation that allows orders to be placed to production orders and their scheduling in order to guarantee the efficiency of the workshop.

This research work is developed in collaboration with companies: AddUp, MBDA and Dassault, who contribute to our work and enable us to compare our tools with an industrial reality.

Key words : Decision-making, uncertain, multicriteria optimization, strategic planning, cost model, scheduling, bin packing

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
RESUME.....	5
TABLE DES MATIÈRES	7
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	15
TABLE DES TABLEAUX.....	19
TABLE DES EQUATIONS	21
ABREVIATIONS.....	25
INTRODUCTION GENERALE	27
PARTIE I. CONTEXTE INDUSTRIEL ET PROBLEMATIQUES	31
CHAPITRE 1. CONTEXTE INDUSTRIEL.....	32
1. <i>Introduction</i>	32
2. <i>Fabrication additive : de la définition au procédé</i>	32
2.1. Historique et définition	33
2.2. Les procédés et les matériaux	34
2.3. La fusion laser sur lit de poudre	36
3. <i>Du prototypage à la production industrielle</i>	37
3.1. Prototypage et pièces détachées	38
3.2. Les évolutions technologiques	39
3.3. Industrialisation.....	40
CHAPITRE 2. FABRICATION ADDITIVE ET SUPPLY CHAIN	41
1. <i>L'évolution de la chaîne de valeur</i>	41
2. <i>Intégration de la fabrication additive dans les entreprises</i>	42
3. <i>Les évolutions du business model</i>	43
3.1. Place du client	43
3.2. Modèle centralisé.....	45
3.3. Modèle distribué	45
3.4. Discussion.....	47
4. <i>L'impact de la fabrication additive sur la supply chain</i>	49
4.1. Simplification de la supply chain	50
4.2. Evolution de la supply chain	51
4.3. Flexibilité, agilité et lean.....	53
5. <i>Hygiène, Sécurité, Environnement</i>	53
6. <i>Synthèse</i>	54
CHAPITRE 3. LES ATELIERS DE FABRICATION ADDITIVE	56
1. <i>Brevets, normes, qualifications et certifications</i>	56
2. <i>Processus et spécificités</i>	57
2.1. Le processus	57
2.2. Les spécificités des ateliers de fabrication additive.....	61
CHAPITRE 4. PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE	62
1. <i>Objectifs industriels</i>	62
2. <i>Les niveaux de décision</i>	62
3. <i>Problématiques de recherche identifiées dans le cadre de l'industrialisation de la fabrication additive et verrous scientifiques associés</i>	63
3.1. Problématique stratégique.....	63
3.2. Problématique tactique.....	64
3.3. Problématique opérationnelle	65

4. Organisation du manuscrit	66
PARTIE II. NIVEAU STRATEGIQUE	69
TABLE DES NOTATIONS.....	72
CHAPITRE 1. PROBLEMATIQUE.....	75
1. <i>Le système : un atelier de fabrication additive</i>	75
1.1. Les machines	75
1.2. Les options	76
1.3. Les opérateurs.....	77
2. <i>Les décisions</i>	77
3. <i>La phase de ramp-up</i>	77
4. <i>Incertitudes et données incertaines</i>	78
5. <i>Evaluation</i>	79
6. <i>Objectif</i>	80
7. <i>Verrous</i>	80
8. <i>Organisation de la partie</i>	81
CHAPITRE 2. DECISION STRATEGIQUE	82
1. <i>Prise de décision stratégique</i>	82
1.1. Efficacité et performance	82
1.2. Impact du décideur	83
2. <i>Investissements</i>	84
CHAPITRE 3. PLANIFICATION STRATEGIQUE.....	86
1. <i>Analogie avec les semi-conducteurs</i>	86
2. <i>Processus de création</i>	87
3. <i>Méthodes</i>	87
CHAPITRE 4. OPTIMISATION PAR METHODES EXACTES.....	93
1. <i>Programmation linéaire</i>	93
1.1. Méthode du Simplexe	94
1.2. Méthode de séparation et d'évaluation.....	94
2. <i>Programmation dynamique</i>	95
CHAPITRE 5. DECISION SOUS INCERTITUDE ET RISQUE	96
1. <i>L'incertain</i>	96
1.1. Définitions : incertitude, imprécision, incomplétude, imperfection	96
1.2. Contexte : certain, risqué, incertain	97
1.3. Qualités de l'information et de l'expertise.....	97
1.4. Prise en compte des incertitudes	97
1.5. Modèles de représentation des incertitudes	98
2. <i>Aide à la décision sous incertitude</i>	99
2.1. Axiomes de Savage	99
2.2. Fonction d'utilité	100
2.3. Décision sous ignorance totale.....	100
3. <i>Risque</i>	101
3.1. Prise en compte du risque	102
3.2. Lien entre risque et connaissance	102
3.3. Lien entre risque et incertitude	103
3.4. Le risque spéculatif.....	103
CHAPITRE 6. FORMALISATION MATHÉMATIQUE ET APPROCHE PROPOSÉE.....	104
1. <i>Les ensembles</i>	104
2. <i>Les paramètres</i>	104
2.1. La demande.....	105
2.2. Le budget maximal	105
2.3. Les machines	105
2.4. Les options	105
2.5. Les investissements.....	105
2.6. Les compatibilités.....	105

2.7.	Les temps	106
2.8.	La vitesse de lasage	106
2.9.	Les disponibilités	106
2.10.	Les opérateurs	106
3.	<i>Variables de décision</i>	107
4.	<i>Variables liées</i>	107
5.	<i>Fonction objectif</i>	108
6.	<i>Contraintes</i>	109
6.1.	Les machines	109
6.2.	Les options	110
6.3.	Les versions	110
6.4.	Les poudres	111
6.5.	Les opérateurs	111
6.6.	Le budget	111
7.	<i>Linéarisation</i>	112
8.	<i>Approche proposée</i>	113
8.1.	Relaxation et arbre de recherche	113
8.2.	L'écart	113
8.3.	Résultats	114
CHAPITRE 7. CAS DETERMINISTE		115
1.	<i>Données</i>	115
1.1.	Les pièces	115
1.2.	Les machines	115
1.3.	Les options	116
1.4.	Les versionings	117
2.	<i>Scenarii</i>	117
3.	<i>Analyse de l'intervalle de discrétisation de la productivité</i>	118
4.	<i>Résultats</i>	118
4.1.	Analyse du comportement du modèle	119
4.2.	Analyse des résultats	121
5.	<i>Conclusion</i>	122
CHAPITRE 8. INTEGRATION DES INCERTITUDES		123
1.	<i>Incertitude liée à la demande</i>	123
1.1.	Variables de décision et variables liées	123
1.2.	Fonction objectif	123
2.	<i>Incertitude liée aux améliorations technologiques</i>	125
3.	<i>Incertitude liée à l'évolution du coût des machines</i>	125
4.	<i>Données</i>	126
5.	<i>Résultats</i>	127
6.	<i>Conclusion</i>	128
CHAPITRE 9. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL		129
1.	<i>Cas industriel</i>	129
2.	<i>Adaptation du modèle déterministe</i>	130
3.	<i>Résultats</i>	131
4.	<i>Conclusion</i>	132
CHAPITRE 10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES		133
1.	<i>Conclusion</i>	133
2.	<i>Perspectives</i>	134
2.1.	Application du modèle intégrant les incertitudes sur le cas industriel	134
2.2.	Analyse de l'intervalle de discrétisation	134
2.3.	Méthode multicritère	134
2.4.	Optimisation	134
2.5.	Incertainces	134
2.6.	Comportement du décideur	135

PARTIE III. NIVEAU TACTIQUE.....	139
TABLE DES NOTATIONS.....	141
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	145
1. <i>Problématique</i>	145
2. <i>Objectifs et verrous</i>	145
3. <i>Organisation de la partie</i>	146
CHAPITRE 2. LES COÛTS EN FABRICATION ADDITIVE	147
1. <i>Disparition des économies d'échelle</i>	147
2. <i>Impact de la fabrication additive sur les coûts</i>	148
2.1. Approvisionner et livrer.....	148
2.2. Fabriquer	149
CHAPITRE 3. MODELISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE	151
1. <i>Estimation des coûts tout au long de la supply chain</i>	151
2. <i>Etudes comparatives des coûts</i>	152
3. <i>Autres modèles technico-economiques</i>	154
4. <i>Synthèse</i>	156
5. <i>Notre positionnement</i>	157
CHAPITRE 4. PROPOSITION D'UN MODELE DE COUT.....	158
1. <i>Modèle de coût</i>	158
2. <i>Coût de (re)conception</i>	159
3. <i>Coût d'industrialisation</i>	160
4. <i>Coût d'achat</i>	160
5. <i>Coût de production</i>	162
5.1. Coût de production pièces et supports	163
5.2. Coût opérateur	166
5.3. Coût de fluides	166
6. <i>Coût de non qualité</i>	167
7. <i>Coût de post-traitement</i>	167
8. <i>Synthèse</i>	169
CHAPITRE 5. ESTIMATION DU TEMPS DE LASAGE	171
1. <i>Analyse des différentes méthodes</i>	171
1.1. Méthodes liées à l'orientation de la pièce	171
1.2. Méthodes paramétriques et analytiques	172
1.3. Méthodes expérimentales	173
2. <i>Synthèse</i>	175
3. <i>Proposition de modélisation</i>	176
4. <i>Application</i>	178
4.1. Application sur des pièces simulées	178
4.2. Application sur des pièces industrielles	180
5. <i>Conclusion</i>	181
CHAPITRE 6. APPLICATION	182
1. <i>Présentation de l'outil informatique</i>	182
2. <i>Application a des pièces industrielles</i>	182
2.1. Pièce 1	184
2.2. Pièce 2	185
3. <i>Conclusion</i>	186
CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	187
1. <i>Conclusion</i>	187
2. <i>Perspectives</i>	188
PARTIE IV. NIVEAU OPERATIONNEL.....	191
TABLE DES NOTATIONS.....	195
CHAPITRE 1. INTRODUCTION : LES DIFFERENTES PROBLEMATIQUES D'ORDONNANCEMENT EN FABRICATION ADDITIVE	199
1. <i>Des commandes aux ordres de fabrication</i>	200

2.	<i>Traitement thermique par lot de plateaux</i>	201
3.	<i>Post-traitement par lot de pièces</i>	201
4.	<i>Post-traitements par pièce</i>	201
5.	<i>Objectif et verrous</i>	201
6.	<i>Partie traitée dans ces travaux</i>	202
7.	<i>Organisation de la partie</i>	202
CHAPITRE 2.	BIN PACKING ET ORDONNANCEMENT	203
1.	<i>Ordonnancement en fabrication additive</i>	203
2.	<i>Bin packing et ordonnancement</i>	206
3.	<i>Bin packing</i>	206
3.1.	Placement des pièces en fabrication additive	206
3.2.	Typologie des problèmes de découpe et de placement	206
3.3.	Méthodes	207
4.	<i>Ordonnancement</i>	207
4.1.	Définitions	207
4.2.	Problèmes d'ordonnancement	207
4.3.	Méthodes	208
5.	<i>Placement dans la littérature</i>	209
CHAPITRE 3.	ETAT DE L'ART : OPTIMISATION ET SIMULATION	210
1.	<i>Les méthodes exactes</i>	210
2.	<i>Les méthodes approchées : Les heuristiques</i>	210
3.	<i>Les méthodes approchées : Les métaheuristiques</i>	210
3.1.	Recuit simulé	210
3.2.	Recherche Tabou	211
3.3.	Les algorithmes évolutionnistes	211
3.4.	Entropie croisée	213
3.5.	Méthodes d'optimisation multimodale	213
4.	<i>Simulation</i>	215
4.1.	Méthodes d'évaluation de la performance	215
4.2.	Simulation à événement discret	216
5.	<i>Optimisation via simulation</i>	216
CHAPITRE 4.	ETAT DE L'ART : DECISION MULTICRITERE	218
1.	<i>Définition : critère</i>	218
2.	<i>Famille de critères : exhaustivité, cohésion, non redondance</i>	218
3.	<i>Aide à la décision multicritère</i>	218
4.	<i>Méthodes d'évaluation et d'agrégation</i>	219
5.	<i>Méthodes basées sur le critère unique de synthèse</i>	220
5.1.	Multi Attribute Utility Theory	220
5.2.	Analytic Hierarchy Process	220
5.3.	Analytic Network Process	220
5.4.	SIMOS	221
5.5.	TOPSIS	221
6.	<i>Méthodes de surclassement de synthèse</i>	221
6.1.	PROMETHEE	221
6.2.	ELECTRE	222
7.	<i>Choix d'une méthode multicritère</i>	222
CHAPITRE 5.	FORMALISATION MATHEMATIQUE	223
1.	<i>Notations</i>	223
2.	<i>Données d'entrée</i>	223
2.1.	Les commandes	223
2.2.	Les machines	223
2.3.	Les plateaux	223
2.4.	Les gammes	224
2.5.	Les compatibilités	224
3.	<i>Bin packing</i>	224

3.1.	Notations.....	224
3.2.	Variables de décision.....	224
3.3.	Variables liées.....	225
3.4.	Contraintes.....	227
4.	<i>Ordonnancement</i>	228
4.1.	Variables de décision.....	228
4.2.	Contraintes.....	228
5.	<i>Evaluation</i>	228
5.1.	Respect des due dates.....	228
5.2.	Taux d'utilisation.....	229
5.3.	Coût de production.....	229
CHAPITRE 6.	APPROCHE PROPOSEE.....	230
1.	<i>Schéma de principe</i>	230
2.	<i>Données d'entrée</i>	230
3.	<i>Evaluation multicritère : simulation et AHP</i>	230
4.	<i>Optimisation</i>	231
4.1.	Des plateaux aux OF.....	231
4.2.	Des pièces aux OF.....	232
CHAPITRE 7.	EVALUATION MULTICRITERE ET SIMULATION.....	233
1.	<i>Modèle de simulation</i>	233
1.1.	Hypothèses.....	233
1.2.	Cadre expérimental.....	233
2.	<i>Méthode d'évaluation multicritère</i>	234
2.1.	Analytic Hierarchy Process.....	234
2.2.	Application.....	239
3.	<i>La fonction d'évaluation</i>	240
CHAPITRE 8.	DES PLATEAUX AUX OF : ALGORITHME GENETIQUE.....	241
1.	<i>Les algorithmes génétiques en planification et en ordonnancement</i>	241
2.	<i>Les algorithmes génétiques appliqués a des problèmes multi-objectifs</i>	241
3.	<i>Le principe de l'algorithme génétique développé</i>	242
4.	<i>Création de la population initiale</i>	242
5.	<i>Evaluation des individus</i>	243
6.	<i>Sélection de la population</i>	243
6.1.	Sélection par loterie biaisée (wheel).....	243
6.2.	Sélection par tournoi.....	243
6.3.	Sélection élitiste.....	244
6.4.	Processus de sélection proposé.....	244
7.	<i>Création des nouveaux individus</i>	244
7.1.	Croisements.....	245
7.2.	Mutations.....	246
7.3.	Processus de création des nouveaux individus.....	247
8.	<i>Critère d'arrêt</i>	249
CHAPITRE 9.	DES PLATEAUX AUX OF : ENTROPIE CROISEE.....	250
1.	<i>Codage des solutions</i>	250
2.	<i>Initialisation de la matrice de probabilité</i>	251
3.	<i>Création d'un ensemble de solutions possibles</i>	252
4.	<i>Sélection des meilleures</i>	253
5.	<i>Mise à jour de la matrice de probabilités</i>	254
CHAPITRE 10.	COMPARAISON DES ALGORITHMES.....	255
1.	<i>Cas d'étude</i>	255
1.1.	Dimensionnement.....	255
1.2.	Les commandes.....	255
1.3.	Les données pièces.....	256
1.4.	L'atelier.....	257
1.5.	Les OF.....	259

2.	<i>Réglage de l'algorithme génétique</i>	260
3.	<i>Réglage de l'entropie croisée</i>	261
4.	<i>Résultats de l'algorithme génétique</i>	262
5.	<i>Résultats de l'entropie croisée</i>	263
6.	<i>Comparaison</i>	265
7.	<i>Conclusion</i>	265
CHAPITRE 11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES		266
1.	<i>Conclusion</i>	266
2.	<i>Perspectives</i>	267
2.1.	Double entropie croisée	267
2.2.	Réglage des algorithmes	269
2.3.	Evolution de l'évaluation	269
2.4.	Moteur d'optimisation	270
2.5.	Ordonnancement en fabrication additive	270
PARTIE V. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		273
CHAPITRE 1. CONCLUSION		274
1.	<i>Niveau Stratégique</i>	274
2.	<i>Niveau Tactique</i>	275
3.	<i>Niveau Opérationnel</i>	276
4.	<i>Conclusion générale</i>	277
CHAPITRE 2. PERSPECTIVES		278
1.	<i>Niveau Stratégique</i>	278
2.	<i>Niveau Tactique</i>	278
3.	<i>Niveau Opérationnel</i>	279
4.	<i>Perspectives générales</i>	280
BIBLIOGRAPHIE.....		281
ANNEXES.....		293
	<i>IDEF 3 : Cartes d'identité</i>	293

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Partie I - Contexte industriel et problématiques

Figure 1 – FORMUP LINE	27
Figure 2 - Classification des procédés de fabrication additive par l'ASTM (ASTM International, 2013)	34
Figure 3 - Technologies en fonction de l'utilisation (Cotteleer, 2014)	35
Figure 4 - Principe de la fusion sur lit de poudre	37
Figure 5 - SWOT : Fusion sur lit de poudre (Rouen, 2015)	37
Figure 6 - Hype Cycle de Gartner sur les impressions 3D.....	38
Figure 7 - Chaîne de valeur de fabrication (Croft,1996).....	41
Figure 8 - Chaîne de valeur digitale (Croft,1996)	41
Figure 9 - Ecosystème de la fabrication additive (Croft, 1996)	41
Figure 10 – D'un modèle centré sur le fabricant à un modèle centré sur le client (Bogers <i>et al.</i> , 2015).....	43
Figure 11 – Processus traditionnel et nouveau processus (Geraedts <i>et al.</i> , 2012)	44
Figure 12 - Représentation du modèle centralisé (Bogers <i>et al.</i> , 2015).....	45
Figure 13 - Représentation du modèle décentralisé (Bogers <i>et al.</i> , 2015).....	46
Figure 14 - Modèle SCOR de la supply chain centralisée (Mokasdar, 2012).....	47
Figure 15 - Modèle SCOR de la supply chain distribuée (Mokasdar, 2012)	47
Figure 16 - Modèle SCOR de la supply chain actuelle (Mokasdar, 2012).....	47
Figure 17 - Point de découplage de la commande client (Minguella-Canela <i>et al.</i> , 2017).....	48
Figure 18 - Position du CODP dans différentes situations tout au long de la supply chain (Minguella-Canela <i>et al.</i> , 2017)	48
Figure 19 - Impacts de la fabrication additive sur la supply chain et les produits (Cotteleer, 2014)	49
Figure 20 - Supply chain traditionnelle (Janssen <i>et al.</i> , 2014).....	50
Figure 21 - Supply chain pour la fabrication additive (Janssen <i>et al.</i> , 2014)	50
Figure 22 - Suppression de l'assemblage	51
Figure 23 - SCOR : Niveau de configuration (Lockamy et McCormack, 2004).....	52
Figure 24 - SCOR : Niveau d'implémentation et activités	52
Figure 25 - Impact de la fabrication additive sur l'étape de fabrication (général).....	55
Figure 26 - Impact de la fabrication additive sur les étapes d'approvisionnement et de livraison	55
Figure 27 - Impact de la fabrication additive sur l'étape de fabrication (coûts et temps).....	55
Figure 28 - IDEF 3 : Unité de comportement	57
Figure 29 - IDEF 3 : Boîtes de jonction	57
Figure 30 - IDEF 3 : Processus global.....	57
Figure 31 - IDEF 3 : Produire.....	58
Figure 32 - IDEF 3 : Fabriquer.....	58
Figure 33 - IDEF 3 : Traiter les plateaux.....	58
Figure 34 - IDEF 3 : Sortir le plateau, nettoyage interne.....	58
Figure 35 - IDEF 3 : Sortir le plateau, nettoyage externe	59
Figure 36 - Processus.....	60
Figure 37 - Organisation du manuscrit.....	66

Partie II - Niveau stratégique

Figure 38 – Evolution du volume de production en fonction du temps	75
Figure 39 - Machine de fabrication additive et ressources auxiliaires.....	76
Figure 40 - Liste des options	76
Figure 41 - Modélisation de la phase de ramp-up (Glock et Grosse, 2015).....	77
Figure 42 - Caractéristiques de la phase de ramp-up (Glock et Grosse, 2015)	78
Figure 43 - Indicateurs	79
Figure 44 - Modèle d'efficacité de la prise de décision stratégique (Dean et Sharfman, 1996)	82

Figure 45 - Impact de la performance sur les dimensions du processus	83
Figure 46 - Modèle conceptuel (Jansen <i>et al.</i> 2013)	84
Figure 47 - Planning des ressources simultanées en considérant les alternatives d'investissement	86
Figure 48 - Planning des ressources simultanées en considérant.....	87
Figure 49 - Méthodes de résolution des problèmes combinatoires	93
Figure 50 - Arborescence séparation et évaluation	94
Figure 51 - L'imperfection de l'information conditionne la décision (Tacnet, 2009)	97
Figure 52 - Exemple de distribution de possibilités (Guillaume, 2011).....	98
Figure 53 - Exemple de valeurs possibles (Guillaume, 2011)	99
Figure 54- Lien risque-rendement et frontière d'efficacité (Coleman et Casselman, 2016).....	102
Figure 55 - Flexibilité et risque (Sreedevi et Saranga, 2017).....	103
Figure 56 - Possibilité d'achats.....	104
Figure 57 - Discrétisation de la productivité	113
Figure 58 - Scenarii : Evolution de la demande	117
Figure 59 - Scenarii : Evolution de la capacité.....	118
Figure 60 - Scénario 1 : Charge et capacité	119
Figure 61 - Scénario 2 : Charge et capacité	120
Figure 62 - Scénario 4 : Charge et capacité	120
Figure 63 - Scénario 4 : Coûts.....	121
Figure 64 - Scénario 4 : Chiffre d'affaire et bénéfice.....	121
Figure 65 - Bénéfice et investissement pour les scenarii 1 et 2	122
Figure 66 - Bénéfice, investissement et coût machine pour les scenarii 3 et 4	122
Figure 67 - Evolution de la demande	126
Figure 68 - Evolution du coût des machines : Scénario 1.....	127
Figure 69 - Cas industriel : Demande	129
Figure 70 - Cas industriel : Charge et capacité	131

Partie III - Niveau tactique

Figure 71 - Economie d'échelle : Comparaison entre l'usinage conventionnel et la fabrication additive (Janssen <i>et al.</i> , 2014)	148
Figure 72 - Impact de la fabrication additive sur les coûts : Approvisionner et livrer	149
Figure 73 - Impact de la fabrication additive sur les coûts : Fabriquer	150
Figure 74 - Modèle de recherche des coûts tout au long du cycle de vie (Lindemann <i>et al.</i> , 2012).....	152
Figure 75 - Exemple d'une pièce et structure des coûts pour des lots de 190 pièces (Lindemann <i>et al.</i> , 2012)	152
Figure 76 - Modèle de coûts (Ruffo <i>et al.</i> 2006)	154
Figure 77 - Positionnement des travaux	157
Figure 78 - Modèle de coût	158
Figure 79 - Synthèse du modèle de coût.....	170
Figure 80 - Boîte englobante	173
Figure 81 - Ecart vecteur	178
Figure 82 - Pièces simulées	178
Figure 83 - Répartition des coûts	184
Figure 84 - Répartition des coûts	186

Partie IV - Niveau opérationnel

Figure 85 - Etapes d'ordonnancement en fabrication additive	199
Figure 86 - Répartition des pièces sur les plateaux.....	200
Figure 87 - Regroupement, allocation et séquençement.....	200
Figure 88 - Méthode de Li <i>et al.</i> (2017).....	203
Figure 89 - Heuristique développé par Li <i>et al.</i> (2017).....	204
Figure 90 - Heuristique développée par Chergui <i>et al.</i> (2018).....	205
Figure 91 - Les problèmes d'ordonnancement	208
Figure 92 - Algorithme génétique	212

Figure 93 - Méthode de l'entropie croisée.....	213
Figure 94 - Méthodes d'évaluation de la performance (Law et Kelton, 1991)	215
Figure 95 - Etapes d'une étude de simulation (Claver <i>et al.</i> , 1997)	216
Figure 96 - Réseau ANP (Dubromelle <i>et al.</i> , 2009).....	221
Figure 97 - Dimensions et coordonnées	225
Figure 98 - Approche proposée.....	230
Figure 99 - Algorithme génétique	231
Figure 100 - Entropie croisée plateau/OF	232
Figure 101 - Entropies croisées	232
Figure 102 - Processus de décision de l'AHP	235
Figure 103 - Détermination de la performance relative	235
Figure 104 - Structure hiérarchique	236
Figure 105 - Lien entre les vecteurs priorités.....	239
Figure 106 - Structure hiérarchique de l'AHP.....	239
Figure 107 - Algorithme génétique	242
Figure 108 - Codage	242
Figure 109 - Processus de sélection	244
Figure 110 - Croisement 1X.....	245
Figure 111 - Croisement en 2 points : OX	245
Figure 112 - Application du croisement OX	246
Figure 113 - Croisement en 2 points : LOX.....	246
Figure 114 - Application du croisement LOX.....	246
Figure 115 - Mutation machine : échange de deux plateaux.....	246
Figure 116 - Mutation machine : changement d'un plateau	247
Figure 117 - Mutation de séquençement : permutation de deux plateaux.....	247
Figure 118 - Mutation de séquençement : déplacement d'un plateau	247
Figure 119 - Processus de création des nouveaux individus.....	248
Figure 120 - Probabilités cumulées pour les croisements	248
Figure 121 - Probabilités cumulées pour les mutations.....	248
Figure 122 - Méthode de l'entropie croisée.....	250
Figure 123 - Codage	251
Figure 124 - Matrice de probabilités.....	251
Figure 125 - Sélection des meilleurs	253
Figure 126 - Réglage de l'algorithme génétique	261
Figure 127 - Réglage de l'entropie croisée	262
Figure 128 - Matrice de probabilités.....	267
Figure 129 - Heuristique de construction.....	268
Figure 130 - Positions possibles et enveloppe	268

TABLE DES TABLEAUX

Partie I - Contexte industriel et problématiques

Tableau 1 - Matériaux utilisables pour chaque technologie (Verhulst, 2015)	35
Tableau 2 - Niveau de maturité de chaque matériau (Cotteleer, 2014)	36
Tableau 3 - Facteurs à prendre en compte pour l'intégration de la fabrication additive (Mellor, 2014)	42
Tableau 4 - Comparaison du modèle centré sur le fabricant et du modèle centré sur le client	44
Tableau 5 - Impacts, Opportunités et Risques	53
Tableau 6 - Impacts de la fabrication additive sur la supply chain	54
Tableau 7 - Les trois niveaux de décisions	62

Partie II - Niveau stratégique

Tableau 8 - Synthèse des critères pour la sélection de fournisseurs (Sureeyatanapas <i>et al.</i> , 2018)	80
Tableau 9 - Efficacité et performance de la prise de décision stratégique	82
Tableau 10 - Lien entre les caractéristiques du décideur, la rationalité et le comportement politique (Francioni <i>et al.</i> , 2015)	83
Tableau 11 - Modèles et méthodes	88
Tableau 12 - Données : Demande	88
Tableau 13 - Données : Produits	88
Tableau 14 - Données : Ressources	89
Tableau 15 - Données : Budget	89
Tableau 16 - Données : Achat et sous-traitance	89
Tableau 17 - Données : Autres éléments	90
Tableau 18 - Variables de décision	90
Tableau 19 - Fonctions objectifs	91
Tableau 20 - Eléments pris en compte dans la littérature	92
Tableau 21 - Données : Types de pièces	115
Tableau 22 - Données : Types de machines	115
Tableau 23 - Données : Machines	115
Tableau 24 - Données : Compatibilité pièces/machines	116
Tableau 25 - Données : Options prises en compte	116
Tableau 26 - Données : Options	116
Tableau 27 - Données : Versionings et machines	117
Tableau 28 - Données : Versionings	117
Tableau 29 - Analyse de l'intervalle de discrétisation	118
Tableau 30 - Résultats des 4 scenarii	119
Tableau 31 - Investissements dans les 4 scenarii	119
Tableau 32 - Temps de cycle	126
Tableau 33 - Scenarii 2 et 3 : Prix des machines en k€	127
Tableau 34 - Résultats du modèle intégrant les incertitudes	127
Tableau 35 - Investissements réalisés	128
Tableau 36 - Cas industriel : Types de machines	130
Tableau 37 - Cas industriels : Machines	130
Tableau 38 - Résultats du cas industriel	131
Tableau 39 - Cas industriel : Investissements	131
Tableau 40 - Cas industriel : Analyse de l'investissement	132
Tableau 41 - Cas industriel : Demande insatisfaite	132

Partie III - Niveau tactique

Tableau 42 - Economies d'échelle et économie à l'unité (Petrick et Simpson, 2013)	147
Tableau 43 - Les quatre principaux facteurs de coût de la fabrication additive (Mellor, 2014)	149
Tableau 44 - Comparaison des coûts entre la fabrication traditionnelle	151
Tableau 45 - Bénéfices impactant les coûts significatifs en prototypage rapide (Ingole <i>et al.</i> , 2009)	155

Tableau 46 - Synthèse des coûts pris en compte dans les différents modèles	156
Tableau 47 - Reconception et préparation : niveaux de complexité	159
Tableau 48 - Coût matière (Hopkinson et Dickens, 2013).....	161
Tableau 49 - Paramètres pour le calcul du coût machine.....	165
Tableau 50 - Coûts de main d'œuvre (Hopkinson et Dickens 2013)	166
Tableau 51 - Niveau de complexité des post-traitements	168
Tableau 52 - Paramètres pris en compte dans le calcul du temps de lasage.....	175
Tableau 53 - Application des modèles de la littérature	176
Tableau 54 - Paramètres de fabrication sur la machine A	179
Tableau 55 - Calcul sur les pièces simulées.....	179
Tableau 56 - Calcul sur les pièces industrielles	180
Tableau 57 - Données sur la machine	182
Tableau 58 - Données sur les coûts.....	183
Tableau 59 - Industrialisation.....	183
Tableau 60 - Temps en fonction du degré de complexité.....	183

Partie IV - Niveau opérationnel

Tableau 61 - Echelle des valeurs de (Saaty, 1987)	236
Tableau 62 - Priorisation des indicateurs.....	237
Tableau 63 - Indice Aléatoire	238
Tableau 64 - AHP : Comparaison des critères	239
Tableau 65 - Vocabulaire de l'algorithme génétique	242
Tableau 66 - Dimensionnement du cas d'étude	255
Tableau 67 - Commandes client.....	255
Tableau 68 - Gammes de fabrication	256
Tableau 69 - Ressources.....	257
Tableau 70 - Distances	257
Tableau 71 - Nettoyage en fonction des changements de poudre.....	258
Tableau 72 - Temps de détensionnement	258
Tableau 73 - Données sur les plateaux	258
Tableau 74 - Données sur les post-traitements	258
Tableau 75 - Données sur les machines	259
Tableau 76 - Compatibilités	259
Tableau 77 - Liste des OF à réaliser.....	260
Tableau 78 - Composition des plateaux.....	260
Tableau 79 - Valeurs des probabilités de croisement et de mutation	260
Tableau 80 - Expérimentation : Valeurs des paramètres.....	261
Tableau 81 - Entropie croisée : Expérimentations	262
Tableau 82 - Résultats de l'AG : Valeurs des indicateurs	263
Tableau 83 - Ecart entre les solutions	263
Tableau 84 - Résultats de l'AG : Solution 1	263
Tableau 85 - Meilleure solution des itérations 23 et 25	264
Tableau 86 - Meilleure solution de l'itération 23.....	264
Tableau 87 - Meilleure solution de l'itération 25.....	264
Tableau 88 - Extrait de la matrice de probabilité pour les OF 22, 23 et 24.....	265
Tableau 89 - Extrait de la matrice de probabilité pour les OF 74, 75 et 76.....	265

Annexes

Tableau 90 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 1).....	293
Tableau 91 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 2).....	294
Tableau 92 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 3).....	295

TABLE DES EQUATIONS

Partie II - Niveau stratégique

(1) Maximin	100
(2) Maximax	100
(3) Critère d’Hurwicz	101
(4) Critère de Laplace	101
(5) Calcul du regret.....	101
(6) Critère de Savage	101
(7) Variable liée : affectation poudre / machine	107
(8) Variable liée : temps disponible.....	107
(9) Variable liée : productivité.....	108
(10) Variable liée : besoin opérateur	108
(11) Fonction objectif.....	108
(12) Fonction objectif : vente.....	108
(13) Fonction objectif : coût machine	108
(14) Fonction objectif : investissement total	108
(15) Fonction objectif : investissement par période	108
(16) Fonction objectif : coût opérateur.....	109
(17) Fonction objectif : coût demande insatisfaite	109
(18) Fonction objectif : formule globale.....	109
(19) Contrainte sur les machines : 1.....	109
(20) Contrainte sur les machines : 2.....	109
(21) Contrainte sur les machines : 3.....	109
(22) Contrainte sur les machines : 4.....	109
(23) Contrainte sur les machines : 5.....	110
(24) Contrainte sur les machines : 6.....	110
(25) Contrainte sur les machines : 7.....	110
(26) Contrainte sur les machines : 8.....	110
(27) Contrainte sur les options : 1.....	110
(28) Contrainte sur les options : 2.....	110
(29) Contrainte sur les options : 3.....	110
(30) Contrainte sur les options : 4.....	110
(31) Contrainte sur les options : 5.....	110
(32) Contrainte sur les options : 6.....	110
(33) Contrainte sur les versions : 1.....	110
(34) Contrainte sur les versions : 2.....	111
(35) Contrainte sur les versions : 3.....	111
(36) Contrainte sur les versions : 4.....	111
(37) Contrainte sur les poudres : 1.....	111
(38) Contrainte sur les poudres : 2.....	111
(39) Contrainte sur les opérateurs : 1	111
(40) Contrainte sur les opérateurs : 2	111
(41) Contrainte sur le budget : 1	111
(42) Contrainte sur le budget : 2	111
(43) Linéarisation : fonction à discrétiser.....	112
(44) Linéarisation : la productivité peut être dans un seul intervalle	112
(45) Linéarisation : inégalités sur la productivité	112
(46) Linéarisation : contrainte de capacité	112
(47) Linéarisation : fonction objectif.....	112
(48) Incertitudes : variable liée pour l’affectation poudre / machine.....	123

(49) Incertitudes : variable liée pour le temps disponible	123
(50) Incertitudes : fonction objectif	123
(51) Incertitudes : vente	123
(52) Incertitudes : coût machine	123
(53) Incertitudes : coût demande insatisfaite	123
(54) Incertitudes : formule globale de la fonction objectif	124
(55) Incertitudes : formule globale de la fonction objectif	124
(56) Incertitudes : minimum du bénéfice.....	124
(57) Incertitudes : maximum du bénéfice	124
(58) Incertitudes : inégalité sur le minimum du bénéfice	124
(59) Incertitudes : inégalité sur le maximum du bénéfice	124
(60) Incertitudes : le bénéfice minimum n'est atteint que pour un scénario	124
(61) Incertitudes : contrainte sur les machines 1.....	124
(62) Incertitudes : contrainte sur les machines 2.....	124
(63) Incertitudes : contrainte sur les machines 3.....	124
(64) Incertitudes : contrainte sur les poudres 1.....	124
(65) Incertitudes : contrainte sur les poudres 2.....	125
(66) Incertitudes : variable liée pour le temps disponible	125
(67) Incertitudes : investissement.....	125
(68) Incertitudes : investissement par période	125
(69) Incertitudes : fonction objectif	125
(70) Coût de qualification.....	130
(71) Cas industriel : fonction objectif	130

Partie III - Niveau tactique

(72) Coût de revient d'une pièce.....	158
(73) Coût de préparation (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	159
(74) Coût de reconception (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013)	159
(75) Coût de placement (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	160
(76) Coût d'industrialisation.....	160
(77) Coût poudre pièce (Baumers <i>et al.</i> , 2012).....	160
(78) Coût poudre pièce (Kopf <i>et al.</i> , 2018).....	160
(79) Coût poudre pièce (Munguia Valenzuela, 2009)	160
(80) Coût poudre plateau (Lindemann <i>et al.</i> , 2012).....	161
(81) Coût poudre plateau (Ruffo <i>et al.</i> , 2006).....	161
(82) Coût d'achat.....	161
(83) Coût poudre.....	161
(84) Volume minimum de poudre.....	162
(85) Volume maximum de poudre	162
(86) Nombre de plateaux	162
(87) Volume de poudre	162
(88) Coût plateau	162
(89) Coût de production.....	162
(90) Coût d'équipement (Kopf <i>et al.</i> , 2018)	163
(91) Coût machine pour une pièce (Hopkinson et Dickens, 2013).....	163
(92) Coût machine pour un plateau (Ruffo <i>et al.</i> , 2006)	163
(93) Coût machine pour une pièce (Baumers <i>et al.</i> , 2012)	163
(94) Coût machine pour un plateau (Lindemann <i>et al.</i> , 2012)	163
(95) Coût machine pour une pièce (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	163
(96) Coût horaire machine (Mahadik et Masel, 2018)	164
(97) Coût opératoire (Mahadik et Masel, 2018)	164
(98) Coût de maintenance (Munguia Valenzuela, 2009).....	164

(99) Coût horaire machine (Munguia Valenzuela, 2009)	164
(100) Coût machine pour un plateau (Munguia Valenzuela, 2009)	164
(101) Coût de setup (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	164
(102) Coût de retrait des pièces (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	164
(103) Coût de production d'une pièce	165
(104) Coût de production des supports	165
(105) Coût horaire de la machine	165
(106) Coût horaire d'amortissement	165
(107) Coût horaire de maintenance.....	165
(108) Coût opérateur (Kopf <i>et al.</i> , 2018).....	166
(109) Coût opérateur (Munguia Valenzuela, 2009)	166
(110) Coût opérateur (Hopkinson et Dickens, 2013)	166
(111) Coût énergie (Kopf <i>et al.</i> , 2018).....	166
(112) Energie utilisée (Baumers <i>et al.</i> , 2012)	167
(113) Coût énergie (Baumers <i>et al.</i> , 2012)	167
(114) Coût de fluide	167
(115) Coût de non qualité	167
(116) Coût de découpe (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	167
(117) Coût de découpe (Hällgren <i>et al.</i> , 2016)	168
(118) Coût de post-traitements (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013)	168
(119) Coût des post-traitements par plateau	168
(120) Coût des post-traitements par pièce	168
(121) Coûts des post-traitements	168
(122) Temps de fabrication (Xu <i>et al.</i> , 1999).....	171
(123) Temps de lasage (Byun et Lee, 2005)	171
(124) Section moyenne des supports (Byun et Lee, 2005)	171
(125) Section moyenne (Byun et Lee, 2005)	171
(126) Temps de lasage (Wilson, 2006)	172
(127) Temps de lasage (Wilson, 2006)	172
(128) Temps de lasage (Zhang et Bernard, 2013)	172
(129) Temps de lasage (Mahadik et Masel, 2018)	172
(130) Temps de fabrication (Baumers et al., 2012).....	173
(131) Temps de lasage (Ruffo <i>et al.</i> , 2006)	173
(132) Ratio entre le volume de la pièce et le volume de la boîte englobante (Ruffo <i>et al.</i> , 2006)	173
(133) Facteur de réduction (Ruffo <i>et al.</i> , 2006)	174
(134) Volume d'encombrement de la pièce (Ruffo <i>et al.</i> , 2006)	174
(135) Temps de fabrication d'un plateau (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013).....	174
(136) Temps de fabrication d'une pièce (Rickenbacher <i>et al.</i> , 2013)	174
(137) Temps de fabrication	177
(138) Temps de mise en couche	177
(139) Temps de lasage	177
(140) Temps de préparation de la mise en couche.....	177
(141) Nombre de couches.....	177
(142) Section moyenne	177
(143) Temps unitaire de lasage d'une couche	177
(144) Temps unitaire de lasage d'une couche (Pillot, 2016).....	177
(145) Volume de construction laser pièce (Pillot, 2016)	178
(146) Volume de construction laser support (Pillot, 2016).....	178
(147) Ecart vecteur (Pillot, 2016)	178

Partie IV - Niveau opérationnel

(148) Volume de l'OF	226
(149) Temps de lasage d'un OF	226
(150) Temps de détensionnement	226
(151) Temps de découpage	226
(152) Surface à découper	226
(153) Temps de refroidissement	226
(154) Volume du plateau	226
(155) Temps de récupération de la poudre	226
(156) Temps de nettoyage	226
(157) Bin packing : contrainte 1	227
(158) Bin packing : contrainte 2	227
(159) Bin packing : contrainte 3	227
(160) Bin packing : contrainte 4	227
(161) Bin packing : contrainte 5	227
(162) Bin packing : contrainte 6	227
(163) Bin packing : contrainte 7	227
(164) Bin packing : contrainte 8	227
(165) Bin packing : contrainte 9	227
(166) Bin packing : contrainte 10	227
(167) Bin packing : contrainte 11	227
(168) Bin packing : contrainte 12	228
(169) Ordonnancement : contrainte 1	228
(170) Ordonnancement : contrainte 2	228
(171) Ordonnancement : contrainte 3	228
(172) Retard	229
(173) Date à laquelle la commande est terminée	229
(174) Retard de chaque commande	229
(175) Taux d'utilisation	229
(176) Coût de production	229
(177) Coût de production de chaque OF	229
(178) Coût de setup	229
(179) Calcul des poids de l'AHP	237
(180) Calcul des poids de l'AHP	237
(181) Calcul des poids de l'AHP	237
(182) Calcul des poids de l'AHP	237
(183) Calcul des poids de l'AHP	237
(184) Calcul des poids de l'AHP	238
(185) Valeur propre	238
(186) Indice de cohérence	238
(187) Ratio de cohérence	238
(188) Fonction d'évaluation	240
(189) Probabilité de croisement LOX	248
(190) Probabilité de mutation séquençement	248

ABBREVIATIONS

AG	Algorithme Génétique
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
BP	Bin Packing
CE	Cross Entropy
DFaM	Design For additive Manufacturing
DFM	Design For Manufacturing
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la REalité
FIFO	First In First Out
MADM	Méthodes d'Aide à la Décision Multicritère
MAUT	Multi Attributes Utilization Theory
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MTO	Make-To-Order
OEM	Original Equipment Manufacturer
OF	Ordre de Fabrication
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations
SCOR	Supply Chain Operations Reference
SLM	Selective Laser melting
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
TOPSIS	Technique to Order Preference by Similarity to Ideal Solution

INTRODUCTION GENERALE

La fabrication additive est un domaine en plein essor. Initialement, ce procédé était considéré comme un outil de prototypage et fabrication rapide. Il est maintenant envisagé comme un nouveau procédé de production industrielle. Ainsi, intégrés à l'usine du futur ou l'industrie 4.0, les nouveaux procédés de fabrication additive offrent des nouvelles perspectives industrielles et économiques intéressantes.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la création de la chaire industrielle de fabrication additive SIGAM qui aborde ce nouveau procédé selon quatre points de vue :

- l'optimisation des procédés,
- l'optimisation de la conception de pièces,
- l'optimisation des machines,
- leur pilotage et l'industrialisation et l'organisation de la supply-chain.

Cette thèse s'inscrit dans ce dernier item.

La Fondation SIGMA soutient financièrement les activités de la chaire industrielle de fabrication additive en finançant notamment cette thèse.

La thèse est réalisée en partenariat avec la société AddUp. AddUp est une joint-venture entre Fives et Michelin. « Fives apporte sa compétence, son expérience et sa capacité d'innovation en génie mécanique, automatisation et contrôle de processus industriels pour la réalisation de machines et systèmes intégralement numérisés répondant aux impératifs technologiques de la fabrication additive, mais aussi aux contraintes de fiabilité et de reproductivité d'une production industrielle maîtrisée. Michelin a développé, depuis plusieurs années, une expertise unique en fabrication additive métallique pour produire, à l'échelle industrielle, des pièces de moules irréalisables avec les moyens de production traditionnels (usinage, soudure...), avec une capacité de production de 650 000 pièces/an (2 ateliers de production multi-machines et auxiliaires associés + post-traitements, 1 cellule de production automatisée avec post-traitement et contrôles intégrés). Cette technologie lui permet de développer et de commercialiser, aujourd'hui, des pneumatiques Poids Lourds et Tourisme aux performances inégalées. À travers cette joint-venture, Michelin valorise son expertise acquise dans des procédés industriels innovants. »

AddUp s'est positionné sur le marché de la fabrication de machines de fabrication additive métallique mais elle souhaite également proposer à ses clients des lignes de production « clé en main » : « des solutions industrielles globales en impression 3D métallique, de la conception et fourniture de machines aux services et conseils associés jusqu'à la production de pièces ». Ils développent la FORMUP™ LINE (Figure 1) qui est un atelier de production complet de la poudre jusqu'à la pièce finie.



Figure 1 – FORMUP LINE

Ce mémoire se structure de la façon suivante.

Dans un premier temps nous présenterons le contexte industriel dans lequel s'inscrit cette thèse. A partir d'un état de l'art sur la fabrication additive, nous mettrons en évidence les problématiques liées à la conception et l'exploitation d'ateliers intégrant la fabrication additive. Les problématiques de recherche traitées dans ces travaux seront ensuite dégagées.

Trois parties se succéderont ensuite correspondant aux trois niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel). Dans chacune d'entre elles, nous détaillerons la problématique de recherche que nous avons traitée en dégageant les verrous scientifiques. Nous proposerons ensuite une démarche méthodologique et un outil d'aide à la décision multicritère pour répondre à celles-ci. Enfin nous développerons un cas industriel. Enfin nous conclurons et présenterons quelques perspectives à ces travaux.

Une conclusion générale terminera ce manuscrit.

Partie I

Contexte industriel et problématiques

PARTIE I. CONTEXTE INDUSTRIEL ET PROBLEMATIQUES

CHAPITRE 1. CONTEXTE INDUSTRIEL	32
1. INTRODUCTION.....	32
2. FABRICATION ADDITIVE : DE LA DEFINITION AU PROCEDE	32
2.1. <i>Historique et définition</i>	33
2.2. <i>Les procédés et les matériaux</i>	34
2.3. <i>La fusion laser sur lit de poudre</i>	36
3. DU PROTOTYPAGE A LA PRODUCTION INDUSTRIELLE	37
3.1. <i>Prototypage et pièces détachées</i>	38
3.2. <i>Les évolutions technologiques</i>	39
3.3. <i>Industrialisation</i>	40
CHAPITRE 2. FABRICATION ADDITIVE ET SUPPLY CHAIN.....	41
1. L'EVOLUTION DE LA CHAINE DE VALEUR	41
2. INTEGRATION DE LA FABRICATION ADDITIVE DANS LES ENTREPRISES.....	42
3. LES EVOLUTIONS DU BUSINESS MODEL.....	43
3.1. <i>Place du client</i>	43
3.2. <i>Modèle centralisé</i>	45
3.3. <i>Modèle distribué</i>	45
3.4. <i>Discussion</i>	47
4. L'IMPACT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LA SUPPLY CHAIN.....	49
4.1. <i>Simplification de la supply chain</i>	50
4.2. <i>Evolution de la supply chain</i>	51
4.3. <i>Flexibilité, agilité et lean</i>	53
5. HYGIENE, SECURITE, ENVIRONNEMENT	53
6. SYNTHESE.....	54
CHAPITRE 3. LES ATELIERS DE FABRICATION ADDITIVE.....	56
1. BREVETS, NORMES, QUALIFICATIONS ET CERTIFICATIONS	56
2. PROCESSUS ET SPECIFICITES.....	57
2.1. <i>Le processus</i>	57
2.2. <i>Les spécificités des ateliers de fabrication additive</i>	61
2.2.1. Les temps de fabrication	61
2.2.2. Les ressources secondaires	61
2.2.3. La gestion de la poudre	61
CHAPITRE 4. PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE	62
1. OBJECTIFS INDUSTRIELS	62
2. LES NIVEAUX DE DECISION.....	62
3. PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE IDENTIFIEES DANS LE CADRE DE L'INDUSTRIALISATION DE LA FABRICATION ADDITIVE ET VERROUS SCIENTIFIQUES ASSOCIES.	63
3.1. <i>Problématique stratégique</i>	63
3.2. <i>Problématique tactique</i>	64
3.3. <i>Problématique opérationnelle</i>	65
4. ORGANISATION DU MANUSCRIT	66

CHAPITRE 1. CONTEXTE INDUSTRIEL

Dans un premier temps la fabrication additive est abordée à travers les procédés existants et les matériaux utilisés. Nous nous concentrons plus précisément sur la fusion sur lit de poudre (SLM) qui est le procédé étudié dans le cadre de ces travaux de recherche. Enfin nous nous intéressons à la phase actuelle de ce nouveau procédé, à savoir une phase de transition entre l'utilisation de la fabrication additive pour le prototypage rapide et son utilisation pour une production industrielle.

1. INTRODUCTION

L'industrie de la fabrication additive est composée de deux marchés distincts. D'un côté ce qui a trait à la production et à l'industrie : le monde médical, aéronautique, automobile, etc. De l'autre, les applications tournées vers le grand public : la mode, la décoration, le divertissement, etc.

Grâce à l'amélioration de la précision et de l'état de surface, la fabrication additive est de plus en plus utilisée dans le domaine médical (appareils auditifs, couronnes, prothèses). Une structure poreuse ressemblant à la structure d'un os est développée (Berman, 2012). Un des intérêts majeurs de la fabrication additive est que les dispositifs médicaux sont fabriqués directement aux bonnes dimensions pour le patient. Les stocks des hôpitaux pourront être ainsi réduits et la planification des opérations améliorée (Bhasin et Bodla 2014). Bourell *et al.* (2009) présentent plusieurs applications biomédicales : la conception d'implants personnalisés et de dispositifs médicaux, le développement de procédés viables Bio-AM (BAM) pour la fabrication de structures intelligentes et la construction de modèles 3D biologiques et de tissus à l'aide de produits biologiques vivants.

La possibilité de produire des pièces avec des géométries internes sophistiquées présente un intérêt pour les industries des turbines et des énergies. Les outilleurs dans l'industrie du gaz et du pétrole voient l'opportunité de créer des pièces fonctionnelles qui proposent des caractéristiques différentes pour prolonger la durée de vie des outils et réduire les pertes de temps (Petrick et Simpson 2013).

Mais la fabrication additive se développe dans d'autres domaines variés. Par exemple, les architectes utilisent la fabrication additive pour fabriquer des modèles de bâtiment (Berman, 2012) et l'industrie alimentaire s'intéresse à l'impression de produits comestibles (Sun *et al.*, 2015).

Cette étendue de domaines est l'une des richesses de la fabrication additive qui mène au développement actuel de ce nouveau procédé.

2. FABRICATION ADDITIVE : DE LA DEFINITION AU PROCEDE

La conception est directement liée aux moyens de fabrication (Cohen, *et al.*, 2014). Les ingénieurs conçoivent les pièces en prenant en compte les contraintes de moulage, de forgeage, de tournage, de fraisage et de soudage. La fabrication additive modifie ces contraintes lors de la conception des pièces. Elle ouvre de nouveaux horizons (Cohen *et al.*, 2014). Gao *et al.* (2015) confirment que l'allègement des contraintes de l'usinage classique (outillage, collision outils, géométries) permet, en utilisant la fabrication additive, une conception plus flexible où il est possible de mettre la matière là où elle est nécessaire.

Des contraintes sont supprimées mais de nouvelles exigences sont à prendre en compte. Il n'y a pas seulement la nature de la conception qui change : il existe un lien étroit entre la méthode de conception, la méthode de fabrication et la méthode de test et de qualification. Le Design for Manufacturing (DFM) permet aux concepteurs d'éliminer les difficultés d'usinage et de minimiser les coûts. Avec la fabrication additive, les règles de conception changent. Le DFM devient le DfAM (Design for Additive Manufacturing) et permet aux concepteurs de profiter des avantages de ce nouveau procédé (Rosen, 2007). Les nouvelles exigences sont dirigées par les caractéristiques du produit conçu et déterminent les caractéristiques de la pièce imprimée (Petrick et Simpson, 2013). Mellor (2014) liste les paramètres à prendre en compte lors de la conception pour la fabrication additive : l'orientation de la pièce, la maximisation du volume de fabrication, la stratégie de couche, la génération des

supports, la vitesse du procédé, l'énergie du laser, les stratégies de découpage de la pièce en couche et le contrôle thermique.

En plus du changement de contraintes à prendre en compte, Petrick et Simpson (2016) indiquent que la notion de « concepteur » est remise en question parce qu'elle devient plus accessible pour les utilisateurs. Les innovations dans les logiciels de conception permettent de concevoir des pièces complexes. Le design for manufacturing devient alors le manufacturing for design (Beaman, 2013).

La prise en compte des nouveaux paramètres fait que, selon Cohen *et al.* (2014), toutes les pièces ne peuvent pas être candidates à la fabrication additive. Les entreprises doivent comprendre quelles sont les caractéristiques importantes qui font qu'une pièce peut être faite en fabrication additive. Ces pièces incluent celles qui demandent un temps important d'assemblage, un outillage complexe, de petits volumes ou une obsolescence rapide. Khlan *et al.* (2014) partagent le fait que toutes les pièces ne sont pas forcément intéressantes à fabriquer par impression 3D. Ils énoncent des critères de sélection pour reconcevoir une pièce. Ces critères permettent de déterminer quelles pièces peuvent être pertinentes à reconcevoir pour être fabriquées par fabrication additive. Ces critères sont :

- Un design intégré : le nombre de pièces est réduit, il y a moins d'interfaces entre les pièces, les composants sont plus compacts et moins d'assemblage est nécessaire ;
- Une individualisation : pour répondre aux différents besoins des clients, elle implique plus de variations et des tailles de lot plus petites, ainsi qu'une séparation des produits en composants standards et en composants personnalisés ;
- Un design plus efficace : l'objectif est d'améliorer l'efficacité du produit en utilisation ;
- Un design plus léger : la réduction du poids améliore la performance du produit, la liberté de forme permet de mettre de la matière seulement là où c'est nécessaire.

Ces critères sont confirmés par White *et al.* (2013) qui indiquent que l'un des points innovants de la fabrication additive est de créer des géométries complexes sans gaspiller de matière première. De plus, en fabrication additive, la complexité des pièces et leur coût ne sont pas liés. Les restrictions de conception liées au coût n'existent plus (Lindemann *et al.*, 2012).

Les pièces sont réalisables en un seul tenant, ce qui supprime l'assemblage. Il est également possible d'intégrer des volumes creux à l'intérieur des pièces ou des structures dites en nid d'abeille ou lattice. L'intégration de ces espaces vides permet de réduire la quantité de matière utilisée et donc le poids total de la pièce ainsi que le temps de fabrication. Cet allègement a un impact important dans les domaines automobiles et aéronautiques où il permet de diminuer la consommation de carburant.

Geraedts *et al.* (2012) présentent un double objectif pour la recherche : développer de nouvelles méthodologies de conception (DfAM) et obtenir une meilleure connaissance de la manière dont la fabrication additive peut permettre le développement de nouveaux produits. La fabrication additive a une influence importante sur la façon dont une pièce est conçue, fabriquée et utilisée. Le DfAM est la méthode développée actuellement pour concevoir les pièces pour la fabrication additive. Cette méthode a ses limites et pour développer de nouvelles méthodes, il faut mieux comprendre les technologies de fabrication additive.

2.1. Historique et définition

La fabrication additive est issue de deux procédés : la topographie amorcée en 1890 par Blather et la photodéposition amorcée en 1860 par Willeme. En 1968, Swainson propose un procédé qui fabrique directement un modèle plastique par une polymérisation 3D d'un polymère photosensible à l'intersection de deux faisceaux laser. A partir de là, de nombreuses technologies ont été développées (Bourell *et al.*, 2009).

La fabrication additive est un « processus d'assemblage de matériaux qui permet de fabriquer des objets à partir de données d'un modèle 3D, habituellement couche après couche, par opposition aux méthodes de fabrication soustractives » (ASTM International, 2013).

2.2. Les procédés et les matériaux

Depuis les deux procédés initiaux, de nombreux procédés ont été développés et de nombreux matériaux sont utilisables. L'ASTM présente les différents procédés de fabrication additive avec les technologies, les matériaux et les sources d'énergie associés ainsi que leurs forces et leurs faiblesses (Figure 2).

Catégories	Technologies	Encre	Source d'énergie	Forces / Faiblesses
Extrusion de matière	Dépôt de fil	Thermoplastiques Pâtes céramiques Pâtes métalliques	Energie thermique	Machine d'extrusion peu coûteuse Impression multi-matériau Résolution des pièces limitée Mauvais état de surface
	Création de contour			
Fusion sur lit de poudre	Frittage sélectif au laser	Polyamides Polymères	Faisceau laser à haute puissance	Haute précision et détails Pièces complètement denses Résistance et rigidité spécifique hautes Manipulation et recyclage de la poudre Support et structure d'ancrage
	Frittage laser direct de métal	Poudre de métal atomisé (acier inoxydable 17-4 PH, cobalt-chrome, titane Ti6AL-4V), poudre de céramique		
	Fusion sélective au laser		Faisceau d'électrons	Pièces complètement denses Résistance et rigidité spécifique hautes
	Fusion par faisceau d'électrons			
Photopolymérisation en cuve	Stéréolithographie	Photopolymères Céramiques (aluminium, zirconium, PZT)	Laser ultraviolet	Vitesse de construction élevée Bonne résolution des pièces Surcuisson, forme de ligne scannée
Projection de matériau	Imprimante à jet d'encre	Photopolymères Wax	Energie thermique Photopolymérisation	Impression multi-matériaux Haute finition de surface Matériau peu résistant
Projection de liant	Imprimante à jet d'encre indirect	Poudre polymère (plastique, résine), poudre céramique, poudre métallique	Energie thermique	Impression d'objets colorés Nécessite une infiltration durant le post-traitement Large choix de matériau Porosité élevée sur les pièces finies
Laminage de feuilles	Fabrication d'objets laminés	Film plastique, feuille métallique, ruban céramique	Faisceau laser	Haute finition de surface Faible coût de matière, machine et procédé
Dépôt direct d'énergie	Mise en forme des filets au laser Soudage électronique par faisceau	Poudre métallique fondue	Faisceau laser	Réparation de pièces abîmées Impression de la matière avec une gradation fonctionnelle Nécessite une machine de post-traitement

Figure 2 - Classification des procédés de fabrication additive par l'ASTM (ASTM International, 2013)

Cotteleer (2014) classe ces différents procédés de fabrication additive en fonction de la phase dans laquelle ils sont le plus utilisés (Figure 3).

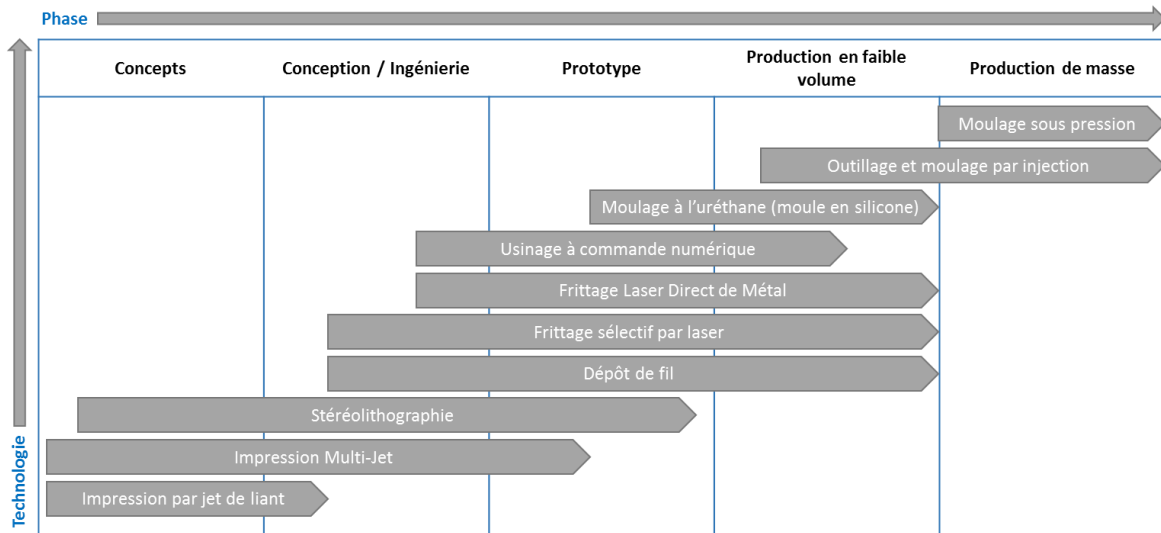


Figure 3 - Technologies en fonction de l'utilisation (Cotteleer, 2014)

Pour chaque technologie, Verlhust (2015) indique quels matériaux peuvent être utilisés (Tableau 1).

Technologie	Polymères	Métaux	Céramiques	Composites
Stéréolithographie	X			X
Traitement numérique de la lumière	X			
Impression Multi-Jet	X			X
Dépôt de fil	X			
Fusion par faisceau d'électrons		X		
Frittage sélectif par laser	X	X	X	X
Frittage thermique sélectif	X			
Frittage Laser Direct de Métal		X		
Impression 3D par jet de liant	X	X	X	X
Impression 3D à base de plâtre			X	X
Fabrication d'objets laminés	X	X	X	X
Consolidation par ultrasons		X		
Dépôt d'un jet de poudre (LMD)		X		X

Tableau 1 - Matériaux utilisables pour chaque technologie (Verhulst, 2015)

Les types de matériaux utilisés dans la fabrication additive sont (Piazza et Alexander, 2015) :

- Les polymères qui sont les matériaux les plus largement utilisés, le nylon étant préféré aux autres car il fond et se lie mieux ;
- Les matériaux métalliques ;
- Les céramiques qui sont utilisées pour leurs structures chimiques et leur résistance aux températures élevées. Malheureusement, ces matériaux peuvent être fragiles, ce qui les rend difficiles à fabriquer, en particulier si des géométries complexes sont impliquées.
- Les matériaux composites.

Cotteleer (2014) classe les matériaux en fonction de la maturité de leur utilisation en fabrication additive, du plus mature au moins mature (Tableau 2).

Prototypage, outillage et pilotage	Fabrication	Développement précoce
Polystyrène	Titane	Béton
ABS	Alliages de cobalt	Tissu vivant
Acier	Alliages de chrome	Plastiques renforcés en carbone
Aluminium	Polyuréthanes	Verre
Cuivre	Nylon	Aliments
Alliages de nickel	PEEK et PEKK	Argile
Blonded plaster	Acide polylactique	
Alumine	Polycarbonate	
Zirconium	Sable	
Papier	Epoxy	

Tableau 2 - Niveau de maturité de chaque matériau (Cotteleer, 2014)

D'après Petrick et Simpson (2013), les caractéristiques des matériaux vont devenir un aspect critique pour la conception et la production. Les caractéristiques des poudres influencent la microstructure. Une innovation collaborative entre les fournisseurs de matériaux, les concepteurs et les producteurs est nécessaire.

De plus, des opérations de finition sont nécessaires pour atteindre les tolérances fonctionnelles et les cibles de performance (Petrick et Simpson, 2013). Pour garantir la tenue mécanique et la géométrie fonctionnelle, il faut parfois rajouter des post-traitements.

Par ailleurs, les variations entre machines ou entre pièces existent couramment et inquiètent les utilisateurs. Il existe des tests destructifs et non destructifs pour vérifier la solidité, la flexibilité, la densité et d'autres caractéristiques. La porosité et les pièces avec des parties internes complexes sont difficiles à tester (Petrick et Simpson, 2013). Ces variations entraînent des incertitudes au niveau des temps de fabrication.

2.3. La fusion laser sur lit de poudre

Les machines fabriquées par AddUp utilisent les procédés de fusion laser sur lit de poudre. Les poudres utilisées sont des poudres métalliques.

Selon Baumer (2016), les systèmes de fusion sur lit de poudre métallique (Figure 4) ou polymère sont les systèmes les plus largement utilisés sur les plateformes d'impression 3D pour la fabrication de produits finis complexes. Contrairement aux systèmes utilisant les poudres polymère, les systèmes Electron Beam Melting (EBM) et le Direct Metal Laser Sintering (DMLS) sont capables de générer des propriétés de matière qui égalent ou qui dépassent les propriétés obtenues en usinage classique.

Le procédé consiste à :

- Etaler une couche de poudre par un rouleau ou un racleur ;
- Fondre cette couche par un laser de forte puissance ;
- Descendre le piston supportant le modèle 3D en cours de l'épaisseur de la couche réalisée.

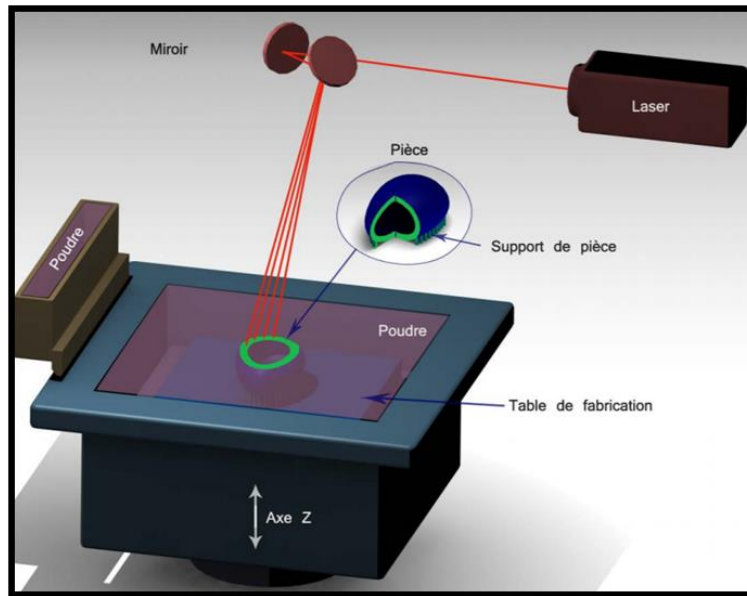


Figure 4 - Principe de la fusion sur lit de poudre

L'atmosphère de la chambre de combustion doit être contrôlée durant tout le processus de réalisation afin d'assurer l'homogénéité des propriétés.

La Figure 5 correspond à la matrice SWOT du procédé de fusion sur lit de poudre. Elle permet de synthétiser les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces de ce nouveau procédé.

<p style="text-align: center;">Forces</p> <p>Géométrie de pièces complexes Rapidité d'exécution grâce au multi-lasers Machines moins chères que pour la projection de poudre</p>	<p style="text-align: center;">Faiblesses</p> <p>Technologies relativement récentes Inadapté aux grandes séries actuellement Nécessité d'avoir un support plan Gestion de l'anisotropie et des contraintes internes par TTH</p>
<p style="text-align: center;">Opportunités</p> <p>Nouvelles possibilités de fabrication réalisation de pièce impossible en usinage traditionnel → nouvelles opportunités de conception Variation continue de propriétés fonctionnelles</p>	<p style="text-align: center;">Menaces</p> <p>Obsolescence rapide des machines due aux développements de nouvelles technologies Qualification des performances des pièces en fonctionnement réel</p>

Figure 5 - SWOT : Fusion sur lit de poudre (Rouen, 2015)

Les inconvénients du lit de poudre sont la nécessité d'une surface plane pour pouvoir étaler la matière grâce au rouleau et l'apparition d'une anisotropie dans le sens de la construction avec un grain allongé selon l'axe vertical (refusion de la couche n-1 lors de la réalisation de couche n), ce phénomène est atténué par des traitements thermiques post-production afin d'homogénéiser la structure (Rouen, 2015). Ces traitements thermiques font partie des post-traitements.

3. DU PROTOTYPAGE A LA PRODUCTION INDUSTRIELLE

Le hype cycle de Gartner (Figure 6), qui représente le développement de technologies, permet de situer les différents types d'impression 3D et les différents types d'utilisation par rapport à leur développement. Les technologies sont placées sur une courbe en fonction de leur visibilité, de ce qui a déjà été réalisé et des étapes nécessaires à leur développement (Verhulst, 2015).

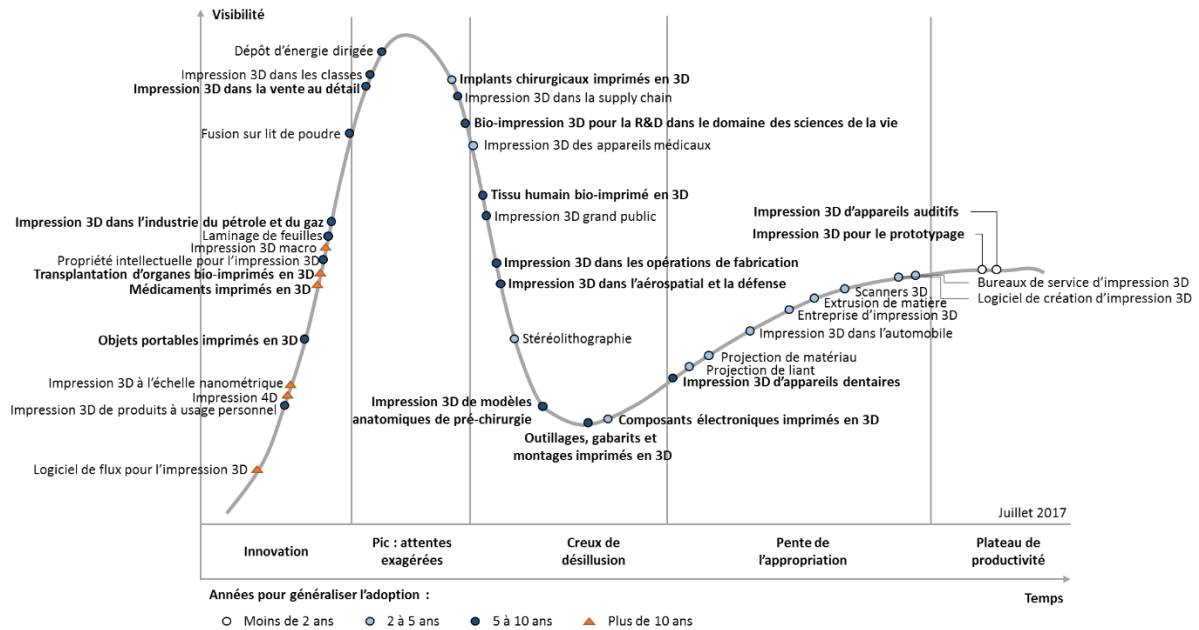


Figure 6 - Hype Cycle de Gartner sur les impressions 3D

L'utilisation la plus ancienne et la plus répandue de la fabrication additive est le prototypage (Kruth, *et al.*, 1998). C'est pourquoi, le prototypage est dans la zone de productivité du hype cycle de Gartner. D'un point de vue industriel, le développement dépend du domaine. L'impression 3D dans le secteur de l'automobile est au niveau de la pente de l'appropriation alors que l'impression 3D dans le secteur des appareils médicaux arrive dans le creux de désillusion.

La fabrication additive est propice au prototypage pour sa rentabilité pour les petites séries. C'est pour cette même raison que la fabrication additive est utilisée pour le prototypage et les pièces détachées.

3.1. Prototypage et pièces détachées

Selon Holmström *et al.* (2010), il existe un compromis entre la production de masse et la production à la demande. Pour les pièces détachées dans les domaines militaire et spatial, il faut souvent des petits lots de pièces voire des pièces uniques. Selon Berman (2012), les coûts de la fabrication additive pour les grandes productions sont élevés. La fabrication additive est intéressante pour les produits qui ont une forte valeur ajoutée ou qui sont très personnalisés ou fabriqués en petite quantité. Les avantages de l'utilisation des machines de fabrication additive pour les pièces détachées sont (Khajavi *et al.*, 2014):

- Des coûts opératoires plus bas ;
- Des temps d'arrêt moins importants ;
- Un potentiel plus grand pour satisfaire le client : la fabrication additive permet de prolonger les durées de vie des produits en améliorant la disponibilité des pièces de remplacement (Baumers *et al.*, 2016). Dans le domaine automobile, un bon service après-vente est devenu un critère important de succès dans la vente de voitures neuves. Les attentes des détaillants sont la réduction des lead times, la réduction des coûts de stockage et l'amélioration de la satisfaction client. Grâce à la fabrication additive, une économie de 90% peut être faite sur les coûts de stockage et d'inventaire et sur les coûts de transport. Par conséquent, le coût total de production peut être réduit et la disponibilité des produits menant à l'amélioration de la satisfaction client peut être améliorée (Bhasin et Bodla, 2014).
- Une flexibilité et une robustesse plus importantes : en fonction de la demande du client, la pièce est facilement modifiable. Cette possibilité permettrait de transporter des usines entières (médicaments, composants) dans les zones d'urgence (épidémie ou catastrophe naturelle) (Manners-Bell et Lyon, 2012). Il en est de même pour les endroits géographiquement isolés (plateformes pétrolières). L'armée américaine est en train d'évaluer les opportunités de la production décentralisée pour fabriquer les pièces détachées près des zones de combat (Holmström *et al.*, 2010).

- Une gestion des stocks et du système d'information plus facile, plus écologique (les machines sont plus petites et consomment moins d'énergie) : La réduction des coûts d'obsolescence du stock est un atout pour le déploiement de la fabrication rapide (Holmström *et al.*, 2010). Au lieu de chercher parmi un stock de millions de pièces, de calculer les pièces redondantes à stocker pour répondre rapidement au client, ils suffisent de chercher la pièce sur une librairie en ligne et à l'imprimer en 3D. Ainsi une grande place de stockage n'est plus nécessaire pour répondre rapidement au client (Manners-Bell et Lyon, 2012).

Les points de vente où il sera possible d'imprimer un modèle 3D proposé par le magasin ou réalisé soi-même vont se développer. Les particuliers pourront imprimer des pièces de rechange dont le modèle sera fourni par le fabricant par exemple (Verhulst, 2015).

Le prototypage et les pièces détachées deviennent des utilisations courantes de la fabrication additive. Des évolutions technologiques permettent d'envisager la fabrication additive comme un outil de production industriel.

3.2. Les évolutions technologiques

Le hype cycle de Gartner permet également de constater que certaines technologies et certains domaines sont maintenant dans la « pente de l'appropriation ». La fabrication additive est bien en train de passer du prototypage à une utilisation industrielle.

L'utilisation industrielle se situe encore dans la phase d'innovation. La diminution du coût et le développement des matériaux, l'amélioration des caractéristiques mécaniques et l'augmentation du taux de production font partie des évolutions technologiques attendues.

Selon Berman (2012) et Piazza et Alexander (2015), l'un des plus grands défis pour que la fabrication additive soit plus largement adoptée est l'augmentation du nombre de matériaux qui peuvent être utilisés pour fabriquer des pièces. Chaque année, de nouveaux matériaux sont développés pour la fabrication additive, pour obtenir de meilleures microstructures et une meilleure tolérance dimensionnelle. Piazza et Alexander (2015) ajoutent que les poudres métalliques, utilisées en fabrication additive, sont jusqu'à 30 fois plus chères que leurs homologues en vrac. Pour l'instant, les fabricants travaillent avec des poudres propriétaires ou avec des poudres fournies par le vendeur de la machine, les prix sont donc élevés. L'entrée sur le marché d'autres vendeurs de poudre pourrait faire baisser significativement les prix et faciliter le déploiement de la fabrication additive.

D'après Berman (2012), la précision obtenue par fabrication additive est plus faible que celle obtenue avec l'usinage classique. La résistance mécanique, la dureté, la résistance à la chaleur et à l'humidité, la viscosité et la stabilité dimensionnelle doivent être évaluées avec attention. La précision influe sur la qualité de l'état de surface qui dépend de l'épaisseur de la couche de matériau mise en œuvre : une épaisseur plus faible permet d'obtenir un meilleur état de surface mais augmente le temps de fabrication. La qualité de surface est déterminée par l'épaisseur des couches, par la forme de la matière première et par la technologie de superposition utilisée (Gao *et al.*, 2015).

Le faible taux de production est l'un des problèmes importants à résoudre (Khajavi *et al.*, 2014). Pour permettre un changement radical, les fabricants de machines doivent continuer à développer leurs machines pour améliorer l'automatisation des machines, pour baisser les prix d'achat et pour réduire les temps de production.

Les évolutions technologiques attendues devraient permettre d'améliorer les caractéristiques mécaniques des pièces, de diminuer les post-traitements et de diminuer le temps de fabrication tout en obtenant une qualité supérieure. A long terme, les applications vont être plus nombreuses et atteindront un meilleur niveau de précision. Il devrait y avoir une diminution des prix des machines et des matières premières (Berman, 2012).

Ces évolutions technologiques sont corrélées aux évolutions des marchés. Elles ne sont utiles que si les marchés se développent mais le développement des marchés dépend de l'évolution des machines.

3.3. Industrialisation

Selon Campbell *et al.* (2012), le rythme du développement et de la mise en œuvre de la fabrication additive est incertain et susceptible de varier considérablement pour les différents types de produits. La révolution pourra avoir lieu quand il sera possible de fabriquer les volumes nécessaires pour remplacer l'usinage classique. Pour l'instant, des solutions hybrides sont développées. Mais la fabrication additive n'est pas une science-fiction (Manners-Bell et Lyon, 2012). La croissance du marché de la fabrication additive est attendue à un taux de 13.5% par an (Baumers *et al.*, 2016).

La fabrication additive était principalement utilisée pour du prototypage rapide. Une transition est en cours, l'objectif est maintenant de réussir à industrialiser ce procédé. Des industriels comme General Electric, Airbus ou encore Dassault investissent dans la fabrication additive. L'objectif 2020 de GE additive, la filiale de fabrication additive de GE, est d'avoir une usine de 10000 machines dont 1000 unités réservées à un usage interne. De son côté, Airbus prévoyait, en 2018, d'imprimer 30 tonnes de pièces métalliques tous les mois et de produire en fabrication additive les systèmes de contrôle climatique des cabines passagers pour les A330Neo (Lefèvre, 2017).

L'industrialisation de la fabrication additive est donc en cours mais dans un contexte incertain. Pour que la fabrication additive puisse être industrialisée à grande échelle, il est nécessaire de réduire les coûts et d'augmenter la productivité.

CHAPITRE 2. FABRICATION ADDITIVE ET SUPPLY CHAIN

Afin que la fabrication additive puisse être utilisée en tant que procédé industriel, il est nécessaire d’anticiper l’intégration des entreprises qui utilisent la fabrication additive au sein des supply chains. L’utilisation de la fabrication additive entraîne une évolution de la chaîne valeur qui amène à s’interroger sur les facteurs d’intégration de la fabrication additive dans les entreprises. Cette intégration est liée au business model de l’entreprise ou à son évolution. Toutes ces évolutions ainsi que le procédé de fabrication additive en lui-même ont un impact sur la supply chain (Antomarchi *et al.*, 2019).

1. L’EVOLUTION DE LA CHAINE DE VALEUR

La simplification de la chaîne de valeur en devenant indépendant des entreprises 3PL améliore la performance et augmente la durée d’utilisation des produits (Gao *et al.*, 2015).

Croft (1996) parle de deux chaînes de valeur : la chaîne de valeur de fabrication (Figure 7) et la chaîne de valeur digitale (Figure 8).

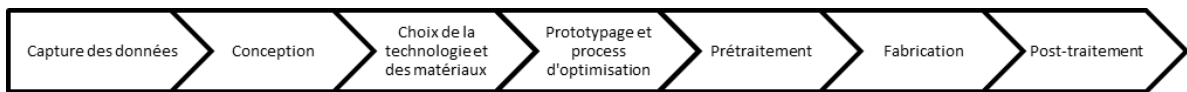


Figure 7 - Chaîne de valeur de fabrication (Croft, 1996)

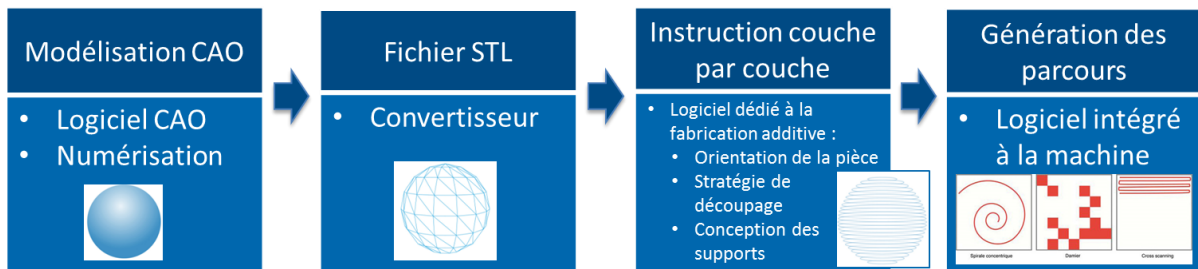


Figure 8 - Chaîne de valeur digitale (Croft, 1996)

La chaîne de valeur de fabrication change : tout le monde peut avoir accès à des logiciels de conception 3D et faire imprimer une pièce en 3D. L’écosystème englobe les activités combinant les deux chaînes de valeur. Croft propose une représentation de l’écosystème de la fabrication additive (Figure 9).

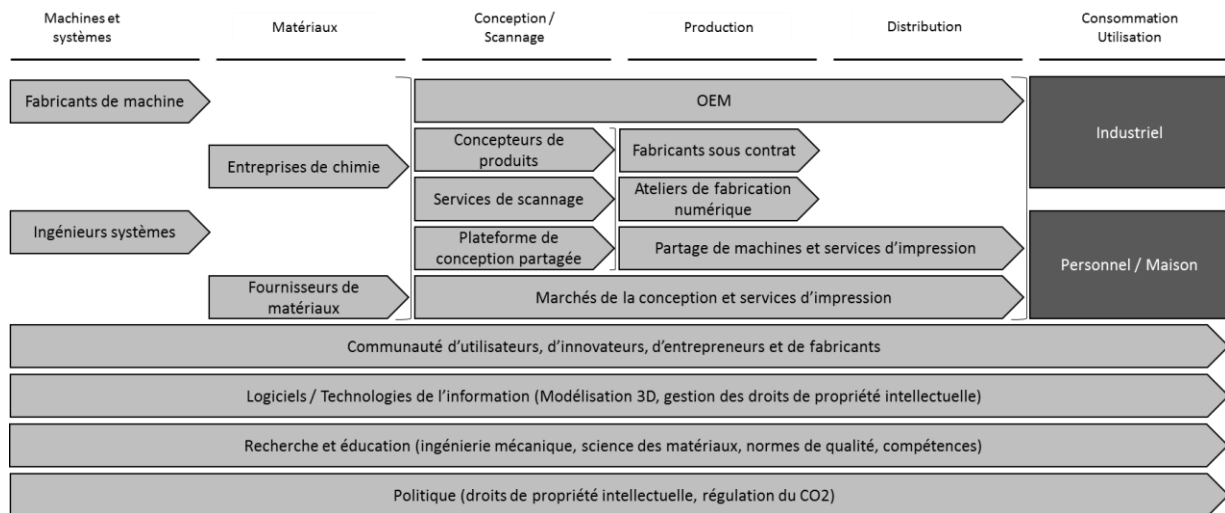


Figure 9 - Ecosystème de la fabrication additive (Croft, 1996)

Les chaînes de valeur et l'écosystème liés à la fabrication additive sont différents de ceux de l'usinage traditionnel. Il faut donc parvenir à intégrer cette nouvelle technologie dans les entreprises existantes ou créer de nouveaux ateliers.

2. INTEGRATION DE LA FABRICATION ADDITIVE DANS LES ENTREPRISES

Les entreprises sont en phase de transition : l'un de leurs défis est d'intégrer la fabrication additive à leurs ateliers. Verhulst (2015) propose quatre scénarii possibles suite à l'adoption d'équipements de fabrication additive :

- Pas de changement radical au sein de l'entreprise. Les produits offerts et la chaîne de production restent identiques. L'impression 3D est utilisée dans de faibles proportions par rapport aux méthodes traditionnelles, dans un but exploratoire. Son utilisation pour du prototypage rapide en est un bon exemple.
- Pas de changement sur les produits, mais bien dans la chaîne de production. L'entreprise intègre les économies que peut amener l'impression 3D pour diminuer ses coûts. Cela permet, par exemple, de limiter le stock nécessaire et de produire à la demande. Cela ajoute de la flexibilité et de la réactivité au sein des activités.
- Saisir les opportunités de changement de la chaîne de production sans modifier l'offre de produits. Une meilleure performance peut être atteinte suite à l'utilisation de machines de fabrication additive. Les produits peuvent connaître des innovations. Une illustration de ce dernier point consisterait à la possibilité de personnaliser le produit plus finement par rapport aux attentes des clients.
- Modifications à la fois des produits et de la chaîne de production. Les changements sont ici radicaux et bouleversent complètement le « business model » mis en place.

Il est possible d'intégrer la fabrication additive à des chaînes de fabrication existantes ou de créer de nouveaux ateliers. Le choix entre les scénarii dépend de la capacité d'investissement de l'entreprise mais surtout de la prise de risque et de la stratégie des décideurs. Mellor (2014) a travaillé sur un cadre d'implémentation de la fabrication additive dans différents types d'entreprises. Les facteurs qui influent sur la stratégie d'intégration de la fabrication additive mis en avant sont donnés dans le Tableau 3.

Facteurs organisationnels		Facteurs stratégiques	Facteurs de la supply chain	Facteurs opérationnels	Facteurs technologiques
Taille de l'entreprise	Culture	Stratégie : De l'entreprise De production De R&D Technologique	Clients Fournisseurs Logistique Distribution Localisation	Conception Planification Contrôle Qualité Coûts Niveau d'intégration	Normes Bénéfices Compromis Maturité Niveau d'héritage

Tableau 3 - Facteurs à prendre en compte pour l'intégration de la fabrication additive (Mellor, 2014)

Ces facteurs sont à prendre en compte lors de l'intégration d'un nouveau procédé en général. La fabrication additive a un impact sur les facteurs de la supply chain (abordé dans le paragraphe 4). Le fait que la fabrication additive ne soit pas encore un procédé mature rend plus compliqué la prise en compte de certains facteurs comme le contrôle et les normes. Les contrôles à réaliser et les règles à suivre ne sont pas encore totalement formalisés. A ce jour, peu de normes ont été publiées, les institutions de la recherche et de l'industrie doivent continuer à travailler pour arriver à un consensus au niveau des normes (Gao *et al.*, 2015). L'amélioration de la qualité fait partie des attentes au niveau des évolutions technologiques. De plus, les coûts sont encore significativement trop importants pour faciliter l'intégration de la fabrication additive dans les entreprises.

Néanmoins, le procédé de fabrication additive en lui-même présente des critères facilitant sa mise en œuvre. Ces critères sont :

- La capacité des fabricants de pièces à relier les produits de fabrication additive aux exigences des utilisateurs ;
- La compétitivité des fabricants de pièces dans la gamme de produits, le prix et la performance ;

- La capacité des fournisseurs de machine à fournir toute une gamme de services de soutien pendant les différentes étapes du processus de mise en œuvre ;
- La capacité des utilisateurs et des fabricants à travailler étroitement pendant le processus de mise en œuvre ;
- La capacité des personnes à se relier entre elles pour la résolution conjointe des problèmes et le partage des connaissances et de l'information ;
- L'engagement des fabricants dans la mise en œuvre par l'affectation des ressources, la détermination à résoudre tous les problèmes ;
- Le degré d'engagement des fabricants et des utilisateurs pour améliorer les relations existantes et pour planifier conjointement afin de voir l'avenir à long terme.

La mise en place de cette nouvelle technologie dans une entreprise doit être pilotée par un manager qui a une vision claire de la fabrication additive. Elle doit faire l'objet de formations et de campagnes d'informations. Connaître les limites de la fabrication additive et définir un cadre adapté est essentiel pour éviter les risques potentiels (Kersten *et al.*, 2015).

L'intégration de la fabrication additive amène, ainsi, les entreprises à s'interroger sur l'évolution de leur business model.

3. LES EVOLUTIONS DU BUSINESS MODEL

L'intégration du client au centre du business model entraîne l'amplification du changement du modèle centralisé vers un modèle décentralisé. Les plateformes collaboratives se développent, ainsi que la co-création avec le client. Il existe une interdépendance forte entre le développement technologique et le développement de nouveaux business models : les supply chains ont un rôle important pour créer de la valeur (Bogers *et al.*, 2015).

3.1. Place du client

Selon Bogers *et al.* (2015), la fabrication additive nécessite des changements au niveau des business modes et de la manière de créer de la valeur. Cette nouvelle technologie permet de mettre le client au centre du business model (Figure 10). Baumers *et al.* (2016) le confirment en affirmant que la réponse appropriée est d'engager les utilisateurs de cette future technologie dans le processus d'innovation et d'explorer les nouveaux business model.

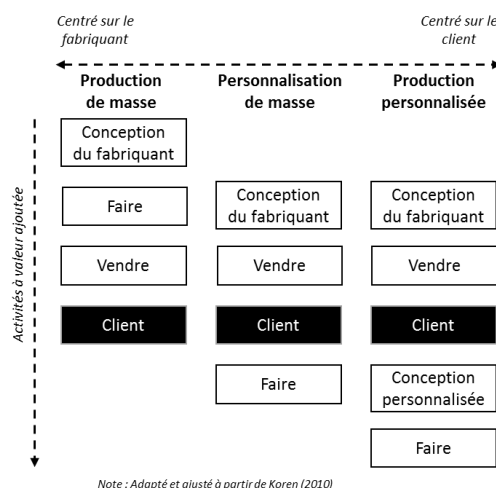


Figure 10 – D'un modèle centré sur le fabricant à un modèle centré sur le client (Bogers *et al.*, 2015)

Alors que le workflow traditionnel se déroule linéairement du concepteur vers l'utilisateur, le nouveau workflow introduit par la fabrication additive intègre l'utilisateur dans la boucle de conception (Figure 11) (Geraedts *et al.*, 2012).

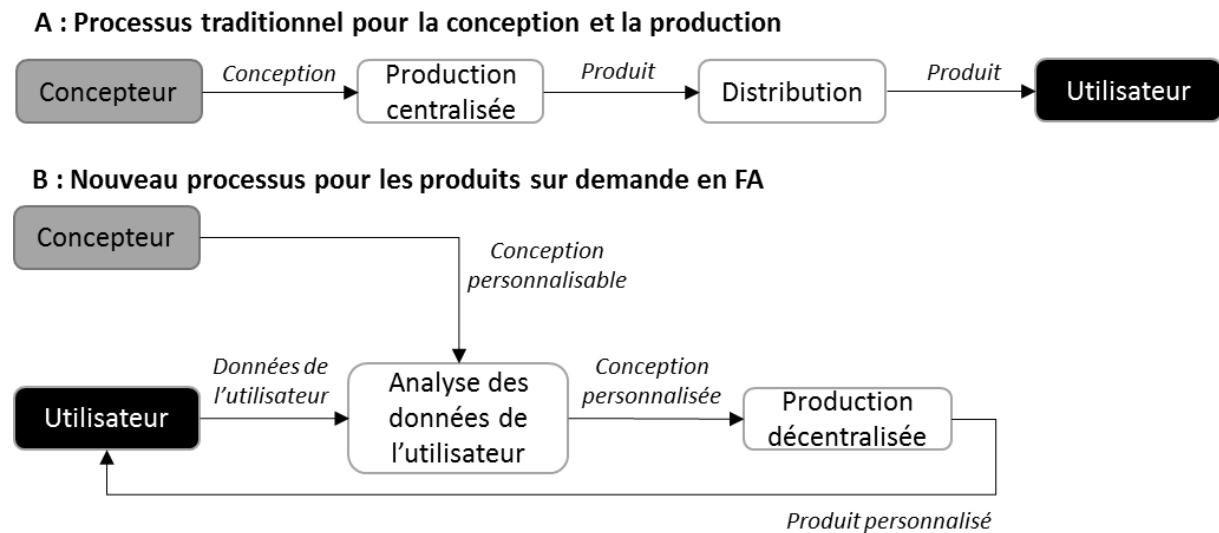


Figure 11 – Processus traditionnel et nouveau processus (Geraedts *et al.*, 2012)

Le Tableau 4 compare le modèle centré sur le fabricant et le modèle centré sur le client en termes d'efficacité, de complémentarités, de verrous et d'innovation (Bogers *et al.*, 2015).

Caractéristiques	Bénéfice	Coût opératoire machine	Coût matière	Coût opérateur	Coût pré et post traitement
Procédé automatisé	Minimise le coût humain	A	N	A	N
Fabrication pièces complexes et petites	Bonne productibilité	N	N	N	N
Pas d'outillage, de gabarit et de montage	Elimine les coûts d'outillage	A	N	A	A
Réduction de la planification	Réduit le temps de planification	N	N	A	A
Pièce unique ou petit lot	Produits personnalisés	A	A	A	N
Pas de rebut	Pas de coût de destruction	A	A	N	A
Meilleure précision et finition	Qualité assurée	A	A	A	A
Produits intégrés	Elimine les coûts d'assemblage	N	N	A	A
Pas de temps de setup	Réduit le temps de cycle total	N	N	A	A

A : affecte, N : n'affecte pas

Tableau 4 - Comparaison du modèle centré sur le fabricant et du modèle centré sur le client

Le modèle centré sur le fabricant est plus propice à un développement industriel alors que le modèle centré sur le client est plus propice à la personnalisation de masse et à la réalisation de pièces en petite quantité. La personnalisation de masse est l'un des principaux avantages de la fabrication additive. Les organisations actuelles ne permettent pas de supporter efficacement le besoin de personnalisation. Les exigences imposent de reconsidérer ces organisations en les complétant avec des technologies d'information avancées. (Mokasdar, 2012). L'évolution ou le choix du business model dépend de l'activité de l'entreprise.

3.2. Modèle centralisé

Dans un modèle centralisé, tous les produits sont fabriqués au niveau des OEM (Original Equipment Manufacturers). Ils sont envoyés vers des centres de distribution régionaux pour être ensuite transportés jusqu'à des services locaux pour être ensuite distribués aux clients (Figure 12).

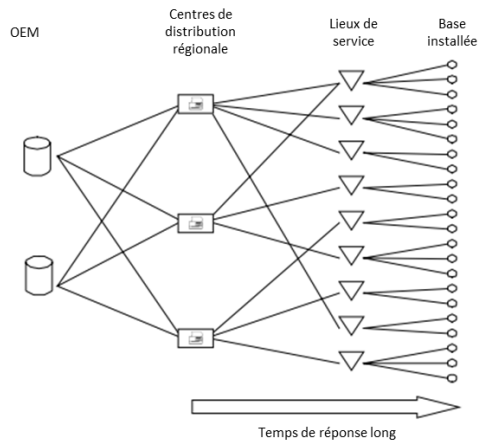


Figure 12 - Représentation du modèle centralisé (Bogers *et al.*, 2015)

La fabrication additive permet de réduire les niveaux de stock nécessaires dans les centres de distribution en utilisant un modèle centralisé. En effet, pour réduire leur coûts et en gardant un temps de réponse acceptable pour des produits personnalisés, les entreprises peuvent fabriquer de manière conventionnelle les pièces ayant un turn over important et utiliser la fabrication additive dans leurs centres de distribution régionaux pour de la différenciation retardée ou de la personnalisation de masse (Mokasdar, 2012). Cette configuration réduit la complexité de la chaîne d'approvisionnement (équilibre des capacités et des stocks), diminue le temps de réponse et modifie le modèle d'entreprise en tant que tel, conformément à l'approche de personnalisation de masse (Bogers, 2015). En contrebalançant l'incertitude sur la demande, la fabrication additive rend la supply chain plus réactive (Chan *et al.*, 2018).

Selon Holmström *et al.* (2010), les OEM deviennent moins vulnérables par rapport aux entreprises 3PL avec la réduction des stocks, des coûts logistiques et des coûts liés aux pièces qui ne tournent pas beaucoup. De plus, ils peuvent les concurrencer en termes de coût et de productivité. Localiser plusieurs machines au même endroit est plus économique en termes de personnel, un opérateur qualifié peut s'occuper de plusieurs machines.

3.3. Modèle distribué

Une des limites du modèle centralisé est l'expédition des pièces : les pièces sont fragiles et impliquent un packaging particulier. De plus, le lead time entre la commande et la réception augmente avec la distance entre l'usine et le client. Une alternative possible est de placer la fabrication près des clients. Ce modèle n'était pas implantable avec les procédés de fabrication traditionnels à cause du prix des moules, des outillages ou des montages d'usinage.

Dans le modèle décentralisé (Figure 13), les commandes, les bases de données et l'ensemble des outils sont gérés de manière centralisée et les pièces sont imprimées chez le partenaire disponible le plus proche du client (Reeves *et al.*, 2011).

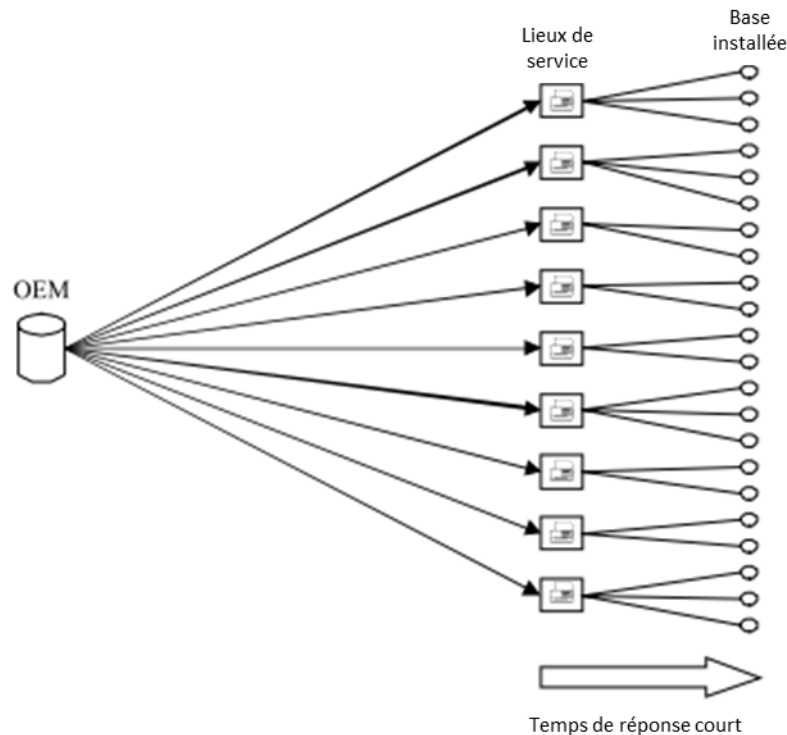


Figure 13 - Représentation du modèle décentralisé (Bogers *et al.*, 2015)

Les supply chains décentralisées sont plus flexibles et résistent mieux aux turbulences. Le système de production décentralisé s'axe autour de la localisation et de l'accessibilité. Il permet d'améliorer la réactivité par rapport aux besoins et aux changements du marché (Bogers *et al.*, 2015).

Selon Khajavi *et al.* (2014), la décentralisation peut permettre de :

- Avoir une meilleure réactivité et flexibilité ;
- Améliorer la base de données de décision avec des données plus précises liées aux conditions locales ;
- Réduire les besoins en système de gestion d'informations ;
- Améliorer l'efficacité et la fiabilité des supply chains ;
- Faire moins d'investissement dans chaque installation ;
- Avoir des coûts liés au stock et aux inventaires moins importants ;
- Avoir un coût opératoire total plus bas ;
- Diminuer le temps d'indisponibilité ;
- Avoir un meilleur potentiel pour la satisfaction client ;
- Avoir une supply chain plus robuste.

Le déploiement de ce modèle permet d'éliminer les coûts de possession de stocks et de transport et de réduire les délais de livraison (Holmström *et al.*, 2010).

Cependant, il faut faire attention à l'absence de management efficace et à l'absence de flux d'informations entre les différents sites de distribution. Le prix d'acquisition d'une machine de fabrication additive et le coût du personnel sont les deux obstacles majeurs au développement d'un modèle distribué pour les pièces détachées. Le taux de production bas est un autre problème à résoudre (Khajavi *et al.*, 2014).

Selon Bogers *et al.* (2015), les entreprises peuvent produire dans des installations de production décentralisées près de leurs clients avec un investissement relativement faible en raison de la réduction des outils dédiés et de la flexibilité des plates-formes de fabrication additive. Cette possibilité implique un changement fondamental dans la structure globale de la fabrication en amplifiant le changement entre la production centralisée et la production décentralisée.

Toutefois, Kersten *et al.* (2015) mettent en garde sur le fait que la décentralisation représente aussi le risque d'augmenter les coûts de fabrication et de ne pas faire d'économies d'échelle. Ce que confirme Khajavi *et al.* (2014) en ajoutant que le prix d'acquisition d'une machine de fabrication additive et le coût du personnel sont les deux obstacles majeurs au développement d'un modèle distribué pour les pièces détachées. En effet, le modèle distribué nécessite la duplication des machines sur les lieux de production et de faire monter en compétence un nombre important d'employés.

3.4. Discussion

La principale différence entre les modèles centralisé et distribué est la localisation de la production. Dans le modèle centralisé, la production est faite chez l'OEM ou chez les centres de distribution régionaux alors que dans le modèle distribué la production est faite au niveau des unités locales. Mokasdar (2012) présente la représentation SCOR des supply chains centralisées (Figure 14) et des supply chains distribuées (Figure 15).



Figure 14 - Modèle SCOR de la supply chain centralisée (Mokasdar, 2012)

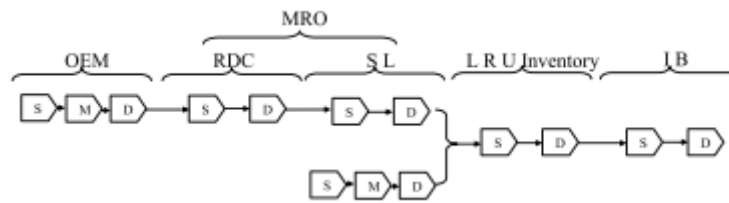


Figure 15 - Modèle SCOR de la supply chain distribuée (Mokasdar, 2012)

Khajavi *et al.* (2014), Mokasdar (2012), Holstrom *et al.* (2010) et Kersten *et al.* (2015) analysent et comparent les modèles centralisés et décentralisés. Mokasdar (2012) compare le modèle centralisé et le modèle décentralisé avec le modèle actuel illustré par la Figure 16.



Figure 16 - Modèle SCOR de la supply chain actuelle (Mokasdar, 2012)

Ainsi le stock de sécurité est maximal pour le scénario actuel alors qu'il est à son plus bas niveau pour le modèle distribué. Cependant, aujourd'hui, la duplication des machines, nécessaire dans le cadre du scénario décentralisé, a un impact économique significativement fort. Le seul avantage actuel du modèle décentralisé est de pouvoir absorber les pic de charge plus facilement et de produire des nouvelles pièces (Khajavi *et al.*, 2014). Le modèle centralisé est donc préférable actuellement même si dans le futur nous pouvons espérer que le modèle distribué sera le plus pertinent.

Certaines entreprises arrivent à un modèle glocalisé : un modèle où les tendances globales sont appliquées à une échelle locale en s'adaptant au lieu choisi. L'aspect local du concept glocalisé fait appel à une chaîne d'approvisionnement auto-suffisante de telle sorte que l'usine fournisse des matériaux, des pièces, des éléments préassemblés, etc. à des fournisseurs locaux et ne fournisse que des clients locaux. L'aspect global entre en vigueur lorsque cette structure est mise en œuvre dans plusieurs régions du globe (Bogers *et al.*, 2015).

Minguella-Canela *et al.* (2017) font le lien entre le type de production et la localisation des unités de production. Ils utilisent la notion de point de découplage de la commande client (CODP) (Figure 17) qui correspond au moment où la commande client est reçue, c'est-à-dire, la transition entre la production sur des prévisions et la production engagée sur commande (Wikner et Rudberg, 2005).

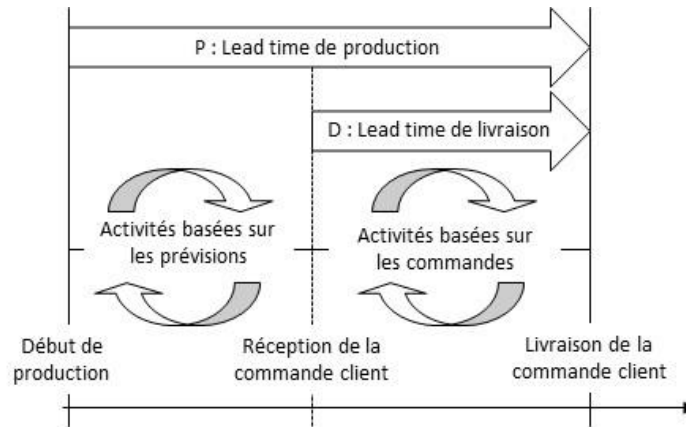


Figure 17 - Point de découplage de la commande client (Minguella-Canela *et al.*, 2017)

Le concept de report se rapporte à la question de retarder le plus possible les processus de la chaîne d'approvisionnement au moment de la commande du client afin d'incorporer le maximum de fonctionnalités demandées par le client.

La Figure 18 illustre le lien entre le degré de report, le CODP et le degré de personnalisation. Plus le CODP arrive tôt, plus le degré de report est faible, plus le degré de personnalisation est important (Minguella-Canela *et al.*, 2017).

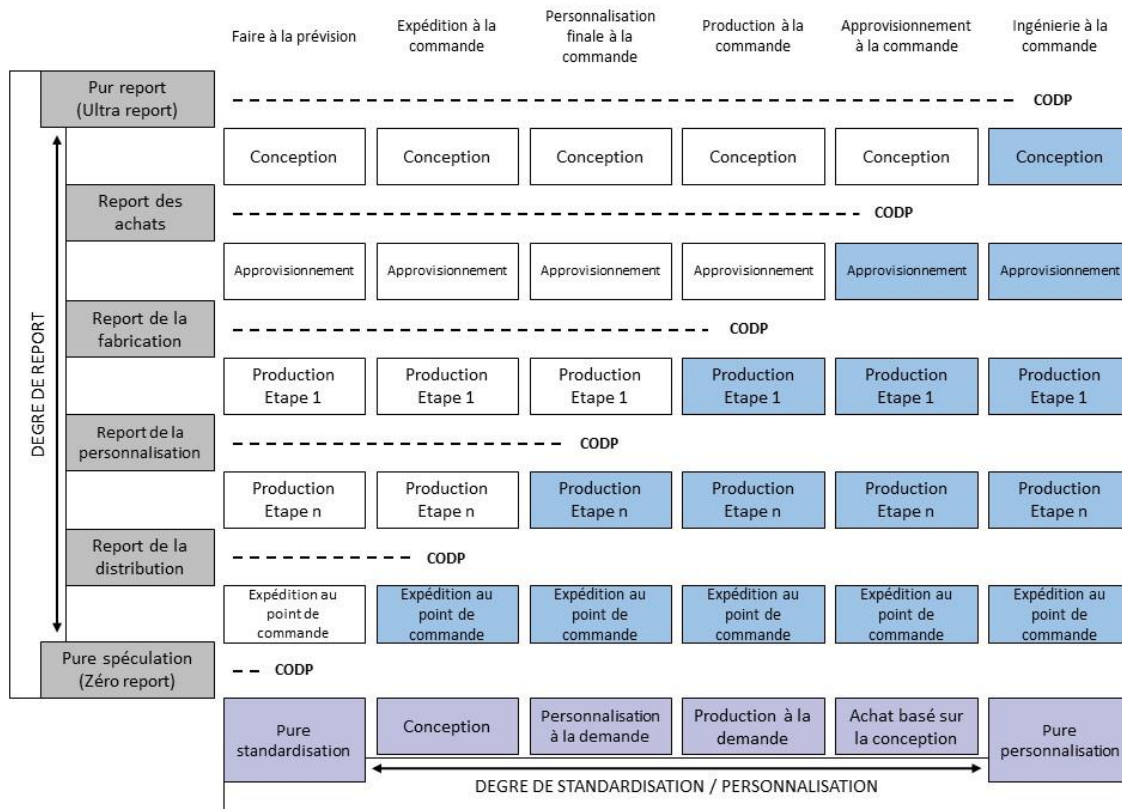


Figure 18 - Position du CODP dans différentes situations tout au long de la supply chain (Minguella-Canela *et al.*, 2017)

Pour les produits non personnalisés ayant une demande stable, il est possible de travailler avec des sites de production situés loin du client final pour réduire les coûts de stock et d'expédition avec les coûts courants et les niveaux technologiques de développement.

Pour les composants de produits fabriqués en quantité importante avec une personnalisation demandée par le client, par exemple les pièces personnalisées dans l'industrie automobile, ils peuvent être fabriqués loin du client final puis personnalisés près de celui-ci.

Pour les produits de convenance avec une forte personnalisation et une demande unitaire, comme pour une partie de l'industrie du jouet, les activités de production sont délocalisées dans des magasins près du client et parfois chez le client lui-même.

Pour les produits de convenance sans personnalisation mais avec une demande discontinue, comme une autre partie de l'industrie du jouet, la décision dépend du volume de demande. Si le niveau de demande est élevé, le modèle conseille d'implémenter une production sur prévisions avec des processus délocalisés. Si le niveau de demande est moyen, il vaut mieux diminuer le degré de report sans aller jusqu'à une personnalisation complète qui ne serait pas assez rapide. Pour un niveau de demande, proche de la pièce personnalisée unitaire, il est fortement recommandé de mettre les points de production près des lieux de consommation (Minguella-Canela *et al.*, 2017).

Pour l'instant, les modèles sont surtout centralisés, les modèles distribués se répandront en fonction de l'évolution de la fabrication additive.

4. L'IMPACT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LA SUPPLY CHAIN

De nombreux auteurs discutent les intérêts de la fabrication additive mais peu de travaux portent sur l'application massive de la fabrication additive en industrie. Les applications actuelles remplacent principalement des procédés existant. Elles n'introduisent pas encore de l'innovation. De nombreux industriels considèrent que la fabrication additive est un élément important de la supply chain digitale mais qu'elle peut fonctionner efficacement uniquement si la fabrication additive est intégrée correctement dans les supply chains (Chan *et al.*, 2018).

La Figure 19 présente l'impact de la fabrication additive sur la supply chain et sur les produits (Cotteleer, 2014).



Figure 19 - Impacts de la fabrication additive sur la supply chain et les produits (Cotteleer, 2014)

4.1. Simplification de la supply chain

La gestion de la supply chain est une fonction intégrée qui lie les principales fonctions d'une entreprise et les différents processus. La Figure 20 représente la structure d'une supply chain traditionnelle, alors que la Figure 21 présente la structure d'une supply chain de fabrication additive. Comme l'illustrent les schémas, la fabrication additive permet de simplifier la supply chain : pour réaliser une pièce, une seule matière première est souvent nécessaire et il n'y a pas de pièce à assembler, ce qui diminue le nombre d'étapes de transport et supprime l'assemblage.

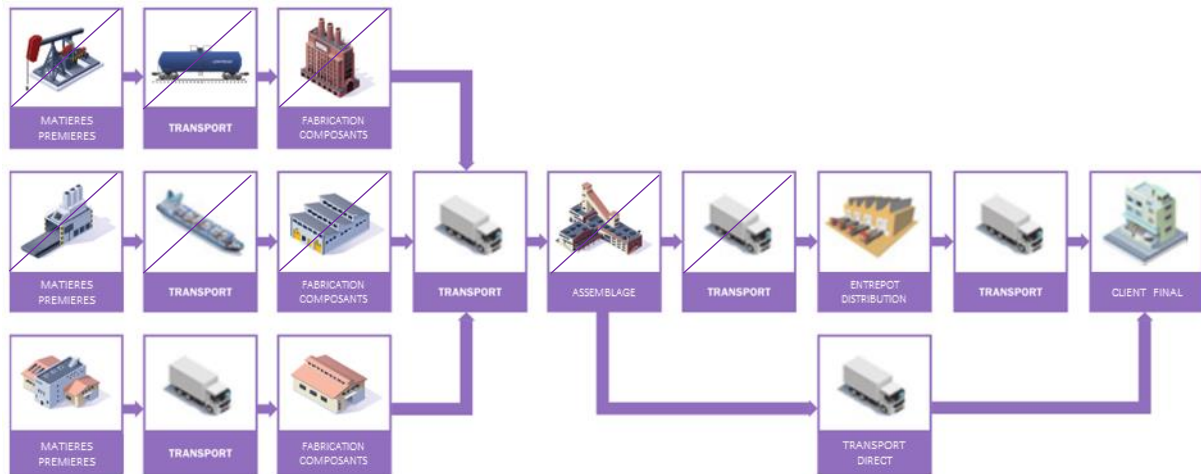


Figure 20 - Supply chain traditionnelle (Janssen *et al.*, 2014)

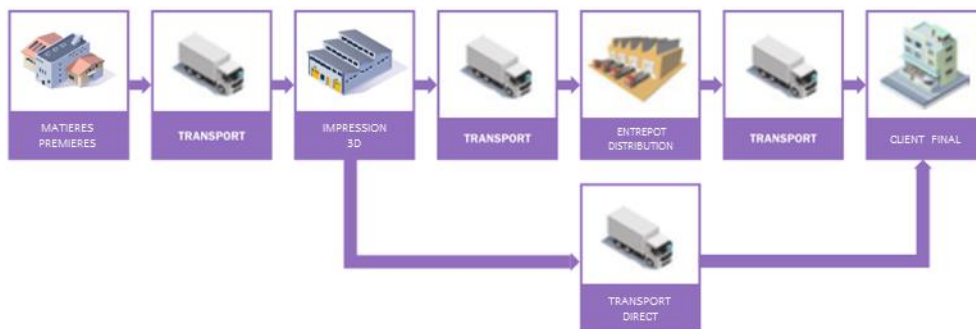


Figure 21 - Supply chain pour la fabrication additive (Janssen *et al.*, 2014)

La supply chain pour la fabrication additive est parfois plus compliquée à cause des prétraitements et des post-traitements. En fabrication additive métallique, les plateaux doivent être rectifiés avant d'être à nouveau utilisés. Cette étape peut être internalisée ou externalisée. De plus, des opérations de finition sont nécessaires pour atteindre les tolérances fonctionnelles et les cibles de performance en termes de propriétés mécaniques et de propriétés du matériau (Petrick et Simpson, 2013). Pour garantir la tenue mécanique et la géométrie fonctionnelle, il faut parfois rajouter des post-traitements. Les étapes de prétraitement et de post-traitement peuvent être réalisées dans l'atelier dans le cas d'un atelier de fabrication additive intégré ou sous-traités. La sous-traitance ajoute des acteurs dans la supply chain tels que des usieurs ou encore des entreprises de traitement thermique.

Manners-Bell et Lyon (2012) présentent les évolutions par rapport aux fournisseurs et à la logistique avale. Il y a moins d'opportunités pour les fournisseurs d'être en amont des supply chains. Les besoins en composants sont fortement diminués. La logistique avale est également concernée. La production à la demande change fondamentalement les relations entre le fabricant, le grossiste et le revendeur. Dans certains secteurs, les revendeurs deviennent des vitrines pour les fabricants : ils n'ont pas de stock. Les commandes seront envoyées au fabricant et livrées chez le client. Le marché de la livraison à domicile va fortement croître. La fabrication additive a permis à un petit nombre de fabricants d'établir un business model viable sans investissement important, elle peut remodeler les règles de la compétition dans certains domaines (Cotteleer, 2014).

Les entreprises sont un mix entre le développement de logiciels, les services de livraison, la gestion des relations avec les partenaires et l'intelligence. Les compagnies de logistique vont devenir des prestataires de service de gestion du cycle de vie du produit. C'est une grande opportunité pour ceux qui peuvent suivre, d'établir cette nouvelle organisation.

4.2. Evolution de la supply chain

Janssen *et al.* (2014) et Mokasdar (2012) proposent une analyse de la supply chain de fabrication additive en suivant les étapes présentées par la méthode SCOR (Supply Chain Operations Reference Model). Nous allons développer l'évolution de la supply chain au niveau des étapes *Make*, *Source*, *Deliver* et *Return*.

Make correspond à la conception et à l'activité de fabrication. Les coûts et les temps de développement de nouveaux produits sont habituellement très élevés : coût de conception, nouveaux outils, nouveaux moules, réglage de la machine... Grâce à la fabrication additive, les coûts de développement sont extrêmement réduits et les temps aussi. Un bénéfice important de la fabrication additive est la réduction du temps de développement d'un produit : la création rapide de prototypes sans besoin d'outillages spécifiques permet de tester plusieurs configurations. Les risques lors du lancement d'un produit diminuent ainsi que le temps de lancement du produit. La fabrication commence à influencer sur la manière de penser la R&D, certaines entreprises pensent que l'externalisation de certaines réflexions pour utiliser la créativité et le savoir-faire d'un grand nombre de personnes (sous-traitants, clients...), pourrait supplanter la R&D (Cohen *et al.*, 2014). Bogers *et al.* (2015) ajoutent que l'ajustement des géométries, des concepts et des nouveaux composants est possible après le lancement en production du produit. Cela permet une réaction meilleure et plus rapide par rapport aux changements de mode et de marché. D'après Lindemann *et al.* (2012), la fabrication additive aide à réduire le time-to-market, le lancement d'un nouveau produit est moins risqué car il ne demande pas la fabrication d'outillages onéreux. L'impression 3D n'a pas besoin de produire en grands lots pour être rentable (elle ne l'est d'ailleurs pas si de grandes quantités sont imprimées). Elle permet de produire des pièces à l'unité et ainsi de favoriser la personnalisation de masse. Des prestataires de service en impression 3D se développent dans le monde entier.

Source correspond à l'identification et à l'évaluation des fournisseurs. Les besoins en composants diminuent. Les matériaux sont disponibles rapidement, il n'y a besoin que des matières premières ce qui permet une diminution des risques de rupture de stock. Le coût nécessaire pour stocker les pièces est un coût important que la fabrication additive permet de diminuer (en particulier pour l'industrie aéronautique). Dans les pièces stockées, certaines sont inutilisées entraînant une perte d'espace et des coûts logistiques. Le seul stock nécessaire est le stock de matières premières nécessaires à la production des pièces (White et Lynskey, 2013). Le marché des modèles 3D va se développer, si une entreprise ne parvient pas à concevoir une pièce, il suffit de récupérer un modèle 3D, de le personnaliser selon la demande du client et de l'imprimer.

Deliver correspond à la préparation et à l'expédition. La suppression de l'assemblage diminue le besoin en transport des composants (Figure 22). La supply chain est simplifiée. La partie qui ne change pas pour les transports est la dernière étape de la supply chain : la livraison des clients à leur domicile.

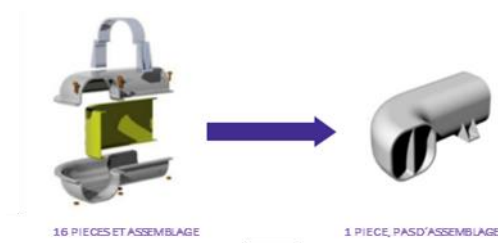


Figure 22 - Suppression de l'assemblage

Return correspond aux retours liés aux sous performances des produits et des services. Le produit pouvant être réalisé sur mesure, le nombre de retours est nettement réduit. La production des pièces détachées peut être décentralisée. Au lieu d'avoir des stocks importants de pièces détachées, les entreprises pourront les imprimer à la demande du client (Janssen *et al.*, 2014).

La supply chain de la fabrication additive est représentée grâce aux niveaux de configuration et d'implémentation du modèle SCOR (Figure 23 et Figure 24).

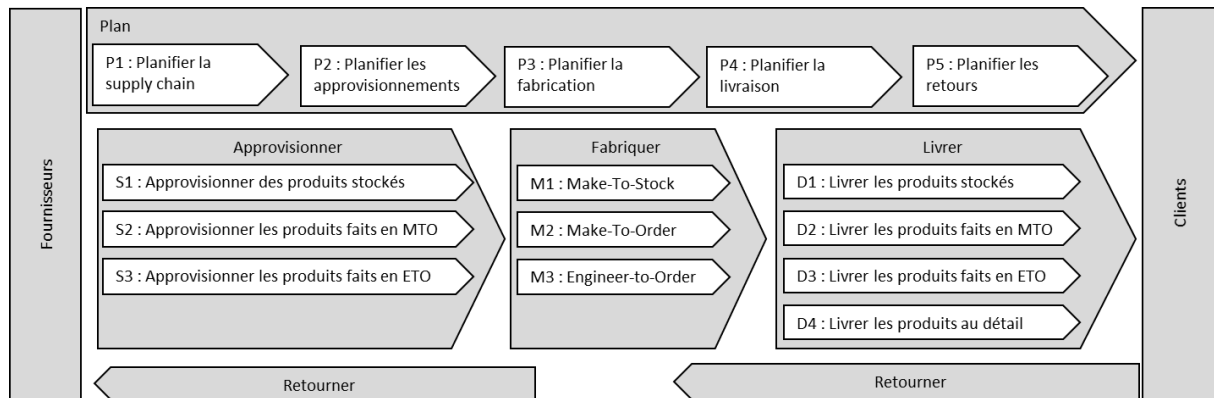


Figure 23 - SCOR : Niveau de configuration (Lockamy et McCormack, 2004)

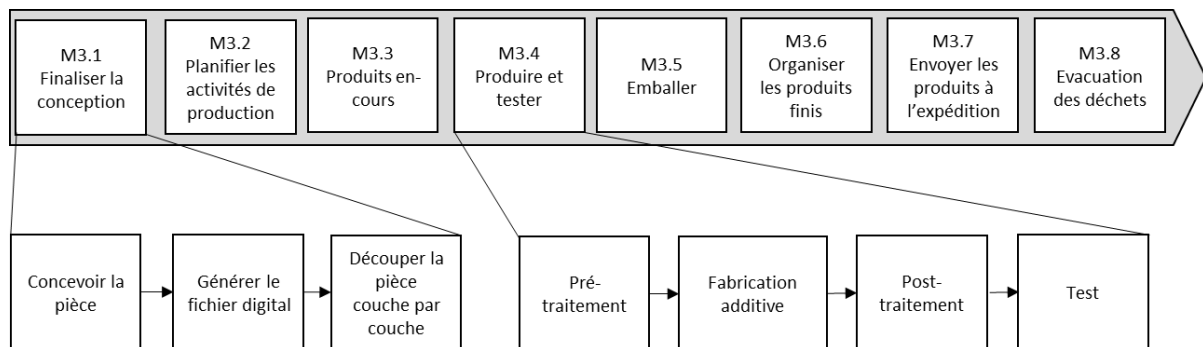


Figure 24 - SCOR : Niveau d'implémentation et activités

Kersten *et al.* (2015) listent les impacts de la fabrication additive sur la supply chain. Il présente également les risques et les opportunités pour la supply chain. Les risques et les opportunités dépendent du contexte, du domaine, des acteurs... Chaque impact fait l'objet d'un compromis entre les opportunités et les risques (Tableau 5).

Impact	Opportunités	Risques
Remplacement de l'envoi des produits par l'envoi des fichiers qui permet de rationaliser la logistique et la gestion des stocks	Réduction des coûts logistiques Disponibilité à la demande des produits	Licenciements Réduction des stocks de sécurité pour répondre aux pics de demande
Décentralisation et fabrication en local	Supply chains plus agiles Réduction des coûts logistiques	Augmenter des coûts de fabrication Suppression des économies d'échelle.
Disparition de l'assemblage	Réduction de la complexité de la supply chain Augmentation de l'agilité et de la résilience contre les perturbations	En aval, cela peut être plus compliqué pour la qualité et le contrôle
Amélioration de la durabilité Utilisation de ressources et de matières premières naturelles avec moins de gaspillage	Diminution de l'impact environnemental en utilisant seulement la matière utile	Augmentation des volumes de production si tout le monde l'utilise pour faire plusieurs essais de prototypes
Augmentation de l'agilité et de la flexibilité de la supply chain	Personnalisation de masse à bas coût	
Suppression des outillages	Réduction des lead times en produisant les prototypes très rapidement et peu chers ce qui peut accélérer l'ensemble du processus de développement	Création de nouveaux goulots à cause de l'accélération du développement

Tableau 5 - Impacts, Opportunités et Risques

4.3. Flexibilité, agilité et lean

Quand la demande est sûre et que les produits uniformes suffisent, il n'y a pas d'intérêt à augmenter la flexibilité du processus de fabrication. Par contre, si le marché environnant est caractérisé par l'incertain, par des produits variés ou par des goûts fluctuants des clients, les entreprises peuvent avoir un avantage concurrentiel à adopter des technologies qui rendent leur fabrication plus flexible (Weller *et al.*, 2015).

Selon White et Lynskey (2013), il existe deux types de supply chains : les supply chains lean et les supply chains agiles. La supply chain lean est utilisée pour les produits qui sont en demande continue, il faut répondre rapidement aux changements de demande où le volume ou le produit change. La supply chain agile se concentre sur la réduction des lead times et est utilisée pour les produits tendances qui ont un cycle de vie court, le but est de réduire les gaspillages de matière, les coûts et les temps de production. La fabrication additive est déstabilisante pour ces deux modèles. Pour les supply chains agiles, les fabricants peuvent produire une multitude de pièces différentes à partir d'une machine. Il est possible de produire en local et d'éliminer les besoins en sous-traitance, cela réduit les temps de transport. Les pièces sont principalement faites en MTO (Make-To-Order). Pour les supply chains lean, la fabrication additive permet de supprimer les coûts d'outillage et de diminuer le gaspillage de matière. La fabrication additive permet de produire de nombreuses pièces spécialisées en une seule pièce ce qui permet un gain de place conséquent et diminue le besoin d'import/export à l'international.

5. HYGIENE, SECURITE, ENVIRONNEMENT

L'environnement est un enjeu important de l'industrie du futur : les industriels cherchent à développer des supply chains durables. Selon White et Lynskey (2013), une supply chain durable est une supply chain qui élimine les gaspillages. Par ailleurs, les bénéfices environnementaux et sociaux sont des objectifs parallèles (Baumers *et al.*, 2016). Le but est d'améliorer les impacts sociaux et environnementaux tout au long de la supply chain pour rassurer le client sur le fait que les sources du produit sont responsables. La fabrication additive s'inscrit dans ces objectifs.

En effet, Manners-Bell et Lyon (2012) présentent l'impact positif de la fabrication additive sur la consommation d'énergie. Par une meilleure utilisation des ressources, elle permet de limiter l'énergie et la matière utilisées. La

diminution des besoins en transport, stockage, packaging... permet de diminuer la consommation en essence et l'émission de gaz à effet de serre (Manners-Bell et Lyon, 2012). L'empreinte carbone du produit fini est ainsi diminuée et l'énergie totale nécessaire à la production d'une pièce peut être réduite aussi (Campbell *et al.*, 2012).

La fabrication additive permet aussi de diminuer le gaspillage de matières premières. Grâce aux nouvelles possibilités de conception, la matière est positionnée là où elle est nécessaire. Si l'utilisation de la poudre est optimisée, la quantité de matière nécessaire à la fabrication d'une pièce est réduite (Baumers *et al.*, 2016). Elle permet d'utiliser moins de matière première et ainsi d'améliorer le buy:fly ratio qui est le ratio entre le poids de matière première achetée et le poids du composant final (Manners-Bell et Lyon, 2012). Une autre source de gaspillage qui peut être fortement réduite est l'excès de production et les produits invendus (Campbell *et al.*, 2012), en fabriquant à la demande.

La fabrication additive pourrait aussi réduire l'utilisation de produits chimiques toxiques (Campbell *et al.*, 2012). L'utilisation de solvants chimiques, de matières premières et de consommables pose un défi significatif à l'estimation de la toxicité, des modes de fin de vie, des effets cancérigènes et des risques pour la santé humaine pour les opérateurs (Gao *et al.*, 2015).

Toutefois, l'un des risques de la fabrication additive est l'augmentation du volume généré. La démocratisation de l'impression 3D avec la facilité de faire produire ou de produire peut augmenter la quantité de pièces produites, d'où l'importance de la recherche sur le recyclage des matériaux utilisés (Baumers *et al.*, 2016). Les taux de recyclage varient en fonction du type de métal (de 1% pour le lithium à 50% pour le fer et le cuivre). La fabrication additive pourrait utiliser des matériaux recyclés comme les plastiques et le métal (Campbell *et al.*, 2012). Des systèmes existent pour transformer les rebuts de plastique en filaments utilisables pour les machines. L'impression 3D va ainsi avoir un impact croissant sur la demande de plastique dans les années à venir. C'est pourquoi il est nécessaire de penser à des solutions de réduction et de recyclage des déchets (Verhulst, 2015).

La fabrication additive a donc des impacts positifs et des impacts négatifs sur l'environnement. Les avantages sont notoires mais il faut faire attention au recyclage des matériaux utilisés et au volume produit. De plus, le risque pour la santé des personnes en contact avec la poudre est un élément fondamental de l'implémentation de la fabrication additive.

6. SYNTHÈSE

Nous allons synthétiser l'ensemble des impacts de la fabrication additive sur la supply chain en général et sur chaque étape de la supply chain.

Le Tableau 6 synthétise les améliorations et les détériorations liées à la fabrication additive sur l'ensemble de la supply chain.

Amélioration	Détérioration
Simplification de la supply chain	Production de masse
Réactivité	Taille des pièces
Agilité	Précision
Flexibilité	Caractéristiques mécaniques
Automatisation	Qualité
Travail collaboratif	Tester
Prototypage	Répétabilité
Petite et moyenne séries	Absence de standards et de certifications
Vente au détail et pièces détachées	Absence de qualifications
Rapprochement entre conception et fabrication	Absence de cadre légal

Tableau 6 - Impacts de la fabrication additive sur la supply chain

Nous allons reprendre le modèle SCOR afin de placer les différents impacts, en dehors des impacts sur les coûts et les temps, de la fabrication additive sur l'étape de fabrication (Figure 25). Les éléments soulignés correspondent aux éléments sur lesquels la fabrication additive a un impact positif.

Les Figure 26 et Figure 27 représentent les impacts de la fabrication additive sur les étapes d’approvisionnement, de livraison et de fabrication en termes de temps et de coûts.

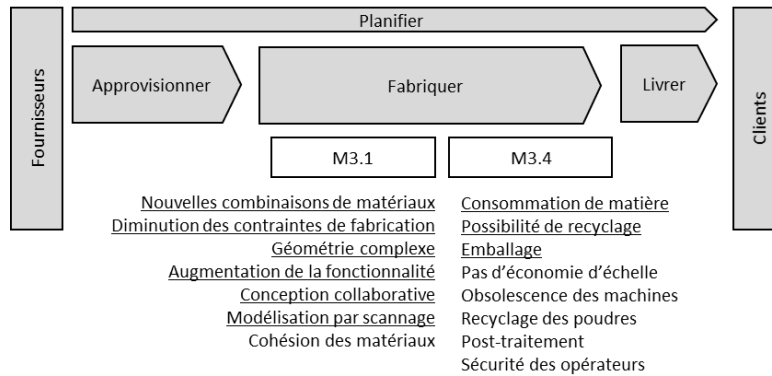


Figure 25 - Impact de la fabrication additive sur l'étape de fabrication (général)

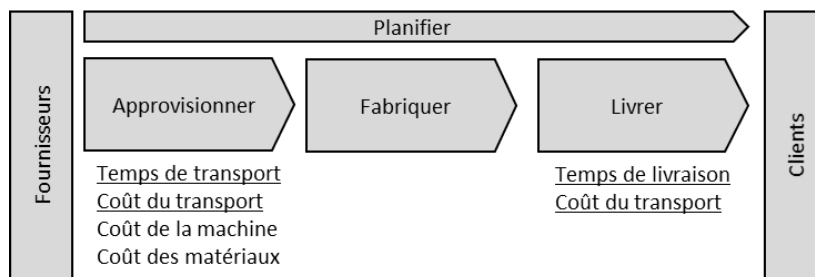


Figure 26 - Impact de la fabrication additive sur les étapes d'approvisionnement et de livraison

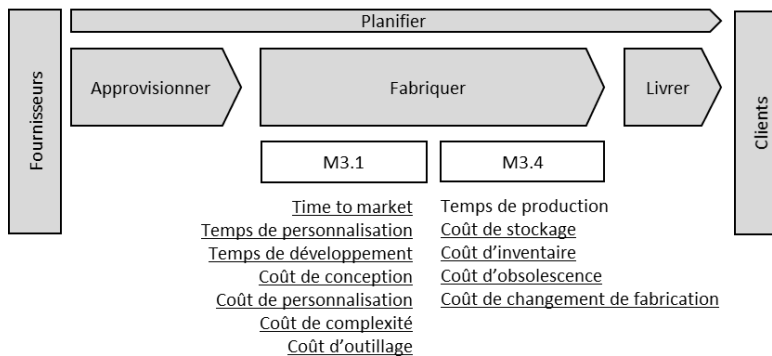


Figure 27 - Impact de la fabrication additive sur l'étape de fabrication (coûts et temps)

Les seuls coûts sur lesquels la fabrication additive n’a pas un impact positif sont le coût machine et le coût matière.

Les modèles SCOR permettent de montrer les différences entre les supply chain traditionnels et les supply chain intégrant la fabrication additive et ainsi de démontrer la nécessité de mener des travaux de recherche qui prennent en compte ces impacts et ces spécificités.

CHAPITRE 3. LES ATELIERS DE FABRICATION ADDITIVE

Après avoir présenté l'impact de la fabrication additive sur la supply chain, nous allons nous concentrer plus particulièrement sur les ateliers qui intègrent la fabrication additive. Nous allons voir dans quel cadre légal ils se développent en termes de brevets, de normes, de qualifications et de certifications. Nous rentrerons ensuite dans le détail du processus lié à l'utilisation du procédé de fusion sur lit de poudre.

1. BREVETS, NORMES, QUALIFICATIONS ET CERTIFICATIONS

Les industriels et les pouvoirs publics commencent à s'interroger sur les solutions pour limiter les copies et le téléchargement. La question se pose également pour les particuliers qui voudraient protéger les modèles qu'ils ont créés (Verhulst, 2015). L'émergence du marché des pièces 3D et du téléchargement remet en cause le cadre légal actuel et la sécurité des inventeurs (Gao *et al.*, 2015). La disponibilité de modèles 3D open-source des armes à feu montre comment ces technologies ont le potentiel de créer des dilemmes éthiques et réglementaires et de perturber les industries (Cohen *et al.*, 2014). Les brevets des pionniers de la fabrication additive commencent à tomber dans le domaine public. Les précurseurs détiennent encore des brevets importants dont ils se servent pour réduire la concurrence. Des procédures judiciaires sont déjà en cours (Bhasin et Bodla, 2014).

La plupart des fabricants ont breveté leurs matières premières, ce qui explique en partie le prix des poudres métalliques. Lorsque ces brevets tomberont dans le domaine public, la concurrence fera baisser les prix (Bhasin et Bodla, 2014).

Piazza et Alexander (2015) soulignent toutefois le manque de normes concernant les matériaux. Les normes et les protocoles sont à créer. Il faut développer des méthodes de qualification et de certification. Des normes sont créées peu à peu, les laboratoires de recherche et les industriels doivent arriver à un consensus au niveau des normes (Gao *et al.*, 2015). Les trois principaux organismes mondiaux de normalisation, dans la fabrication additive sont : l'ASTM (F42), l'ISO (TC261) et le CEN CENELEC (TC 438). Des organismes européens travaillent également sur la fabrication additive :

- L'AFNOR en France avec le comité UNM 920 Fabrication additive,
- Le VDI en Allemagne avec GPL Committee on Production and Logistics,
- L'AENOR en Espagne avec le comité AEN / CTN 116,
- Le SIS en Suède avec le comité SIS / TK 563,
- Le BSI au Royaume-Uni avec le comité AMT / 8.

D'un point de vue hygiène et sécurité, l'impact de la poudre sur le corps humain n'a pas encore été déterminé. Aucune norme ne définit les mesures nécessaires à mettre en place. Dans les ateliers de fabrication additive, nous trouvons des politiques différentes en matière d'installation. Soit les machines de fabrication additive sont installées sans précaution particulière au milieu de l'atelier soit ce sont des ateliers confinés avec des équipements spécifiques et les opérateurs doivent être intégralement couverts et porter un masque ventilé.

Les trois organismes de normalisation travaillent en coordination pour atteindre l'objectif partagé d'adopter un ensemble de normes à utiliser au niveau international. En pratique, l'ASTM F42 a conclu un accord de coopération signé avec l'ISO TC 261 sur l'adoption commune des normes et le CEN TC438 évalue les normes existantes du niveau ISO pouvant être adoptées. Ils étudient plusieurs aspects : la sécurité, (inflammabilité, toxicité, distribution de la taille des particules, la qualité des polymères, du métal et du composite), la compatibilité de l'équipement... (Verhulst, 2015).

2. PROCESSUS ET SPECIFICITES

A partir de l'état de l'art et des échanges avec les industriels, le processus de fabrication additive a été modélisé de plusieurs façons et les spécificités des ateliers de fabrication additive ont été identifiées.

2.1. Le processus

Le processus est modélisé grâce à la méthodologie IDEF (Integrated Definition for Function). Parmi les six méthodes proposées par IDEF, l'IDEF 3 est une méthode qui permet de décrire le flux d'un processus (Mayer *et al.*, 1994). Aussi appelée « Process Flow Description Diagram », elle a été créée pour représenter et décrire des activités séquentielles. La charte graphique utilisée est simple afin de permettre le dialogue entre les différents acteurs. Elle est composée d'unités de comportement qui modélisent les étapes numérotées (Figure 28), des liens et des boîtes de jonction (Figure 29). La numérotation permet de se repérer dans les différents niveaux de décomposition et de se référencer aux cartes d'identité rattachées à chaque unité de comportement. Ces cartes d'identité sont présentées en annexe (Tableau 90, Tableau 91, Tableau 92).

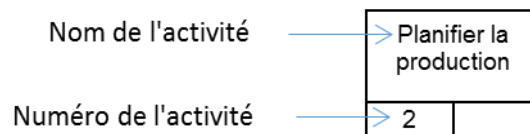


Figure 28 - IDEF 3 : Unité de comportement

Type	Type de synchronisation	Symbole	Type de jonction	Description
AND	Asynchrone	[&]	Convergent	Toutes les tâches en amont s'achèvent.
			Divergent	Toutes les tâches en aval commencent.
	Synchrone	[&]	Convergent	Toutes les tâches en amont s'achèvent simultanément.
			Divergent	Toutes les tâches en aval commencent simultanément.
OR	Asynchrone	[o]	Convergent	Une ou plusieurs tâches en amont s'achèvent.
			Divergent	Une ou plusieurs tâches en aval commencent.
	Synchrone	[o]	Convergent	Une ou plusieurs tâches en amont s'achèvent simultanément.
			Divergent	Une ou plusieurs tâches en aval commencent simultanément.
XOR		[x]	Convergent	Une seule tâche en amont s'achève.
			Divergent	Une seule tâche en aval commence.

Figure 29 - IDEF 3 : Boîtes de jonction

Le modèle IDEF 3 proposé, prend en compte les étapes de l'approvisionnement en matière première jusqu'à l'expédition de la pièce finie. La Figure 30 présente le processus dans sa globalité.

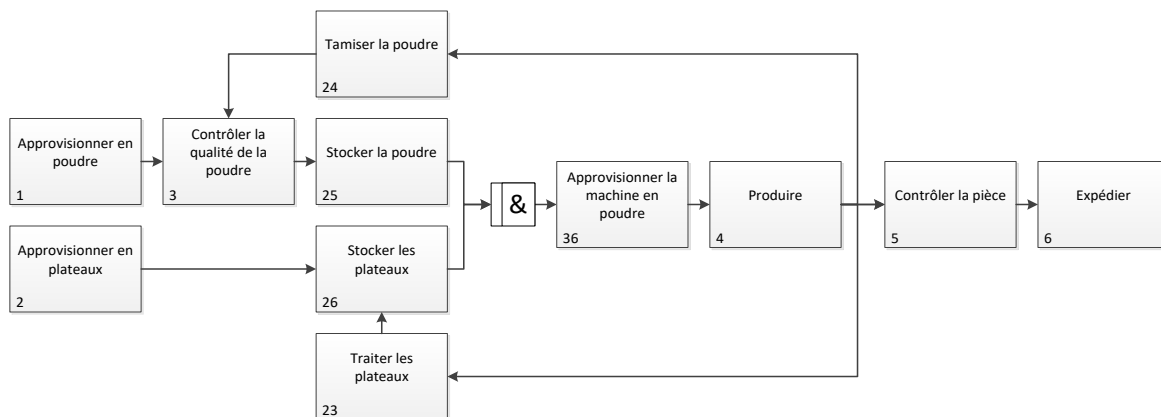


Figure 30 - IDEF 3 : Processus global

L'étape de production est décomposée en plusieurs étapes qui vont du lasage jusqu'aux post-traitements (Figure 31). Une fois que le plateau est sorti de la machine, il faut enlever les contraintes mécaniques inhérentes à la fabrication de la pièce. Pour cela, le plateau est inséré dans un four de détensionnement. Après ce traitement thermique, les pièces sont séparées du plateau, la méthode la plus utilisée est la découpe fil. Ensuite, les pièces sont nettoyées et chaque pièce va subir des post-traitements.

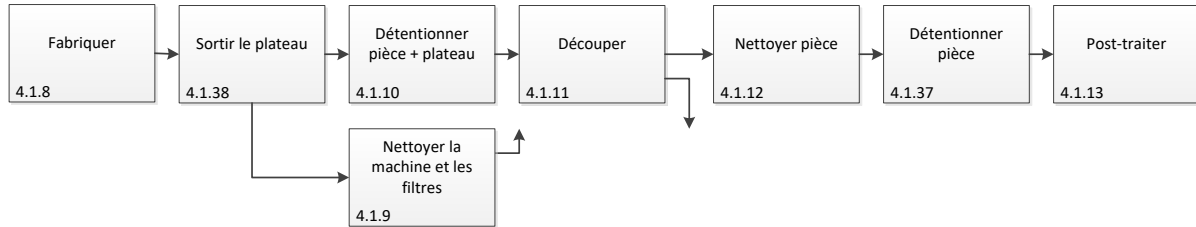


Figure 31 - IDEF 3 : Produire

Avant d'effectuer le lasage, il est nécessaire de préparer la machine. Il faut effectuer la mise en référence du plateau, la mise en température du plateau, lorsque celui est chauffé, la configuration de la machine et la mise sous atmosphère de la machine car le lasage a lieu dans une atmosphère inerte (Figure 32).

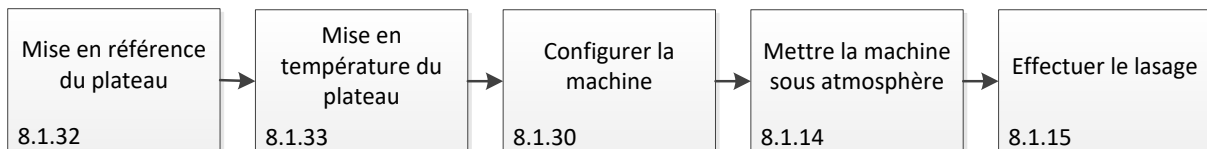


Figure 32 - IDEF 3 : Fabriquer

Les plateaux supports à la fabrication des pièces, peuvent être utilisés plusieurs fois. Après chaque utilisation, ils doivent être nettoyés, usinés, mis en géométrie, contrôlés et démagnétisés (Figure 33).

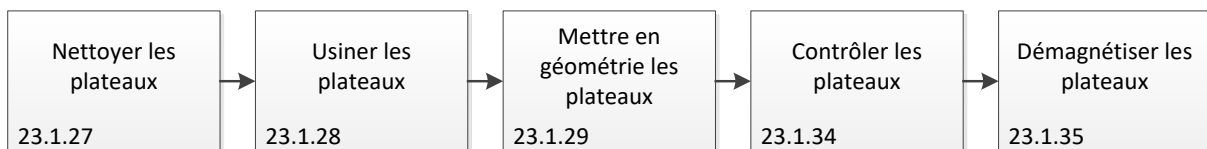


Figure 33 - IDEF 3 : Traiter les plateaux

Lorsque le lasage est terminé, la température est importante dans la chambre de fabrication et il faut nettoyer le plateau et les pièces. La plupart du temps, ces deux étapes sont effectuées au sein de la machine (Figure 34). Ces étapes représentent un temps important à non-valeur ajoutée. Certaines machines permettent d'effectuer ces deux étapes dans une autre enceinte et ainsi de pouvoir relancer plus rapidement une production sur la machine de fabrication additive (Figure 35).

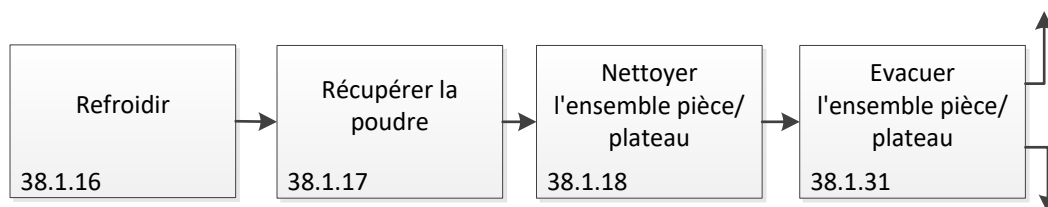


Figure 34 - IDEF 3 : Sortir le plateau, nettoyage interne

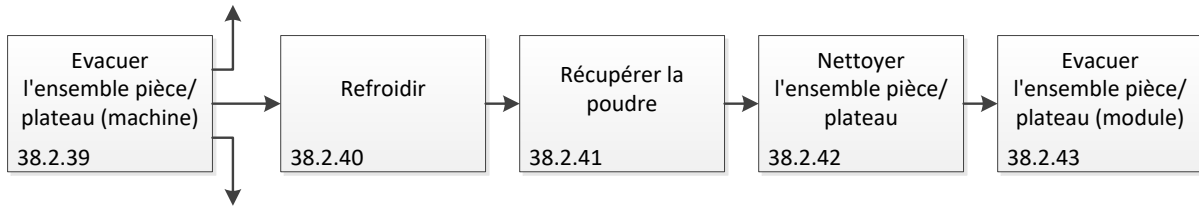


Figure 35 - IDEF 3 : Sortir le plateau, nettoyage externe

La Figure 36 permet d’avoir un aperçu du processus avec toutes les étapes mentionnées ci-dessus et de différencier les stocks de matières premières, les stocks d’en-cours, les opérations, les transports et les contrôles. De plus, elle permet de différencier les différents flux : la poudre, le plateau et la pièce ainsi que les flux où la poudre, la pièce et le plateau sont solidaires.

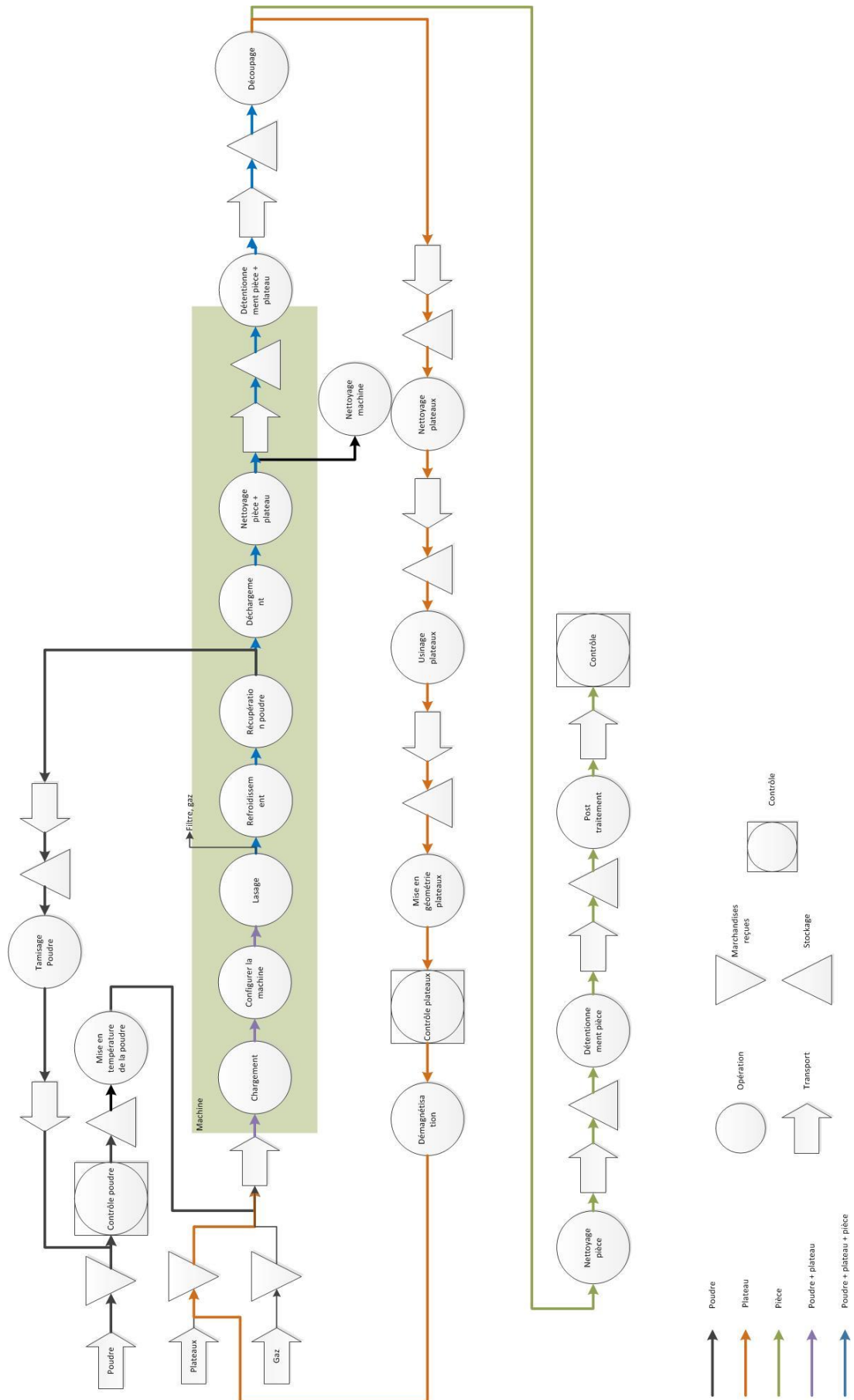


Figure 36 - Processus

2.2. Les spécificités des ateliers de fabrication additive

La fabrication additive entraîne une réduction des besoins fonctionnels et logistiques. Les délais et les distances entre la conception, la production et la consommation sont raccourcis ce qui nécessite de repenser le modèle de la chaîne logistique.

2.2.1. Les temps de fabrication

Actuellement, les temps de fabrication sont très longs. Il faut compter 20h pour un volume de fabrication de 350x350x350mm. Ces temps très longs ont plusieurs conséquences.

Lors de l'ajout des post-traitements, la fabrication additive devient goulot, les flux sont désynchronisés et les machines avals ont un faible taux d'utilisation. L'état de surface et la résistance mécanique de la pièce en sortie de machine ne correspond pas toujours aux attentes du client : la rugosité peut être importante et les surfaces fonctionnelles peuvent ne pas atteindre le niveau de précision demandé. Pour garantir la tenue mécanique et la géométrie fonctionnelle, il faut parfois ajouter des prétraitements et des post-traitements. Ainsi, la question de la mutualisation des ressources avals apparaît. De plus, pour atteindre des cadences industrielles, il faut multiplier le nombre de machines, l'augmentation de la taille du parc machine entraîne un coût très important.

Ces temps de fabrication longs sont incompatibles avec les délais courts attendus par les clients dans le cadre de la personnalisation de masse ((Berman, 2012); (Mourtzis *et al.*, 2008); (Reeves *et al.*, 2011)). La fabrication additive permet d'introduire le client en amont de la chaîne logistique et d'obtenir des produits personnalisés.

2.2.2. Les ressources secondaires

Les temps de fabrication sont longs mais une fois la machine lancée, elle fonctionne de façon autonome. En effet, le processus de fabrication additive nécessite une intervention humaine importante uniquement lors du changement de production. La durée d'intervention dépend du degré d'automatisation de la machine. En début de production, l'opérateur doit insérer un nouveau plateau et la poudre nécessaire à la fabrication, configurer la machine et lancer la production. En fin de production, l'opérateur doit nettoyer et sortir le plateau terminé et nettoyer la machine. Les temps d'intervention des ressources secondaires sont donc bien inférieurs au temps de lasage.

Cet écart entre les temps pose alors un problème de planification et d'allocation des ressources secondaires. Pour des raisons économiques un opérateur ne peut pas être rattaché à une seule machine. Les opérateurs font partie des ressources partagées qui peuvent générer des temps de blocage sur les machines de fabrication additive. L'objectif est de trouver une organisation qui permet de réduire les temps d'attente de l'opérateur tout en évitant l'arrêt des machines à cause d'une absence d'opérateur.

2.2.3. La gestion de la poudre

La gestion de la poudre tout au long de la ligne soulève de nombreux problèmes. La poudre métallique peut être explosive, son stockage doit être fait dans des conditions particulières. Les effets de la poudre sur l'être humain ne sont pas encore bien connus, la manutention demande donc une protection particulière. Toute la partie de la production où la poudre est présente à l'air libre se fait en atmosphère confinée et les opérateurs ont une tenue intégrale ainsi qu'un masque ventilé. La poudre inutilisée lors de la fabrication est réutilisable. Pour des problèmes de qualité et de caractéristiques mécaniques, elle n'est recyclable qu'un certain nombre de fois. Il faut gérer la durée de vie de la poudre ainsi que sa traçabilité. En effet, la traçabilité est un élément fondamental pour l'industrie aéronautique, ils demandent le certificat d'atomisation ce qui contraint la gestion de la poudre.

CHAPITRE 4. PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE

1. OBJECTIFS INDUSTRIELS

Notre partenaire veut se placer sur le marché des fabricants de machines de fabrication additive métallique mais ils souhaitent également proposer à ses clients des lignes de production « clé en main » : « des solutions industrielles globales en impression 3D métallique, de la conception et fourniture de machines aux services et conseils associés jusqu'à la production de pièces ». Ils développent la FormUp™ Line qui est un atelier de production complet de la poudre jusqu'à la pièce imprimée en 3D, les post-traitements se font à l'extérieur.

L'objectif est de réaliser des outils d'aide à la décision multicritère pour la conception modulaire et l'ordonnancement d'ateliers de fabrication additive, des outils d'aide à la décision intégrés pour la conception des ateliers 4.0. Ces outils, dédiés à la conception d'ateliers évolutifs accompagnant la montée en puissance des entreprises, doivent permettre de faire des choix parmi plusieurs configurations possibles. Il sera également proposé une aide à la planification pour améliorer l'efficacité de l'atelier à travers la définition de bonnes pratiques de pilotage opérationnel et des règles pour réaliser un ordonnancement optimal et robuste. Les outils s'appuient sur deux socles scientifiques : une méthode d'évaluation multicritère de l'efficacité organisationnelle et la prise en compte du caractère imparfait des informations.

A partir de l'étude bibliographique présentée, plusieurs problématiques sont identifiées. Ces problématiques sont définies à partir des trois niveaux de décision (Ansoff, 1979) : stratégique, tactique et opérationnel. L'objectif de ce chapitre est de présenter les trois problématiques de recherche correspondant à ces trois niveaux.

2. LES NIVEAUX DE DECISION

H.Igor Ansoff (1979) a défini un modèle qui distingue trois grands types de décisions : les décisions stratégiques, tactiques ou administratives et opérationnelles (Tableau 7).

Les décisions stratégiques sont les plus importantes car elles déterminent l'orientation générale de l'entreprise, elles engagent l'entreprise à long terme. Ce sont les décisions où les conséquences et l'environnement sont les moins connus.

Les décisions tactiques ou administratives dépendent des décisions stratégiques et influencent les décisions opérationnelles. Elles correspondent à des décisions de gestion.

Les décisions opérationnelles sont relatives à la gestion courante. L'objectif est d'assurer le fonctionnement régulier et efficace de l'organisation. Elles sont répétitives et ont un effet immédiat qui se passe dans un environnement connu (Dhillon, 2004).

	Décisions stratégiques	Décisions tactiques	Décisions opérationnelles
Horizon temporel	Long terme	Moyen terme	Court terme
Fréquence et degré de répétitivité	Décisions uniques	Fréquence faible, décisions peu répétitives	Décisions très nombreuses et répétitives
Degré d'incertitude des informations	Elevé	Moyen	Quasi nul
Degré de réversibilité	Quasi nul	Moyen	Elevé
Niveau de décision	Direction générale	Directeurs fonctionnels et administratifs	Décisions décentralisées

Tableau 7 - Les trois niveaux de décisions

Le degré de réversibilité correspond au degré où il est possible de revenir sur la décision qui a été prise.

3. PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE IDENTIFIEES DANS LE CADRE DE L'INDUSTRIALISATION DE LA FABRICATION ADDITIVE ET VEROUS SCIENTIFIQUES ASSOCIES.

Pour que la fabrication additive devienne un procédé clé dans l'industrie 4.0, les industriels doivent disposer d'outils d'aide à la décision pour les trois niveaux de décision identifiés précédemment.

3.1. Problématique stratégique

La conception d'un atelier de production fait partie des décisions stratégiques d'une entreprise. Des décisions fortes pluriannuelles d'investissement, de sélection de machines et de choix d'organisation sont à prendre lors de cette étape avec des enjeux économiques, de rentabilité et de réponses aux marchés importants. Il est donc demandé aux décideurs de se positionner aujourd'hui sur un système de production pour un système et une organisation qui seront effectifs après une phase de ramp-up et une mise en place progressive du système final.

Il s'agit alors de définir à un instant t , un système qui devra :

- Etre efficient lorsque la production sera installée ;
- Répondre à la phase transitoire de montée en charge avec une mise en place progressive du système de production tout en étant efficient à chaque échéance.

Les ateliers d'application sont des ateliers intégrant la fabrication additive. Cette nouvelle technologie peut représenter une révolution industrielle. Cependant, les industriels sont aujourd'hui surtout dans une phase d'interrogation par rapport à ce nouveau procédé et son utilisation dans le cadre d'une production de masse.

Ce nouveau procédé a été, jusqu'à présent, utilisé pour du prototypage rapide. Le marché du remplacement s'en est déjà emparé. Mais les industriels s'interrogent maintenant sur son intérêt pour une production plus standardisée de pièces complexes et coûteuses dans le cadre d'une fabrication plus standard (usinage, assemblage mécano-riveté...). En effet, cela nécessite aujourd'hui un investissement machine important. Cela nécessite aussi obligatoirement un pré-traitement pour la poudre et les plateaux, des post-traitements et la plupart du temps, une reprise de la pièce. La fabrication additive nécessite la création d'un nouveau processus industriel global. Comme expliqué précédemment, ce procédé implique des investissements parfois lourds en termes d'hygiène et sécurité. Dans le cadre d'une pièce déjà existante, s'ajoute à cela des coûts de reconception de la pièce qui ne sont pas négligeables.

Par ailleurs, ce nouveau procédé implique le développement de nouvelles machines. Plusieurs constructeurs se sont lancés sur ce marché mais celui-ci est à ses prémices. Les machines de fabrication additive, aujourd'hui, restent très coûteuses et avec des temps de cycle à valeur ajoutée et des temps à non-valeur ajoutée conséquents. De plus, différentes stratégies de conception de ces machines et les différents degrés d'automatisation ont un impact important sur les flux et la performance globale de l'atelier.

Ces machines sont, cependant, de plus en plus efficaces et fiables. Leur coût d'acquisition devrait baisser. Mais nous ne pouvons pas, aujourd'hui, prédire ni leur évolution en termes de coût ni leur évolution technologique, ce qui ajoute de l'incertitude au problème.

Enfin, ce procédé commence seulement à être pris en compte dans le cadre de la (re)conception de pièces pour en tirer le meilleur parti. Cela change fondamentalement les habitudes du bureau d'études et nécessite parfois de (re)qualifier les pièces ainsi conçues. Les pièces pertinentes à être fabriquées de façon additive et en série (par opposition aux procédés soustractifs classiques) commencent seulement à être identifiées. Le marché de la pièce fabriquée additivement en série est donc à ses balbutiements avec toutes les incertitudes sur son développement associé.

Toutefois, les fabricants de pièces souhaitant se positionner sur ce marché doivent investir aujourd'hui et progressivement pour maîtriser ce procédé tout en prenant un risque certain vis-à-vis des performances et du développement des machines de fabrication additive et de la montée en puissance des pièces à fabriquer additivement en série. Tout ceci pour devenir un acteur clé lorsque le marché sera à son apogée.

L'objectif de ces travaux de recherche dans le cadre de cette thèse est donc de définir une méthode d'optimisation multicritères pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimale sur le long terme et sur le court terme. Il s'agit de proposer un **outil d'aide à la décision qui identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte :**

- **Des incertitudes du développement du marché des pièces fabriquées additivement ;**
- **Des incertitudes liées aux développements des machines de fabrication additive ;**
- **De l'attitude du décideur face à tous ces risques.**

Plusieurs verrous sont donc à lever dans le cadre de ces travaux :

- Comment définir la modularité de la conception d'un système de production ?
- Qu'est-ce qu'une conception efficace pour un tel système pour le court terme et le long terme ?
- Quels sont les indicateurs de performance à prendre en compte dans les différents espaces temporels de l'évolution de l'entreprise dans ce nouveau marché ?
- Comment prendre en compte les incertitudes sur le développement du marché et l'évolution incertaine des machines de fabrication additive, de ses modules / options et des performances associées ?
- Comment modéliser l'attitude du décideur face au risque ?

3.2. Problématique tactique

Une fois l'atelier conçu, l'industriel doit pouvoir identifier les pièces qu'il est pertinent de faire selon un procédé additif. En effet, les industriels s'interrogent maintenant sur son intérêt pour une production plus standardisée de pièces complexes et coûteuses dans le cadre d'une fabrication plus standard (usinage, assemblage mécano-riveté...).

Le pré-traitement pour la poudre et les plateaux, les post-traitements et la reprise de la pièce entraînent des coûts qui peuvent être importants. Dans le cadre d'une pièce déjà existante, s'ajoutent à cela des coûts de reconception de la pièce qui ne sont pas négligeables et des coûts de certification de la pièce nouvellement conçue et de qualification du nouveau procédé.

Toutefois, ce nouveau procédé permet aussi de :

- Repousser les limites de la conception. Sur les pièces qui tirent parti des avantages de la fabrication additive, il n'y aura pas de retour en arrière possible car elles ne seront pas fabricables avec un autre procédé ;
- Produire plus facilement des pièces fabriquées à partir de matériaux chers et difficiles à usiner ;
- Alléger les pièces afin d'obtenir de meilleures performances ou de diminuer la consommation, par exemple ;
- Intégrer de nouvelles fonctions au niveau des composants mécaniques : sur un produit avec des fonctions intégrées, le coût de fabrication devient marginal car l'impact concerne l'ensemble du processus de conception et de fabrication. La fabrication additive peut permettre de passer de plusieurs pièces à concevoir et à fabriquer à une seule pièce ;
- Intégrer de nouvelles fonctions au niveau du produit.

Le choix de la fabrication additive doit être fait très tôt dans le processus si l'objectif est d'intégrer des fonctions que ce soit au niveau des composants mécaniques ou au niveau du produit.

Par conséquent, toutes les pièces ne sont pas forcément des candidates pertinentes pour la fabrication additive. Il est donc nécessaire pour le décideur de disposer d'un **outil permettant d'estimer le prix de revient d'une pièce en fabrication additive en partant de la conception et en allant jusqu'à la finition complète de la pièce.**

Au niveau tactique, nous devons donc lever les verrous suivants :

- Comment modéliser l'ensemble des coûts liés à l'industrialisation d'une pièce en fabrication additive ?
- Comment travailler en avance de phase, sans la pièce conçue ?
- Comment estimer le temps de fabrication d'une pièce en fabrication additive ?

3.3. Problématique opérationnelle

Comme nous avons pu le voir, les particularités liées à la fabrication additive sont énumérées ci-après.

- Les temps de lasage sur la machine en elle-même sont très longs par rapport au post-traitement, rendant l'atelier de fabrication additive goulot sur le flux. Il est donc important d'éviter ou de minimiser les phénomènes de famines et d'attente sur les ateliers de post-traitement en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de valeur pour stabiliser l'ordonnancement global.
- Les temps de setup entre deux plateaux peuvent être très différents (nettoyage simple ou complet de la machine notamment en fonction du matériau) et dépendent du séquençement et de l'affectation des plateaux aux machines de fabrication additive.
- L'opérateur dans la zone confinée est affecté sur plusieurs machines de fabrication additive de manière à maximiser sa charge. Même si celui-ci intervient sur des opérations à non valeurs ajoutées mais néanmoins sur le chemin critique du flux, il faut éviter un phénomène de blocage de la machine fabrication additive dû à l'indisponibilité de l'opérateur.
- Il est possible de mettre plusieurs références de pièces sur un même plateau de manière à optimiser la charge de la machine de fabrication additive mais aussi d'optimiser les flux dans la partie post-traitement. Il est donc nécessaire d'avoir un outil qui permette de définir la composition des plateaux judicieusement pour optimiser l'ensemble des flux et des performances ateliers.

Une fois l'atelier de fabrication additive installé, il est crucial de disposer d'outils d'aide à la décision pour son pilotage au quotidien. Notre objectif sur le niveau opérationnel dans le cadre de ces travaux de recherche est donc de proposer aux exploitants ***un outil d'aide à la décision permettant de passer d'une liste de commandes multi-références à une composition de plateaux et un ordonnancement de ces plateaux pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.***

Au niveau opérationnel, nous devons donc lever les verrous suivants :

- Comment traduire la notion d'efficience dans ce contexte ?
- Comment prendre en compte les différents objectifs du décideur qui sont parfois contradictoire ?
- Comment résoudre CONJOINTEMENT le problème de répartition des pièces clients sur les plateaux, le problème d'affectation des plateaux aux machines de fabrication additive et leur séquençement sur la machine ?

4. ORGANISATION DU MANUSCRIT

La Figure 37 schématise l'organisation du manuscrit. Les niveaux stratégique, tactique et opérationnel seront traités respectivement dans les parties II, III et IV. Dans chacune d'elle, après une mise en contexte plus détaillée de la problématique, nous effectuerons une bibliographie se rapportant au domaine. Le problème sera ensuite formalisé et nous proposerons une démarche de résolution de la problématique en présentant l'outil développé. Nous appliquerons ensuite l'approche sur un cas industriel. Nous terminerons ensuite par un chapitre conclusion et perspectives.

Une conclusion générale sur l'ensemble de nos travaux terminera le manuscrit.

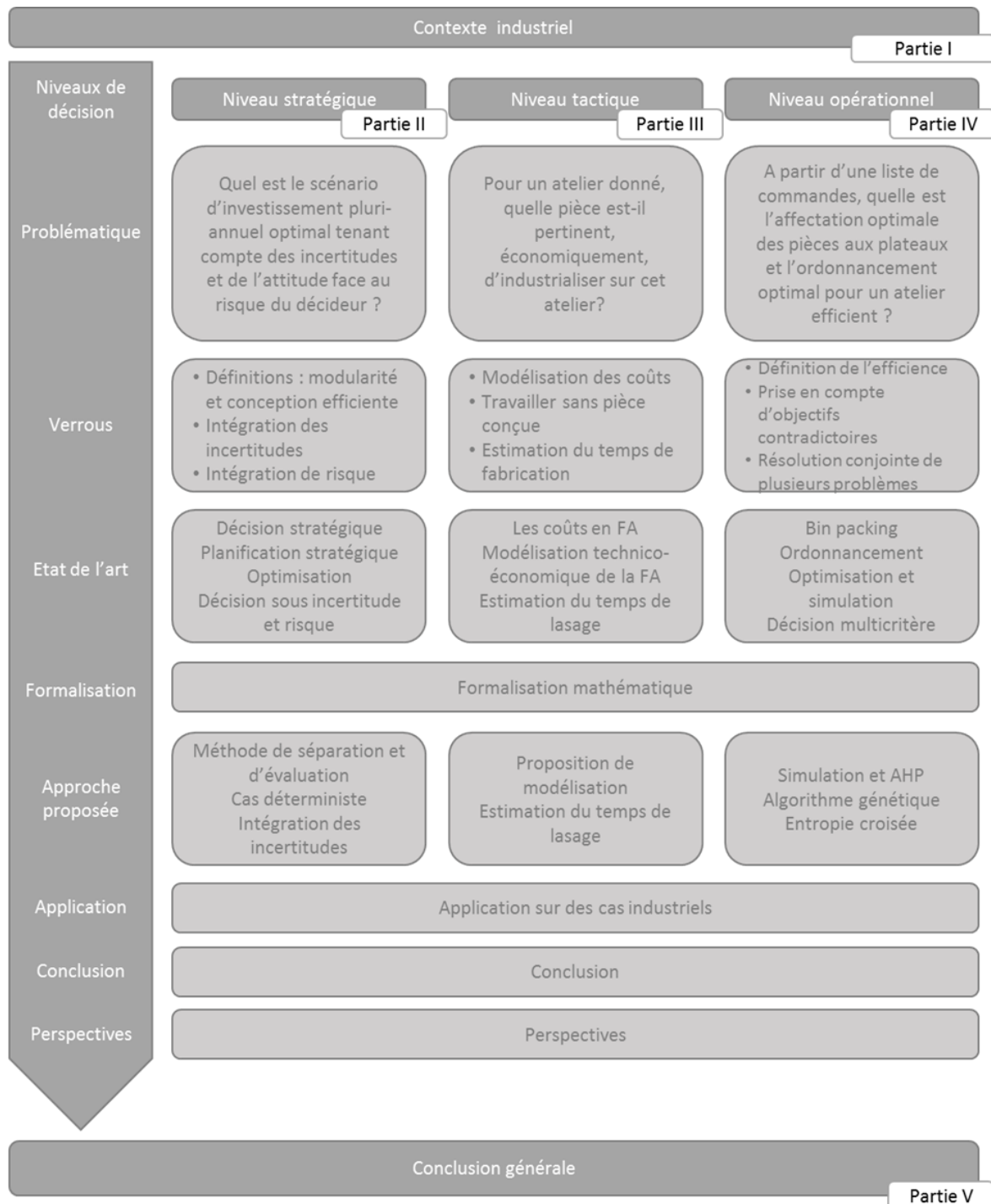


Figure 37 - Organisation du manuscrit

Partie II

Niveau stratégique

PARTIE II. NIVEAU STRATEGIQUE

TABLE DES NOTATIONS	72
CHAPITRE 1. PROBLEMATIQUE	75
1. LE SYSTEME : UN ATELIER DE FABRICATION ADDITIVE	75
1.1. <i>Les machines</i>	75
1.2. <i>Les options</i>	76
1.3. <i>Les opérateurs</i>	77
2. LES DECISIONS	77
3. LA PHASE DE RAMP-UP	77
4. INCERTITUDES ET DONNEES INCERTAINES	78
5. EVALUATION	79
6. OBJECTIF	80
7. VERROUS	80
8. ORGANISATION DE LA PARTIE.....	81
CHAPITRE 2. DECISION STRATEGIQUE	82
1. PRISE DE DECISION STRATEGIQUE	82
1.1. <i>Efficacité et performance</i>	82
1.2. <i>Impact du décideur</i>	83
2. INVESTISSEMENTS	84
CHAPITRE 3. PLANIFICATION STRATEGIQUE	86
1. ANALOGIE AVEC LES SEMI-CONDUCTEURS	86
2. PROCESSUS DE CREATION.....	87
3. METHODES.....	87
CHAPITRE 4. OPTIMISATION PAR METHODES EXACTES	93
1. PROGRAMMATION LINEAIRE	93
1.1. <i>Méthode du Simplexe</i>	94
1.2. <i>Méthode de séparation et d'évaluation</i>	94
2. PROGRAMMATION DYNAMIQUE.....	95
CHAPITRE 5. DECISION SOUS INCERTITUDE ET RISQUE	96
1. L'INCERTAIN.....	96
1.1. <i>Définitions : incertitude, imprécision, incomplétude, imperfection</i>	96
1.2. <i>Contexte : certain, risqué, incertain</i>	97
1.3. <i>Qualités de l'information et de l'expertise</i>	97
1.4. <i>Prise en compte des incertitudes</i>	97
1.5. <i>Modèles de représentation des incertitudes</i>	98
1.5.1. Modélisation déterministe	98
1.5.2. Modélisation probabiliste	98
1.5.3. Modélisation possibiliste.....	98
1.5.4. Nuages.....	98
1.5.5. Notion de flou	99
1.5.6. Modélisation par des scenarii ou par des événements	99
1.5.7. Approches robustes.....	99
1.5.8. Analyse de sensibilité	99
2. AIDE A LA DECISION SOUS INCERTITUDE	99
2.1. <i>Axiomes de Savage</i>	99
2.2. <i>Fonction d'utilité</i>	100

2.3.	<i>Décision sous ignorance totale</i>	100
2.3.1.	Maximin et maximax.....	100
2.3.2.	Critère d'Hurwicz.....	101
2.3.3.	Critère de Laplace.....	101
2.3.4.	Critère de Savage.....	101
2.3.5.	Leximin et Leximax.....	101
3.	RISQUE.....	101
3.1.	<i>Prise en compte du risque</i>	102
3.1.1.	Approches systémiques : arbres d'événements, défaillance, cause.....	102
3.1.2.	Systèmes experts.....	102
3.2.	<i>Lien entre risque et connaissance</i>	102
3.3.	<i>Lien entre risque et incertitude</i>	103
3.4.	<i>Le risque spéculatif</i>	103
CHAPITRE 6.	FORMALISATION MATHÉMATIQUE ET APPROCHE PROPOSÉE	104
1.	LES ENSEMBLES.....	104
2.	LES PARAMÈTRES.....	104
2.1.	<i>La demande</i>	105
2.2.	<i>Le budget maximal</i>	105
2.3.	<i>Les machines</i>	105
2.4.	<i>Les options</i>	105
2.5.	<i>Les investissements</i>	105
2.6.	<i>Les compatibilités</i>	105
2.7.	<i>Les temps</i>	106
2.8.	<i>La vitesse de lasage</i>	106
2.9.	<i>Les disponibilités</i>	106
2.10.	<i>Les opérateurs</i>	106
3.	VARIABLES DE DÉCISION.....	107
4.	VARIABLES LIÉES.....	107
5.	FONCTION OBJECTIF.....	108
6.	CONTRAINTES.....	109
6.1.	<i>Les machines</i>	109
6.2.	<i>Les options</i>	110
6.3.	<i>Les versions</i>	110
6.4.	<i>Les poudres</i>	111
6.5.	<i>Les opérateurs</i>	111
6.6.	<i>Le budget</i>	111
7.	LINEARISATION.....	112
8.	APPROCHE PROPOSÉE.....	113
8.1.	<i>Relaxation et arbre de recherche</i>	113
8.2.	<i>L'écart</i>	113
8.3.	<i>Résultats</i>	114
CHAPITRE 7.	CAS DÉTERMINISTE	115
1.	DONNÉES.....	115
1.1.	<i>Les pièces</i>	115
1.2.	<i>Les machines</i>	115
1.3.	<i>Les options</i>	116
1.4.	<i>Les versionings</i>	117
2.	SCÉNARI.....	117
3.	ANALYSE DE L'INTERVALLE DE DISCRETISATION DE LA PRODUCTIVITÉ.....	118
4.	RÉSULTATS.....	118
4.1.	<i>Analyse du comportement du modèle</i>	119
4.2.	<i>Analyse des résultats</i>	121

5.	CONCLUSION.....	122
CHAPITRE 8. INTEGRATION DES INCERTITUDES.....		123
1.	INCERTITUDE LIEE A LA DEMANDE	123
1.1.	<i>Variables de décision et variables liées</i>	123
1.2.	<i>Fonction objectif</i>	123
2.	INCERTITUDE LIEE AUX AMELIORATIONS TECHNOLOGIQUES	125
3.	INCERTITUDE LIEE A L'EVOLUTION DU COUT DES MACHINES.....	125
4.	DONNEES	126
5.	RESULTATS	127
6.	CONCLUSION.....	128
CHAPITRE 9. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL		129
1.	CAS INDUSTRIEL	129
2.	ADAPTATION DU MODELE DETERMINISTE	130
3.	RESULTATS	131
4.	CONCLUSION.....	132
CHAPITRE 10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES		133
1.	CONCLUSION.....	133
2.	PERSPECTIVES.....	134
2.1.	<i>Application du modèle intégrant les incertitudes sur le cas industriel</i>	134
2.2.	<i>Analyse de l'intervalle de discrétisation</i>	134
2.3.	<i>Méthode multicritère</i>	134
2.4.	<i>Optimisation</i>	134
2.5.	<i>Incertitudes</i>	134
2.6.	<i>Comportement du décideur</i>	135

TABLE DES NOTATIONS

α	Coefficient de pessimisme d'Hurwicz
γ	Facteur représentant l'impact des changements de poudre sur le temps disponible
$\delta_{m,t}^i$	Valeur de $f(P_{m,t})$ comprise dans l'intervalle $[P_{m,t}^i, P_{m,t}^{i+1}]$
δ_s	Coefficient utilisé dans la linéarisation d'Hurwicz
A	Ensemble des types de machines a
a	Indice du type de machines
AM	Ensemble des machines de fabrication additive m
B	Budget total en €
b_a	Besoin en opérateur de la machine de type a en $h/équipe$ (en h sur 8h)
B_t	Budget pour chaque période t en €
$Be_{m,t}$	Besoin en opérateur de la machine m à la période t
$bo_{o,a}$	Besoin en opérateur de l'option o sur une machine de type a
$bv_{a,v}$	Besoin en opérateur suite au versioning v sur une machine de type a (peut être négatif)
C	Ensemble des périodes où un versioning peut être effectué
C_{dins}	Coût de la demande insatisfaite
$C_{dins,s}$	Coût de la demande insatisfaite dans le scénario s
c_{fixe}	Coût fixe de la machine à l'année
C_{qualif}	Coût de qualification
$C_{qualif,s}$	Coût de qualification dans le scénario s
$C_{machine}$	Coût machine
$C_{machine,s}$	Coût machine dans le scénario s
C_{op}	Coût opérateur
$co_{a,t}$	Coût d'utilisation de la machine de type a en €/h sur la période t
$comp_{a,o,t}^O$	Compatibilité de l'option o avec une machine de type a à la période t
$comp_{a,p,t}^P$	Compatibilité de la pièce p avec une machine de type a à la période t (prend en compte les contraintes de taille/poudre)
$comp_{a,v}^v$	Compatibilité du versioning v avec une machine de type a
$coo_{o,t}$	Coût d'utilisation de l'option o en €/cm ³ sur la période t
cop	Coût opérateur en €/h

$cqualif_{m,p}$	Coût unitaire d'une qualification
$d_{p,t}$	Demande de pièce p sur la période t en cm^3
$d_{p,t,s}$	Demande de pièce p sur la période t en cm^3 dans le scénario s
$dat_{a,t}$	Disponibilité de la machine de type a à la période t
$dat_{o,t}$	Disponibilité de l'option o à la période t
$dat_{v,t}$	Disponibilité de la version v à la période t
H	Maximum du bénéfice sur l'ensemble des scenarii
h	Minimum du bénéfice sur l'ensemble des scenarii
$I_{a,t}$	Investissement pour une machine de type a en € à la période t
$Io_{o,t}$	Investissement à l'achat de l'option o en € à la période t
IT	Investissement total
IT_t	Investissent à la période t
$Iv_{v,t}$	Investissement à l'achat du versioning v en € à la période t
J	Très petite valeur
k	Indice de la poudre
L	Ensemble des périodes où des machines peuvent être achetées
M	Ensemble des périodes où des options peuvent être achetées
m	Indice de la machine
max_o	Nombre de machines qui peuvent utiliser l'option o
$nbop_t$	Nombre d'opérateurs dans l'atelier sur la période t
O	Ensemble des options o
o	Indice de l'option
$opt_{a,o}$	Obligation d'acheter l'option o lors de l'achat d'une machine de type a
P	Ensemble des pièces p
p	Indice du type de pièces
p_a	Vitesse de lasage d'une machine de type a en cm^3/h
$P_{m,t}$	Productivité de la machine m à la période t
$pi_{m,a,t,p}$	Affectation de la pièce p à la machine m sur la période t
$pi_{m,a,t,p,s}$	Affectation de la pièce p à la machine m sur la période t dans le scénario s
$po_{a,o}$	Gain sur la vitesse de lasage engendré par l'option o sur une machine de type a

PARTIE II - Niveau stratégique

$pow_{p,k}$	Fabrication de la pièce p avec la poudre k
$pv_{a,v}$	Gain sur la vitesse de lasage engendré par le versioning v sur une machine de type a
$pv_{p,t}$	Prix de vente du produit p en €/cm ³ à la période t
$q_{m,a,t,p}$	Quantité de pièce p produite sur la machine m de type a sur la période t
$q_{m,a,t,p,s}$	Quantité de pièce p produite sur la machine m de type a sur la période t dans le scénario s
S	Ensemble des scenarii
s	Indice du scénario
T	Temps total discrétisé en période t
t	Indice de la période
t_a	Temps disponible pour une machine de type a en h
$T_{m,t}$	Temps disponible sur la machine m à la période t
$T_{m,t,s}$	Temps disponible sur la machine m à la période t dans le scénario s
$to_{a,o}$	Gain de temps engendré par l'option o sur une machine de type a
$tv_{a,v}$	Gain de temps engendré par le versioning v sur une machine de type a
V	Ensemble des versioning possibles v
v	Indice du versioning
$w_{po,m,t}$	Affectation d'une poudre po à la machine m à la période t
$w_{po,m,t,s}$	Affectation d'une poudre po à la machine m à la période t dans le scénario s
$x_{m,a,t}$	Présence dans l'atelier de la machine m de type a à la période t
$y_{m,a,o,t}$	Utilisation de l'option o par la machine m de type a à la période t
$Y_{o,t}$	Nombre d'options o dans l'atelier à la période t
Z	Très grande valeur
$z_{m,a,v,t}$	Réalisation d'un versioning v sur la machine m de type a à la période t

CHAPITRE 1. PROBLEMATIQUE

La conception d'un atelier de production fait partie des décisions stratégiques d'une entreprise. Des décisions fortes d'investissement, de sélection de machines et de choix d'organisation sont à prendre lors de cette étape avec des enjeux économiques, de rentabilité et de réponses aux marchés importants. Il est demandé aux décideurs de se positionner aujourd'hui sur un atelier pour un système et une organisation qui seront effectifs après une phase de ramp-up et une mise en place progressive du système final.

Les ateliers d'application sont des ateliers intégrant la fabrication additive. Cette nouvelle technologie peut représenter une révolution industrielle. Cependant, les industriels sont aujourd'hui plutôt dans une phase d'interrogation par rapport à ce nouveau procédé et son utilisation dans le cadre d'une production de masse.

Ce procédé a été, jusqu'à présent, utilisé pour des applications de prototypage. Le marché du remplacement s'en est déjà emparé. Mais les industriels s'interrogent maintenant sur son intérêt pour une production série de pièces complexes et coûteuses lorsqu'elles sont obtenues par un procédé traditionnel (usinage, assemblage mécano-riveté...). En effet, cela nécessite un investissement important. Il faut également prendre en compte le pré-traitement de la poudre et des plateaux, le post-traitement et la plupart du temps, une reprise de finition de la pièce. La fabrication additive nécessite la création d'un nouveau processus industriel global. Comme expliqué précédemment, ce procédé implique aussi des investissements parfois lourds en termes d'hygiène et sécurité.

Dans le cadre de ces travaux, il s'agit alors de définir à un instant t , un système :

- Qui devra être efficient lorsque la production sera installée (stabilisation) ;
- Tout en étant efficient à chaque échéance de la phase transitoire de montée en charge (lancement et ramp-up) avec une mise en place progressive du système de production (Figure 38) ;
- Dans un contexte où le développement marché des pièces aéronautiques est prometteur mais flou et où le développement des machines industrielles de fabrication additive est en plein essor avec de nombreuses promesses de fabricants qui seront tenues ou non à moyen et long termes.

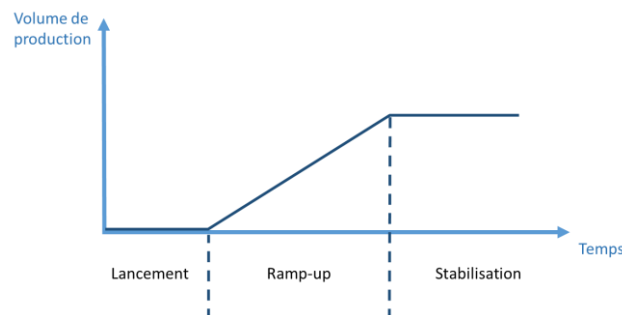


Figure 38 – Evolution du volume de production en fonction du temps

Nous allons définir le système pris en compte, les décisions à prendre, la phase de ramp-up et les incertitudes. Ces éléments vont nous permettre d'exposer les objectifs et les verrous.

1. LE SYSTEME : UN ATELIER DE FABRICATION ADDITIVE

Un atelier de fabrication additive est composé de machines, d'options et d'opérateurs.

1.1. Les machines

Une machine de fabrication additive est définie par un fournisseur, un mode de chargement et de déchargement de plateaux, un mode de chargement de poudre et un système de nettoyage. Ces fonctions définissent des options nécessaires pour pouvoir utiliser la machine.

Au cours du temps, des versionings peuvent être réalisés sur les machines. Ces mises à jour peuvent améliorer la productivité, le temps disponible ou le besoin opérateur de la machine.

1.2. Les options

Les machines de fabrication additive nécessitent des ressources auxiliaires. Il faut un système de manutention pour entrer et sortir les plateaux. Ce système peut être automatique ou manuel. Il faut également un système de nettoyage des pièces et des plateaux à la fin du lasage. Ce nettoyage peut être interne avec différents aspirateurs ou externe avec une machine de nettoyage. Dans le cas du nettoyage externe, un système de manutention spécifique est nécessaire pour transporter le plateau avec les pièces et la poudre. Afin de gérer cette poudre, des systèmes de remplissage et de tamisage sont utilisés. Le tamisage peut être externe ou interne à la machine de fabrication additive. Le remplissage peut être interne à l'aide d'une boîte à gants, externe en utilisant des modules de poudre ou centralisé avec une centrale de poudre qui dessert plusieurs machines (Figure 39).

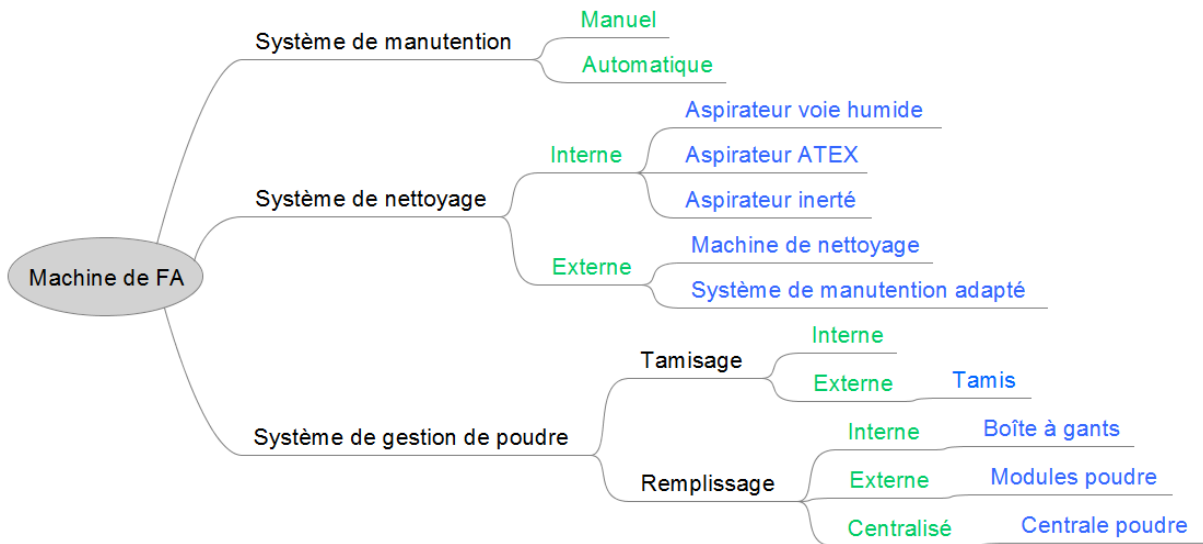


Figure 39 - Machine de fabrication additive et ressources auxiliaires

Les options correspondent à toutes les ressources auxiliaires qui peuvent être ajoutées en lien avec une machine de fabrication additive.

Le nombre de modules complémentaires dépend du fait que le module soit dédié à une nuance de poudre, à une famille de poudre, à une machine et s'il est mutualisable (Figure 40). Lorsqu'un module est mutualisable, son nombre dépend également du nombre de machines sur lequel il peut être utilisé. En fonction de la capacité de chaque option, elles peuvent être utilisées par un nombre plus ou moins grand de machines.

	Dédié nuance de poudre	Dédié famille de poudre	Dédié machine	Mutualisable
Tamis		X		X
Aspirateur voie humide				X
Aspirateur ATEX		X		X
Aspirateur inerté		X		X
Module de dépoudrage		X		X
Boîte à gants		X		X
Module poudre intégré	X		X (interchangeable)	
Module poudre centralisé	X			X
Module de chargement et déchargement		X		X

Figure 40 - Liste des options

1.3. Les opérateurs

Lorsque la machine fonctionne normalement, les opérateurs n'ont besoin d'intervenir qu'au moment du changement de plateau. Selon les fonctionnalités de la machine et les options associées, le besoin opérateur est plus ou moins important à chaque changement. Ce besoin opérateur par machine permet de définir le nombre d'opérateurs nécessaires dans l'atelier.

2. LES DECISIONS

Un atelier donc est caractérisé par :

- Un nombre de machines de chaque référence
 - Pour chaque machine :
 - Un système de manutention
 - Un système de nettoyage
 - Un système de gestion de poudre
- } Définit le type et nombre de modules complémentaires
- } Définit le nombre d'opérateurs

Afin de définir le système, deux types de décisions sont à prendre :

- Les décisions qui concernent le principe de l'atelier :
 - Chargement : manuel ou automatique ;
 - Déchargement : manuel ou automatique ;
 - Chargement poudre : interne, externe ou centralisé ;
 - Nettoyage : interne ou externe.
- Les décisions en termes de dimensionnement :
 - Nombre de machines ;
 - Nombre de modules complémentaires ;
 - Nombre d'opérateurs.

3. LA PHASE DE RAMP-UP

Une fois que le produit est conçu et que son développement est terminé, la phase de production peut commencer. La phase de production commence par la phase de ramp-up qui correspond à la phase entre le début de la production des pièces tests et le début de la production stable (Figure 41). Elle se décompose en trois étapes : le test de produits, la fabrication du lot initial puis le démarrage de la fabrication (Glock et Grosse, 2015).

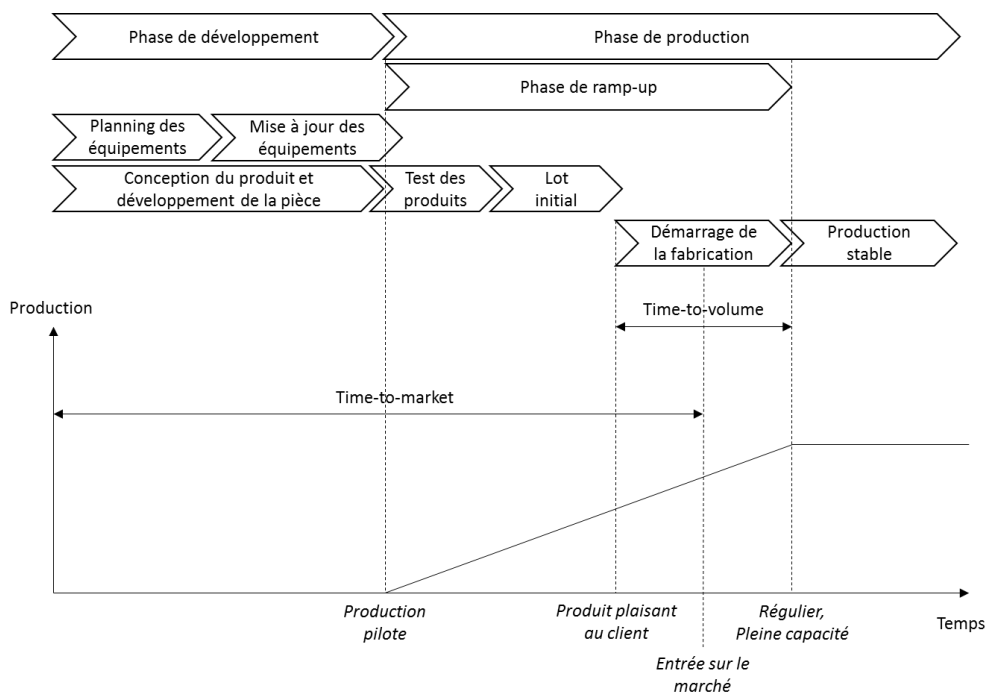


Figure 41 - Modélisation de la phase de ramp-up (Glock et Grosse, 2015)

Selon Glock et Grosse (2015), la phase de ramp-up est caractérisée par : des interruptions, des incertitudes, une augmentation de la demande, des phases d'apprentissage, une réduction des prix, des défauts et un horizon fini. La réussite de cette phase de ramp-up dépend de la capacité d'investissement, de la gestion des flux et des stocks, du dimensionnement des lots et de l'affectation du personnel (Figure 42).

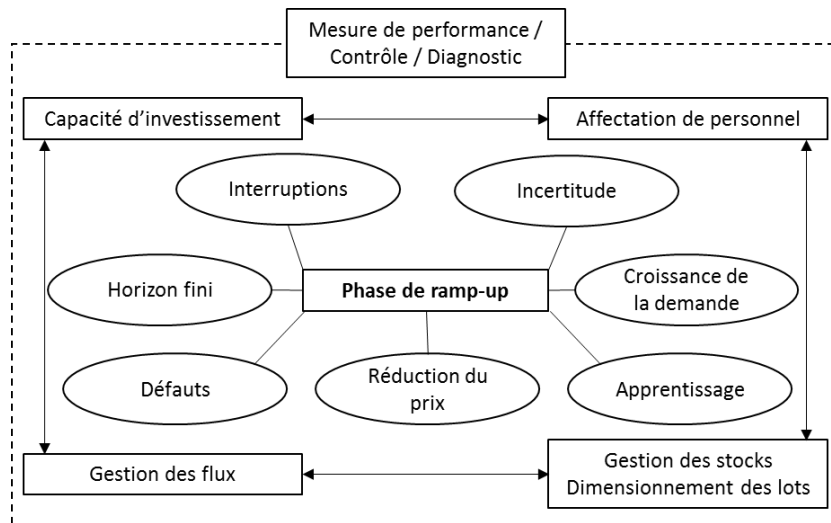


Figure 42 - Caractéristiques de la phase de ramp-up (Glock et Grosse, 2015)

Les incertitudes qui caractérisent la phase de ramp-up sont encore plus importantes dans le contexte de la fabrication additive notamment car la demande n'est pas assurée.

4. INCERTITUDES ET DONNEES INCERTAINES

Le système doit être efficient dans un contexte où le développement du marché des pièces aéronautiques est prometteur mais flou et où le développement des machines industrielles de fabrication additive est en plein essor avec de nombreuses promesses de fabricants qui seront tenues ou non à moyen et long termes. Les développements du marché de la fabrication additive et des machines de fabrication additive ne sont pas prévisibles.

Selon Verhulst (2015), deux points de vue s'opposent : celui qui consiste à penser que cette technologie représente une révolution dans le domaine des procédés de fabrication et celui qui consiste à penser que cette technologie suscite un intérêt immense et un énorme battage médiatique, mais que l'excitation retombera une fois la tendance passée. De plus, dans le cadre d'une pièce déjà existante, il s'ajoute des coûts de reconception qui ne sont pas négligeables. Par conséquent, toutes les pièces ne sont pas forcément des candidates pertinentes pour la fabrication additive. Dans les différents travaux, le développement de ce nouveau marché est donc complètement incertain. Pour autant, les industriels qui prendront ce risque aujourd'hui, seront reconnus si ce marché tient ses promesses. Les incertitudes concernent :

- L'évolution de la demande : il s'agit d'une incertitude sur les valeurs. Si la fabrication additive continue son essor, la demande va être confirmée et elle va augmenter rapidement, dans le cas contraire, la demande peut fortement diminuer. Elle peut également augmenter mais plus lentement que prévu ;
- L'utilisation de nouveaux matériaux : la possibilité d'utiliser des nouveaux matériaux fait partie des promesses faites par les industriels et les chercheurs, ces promesses peuvent être tenues ou pas.

Par ailleurs, ce nouveau procédé implique le développement de nouvelles machines. Plusieurs constructeurs se sont lancés sur ce marché mais celui-ci est à ses prémices. Les machines de fabrication additive, aujourd'hui, restent très coûteuses et présentent des temps de cycle à valeur ajoutée et des temps à non-valeur ajoutée conséquents. De plus, les différentes stratégies de conception de ces machines et les différents degrés d'automatisation ont un impact important sur les flux et la performance globale de l'atelier. Ces machines sont, cependant, de plus en plus efficaces et fiables. Leur coût d'acquisition devrait baisser. Mais nous ne pouvons

pas, aujourd’hui, prédire ni leur évolution en termes de coût ni leur évolution technologique, ce qui ajoute de l’incertitude au problème. Par conséquent, les industriels se lançant maintenant sur le marché de la fabrication de pièces en fabrication additive vont investir progressivement dans leur atelier. Les incertitudes concernent :

- Les améliorations des temps de cycle : les fabricants de machine annoncent une amélioration des temps de cycle sur les futures machines, l’incertitude porte sur la valeur de cette amélioration ;
- Le développement de modules complémentaires : les fabricants de machines promettent le développement de nouveaux modules complémentaires afin d’améliorer le taux de rendement synthétique (TRS) des machines ou de diminuer le besoin opérateur, ces promesses peuvent être tenues ou pas ou elles peuvent être retardées dans le temps ;
- Le développement de nouvelles machines : de même que pour les nouveaux modules complémentaires, les promesses concernant le développement de nouvelles machines peuvent être tenues ou pas ou elles peuvent être retardées dans le temps ;
- L’évolution du coût des machines de fabrication additive : avec le développement de la fabrication additive, les fabricants de machine annoncent une baisse des prix des machines de fabrication additive, l’incertitude porte sur la valeur de cette diminution.

5. EVALUATION

Les différentes solutions peuvent être évaluées à partir d’indicateurs quantitatifs et qualitatifs. A partir des indicateurs utilisés dans la littérature sur la planification stratégique et des discussions avec les industriels, un arbre de performance a été défini pour les indicateurs quantitatifs (Figure 43).

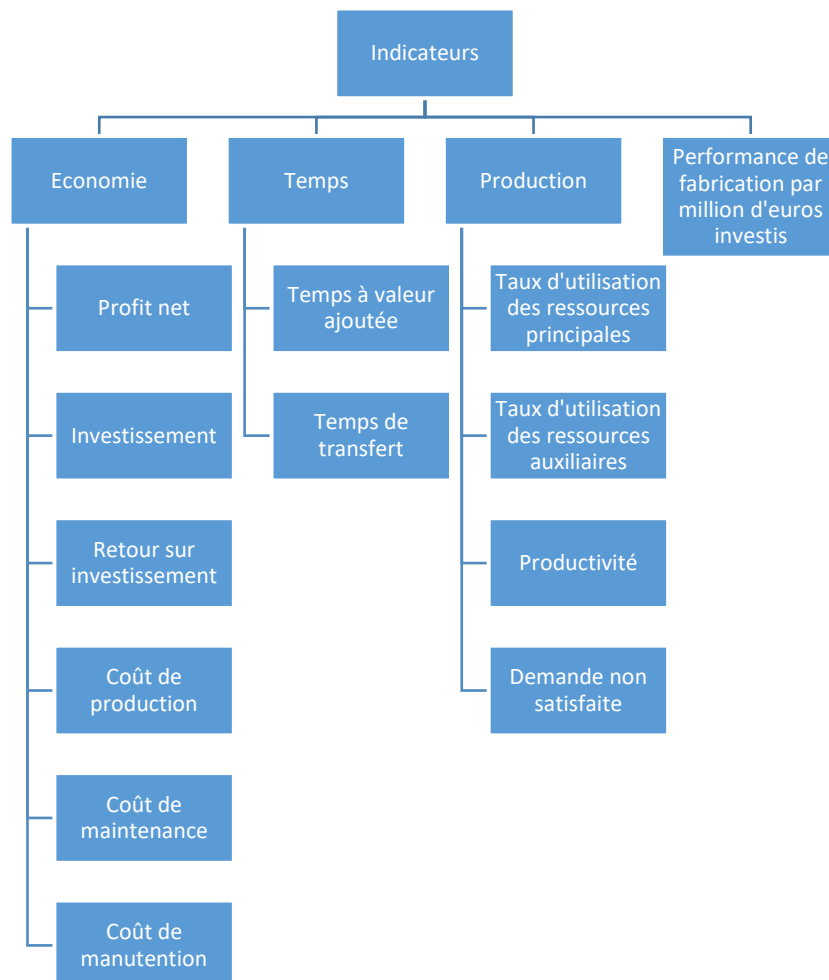


Figure 43 - Indicateurs

Les clients parlent de performance de fabrication par millions d'euros investis. Cet indicateur permet de savoir s'il vaut mieux utiliser beaucoup de machines peu chères ou des machines plus performantes mais plus chères.

L'arbre de performance représente les indicateurs utilisables pour évaluer les solutions. Au sein de l'optimisation, un choix de fournisseur de machines est fait. Pour faire ce choix, d'autres indicateurs doivent être considérés. Les indicateurs qualitatifs sont issus de la littérature sur la sélection de fournisseurs. Dans leur état de l'art, Sureeyatanapas *et al.* (2018) synthétisent les critères utilisés dans la sélection de fournisseurs (Tableau 8).

1. Certifications	21. Prix
2. Production propre	22. Conformité des procédures
3. Cohérence culturelle	23. Capacité de contrôle des procédés
4. Satisfaction client et impression	24. Apparence du produit
5. Performance de livraison	25. Connaissance du produit
6. Stabilité de la politique domestique	26. Qualité du produit
7. Facilité d'utilisation	27. Fiabilité du produit
8. Produits respectueux de l'environnement	28. Sécurité du produit
9. Statuts financiers	29. Capacité de production
10. Localisation géographique	30. Installations de production et technologie
11. Image et expérience du fournisseur	31. Réponse rapide aux urgences, problèmes ou demandes spéciales
12. Technologie de l'information et systèmes de communication	32. Sensibilisation à la sûreté
13. Innovation et R&D	33. Politiques de vente
14. Inventaire et stockage	34. Responsabilité sociale
15. Facturation	35. Aptitude au service
16. Bilan des relations de travail	36. Garantie et politiques de réclamation
17. Maintenabilité	37. Disposition à changer leurs produits et leurs services pour correspondre au besoin client
18. Management et organisation	38. Disposition à participer au développement de nouveaux produits du client et à la partie R&D
19. Qualité du conditionnement	39. Disposition à partager les informations sensibles
20. Modalité de règlement	

Tableau 8 - Synthèse des critères pour la sélection de fournisseurs (Sureeyatanapas *et al.*, 2018)

Mise à part le prix et la capacité de production qui sont des critères quantitatifs, l'ensemble des autres critères correspondent aux critères qualitatifs utilisables pour choisir le fournisseur de machines de fabrication additive ou le sous-traitant pour la fabrication de pièces.

6. OBJECTIF

L'objectif de ces travaux de recherche dans le cadre de cette thèse est donc de définir une méthode d'optimisation multicritères pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimal sur le long terme et sur le court terme. Il s'agit de proposer un ***outil d'aide à la décision qui identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte :***

- ***Des incertitudes du développement du marché des pièces fabriquées additivement ;***
- ***Des incertitudes liées aux développements des machines de fabrication additive ;***
- ***De l'attitude du décideur face à tous ces risques.***

7. VERROUS

Plusieurs verrous sont donc à lever dans le cadre de ces travaux :

- Comment définir la modularité de la conception d'un système de production ?
- Qu'est-ce qu'une conception efficiente pour un tel système pour le court terme et le long terme ?

- Quels sont les indicateurs de performance à prendre en compte dans les différents espaces temporels de l'évolution de l'entreprise dans ce nouveau marché ?
- Comment prendre en compte les incertitudes sur le développement du marché et l'évolution incertaine des machines de fabrication additive, de ses modules ou options et des performances associées ?
- Comment modéliser l'attitude du décideur face au risque ?

8. ORGANISATION DE LA PARTIE

Nous commençons par définir les décisions stratégiques et plus particulièrement celles qui concernent la planification stratégique. Il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire dans un contexte incertain donc un état de l'art sur les méthodes d'optimisation et sur la décision sous incertitude et le risque est présenté. Après avoir formalisé mathématiquement le problème, nous présentons l'approche utilisée. Un premier modèle déterministe est développé et appliqué sur plusieurs scénarii. Par la suite, les incertitudes sont intégrées au modèle. Ce nouveau modèle est ensuite appliqué sur un cas d'étude. La méthode est ensuite éprouvée sur un cas industriel. Nous terminons sur une partie conclusion et perspectives.

CHAPITRE 2. DECISION STRATEGIQUE

La conception d'un atelier de production fait partie des décisions stratégiques d'une entreprise. Parmi ces décisions, les investissements font partie des décisions fortes à prendre dans le cadre de la fabrication additive.

1. PRISE DE DECISION STRATEGIQUE

1.1. Efficacité et performance

Dean et Sharfman (1996) étudient la prise de décision stratégique. Ils montrent que la rationalité de la procédure, le caractère favorable de l'environnement et la qualité de l'implémentation sont positivement reliés à l'efficacité de la prise de décision alors que le comportement politique a un effet négatif. De plus, l'instabilité de l'environnement module la relation entre la rationalité des procédures et l'efficacité de la prise de décision, cette relation est plus forte dans des environnements instables (Figure 44).

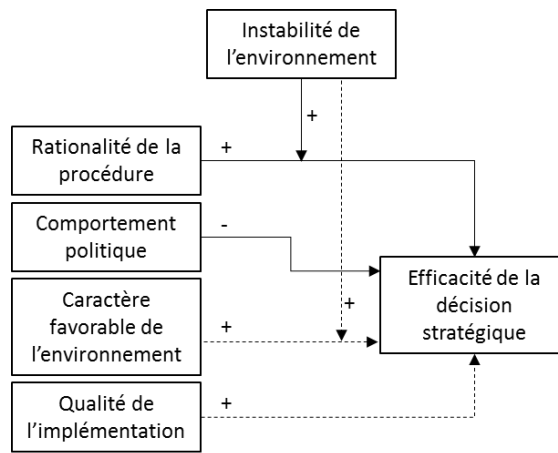


Figure 44 - Modèle d'efficacité de la prise de décision stratégique (Dean et Sharfman, 1996)

Un comportement est rationnel lorsqu'il répond à la satisfaction des intérêts des individus. Herbert Simon développe le concept de rationalité limitée : les décideurs n'ont pas toujours un comportement rationnel car ils n'ont pas toutes les informations nécessaires (Simon, 1950). Le comportement politique correspond à la tactique politique à l'intérieur de l'entreprise ou à l'influence des acteurs internes et des parties externes (Francioni *et al.*, 2015). Elbanna et Naguib (2009) étudient l'influence de la performance financière et de l'efficacité organisationnelle sur trois dimensions du processus de prise de décision stratégique : la rationalité, l'intuition et le comportement politique.

Le Tableau 9 synthétise les résultats de Dean et Sharfman (1996) et de Elbanna et Naguib (2009). Lors d'une prise de décision stratégique, il faut être vigilant à ne pas laisser une place trop importante au comportement politique et à l'intuition.

	Caractère favorable de l'environnement	Qualité de l'implémentation	Rationalité des procédures	Comportement politique	Intuition
Efficacité (Dean, 1996)	+	+	+	-	
Performance (Elbanna, 2009)			+	-	-

Tableau 9 - Efficacité et performance de la prise de décision stratégique

Le lien entre la performance de l'entreprise, la rationalité, l'intuition et le comportement politique dépend de l'importance, de l'incertitude et du motif de la décision, de l'incertitude et de l'hostilité de l'environnement et de la taille de l'entreprise (Figure 45).

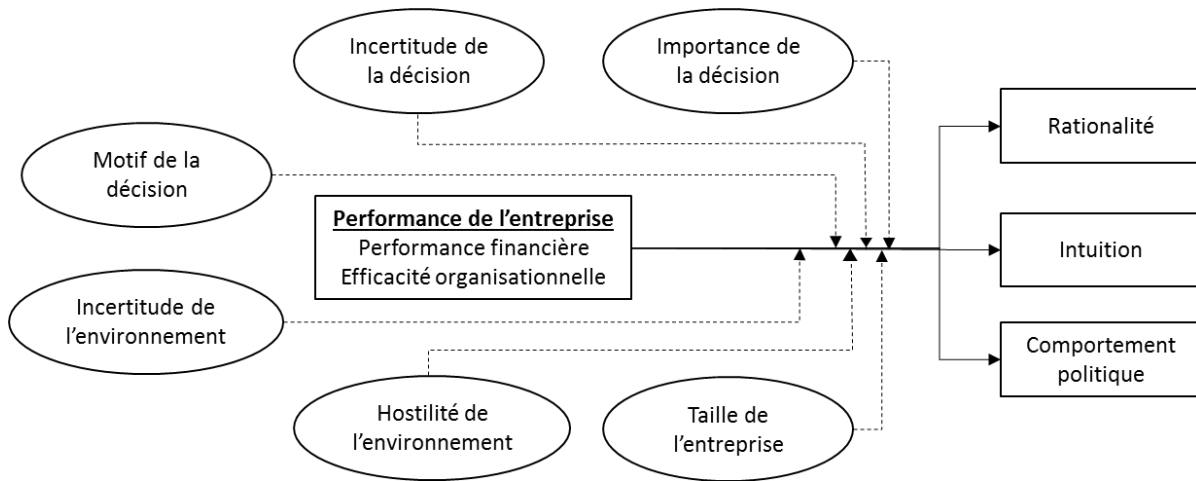


Figure 45 - Impact de la performance sur les dimensions du processus de prise de décision stratégique (Elbanna et Naguib, 2009)

Papadakis (1998) étudie la relation entre la performance et des caractéristiques du processus de prise de décision stratégique. Il prend en compte : l'exhaustivité/rationalité, l'étendue de l'information financière, l'existence d'un ensemble de règles formalisées pour guider le processus, l'existence de dispositifs formels de coordination, la décentralisation hiérarchique, la communication latérale, la politisation, la résolution du problème, le temps de gestation et la durée du processus. Il conclut qu'une meilleure performance est liée à un processus de prise de décision plus rationnel, à un plus grand nombre d'activités de réalisation de rapports financiers et à une participation plus large tant au niveau des départements qu'à celui de la hiérarchie.

De nombreux facteurs sont à prendre en compte dans le processus de prise de décision stratégique afin de prendre une décision qui permettra d'avoir une entreprise efficace et performante. Nous allons maintenant voir plus précisément l'impact des caractéristiques du décideur sur la qualité de la prise de décision.

1.2. Impact du décideur

Francioni *et al.*, (2015) considèrent deux dimensions du processus de prise de décision : la rationalité et le comportement politique. Ils étudient l'influence des caractéristiques des décideurs sur le processus de prise de décision stratégique. Leur cas d'application concerne les décisions stratégiques liées à l'internationalisation. Le processus de décision dépend des caractéristiques de personnalité (besoin d'accomplissement, attitude face au risque), des caractéristiques sociodémographiques (âge, éducation) et des compétences du décideur.

Leur analyse de 165 décideurs de PME montre que l'hostilité de l'environnement, la performance internationale passée, l'attitude face au risque et le niveau d'éducation sont positivement reliés à la rationalité des procédures. Le besoin d'accomplissement, l'attitude face au risque et le réseau sont positivement reliés au comportement politique. En revanche, l'âge est négativement relié au comportement politique (Tableau 10).

	Rationalité des procédures	Comportement politique
Hostilité de l'environnement	+	
Performance internationale passée	+	
Besoin d'accomplissement		+
Attitude face au risque	+	+
Niveau d'éducation	+	
Age		-
Réseau		+
Expérience internationale		

Tableau 10 - Lien entre les caractéristiques du décideur, la rationalité et le comportement politique (Francioni *et al.*, 2015)

Jansen *et al.* (2013) étudient le rôle du capital humain et du capital social pour prendre une décision efficace. Le décideur est défini par : son niveau d'acceptation du risque, son niveau de confiance, son expérience, sa connaissance et ses liens sociaux. Les indicateurs utilisés pour mesurer l'efficacité sont : la croissance du profit, la satisfaction du décideur et à quel point la décision a permis d'atteindre le résultat attendu. Plus le décideur croit que ses équipes sont compétentes, plus il sera prêt à accepter le risque. Les décideurs qui acceptent le risque sont supposés atteindre des niveaux d'efficacité plus importants. L'impact de l'humain (expérience et éducation) et le capital social sur l'efficacité de la décision est modéré par les jugements évaluatifs (niveau de risque accepté et niveau de confiance). Ils sont tous positivement reliés entre eux sauf le niveau d'expérience et le niveau d'acceptation du risque (Figure 46).

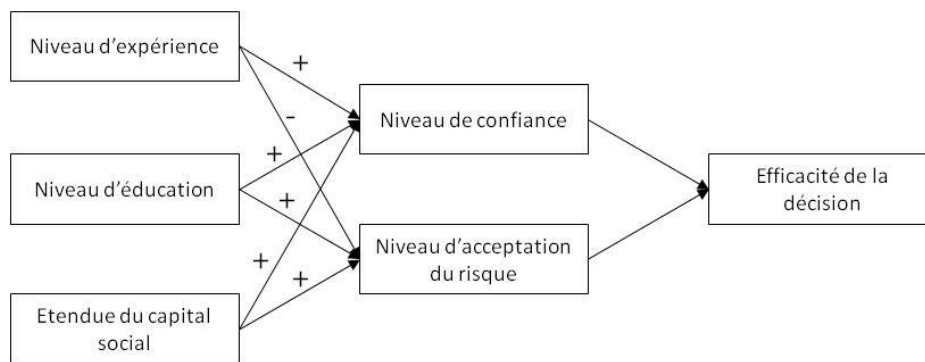


Figure 46 - Modèle conceptuel (Jansen *et al.* 2013)

Chaque décideur est différent de part ses caractéristiques. La rationalité, le comportement politique, le besoin d'accomplissement, l'attitude face au risque et l'ensemble des caractéristiques citées dans la bibliographie ont un impact important sur la prise de décision. Afin de développer un outil d'aide à la décision pertinent, sur lequel le décideur va pouvoir s'appuyer, il est important de prendre en compte son raisonnement et ses préférences au sein du processus d'optimisation.

2. INVESTISSEMENTS

Les décisions sur les investissements font partie des décisions stratégiques. En effet, ces décisions engagent l'entreprise à long terme et conditionnent la stratégie de l'entreprise. La décision d'investir est un « pari sur l'avenir et un arbitrage de la répartition du revenu dans le temps » (Mourgues, 1995).

Fumey (2001) distingue trois types d'investissements :

- Les investissements productifs composés d'investissements de modernisation, d'investissements d'expansion et d'investissements de diversification et d'innovation ;
- Les investissements sociaux visant à améliorer les conditions de travail, de sécurité et plus généralement tout ce qui peut pérenniser les activités de l'entreprise ;
- Les investissements réglementaires, au caractère obligatoire pour l'entreprise.

Dans nos travaux, nous considérons les investissements productifs et plus précisément les investissements d'expansion et d'innovation. A moyen et à long termes, il est possible de faire des investissements de modernisation.

Dorval (1981) décompose le processus d'investissement en trois phases :

- La phase de planification des investissements : déterminer les investissements nécessaires et les répartir dans le temps ;
- La phase de réalisation ;
- La phase de suivi ou de contrôle.

Notre problématique s'intègre dans la phase de planification des investissements.

Zellweger (2007) travaille sur la relation entre l'horizon de temps, l'attitude du décideur et les investissements. Il se concentre sur les entreprises familiales qui doivent prendre des décisions à long terme. Deux stratégies sont présentées : la stratégie de persévérance et la stratégie de dépassement. Dans le cas de la stratégie de persévérance : à long terme et à court terme, le risque est le même mais la rentabilité est plus faible à long terme. Pour la stratégie de dépassement : à long terme et à court terme, la rentabilité est la même mais le risque est plus élevé à long terme. Il conclue qu'un horizon d'investissement à long terme est une source de risque mais également une source supplémentaire d'avantage concurrentiel.

Le choix entre la stratégie de persévérance et la stratégie de dépassement est fait au niveau stratégique en fonction du risque que le décideur accepte de prendre. Ce choix a un impact sur l'investissement, il doit donc pour être pris en compte dans la méthode développée. De plus, cela confirme que ce sont les industriels qui prendront le risque aujourd'hui seront reconnus si ce marché tient ses promesses.

CHAPITRE 3. PLANIFICATION STRATEGIQUE

Parmi l'ensemble des décisions stratégiques, nous allons nous concentrer sur les décisions qui concernent la planification stratégique.

La planification stratégique se réfère à la détermination de la séquence et du calendrier de l'achat ou de l'élimination des équipements, ce qui est un processus de prise de décision multicritères impliquant des compromis entre le coût, le débit, le temps de cycle et le risque. Elle est aussi nommée plan d'expansion de la capacité, plan d'achat d'outils ou plan d'un portefeuille d'outils ou de ressources. Elle représente un enjeu important pour les investissements de capacité de production (Mhiri, 2016).

La planification stratégique n'a pas encore été souvent appliquée en fabrication additive. C'est pourquoi nous allons nous référer à son application sur un système similaire : l'industrie des semi-conducteurs.

1. ANALOGIE AVEC LES SEMI-CONDUCTEURS

La planification stratégique est utilisée dans le domaine des semi-conducteurs. Les caractéristiques de l'industrie des semi-conducteurs ((Geng et Jiang, 2009); (Swaminathan, 2000)) sont :

- Un processus de fabrication complexe ;
- **Des changements rapides dans la technologie et les produits ;**
- **Un lead time long ;**
- **Un coût important pour incrémenter la capacité ;**
- **Des incertitudes importantes sur la demande et la capacité.**

Mise à part la complexité du processus, les caractéristiques des semi-conducteurs sont semblables aux caractéristiques de la fabrication additive. Wang (2007) illustre le planning des ressources simultanées avec la prise en compte des alternatives d'investissement pour les semi-conducteurs (Figure 47). Comme le montre la Figure 48, il est possible de représenter la fabrication additive selon le même schéma.

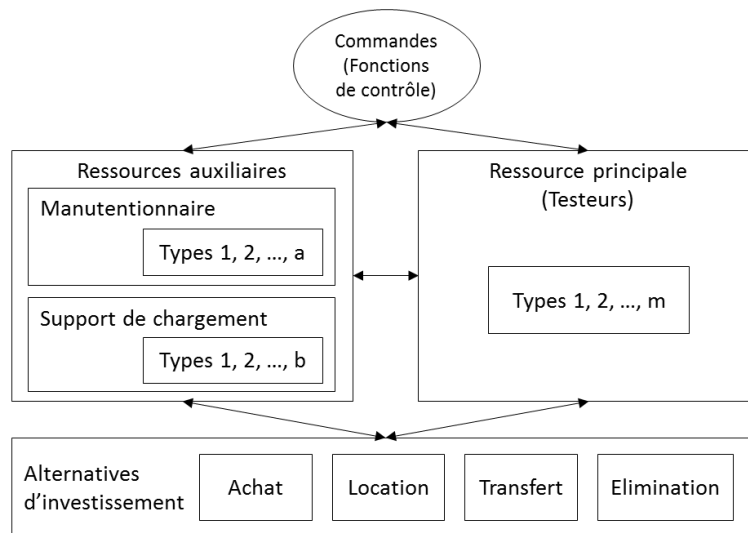


Figure 47 - Planning des ressources simultanées en considérant les alternatives d'investissement pour les semi-conducteurs (Wang 2007)

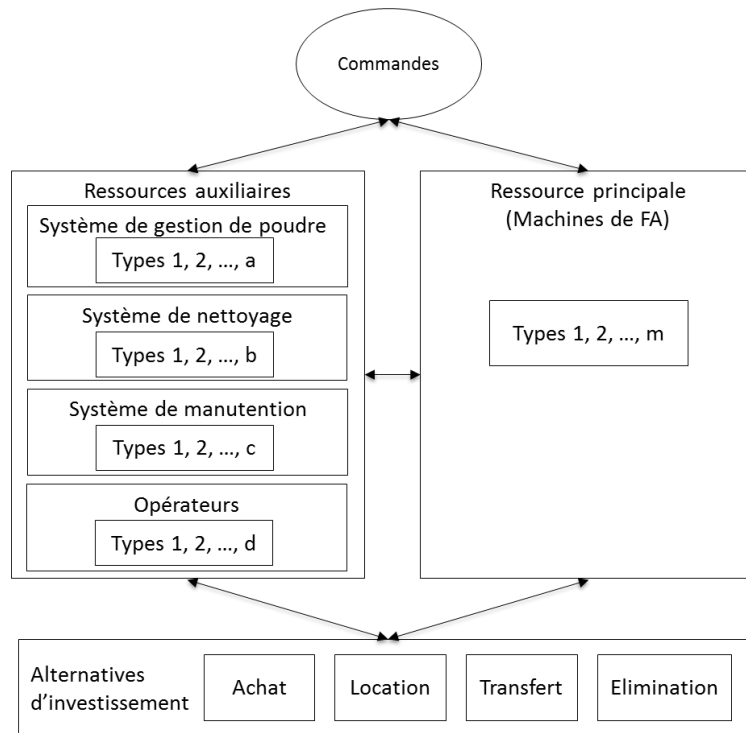


Figure 48 - Planning des ressources simultanées en considérant les alternatives d'investissement pour la fabrication additive

2. PROCESSUS DE CREATION

Le processus de création d'un planning stratégique est divisé en 4 phases (Rusjan, 2005) :

- L'analyse de la situation actuelle de l'objet du planning ;
- L'analyse et prévision de l'environnement de l'objet de planning ;
- La définition de la situation future pour l'objet du planning, exprimé avec différents objectifs planifiés ;
- La définition des chemins pour arriver aux objectifs planifiés.

Dans nos travaux de recherche, les analyses sont faites, les cibles numériques de la situation future sont données par le décideur. L'objectif est de trouver les moyens d'arriver à ces objectifs.

3. METHODES

D'après Geng et Jiang (2009), les méthodes utilisées pour résoudre les problèmes de planification stratégique sont réparties en trois catégories : le modèle statique de capacité, les méthodes de recherche par voisinage et les programmations mathématiques.

Nous allons maintenant étudier cinq articles qui utilisent ces méthodes dans le cadre du planning de capacité pour les semi-conducteurs. Le modèle et la méthode utilisés dans chaque article sont précisés dans le Tableau 11.

Référence	Modèle	Méthode
(Wang, 2007)	Modèle mathématique mixte non linéaire en nombres entiers	Algorithme génétique basé sur la programmation de contraintes
(Barahona <i>et al</i> , 2005)	Modèle stochastique multi-période à deux étages	Heuristique
(Hood <i>et al</i> , 2003)	Modèle de programmation stochastique en nombre entiers	Programmation stochastique
(Shabbir, 2002)	Modèle stochastique multi étage	Programmation stochastique
(Yang <i>et al.</i> , 2009)	Modèle mathématique mixte non linéaire en nombres entiers	Algorithme génétique avec satisfaction de contraintes

Tableau 11 - Modèles et méthodes

De nombreuses données sont nécessaires en entrée de ces modèles. Elles concernent : la demande, les produits, les ressources, le budget et les différentes options : achat et sous-traitance.

La demande est prise en compte dans tous les articles mais de façon différente. Shabbir (2002) et Wang (2007) utilisent la demande par période. Hood *et al.*, (2003) utilisent la demande par scénario et Barahona *et al.*, (2005) et Yang *et al.* (2009) utilisent la demande par produit (Tableau 12). Un wafer est une plaque de semi-conducteur microcristallin utilisée en micro-électronique.

Demande	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Demande par période	x			x	
Demande par scénario			x		
Demande par produit (en wafers par jour)		x			x
Borne supérieure pour la demande non satisfaite par produit		x	x		
Maximum de demande en surplus			x		
Compatibilité commande-ressource principale	x				

Tableau 12 - Données : Demande

Les données sur les produits correspondent aux gammes exprimées de différentes façons (Tableau 13).

Produits	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Nombre de passes par opération sur un produit		x			
Nombre d'heures pour faire un wafer		x			
Temps de passage pour chaque opération pour chaque ressource à chaque période				x	x
Gammes			x		x

Tableau 13 - Données : Produits

Les données sur les ressources concernent principalement le nombre initial de ressources, les cadences, les temps disponibles et les capacités (Tableau 14).

Ressources	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Nombre initial de ressources principales	x				
Nombre initial de ressources auxiliaires	x				
Cadence théorique des ressources principales	x				
Cadence théorique des ressources auxiliaires	x				
Temps opératoire disponible des ressources principales	x				x
Temps opératoire disponible des ressources auxiliaires	x				x
Capacité initiale par groupe d'outils		x	x		
Capacité unitaire d'un outil dans un groupe d'outils		x			
Nombre d'outils déjà disponible par groupe d'outils			x		x
Capacité par période d'un outil				x	
Coût de temps libre par ressource					x
Taux de rendement cible par ressource par période					x
Taux d'utilisation des ressources principales	x				

Tableau 14 - Données : Ressources

Le budget disponible est exprimé soit par période soit sur l'ensemble de l'intervalle de temps étudié (Tableau 15).

Budget	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Budget total disponible pour acheter de nouveaux outils		x			
Budget disponible par période			x		x
Taux d'intérêt capital (par période)	x				x

Tableau 15 - Données : Budget

En plus de la possibilité d'acheter des ressources, Wang (2007) ajoute la notion de sous-traitance (Tableau 16).

Achat et Sous-traitance	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Coût d'achat	x	x			x
Coût d'un outil à une période				x	
Valeur de récupération des ressources	x				x
Coût unitaire d'une machine par l'alternative de sous-traitance (location, transfert)	x				
Coefficient de pénalité pour l'achat d'un outil primaire		x	x		
Coefficient de pénalité pour l'achat d'un outil non primaire		x	x		

Tableau 16 - Données : Achat et sous-traitance

En fonction des articles, d'autres éléments sont pris en compte (Tableau 17).

Autres éléments	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Nombre attendu de wafer complets par wafer commencé pour un produit		x			
Coefficient pour la production en plus			x		
Coût de pénalité d'une pénurie				x	x
Profit marginal d'une puce	x				x
Collection de groupes d'outils qui peuvent faire une opération j		x			
Collection d'opérations qui peuvent être réalisées par un groupe d'outils i		x			
Probabilité de réalisation par scénario		x	x		

Tableau 17 - Données : Autres éléments

L'ensemble de ces données permet de prendre les différentes décisions. Sur les cinq articles, trois ensembles de variables de décision se dessinent. Barahona *et al.* (2005), Shabbir (2002), Hood *et al.* (2003) et Yang *et al.* (2009) considèrent le nombre de wafers par jour qui entre dans la ligne de production par produit et qui demande une opération j sur un outil i . Barahona *et al.* (2005) et Shabbir (2002) prennent en compte le nombre de nouveaux outils achetés alors que Hood, Bermon et Barahona (2003) et Yang *et al.* (2009) prennent en compte le nombre de ressources principales dans l'atelier à chaque période. Wang (2007) a une approche différente en prenant des décisions sur les nombres de ressources principales et auxiliaires dans l'atelier à chaque période ou associées à une alternative de sous-traitance et la quantité de produits par ressource (Tableau 18).

Variables de décision	Wang 2007	Barahona <i>et al</i> 2005	Hood <i>et al</i> 2003	Shabbir 2002	Yang <i>et al</i> 2009
Nombre de nouveaux outils achetés		x		x	
Nombre de ressources principales dans l'atelier à chaque période	x		x		x
Nombre de ressources auxiliaires dans l'atelier à chaque période	x				
Quantité de produits par ressource	x				
Nombre de ressources principales associées à une alternative de sous-traitance	x				
Nombre de ressources auxiliaires associées à une alternative de sous-traitance	x				
Nombre de wafers par jour qui entre dans la ligne de production par produit		x	x	x	x
Nombre de wafers par jour qui demande une opération j sur un outil i		x	x	x	x

Tableau 18 - Variables de décision

Afin de déterminer les valeurs des variables de décision, il faut définir une fonction objectif afin d'évaluer les solutions. Les fonctions objectifs utilisées sont présentées dans le Tableau 19.

Référence	Objectif
(Wang, 2007)	Maximiser le profit net dans des périodes à long terme
(Barahona <i>et al.</i>, 2005)	Minimiser la demande non satisfaite totale pour tous les produits
(Hood <i>et al.</i>, 2003)	Minimiser la moyenne pondérée de la demande non satisfaite
(Shabbir, 2002)	Minimiser le total des coûts prévus
(Yang <i>et al.</i>, 2009)	Maximiser le profit net Minimiser le coût d'allocation des ressources Minimiser le coût des pénuries Maximiser l'utilisation des ressources Modèle hybride pour maximiser le profit et l'utilisation Modèle hybride entre l'utilisation et le coût de pénurie

Tableau 19 - Fonctions objectifs

Chaque approche a ses propres spécificités. Wang (2007) et Yang *et al.* (2009) travaillent sur le long terme avec un fonctionnement en make-to-order. Shabbir (2002) découpe le temps en périodes et intègre des incertitudes grâce à un processus stochastique à temps discret avec un espace fini de probabilité. Ces incertitudes portent sur le coût d'un outil à une période, le coût de pénalité d'une pénurie et la demande par période. Barahona *et al.* (2005) travaillent avec des scénarii et des périodes de temps.

Deux autres approches du planning de capacité stratégique sont proposées par Karabuk et Wu (2003) et Swaminathan (2000). Karabuk et Wu (2003) considèrent le planning de capacité à chaque début d'année fiscale avec un horizon de temps de 3 à 5 ans. Ils utilisent un processus itératif entre l'expansion de capacité et la configuration des ressources. Les décisions concernent le nombre de démarrage de wafers par semaine pour chaque technologie, l'expansion de capacité et le volume de l'expansion. Ils prennent en compte deux incertitudes : la demande et la capacité grâce à des scénarii composés d'une probabilité pour chaque incertitude. Les préférences du client sont modélisées par l'imputation d'un coût si une préférence n'est pas respectée.

Swaminathan (2000) utilise des scénarii définis par la quantité de wafers par période, le coût des ruptures de stock par wafer, une probabilité et la prévision de la demande par wafer. Les incertitudes sont prises en compte grâce à un programme stochastique à deux étages avec recours.

Parmi ces travaux, aucun article ne prend en compte tous les éléments que nous voulons considérer. Chaque article intègre un ou deux éléments. Wang (2007) et Yang *et al.* (2009) prennent en compte les ressources auxiliaires. L'évolution de la capacité et du coût d'achat au cours du temps n'est incluse que dans l'article de Shabbir (2000). Concernant le budget, les articles considèrent soit le budget total, soit le budget par période mais pas les deux. La demande insatisfaite est considérée seulement par Barahona *et al.* (2005) et Hood *et al.* (2003). De plus, aucun article ne considère le risque pris par le décideur et son attitude face à ce risque. De plus, Shabbir *et al.* (2000), Karabuk et Wu (2003) et Swaminathan (2000) incluent les incertitudes sur la demande et sur le coût mais pas sur le développement technologique. Shabbir *et al.* (2000) développe un programme stochastique à multi-étage. Karabuk et Wu (2003) et Swaminathan (2000) ajoutent une probabilité sur chaque scénario.

Par ailleurs, l'article de Yang *et al.* (2009) considèrent le progrès technologique mais il n'y a pas d'incertitude sur l'évolution et sur la disponibilité des technologies. Ils considèrent seulement l'obsolescence des technologies.

Le Tableau 20 synthétise les éléments à prendre en compte dans nos travaux et ceux qui sont considérés dans les articles étudiés.

Paramètres	Wang (2007)	Yang et al. (2009)	Shabbir (2000)	Barahona et al. (2005)	Hood et al. (2003)	Karabuk et Wu (2003)	Swaminathan (2000)
Ressources auxiliaires	x	x					
Evolution de la capacité			x				
Evolution du coût d'achat			x				
Demande insatisfaite				x	x		
Incertitudes sur la demande			x			x	x
Incertitudes sur le coût			x			x	x
Progrès technologique	x						
Incertitudes sur le développement technologique							
Disponibilité des technologies							

Tableau 20 - Eléments pris en compte dans la littérature

En conclusion, nous avons besoin de proposer un nouveau modèle qui considère ces éléments et pouvant intégrer les incertitudes et l'attitude du décideur face au risque.

Dans une première approche, nous formalisons mathématiquement ce problème par un programme mixte en nombres entiers. La fonction objectif choisie est la maximisation du profit net qui intègre différents coûts pour être le plus complet possible. Le modèle pourra être étendu pour prendre en compte d'autres critères.

CHAPITRE 4. OPTIMISATION PAR METHODES EXACTES

Le problème à résoudre dans nos travaux est un problème d'optimisation combinatoire.

Résoudre un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver la meilleure solution parmi un ensemble fini de choix, à déterminer l'optimum d'une fonction sous des contraintes données. Il existe deux grandes catégories de méthodes pour résoudre ces problèmes : les méthodes exactes et les méthodes approchées (Figure 49).

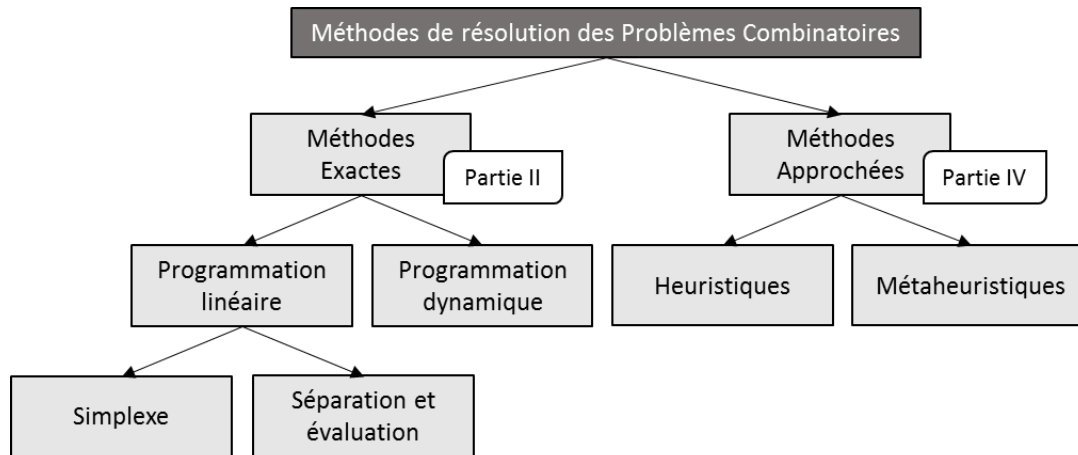


Figure 49 - Méthodes de résolution des problèmes combinatoires

Les méthodes approchées sont développées dans la 0. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les méthodes exactes d'optimisation. Les méthodes les plus utilisées peuvent être classées selon deux approches : la programmation linéaire et la programmation dynamique. Les problèmes de programmation linéaire peuvent être résolus grâce à deux méthodes : la méthode du simplexe et la méthode de séparation et évaluation.

1. PROGRAMMATION LINEAIRE

Un problème de programmation linéaire correspond à l'optimisation d'une fonction linéaire. Cette fonction, appelée fonction objectif, est une combinaison linéaire de variables de décisions réelles. L'objectif est de minimiser ou de maximiser cette fonction objectif. Des contraintes peuvent être définies sur les variables de décision : il s'agit d'égalités ou d'inégalités linéaires. Une solution réalisable est une solution qui satisfait toutes les contraintes. Un programme linéaire peut s'écrire sous différentes formes mais il est toujours possible de se ramener à la forme standard :

$$\begin{aligned}
 & \text{maximiser} && c_1x_1 + \dots + c_nx_n \\
 & \text{tel que} && a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n = b_i ; 1 \leq i \leq m, b_i \geq 0 \\
 & && x_1, \dots, x_n \geq 0
 \end{aligned}$$

Où b_i, c_i et a_{ij} sont des constantes fixées et où les x_i sont des variables réelles à déterminer.

En fonction de la nature des variables de décision x_i , trois familles de programmes linéaires sont distinguées :

- La programmation linéaire en variables réelles : ce problème est polynomial ;
- La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) : ce problème est NP-complet ;
- La programmation linéaire en variables bivalentes (PL01) : ce problème est NP-complet.

Dans certains problèmes, les variables de décision peuvent être de types différents, il s'agit alors de programmation linéaire mixte en nombres entiers.

Un programme linéaire peut être résolu grâce à des méthodes de résolution générales et efficaces. La méthode du simplexe et la méthode de séparation et d'évaluation font partie de ces méthodes. Il existe de nombreux logiciels de résolution (Excel, Mathematica, Cplex, PL-Solve...).

1.1. Méthode du Simplexe

L'une des méthodes de résolution est la méthode du Simplexe. Le mathématicien américain G.B.Dantzig l'a développé dans les années 50 (Dantzig, 1951). Il s'agit d'un algorithme itératif. Il est basé sur un principe d'amélioration locale : à partir d'un sommet, il faut chercher un sommet voisin qui améliore l'objectif. L'idée est d'augmenter la variable de la fonction objectif associée au plus grand coefficient positif.

La méthode du Simplexe est appliquée par Rosat *et al.* (2017) pour la planification des équipages d'avion. Bendato *et al.* (2017) utilisent la méthode du simplexe pour déterminer la solution d'investissement multi-site optimale.

1.2. Méthode de séparation et d'évaluation

Les méthodes de séparation et d'évaluation sont des méthodes arborescentes, elles sont basées sur la construction d'un arbre de recherche composé de branches et de nœuds qui permet d'explorer l'espace des solutions pour trouver la solution optimale.

Il s'agit de méthodes énumératives : l'ensemble des solutions est fini mais gigantesque, il faut trouver un moyen pour déterminer la meilleure solution possible sans parcourir toutes les solutions. Une énumération implicite consiste à éliminer *a priori* des solutions. L'objectif est de détecter que des solutions sont mauvaises ou irréalisables sans les évaluer explicitement. Ceci est réalisable grâce au concept de séparation et d'évaluation.

Le principe de séparation consiste à décomposer le problème initial P en sous-problèmes de plus en plus petits P_k (Figure 50).

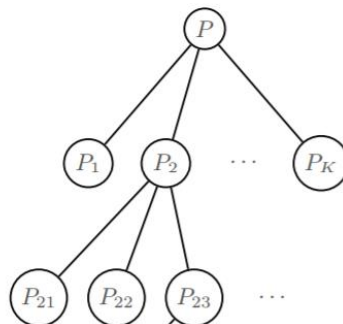


Figure 50 - Arborescence séparation et évaluation

Le principe d'évaluation consiste à déterminer pour chaque sommet de l'arbre, une minoration de ce que le sous-ensemble qui part de ce sommet peut contenir comme solutions. Seuls les sommets qui améliorent le minorant sont parcourus. Ceci permet de réduire de façon conséquente le nombre de sommets à examiner.

Soit le sous problème P_k : $\min f(x)$ sous contraintes $x \in F_k$.

Une borne inférieure b_k est calculée telle que $b_k \leq f(x), \forall x \in F_k$.

Soit $y \in F$ une solution admissible du problème P .

Si $f(y) \leq b_k \leq f(x), \forall x \in F_k$, alors cela ne vaut pas la peine de résoudre le problème P_k .

A chaque instant, est mémorisé :

- Une liste de sous-problèmes actifs $\{P_1, P_2, \dots\}$;
- La valeur $U = f(y)$ de la meilleure solution admissible obtenue jusque-là.

Lors de l'initialisation, la valeur U correspond soit à l'infini soit à une solution $f(x)$ où x est un admissible connu.

Algorithmiquement, une itération est composée des étapes suivantes :

Soit P_k un sous-problème actif.

Si P_k est non admissible, il est supprimé de la liste.

Sinon, calculer la borne b_k .

Si $U \leq b_k$, supprimer P_k de la liste.

Sinon,

Soit résoudre P_k directement.

Soit partitionner F_k et créer de nouveaux sous-problèmes qui sont ajoutés à la liste.

La rapidité d'obtention de la solution optimale peut dépendre de la façon de parcourir l'arbre : en profondeur, en largeur ou en meilleur d'abord, de la fonction d'évaluation et de l'ordre dans lequel les solutions sont construites. Il existe différentes méthodes pour partitionner, choisir le sous-problème à traiter et calculer les bornes.

La méthode de séparation et d'évaluation est fréquemment utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire. Wei *et al.* (2018) l'appliquent sur un problème de découpe 2D sans prise en compte de la contrainte guillotine. Elle est également utilisée par Sölveling et Clarke (2014) pour ordonnancer les avions sur les pistes des aéroports. Xie et Sahinidis (2008) l'utilisent dans le cadre de l'implantation d'ateliers. Solimanpur et Jafari (2008) l'utilisent également pour optimiser l'implantation d'un atelier en deux dimensions.

Elle est également utilisée en contexte incertain. Defraeye et Nieuwenhuys (2016) l'appliquent pour optimiser un ordonnancement avec une demande stochastique non stationnaire. Solimanpur et Jafari (2008) l'appliquent également dans un contexte stochastique. Arya *et al.* (2018) utilisent une méthode de séparation et d'évaluation basée sur la logique floue.

2. PROGRAMMATION DYNAMIQUE

Le concept de programmation dynamique a été développé par Richard Bellman au début des années 50 (Bellman, 1957). La programmation dynamique consiste à décomposer un problème en plusieurs sous-problèmes et à résoudre les sous-problèmes des plus petits aux plus grands en stockant les résultats intermédiaires. Il s'agit d'une approche du bas vers le haut. Les solutions combinées de chaque sous-problème permettent d'obtenir une solution complète qui est la solution finale du problème principal. L'une des idées de cette méthode est de ne pas évaluer plusieurs fois la même solution. Les sous-problèmes sont résolus et leurs résultats sont stockés, les sous-problèmes pertinents sont utilisés pour construire la solution optimale du problème initial. Une des limites de la programmation dynamique est la taille des instances.

La conception d'une solution optimale se fait en quatre étapes :

- La caractérisation de la structure d'une solution optimale ;
- La définition par récurrence de la valeur d'une solution optimale ;
- Le calcul de la valeur d'une solution optimale ;
- La construction de la solution optimale.

La programmation dynamique est appliquée sur les problèmes classiques de recherche opérationnelle : le problème du plus court chemin et le problème du sac à dos. Pour le problème du plus court chemin, deux algorithmes basés sur la programmation dynamique sont développés : l'algorithme de Roy-Floyd-Warshall (Cormen *et al.*, 2001) et l'algorithme de Bellman-Ford-Moore (Jukna et Schnitger, 2016). Elle est également utilisée dans le domaine des transports : He *et al.* (2018) optimisent un ordonnancement de véhicules, et dans le domaine industriel : Tripathy *et al.* (2015) l'appliquent dans le cas d'une implantation d'atelier.

La littérature montre que les programmes mixtes en nombres entiers sont généralement résolus à l'aide d'un algorithme de programmation linéaire basé sur la séparation et l'évaluation. Il s'agit de la méthode que nous allons utiliser.

CHAPITRE 5. DECISION SOUS INCERTITUDE ET RISQUE

Les décisions stratégiques étant prises à long terme et le contexte de la fabrication additive étant incertain tant au niveau du marché que de la technologie, les décisions sont prises dans un contexte incertain et risqué.

1. L'INCERTAIN

1.1. Définitions : incertitude, imprécision, incomplétude, imperfection

Dubois et Prade (2006) définissent l'information comme une "collection de symboles ou de signes produits soit par l'observation de phénomènes naturels ou artificiels, soit par l'activité cognitive humaine et destinée à comprendre le monde qui nous entoure, à aider à la prise de décision ou à communiquer avec des individus". L'information est le support de la décision. Les principales formes d'imperfection de l'information sont l'incomplétude, l'imprécision et l'incertitude (Smets, 1991).

L'incomplétude correspond aux cas où la valeur d'une variable est inconnue. Il s'agit d'une absence d'information ou d'une information partielle. Il existe deux types d'incomplétude : existentielle et universelle.

L'imprécision correspond aux cas où la valeur d'une variable est donnée mais pas avec la précision attendue. L'imprécision vient d'une mauvaise connaissance des valeurs numériques ou de l'utilisation du langage. Pour les valeurs numériques, l'imprécision peut venir d'un manque de moyens de mesure, d'erreurs de mesure ou d'une référence à des connaissances génériques. Il existe plusieurs catégories d'imprécision : disjonctive, négative, informations données par intervalle, informations floues et possibilité. Selon Guillaume (2011), les imprécisions peuvent être dues :

- à une approximation ;
- à une définition "floue" des bornes d'une catégorie ;
- au passage progressif entre deux propriétés.

L'incertitude correspond aux cas où l'individu peut construire une idée subjective à partir de l'état réel. Elle correspond à l'appréciation qu'il se fait du réel. Il existe trois types d'incertitude : probabilité, possibilité et crédibilité. Selon Guillaume (2011), l'incertitude peut venir de :

- la fiabilité de la source de l'information ;
- une difficulté d'obtention ou de vérification ;
- la qualité d'une prévision ;
- sa nature aléatoire ;
- une imprécision et une incomplétude.

L'incomplétude et l'imprécision sont des formes objectives de l'ignorance qui dépendent du contexte alors que l'incertitude est une forme subjective (Smets, 1991).

Selon Tacnet (2009), il existe des liens entre ces différentes imperfections : les incomplétudes entraînent des incertitudes et les imprécisions peuvent induire des inconsistances. L'imperfection de l'information conditionne la décision. L'information peut être objective ou subjective en fonction de la source. Elle peut être numérique ou qualitative. L'imperfection est indissociable de l'information. L'incertitude peut être épistémique (subjective) ou aléatoire (objective). L'imprécision peut être exprimée par un ensemble de valeurs, un intervalle ou des nombres flous. L'inconsistance est issue de conflits (Figure 51).

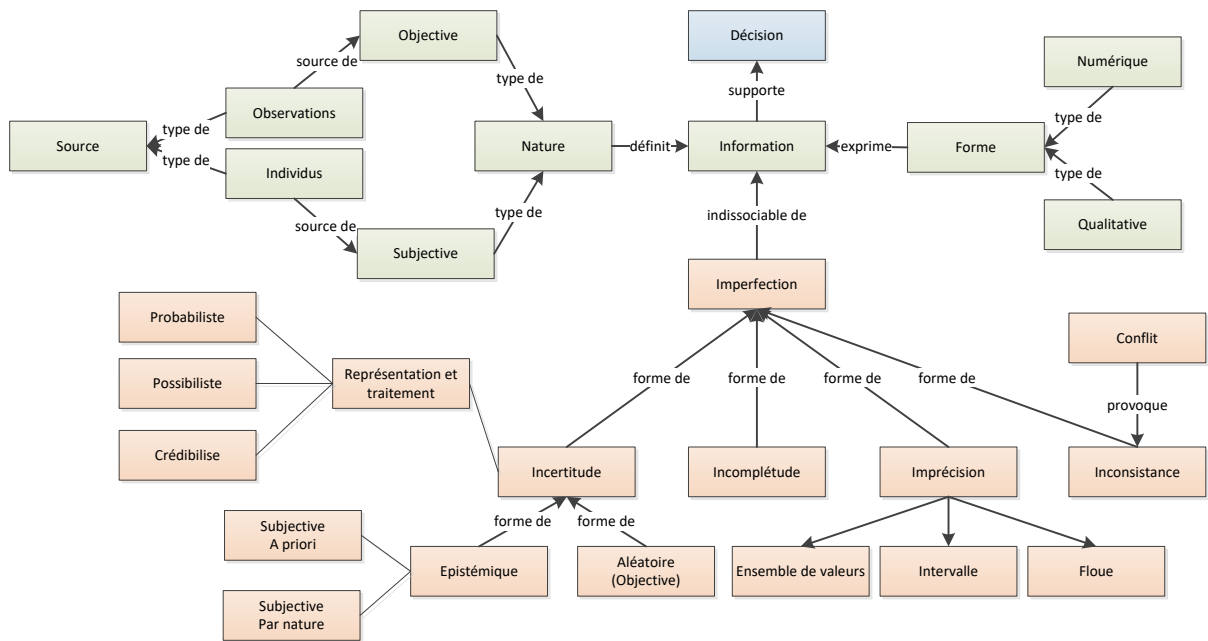


Figure 51 - L'imperfection de l'information conditionne la décision (Tacnet, 2009)

1.2. Contexte : certain, risqué, incertain

Une décision peut être prise dans différents contextes. En fonction du contexte, les conséquences de la décision peuvent dépendre des événements qui sont aussi appelés états de la nature. Dans un contexte certain, la décision prise ne peut avoir qu'une et une seule conséquence quel que soit l'état de la nature. Dans un contexte risqué ou incertain, les conséquences de la décision prise dépendent des états de la nature. Dans le cas d'une décision dans le risque, la distribution de probabilité sur la réalisation des événements est objective alors qu'elle est subjective dans le cas d'une décision dans l'incertain (Tacnet, 2009).

1.3. Qualités de l'information et de l'expertise

Les qualités de l'information et de l'expertise sont liées, tout comme le sont l'information et la décision. Selon Tacnet (2009), la qualité de l'information dépend des imperfections et de l'incertitude. Pour prendre une décision, il faut réaliser plusieurs étapes :

- La définition de la nature de l'information ;
- Le regroupement des informations en fonction des raisonnements mis en œuvre ;
- L'évaluation des informations par rapport à leur niveau d'imperfection ;
- La capitalisation des informations.

1.4. Prise en compte des incertitudes

L'incertitude peut être prise en compte de différentes manières :

- Par approche stochastique (Dentcheva *et al.*, 2002) ;
- Par la formalisation d'un problème d'optimisation multicritère où il faut minimiser l'espérance et l'écart type de la fonction objectif (Doltsinis et Kang, 2004) ;
- Par « optimisation robuste » (Dellino *et al.*, 2010) : une solution robuste est insensible à de petites variations des variables de décision ou de l'environnement ;
- Par l'utilisation d'une fonction objectif bruitée : chaque calcul de la fonction objectif avec les mêmes paramètres d'entrée donne une valeur différente ;
- Par l'utilisation d'une fonction objectif approchée : les approximations sont dues à une fonction objectif déterminée à partir d'expérimentations ou de simulations ;
- Par la mise en place d'un environnement dynamique : le système suit le changement d'optimum sans redémarrer le processus de recherche.

1.5. Modèles de représentation des incertitudes

Beyer et Sendhoff (2007) proposent un état de l'art des approches utilisées pour modéliser les incertitudes. Ils décrivent trois façons de quantifier mathématiquement l'incertitude :

- La modélisation déterministe : définition des domaines de variation des données incertaines par des ensembles fixés ;
- La modélisation probabiliste : définition des distributions de probabilités associées aux données incertaines ;
- La modélisation possibiliste : définition des ensembles flous décrivant les possibilités d'occurrence d'un événement.

D'autres modèles de représentation sont proposés dans la littérature : les nuages, la notion de flou, la modélisation par des scénarii ou des événements, les approches robustes et l'analyse de sensibilité.

1.5.1. Modélisation déterministe

Un ensemble aléatoire est une manière de représenter les incertitudes. Les probabilités de chaque élément ne sont pas connues mais les poids de probabilités sont à répartir entre les sous-ensembles.

A partir de la distribution de masse, il est possible de calculer les mesures de plausibilité et de croyance qui sont les estimations supérieures et inférieures de la croyance en l'apparition de l'évènement. En effet, la mesure de plausibilité représente à quel point l'évènement est plausible, alors que la mesure de croyance représente la certitude sur l'évènement (Guillaume, 2011).

1.5.2. Modélisation probabiliste

Le modèle de simulation et la fonction objectif sont dits stochastiques lorsque des variables d'entrée sont aléatoires. Elles sont souvent représentées par des lois de probabilités. Il est nécessaire de réaliser plusieurs répliques pour prendre en compte les variables aléatoires (Comets et Meyre, 2006).

La théorie des probabilités est utilisée pour quantifier la chance qu'un événement se produise ou qu'une proposition soit vraie ou fautive (Guillaume, 2011).

1.5.3. Modélisation possibiliste

Les distributions de possibilités (Figure 52) sont construites à partir d'intervalles de confiance d'un expert sur une variable. Il faut noter que plus l'information est imprécise, plus elle est sûre. La distribution de possibilité est construite à partir de l'évaluation de la possibilité de chaque intervalle. Contrairement aux probabilités, ce formalisme permet de représenter l'incomplétude de l'information (Guillaume, 2011).

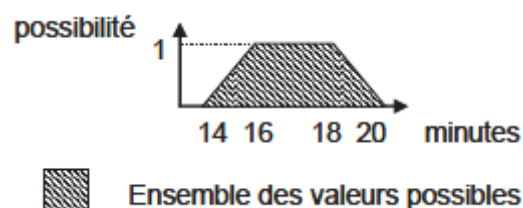


Figure 52 - Exemple de distribution de possibilités (Guillaume, 2011)

« Le degré de possibilité représente le degré avec lequel l'évènement est susceptible de se réaliser. » Le degré de nécessité représente le degré de certitude attribué à la réalisation de l'évènement. Il permet d'estimer la confiance dans une information imparfaite (Tacet, 2009). Le degré de nécessité d'une proposition A est le complément du degré de possibilité de ne pas avoir A (Smets, 1991).

1.5.4. Nuages

La distribution de possibilité donne une information sur l'ensemble des valeurs qu'il est possible d'avoir. Les nuages (Figure 53) permettent d'ajouter une information sur l'ensemble des valeurs qu'il est possible de ne pas avoir (Guillaume, 2011).

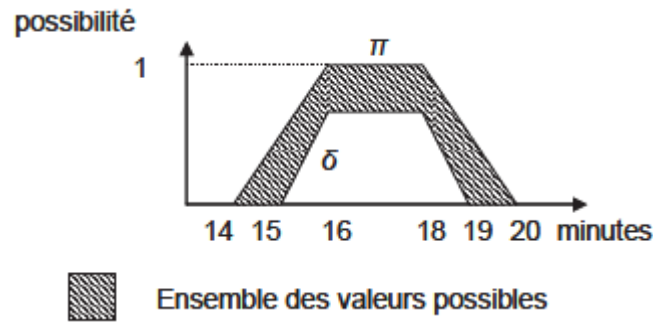


Figure 53 - Exemple de valeurs possibles (Guillaume, 2011)

1.5.5. Notion de flou

Certaines informations ne peuvent être quantifiées même avec une certaine probabilité. Les informations sont vagues et floues. La notion de flou représente l'appartenance d'une variable à un ensemble dont les frontières ne sont pas clairement définies. Si les variables d'entrée sont floues, le modèle de simulation et la fonction objectif sont flous (Smets, 1991) ou (Dubois et Prade, 1980).

La théorie des ensembles flous permet de représenter les informations imprécises exprimées sous forme linguistique (Zadeh, 1965). Les approches basées sur la théorie des ensembles flous ont pu être utilisées pour l'agencement des ateliers (Al-Najjar et Alsyof, 2003).

1.5.6. Modélisation par des scénarii ou par des événements

D'après Roy (2010), la recherche de robustesse repose sur la définition d'une famille finie ou infinie de scénarii en expliquant que « Cette famille doit permettre d'internaliser dans les différentes réalités vécues qui méritent d'être considérées : c'est l'incertitude dans laquelle on est, d'attribuer une vraie valeur à certaines données ou paramètres qui oblige à considérer ces différentes réalités. Chaque scénario est ainsi défini en attribuant une valeur précise à chacune de ces données et paramètres ».

Les facteurs bruits ou les facteurs d'environnement sont modélisés par des scénarii ou des événements. Plusieurs méthodes sont proposées par la littérature.

1.5.7. Approches robustes

Une solution robuste peut être définie comme une bonne solution dans le pire des cas. Elle est peu sensible à l'incertitude et aux aléas. Les critères utilisés pour évaluer la robustesse sont le maximin, le maximax, le regret maximal et le regret relatif. Gurevsky (2011) applique l'approche robuste aux problèmes du sac à dos, d'affectation, du plus court chemin, de l'arbre couvrant de poids minimal et d'ordonnement.

1.5.8. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité permet d'identifier les facteurs d'entrée aléatoires qui ont le plus d'influence sur l'incertitude des résultats en sortie. Elle permet d'analyser le comportement de la fonction objectif. Gurevsky (2011) réalise une analyse de sensibilité pour les problèmes du sac à dos, du voyageur de commerce, du plus court chemin, de l'arbre couvrant de poids minimal, d'ordonnement, multi objectifs et à la planification de la production.

2. AIDE A LA DECISION SOUS INCERTITUDE

2.1. Axiomes de Savage

La théorie de la décision est basée sur les axiomes de Savage, ils décrivent les principes qu'un décideur rationnel doit respecter (Savage, 1972):

- le **principe de la chose sûre** : pour un état donné, si des décisions ont la même conséquence, la préférence entre les deux décisions ne dépend pas de cette conséquence ;
- le **principe de Pareto optimalité** : si, pour tous les états de la nature, une décision a est préférée ou indifférente par rapport à la décision b et que, pour au moins un état, la décision a est préférée à b, alors le décideur préfère la décision a.

2.2. Fonction d'utilité

Dans un contexte incertain, le décideur ne prend pas sa décision uniquement en fonction de la valeur espérée. Il doit prendre en compte le risque ou les variations possibles des valeurs. La fonction d'utilité traduit l'attitude du décideur (Savage, 1972). Elle est définie comme suit :

$u : X \rightarrow \mathbb{R}$ telle que pour toute paire x, x' dans X , $u(x) > u(x')$ si et seulement si x est préféré à x' .

La forme de la fonction d'utilité modélise l'attitude du décideur face au risque :

- L'aversion pour le risque, pessimisme : fonction d'utilité concave ;
- L'indifférence au risque, neutralité : fonction d'utilité linéaire ;
- Le goût du risque, optimisme : utilité convexe.

2.3. Décision sous ignorance totale

En fonction de la connaissance sur l'état du monde, plusieurs catégories de décision sont identifiées. La distinction est faite entre la décision sous :

- Ignorance totale ;
- Information incomplète (théorie des possibilités) ;
- Incertitude probabilisée : décision sous risque ;
- Probabilités imprécises.

La décision sous incertitude probabilisée nécessite des informations riches sur le monde en termes de statistiques ou d'historiques. La décision sous probabilités imprécises nécessite également la connaissance de probabilités. Dans le cadre de ces travaux, nous ne pouvons pas obtenir ces informations-là. Nous allons travailler dans le cadre de décision sous ignorance totale.

Dans le cas de l'ignorance totale, rien n'est connu sur l'état de la nature. Tous les états de la nature sont considérés équiprobables.

Afin de formaliser les critères, plusieurs ensembles sont définies :

- $S = \{1, \dots, n\}$: ensemble d'états possibles du monde ;
- D : ensemble de décisions d ;
- X : ensemble de conséquences possibles des actions x .

Une décision est une application $d : S \rightarrow X$, $d(s) = x$ où x est la conséquence de la décision d dans l'état s .

Les critères utilisés dans ce cas sont le maximin et le maximax, le critère d'Hurwicz, le critère de la Laplace, le critère de Savage et le Leximin et le Leximax. Le critère de Laplace, le leximin et le leximax satisfont le principe de la chose sûre mais ce n'est pas le cas du maximin et du critère de Savage.

2.3.1. Maximin et maximax

Dans le cas d'une maximisation, le maximin, aussi appelé critère de Wald (1950), consiste à choisir la décision qui maximise l'utilité minimale du décideur (Equation (1)). Il permet d'obtenir le gain au pire des cas. Il traduit un caractère pessimiste ou une attitude prudente.

$$\text{Maximiser } U_*(d) = \min_{s \in S} d(s) \quad (1)$$

Le maximax consiste à choisir la décision qui maximise l'utilité maximale du décideur (Equation (2)). Il permet d'obtenir le gain dans le meilleur des cas. Il traduit une attitude optimiste.

$$\text{Maximiser } U^*(d) = \max_{s \in S} d(s) \quad (2)$$

2.3.2. Critère d'Hurwicz

Le critère d'Hurwicz pondère les deux critères précédents en utilisant un coefficient de pessimisme α . Il permet de faire un compromis entre l'optimisme et le pessimisme (Equation (3)).

$$\text{Maximiser } H(d) = \alpha * \min_s u(d(s)) + (1 - \alpha) * \max_s u(d(s)) \quad (3)$$

Si $\alpha = 1$, le décideur a une attitude pessimiste, si $\alpha = 0$, le décideur a une attitude optimiste.

2.3.3. Critère de Laplace

Le principe de Laplace vise à maximiser la conséquence moyenne $L(d)$. Il revient à calculer la moyenne arithmétique des revenus espérés pour chaque stratégie et chaque état de la nature puis de conserver la stratégie qui a la moyenne la plus élevée (Equation (4)).

$$L(d) = \max_{d \in D} \left(\frac{\sum_s u(d(s))}{|S|} \right) \quad (4)$$

2.3.4. Critère de Savage

Le regret correspond à la différence entre les gains que le décideur aurait pu avoir et les gains qu'il a obtenu. Trois critères permettent de prendre des décisions en fonction du regret : le critère de minimisation du regret, le Leximin et le Leximax.

La minimisation du regret peut être associée à une recherche de robustesse. Elle permet de minimiser la dégradation d'un critère due à l'incertitude sur l'état de la nature et ainsi de limiter les risques. Ce critère est utilisé dans les problèmes d'optimisation sous incertitude comme critère de robustesse lorsque les incertitudes sur les variables sont des scénarii discrets ou des intervalles (Roy, 2010).

Le critère de minimisation du regret maximal, ou critère de Savage, consiste à choisir la plus petite valeur des regrets maximums. Le calcul du regret est la différence entre l'utilité de la décision idéale et l'utilité de la décision qu'il prendrait. Ce critère traduit une attitude prudente.

Si l'utilité de la décision idéale pour l'état s est notée $\max_{d'} u(d'(s))$, le regret d'avoir choisi d dans l'état s est exprimé par l'équation (5). Le critère de minimisation du regret maximal est exprimé par l'équation (6).

$$r(d, s) = \max_{d'} u(d'(s)) - u(d(s)) \quad (5)$$

$$\text{Minimiser } R(d) = \max_s (\max_{d'} u(d'(s)) - u(d(s))) \quad (6)$$

2.3.5. Leximin et Leximax

Les critères du Leximin et du Leximax consistent à classer les utilités d'une décision par ordre croissant et à choisir le minimum dans le cas du Leximin et le maximum dans le cas du Leximax.

Une solution optimale pour les critères Leximin et Leximax est également optimale pour les critères Maximin et Maximax mais la réciproque n'est pas vrai.

Ces critères respectent le principe de la chose sûre, contrairement aux critères précédemment présentés.

3. RISQUE

Les sources de risque diffèrent suivant le niveau de décision (stratégique, tactique ou opérationnel). Les risques peuvent être classés selon leur origine :

- Les risques de planification et de pilotage (niveau tactique) ;
- Les risques d'approvisionnement (niveau opérationnel) ;
- Les risques de production (niveau opérationnel) ;
- Les risques sur la demande (niveau stratégique) ;
- Les risques environnementaux (niveau stratégique).

3.1. Prise en compte du risque

Dans les problèmes d'optimisation, l'objectif est de minimiser le risque. Liu (2002) propose de modéliser la minimisation des risques par deux types de fonction objectif : la première minimise la probabilité d'apparition d'une mauvaise conséquence et la seconde minimise la moyenne des conséquences. Les conséquences sont représentées par des fonctions coût. Le premier type revient à minimiser la probabilité que la fonction coût soit supérieure à un coût fixé, le second type revient à minimiser l'espérance de la fonction coût.

Les méthodes d'analyse des risques sont surtout utilisées et développées en industrie. Les industriels utilisent des approches relatives à la fiabilité et à la sûreté de fonctionnement. Il existe deux types de méthodes : les approches systémiques et les systèmes experts.

3.1.1. Approches systémiques : arbres d'événements, défaillance, cause

Les approches systémiques s'appuient sur une analyse systémique et sur l'utilisation de représentations sous forme d'arbres. Les approches a priori par rapport à un événement redouté sont représentées par des arbres d'événement ou des arbres de défaillance, les analyses a posteriori sont représentées par des arbres de causes (Mortureux, 2001). L'arbre d'événements permet de représenter l'ensemble des conséquences d'un événement. L'arbre de défaillance représente les scénarii pouvant conduire à un événement redouté. L'arbre des causes représente qualitativement les explications possibles pour un événement réalisé (Tacnet, 2009).

3.1.2. Systèmes experts

Les systèmes experts sont issus de l'intelligence artificielle. Ils reposent sur la modélisation des raisonnements. A partir de propositions d'experts, ils utilisent des combinaisons logiques pour obtenir et évaluer de nouvelles propositions.

3.2. Lien entre risque et connaissance

Coleman et Casselman (2016) proposent une approche stratégique pour faire un compromis entre les connaissances et le risque. Une grande accumulation de connaissances et une forte réduction des risques ne donnent pas une performance optimale de l'entreprise. Le compromis entre les deux permet d'améliorer l'efficacité de l'entreprise. L'objectif est d'examiner l'impact de la frontière entre la connaissance et le risque sur le rendement organisationnel. Le temps déplace cette frontière. Plus le temps passe plus la connaissance augmente et le risque diminue (Figure 54).

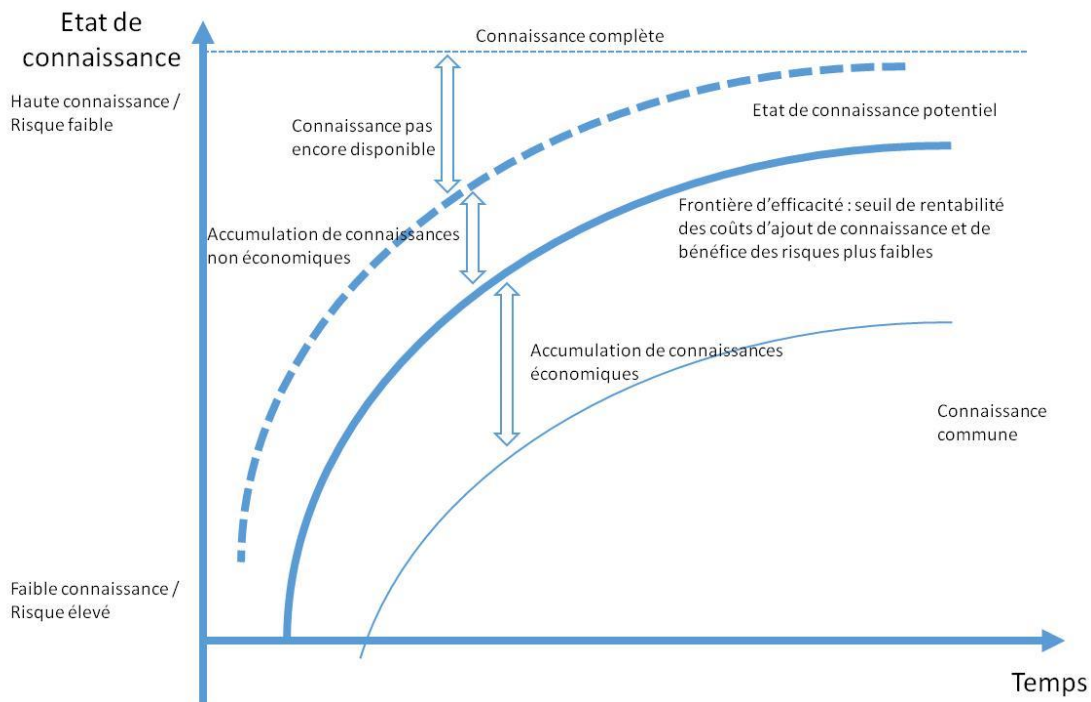


Figure 54- Lien risque-rendement et frontière d'efficacité (Coleman et Casselman, 2016)

Les connaissances sur la fabrication additive sont en cours d'acquisition autant au niveau technologique qu'au niveau du marché. Ainsi, la fabrication additive se situe dans la zone de faible connaissance et de risque élevé.

3.3. Lien entre risque et incertitude

Selon Sreedevi et Saranga (2017), les supply chain flexibles ont un rôle modérateur sur les incertitudes et le risque. Les entreprises qui ont une incertitude élevée sur l'environnement sont exposées à : un risque d'approvisionnement important, un risque élevé sur les procédés de fabrication et un risque élevé sur les livraisons. La flexibilité de l'approvisionnement, de la fabrication et de la distribution modère la relation entre les incertitudes sur l'environnement et le risque lié à l'approvisionnement, à la fabrication et à la distribution (Figure 55).

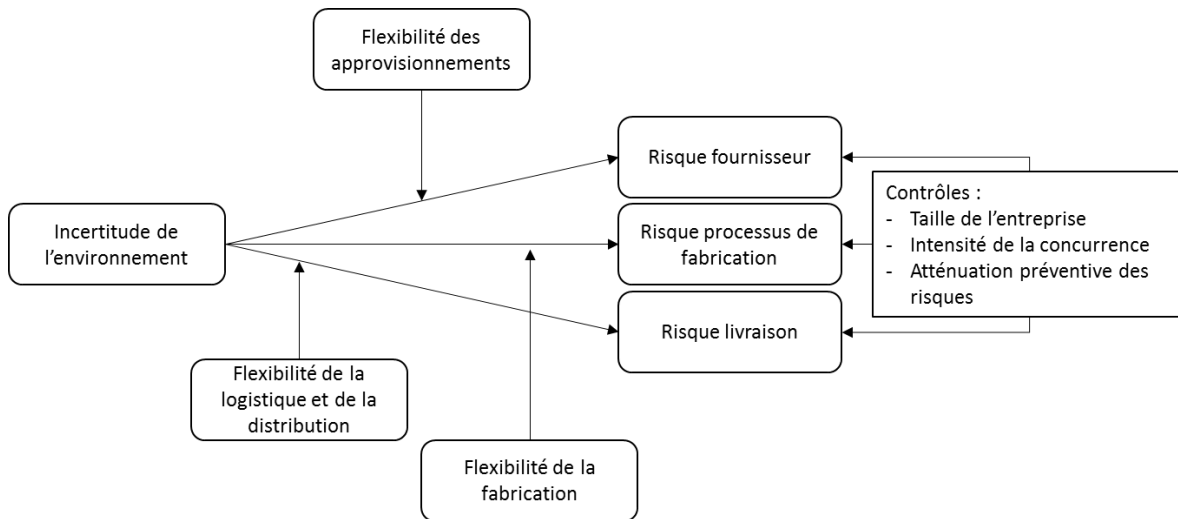


Figure 55 - Flexibilité et risque (Sreedevi et Saranga, 2017)

En fabrication additive, l'incertitude sur l'environnement est importante. Même si la fabrication additive permet d'obtenir des chaînes de fabrication plus flexibles, le risque sur le processus de fabrication reste important.

3.4. Le risque spéculatif

Le risque est souvent rattaché à la notion de pertes. A partir des années 70, il est considéré comme un moteur pour l'innovation et la création de valeurs nouvelles (Gourc, 1999). Marmuse et Montaigne (1989) distinguent les risques purs et les risques spéculatifs. Les risques purs sont ceux qui restent difficiles à contrôler, ils sont souvent accidentels. Lorsqu'ils se réalisent, le résultat est presque toujours une perte ou une absence de gain. Les risques spéculatifs, appelé aussi risques d'entreprendre sont contrôlables. En prenant ces risques l'entreprise espère qu'il en résulte des gains. Ce risque est défini comme le résultat d'une décision de gestion qui est prise dans le but d'accroître le profit mais qui comporte des risques de pertes (Lambert-Faivre, 1991). Les caractéristiques communes des risques spéculatifs sont (Salvator et Gondé, 1981) :

- L'acceptation : le risque résulte d'un choix raisonné de l'entreprise ;
- La délimitation : les engagements pris par l'entreprise sont maîtrisés ;
- Le contrôle : des signes peuvent permettre de contrôler ce risque.

La décision d'investissement résulte d'un choix raisonné avec des engagements qui sont maîtrisés et des signes qui peuvent permettre de contrôler le risque. Nous sommes donc en présence d'un risque spéculatif.

CHAPITRE 6. FORMALISATION MATHÉMATIQUE ET APPROCHE PROPOSÉE

Dans une première approche, nous formalisons ce problème par un programme mixte en nombres entiers. La fonction objectif choisie est la maximisation du profit net qui intègre différents coûts pour être le plus complet possible. Ensuite, nous présentons l'approche proposée afin de réaliser l'optimisation à partir de ce modèle.

1. LES ENSEMBLES

Les achats de machines représentent un investissement beaucoup plus important que l'achat d'options ou de versionings. Les intervalles séparant deux prises de décision sur l'achat des machines sont donc plus importants que les intervalles séparant deux prises de décision sur l'achat d'option. Les intervalles séparant deux prises de décision sur la réalisation de versioning sont encore plus faibles. A chaque période, il sera donc possible de prendre de une à trois décisions : soit seulement des décisions concernant les versions, soit des décisions concernant les versions et les options soit des décisions concernant les versions, les options et les machines (Figure 56).

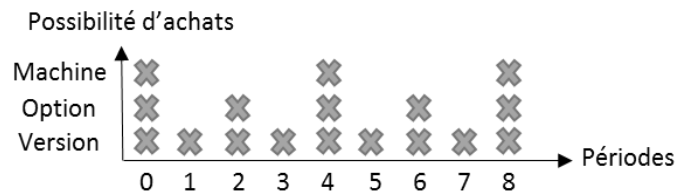


Figure 56 - Possibilité d'achats

- T Ensemble des périodes t
- L Ensemble des périodes où des machines peuvent être achetées
- M Ensemble des périodes où des options peuvent être achetées
- C Ensemble des périodes où un versioning peut être effectué

Au niveau stratégique, les pièces à fabriquer ne sont pas connues précisément. Un type de pièce p est défini par une catégorie de taille de pièce et une poudre.

- P Ensemble des pièces p

Les machines de fabrication additive de type a correspondent aux machines d'une même référence chez un même fournisseur.

- A Ensemble des types de machine a
- AM Ensemble des machines de fabrication additive m
- O Ensemble des options o
- V Ensemble des versionings possibles v

2. LES PARAMETRES

Les paramètres concernent : la demande, le budget, les machines, les options, les investissements, les compatibilités, les temps, la vitesse de lasage, les disponibilités et les opérateurs.

2.1. La demande

Chaque pièce est caractérisée par un volume de demande à chaque période t , une poudre et un prix de vente.

$$d_{p,t} \quad \text{Demande de pièce } p \text{ sur la période } t \text{ en } cm^3$$

$$pou_{p,k} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } p \text{ est fabriquée avec la poudre } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$pv_{p,t} \quad \text{Prix de vente du produit } p \text{ en } €/cm^3 \text{ à la période } t$$

2.2. Le budget maximal

Le budget est défini sur plusieurs horizons de temps : un budget total sur l'ensemble des périodes et un budget pour chaque période à ne pas dépasser.

$$B \quad \text{Budget total en } €$$

$$B_t \quad \text{Budget pour chaque période } t \text{ en } €$$

2.3. Les machines

Un coût d'utilisation de la machine est défini pour chaque type de machine et à chaque période.

$$co_{a,t} \quad \text{Coût d'utilisation de la machine de type } a \text{ en } €/h \text{ sur la période } t$$

2.4. Les options

Une option peut être mutualisable sur plusieurs machines. En fonction de la capacité de l'option, elle peut être utilisée par plus ou moins de machines. Les temps d'utilisation font qu'un aspirateur pourra être utilisé par plus de machines que la machine de dépoudrage.

$$max_o \quad \text{Nombre de machines qui peuvent utiliser l'option } o$$

$$coo_{o,t} \quad \text{Coût d'utilisation de l'option } o \text{ en } €/cm^3 \text{ sur la période } t$$

Lors de l'achat de certaines machines, des options peuvent être obligatoires pour utiliser la machine. L'achat d'une machine où le chargement et le déchargement sont automatiques nécessitera l'achat des modules de chargement et de déchargement automatiques par exemple.

$$opt_{a,o} = \begin{cases} 1 & \text{si l'achat de l'option } o \text{ est obligatoire lors de l'achat d'une machine de type } a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

2.5. Les investissements

Les investissements représentent le prix d'achat ainsi que le coût d'installation.

$$I_{a,t} \quad \text{Investissement pour une machine de type } a \text{ en } € \text{ à la période } t$$

$$Io_{o,t} \quad \text{Investissement à l'achat de l'option } o \text{ en } € \text{ à la période } t$$

$$Iv_{v,t} \quad \text{Investissement à l'achat du versioning } v \text{ en } € \text{ à la période } t$$

2.6. Les compatibilités

Les options ne sont pas compatibles avec chaque type de machines.

$$comp_{a,o,t}^o = \begin{cases} 1 & \text{si l'option } o \text{ est compatible avec une machine de type } a \text{ à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour des questions de taille et de poudre, toutes les pièces ne sont pas réalisables sur toutes les machines. Les versionings ne peuvent pas être effectués sur toutes les machines.

$$comp_{a,p,t}^p = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } p \text{ est réalisable sur une machine de type } a \text{ à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$comp_{a,v}^v = \begin{cases} 1 & \text{si le versioning } v \text{ est réalisable sur une machine de type } a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

2.7. Les temps

Chaque type de machine est défini par un temps disponible qui correspond au temps où elle peut réellement produire.

t_a Temps disponible pour une machine de type a en h

L'ajout d'options ou la réalisation d'un versioning peut diminuer le taux de panne, le taux de rebut ou le temps de changement plateau et donc augmenter le temps disponible de la machine.

$to_{a,o}$ Gain de temps engendré par l'option o sur une machine de type a

$tv_{a,v}$ Gain de temps engendré par le versioning v sur une machine de type a

γ Facteur représentant l'impact des changements de poudre sur le temps disponible

2.8. La vitesse de lasage

Chaque type de machine est défini par une vitesse de lasage.

p_a Vitesse de lasage d'une machine de type a en cm^3/h

L'ajout d'une option ou la réalisation d'un versioning peut permettre d'augmenter la productivité de la machine.

$po_{a,o}$ Gain sur la vitesse de lasage engendré par l'option o sur une machine de type a

$pv_{a,v}$ Gain sur la vitesse de lasage engendré par le versioning v sur une machine de type a

2.9. Les disponibilités

Toutes les machines, les options et les versions ne sont pas disponibles à l'achat à chaque période.

$dat_{a,t} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine de type } a \text{ est disponible à l'achat à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

$dat_{o,t} = \begin{cases} 1 & \text{si l'option } o \text{ est disponible à l'achat à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

$dat_{v,t} = \begin{cases} 1 & \text{si la version } v \text{ est disponible à l'achat à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

2.10. Les opérateurs

En fonction du degré d'automatisation de la machine et de l'option, le besoin en opérateur évolue.

b_a Besoin en opérateur de la machine de type a en $h/\text{équipe}$ (en h sur 8h)

Si l'ajout d'une option ou la réalisation d'un versioning augmentent le degré d'automatisation de la machine, le besoin en opérateur peut diminuer.

$bo_{o,a}$ Besoin en opérateur de l'option o sur une machine de type a

$bv_{a,v}$ Besoin en opérateur suite au versioning v sur une machine de type a (peut être négatif)

cop Coût opérateur en €/h

3. VARIABLES DE DECISION

Les variables de décision sont relatives à l'achat de machines, d'options et de versions, à l'affectation d'un volume de chaque pièce sur chaque machine à chaque période et au nombre d'opérateurs.

$$\begin{aligned}
 x_{m,a,t} &= \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ est de type } a \text{ et qu'elle est présente dans l'atelier à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 y_{m,a,o,t} &= \begin{cases} 1 & \text{si l'option } o \text{ est utilisée par la machine } m \text{ de type } a \text{ à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 Y_{o,t} & \text{ Nombre d'options } o \text{ dans l'atelier à la période } t \\
 z_{m,a,v,t} &= \begin{cases} 1 & \text{si le versioning } v \text{ est réalisé sur la machine } m \text{ de type } a \text{ à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 q_{m,a,t,p} & \text{ Quantité de pièce } p \text{ produite sur la machine } m \text{ de type } a \text{ sur la période } t \text{ en } cm^3 \\
 pi_{m,a,t,p} &= \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } p \text{ est affectée à la machine } m \text{ de type } a \text{ sur la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 nbop_t & \text{ Nombre d'opérateurs dans l'atelier sur la période } t
 \end{aligned}$$

Certaines variables de décision sont binaires.

$$\begin{aligned}
 x_{m,a,t} &\in \{0 ; 1\} \\
 y_{m,a,o,t} &\in \{0 ; 1\} \\
 z_{m,a,v,t} &\in \{0 ; 1\} \\
 pi_{m,a,t,p} &\in \{0 ; 1\}
 \end{aligned}$$

D'autres variables sont des nombres entiers.

$$\begin{aligned}
 Y_{o,t} &\in \mathbb{N} \\
 q_{m,a,t,p} &\in \mathbb{N} \\
 nbop_t &\in \mathbb{N}
 \end{aligned}$$

4. VARIABLES LIEES

Soit $w_{po,m,a,t}$ une variable binaire qui est égale à 1 si une pièce qui utilise la poudre po est affectée à la machine m à la période t et à 0 sinon. Sa valeur dépend de la variable de décision $pi_{m,a,t,p}$ (Equation (7)).

$$w_{po,m,a,t} = \sum_p^P \sum_k^{PO} pou_{p,k} * pi_{m,a,t,p} \quad (7)$$

Soit $T_{m,t}$ le temps disponible de la machine m sur la période t en h . Il correspond à la somme du temps disponible de la machine avec le gain lié aux options affectées et aux versionings réalisés. L'année où la machine est achetée, il faut 6 mois pour qu'elle puisse produire des pièces conformes. Le temps disponible de la première année est donc divisé par 2. Il est déduit de cette somme un temps disponible en fonction du nombre de changements de poudre (Equation (8)).

$$\begin{aligned}
 T_{m,t} &= \sum_a^A \frac{1}{2} (x_{m,a,t} + x_{m,a,t-1}) * t_a + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * t_{o,a,o} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * t_{v,a,v} - \gamma \\
 & * \sum_k^{PO} w_{k,m,a,t}
 \end{aligned} \quad (8)$$

Soit $P_{m,t}$ la productivité de la machine m sur la période t . Tout comme pour le temps disponible, elle correspond à la somme de la productivité de la machine avec le gain lié aux options affectées et aux versionings réalisés (Equation (9)).

$$P_{m,t} = \sum_a^A x_{m,a,t} * p_a + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * p_{o_{a,o}} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * p_{v_{a,v}} \quad (9)$$

Soit $Be_{m,t}$ le besoin en opérateur de la machine m sur la période t . Le calcul est le même que pour le temps disponible et la productivité. Le résultat est divisé par 8 car le besoin opérateur est exprimé en $h/équipe$ et qu'une équipe correspond à 8h (Equation (10)).

$$Be_{m,t} = \frac{(\sum_a^A x_{m,a,t} * b_a + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * b_{o_{a,o}} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * b_{v_{a,v}})}{8} \quad (10)$$

5. FONCTION OBJECTIF

L'objectif est de maximiser le bénéfice. Le bénéfice est calculé à partir du montant rapporté par les produits vendus $Vente$ auquel est enlevé : le coût machine $C_{machine}$, l'investissement total IT , le coût des opérateurs C_{op} et le coût de la demande insatisfaite C_{dins} (Equation (11)).

$$Bénéfice = Vente - (C_{machine} + IT + C_{op} + C_{dins}) \quad (11)$$

Nous faisons l'hypothèse que tout ce qui est fabriqué est vendu. Le montant rapporté par les produits vendus correspond donc à la quantité produite multipliée par le prix de vente de chaque pièce (Equation (12)).

$$Vente = \sum_p^P \sum_t^T \left(p_{v_{p,t}} * \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p} \right) \quad (12)$$

Le coût machine correspond au temps où la machine est utilisée, calculé à partir de la quantité de pièce attribuée à chaque machine et de la productivité de la machine, multiplié par le coût horaire de la machine (Equation (13)). Lorsque la machine ne produit pas, elle a quand même un coût pour l'entreprise. Ce coût est représenté par C_{fixe} .

$$C_{machine} = \sum_m^{AM} \sum_t^T \sum_a^A \left(\frac{\sum_p^P q_{m,a,t,p}}{P_{m,t}} * c_{o_{a,t}} \right) + x_{m,a,t} * C_{fixe} \quad (13)$$

L'investissement total correspond à l'investissement lié aux achats de machines, d'options et de versionings (Equations (14) et (15)).

$$IT = \sum_t^T IT_t \quad (14)$$

$$IT_t = \sum_a^A \left(I_{a,t} * \sum_m^{AM} (x_{m,a,t} - x_{m,a,t-1}) \right) + \sum_v^V I_{v,t} * \sum_m^{AM} \sum_a^A (z_{m,a,v,t} - z_{m,a,v,t-1}) + \sum_o^O (I_{o,t} * (Y_{o,t} - Y_{o,t-1})) \quad (15)$$

Le coût opérateur est le produit du nombre d'opérateurs et de leur coût horaire (Equation (16)).

$$C_{op} = \sum_t^T cop * nb_op_t \quad (16)$$

Le coût de la demande insatisfaite correspond au produit de la quantité de pièces qui n'a pas été produite par le prix de vente (Equation (17)).

$$C_{dins} = \sum_p^P \sum_t^T \left(d_{p,t} - \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p} \right) * pv_{p,t} \quad (17)$$

La formule globale de la fonction objectif est donnée par l'équation (18).

$$\begin{aligned} Bénéfice = & \sum_p^P \sum_t^T pv_{p,t} * \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p} \\ & - \left(\sum_m^{AM} \sum_t^T \sum_a^A \left(\frac{\sum_p^P q_{m,a,t,p}}{P_{m,t}} * co_{a,t} + x_{m,a,t} * c_{fixe} \right) + \sum_t^T IT_t + \sum_t^T cop * nb_op_t \right) \\ & + \sum_p^P \sum_t^T \left(d_{p,t} - \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p} \right) * pv_{p,t} \end{aligned} \quad (18)$$

6. CONTRAINTES

6.1. Les machines

Une machine m ne peut être que d'un seul type de machine a .

$$\forall m \in AM, \forall t \in T, \sum_a^A x_{m,a,t} \leq 1 \quad (19)$$

Une machine m de type a peut être achetée à une période t uniquement si $t \in L$.

$$\forall m \in AM, \forall a \in A, \forall t \notin L, x_{m,a,t} = x_{m,a,t-1} \quad (20)$$

Une machine m de type a peut être présente à une période t uniquement si elle est disponible à l'achat à cette période.

$$\begin{aligned} \forall t \in T \setminus \{0\}, x_{m,a,t} & \leq dat_{a,t} + x_{m,a,t-1} \\ \text{Pour } t = 0, x_{m,a,t} & \leq dat_{a,t} \end{aligned} \quad (21)$$

La demande effectuée sur une machine m ne doit pas dépasser la capacité de cette machine.

$$\forall m \in AM, \forall a \in A, \forall t \in T, \sum_p^P q_{m,a,t,p} \leq T_{m,t} * P_{m,t} \quad (22)$$

La quantité de pièce p produite ne doit pas dépasser la demande.

$$\forall p \in P, \forall t \in T, \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p} \leq d_{p,t} \quad (23)$$

La pièce p peut être réalisée sur une machine m de type a uniquement si elles sont compatibles et si la machine a été achetée.

$$\forall a \in A, \forall m \in AM, \forall p \in P, \forall t \in T, q_{m,a,t,p} \leq x_{m,a,t} * comp_{a,p,t}^p * Z \quad (24)$$

Quand une machine m est achetée, elle ne peut pas être vendue.

$$\forall m \in AM, \forall a \in A, \forall t \in T, x_{m,a,t} \leq x_{m,a,t+1} \quad (25)$$

Une machine peut nécessiter des options obligatoires.

$$\forall a \in A, \forall t \in T, \forall m \in AM, \forall o \in O, x_{m,a,t} * opt_{a,o} \leq y_{m,a,o,t} \quad (26)$$

6.2. Les options

Une option o peut être achetée à une période t uniquement si $t \in M$.

$$\forall o \in O, \forall t \notin M, Y_{o,t} = Y_{o,t-1} \quad (27)$$

Une option o peut être achetée à une période t uniquement si elle est disponible à cette période. Z est une très grande valeur qui permet à $Y_{o,t}$ de prendre une valeur supérieure à 1 lorsque $dat_{o,t}$ est égal à 1.

$$\forall o \in O, \forall t \in T, Y_{o,t} \leq dat_{o,t} * Z \quad (28)$$

Une option o ne peut pas être utilisée par plus de max_o machines.

$$\forall o \in O, \forall t \in T, \sum_m^{AM} \sum_a^A y_{m,a,o,t} \leq Y_{o,t} * max_o \quad (29)$$

Une option o peut être affectée à une machine m de type a uniquement si elles sont compatibles et si la machine a été achetée.

$$\forall a \in A, \forall m \in AM, \forall o \in O, \forall t \in T, y_{m,a,o,t} \leq x_{m,a,t} * comp_{a,o,t}^o \quad (30)$$

Quand l'option o a été achetée, elle ne peut pas être vendue.

$$\forall o \in O, \forall t \in T, Y_{o,t} \leq Y_{o,t+1} \quad (31)$$

Lorsqu'une option est achetée elle doit être affectée à au moins une machine.

$$\forall o \in O, \forall t \in T, \sum_m^{AM} \sum_a^A y_{m,a,o,t} \geq Y_{o,t} \quad (32)$$

6.3. Les versions

Un versioning v peut être acheté à une période t uniquement s'il est disponible à cette période.

$$\forall a \in A, \forall m \in AM, \forall v \in V, \forall t \in T, z_{m,a,v,t} \leq x_{m,a,t} * dat_{v,t} \quad (33)$$

Quand un versioning v a été réalisé, il n'est pas possible de revenir en arrière.

$$\forall m \in AM, \forall v \in V, \forall t \in T, \sum_a^A z_{m,a,v,t} \leq \sum_a^A z_{m,a,v,t+1} \quad (34)$$

Un versioning v peut être réalisé sur une machine m de type a uniquement si elles sont compatibles et que la machine a été achetée.

$$\forall a \in A, \forall m \in AM, \forall v \in V, \forall t \in T, z_{m,a,v,t} \leq x_{m,a,t} * comp_{a,v}^v \quad (35)$$

Un versioning v ne peut être réalisé qu'une seule fois sur chaque machine m .

$$\forall m \in AM, \forall a \in A, \forall v \in V, \sum_t^T z_{m,a,v,t} \leq 1 \quad (36)$$

6.4. Les poudres

Une pièce ne peut être produite sur une machine que si la pièce a été affectée à cette machine.

$$\forall m \in AM, \forall t \in T, \forall p \in P, Z * pi_{m,a,t,p} \geq \sum_a^A q_{m,a,t,p} \quad (37)$$

Si un type de pièce est affecté à une machine, au moins une pièce de ce type doit être produite sur cette machine.

$$\forall m \in AM, \forall t \in T, \forall p \in P, pi_{m,a,t,p} \leq \sum_a^A q_{m,a,t,p} \quad (38)$$

6.5. Les opérateurs

Le nombre d'opérateur doit être un nombre entier, il est arrondi à l'entier supérieur.

$$\forall t \in T, nb_op_t < \sum_m^{AM} Be_{m,t} + 1 \quad (39)$$

$$\forall t \in T, nb_op_t \geq \sum_m^{AM} Be_{m,t} \quad (40)$$

6.6. Le budget

L'investissement total ne doit pas dépasser le budget total.

$$\sum_{t=1}^T IT_t \leq B \quad (41)$$

L'investissement à chaque période ne doit pas dépasser le budget disponible à chaque période.

$$\forall t \in C, IT_t \leq B_t \quad (42)$$

7. LINEARISATION

Le quotient d'une variable de décision $q_{m,a,t,p}$ et d'une variable liée $P_{m,t}$ présent dans le calcul du coût machine (13) de la fonction objectif, rend la fonction objectif non linéaire. De même, le produit présent dans la contrainte (Equation (22)) qui impose que la demande effectuée sur une machine m ne dépasse pas la capacité de cette machine rend la contrainte non linéaire. Plus précisément, la contrainte est concave.

Pour linéariser le problème, la productivité est discrétisée. Un intervalle est défini par un nombre i , il y a n intervalles. Les limites de chaque intervalle sont définies par $[P_{m,t}^i, P_{m,t}^{i+1}]$.

La fonction à discrétiser est $f(P_{m,t})$ (Equation (43)).

$$f(P_{m,t}) = \sum_a^A x_{m,a,t} * p_a + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * p_{o,a,o} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * p_{v,a,v} \quad (43)$$

Nous introduisons une nouvelle variable binaire $\delta_{m,t}^i$.

$$\delta_{m,t}^i = \begin{cases} 1 & \text{si } f(P_{m,t}) \text{ est compris dans l'intervalle } [P_{m,t}^i, P_{m,t}^{i+1}] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La productivité peut être dans un seul intervalle (Equation (44)).

$$\sum_{i=1}^{n-1} \delta_{m,t}^i = 1 \quad (44)$$

Les inégalités de l'équation (45) permettent de savoir dans quel intervalle se trouve la productivité.

$$\forall i = 0, \dots, n-1, \delta_{m,t}^i * P_{m,t}^i \leq f(P_{m,t}) \leq P_{m,t}^{i+1} + (1 - \delta_{m,t}^i) * (P_{m,t}^n - P_{m,t}^{i+1}) \quad (45)$$

Dans la contrainte de capacité, la productivité est remplacée par la moyenne de l'intervalle dans lequel se trouve la valeur de la productivité calculée. Si la productivité n'est pas dans l'intervalle considéré, la très grande valeur Z permet d'obtenir une grande valeur dans le membre de droite de l'inéquation qui ne sera pas prise en compte car elle sera supérieure à la valeur obtenue lorsque $\delta_{m,t}^i$ vaudra 1 (Equation (46)).

$$\forall i = 0, \dots, n-1,$$

$$\sum_p^P \sum_a^A q_{m,a,t,p} \leq T_{m,t} * \frac{(P_{m,t}^i + P_{m,t}^{i+1})}{2} + (1 - \delta_{m,t}^i) * Z \quad (46)$$

Avec la linéarisation, le coût machine est exprimé selon l'équation (47). L'objectif étant de minimiser le coût machine, il est borné par une valeur inférieure.

$$\frac{q_{m,a,t,p}}{P_{m,t}} * CO_{a,t} \geq \frac{q_{m,a,t,p}}{\frac{P_{m,t}^i + P_{m,t}^{i+1}}{2}} * CO_{a,t} + x_{m,a,t} * c_{fixe} + (1 - \delta_{m,t}^i) * J \quad (47)$$

La courbe est tracée pour un $T_{m,t} * P_{m,t}$ donné (Figure 57). La portion de la courbe entre les deux points de l'intervalle $[P_{m,t}^i, P_{m,t}^{i+1}]$ est considérée linéaire.

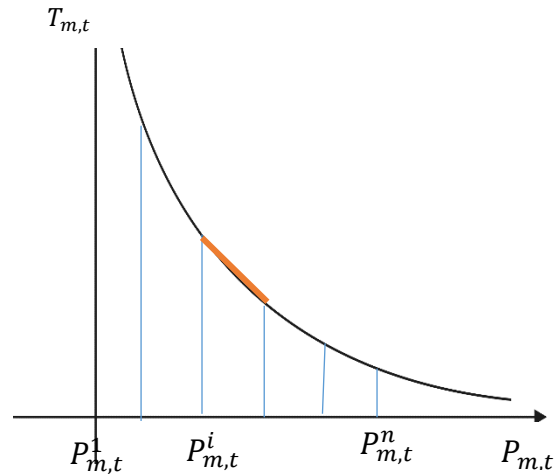


Figure 57 - Discrétisation de la productivité

8. APPROCHE PROPOSEE

Nous venons de formaliser mathématiquement notre problème par un programme mixte en nombres entiers. La littérature montre que ces problèmes sont généralement résolus à l'aide d'un algorithme de programmation linéaire basé sur la séparation et l'évaluation. Le solveur Gurobi, utilisé dans nos travaux, utilise cette méthode. Gurobi est couplé à l'environnement de développement python Spyder d'Anaconda.

Nous allons décrire l'algorithme utilisé par Gurobi (site de Gurobi : <https://www.gurobi.com/>).

8.1. Relaxation et arbre de recherche

Le programme n'est pas résoluble directement. Dans un premier temps, la contrainte d'intégrité est relaxée. Le programme continu qui en résulte peut être résolu. Si la solution trouvée satisfait les contraintes d'intégrité, ce qui est rare, elle correspond à une solution du problème initial. Si ce n'est pas le cas, une variable dont la valeur est fractionnelle alors qu'elle devrait être entière est choisie. Elle est bornée par les entiers inférieur et supérieur (ex : Si $x = 3.4$, les restrictions $x \leq 4$ et $x \geq 3$ sont imposées). Il en résulte deux sous-problèmes, chacun avec l'une des restrictions, et ainsi de suite avec l'ensemble des variables qui doivent être entières. Un arbre de recherche est obtenu : le problème initial est le nœud racine, les sous-problèmes sont les nœuds de l'arbre. Lorsque toutes les contraintes d'intégrité sont respectées par la solution d'un nœud, il s'agit d'une solution faisable du problème d'origine et le nœud devient une feuille de l'arbre, il n'est plus nécessaire de le ramifier. La meilleure des solutions des sous-problèmes est la solution optimale du problème initial.

A chaque instant, la meilleure solution trouvée est conservée, elle est appelée le titulaire. Dès qu'une meilleure solution est trouvée, le titulaire est mis à jour.

Il existe deux cas où un nœud n'est plus exploré : lorsqu'aucune solution n'existe pour le problème relaxé et lorsque la valeur objective du problème relaxé est moins bonne que la valeur objective du titulaire. Si la valeur objective du problème relaxé est moins bonne que celle du titulaire, celle du problème entier ne pourra pas être meilleure.

8.2. L'écart

Si le problème initial est un problème de maximisation, la valeur objective du titulaire est une limite inférieure valable pour la solution optimale du problème initial. Aucune solution entière inférieure à cette valeur ne sera acceptée.

A n'importe quel moment de la recherche, il y a une limite supérieure valide, appelée la meilleure limite. Elle est obtenue en prenant le maximum des valeurs objectives optimales de tous les nœuds courants.

La différence entre les limites inférieures et supérieures est appelée l'écart. Lorsque cet écart est nul, la solution trouvée est optimale.

8.3. Résultats

Sans indication contraire, l'optimisation s'arrête lorsque l'écart est égal à 0%, c'est-à-dire, lorsque la solution optimale a été trouvée. Il est possible d'arrêter l'optimisation soit en fixant un temps soit en fixant un seuil pour l'écart. Lorsque l'optimisation s'arrête, Gurobi affiche : le nombre de nœuds explorés, le nombre d'itérations de simplexe, le temps d'optimisation, Le nombre de solutions entières trouvées et les valeurs objectives associées, la valeur objective de la meilleure solution, la meilleure limite et l'écart.

Les valeurs des variables peuvent être affichées soit dans Spyder, soit dans un fichier texte, soit dans un fichier Excel. Nous récupérons l'ensemble des valeurs des variables de décision dans un fichier Excel.

CHAPITRE 7. CAS DETERMINISTE

Dans un premier temps, le problème mixte en nombres entiers est résolu dans un cas déterministe. Il est appliqué sur quatre scénarii différents (Antomarchi *et al.*, 2019).

1. DONNEES

L'étude est réalisée sur 12 ans. Les machines peuvent être achetées tous les 4 ans, les options tous les 2 ans et les versions tous les ans.

Le budget total est de 13M€. Le budget par période est de 3M€ sur les années où il est possible d'acheter des machines et de 0,1M€ pour les autres années.

Le coût opérateur est de 52000 € par an.

Un prix de vente pour chaque type de pièces à chaque période est défini.

1.1. Les pièces

5 types de pièces sont pris en compte, chaque type est défini par une catégorie de taille et une poudre. Les pièces sont fabriquées à partir de 3 poudres différentes (Tableau 21).

Pièce	Taille	Poudre
1	<200x200	1
2	<300x300	2
3	<300x300	1
4	<700x700	2
5	<400x400	3

Tableau 21 - Données : Types de pièces

1.2. Les machines

Il est possible d'acheter jusqu'à 10 machines de 5 types différents (Tableau 22).

	A	B	C	D	E
Fournisseur	1	1	2	2	3
Volume	250*250*280	400*400*425	350*350*350	700*700*700	700*700*700
Confiance	Eprouvée	Lancée	Eprouvée	Lancée	Lancée
Manutention	Manuelle	Automatique	Manuelle	Manuelle	Automatique
Nettoyage	Interne	Externe	Interne	Externe	Interne
Poudre : tamisage	Externe	Interne	Externe	Interne	Externe
Poudre : remplissage	Externe	Externe	Interne	Externe	Externe

Tableau 22 - Données : Types de machines

Pour chaque machine, pour chaque période, il est indiqué la disponibilité à l'achat, le prix d'achat et le coût horaire d'utilisation (Tableau 23).

Pour la machine A :												
t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Disponibilité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Prix (k€)	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	500	500
Coût d'utilisation (€/h)	60	60	60	60	60	50	50	50	50	50	50	50

Tableau 23 - Données : Machines

Pour chaque période, en fonction de la poudre et de la taille des pièces, une matrice indique la compatibilité entre les pièces et les machines (Tableau 24).

Pièces / machines	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	0
3	0	1	1	1	1
4	0	0	0	1	0
5	0	1	0	0	1

Tableau 24 - Données : Compatibilité pièces/machines

1.3. Les options

15 options sont prises en compte avec un nombre maximum de machines associables (Tableau 25).

Options	Type	Maximum d'options associées
1	Manutention manuelle	5
2	Manutention manuelle	5
3	Manutention auto	8
4	Manutention auto	5
5	Aspi voie humide	5
6	Aspi ATEX	5
7	Aspi interté	5
8	Machine nettoyage	3
9	Manutention adaptée	5
10	Tamis	5
11	Boîte à gants	8
12	Module poudre	1
13	Centrale poudre	5
14	Nouveau module 1	6
15	Nouveau module 2	7

Tableau 25 - Données : Options prises en compte

Chaque option peut améliorer ou dégrader la productivité, le temps disponible et le besoin opérateur de chaque type de machine. Dans ce cas, les options 2, 6, 7, 8, 10, 12, 13 et 15 augmentent le temps disponible sur certains types de machines. Les options 14 et 15 diminuent le besoin opérateur des machines de types A et B. L'option 14 augmente la productivité des machines de type A.

Pour chaque option, pour chaque période, il est indiqué si l'option est disponible, son prix d'achat et son coût horaire d'utilisation (Tableau 26).

Pour l'option 1 :												
t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Disponibilité	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Prix (k€)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Coût d'utilisation (€/h)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tableau 26 - Données : Options

1.4. Les versionings

Il est possible de réaliser un versioning sur les types de machines A, B et C (Tableau 27).

Versioning/Machine	1	2	3	4	5
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0

Tableau 27 - Données : Versionings et machines

Pour chaque versioning, pour chaque période, il est indiqué si le versioning est disponible et le prix d'achat (Tableau 28).

Pour le versioning 1 :												
t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Disponibilité	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Prix (k€)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tableau 28 - Données : Versionings

2. SCENARI

Quatre scenarii sont définis. Les deux premiers scenarii diffèrent sur la demande (Figure 58) :

- Scénario 1 : la demande augmente rapidement et l'évolution des machines est stable ;
- Scénario 2 : la demande augmente lentement et l'évolution des machines est stable.

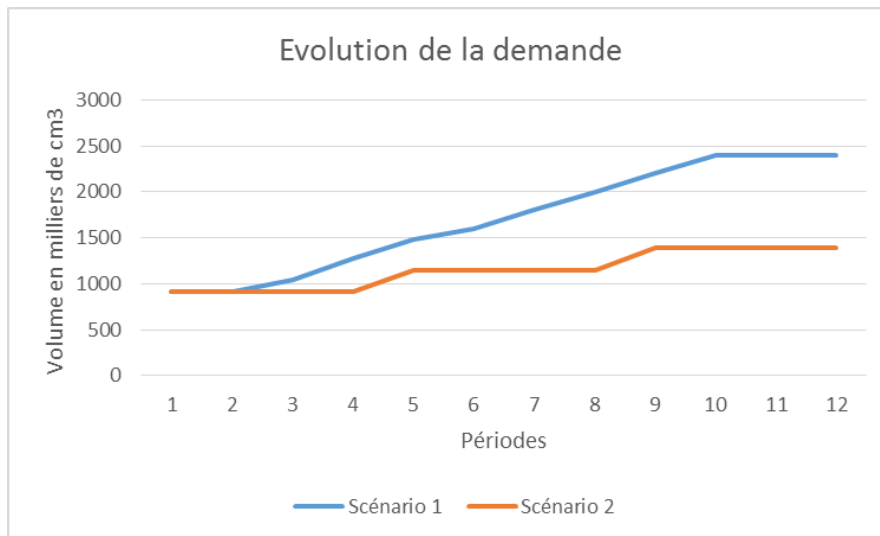


Figure 58 - Scenarii : Evolution de la demande

Les deux autres scenarii diffèrent sur l'évolution de la capacité des machines :

- Scénario 3 : la demande augmente moins lentement et l'évolution des machines est stable ;
- Scénario 4 : la demande augmente moins lentement et les machines évoluent rapidement au niveau de la productivité et du temps disponible.

La Figure 59 illustre la différence entre les scenarii 3 et 4. Dans le scénario 4, les machines de type D et E ont une capacité plus importante.

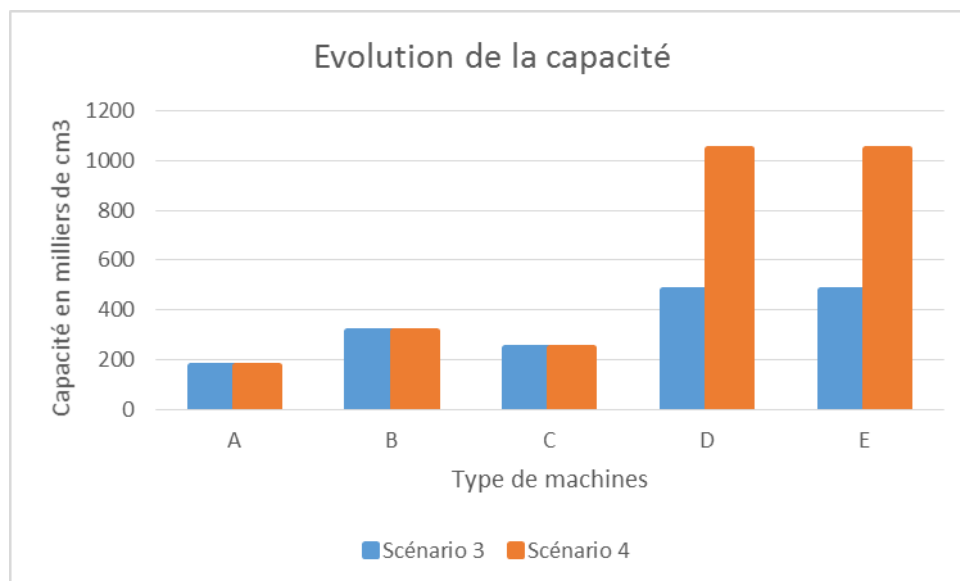


Figure 59 - Scenarii : Evolution de la capacité

3. ANALYSE DE L'INTERVALLE DE DISCRETISATION DE LA PRODUCTIVITE

Nous allons étudier l'impact de l'intervalle de discrétisation de la productivité sur la précision et sur le temps de calcul. Les calculs sont effectués à partir des données d'entrée du scénario 2. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 29.

Intervalle	6	7	8	9	10	15	20	25
Valeurs du modèle avec linéarisation								
Bénéfice	308 037 054,00 €	311 280 983,00 €	310 079 496,00 €	305 696 998,00 €	313 528 407,00 €	311 166 376,00 €	306 598 659,00 €	321 915 884,00 €
Investissement	5 542 000,00 €	5 522 000,00 €	5 522 000,00 €	5 542 000,00 €	5 522 000,00 €	5 522 000,00 €	5 522 000,00 €	5 522 000,00 €
Coût opérateur	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €
Coûts machine	10 298 946,00 €	10 188 017,00 €	10 178 404,00 €	10 566 002,00 €	9 835 593,00 €	10 042 624,00 €	9 855 341,00 €	9 988 116,00 €
Demande insatisfaite	10 499 000,00 €	8 942 500,00 €	9 548 050,00 €	11 535 500,00 €	7 995 000,00 €	9 072 500,00 €	11 450 000,00 €	3 725 000,00 €
Profit	335 001 000,00 €	336 557 500,00 €	335 951 950,00 €	333 964 500,00 €	337 505 000,00 €	336 427 500,00 €	334 050 000,00 €	341 775 000,00 €
Valeurs calculées								
Bénéfice	310 260 238,23 €	308 639 727,62 €	314 504 755,56 €	312 409 349,65 €	302 406 323,75 €	314 052 200,00 €	303 053 910,00 €	302 580 247,62 €
Coûts machine	7473722	5813252,381	1 093 244,44 €	5 324 650,35 €	10 297 726,25 €	896 800,00 €	11 045 050,00 €	7 063 752,38 €
Demande insatisfaite	10800020	12450510	11 878 000,00 €	10 800 000,00 €	13 324 975,00 €	12 202 500,00 €	12 627 520,00 €	14 855 000,00 €
Profit	334699980	333049490	333 622 000,00 €	334 700 000,00 €	332 175 025,00 €	333 297 500,00 €	332 872 480,00 €	330 645 000,00 €
Ecart	1%	-1%	1%	2%	-4%	1%	-1%	-6%
Temps (s)	245		1806	11661	37487	182		18480
Achats								
Achats t=1	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 10 11 12 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 8 10 11 12 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 10 11 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 10 11 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 6 10 11 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 8 10 11 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 10 11 12	M : 3 1 3 O : 1 3 4 5 10 11 12 12
Achats t=2	O : 6 13	O : 2 6 7 13	O : 2		O9	O : 6 7 9	O : 6 7 9 12 13	O : 7 9
Achats t=3	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1
Achats t=4	M : 2 4 O : 2 7 8 9	M : 2 4 O : 9	M : 2 4 O : 6 7 8 9 12 13	M : 2 4 O : 2 6 7 8 9 12 13	M : 2 4 O : 2 7 8 12 13	M : 2 4 O : 2 12 13	M : 2 4 O : 2 8	M : 2 4 O : 2 6 8
Achats t=6	O14			O14				
Achats t=7	V2	V2	V2	V2	V2	V2	V2	V2
Achats t=10	O15	O15	O15	O15	O15	O15	O15	O15

Tableau 29 - Analyse de l'intervalle de discrétisation

Pour chaque intervalle testé, le bénéfice réel, sans linéarisation, est calculé. L'écart entre le bénéfice obtenu par le modèle et le bénéfice réel varie entre -6% et 1%. Les machines, les options et les versions achetées sont les mêmes sauf pour l'option 14 pour les intervalles de 6 et 9. La période d'achat varie selon les scénarii.

Au vu de l'écart entre le bénéfice obtenu par le modèle et le bénéfice réel et du temps de calcul, les calculs suivants sont effectués avec un intervalle de 6.

4. RESULTATS

Pour ce cas d'application, les calculs sont arrêtés quand l'écart entre la borne inférieure et la borne supérieure calculée par Gurobi est égal à 1%. Le Tableau 30 présente l'ensemble des coûts calculés dans la fonction objectif.

Le Tableau 31 synthétise les machines, les options et les versions achetées à chaque période dans chaque scénario.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Chiffre d'affaire (€)	494 339 000,00 €	332 737 000,00 €	343 437 000,00 €	343 437 000,00 €
Investissement (€)	6 380 000,00 €	5 080 000,00 €	5 060 000,00 €	3 600 000,00 €
Coût machine (€)	25 783 706,00 €	19 151 651,00 €	19 148 835,00 €	13 724 694,00 €
Coût opérateur (€)	728 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €
Demande insatisfaite (€)	14 461 000,00 €	12 763 000,00 €	12 763 000,00 €	12 763 000,00 €
Bénéfice (€)	446 986 294,00 €	295 118 349,00 €	305 841 165,00 €	312 725 306,00 €

Tableau 30 - Résultats des 4 scenarii

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Investissement (€)	6 380 000,00 €	5 080 000,00 €	5 060 000,00 €	3 600 000,00 €
t=1	1 machine B 1 machine C 10 options	1 machine B 1 machine C 10 options	1 machine B 1 machine C 10 options	1 machine B 1 machine C 10 options
t=4	2 machines D 3 options	1 machine D 3 options	1 machine D 3 options	1 machine D 3 options
t=6				1 option
t=8	1 machine D	1 machine D	1 machine D	
t=10	1 option	1 option		1 option

Tableau 31 - Investissements dans les 4 scenarii

4.1. Analyse du comportement du modèle

Nous allons commencer par analyser les résultats de chaque scénario.

Pour le scénario 1. L'analyse de la capacité par rapport à la charge montre que les résultats sont cohérents. Il y a bien une demande insatisfaite sur les trois premières périodes. Des machines, des options ou des versions sont achetées lorsque la charge augmente (Figure 60).

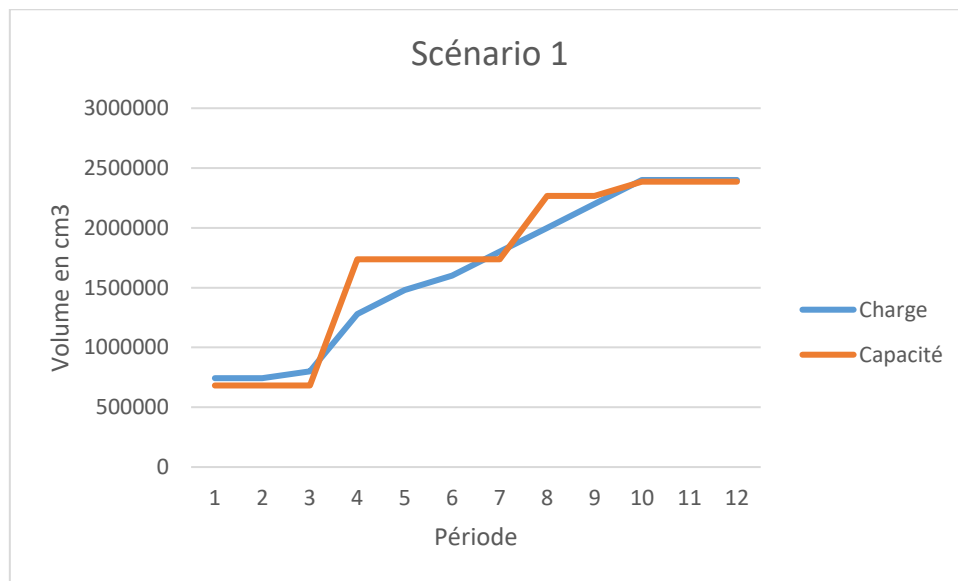


Figure 60 - Scénario 1 : Charge et capacité

Le même graphique est tracé pour le scénario 2 (Figure 61) et le scénario 4 (Figure 62). Le graphique du scénario 3 est très proche de celui du scénario 2.

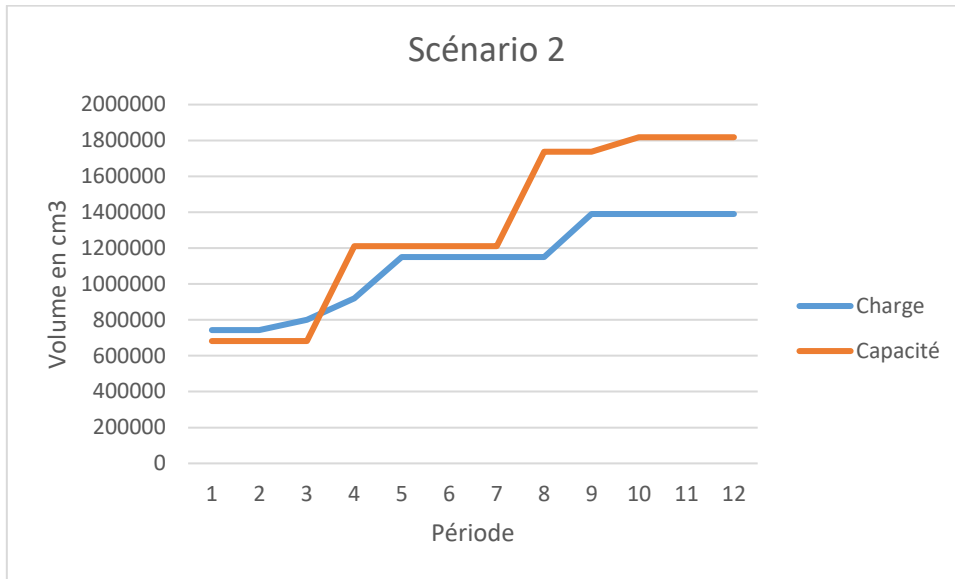


Figure 61 - Scénario 2 : Charge et capacité

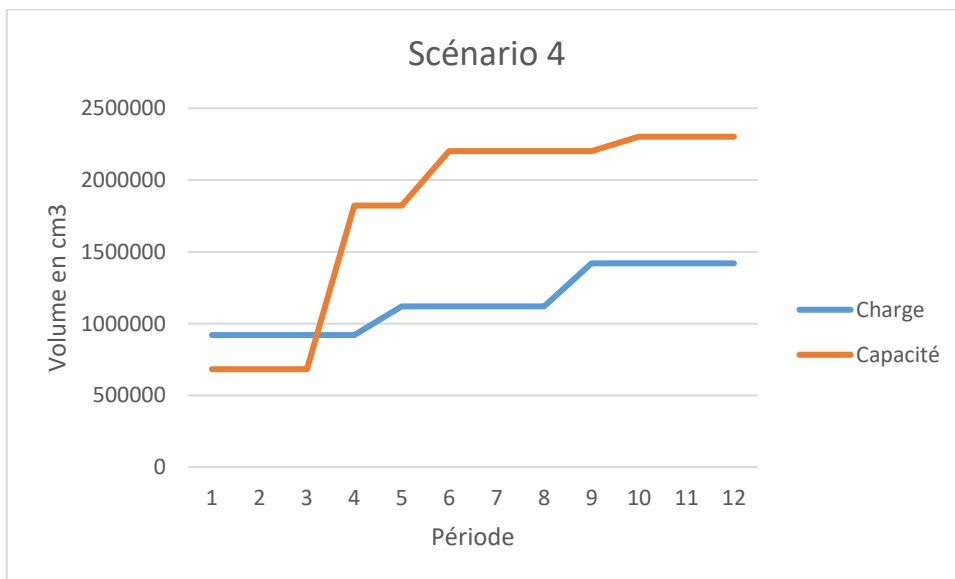


Figure 62 - Scénario 4 : Charge et capacité

L'analyse charge/capacité des scénarii 2, 3 et 4 montre le même phénomène : la capacité devient bien plus importante que la charge. En effet dans les trois cas, la capacité augmente beaucoup plus que la charge. Ce phénomène est le plus marqué pour le scénario 4. Une analyse détaillée est réalisée ci-après. L'analyse pour les scénarii 2 et 3 est analogue à l'analyse pour le scénario 4.

Afin de compléter l'analyse, les différents coûts pris en compte dans la fonction objectif sont représentés à partir de t=4, les trois premières périodes n'étant pas concernées (Figure 63). Le chiffre d'affaire et le bénéfice sont également représentés (Figure 64).

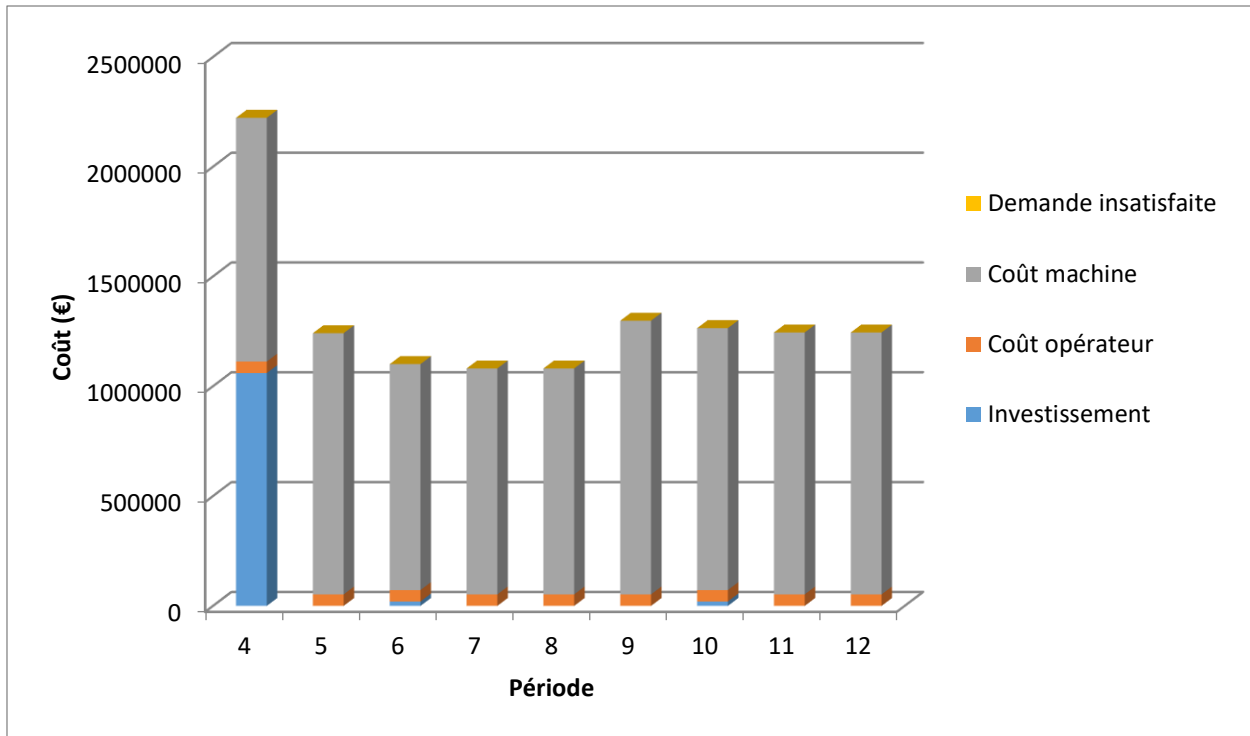


Figure 63 - Scénario 4 : Coûts

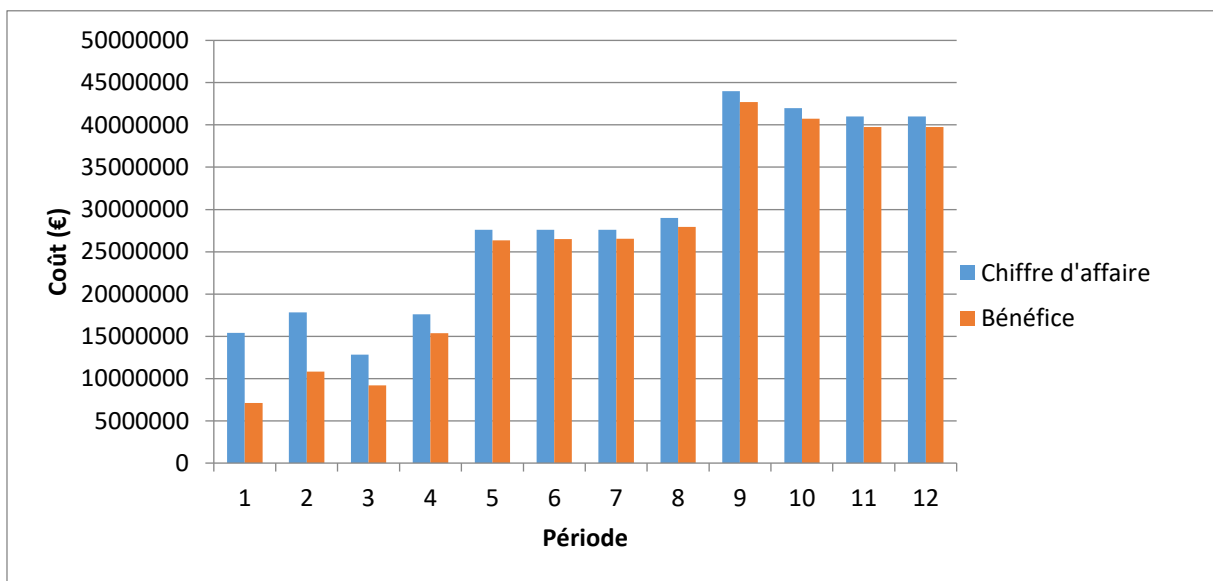


Figure 64 - Scénario 4 : Chiffre d'affaire et bénéfice

A $t=6$, une option est achetée ce qui augmente la capacité de la machine D. Pour les périodes 5, 6 et 7, la charge est la même. Cette augmentation de la capacité diminue le temps nécessaire à fabriquer un volume équivalent ce qui diminue le coût machine. Le coût machine ainsi économisé (160 609 €) est plus important que le coût lié à l'investissement (20 000 €).

4.2. Analyse des résultats

Quand la demande augmente rapidement, l'investissement est important : une machine plus productive et une machine supplémentaire sont achetées. Quand la demande augmente lentement, l'investissement est plus limité (25% de moins) (Figure 65). Ces résultats montrent l'impact que les incertitudes sur la demande peuvent avoir sur l'investissement et le bénéfice.

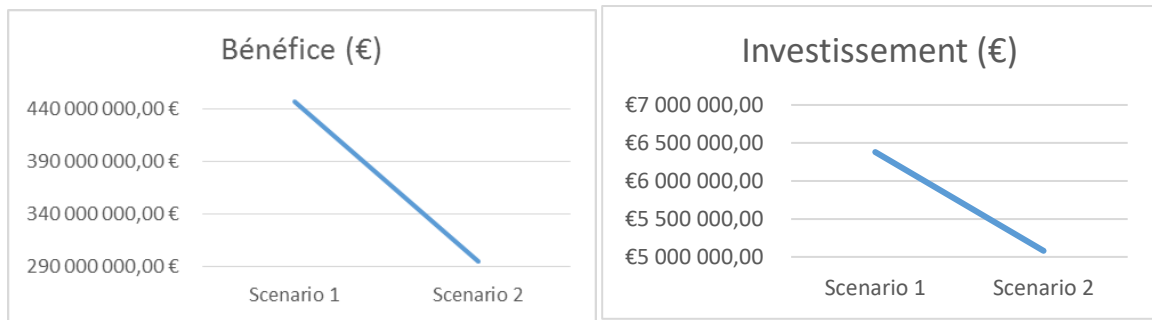


Figure 65 - Bénéfice et investissement pour les scénarii 1 et 2

L'évolution des machines a un impact sur le type de machines acheté. Les machines E sont plus chères mais elles ont une productivité plus importante dans le scénario 4. Les deux différences se compensent. Le temps pour produire le même volume diminue, donc le coût machine diminue (Figure 66). Ces résultats montrent l'impact que les incertitudes sur l'évolution des machines peuvent avoir sur l'investissement.

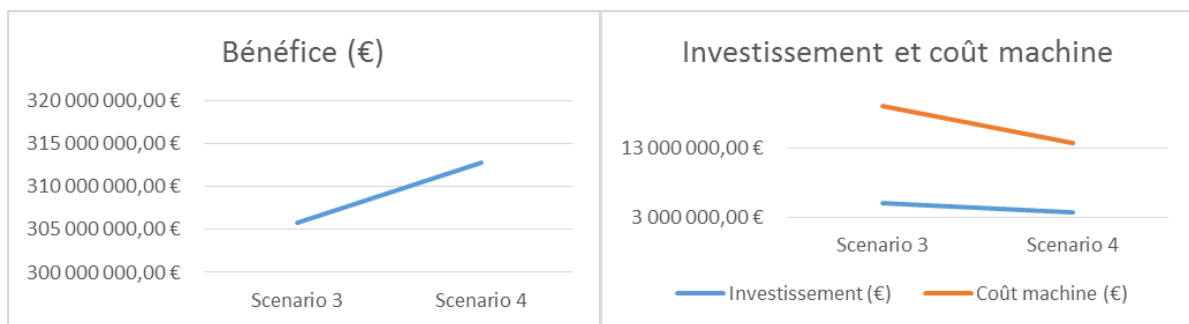


Figure 66 - Bénéfice, investissement et coût machine pour les scénarii 3 et 4

5. CONCLUSION

L'analyse des résultats du modèle sur les 4 scénarii montre que le comportement du modèle est cohérent. L'application du modèle sur les quatre scénarii avec des évolutions différentes sur la demande et sur la capacité des machines démontre que ces évolutions ont un impact significatif sur la solution optimale. Il est donc important de prendre en compte ces évolutions incertaines directement dans le processus d'optimisation.

CHAPITRE 8. INTEGRATION DES INCERTITUDES

L'impact de l'évolution de la demande et de la capacité des machines vient d'être démontré à partir du modèle déterministe. Nous allons maintenant intégrer ces incertitudes au modèle.

1. INCERTITUDE LIEE A LA DEMANDE

L'incertitude liée à la demande est intégrée à l'aide des scenarii. Plusieurs scenarii s de demande sont définis. Cette intégration modifie la formalisation mathématique.

Au niveau des données d'entrée seule la demande change :

$d_{p,t,s}$ Demande de pièce p sur la période t en cm^3 dans le scénario s

1.1. Variables de décision et variables liées

Les variables de décision qui dépendent des scenarii sont celles qui concernent l'affectation des pièces aux machines et le volume affecté :

$q_{m,a,t,p,s}$ Quantité de pièce p produite sur la machine m de type a sur la période t dans le scénario s

$pi_{m,a,t,p,s}$ = 1 si la pièce p est affectée à la machine m de type a sur la période t dans le scénario s

Deux variables liées dépendent de ces variables de décision donc elles sont également modifiées. Soit $w_{po,m,t,s}$ une variable binaire qui est égale à 1 si la poudre po est affectée à la machine m à la période t dans le scénario s et à 0 sinon. Sa valeur dépend de la variable de décision $pi_{m,a,t,p,s}$ (Equation (48)(7)).

$$w_{po,m,a,t,s} = \sum_p^P \sum_k^{PO} pou_{p,k} * pi_{m,a,t,p,s} \quad (48)$$

Soit $T_{m,t,s}$ le temps disponible de la machine m sur la période t dans le scénario s en h . Il correspond à la somme du temps disponible de la machine avec le gain lié aux options affectées et aux versionings réalisés. Il est déduit de cette somme un temps disponible en fonction du nombre de changements de poudre (Equation (49)(8)).

$$T_{m,t,s} = \sum_a^A x_{m,a,t} * t_a + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * to_{a,o} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * tv_{a,v} - \gamma * \sum_p^P w_{k,m,t,s} \quad (49)$$

Les autres variables de décision et les autres variables liées sont communes à tous les scenarii.

1.2. Fonction objectif

Un bénéfice par scénario s est calculé (Equation (50)). L'investissement total IT (Equation (15)) et le coût opérateur C_{op} (Equation (16)) sont indépendants des scenarii alors que les ventes (Equation (51)), le coût machine (Equation (52)) et le coût de la demande insatisfaite (Equation (53)) dépendent du scénario.

$$Bénéfice_s = Vente_s - (C_{machine,s} + IT + C_{op} + C_{dins,s}) \quad (50)$$

$$Vente_s = \sum_p^P \sum_t^T pv_{p,t} * \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p,s} \quad (51)$$

$$C_{machine,s} = \sum_m^{AM} \sum_t^T \sum_a^A \frac{\sum_p^P q_{m,a,t,p,s}}{P_{m,t}} * co_{a,t} + x_{m,a,t} * c_{fixe} \quad (52)$$

$$C_{dins,s} = \sum_p^P \sum_t^T \left(d_{p,t,s} - \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p,s} \right) * pv_{p,t} \quad (53)$$

L'objectif est de trouver une bonne solution quel que soit le scénario qui se produit. Il faut trouver un compromis entre la solution la plus pessimiste qui est aussi la moins risquée et la solution la plus optimiste qui est la plus risquée. C'est pourquoi, le critère de décision sous incertitude qui est utilisé est le critère d'Hurwicz.

Soit α le coefficient de pessimisme d'Hurwicz et S l'ensemble des scenarii. La fonction objectif correspond à l'équation (54).

$$\text{Maximiser } \alpha * \min_{s \in S} \text{Bénéfice}_s + (1 - \alpha) * \max_{s \in S} \text{Bénéfice}_s \quad (54)$$

Afin de l'intégrer à la programmation mixte en nombres entiers, il faut linéariser la fonction objectif.

La fonction objectif peut s'écrire :

$$\text{Maximiser } \alpha * h + (1 - \alpha) * H \quad (55)$$

Avec :

$$h = \min_{s \in S} \text{Bénéfice}_s \quad (56)$$

$$H = \max_{s \in S} \text{Bénéfice}_s \quad (57)$$

Il faut trouver le plus petit bénéfice pour obtenir h . La très grande valeur de Z permet d'obtenir des grandes valeurs qui ne seront pas prise en compte car elles seront supérieures à la valeur obtenue lorsque δ_s vaudra 1 (Equation (58)). L'objectif étant de maximiser H , il est borné par une valeur supérieure (Equation (59)). δ_s ne peut être égal à 1 que pour un scénario, celui qui a le plus petit bénéfice (Equation (60)).

$$\forall s \in S, h \leq \text{Bénéfice}_s + (1 - \delta_s) * Z \quad (58)$$

$$\forall s \in S, H \leq \text{Bénéfice}_s \quad (59)$$

$$\sum_{s \in S} \delta_s = 1, \delta_s \in \{0,1\} \quad (60)$$

1.3. Contraintes

Cinq contraintes dépendantes de la demande et des variables liées évoluent.

La demande effectuée sur une machine m ne doit pas dépasser la capacité de cette machine (Equation (61)).

$$\forall s \in S, \forall m \in AM, \forall a \in A, \forall t \in T, \sum_p^P q_{m,a,t,p,s} \leq T_{m,t,s} * P_{m,t} \quad (61)$$

La quantité de pièce p produite ne doit pas dépasser la demande (Equation (62)).

$$\forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T, \sum_m^{AM} \sum_a^A q_{m,a,t,p,s} \leq d_{p,t,s} \quad (62)$$

La pièce p peut être réalisée sur une machine m de type a uniquement si elles sont compatibles et si la machine a été achetée (Equation (63)).

$$\forall s \in S, \forall a \in A, \forall m \in AM, \forall p \in P, \forall t \in T, q_{m,a,t,p,s} \leq x_{m,a,t} * \text{comp}_{a,p,t}^p * Z \quad (63)$$

Une pièce ne peut être produite sur une machine que si la pièce a été affectée à cette machine (Equation (64)).

$$\forall s \in S, \forall m \in AM, \forall t \in T, \forall p \in P, Z * p_{i_{m,t,p,s}} \geq \sum_a^A q_{m,a,t,p,s} \quad (64)$$

Si un type de pièce est affecté à une machine, au moins une pièce de ce type doit être produite sur cette machine (Equation (65)).

$$\forall s \in S, \forall m \in AM, \forall t \in T, \forall p \in P, pi_{m,t,p,s} \leq \sum_a^A q_{m,a,t,p,s} \quad (65)$$

Aux incertitudes sur la demande, s'ajoute l'incertitude liée aux améliorations technologiques.

2. INCERTITUDE LIEE AUX AMELIORATIONS TECHNOLOGIQUES

Les machines de fabrication additive sont de plus en plus efficaces et fiables. Mais nous ne pouvons pas, aujourd'hui, prédire leur évolution technologique. Les fabricants de machines annoncent une amélioration des temps de cycle sur les futures machines, l'incertitude porte sur la valeur de cette augmentation.

Au niveau des données d'entrée seul le temps disponible change :

$t_{a,s}$ Temps disponible pour les machines de type a dans le scénario s

Soit $T_{m,t,s}$ le temps disponible de la machine m sur la période t dans le scénario s en h . Il correspond à la somme du temps disponible de la machine avec le gain lié aux options affectées et aux versionings réalisés. Il est déduit de cette somme un temps disponible en fonction du nombre de changements de poudre (Equation (66)).

$$T_{m,t,s} = \sum_a^A x_{m,a,t} * t_{a,s} + \sum_a^A \sum_o^O y_{m,a,o,t} * t_{o,a,o} + \sum_a^A \sum_v^V z_{m,a,v,t} * t_{v,a,v} - \gamma * \sum_p^P w_{k,m,t,s} \quad (66)$$

Le troisième type d'incertitudes pris en compte concerne l'évolution du coût des machines.

3. INCERTITUDE LIEE A L'EVOLUTION DU COUT DES MACHINES

Avec le développement de la fabrication additive, les fabricants de machine annoncent une baisse des prix des machines de fabrication additive, l'incertitude porte sur la valeur de cette diminution.

Au niveau des données d'entrée seul l'investissement lié aux machines change :

$I_{a,t,s}$ Investissement pour une machine de type a à une période t dans un scénario s

Ce changement a un impact sur la formule de l'investissement (Equations (67) et (68)) dans le calcul de la fonction objectif (Equation (69)).

$$IT_s = \sum_t^T IT_t \quad (67)$$

$$IT_t = \sum_a^A \left(I_{a,t,s} * \sum_m^{AM} (x_{m,a,t} - x_{m,a,t-1}) \right) + \sum_v^V I_{v,t} * \sum_m^{AM} \sum_a^A (z_{m,a,v,t} - z_{m,a,v,t-1}) + \sum_o^O (I_{o,t} * (Y_{o,t} - Y_{o,t-1})) \quad (68)$$

$$Bénéfice_s = Vente_s - (C_{machine,s} + IT_s + C_{op} + C_{dins,s}) \quad (69)$$

4. DONNEES

Trois scénarii sont définis. Le premier scénario est le scénario le plus optimiste, les promesses sont tenues et les améliorations annoncées ont bien lieu. La demande augmente rapidement, les temps de cycle s'améliorent et les coûts des machines diminuent. Le deuxième scénario est le scénario le plus pessimiste. La demande augmente lentement, les temps de cycles restent les mêmes et les coûts des machines augmentent. Le troisième scénario est un scénario plus neutre. La demande augmente moyennement, les temps de cycle s'améliorent mais pas autant que prévu et les coûts des machines restent les mêmes.

La Figure 67 représente l'évolution de la demande au cours du temps dans les trois scénarii.

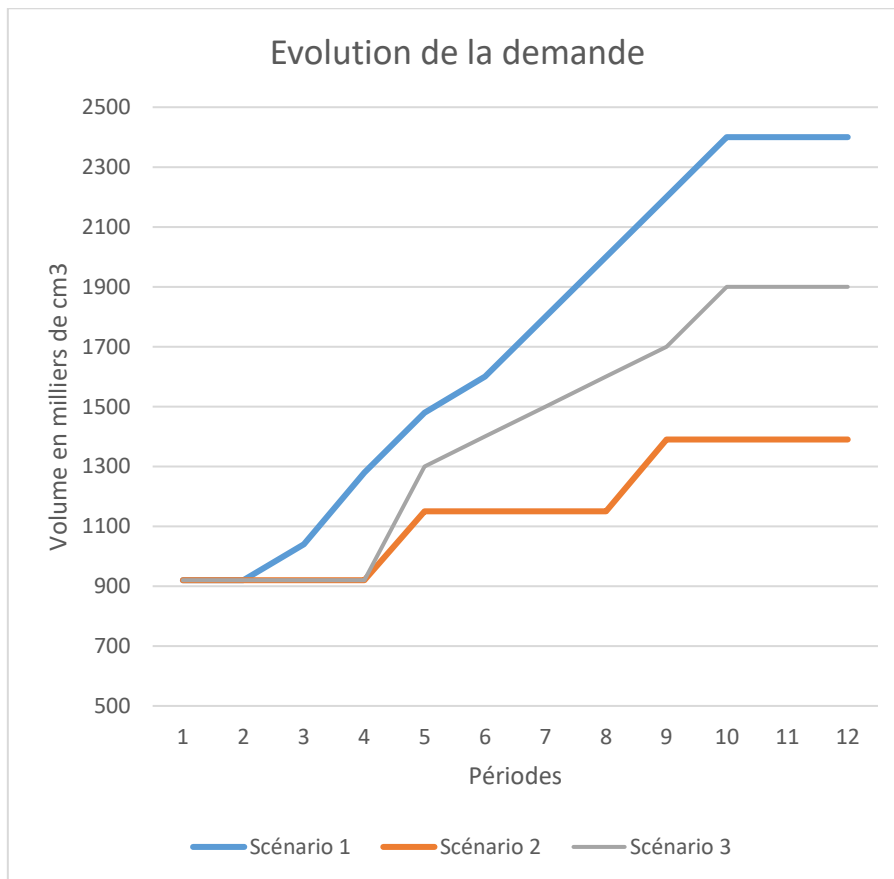


Figure 67 - Evolution de la demande

Le Tableau 32 correspond au temps de cycle de chaque type de machine dans chaque scénario.

Machine / Scénario	1	2	3
1	5000	5000	5000
2	4500	4500	4500
3	5000	5000	5000
4	7000	5000	6000
5	7000	5000	6000

Tableau 32 - Temps de cycle

Dans le scénario 1, les prix des machines baissent, leur évolution est représentée par la Figure 68.

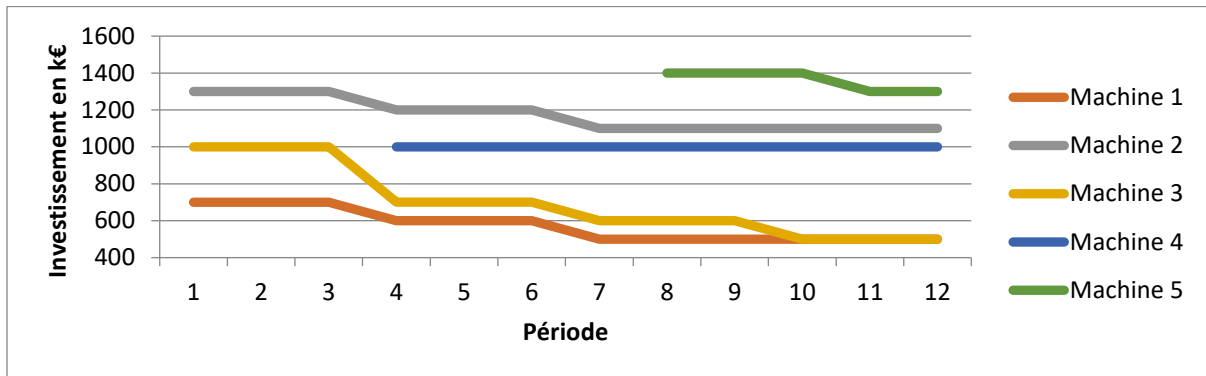


Figure 68 - Evolution du coût des machines : Scénario 1

Dans les scénarii 2 et 3, les prix des machines n'évoluent pas. Les machines 4 et 5 sont moins chères dans le scénario 3 que dans le scénario 2 (Tableau 33).

Machine / Scénario	2	3
1	700	700
2	1300	1300
3	1000	1000
4	1200	1000
5	1600	1400

Tableau 33 - Scénarii 2 et 3 : Prix des machines en k€

5. RESULTATS

Le modèle intégrant les incertitudes est appliqué avec les trois scénarii présentés. Le calcul est arrêté avec un écart de 9.8 %. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 34.

Scénario	1	2	3
Chiffre d'affaire	496 618 425,00 €	334 518 425,00 €	397 513 490,00 €
Investissement	3 612 000,00 €	3 812 000,00 €	3 612 000,00 €
Coût opérateur	624 000,00 €	624 000,00 €	624 000,00 €
Coût machine	20 432 089,00 €	18 053 813,00 €	70 443 943,00 €
Demande insatisfaite	12 181 575,00 €	10 981 575,00 €	21 786 510,00 €
Bénéfice	459 768 761,00 €	301 047 037,00 €	301 047 037,00 €

Tableau 34 - Résultats du modèle intégrant les incertitudes

Pour les scénarii 2 et 3, la valeur du profit est la même car le modèle ne considère que les valeurs extrêmes nécessaires au calcul de la fonction objectif avec les bénéfices minimal et maximal.

Dans le cas du premier scénario, si les promesses sont tenues et les améliorations annoncées ont bien lieu le bénéfice attendu est de 459 768 761 €. Dans le cas du second scénario, le plus pessimiste, le bénéfice attendu est de 301 047 037 €. Lors de l'application du critère d'Hurwicz avec un facteur de pessimisme égale à 0,5, la valeur de la fonction objectif est de 380 407 899€.

Les investissements réalisés sont synthétisés dans le Tableau 35.

Période	Investissements
t = 1	1 machine B 1 machine C 10 options
t = 4	1 machine D 3 options
t = 6	1 option
t = 10	1 option

Tableau 35 - Investissements réalisés

Au vu des résultats obtenus dans le chapitre précédent avec le modèle déterministe appliqué indépendamment aux 4 scénarii, le scénario d'investissement proposé par le modèle qui prend en compte simultanément les 3 scénarii est cohérent.

6. CONCLUSION

L'analyse des résultats obtenus par l'application du modèle aux trois scénarii permettant d'intégrer les incertitudes montre que le modèle a un comportement cohérent.

Nous obtenons donc un outil d'aide à la décision pour la définition d'un scénario d'investissement optimal à court terme et à long terme et qui prend en compte des données incertaines.

CHAPITRE 9. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL

Nous allons maintenant appliquer le modèle déterministe à un cas industriel.

1. CAS INDUSTRIEL

L'étude est réalisée sur 23 ans : de 2018 à 2040. Les machines peuvent être achetées tous les 4 ans, les options tous les 2 ans et les versions tous les ans.

Le budget n'est pas une contrainte.

12 types de pièces sont pris en compte. Toutes les pièces sont fabriquées à partir de la même poudre et elles sont réparties selon 3 catégories de taille : <100mm, <250mm et <400mm.

Le coût opérateur est de 60000 € par an.

Le prix de vente pour chaque type de pièces à chaque période est de 7 €/cm³.

La demande par période pour chaque type de pièces est exprimée en cm³ (Figure 69). Le volume de chaque type de pièces évolue différemment. Certaines pièces sont fabriquées dès le début : leur volume augmente puis diminue parfois jusqu'à devenir nul. D'autres pièces commencent à être fabriquées plus tard puis leur volume augmente.

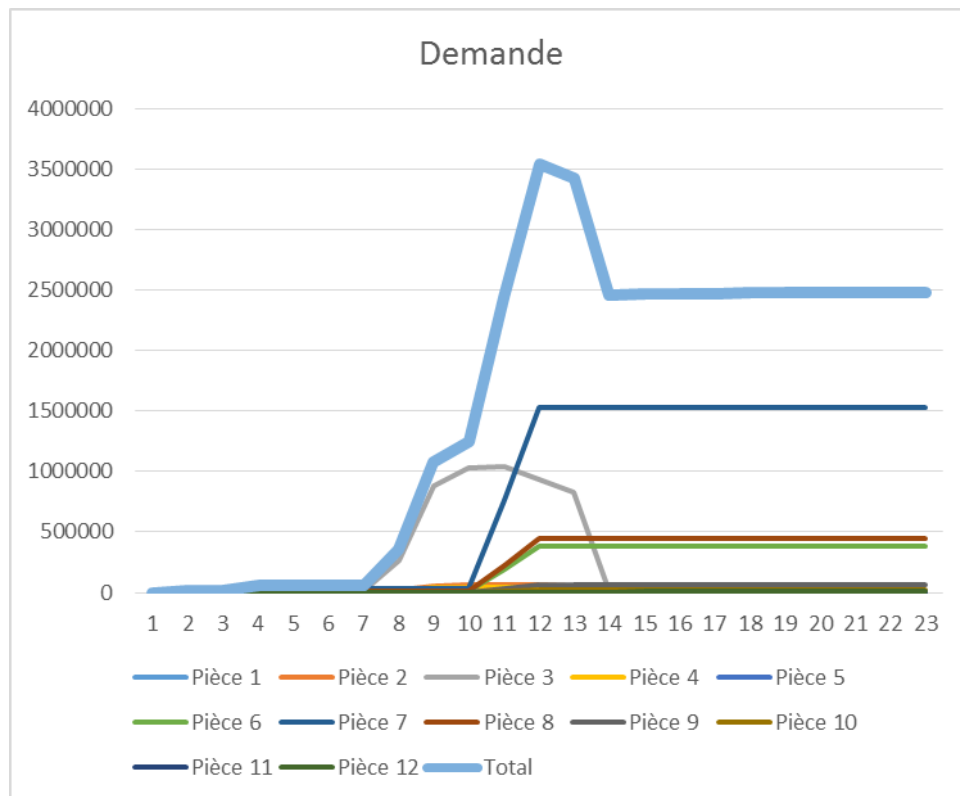


Figure 69 - Cas industriel : Demande

Il est possible d'acheter jusqu'à 20 machines de 4 types différents (Tableau 36)

	A	B	C	D
Fournisseur	1	1	2	2
Volume	250*250*280	400*400*425	350*350*350	700*700*700
Confiance	Eprouvée	Lancée	Eprouvée	Lancée
Manutention	Manuelle	Automatique	Manuelle	Manuelle
Nettoyage	Interne	Externe	Interne	Externe
Poudre : tamisage	Externe	Interne	Externe	Interne
Poudre : remplissage	Externe	Externe	Interne	Externe

Tableau 36 - Cas industriel : Types de machines

Chaque type de machine est caractérisé par : une productivité, un temps disponible et un besoin opérateur (Tableau 37).

Machine	Productivité cm^3/h	Temps disponible (h)	Besoin opérateur (h/équipe)
1	35	4800	1
2	70	4800	2
3	50	4800	1
4	80	4800	2
5	80	4800	1

Tableau 37 - Cas industriels : Machines

2. ADAPTATION DU MODELE DETERMINISTE

Dans certains secteurs, à chaque fois qu'une pièce est affectée à une nouvelle machine, il faut réaliser la qualification de la machine. Cette qualification a un coût que nous allons prendre en compte (Equation (70)).

$$\forall t \in T \setminus \{0\}, C_{qualif} = \sum_m^M \sum_a^A \sum_p^P c_{qualif_{m,p}} * (p_{i_{m,a,t,p}} - p_{i_{m,a,t-1,p}}) \quad (70)$$

$$\text{Pour } t = 0, C_{qualif} = \sum_m^M \sum_a^A \sum_p^P c_{qualif_{m,p}} * p_{i_{m,a,t,p}}$$

Ce coût est intégré à la fonction objectif (Equation (71)).

$$\text{Bénéfice} = \text{Vente} - (C_{machine} + C_{qualif} + IT + C_{op} + C_{dins}) \quad (71)$$

3. RESULTATS

Le modèle est arrêté lorsque l'écart est de 1,33%. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 38.

Coût	Résultat
Chiffre d'affaire	218 686 461,00 €
Investissement	12 140 000,00 €
Coût opérateur	720 000,00 €
Coût machine	96 221 372,00 €
Demande insatisfaite	40 598 992,00 €
Qualification	800 000,00 €
Bénéfice	68 206 097,00 €

Tableau 38 - Résultats du cas industriel

Le scénario d'investissement obtenu est décrit dans le Tableau 39.

Période	Investissements
t = 4	1 machine B 4 options
t = 8	5 machines B 8 options
t = 12	1 option

Tableau 39 - Cas industriel : Investissements

Nous allons maintenant analyser ces résultats. Le graphique charge/capacité est tracé (Figure 70).

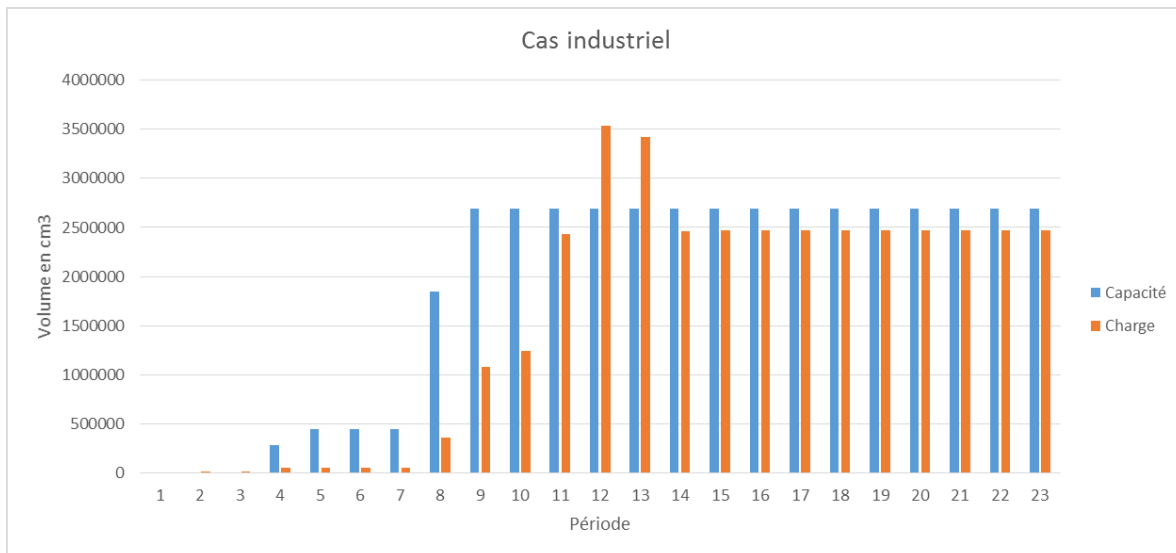


Figure 70 - Cas industriel : Charge et capacité

A t=8, un investissement dans 5 machines est effectué. Cet investissement rend l'atelier sur capacitaire sur les périodes 8, 9 et 10. Cependant, si 4 machines sont achetées à t=8 et la cinquième à t=12, la demande insatisfaite à t=11 et à t=12 augmente d'autant plus qu'avec le délai de qualification la cinquième machine n'est disponible que la moitié du temps à t=12. Cette augmentation est plus importante que le coût représenté par l'achat de la cinquième machine à t=8 (Tableau 40).

Coût	5 machines à t=8	4 machines à t=8 1 machine à t=12
Chiffre d'affaire	218 686 461,00 €	216 177 752,00 €
Investissement	12 140 000,00 €	12 140 000,00 €
Coût opérateur	720 000,00 €	720 000,00 €
Coût machine	96 221 372,00 €	93 154 276,00 €
Demande insatisfaite	40 598 992,00 €	43 107 701,00 €
Qualification	800 000,00 €	800 000,00 €
Bénéfice	68 206 097,00 €	66 255 775,00 €

Tableau 40 - Cas industriel : Analyse de l'investissement

La demande insatisfaite (Tableau 41) est liée à une question de compatibilité machine. La pièce 6 est compatible seulement avec la machine 4 qui ne fait pas partie des investissements réalisés. Il est financièrement plus intéressant de ne pas acheter la machine et d'avoir de la demande insatisfaite que d'acheter la machine.

Période	Demande insatisfaite en cm ³
t = 1	0
t = 2	12647
t = 3	12658
t = 4	7740
t = 5	7740
t = 6	7740
t = 7	7740
t = 8	7740
t = 9	7740
t = 10	7740
t = 11	193500
t = 12	888511
t = 13	768360
t = 14	387000
t = 15	387000
t = 16	387000
t = 17	387000
t = 18	387000
t = 19	387000
t = 20	387000
t = 21	387000
t = 22	387000
t = 23	387000

Tableau 41 - Cas industriel : Demande insatisfaite

Le graphique fait apparaître une demande insatisfaite à t=12, ce qui ne devrait pas apparaître. Cet écart est dû à la linéarisation de la productivité.

4. CONCLUSION

Tout comme l'application du modèle déterministe sur le cas d'étude, l'application du modèle déterministe sur le cas industriel permet d'obtenir des résultats cohérents. Nous obtenons donc un outil d'aide à la décision qui permet d'obtenir un scénario d'investissement optimal à court terme et à long terme dans un contexte déterministe.

CHAPITRE 10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. CONCLUSION

L'objectif, au niveau stratégique, est de définir une méthode d'optimisation multicritères pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimale sur le long terme et sur le court terme. Il s'agit de proposer un ***outil d'aide à la décision qui identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte :***

- ***Des incertitudes du développement du marché des pièces fabriquées additivement,***
- ***Des incertitudes liées aux développements des machines de fabrication additive,***
- ***De l'attitude du décideur face à tous ces risques.***

La conception d'un atelier de production fait partie des décisions stratégiques d'une entreprise. L'étude bibliographique montre que chaque décideur est différent de par ses caractéristiques. Elles ont un impact sur le niveau d'acceptation du risque. C'est pourquoi, il est important de prendre en compte l'attitude du décideur face au risque.

Parmi les décisions stratégiques, les investissements font partie des décisions fortes à prendre dans le cadre de la fabrication additive. Dans nos travaux, nous considérons les investissements productifs et plus précisément les investissements d'expansion et d'innovation. A moyen et à long termes, il est possible de faire des investissements de modernisation. Nous nous situons au niveau de la phase de planification des investissements. L'horizon d'investissement à long terme que nous prenons est une source de risque mais également une source d'avantage concurrentiel.

Parmi l'ensemble des décisions stratégiques, nos travaux se concentrent sur les décisions qui concernent la planification stratégique. Dans nos travaux, les analyses préalables sont considérées faites et les cibles numériques de la situation future sont données par le décideur. L'objectif est de trouver les moyens d'arriver aux objectifs fixés. L'analogie avec les semi-conducteurs nous permet de nous appuyer sur une littérature plus développée que dans le secteur de la fabrication additive. Cependant, aucun article ne considère le risque pris par le décideur et son attitude face à ce risque. Les articles étudiés n'incluent pas les incertitudes sur la demande et sur le coût ainsi que les incertitudes sur le développement technologique. Donc, nous avons besoin de proposer un nouveau modèle qui considère tous ces éléments et que nous pouvons utiliser pour intégrer les incertitudes et l'attitude du décideur face au risque.

Les décisions stratégiques étant prises à long terme et le contexte de la fabrication additive étant incertain tant au niveau du marché que de la technologie, les décisions sont prises dans un contexte incertain et risqué. La décision d'investissement résulte d'un choix raisonné avec des engagements qui sont maîtrisés et des signes qui peuvent permettre de contrôler le risque. Nous sommes donc en présence d'un risque spéculatif.

Après avoir situé notre problématique au sein de la littérature, le problème est formalisé par un programme mixte en nombres entiers. La fonction objectif choisie est la maximisation du profit net qui intègre différents coûts pour être le plus complet possible. La littérature montre que ces problèmes sont généralement résolus à l'aide d'un algorithme de programmation linéaire basé sur la séparation et l'évaluation. Nous utilisons le solveur Gurobi qui utilise cette méthode.

Dans un premier temps, le problème mixte en nombres entiers est résolu dans un cas déterministe. Il est appliqué sur quatre scénarii différents. L'analyse des résultats du modèle sur les 4 scénarii montre que le comportement du modèle est cohérent. L'application du modèle sur les quatre scénarii avec des évolutions différentes sur la demande et sur la capacité des machines démontre que ces évolutions ont un impact significatif sur la solution optimale. Il est donc important de prendre en compte ces évolutions incertaines.

Le modèle déterministe est ensuite appliqué à un cas industriel. L'application du modèle déterministe sur ce cas permet d'obtenir des résultats cohérents.

Afin de prendre en compte les évolutions incertaines, les incertitudes sont intégrées au modèle grâce à des scénarii. Les scénarii concernent : la demande, l'amélioration du temps disponible et le coût des machines. L'analyse des résultats obtenus par l'application du modèle aux trois scénarii permettant d'intégrer les incertitudes montre que le modèle a un comportement cohérent. Nous obtenons donc une méthode d'optimisation pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimale sur le long terme et sur le court terme. L'outil d'aide à la décision développé identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte des incertitudes liées au développement du marché à travers les scénarii de demande et des incertitudes liées aux développements des machines à travers les scénarii de temps disponible et de coût des machines.

2. PERSPECTIVES

2.1. Application du modèle intégrant les incertitudes sur le cas industriel

La vision à long terme est source d'incertitudes. Parmi les douze types de pièces présentes dans le cas industriel, tous ne seront peut-être pas produits en fabrication additive. Trois niveaux de probabilité d'insertion peuvent être définis : sûr, probable et opportunité. Les pièces sûres sont celles dont les valeurs de la demande sont connues avec certitude, elles sont prises en compte dans tous les scénarii. Les pièces probables sont celles dont le choix technologique est en cours, elles seront probablement fabriquées en fabrication additive. La demande rattachée aux opportunités est la demande la plus incertaine. En fonction de ces trois niveaux, trois scénarii peuvent être définis :

- Scénario 1 : seule la demande liée aux pièces sûres est prise en compte ;
- Scénario 2 : la demande liée aux pièces probables est ajoutée ;
- Scénario 3 : la demande liée aux opportunités est ajoutée à la demande du scénario 2.

Après avoir appliqué le modèle déterministe sur le cas industriel, il faudrait appliquer le modèle qui intègre les incertitudes avec ces 3 scénarii.

2.2. Analyse de l'intervalle de discrétisation

Nous avons vu que la linéarisation de la productivité crée des écarts entre les résultats obtenus et les résultats réels. Un intervalle de discrétisation de $10 \text{ cm}^3/h$ engendre un écart de 2% à 8% lorsque la charge est proche de la capacité. Il serait intéressant de réaliser des expérimentations afin de déterminer l'intervalle de discrétisation qui permet d'obtenir les résultats les plus proches de la réalité en un temps raisonnable.

2.3. Méthode multicritère

La fonction objectif est pour l'instant monocritère, elle ne considère que le critère de coût. Comme nous l'avons montré dans le CHAPITRE 1 de nombreux critères peuvent être pris en compte dans l'évaluation d'un scénario d'investissement. Une fonction objectif multicritère pourrait ainsi être définie. De plus, parmi ces critères, certains sont qualitatifs. Une réflexion sur la méthode à utiliser afin de les prendre en compte serait intéressante.

2.4. Optimisation

La méthode d'optimisation utilisée est la méthode de séparation et d'évaluation. Il s'agit d'une méthode exacte d'optimisation. Il pourrait être envisagé d'utiliser un autre moteur d'optimisation.

En effet, dans le cas de problèmes de grande taille, le temps de calcul risque d'être important. Le temps de calcul est moins contraignant pour le niveau stratégique que pour le niveau opérationnel. Il est possible d'attendre plusieurs jours pour prendre une décision importante qui engage une entreprise financièrement et à long terme. Cependant, la question de l'utilisation de métaheuristiques ou d'heuristiques pourrait se poser.

2.5. Incertitudes

Plusieurs sources d'incertitudes ont été identifiées :

- Les incertitudes qui concernent l'évolution du marché :
 - L'évolution de la demande ;
 - L'utilisation de nouveaux matériaux ;
- Les incertitudes qui concernent le développement technologique :

- Améliorations des temps de cycle ;
- Développement de modules complémentaires ;
- Développement de nouvelles machines ;
- L'évolution du coût des machines de fabrication additive.

L'évolution de la demande, les améliorations des temps de cycle et l'évolution du coût des machines sont pris en compte dans le modèle qui intègre les incertitudes grâce aux scénarii.

Les promesses sur l'utilisation de nouveaux matériaux et les incertitudes sur le développement et la disponibilité des modules complémentaires et des machines ne sont pas encore prises en compte.

Une réflexion doit être menée afin de savoir si leur intégration peut être faite au sein des scénarii ou s'il faut utiliser d'autres méthodes d'intégration des incertitudes.

2.6. Comportement du décideur

L'étude bibliographique montre que chaque décideur est différent de par ses caractéristiques. Elles ont un impact sur le niveau d'acceptation du risque. C'est pourquoi, il est important de prendre en compte l'attitude du décideur face au risque. Cette dernière doit être intégrée au sein de la méthode d'optimisation.

De plus, une décision est souvent basée sur la confiance. En fonction de la réputation et des résultats des fournisseurs de machines, le décideur va leur faire plus ou moins confiance. Le niveau de confiance du décideur par rapport aux fournisseurs de machines et par rapport aux promesses faites peut avoir un impact important sur la décision prise. Une réflexion importante doit être menée afin d'étudier comment prendre en compte ce niveau de confiance au sein de la méthode d'optimisation.

Partie III

Niveau tactique

PARTIE III. NIVEAU TACTIQUE

TABLE DES NOTATIONS	141
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	145
1. PROBLEMATIQUE	145
2. OBJECTIFS ET VERROUS.....	145
3. ORGANISATION DE LA PARTIE.....	146
CHAPITRE 2. LES COUTS EN FABRICATION ADDITIVE	147
1. DISPARITION DES ECONOMIES D'ECHELLE	147
2. IMPACT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LES COUTS	148
2.1. <i>Approvisionner et livrer</i>	148
2.2. <i>Fabriquer</i>	149
CHAPITRE 3. MODELISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE.....	151
1. ESTIMATION DES COUTS TOUT AU LONG DE LA SUPPLY CHAIN	151
2. ETUDES COMPARATIVES DES COUTS	152
3. AUTRES MODELES TECHNICO-ECONOMIQUES.....	154
4. SYNTHESE	156
5. NOTRE POSITIONNEMENT	157
CHAPITRE 4. PROPOSITION D'UN MODELE DE COUT.....	158
1. MODELE DE COUT	158
2. COUT DE (RE)CONCEPTION.....	159
3. COUT D'INDUSTRIALISATION.....	160
4. COUT D'ACHAT	160
5. COUT DE PRODUCTION	162
5.1. <i>Coût de production pièces et supports</i>	163
5.2. <i>Coût opérateur</i>	166
5.3. <i>Coût de fluides</i>	166
6. COUT DE NON QUALITE	167
7. COUT DE POST-TRAITEMENT.....	167
8. SYNTHESE.....	169
CHAPITRE 5. ESTIMATION DU TEMPS DE LASAGE.....	171
1. ANALYSE DES DIFFERENTES METHODES.....	171
1.1. <i>Méthodes liées à l'orientation de la pièce</i>	171
1.2. <i>Méthodes paramétriques et analytiques</i>	172
1.3. <i>Méthodes expérimentales</i>	173
2. SYNTHESE.....	175
3. PROPOSITION DE MODELISATION.....	176
4. APPLICATION.....	178
4.1. <i>Application sur des pièces simulées</i>	178
4.2. <i>Application sur des pièces industrielles</i>	180
5. CONCLUSION.....	181
CHAPITRE 6. APPLICATION	182
1. PRESENTATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE	182
2. APPLICATION A DES PIECES INDUSTRIELLES.....	182
2.1. <i>Pièce 1</i>	184
2.1.1. Présentation de la pièce	184
2.1.2. Analyse des coûts	184

PARTIE III - Niveau tactique

- 2.2. *Pièce 2* 185
 - 2.2.1. Présentation de la pièce 185
 - 2.2.2. Analyse des coûts 185
- 3. CONCLUSION..... 186
- CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 187**
 - 1. CONCLUSION..... 187
 - 2. PERSPECTIVES..... 188

TABLE DES NOTATIONS

α	Facteur représentant le nombre de recyclage de la poudre
c_{achat}	Coût d'achat en €
c_{fluide}	Coûts liés aux fluides en €
$c_{industrialisation}$	Coût d'industrialisation en €
c_{kWh}	Coût du kWh en €
$c_{non_qualité}$	Coût de non qualité en €
$c_{opérateur}$	Coûts liés à l'intervention des opérateurs en €
$c_{plateau}$	Coût du plateau en €
$c_{posttraitement}$	Coût de post-traitement en €
$c_{production_pièce}$	Coûts liés à la production intrinsèque de la pièce en €
$c_{production_support}$	Coûts liés à la production intrinsèque des supports en €
$c_{production}$	Coût de production en €
$c_{posttraitement_pièce}$	Coûts de post-traitements par pièce en €
$c_{posttraitement_plateau}$	Coûts de post-traitements par plateau en €
c_{poudre}	Coût de la poudre en €
$c_{poudre_pièce}$	Coût de la poudre nécessaire pour réaliser la pièce en €
$c_{reconception}$	Coût de reconception en €
$c_{revient}$	Coût de revient en €
c_{tests}	Coût des tests réalisés sur les pièces en €
$ch_{amortissement}$	Coût horaire d'amortissement en €
$ch_{concepteur}$	Coût horaire du concepteur en €/h
$ch_{gazinerte}$	Coût horaire du gaz d'inertage en €/h
$ch_{machine}$	Coût horaire de la machine en €/h
$ch_{maintenance}$	Coût horaire de maintenance en €/h
$ch_{opérateur}$	Coût horaire opérateur en €/h
$ch_{posttraitement_i}$	Coût horaire de la machine de post-traitement concerné i en €/h
$ch_{tr_plateau}$	Coût horaire du traitement du plateau en €/h
ch_{tr_poudre}	Coût horaire du traitement de la poudre en €/h
$conso_h$	Consommation énergétique par heure en €/h

d_{laser}	Diamètre du laser en mm
$d_{matière}$	Densité de la matière en kg/mm^3
$durée_{amortissement}$	Durée d'amortissement en année
e	Epaisseur d'une couche en mm
$frais_{annuels}$	Frais annuels de maintenance en €
$h_{pièce}$	Hauteur de la pièce en mm
nb_{couche}	Nombre de couches
$nb_{pièces_{plateau}}$	Nombre de pièces sur un plateau
$nb_{pièces_{prévues}}$	Nombre de pièces prévues
$nb_{pièces_{test}}$	Nombre de pièces qui doit être fabriqué afin de pouvoir réaliser les tests nécessaires à la validation des paramètres de la machine et des pièces
$nb_{plateau}$	Nombre de plateaux
$nbh_{utilisation}$	Nombre d'heures d'utilisation de la machine par an en h
$nb_{utilisation}$	Nombre de fois où un plateau peut être utilisé
p_{achat}	Prix d'achat de la machine en €
$p_{plateau}$	Prix du plateau n €
$p_{poudre_{kg}}$	Prix de la poudre en €/kg
$poudre_{brulée\%}$	Pourcentage de poudre brûlée autour de la pièce
$S_{moyenne}$	Section moyenne en mm^2
$S_{plateau}$	Surface du plateau en mm^2
$t_{fabrication}$	Temps de fabrication global en min
t_{lasage}	Temps de lasage d'une pièce (pièce + supports) en min
$t_{lasage_{pièce}}$	Temps de lasage de la pièce en min
$t_{lasage_{support}}$	Temps de lasage des supports en min
$t_{mise\ en\ couche}$	Temps de mise en couche en min
$t_{opérateur}$	Temps d'intervention nécessaire en min
$t_{prep\ mise\ en\ couche}$	Temps de préparation d'une mise en couche en min
$t_{préparation}$	Temps de préparation de la pièce en min
$t_{reconception}$	Temps de reconception en min
$t_{placement}$	Temps de placement des pièces en min
$t_{procédé_i}$	Temps nécessaire pour le procédé i en min

$t_{tr\text{plateau}}$	Temps de traitement du plateau en min
$t_{tr\text{poudre}}$	Temps de traitement de la poudre en min
taux de rebut	Taux de rebut
$\text{taux}_{\text{recouvrement}}$	Taux de recouvrement
$tu_{\text{lasage couche}}$	Temps unitaire de lasage d'une couche en min
$tu_{\text{mise en couche}}$	Temps unitaire de mise en couche en min
$tu_{\text{prep mise en couche}}$	Temps unitaire de préparation d'une mise en couche en min
$v_{\text{balayage pièce}}$	Vitesse du balayage en mm/min
V_p	Volume de poudre à acheter en mm^3
$V_{p\text{max}}$	Volume maximal de poudre à acheter en mm^3
$V_{p\text{min}}$	Volume minimal de poudre à acheter en mm^3
$V_{\text{pièce}}$	Volume net de la pièce en mm^3
V_{support}	Volume net des supports en mm^3

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1. PROBLEMATIQUE

Une fois l'atelier conçu, l'industriel doit pouvoir identifier les pièces qu'il est pertinent de faire selon un procédé additif. En effet, les industriels s'interrogent maintenant sur son intérêt pour une production plus standardisée de pièces complexes et coûteuses dans le cadre d'une fabrication plus usuelle (usinage, assemblage mécano-riveté...).

Toutes les étapes de fabrication doivent être prises en compte. En effet, produire une pièce en fabrication additive nécessite une phase de pré-traitement pour la poudre et les plateaux et une phase de post-traitements. Dans le cadre d'une pièce déjà existante, des coûts de reconception de la pièce non négligeables et des coûts de certification de la pièce nouvellement conçue et de qualification du nouveau procédé s'ajoutent au coût de production.

Toutefois, ce nouveau procédé est à l'origine d'évolutions positives. Il permet notamment de repousser les limites de la conception : de nouvelles formes sont réalisables. Sur les pièces qui utilisent pleinement les avantages de la fabrication additive au niveau de la conception, un retour en arrière ne sera pas possible. Certains matériaux sont durs à usiner et sont chers. La fabrication additive permet de diminuer la quantité de matériau utilisée et n'est pas concerné par la difficulté d'usinage. Le fait de mettre de la poudre uniquement là où elle est nécessaire permet d'alléger les pièces et ainsi d'obtenir des pièces plus performantes ou de diminuer la consommation d'énergie. La fabrication additive permet d'intégrer de nouvelles fonctions sur certains composants mécaniques. Cet avantage a une répercussion sur l'ensemble du processus de conception et de fabrication. En effet, cela permet de diminuer le nombre de pièces à concevoir et à fabriquer. Dans ce cas, le coût de fabrication devient marginal. Cet élément souligne la nécessité de prendre en compte les coûts sur le processus global.

Nous nous situons donc au niveau du processus d'industrialisation d'une pièce. Ce processus est structuré en 2 étapes. Tout d'abord, une étude de faisabilité et une étude technico-économique, permet de valider si la pièce est économiquement rentable. Puis, une étude de R&D est réalisée en étudiant finement la conception de la pièce.

Nos travaux se situent au niveau de l'étude technico-économique. Elle peut être réalisée à partir d'un estimateur du coût de fabrication de la pièce. Aujourd'hui, aucun outil standard n'existe, car le coût de fabrication dépend du processus spécifique de lasage. Cette étude doit prendre en compte toutes les étapes de fabrication : la conception, l'industrialisation, les pré-traitements, la fabrication et les post-traitements.

2. OBJECTIFS ET VERROUS

Nous avons vu que toutes les pièces ne sont pas forcément des candidates pertinentes pour la fabrication additive. L'objectif est de permettre au décideur de disposer d'un **outil permettant d'estimer le prix de revient d'une pièce en fabrication additive en partant de la conception et en allant jusqu'à la finition complète de la pièce.**

Au niveau tactique, nous devons donc lever les verrous suivants :

- Comment modéliser l'ensemble des coûts liés à l'industrialisation d'une pièce en fabrication additive ?
- Comment travailler en avance de phase, sans la pièce conçue ?
- Comment estimer le temps de fabrication d'une pièce en fabrication additive ?

3. ORGANISATION DE LA PARTIE

Nous allons, dans un premier temps, faire un état de l'art de l'impact de la fabrication additive sur les coûts et sur les modélisations technico-économiques associées. Une fois le positionnement énoncé, nous proposons une modélisation technico-économique. Dans cette modélisation, l'estimation du temps de lasage est nécessaire. Après avoir présenté les formules proposées dans la littérature, un modèle appliqué à plusieurs pièces est détaillé. Enfin, nous présentons l'outil informatique et appliquons le modèle technico-économique sur plusieurs pièces.

CHAPITRE 2. LES COÛTS EN FABRICATION ADDITIVE

La répartition des coûts en fabrication additive est fondamentalement différente de celle des procédés usuels. En effet, la notion d'économie d'échelle disparaît. De même, ce chapitre montre que la fabrication additive a un impact sur les coûts à chaque étape de la supply chain.

1. DISPARITION DES ECONOMIES D'ECHELLE

Selon Petrick et Simpson (2016), les futurs fabricants seront gouvernés par deux types de règles : les économies d'échelle pour les pièces interchangeables produites en grand volume et les économies à l'unité pour les produits hautement personnalisables qui peuvent être fabriqués par fabrication additive (Tableau 42).

	Economies d'échelle	Economies à l'unité
Source de l'avantage concurrentiel	Coût faible, volume important, grande variété	Personnalisation par l'utilisateur final
Supply Chain	Transferts séquentiels et linéaires entre les différents acteurs avec des rôles et des responsabilités bien définis	Non linéaire, collaboration localisée avec des rôles et des responsabilités mal définis
Livraison	Le volume important couvre les coûts de transport	Interaction directe entre le client et le producteur
Modèle économique	Coûts fixes + coûts variables	Presque tous les coûts deviennent variables
Conception	Conceptions simplifiées dictées par les contraintes de fabrication	Conceptions complexes et uniques qui permettent la personnalisation
Concurrence	Ensemble de concurrents bien défini	Ensemble de concurrents qui change en continu

Tableau 42 - Economies d'échelle et économie à l'unité (Petrick et Simpson, 2013)

La fabrication additive n'utilise pas d'outils ou d'outillages dédiés, donc les économies d'échelle basées sur l'utilisation massive des outillages sont absentes. Les procédés qui nécessitent un outillage sont limités à de grandes séries. Ainsi, la fabrication additive diminue, voire supprime les économies d'échelle (Figure 71). Dans le cas de la fabrication conventionnelle, le coût par pièce fabriquée diminue lorsque le volume de pièces fabriquées augmente alors que le coût par pièce fabriquée en fabrication additive varie peu quel que soit le volume de pièces fabriquées. En revanche, les procédés traditionnels ne permettent pas de faire des économies à l'unité, la personnalisation est onéreuse et chronophage. La fabrication additive permet de personnaliser les pièces rapidement et sans ajouter de coût important (Petrick et Simpson, 2013).



Figure 71 - Economie d'échelle : Comparaison entre l'usinage conventionnel et la fabrication additive (Janssen *et al.*, 2014)

L'absence d'économies d'échelle est l'un des freins au déploiement de la fabrication additive pour les grandes séries. Pour rentabiliser au mieux le procédé, il convient de minimiser la surface du plateau inoccupée par des pièces à fabriquer. Des économies sont réalisables en optimisant le volume de fabrication. Des économies sont donc possibles sur les petites pièces mais pas sur les grandes pièces (Schröder *et al.*, 2015). Baumer *et al.* (2016) proposent un algorithme de remplissage du volume pour optimiser le volume de fabrication.

La disparition de la notion d'économies d'échelle participe au déploiement d'un business model décentralisé. En effet, les économies d'échelle poussaient les industriels à centraliser la production de grandes séries pour rentabiliser les moyens. Avec la fabrication additive, ils peuvent produire de plus petites séries à plusieurs endroits et se placer au plus près des clients (Baumer *et al.*, 2016).

2. IMPACT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LES COÛTS

La fabrication additive a un impact différent sur les coûts liés à l'approvisionnement et à la livraison ainsi que sur les coûts liés à la fabrication des pièces.

2.1. Approvisionner et livrer

Pour fabriquer une pièce de façon traditionnelle, les besoins en approvisionnement sont nombreux : matières premières, outils, outillage, d'autres pièces dans les cas d'assemblage... En fabrication additive, les seuls approvisionnements nécessaires sont les poudres et les plateaux. Ce changement permet de diminuer fortement les besoins de transport (Campbell *et al.*, 2012). Selon Verhulst (2015), les coûts de transport ne sont pas significatifs dans les coûts de la fabrication additive. Selon Bhasin et Bodla (2014), avec l'évolution du business model, les pièces seront produites plus près du client final donc les coûts de transport diminueront.

Selon Bhasin et Bodla (2014), les deux coûts qui impactent fortement le prix de l'impression 3D sont le coût d'achat de l'imprimante et le prix des matières premières. Ces deux coûts font partie des quatre principaux facteurs de coûts de la fabrication additive présentés par Mellor (2014) (Tableau 43). Pour chaque facteur de coût, ils donnent les trois composantes les plus importantes. Certaines composantes sont en lien avec des temps spécifiques de la fabrication additive : le temps de fabrication d'un plateau, le temps de setup et le temps de post-traitement.

Temps opératoires	Coûts machine	Coûts opérateur	Coûts matière
Nombre de plateaux	Machine, équipements auxiliaires	Coût horaire de l'opérateur machine	Matière par pièce
Temps de fabrication pour un plateau	Coût de dépréciation par an	Temps de setup pour contrôler la machine	Matière support par pièce
Heures par an en opération	Maintenance par an	Temps de post-traitement par fabrication	Coût matière au kg

Tableau 43 - Les quatre principaux facteurs de coût de la fabrication additive (Mellor, 2014)

La diminution des prix d'acquisition des machines fait partie des facteurs importants pour favoriser le déploiement de la fabrication additive (Khajavi *et al.* 2014). La diversification des applications et l'augmentation du nombre de matériaux disponibles permettent d'augmenter le nombre d'applications. Berman (2012) confirme, qu'à terme, les prix des machines et des matières premières devraient diminuer.

Les impacts de la fabrication additive sur les coûts d'approvisionnement et de livraison sont synthétisés sur la Figure 72. La fabrication additive diminue les coûts de transport mais pour l'instant le coût de la machine et le coût des matériaux sont plus importants que pour les procédés classiques.

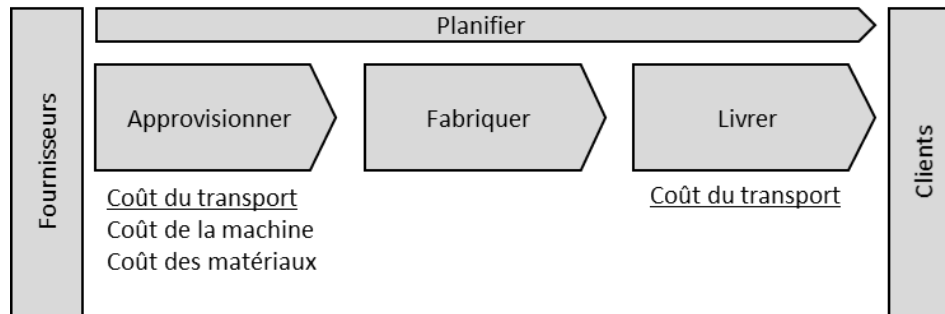


Figure 72 - Impact de la fabrication additive sur les coûts : Approvisionner et livrer

2.2. Fabriquer

Lors de la phase de conception d'un produit, plusieurs prototypes sont réalisés. En fabrication traditionnelle, ils peuvent nécessiter l'achat d'outils ou d'outillage. En fabrication additive, les prototypes peuvent être réalisés facilement et rapidement ce qui diminue le coût de conception (Janssen *et al.*, 2014).

En fabrication traditionnelle, la personnalisation de masse a des conséquences fortes : changements de planification, gestion des stocks, délai de fabrication... Toutes ces conséquences augmentent les prix des produits personnalisés. En fabrication additive, les coûts liés à la personnalisation des pièces sont faibles, seul compte le temps de modification du modèle 3D avant le lancement de la production (Mourtzis *et al.*, 2008).

La fabrication additive ne nécessite pas d'outillage onéreux, il n'y a pas de coût ou de temps additionnel entre la fabrication d'une pièce simple et celle d'une pièce complexe (Campbell *et al.*, 2012). Les restrictions de conception dues au coût ou aux contraintes d'usinage ou d'assemblage n'existent plus (Lindemann *et al.*, 2012). La complexité des pièces n'ajoute pas de coût supplémentaire important, car seul le temps de fabrication peut être impacté (Gao *et al.*, 2015). L'absence d'outillage permet également de diminuer les coûts de changement de séries (Campbell *et al.*, 2012). Après nettoyage de la machine, il suffit de remettre un plateau et de la poudre pour relancer une fabrication. Par contre, si un changement de poudre doit être effectué, le coût de changement de séries peut augmenter significativement, car il faut nettoyer totalement et méticuleusement la machine pour éviter la pollution des futures pièces à produire.

Les coûts de stockage et d'inventaire représentent des coûts importants pour les fabricants. En fabrication additive, la diminution des coûts liés au stockage et aux inventaires provient de la capacité de fabriquer les pièces nécessaires sur demande (Piazza et Alexander, 2015). Les besoins de stockage diminuent (Mokasdar, 2012). Bhasin et Bodla (2014) estiment à 90% l'économie faite sur les coûts de stockage et d'inventaire. Les besoins en stockage étant moindres, les coûts liés à l'obsolescence des stocks sont également diminués (Holmström *et al.*, 2010).

Ainsi, l'ensemble des impacts de la fabrication additive sur les coûts est résumé sur le modèle SCOR proposé (Figure 73). Les coûts soulignés sont les coûts sur lesquels la fabrication additive a un impact positif.

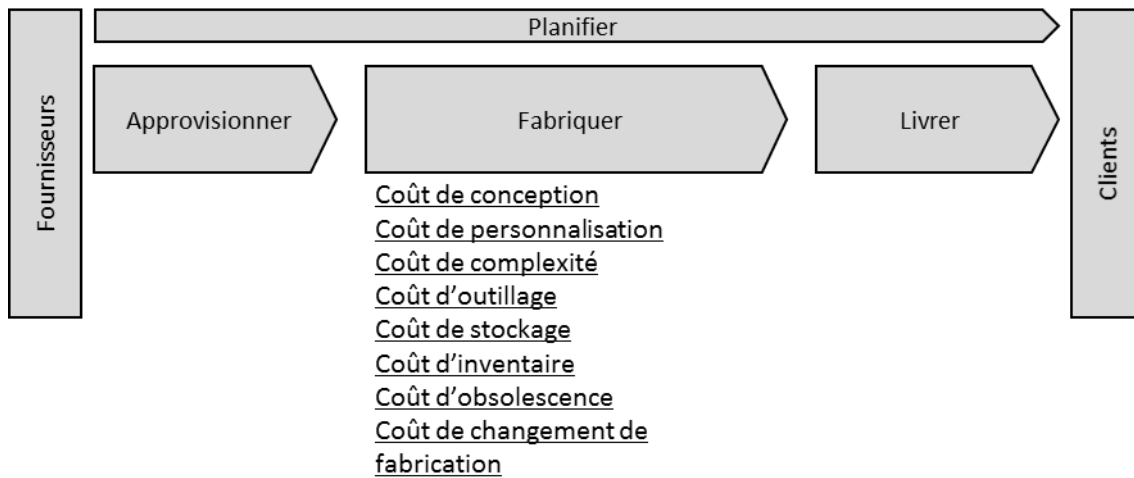


Figure 73 - Impact de la fabrication additive sur les coûts : Fabriquer

Ainsi, selon la bibliographie, l'analyse de l'impact des coûts sur les différentes étapes de la supply chain en fabrication additive montre que la fabrication additive a un impact positif sur l'ensemble des coûts liés à la fabrication. Néanmoins, pour l'instant, les coûts liés à l'investissement et à l'achat des matières premières sont plus importants que pour les procédés traditionnels.

CHAPITRE 3. MODELISATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE

Plusieurs modèles de coûts sont proposés dans la littérature. Ils ne sont pas tous construits pour répondre au même objectif. Certains modèles permettent de comparer les coûts liés à la fabrication additive avec les coûts liés à la fabrication traditionnelle ou à d'autres procédés de fabrication additive. D'autres modèles ont été construits pour estimer l'impact de la fabrication sur les coûts tout au long de la supply chain.

1. ESTIMATION DES COÛTS TOUT AU LONG DE LA SUPPLY CHAIN

Khajavi *et al.* (2014) cherchent à évaluer l'impact de la fabrication additive sur la supply chain de pièces détachées. L'étude est réalisée sur une pièce d'avion de chasse. Ils prennent l'échelle temporelle de l'année. Les coûts compris dans la formule de coût annuel sont les coûts de :

- Personnel (dépendant du niveau d'automatisation),
- Machine,
- Matériel (dépendant du niveau de demande),
- Transport (dépendant de la politique de planification),
- Stockage (en lien avec le niveau de stock),
- D'immobilisation de l'avion, lié à l'obsolescence des stocks, de dépréciation de l'investissement initial dans les machines et de réalisation de l'inventaire.

Les coûts les plus impactants sont le coût d'investissement, le coût matière et le coût du personnel lors des pré-traitements et des post-traitements. D'après Khajavi *et al.* (2014), le coût des machines doit nécessairement diminuer pour permettre un changement radical et le déploiement de la fabrication additive.

Bhasin et Bodla (2014) étudient l'impact de la fabrication additive sur les supply chains mondiales d'ici 2020. L'ensemble des coûts liés à la supply chain est donc pris en compte : les achats, les commandes, le transport et le stockage. En ce qui concerne le coût spécifique de la fabrication additive, les coûts d'installation, d'achat de la machine, de conception et de matière sont inclus dans le calcul.

Ils concluent qu'en prenant en compte seulement le coût de production, la fabrication additive est rentable pour les petites séries. Cependant, une fois que la production atteint une certaine quantité de pièces le moulage par injection devient économiquement plus intéressant. Dans l'exemple traité, la fabrication additive est rentable jusqu'à entre 500 et 750 pièces. Par contre, en analysant l'ensemble de la supply chain, la fabrication additive permet de faire des économies de l'ordre de 33% (Tableau 44).

Scénario	Fabrication traditionnelle	Impression 3D	% gagnés
Coût d'achat	120 000 \$	96 000 \$	20 %
Coût de transport	18 723 \$	953 \$	95 %
Coût de possession	2 500 \$	33 \$	99 %
Coût de pièces en transit	3 462 \$	132 \$	96 %
Coût total	144 684 \$	97 117 \$	33 %

Tableau 44 - Comparaison des coûts entre la fabrication traditionnelle et l'impression 3D (Bhasin et Bodla, 2014)

2. ETUDES COMPARATIVES DES COÛTS

Lindemann *et al.* (2012) développent une méthodologie pour obtenir les coûts de la fabrication additive au cours du cycle de vie du produit. Le premier objectif est d'identifier la structure du coût des machines lors d'une utilisation courante. Le second objectif est de comprendre comment comparer la structure des coûts des machines pour l'usinage conventionnel et la fabrication additive.

Le modèle de coût, utilisé par Lindemann *et al.*, pour calculer le prix de revient d'un plateau ainsi que les coûts pris en compte est représenté Figure 74.

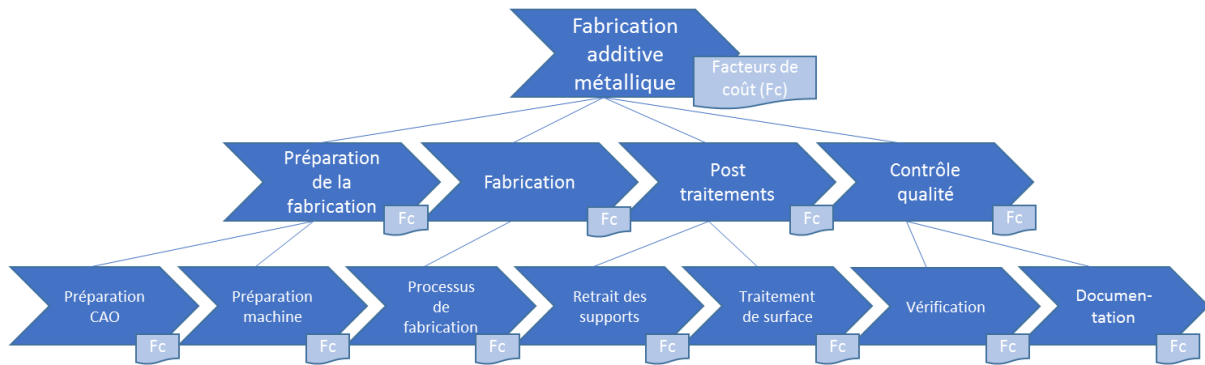


Figure 74 - Modèle de recherche des coûts tout au long du cycle de vie (Lindemann *et al.*, 2012)

Le calcul est réalisé sur un échantillon. La Figure 75 présente les résultats de l'application du modèle sur une pièce.

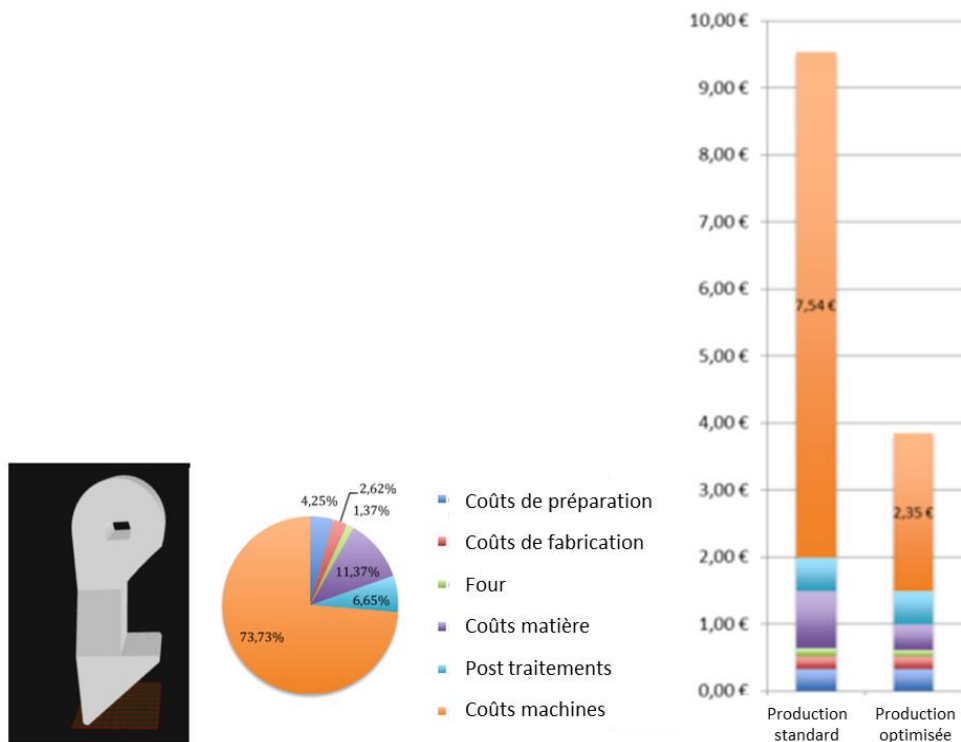


Figure 75 - Exemple d'une pièce et structure des coûts pour des lots de 190 pièces (Lindemann *et al.*, 2012)

Les résultats montrent bien que les coûts prédominants sont les coûts liés à la machine et aux matières premières. Néanmoins, ces coûts peuvent être nettement diminués en optimisant la production (Lindemann *et al.*, 2012).

L'analyse des coûts tout au long du cycle de vie du produit permet de conclure que la fabrication additive est capable de diminuer les coûts grâce à la réduction du nombre de pièces, de tests, de fournisseurs et de sous-traitants ainsi qu'au gain de temps pour la conception. La capacité de réduire les coûts et d'ajouter de la valeur ne bénéficie pas qu'aux entreprises : les clients bénéficient d'une augmentation de fonctionnalité et de la réduction du coût sur l'ensemble du cycle de vie du produit lors de son utilisation. La fabrication additive est attractive pour les entreprises qui peuvent atteindre un haut degré d'utilisation des machines. Les coûts et les bénéfices dépendent fortement du secteur de l'industrie. Cela met en avant le besoin d'une investigation spécifique à chaque industrie.

Baumers *et al.* (2016) proposent un modèle de coût afin de comparer deux technologies de fabrication additive : l'Electron Beam Melting (EBM) et la Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Le modèle prend en compte deux coûts directs : le coût des matières premières et la consommation énergétique et un coût supplémentaire qui représente les coûts indirects. La productivité des machines a un impact fort sur le coût de fabrication. Elle représente un frein au développement de la fabrication additive. Baumers espère que la productivité des machines va s'améliorer et que les coûts des machines vont diminuer.

Hopkinson et Dickens (2013) ont développé un modèle afin de comparer plusieurs technologies de fabrication additive : Stereolithography, Fused Deposition Modeling, Selective Laser Melting avec le moulage par injection. Les trois coûts pris en compte sont le coût machine, le coût matière et le coût de personnel. Dans le coût matière, la notion de recyclage n'est pas prise en compte. De plus, les coûts de post-traitements ne sont pas pris en compte. Le modèle montre que les coûts prépondérants sont le coût machine et le coût matière. Le coût du personnel représente une partie infime du coût de la pièce.

Hällgren *et al.* (2016) veulent comparer le coût d'une série de pièces réalisées en fabrication additive avec le coût d'une série de pièces réalisées en usinage. Il prend en compte les changements de matériaux, l'augmentation de la vitesse d'impression et la réduction de la masse permis par la fabrication additive. Ses conclusions sont :

- Les pièces qui demandent un faible temps d'usinage sont plus chères à réaliser en fabrication additive,
- Le temps de lasage est difficile à prévoir car il dépend de la forme de la pièce et du matériau,
- Le nombre et la vitesse des post-traitements ont une influence importante sur le coût. Il s'agit de l'incertitude la plus importante, une meilleure prévision est nécessaire.

La série de pièces est plus chère lorsqu'elle est réalisée en fabrication additive. Pour certains matériaux, utiliser les avantages de la fabrication additive pour la réalisation de pièces complexes peut rendre la fabrication additive économiquement intéressante.

Les études comparatives montrent que, dans la situation actuelle, les coûts de production sont plus importants en utilisant la fabrication additive qu'en utilisant les procédés traditionnels. Par contre, cette différence est nuancée lorsque l'ensemble du cycle de vie de la pièce est pris en compte. La diminution du coût machine et du coût matière attendue ainsi que l'ajout de fonctionnalités devrait permettre à la fabrication additive de pouvoir concurrencer les procédés traditionnels.

3. AUTRES MODELES TECHNICO-ECONOMIQUES

Ruffo *et al.* (2006) estiment le coût de fabrication de lots de petite et de moyenne tailles. Ils étendent le modèle de Hopkinson et Dickens. Le modèle est construit en fonction des coûts directs et des coûts indirects (Figure 76). Le coût direct correspond au coût matière. Les coûts indirects, liés au coût de fabrication, correspondent aux coûts de production et de main d'œuvre ainsi qu'aux coûts administratifs et au coût machine. Pour chacun de ces coûts, les différents postes sont détaillés.

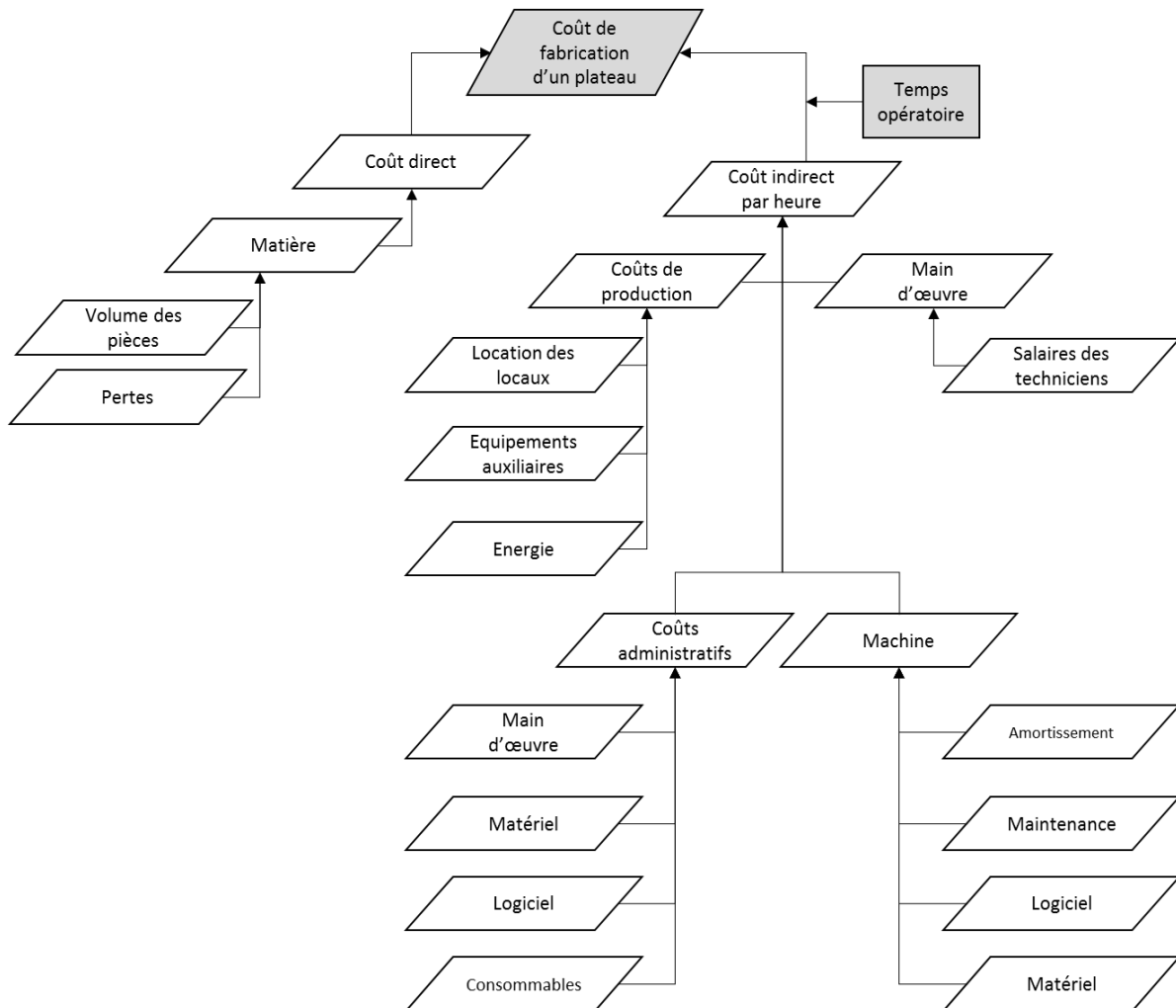


Figure 76 - Modèle de coûts (Ruffo *et al.* 2006)

Lors de l'application du modèle, ils observent un impact important des coûts liés à la machine, au matériau et aux opérateurs.

Ingole *et al.* (2009) mènent une étude pour améliorer le prototypage rapide en termes de vitesse et de coût grâce au procédé de fusion sur lit de poudre. Dans ce cadre, ils développent un modèle de coût qui prend en compte les coûts liés à la machine, au matériau et à la main d'œuvre mais aussi les coûts dus aux prétraitements et aux post-traitements. Il s'agit d'un modèle de calcul de rentabilité. Pour chaque caractéristique du prototypage rapide, le Tableau 45 donne le bénéfice principal et indique si la caractéristique affecte (A) ou n'affecte pas (N) le coût opératoire machine, le coût matière, le coût opérateur et le coût de pré et post-traitement.

Caractéristiques	Bénéfice	Coût opératoire machine	Coût matière	Coût opérateur	Coût pré et post-traitement
Procédé automatisé	Minimise le coût humain	A	N	A	N
Fabrication pièces complexes et petites	Bonne productibilité	N	N	N	N
Pas d'outillage, de gabarit et de montage	Elimine les coûts d'outillage	A	N	A	A
Réduction de la planification	Réduit le temps de planification	N	N	A	A
Pièce unique ou petit lot	Produits personnalisés	A	A	A	N
Pas de rebut	Pas de coût de destruction	A	A	N	A
Meilleure précision et finition	Qualité assurée	A	A	A	A
Produits intégrés	Elimine les coûts d'assemblage	N	N	A	A
Pas de temps de setup	Réduit le temps de cycle total	N	N	A	A

A : affecte, N : n'affecte pas

Tableau 45 - Bénéfices impactant les coûts significatifs en prototypage rapide (Ingole *et al.*, 2009)

L'objectif de Kopf *et al.* (2018) est de développer une méthodologie orientée vers les coûts des équipements SLM pour les lignes de production en série afin d'optimiser la planification. Pour cela, ils proposent un modèle de coût qui prend en compte le coût des équipements, le coût matière, le coût de la main d'œuvre et le coût de l'énergie. Par contre, la méthode présentée ne correspond pas à notre problématique car ils ne prennent en compte que les coûts de mise en œuvre.

Dans ses travaux de thèse sur la fabrication rapide, Munguia Valenzuela (2009) propose un modèle paramétrique des coûts qui prend en compte le coût matière, le coût de maintenance, le coût machine et le coût de fabrication qui intègre le coût opérateur. Dans cet article, l'auteur se focalise aussi uniquement sur les coûts de mise en œuvre.

Quant à Rickenbacher *et al.* (2013), les auteurs proposent un modèle qui permet d'estimer le coût d'une pièce fabriquée sur un plateau qui contient plusieurs types de pièces. Ils prennent en compte les coûts du prétraitement jusqu'aux post-traitements : coûts de préparation du modèle CAO, coûts de préparation de la fabrication, coût de setup, coût de fabrication, coût de retrait du plateau, coût de séparation pièces/plateau et coût de post-traitements. Ce modèle est plus complet mais il n'intègre pas les coûts de conception, d'industrialisation et de qualité.

Ces travaux proches ne répondent pas à tous nos critères, les différences et les similitudes entre ces articles et notre approche sont développées dans la suite du document.

4. SYNTHÈSE

Le Tableau 46 synthétise les objectifs et les paramètres pris en compte dans chacun des modèles de la littérature étudiés.

Objectif	Modèle proposé										
	Bauners et al. 2015	Halgreen et al. 2016	Hopkinson et Dickens 2013	Ingle et al. 2009	Rickenbacher et al. 2013	Knapik 2014	Kopf et al. 2018	Unterwiesing et al. 2012	Ruffo et al. 2005	Modèle proposé	
Comparer différents procédés de FA	x										
Prédire le coût de pièces prismatiques en FA		x									
Comparer différents procédés de FA avec le moulage par injection		x									
Évaluer le degré de changement de processus et d'investissements			x								
Proposer un modèle de coût pour le SLM					x						
Évaluer l'impact de la FA sur la SC de pièces détachées						x					
Optimiser la production avec une approche orientée coût							x				
Comparer la FA et l'usinage conventionnel								x			
Estimer le coût de petits et moyens lots									x		
Estimer le coût d'une pièce lors de l'étude de faisabilité										x	
Matières premières											x
Machine											x
Personnel											x
Post traitement											x
Modèle 3D											x
Lasage											x
Pré traitement											x
Consommation énergétique											x
Supports											x
Livraison											x
Coûts indirects											x
Préparation CAO + machine											x
Logiciels											x
Equipements											x
Transport											x
Stockage											x
Immobilisation de l'avion											x
Maintenance											x
Production											x
Management											x

Tableau 46 - Synthèse des coûts pris en compte dans les différents modèles

Ainsi, la littérature montre que plusieurs méthodes sont développées pour évaluer le coût de revient d'une pièce de fabrication additive. Il apparaît que toutes les méthodes n'utilisent pas le même paramétrage, ce qui influe sur le périmètre étudié et sur la fiabilité des résultats. Chaque modèle prend en compte des paramètres spécifiques en fonction de l'objectif recherché. De plus, au stade de notre étude, certains paramètres ne sont pas connus précisément. Il reste difficile d'évaluer avec précision le coût de fabrication d'une pièce. Aucun modèle ne prend en compte l'ensemble des paramètres que nous souhaitons considérer dans notre modèle et nous ne prenons pas en compte certains paramètres considérés par les modèles de la littérature. En effet, nous ne prenons pas en compte les coûts liés à la supply chain : les coûts de transport, de livraison et d'emballage car ils ne font pas partie du périmètre de l'étude. Le coût de management n'est pas directement en lien avec la pièce fabriquée ou avec le procédé choisi, il n'est pas pris en compte. Et enfin, le coût d'immobilisation d'un avion est propre au domaine de l'aéronautique. Il peut être étendu à tous les cas d'immobilisation dans le cadre d'une maintenance mais nous sommes dans un cas général donc nous ne considérons pas ce coût.

5. NOTRE POSITIONNEMENT

Dans le cadre de nos travaux, il est nécessaire de proposer un modèle de coût fiable qui satisfasse les deux contraintes principales suivantes :

- Couvrir l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements, pour permettre d'estimer le bénéfice d'un changement de procédé ou de sa mise en œuvre ;
- Permettre de prendre des décisions au début de l'étude de faisabilité, alors que toutes les informations nécessaires ne sont pas disponibles ou connues précisément.

En effet, notre étude se situe au niveau de l'étude de faisabilité afin de savoir s'il est économiquement pertinent de prévoir de fabriquer la pièce en fabrication additive alors que les articles de la littérature se situent au niveau de la phase de fabrication, lorsque la pièce est entièrement prête à être produite en fabrication additive (Figure 77).

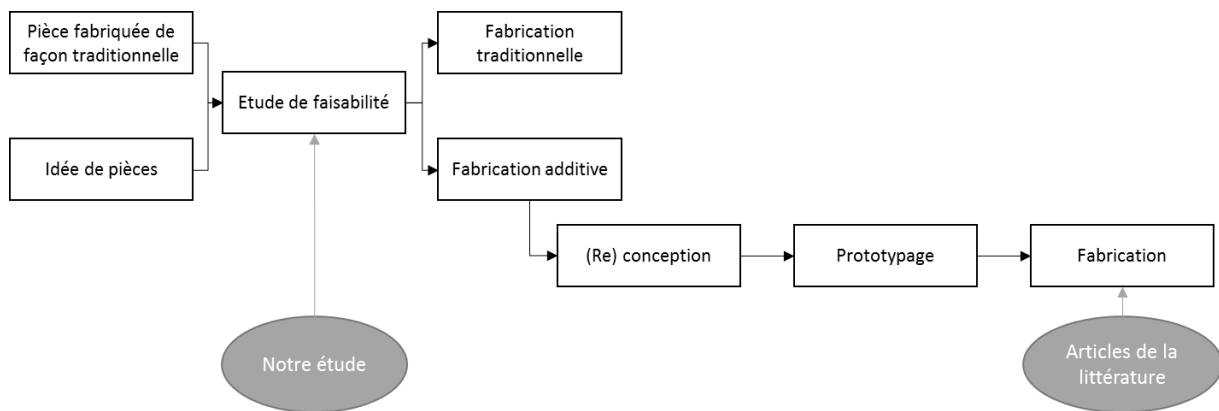


Figure 77 - Positionnement des travaux

Pour satisfaire les deux contraintes citées précédemment, nous nous appuyons sur les différents modèles de coût proposés par la littérature. Notre étude diffère des articles de la littérature. Dans la plupart des cas, les travaux présentés se situent plus en aval dans la chaîne de la valeur et utilisent des données connues plus précisément. En guise d'illustration, la géométrie et donc les dimensions de la pièce ne sont pas définies. Dans notre cas, la pièce est caractérisée par un volume.

CHAPITRE 4. PROPOSITION D'UN MODELE DE COUT

A partir de la bibliographie présentée dans le chapitre précédent, nous avons établi un nouveau modèle de coût adapté à notre problématique. Pour chaque coût, nous étudions les modèles de la littérature puis nous proposons notre modèle.

1. MODELE DE COUT

Nous allons distinguer les coûts récurrents et les coûts non récurrents. Les coûts récurrents varient en fonction de la quantité. Ils s'appliquent à chaque système alors que les coûts non récurrents ne sont éprouvés qu'une seule fois au cours du cycle de vie du système considéré. Dans notre cas, les coûts non récurrents sont les coûts qui s'appliquent une seule fois par type de pièce et ils sont indépendants du nombre de pièces fabriquées. Les coûts récurrents s'appliquent à chaque pièce fabriquée.

Afin de couvrir l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements, les coûts pris en compte dans le calcul du coût de revient d'une pièce sont : le coût de conception, les coûts liés à l'industrialisation (plateaux test et tests), les coûts d'achat (poudre et plateau), les coûts dus à la production (pièce, support, opérateur, énergie), le coût lié à la qualité et les coûts de post-traitements (Figure 78).

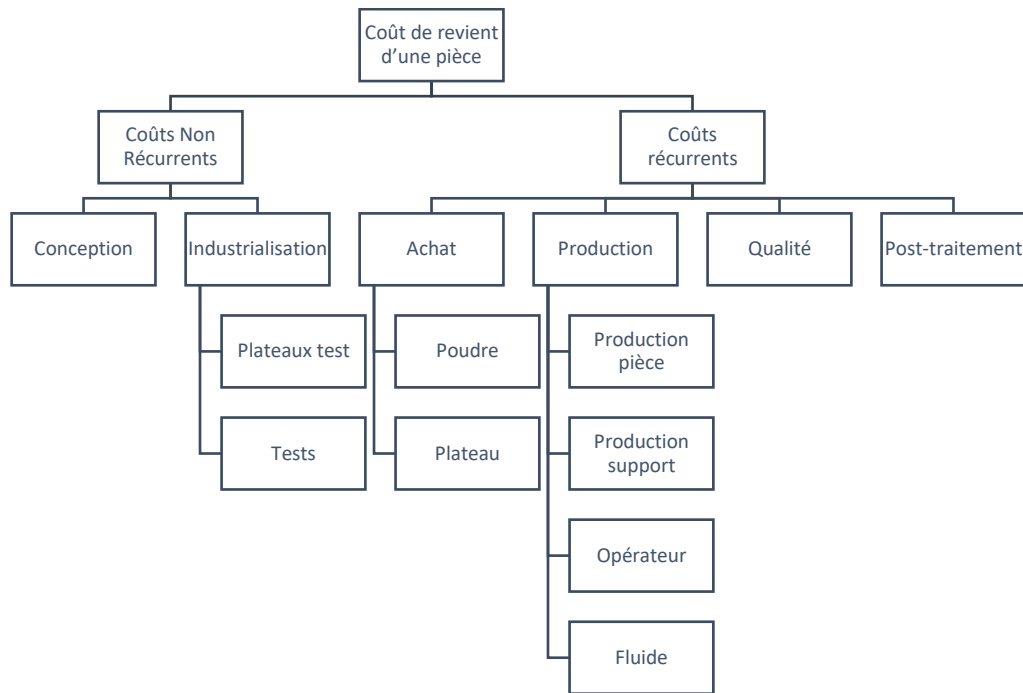


Figure 78 - Modèle de coût

Le coût de revient $c_{revient}$ est la somme du coût de reconception $c_{reconception}$ du coût d'industrialisation $c_{industrialisation}$, du coût d'achat c_{achat} , du coût de production $c_{production}$, du coût de non qualité $c_{non_qualité}$ et du coût de post-traitement $c_{post_traitement}$ (Equation (72)).

$$c_{revient} = c_{reconception} + c_{industrialisation} + c_{achat} + c_{production} + c_{non_qualité} + c_{post_traitement} \quad (72)$$

Dans la suite du document, pour chaque coût, nous présentons les formules proposées dans la littérature puis le modèle de coût choisi.

2. COUT DE (RE)CONCEPTION

Le coût de (re)conception prend en compte le coût lié au temps passé à (re)concevoir la pièce et à la préparer pour la fabrication. En effet, avant de lancer la pièce en fabrication, il faut ajouter des surépaisseurs pour la tribofinition par exemple, choisir l'orientation de la pièce et placer les supports nécessaires.

Dans l'ensemble des modèles étudiés, les pièces sont conçues pour la fabrication additive. L'étape de reconception n'est donc pas prise en compte. Par contre, Rickenbacher *et al.*, (2013) prennent en compte le coût de préparation (Equation (73)).

$$C_{Prep}(P_i) = (ch_{opérateur} + C_{PC}) * \frac{T_{Prep}(G_i)}{N_i} \quad (73)$$

Avec :

C_{Prep} : Coût de préparation des données géométriques

P_i : Pièce de géométrie i

C_{PC} : Coût horaire de la station informatique (matériel, logiciel...)

T_{Prep} : Temps requis pour la préparation des données CAO

G_i : Géométrie i

N_i : Nombre de pièces de géométrie i

$ch_{opérateur}$: Coût horaire opérateur

Dans nos travaux, les temps de (re)conception et de préparation ne peuvent être précisément connus au niveau de l'étude de faisabilité, plusieurs temps sont définis en fonction d'un degré de complexité (Tableau 47).

Complexité	Temps de reconception	Temps de préparation
1	15	15
2	30	30
3	50	50
4	75	75
5	100	100

Tableau 47 - Reconception et préparation : niveaux de complexité

Soit $ch_{concepteur}$ le coût horaire du concepteur qui prend en compte le coût logiciel et le coût matériel.

Soit $t_{reconception}$ le temps de reconception et $t_{préparation}$ le temps de préparation de la pièce qui correspond au temps nécessaire pour placer les supports et choisir l'orientation des pièces.

Ainsi, le coût de reconception est réparti sur le nombre de pièces prévues $nb_{pièces_prévues}$. Il est estimé à partir de l'équation (74), selon la formule utilisée par Rickenbacher *et al.* (2013) à laquelle le temps de reconception est ajouté.

$$C_{reconception} = \frac{ch_{concepteur} * (t_{reconception} + t_{préparation})}{nb_{pièces_prévues}} \quad (74)$$

3. COUT D'INDUSTRIALISATION

Le coût d'industrialisation correspond au coût engendré par le lancement en production d'un plateau de pièces. Un certain nombre de pièces $nb_{pièces_test}$ doivent être fabriquées afin de pouvoir réaliser les tests nécessaires à la validation des paramètres de la machine et des paramètres de conception. Ce coût est donc composé du coût de placement des pièces, du coût de revient de ces pièces $c_{revient}$ ainsi que du coût des tests réalisés sur les pièces c_{tests} .

La phase de test n'est pas prise en compte dans les modèles de la littérature. Néanmoins, Rickenbacher *et al.* (2013) prennent en compte le coût lié au placement des pièces sur les plateaux $C_{placement}$ (Equation (75)).

Soit $t_{placement}$ le temps nécessaire au placement des pièces sur les plateaux, C_{PC} le coût horaire de la station informatique (matériel, logiciel...) et N_i le nombre de pièces de géométrie i .

$$C_{placement}(P_i) = t_{placement} * \frac{ch_{opérateur} + C_{PC}}{\sum_i N_i} \quad (75)$$

Le coût d'industrialisation est réparti sur le nombre de pièces prévues $nb_{pièces_prévues}$. Il est calculé à partir de l'équation (76).

$$C_{industrialisation} = \frac{nb_{pièces_test} * c_{revient} + c_{tests} + t_{placement} * ch_{concepteur}}{nb_{pièces_prévues}} \quad (76)$$

4. COUT D'ACHAT

Le coût d'achat correspond au coût d'achat des matières premières.

Baumers *et al.* (2012) proposent la formule la plus simple du coût matière en faisant le produit entre la masse de la pièce $m_{pièce}$ et le prix de la poudre par unité de poids p_{poudre_kg} (Equation (77)).

$$c_{poudre_pièce} = m_{pièce} * p_{poudre_kg} \quad (77)$$

Kopf *et al.* (2018) n'utilisent pas la masse de la pièce mais le volume de la pièce $V_{pièce}$. Le prix de la poudre est donc exprimé par unité de volume p_{poudre_vol} . De plus, ils prennent en compte le fait qu'une partie de la poudre ne sera pas réutilisable à travers le facteur f_{poudre} (Equation (78)).

$$c_{poudre_pièce} = p_{poudre_vol} * V_{pièce} * f_{poudre} \quad (78)$$

Munguia Valenzuela (2009) ajoute les notions de support et de densité matière (Equation (79)). Les supports sont pris en compte grâce au facteur support $f_{support}$ qui permet de calculer le volume matière pour les supports. En prenant en compte la densité matière $d_{matière}$, le prix de la poudre p_{poudre_kg} doit être exprimé par unité de poids (Equation (79)).

$$c_{poudre_pièce} = \left(V_{pièce} * d_{matière} * (1 + f_{support}) \right) * p_{poudre_kg} \quad (79)$$

Baumers *et al.* (2012), Kopf *et al.* (2018) et Munguia Valenzuela (2009) calculent le coût matière pour une pièce (Equations (77),(78),(79)). Les formules présentées par la suite permettent d'obtenir le coût matière pour un plateau $c_{poudre_plateau}$.

Lindemann *et al.* (2012) combinent les deux précédentes formules en multipliant le résultat par le nombre de pièces sur un plateau $nb_{pièces_{plateau}}$ (Equation (80)).

$$c_{poudre_{plateau}} = f_{support} * f_{poudre} * nb_{pièces_{plateau}} * V_{pièce} * p_{poudre_{kg}} * d_{matière} \quad (80)$$

Ruffo *et al.* (2006) associent le coût matière à la masse. Le rapport entre les coûts directs $coût_{direct}$ et une unité de masse $unité_{masse}$ permet d'obtenir un coût au kilo. Le calcul du poids des pièces du plateau ne prend pas en compte les supports (Equation (81)).

$$c_{poudre_{plateau}} = \frac{coût_{direct}}{unité_{masse}} * d_{matière} * V_{pièce} * nb_{pièces_{plateau}} \quad (81)$$

Hopkinson et Dickens (2013) calculent également la masse de matière fondue à partir de la masse des pièces finies et la masse de matière non fondue à partir du volume de fabrication, du volume des pièces et de la densité matière (Tableau 48). Nous ne pouvons pas utiliser ce modèle car il nécessite de connaître la masse de la pièce finie.

	Variable	Obtenue par
Nombre de pièces par plateau	N	Maximum possible sur un plateau
Temps de fabrication (h)	T	Heure
Taux de production par heure (h ⁻¹)	R	N / T
Heures par an en opération (h)	HY	365*24*90% = 7884
Volume total de production par an	V	R*7884
<i>Coûts matière</i>		
Coût matière par kilo (€)	LSC	54€
Masse de chaque pièce (kg)	LSM	Pesée des pièces finies
Volume de chaque pièce (cm ³)	VP	Calculé avec le logiciel Magics
Volume total de fabrication (cm ³)	TBV	34 * 34 * 60 cm ³
Masse de matière fondue par plateau (kg)	LSMS	N * LSM
Masse de matière non fondue par plateau (kg)	LSMU	(TBV – N * VP) * 0,475
Coût de la matière utilisée pour un plateau (€)	LSMC	(LSMU + LSMS) * LSC
Coût matière par pièce (€)	LSMCP	LSMC / N

Tableau 48 - Coût matière (Hopkinson et Dickens, 2013)

Le coût d'achat correspond au coût d'achat de la poudre c_{poudre} qui prend en compte la poudre pour la pièce et pour les supports. A ce coût, se rajoute le coût du plateau $c_{plateau}$ nécessaire à la fabrication d'un plateau de pièces est ajouté. Le coût d'achat correspond à la somme de ces deux coûts (Equation (82)).

$$c_{achat} = c_{poudre} + c_{plateau} \quad (82)$$

Le coût de la poudre est calculé à partir du volume de poudre nécessaire à la fabrication de l'ensemble des pièces V_p , de la densité de la matière $d_{matière}$ et du prix de la poudre $p_{poudre_{kg}}$. Au coût d'achat de la poudre, il faut ajouter le coût de traitement de la poudre (transfert, tamisage...) qui est calculé à partir du coût horaire de traitement $ch_{tr_{poudre}}$ et du temps de traitement $t_{tr_{poudre}}$ (Equation (83)).

$$c_{poudre} = \frac{V_p * d_{matière} * p_{poudre_{kg}} + ch_{tr_{poudre}} * t_{tr_{poudre}}}{nb_{pièces_{prévues}}} \quad (83)$$

Le volume de poudre inutilisé pour la pièce et irrécupérable pour une autre production, c'est-à-dire, le pourcentage de poudre brûlée autour de la pièce f_{poudre} est également pris en compte car il représente un volume de poudre qui ne sera pas recyclable. Le fait que la poudre soit recyclable n'est pas pris en compte dans les modèles de la littérature étudiés. Nous allons l'intégrer en calculant le volume minimum $V_{p_{min}}$ qui correspond

à un nombre de recyclage infini de la poudre et le volume maximum $V_{p_{max}}$ qui correspond à une poudre qui n'est pas recyclée. Si la poudre est infiniment recyclée, le volume de poudre nécessaire correspond au volume de chaque pièce avec ses supports et le pourcentage de poudre brûlée autour de la pièce auquel est ajouté une fois le volume de poudre recyclable (Equation (84)).

$$V_{p_{min}} = nb_{pièces_{prévues}} * (1 + f_{poudre}) * (V_{support} + V_{pièce}) + S_{plateau} * h_{pièce} - (1 + f_{poudre}) * (V_{support} + V_{pièce}) * nb_{pièces_{plateau}} \quad (84)$$

Si la poudre n'est pas recyclée, le volume de poudre nécessaire correspond au volume de chaque plateau, calculé à partir de la surface du plateau $S_{plateau}$ et de la hauteur des pièces $h_{pièce}$ multiplié par le nombre de plateau (Equation (85)).

$$V_{p_{max}} = S_{plateau} * h_{pièce} * nb_{plateau} \quad (85)$$

Le nombre de plateau correspond au rapport entre le nombre de pièces prévues et le nombre de pièces par plateau (Equation (86)).

$$nb_{plateau} = E \left[\frac{nb_{pièces_{prévues}}}{nb_{pièces_{plateau}}} \right] + 1 \quad (86)$$

$V_{p_{min}}$ et $V_{p_{max}}$ correspondent aux bornes du volume de poudre nécessaire. Le taux α , compris entre 0 et 1, permet de représenter le nombre de recyclages envisagé, plus α est grand moins la poudre est recyclée (Equation (87)).

$$V_p = (1 - \alpha) * V_{p_{min}} + \alpha * V_{p_{max}} \quad (87)$$

En ce qui concerne, le coût lié au plateau, les formules de la littérature ne le prennent pas en compte. Le coût d'achat du plateau correspond au prix du plateau $p_{plateau}$ divisé par le nombre de fois où le plateau va être utilisé $nb_{utilisation}$. A ce coût d'achat, il faut ajouter le coût de traitement du plateau entre chaque utilisation. Ce coût correspond au coût horaire de traitement du plateau $ch_{tr_{plateau}}$ multiplié par le temps de traitement $t_{tr_{plateau}}$. L'objectif est d'obtenir le coût total d'une pièce. En fonction de la taille des pièces, plusieurs pièces peuvent être fabriquées sur le même plateau. Certains coûts sont donc divisés par le nombre de pièces sur le plateau $nb_{pièces_{plateau}}$ (Equation (88)).

$$c_{plateau} = \left(\frac{p_{plateau}}{nb_{utilisation}} + ch_{tr_{plateau}} * t_{tr_{plateau}} \right) * \frac{1}{nb_{pièces_{plateau}}} \quad (88)$$

5. COUT DE PRODUCTION

Le coût de production correspond à l'ensemble des coûts liés à la fabrication d'un plateau de pièces. Parmi eux, le coût intrinsèque de fabrication de la pièce et des supports dépend fortement du temps de lasage.

Le coût de production $c_{production}$ comprend l'ensemble des coûts liés à la production. Tout d'abord, les coûts liés à la production intrinsèque de la pièce $c_{production_{pièce}}$ et des supports $c_{production_{support}}$, puis les coûts liés à l'intervention des opérateurs $c_{opérateur}$, et enfin les coûts liés aux fluides c_{fluide} (Equation (89)).

$$c_{production} = c_{production_{pièce}} + c_{production_{support}} + c_{opérateur} + c_{fluide} \quad (89)$$

5.1. Coût de production pièces et supports

Le coût de production des pièces et des supports correspond au coût lié à l'utilisation de la machine.

Plusieurs approches sont proposées dans les différents articles. Dans un premier temps, Kopf *et al.* (2018) et Hopkinson et Dickens (2013) utilisent le coût d'achat et la dépréciation.

Kopf *et al.* (2018) prennent en compte le coût d'achat c_{invest} et la dépréciation à travers le temps de dépréciation de a années et le temps de vie planifié de l'équipement avec un intérêt i . Ils prennent également en compte le temps disponible $t_{disponibilité}$ (Equation (90)).

$$C_{\text{équipement}} = c_{invest} * \left(\frac{1}{2}i + \frac{1}{a}\right) * \frac{t_{occupation} * N_{pièces}}{t_{disponibilité} * nb_{pièces_{plateau}}} \quad (90)$$

Avec :

$C_{\text{équipement}}$: Coût d'investissement dans les équipements

$t_{occupation}$: Temps d'occupation de la machine pour produire un plateau

$N_{pièces}$: Nombre de pièces produites par an

Hopkinson et Dickens (2013) ne prennent pas en compte le temps disponible. Par contre, ils considèrent le coût de maintenance machine par an $frais_{annuels}$. Pour obtenir un coût à la pièce, ils divisent le coût annuel par le volume total de production par an $V_{total_{an}}$ (Equation (91)). Le coût annuel comprend les frais annuels et le coût d'investissement amorti sur 8 ans.

$$C_{\text{machine pièce}} = \frac{\frac{c_{invest}}{8} + frais_{annuels}}{V_{total_{an}}} \quad (91)$$

Une deuxième approche, proposée par Ruffo *et al.* (2006) et Baumers *et al.* (2012), consiste à prendre en compte les coûts indirects $c_{indirect}$ et le temps de lasage t_{lasage} .

Ruffo *et al.* (2006) calculent un coût par unité de temps en divisant l'ensemble des coûts indirects $c_{indirect}$ par le temps total de fabrication $t_{fab_{totale}}$ (Equation (92)). Baumers *et al.* (2012) expriment directement les coûts indirects par unité de temps (Equation (93)).

$$c_{\text{machine plateau}} = \frac{\sum c_{indirect}}{t_{fab_{totale}}} * t_{lasage} \quad (92)$$

$$c_{\text{machine pièce}} = \frac{c_{indirect} * t_{lasage}}{nb_{pièces_{plateau}}} \quad (93)$$

La dernière approche est basée sur le temps de lasage et sur le coût horaire de la machine $ch_{machine}$.

Lindemann *et al.* (2012) ajoutent les coûts fixes c_{fixes} (Equation (94)).

$$c_{\text{machine plateau}} = c_{fixes} + ch_{machine} * t_{lasage} \quad (94)$$

De leur côté, Rickenbacher *et al.* (2013) ne prennent pas en compte les coûts fixes mais ils ajoutent le coût horaire de consommation de gaz inerte $c_{gaz_{inerte}}$ (Equation (95)).

$$c_{\text{machine pièce}}(P_i) = t_{lasage}(P_i) * (ch_{machine} + c_{gaz_{inerte}}) \quad (95)$$

En ce qui concerne Mahadik et Masel (2018), ils calculent le coût horaire de la machine à partir du coût annuel d'achat équivalent C_{EAC} qui prend en compte le coût d'achat et l'amortissement et du temps disponible sur la

machine. Ils estiment le temps disponible par mois en se basant sur le nombre de jours travaillés dans un mois N_{jours} et le temps opératoire espéré par jour $E[H]$ (Equation (96)). Ils multiplient ensuite ce coût horaire de la machine avec l'ensemble des temps où la machine est mobilisée : le temps de setup de la machine T_s , le temps de changement de matière T_l , le temps de paramétrage T_p , le temps de récupération des pièces T_r et le temps de nettoyage de la machine T_c (Equation (97)).

$$ch_{machine} = \frac{C_{EAC}}{12 * N_{jours} * E[H]} \quad (96)$$

$$C_{op} = (T_s + T_l + T_p + t_{lasage} + T_r + T_c) * ch_{machine} \quad (97)$$

Pour finir, Munguia Valenzuela (2009) calculent séparément le coût de maintenance et le coût lié à l'utilisation de la machine. Le coût de maintenance est calculé à partir du coût annuel de maintenance $frais_{annuels}$, du nombre de machines N_{mach} et du nombre de pièces produites par jour N_{ppd} (Equation (98)). Le coût horaire de la machine n'est pas calculé à partir du temps disponible mais à partir du temps utilisé qui dépend du nombre de pièces produites par jour et du temps utile de la machine pour une pièce ul (Equation (99)). Le coût horaire de la machine est ensuite multiplié par le temps de lasage d'un plateau (Equation (100)).

$$C_{maintenance} = \frac{frais_{annuels} * N_{mach}}{365 * N_{ppd}} \quad (98)$$

$$ch_{machine} = \frac{C_{invest} * N_{mach}}{365 * ul * N_{ppd}} \quad (99)$$

$$C_{machine_{plateau}} = t_{lasage} * ch_{machine} \quad (100)$$

Au coût machine, Rickenbacher *et al.* (2013) ajoutent un coût de setup C_{setup} et un coût de retrait des pièces $C_{retrait}$.

Le coût de setup prend en compte un facteur d'effort supplémentaire pour la manutention dans un environnement à atmosphère protégée $F_{gaz_{inerte}}$, le coût opérateur et le coût machine qui sont répartis sur l'ensemble des pièces produites N_i , le temps de setup T_{setup} , et le coût lié aux changements de matière. Ce dernier est calculé à partir du temps requis pour changer de matière $T_{Mat.change}$ et d'un facteur $F_{Mat.change}$ qui modélise la fréquence de changement matière (Equation (101)).

$$C_{Setup}(P_i) = F_{gaz_{inerte}} * \frac{C_{oper} + ch_{machine}}{\sum_i N_i} * (T_{setup} + (F_{Mat.change} * T_{Mat.change})) \quad (101)$$

Le coût pour retirer les pièces de la machine (Equation (102)) est calculé selon le même principe en remplaçant les temps de setup et de changement matière par le temps requis pour retirer les pièces de la machine $T_{retrait}$.

$$C_{retrait}(P_i) = F_{gaz_{inerte}} * T_{retrait} * \frac{C_{oper} + ch_{machine}}{\sum_i N_i} \quad (102)$$

Le Tableau 49 permet de résumer les paramètres pris en compte par chacun des modèles présentés.

Paramètres	Kopf et al. 2018	Hopkinson et Dickens, 2013	Baumers et al. 2012	Ruffo et al. 2006	Linde mann et al. 2012	Rickenbacher et al. 2013	Mahadik et Masel, 2018	Munguia Valenzuela, 2009
Temps lasage		x	x	x	x	x	x	x
Coût d'achat	x	x					x	x
Coût horaire machine					x	x	x	x
Dépréciation	x	x						
Temps en opération			x					x
Nombre de pièces		x						x
Coût de maintenance		x						x
Coût indirect			x	x				
Temps disponible	x						x	
Coût fixe					x			
Consommation gaz						x		

Tableau 49 - Paramètres pour le calcul du coût machine

Suite à des discussions avec des industriels et en s'appuyant sur la bibliographie, afin d'obtenir un coût représentatif de la réalité, nous voulons prendre en compte le temps de lasage, le coût d'achat, le coût horaire machine, l'amortissement, le temps disponible et le coût de maintenance. Aucun modèle ne prend en compte l'ensemble de ces critères mais en combinant une partie de ces modèles nous proposons le modèle ci-dessous.

Le coût de production de la pièce (Equation (103)) et des supports (Equation (104)) est le produit du coût horaire de la machine $ch_{machine}$ et respectivement du temps de lasage de la pièce $t_{lasage_{pièce}}$ auquel le temps de mise en couche $t_{mise\ en\ couche}$ est ajouté et du support $t_{lasage_{support}}$.

$$c_{production_pièce} = ch_{machine} * (t_{lasage_{pièce}} + t_{mise\ en\ couche}) \tag{103}$$

$$c_{production_support} = ch_{machine} * t_{lasage_support} \tag{104}$$

Le coût horaire de la machine (Equation (105)) dépend du coût horaire d'amortissement $ch_{amortissement}$ et du coût horaire de maintenance $ch_{maintenance}$. Le coût horaire d'amortissement (Equation (106)) permet de répartir sur chaque pièce le prix d'achat de la machine p_{achat} , ce prix est divisé par le nombre d'heures d'utilisation de la machine par an $nbh_{utilisation}$ et par la durée d'amortissement $durée_{amortissement}$. Le coût horaire de maintenance (Equation (107)) prend en compte les frais annuels de maintenance $frais_{annuels}$ divisés par le nombre d'heures d'utilisation.

$$ch_{machine} = ch_{amortissement} + ch_{maintenance} \tag{105}$$

$$ch_{amortissement} = \frac{p_{achat}}{nbh_{utilisation} * durée_{amortissement}} \tag{106}$$

$$ch_{maintenance} = \frac{frais_{annuels}}{nbh_{utilisation}} \tag{107}$$

5.2. Coût opérateur

Le coût opérateur $c_{opérateur}$ correspond au coût engendré par l'intervention des opérateurs lors de la fabrication d'un plateau.

Kopf *et al.* (2018) calculent le coût opérateur à partir du coût horaire d'un opérateur $ch_{opérateur}$ et du temps de travail manuel nécessaire t_{manuel} (Equation (108)).

$$c_{opérateur} = ch_{opérateur} * t_{manuel} \quad (108)$$

Munguia Valenzuela (2009) sépare le temps de travail manuel en deux : le temps de prétraitement t_{pre} et le temps de post-traitement t_{post} (Equation (109)).

$$c_{opérateur} = (t_{pre} + t_{post}) * ch_{opérateur} \quad (109)$$

Hopkinson et Dickens (2013) prennent en compte le temps de post-traitement mais aussi le temps de réglage présenté dans le Tableau 50.

	Variable	Obtenue par
Nombre de pièces par plateau	N	Maximum possible sur un plateau
Temps de fabrication (h)	T	Heure
Taux de production par heure (h^{-1})	R	N / T
Heures par an en opération (h)	HY	$365 * 24 * 90\% = 7884$
Volume total de production par an	V	$R * 7884$
<i>Coûts de main d'œuvre</i>		
Coût d'un opérateur machine par heure (€)	Op	Salaire minimum 5,30 €
Temps de réglage pour contrôler la machine (min)	Set	Temps
Temps de post-traitements par plateau (min)	Post	Temps
Coût de main d'œuvre par plateau (€)	L	$Op * (Set + Post)$
Coût de main d'œuvre par pièce (€)	LCP	L / N

Tableau 50 - Coûts de main d'œuvre (Hopkinson et Dickens 2013)

Le coût de main d'œuvre est calculé à partir du coût horaire opérateur $ch_{opérateur}$ et du temps d'intervention nécessaire $t_{opérateur}$ (Equation (110)).

$$c_{opérateur} = \frac{ch_{opérateur} * t_{opérateur}}{nb_{pièces_plateau}} \quad (110)$$

5.3. Coût de fluides

Le coût de fluides correspond au coût engendré par la consommation énergétique de la machine et par la consommation de gaz pour l'inertage de la machine de fabrication additive.

Kopf *et al.* (2018) distinguent la consommation en veille et la consommation en opération. La consommation en veille correspond à la puissance en veille P_{veille} multipliée par le temps où la machine est en veille, c'est-à-dire le temps de mise en couche t_{mise_couche} et le temps de setup t_{setup} . La consommation en opération correspond au produit de la puissance en opération $P_{opération}$ et du temps de lasage t_{lasage} (Equation (111)).

$$c_{energie} = c_{kWh} * (P_{veille} * (t_{mise_couche} + t_{setup}) + (P_{opération} * t_{lasage})) \quad (111)$$

Baumers *et al.*, (2012) proposent un modèle détaillé qui distinguent quatre types d'énergie. E_{job} correspond à toute la consommation d'énergie attribuable à la construction, y compris l'énergie consommée par le processus de découpe par fil pour séparer les pièces du plateau. E_{layer} désigne les éléments fixes de la consommation d'énergie par machine et par couche, pour un nombre total de couches l . $E_{voxel\ xyz}$ exprime la consommation d'énergie en fonction de la géométrie, elle est obtenue en additionnant toute la consommation d'énergie

associée au dépôt réel de matière, dans l'espace de travail discret. Et enfin, E_{Time} correspond à l'énergie associée au taux de consommation d'énergie. L'énergie totale E_{total} pour une pièce est estimée à partir de l'équation (112). Multipliée par le coût du kWh elle permet d'obtenir le coût de l'énergie (Equation (113)).

$$E_{total} = E_{job} + (E_{Time} * t_{fabrication}) + (E_{layer} * l) + \sum_{z=1}^z \sum_{y=1}^y \sum_{x=1}^x E_{voxel\ xyz} \quad (112)$$

$$C_{\text{énergie}} = E_{total} * c_{kWh} \quad (113)$$

Au stade de notre étude, les deux modèles présentés ne sont pas applicables car ils sont trop précis et nécessitent des données inconnues avant la reconception de la pièce.

Le coût du gaz d'inertage n'est pas pris en compte dans les articles étudiés. Le coût de fluide prend en compte l'énergie nécessaire au fonctionnement de la machine de fabrication additive représentée par la consommation par heure $conso_h$ multipliée par le coût du kWh c_{kWh} . A ce coût s'ajoute, le coût horaire de consommation de gaz d'inertage $ch_{gazinerte}$. Ces deux coûts permettent d'obtenir un coût horaire global qui est multiplié par le temps de fabrication $t_{fabrication}$ (Equation (114)).

$$C_{fluide} = \frac{(c_{kWh} * conso_h + ch_{gazinerte}) * t_{fabrication}}{nb_{piècesplateau}} \quad (114)$$

6. COUT DE NON QUALITE

Les modèles étudiés ne prennent pas en compte le coût de non qualité. Le coût de rebut dépend du taux de rebut et des coûts jusqu'à la fin de la fabrication additive, c'est-à-dire, le coût d'achat et le coût de production. Il est calculé à partir de l'équation (115).

$$C_{non_qualité} = \frac{\text{taux de rebut} * (c_{production} + c_{achat})}{nb_{piècesplateau}} \quad (115)$$

7. COUT DE POST-TRAITEMENT

Les opérations de post-traitements sont les opérations effectuées après le lasage afin d'obtenir une pièce de service qui correspond aux spécifications attendues par le client. Les opérations de post-traitements concernent des opérations géométriques (usinage, rectification) et des opérations métallurgiques de traitement thermique. Certains post-traitements sont effectués sur l'ensemble du plateau comme le détensionnement, d'autres post-traitements sont effectués sur chaque pièce après l'opération de découpe.

Rickenbacher *et al.* (2013) et Hällgren *et al.* (2016) prennent en compte le coût de découpe, c'est-à-dire, le coût de séparation des pièces et du plateau.

Rickenbacher *et al.* (2013) calculent le coût de découpage $c_{decoupe}$ pour chaque pièce P_i de géométrie G_i à partir de l'aire de connexion entre la pièce considérée et le plateau $A_{Con}(G_i)$ et d'un coût par unité de surface obtenu en faisant le rapport entre le coût du procédé EDM C_{EDM} et l'aire de connexion entre toutes les pièces et le plateau $\sum_i A_{Con}(G_i)$ (Equation (116)).

$$c_{decoupe}(P_i) = \frac{C_{EDM}}{\sum_i A_{Con}(G_i)} * A_{Con}(G_i) \quad (116)$$

Hällgren *et al.* (2016) proposent une approche différente en considérant que le coût de découpage $c_{decoupe}$ est le produit entre le coût horaire machine $ch_{machine}$ et le temps opératoire auquel est ajouté le coût non récurrent de fabrication NRC_{fab} . Le temps opératoire se compose du temps de manutention $t_{manutention}$ et du temps de découpe calculé à partir du volume à découper et de la vitesse de découpe Vit_{dec} (Equation (117)). Ils

considèrent qu'il y a 25% du volume de la pièce à enlever et que les supports représentent 15% du volume de la pièce.

$$c_{découpe} = ch_{machine} * \left(t_{manutention} + \frac{0.25 * V_{pièce} + 0.15 * V_{pièce}}{Vit_{dec}} \right) + NRC_{fab} \quad (117)$$

Seuls Rickenbacher *et al.* (2013) prennent en compte les autres post-traitements. Ils déterminent un coût pour l'ensemble des post-traitements C_{post} en utilisant un coût horaire pour un atelier qui inclut tous les outils nécessaires aux post-traitements C_{outils} . Le coût de post-traitements est donc le produit entre les coûts horaires opérateur C_{oper} et de l'atelier et le temps de post-traitements T_{post} (Equation (118)).

$$C_{post}(P_i) = T_{postp}(G_i) * (C_{oper} + C_{outils}) \quad (118)$$

Les formules de calcul du coût de découpe sont précises à ce stade de l'étude. Mais le fait d'agrèger le coût horaire de tous les post-traitements en un coût horaire atelier ne permet de prendre en compte les différents temps de procédé ainsi que la différence de coût entre ces procédés.

Nous proposons une formule de coût commune à tous les post-traitements par pièce i . Elle correspond au produit du coût horaire de la machine de post-traitement concerné $ch_{post_traitement_i}$ par le temps nécessaire $t_{procédé_i}$ (Equation(120)). Pour les post-traitements par plateau, c'est-à-dire le nettoyage, le détensionnement et la découpe, le coût de chaque post-traitement est réparti sur l'ensemble des pièces présentes sur le plateau (Equation (119)). Le coût de main d'œuvre est compris dans le coût horaire de chaque post-traitement. Le coût de post-traitement est la somme des coûts de post-traitements par plateau $c_{posttraitement_plateau}$ et par pièce $c_{posttraitement_pièce}$ (Equation (121)).

$$c_{posttraitement_plateau} = \sum_{i=1}^3 \frac{ch_{posttraitement_i} * t_{procédé_i}}{nb_{pièces_plateau}} \quad (119)$$

$$c_{posttraitement_pièce} = \sum_{i=1}^3 ch_{posttraitement_i} * t_{procédé_i} \quad (120)$$

$$c_{posttraitement} = c_{posttraitement_plateau} + c_{posttraitement_pièce} \quad (121)$$

Les temps de post-traitements ne peuvent pas être précisément connus au niveau de l'étude de faisabilité, plusieurs classes de temps sont définies en fonction d'un degré de complexité (Tableau 51).

Complexité	Temps nettoyage	Temps détensionnement	Temps découpe	Temps usinage	Temps sablage	Autre temps	Temps Traitement thermique
1	0,2	2	1	2	0,1	0	3
2	0,3	4	1,5	2,5	0,25	0	3,5
3	0,4	6	2	3	0,5	0	4
4	0,5	8	2,5	3,5	1	0	4,5
5	1	10	3	4	2	0	5

Tableau 51 - Niveau de complexité des post-traitements

Les temps sont donnés en heure, ils peuvent être modifiés en fonction de la typologie des pièces.

8. SYNTHÈSE

La Figure 79 présente la synthèse des calculs de coûts.

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de coût original qui prend en compte l'ensemble du processus, de la conception à la pièce finie. Ce modèle permet d'estimer le coût de fabrication d'une pièce dès la phase d'avant-projet. Pour cela, des classes de complexité sont proposées pour estimer le coût des phases de conception et de post-traitements. Les modèles proposés dans la littérature sont adaptés à ce cas d'emploi. Ainsi, ce modèle de coût permet de prendre des décisions au niveau tactique, quant à la mise en œuvre de la fabrication additive pour la pièce étudiée.

L'analyse de la littérature montre qu'un des paramètres critiques concerne l'estimation du temps de lasage nécessaire à la fabrication d'une pièce.

Coût de revient	Coût de reconception	$C_{reconception} = \frac{ch_{concepteur} * (t_{reconception} + t_{préparation})}{nb_{pièces_{prévues}}}$
	Coût d'achat	$C_{achat} = C_{poudre} + C_{plateau}$ <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Poudre</div> $C_{poudre} = \frac{V_p * d_{matière} * p_{poudre_{kg}} + ch_{tr_{poudre}} * t_{tr_{poudre}}}{nb_{pièces_{prévues}}}$ $V_p = \alpha * V_{p_{min}} + (1 - \alpha) * V_{p_{max}}$ $V_{p_{min}} = (nb_{pièces_{prévues}} - nb_{pièces_{plateau}}) * (1 + f_{poudre}) * (V_{support} + V_{pièce}) + S_{plateau} * h_{pièce}$ $V_{p_{max}} = S_{plateau} * h_{pièce} * nb_{plateau}$ $nb_{plateau} = E \left[\frac{nb_{pièces_{prévues}}}{nb_{pièces_{plateau}}} \right] + 1$ </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Plateau</div> $C_{plateau} = \left(\frac{p_{plateau}}{nb_{utilisation}} + ch_{tr_{plateau}} * t_{tr_{plateau}} \right) * \frac{1}{nb_{pièce_{s_{plateau}}}}$ </div>
	Coût de production	$C_{production} = C_{production_{pièce}} + C_{production_{support}} + C_{opérateur} + C_{énergie}$ <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Production pièce</div> $C_{production_{pièce}} = ch_{machine} * (t_{lasage_{pièce}} + t_{mise\ en\ couche})$ $ch_{machine} = ch_{amortissement} + ch_{maintenance}$ $ch_{amortissement} = \frac{p_{achat}}{nb_{utilisation} * durée_{amortissement}}$ $ch_{maintenance} = \frac{frais_{annuels}}{nb_{utilisation}}$ </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Production support</div> $C_{production_{support}} = ch_{machine} * t_{lasage_{support}}$ </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Opérateur</div> $C_{opérateur} = \frac{ch_{opérateur} * t_{opérateur}}{nb_{pièces_{plateau}}}$ </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Fluide</div> $C_{fluide} = \frac{(C_{kWh} * CONSO_h + ch_{gazinerte}) * t_{fabrication}}{nb_{pièces_{plateau}}}$ </div>
	Coût de non qualité	$C_{non_qualité} = \frac{taux\ de\ rebut * (C_{production} + C_{achat})}{nb_{pièces_{plateau}}}$
	Coût de post-traitements	$C_{posttraitement} = C_{posttraitement_{plateau}} + C_{posttraitement_{pièce}}$ <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Post traitement plateau</div> $C_{posttraitement_{plateau}} = \sum_{i=1}^3 \frac{ch_{posttraitement_i} * t_{procédé_i}}{nb_{pièces_{plateau}}}$ </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="background-color: #ADD8E6; padding: 5px; margin-right: 10px;">Post traitement pièce</div> $C_{posttraitement_{pièce}} = \sum_{i=1}^3 ch_{posttraitement_i} * t_{procédé_i}$ </div>
Coût d'industrialisation	$C_{industrialisation} = \frac{nb_{pièces_{test}} * C_{revient} + C_{tests} + t_{placement} * ch_{concepteur}}{nb_{pièces_{prévues}}}$	

Figure 79 - Synthèse du modèle de coût

CHAPITRE 5. ESTIMATION DU TEMPS DE LASAGE

Le coût de fabrication de la pièce est directement proportionnel au temps de production et donc au temps de lasage (Mahadik et Masel 2018). Le temps de lasage est un facteur qui a un fort impact sur le coût de production et donc sur le coût global de la pièce (Byun et Lee, 2005). Il joue un rôle important dans la comparaison entre la fabrication additive et les procédés traditionnels (Zhang et Bernard, 2013).

Le nombre de paramètres à prendre en compte rend le temps de lasage difficile à calculer avec précision. Le temps de lasage peut être calculé suivant plusieurs approches : à partir du volume de la pièce et d'un débit, à partir du trajet du laser, à partir de la trajectoire du laser, en prenant en compte les paramètres cinématiques de la machine. En effet, des paramètres comme l'accélération et la décélération du laser sont compliqués à considérer (Byun et Lee 2005). Hällgren *et al.* (2016) ajoutent que le temps de lasage est difficile à prévoir car il dépend de la forme de la pièce et du matériau.

Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature pour calculer le temps de lasage. Après les avoir analysées, nous proposons une modélisation appliquée à différentes pièces.

1. ANALYSE DES DIFFERENTES METHODES

Chaque méthode propose une approche différente du temps de lasage et des paramètres à prendre en compte. Trois types de méthodes sont distinguées : les méthodes développées pour optimiser l'orientation de la pièce, les méthodes paramétriques et analytiques et enfin les méthodes expérimentales.

1.1. Méthodes liées à l'orientation de la pièce

Le temps de lasage est fortement dépendant de l'orientation des pièces car elle modifie la hauteur et donc le nombre de couches. Deux articles cherchent à déterminer l'orientation optimale des pièces fabriquées à l'aide de procédés fonctionnant par couche. Xu *et al.* (1999) discutent la sélection de l'orientation des pièces pour quatre procédés différents : la stéréolithographie, la fusion sur lit poudre, le dépôt de fil et la fabrication d'objets laminés. La formule de temps de lasage distingue le taux surfacique de solidification de la matière t_s qui est lié au volume de matière V_{mat} et à l'épaisseur de la couche et le temps entre les couches t_w qui est lié au nombre de couches (Equation (122)).

$$t_{fabrication} = \frac{V_{mat}}{e_{couche}} * t_s + nb_{couche} * t_w \quad (122)$$

L'objectif de Byun et Lee (2005) est de déterminer l'orientation optimale des pièces en utilisant un algorithme génétique. La fonction *objectif* utilisée est la minimisation du temps de lasage exprimé par l'équation (123). Les calculs des aires sont détaillés dans les équations (124) et (125).

$$t_{lasage} = nb_{couche} \left(T_p + d_{matiere} \left(\frac{S_{moyenne}}{A_{phr}} + \frac{S_{moyenne}}{A_{psr}} \right) \right) + d_{support} * \frac{S_{moyenne_support}}{A_{sr}} \quad (123)$$

$$S_{moyenne_support} = \frac{S_{pièce} * d_{laser}}{nb_{couche} * e_{couche}} \quad (124)$$

$$S_{moyenne} = \frac{V_{pièce}}{nb_{couche} * e_{couche}} \quad (125)$$

Avec :

T_p : Temps libre entre les couches

S_A : Surface de la pièce

A_{phr} : Vitesse surfacique de scannage de l'intérieur de la pièce

A_{psr} : Vitesse surfacique de hachage de l'intérieur de la pièce

A_{sr} : Vitesse surfacique de scannage de l'intérieur du support

1.2. Méthodes paramétriques et analytiques

Wilson (2006) exprime le temps de lasage comme une fonction de la distance à parcourir et de la vitesse à laquelle elle est parcourue. Il distingue le temps de lasage des pièces et le temps de lasage des supports, chacun de ces deux temps est le produit entre le temps unitaire de lasage pour une couche $tu_{lasage\ couche\ pièce}$ et $tu_{lasage\ couche\ support}$ et le nombre de couches $nb_{couche\ pièce}$ et $nb_{couche\ support}$ (Equation (126)). Les nombres de couches sont les rapports entre les hauteurs $h_{pièce}$ et $h_{support}$ et l'épaisseur de couche e_{couche} . Les temps unitaires pour une couche sont le rapport entre la surface à parcourir (le produit entre le nombre de passages N_{scan} et la surface moyenne $S_{moyenne}$) et la vitesse surfacique (le produit entre le diamètre laser d_{laser} , la vitesse moyenne de lasage V_{moy} et l'écart vecteur $e_{vecteur}$). Pour le temps unitaire d'une couche de support, un ratio du volume de support sup_{ratio} est pris en compte pour calculer la surface de support à parcourir (Equation (127)).

$$t_{lasage} = tu_{lasage\ couche\ pièce} * nb_{couche\ pièce} + tu_{lasage\ couche\ support} * nb_{couche\ support} \quad (126)$$

$$t_{lasage} = \frac{N_{scan} * S_{moy}}{d_{laser} * V_{moy} * e_{vecteur}} * \left(\frac{h_{pièce}}{e_{couche}} \right) + \frac{N_{scan_{supp}} * S_{moy} * sup_{ratio}}{d_{laser} * V_{moy} * e_{vecteur}} * \left(\frac{h_{support}}{e_{couche}} \right) \quad (127)$$

Si plusieurs pièces sont considérées, le temps de lasage est multiplié par le nombre de pièces sur le plateau.

Zhang et Bernard (2013) proposent une méthode analytique pour estimer le temps de lasage et mettent en avant l'importance du contexte de production sur l'estimation du temps de lasage. Dans leur modèle, la formule utilisée pour calculer le temps de lasage correspond à l'équation (128).

$$t_{lasage} = \frac{\frac{V_{pièce}}{e_{couche}}}{nb_{lasers} * (d_{laser} + d_h) * V} + \frac{\frac{S_{pièce}}{e_{couche}}}{V} \quad (128)$$

Avec :

d_h : espace de hachage

V : vitesse de lasage

Mahadik et Masel (2018) proposent un outil d'estimation du coût global de la fabrication d'une pièce en fabrication additive. Pour le temps de lasage, ils calculent le temps nécessaire pour une couche (Equation (129)) multiplié par le nombre de couches.

$$(T_s)_{FDM} = \sum_{k=1}^{nb_{couche}} \left[\max \left(\frac{v_k + v_{pk}}{R_d}; \frac{v_k + v_{pk}}{R_f} \right) + \frac{e_{couche}}{S_l} \right] \quad (129)$$

Avec :

v_k : volume de la pièce dans la couche k

v_{pk} : volume de support dans la couche k

R_d : taux de dépôt

R_f : taux de fusion de la matière

S_l : Vitesse de descente de la plateforme

Di Angelo et Di Stefano (2011) estiment que les modèles paramétriques présentés dans la littérature ne sont pas assez précis et ne prennent pas tous les paramètres en compte. Ils proposent une méthode basée sur les réseaux de neurones afin d'améliorer la précision du calcul du temps de lasage. Leur méthode nécessite de connaître précisément la pièce et la stratégie de lasage.

Pour Baumers *et al.* (2012), le temps de fabrication $t_{fabrication}$ est la somme du temps fixe pour chaque plateau T_{fixe} qui correspond au temps de préparation, d'un temps par couche t_{couche} et du temps pour chaque voxel T_{voxel} (Equation (130)).

$$t_{fabrication} = T_{fixe} + (t_{couche} * nb_{couche}) + \sum_{z=1}^z \sum_{y=1}^y \sum_{x=1}^x T_{voxel_{xyz}} \quad (130)$$

1.3. Méthodes expérimentales

Ruffo *et al.* (2006) utilisent une méthode empirique développée à partir de fabrications simulées ou réelles. L'estimateur se base sur la géométrie de la pièce en utilisant les données des modèles 3D. La fonction expérimentale du temps de lasage t_{xy} est calculée à partir du temps de lasage du volume d'encombrement de la pièce t_{xy_box} réduit par un facteur dépendant du volume réel de la pièce ∂ (Equation (131)).

$$t_{xy} = \partial * t_{xy_box} \quad (131)$$

Le facteur de réduction ∂ dépend du ratio Cr entre le volume de la pièce $V_{pièce}$ et le volume de la boîte englobante (Figure 80) V_{ext} (Equation (132)).

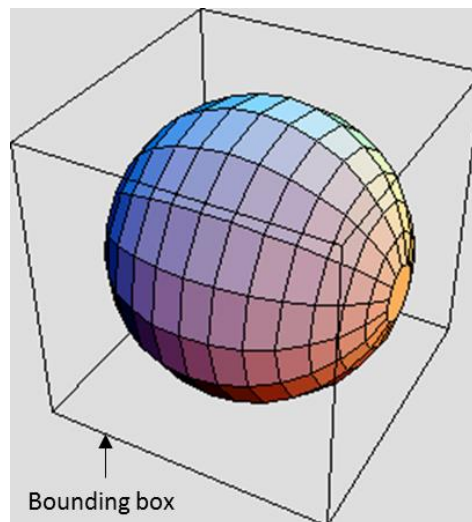


Figure 80 - Boîte englobante

$$Cr = \frac{V_{pièce}}{V_{ext}} \quad (132)$$

Deux formules du facteur de réduction sont nécessaires en fonction de la valeur du ratio entre les deux volumes (Equation (133)).

$$\partial = \begin{cases} 0.3422 * Cr^2 + 0.2468 * Cr + 0.45 & \text{si } Cr < 0.4 \\ 0.417 * e^{0.9283 * Cr} & \text{si } Cr > 0.4 \end{cases} \quad (133)$$

Après la réalisation de plusieurs tests, ils proposent l'équation (134) afin d'exprimer le temps de lasage pour la boîte englobante. Ce temps dépend de facteurs expérimentaux, de l'aire de la section S , de la longueur x dans la direction x et de la hauteur z .

$$t_{xy_box} = (0.042 * x^{-0.1809} * S) * z \quad (134)$$

Afin de déterminer le temps de lasage d'un plateau, Rickenbacher *et al.* (2013) réalisent une régression linéaire à partir des temps de lasage de 24 plateaux différents avec des géométries et des quantités de pièces différentes. Tous les plateaux sont imprimés avec les mêmes paramètres. La régression linéaire permet d'obtenir les coefficients de régression a_0, \dots, a_5 de l'équation (135).

$$\sum_i^I T_{Build}(P_i) = a_0 + a_1 * nb_{couche} + a_2 * V_{tot} + a_3 * S_{supptot} + a_4 * \sum_i^I N_i + a_5 * S_{tot} \quad (135)$$

Avec :

P_i : Pièce de géométrie i

N_i : Nombre de pièces de géométrie i

T_{Build} : Temps de fabrication

V_{tot} : Volume total du plateau (mm^3)

$S_{supptot}$: Surface totale des supports (mm^2)

S_{tot} : Surface totale du plateau (mm^2)

Pour obtenir le temps de fabrication des pièces de chaque géométrie, le premier coefficient de régression a_0 est divisé par le nombre de pièces de cette géométrie présentes sur le plateau. Une fraction dépendante du nombre de couches $T_L(P_i)$ est obtenue en appliquant un algorithme dédié. Le coefficient a_2 est appliqué au volume de la pièce et le coefficient a_3 à la surface des supports de la pièce. Le temps de lasage d'une géométrie de pièces est calculé à partir de l'équation (136).

$$T_{Build}(P_i) = \frac{a_0}{\sum_i^I N_i} + T_L(P_i) + a_2 * V_{pièce}(P_i) + a_3 * S_{supp}(P_i) \quad (136)$$

2. SYNTHÈSE

Le Tableau 52 synthétise les paramètres pris en compte dans chaque article.

Paramètres	Articles								
	Ruffo et al. 2006	Wilson, 2006	Zhang et Bernard, 2013	Di Angelo et Di Stefano, 2011	Mahadik et Masel, 2018	Byun et Lee, 2005	Pilot, 2016	Rickenbacher et al. 2013	Modèle proposé
Pièces	Volume pièce	x	x	x			x	x	x
	Dimensions	x							
	Densité de la pièce						x		
	Section moyenne de la pièce						x		x
	Surface de la pièce			x			x	x	
Supports	Hauteur support		x						
	Densité du support						x		
	Section moyenne du support						x	x	
	Volume support								x
Couches	Épaisseur couche		x	x	x	x	x		x
	Nombre de couches pièce		x			x	x	x	x
	Nombre de couches support		x						x
	Volume d'une couche pièce					x			
	Volume d'une couche support					x			
Plateau	Volume total	x							
	Hauteur	x			x			x	x
	Nombre de pièces		x					x	x
	Temps entre deux couches				x		x		x
Machine	Diamètre laser		x	x			x	x	x
	Ecart vecteur		x	x				x	x
	Taux de recouvrement		x					x	
	Vitesse de saut		x						
	Vitesse de lasage		x	x				x	x
	Vitesse de lasage surfacique pièce						x		
	Vitesse de lasage surfacique support						x		
	Vitesse volumique						x	x	
	Nombre de lasers			x					
	Vitesse de descente de la plateforme						x		
	Taux de déposition						x		
	Taux de hachage							x	
Taux de solidification				x	x				

Tableau 52 - Paramètres pris en compte dans le calcul du temps de lasage

Les différences entre les modèles sont parfois juste des différences de point de vue. Travailler avec la hauteur de la pièce et l'épaisseur de couche ou avec le nombre de couches donnera le même résultat.

Les modèles de la littérature sont appliqués aux sept pièces industrielles dont nous connaissons les temps. Les résultats sont présentés dans le Tableau 53.

PARTIE III - Niveau tactique

Nom de la pièce		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Pièce								
Volume pièce	mm ³	160000,00	350000,00	655000,00	177410,00	1403226,00	7300000,00	7300000,00
Volume support	mm ³	90000,00	5000,00		121648,00	574686,00		
Surface pièce	mm ²	180000,00	193900,00	167000,00				
Hauteur	mm	94,06	180,00	215,00	107,12	146,34	320,00	320,00
Paramètres								
Epaisseur couche	mm	0,03	0,06	0,06	0,04	0,045	0,04	0,05
Largeur trait laser / Diamètre de spot	mm	0,08	0,10	0,10	0,07	0,07	0,07	0,07
Ecart vecteur	mm	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05
Vitesse de balayage pièce	mm/min	60000,00	45000,00	45000,00	90000,00	90000,00	90000,00	108000,00
Vitesse de balayage support	mm/min	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00
Nombre de lasers		1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00
Temps d'UNE mise en couche donné	min	0,16	0,23	0,15	0,07	0,05	0,13	0,14
Calculs intermédiaires								
Nombre de couches		3135,43	3000,00	3583,33	2678,00	3252,00	8000,00	6400,00
Section moyenne	mm ²	1700,99	1944,44	3046,51	1656,18	9588,81	22812,50	22812,50
Temps fabrication donné pour une pièce	min	2832,00	2612,20	3078,00	1713,85	11023,30	33616,80	22200,00
Xu	Temps (min)	7440,89	5630,56	9634,72	6408,91	36790,60	153123,33	122562,67
	Erreur	-163%	-116%	-213%	-274%	-234%	-355%	-452%
Byun	Temps (min)	2718,68	3292,60	5389,36				
	Erreur	4%	-26%	-75%				
Wilson	Temps (min)	38194,44	26111,11	48518,52	19778,97	139535,24	579365,08	386243,39
	Erreur	-1249%	-900%	-1476%	-1054%	-1166%	-1623%	-1640%
Zhang	Temps (min)	1211,11	1368,11	2487,78	352,00	2474,83	28968,25	19312,17
	Erreur	57%	48%	19%	79%	78%	14%	13%

Tableau 53 - Application des modèles de la littérature

Les modèles de Xu *et al.* (1999) et de Wilson (2006) surestiment de plus de 163% le temps de fabrication. Pour le modèle de Wilson, il manque la valeur d'un paramètre qui augmenterait le temps de fabrication.

Le modèle de Zhang et Bernard (2013) sous-estime le temps de fabrication surtout qu'il manque la valeur d'un paramètre qui diminuerait encore le temps de fabrication.

Nous avons pu appliquer le modèle de Byun et Lee (2005) à titre indicatif sur les trois premières pièces car nous connaissons la surface des pièces. Au stade de l'étude, nous ne connaissons pas la surface des pièces. Sur ces trois pièces, le modèle de Byun a tendance à surestimer le temps de fabrication.

Nous ne pouvons pas appliquer les autres modèles car ils nécessitent des données trop précises :

- Le volume de pièce et de support par couche (Mahadik et Masel, 2018) ;
- Le découpage de la pièce en voxel (Baumers *et al.*, 2012) ;
- Les dimensions de la pièce (Ruffo *et al.*, 2006) ;
- La surface des supports (Rickenbacher *et al.*, 2013).

Nous ne pouvons pas prendre en compte les dimensions de la pièce, la hauteur ou la section moyenne des supports et les volumes d'une couche pièce ou d'une couche support inconnus à ce stade de l'étude. En nous appuyant sur les différents modèles de la littérature, nous proposons une nouvelle modélisation qui permet de prendre en compte l'ensemble des paramètres nécessaires tout en ne travaillant qu'avec les données disponibles au moment de l'étude de faisabilité.

3. PROPOSITION DE MODELISATION

Les modèles de la littérature étudiés prennent en compte des paramètres qui nécessitent une bonne connaissance de la pièce. Or, lors de l'étude de faisabilité, nous ne connaissons pas précisément ces données. Nous proposons donc la modélisation ci-dessous.

Le temps de fabrication est séparé en deux temps : le temps de mise en couche $t_{mise\ en\ couche}$ et le temps de lasage t_{lasage} . La préparation de la mise en couche se fait souvent en temps masqué, en même temps que le lasage. Cependant, dans certains cas, le temps de lasage peut être inférieur au temps de préparation de la mise en couche $t_{prep\ mise\ en\ couche}$ et il faut attendre la fin de la préparation de la mise en couche pour pouvoir réaliser la mise en couche suivante. C'est donc le plus grand de ces deux temps qui est utilisé (Equation (137)).

$$t_{fabrication} = t_{mise\ en\ couche} + \max(t_{lasage}; t_{prep\ mise\ en\ couche}) \quad (137)$$

Pour chaque temps, un temps unitaire pour une couche, respectivement $tu_{mise\ en\ couche}$, $tu_{lasage\ couche}$ et $tu_{prep\ mise\ en\ couche}$ sont calculés puis multipliés par le nombre de couches nb_{couche} (Equations (138), (139), (140)). Le nombre de couches est le rapport entre la hauteur de la pièce $h_{pièce}$ et l'épaisseur de couche e_{couche} (Equation (141)).

$$t_{mise\ en\ couche} = nb_{couche} * tu_{mise\ en\ couche} \quad (138)$$

$$t_{lasage} = nb_{couche} * tu_{lasage\ couche} \quad (139)$$

$$t_{prep\ mise\ en\ couche} = nb_{couche} * tu_{prep\ mise\ en\ couche} \quad (140)$$

$$nb_{couche} = \frac{h_{pièce}}{e_{couche}} \quad (141)$$

Lors du calcul du temps de lasage d'une couche, la section de la pièce pour chaque couche n'est pas connue donc nous considérons la section moyenne en faisant le rapport entre le volume de la pièce $V_{pièce}$ et la hauteur de la pièce $h_{pièce}$ (Equation (142)).

$$S_{moyenne} = \frac{v_{pièce}}{h_{pièce}} \quad (142)$$

Il faut ensuite calculer une vitesse surfacique. Elle est calculée à partir des paramètres machine : la vitesse de balayage $v_{balayage\ pièce}$, le diamètre laser d_{laser} et le taux de recouvrement $taux_{recouvrement}$ qui dépend de la densité de matière souhaitée pour la pièce.

En ce qui concerne les supports, à ce stade, la seule donnée évaluable est le volume des supports $V_{support}$. Il faut calculer une vitesse volumique. La démarche est la même que pour le lasage de la pièce, la vitesse surfacique obtenue est multipliée par l'épaisseur de couche. Le temps unitaire de lasage d'une couche se calcule donc à l'aide de l'équation (143).

$$tu_{lasage\ couche} = \frac{S_{moyenne}}{v_{balayage\ pièce} * d_{laser} * (1 - taux_{recouvrement})} + \frac{V_{support}}{v_{balayage\ support} * e_{couche} * d_{laser} * (1 - taux_{recouvrement})} * \frac{1}{nb_{couche}} \quad (143)$$

Dans le cas où le temps de lasage est supérieur au temps de préparation de la mise en couche, le modèle proposé est conforme au modèle proposé dans les techniques de l'ingénieur (Pillot, 2016).

Le modèle diffère au niveau du calcul du temps de lasage d'une couche. Il sépare le lasage de la pièce et le lasage des supports et il fait le rapport entre les volumes et les vitesses volumiques $v_{construction\ laser\ pièce}$ et $v_{construction\ laser\ support}$ (Equation (144)).

$$tu_{lasage\ couche} = \frac{v_{pièce}}{v_{construction\ laser\ pièce}} + \frac{v_{support}}{v_{construction\ laser\ support}} \quad (144)$$

Les deux vitesses sont calculées de la même façon. Il s'agit du produit de la vitesse de balayage avec l'épaisseur de couche et l'écart vecteur *écart vecteur* (Equations (145), (146)).

$$v_{construction\ laser\ pièce} = v_{balayage_{pièce}} * e_{couche} * \text{écart vecteur} \quad (145)$$

$$v_{construction\ laser\ support} = v_{balayage_{support}} * e_{couche} * \text{écart vecteur} \quad (146)$$

L'écart vecteur correspond à l'écart entre les centres de deux passages de laser successifs. Il est représenté sur la Figure 81 et son calcul correspond à l'équation (147).

$$\text{écart vecteur} = d_{laser} * (1 - \text{taux de recouvrement}) \quad (147)$$

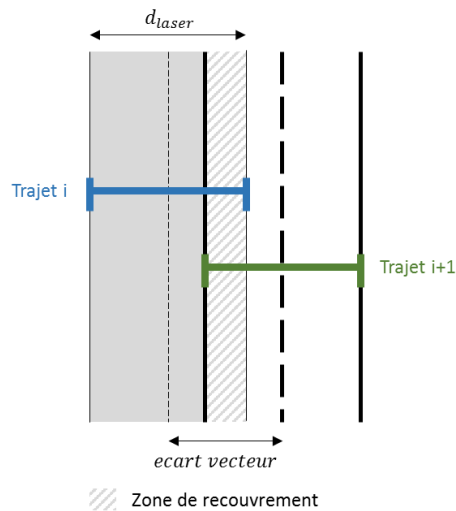


Figure 81 - Ecart vecteur

Les deux modèles sont conformes et cohérents. Ils correspondent à deux approches différentes du calcul de temps de lasage.

4. APPLICATION

L'estimateur de temps de lasage est testé sur des pièces simulées puis sur des pièces réelles.

4.1. Application sur des pièces simulées

Les modèles CAO de cinq pièces différentes ont été créés : des cylindres, une pyramide, un cube, un cylindre creux et un pavé (Figure 82). La fabrication de ces pièces a été simulée sur un logiciel de fabrication additive.

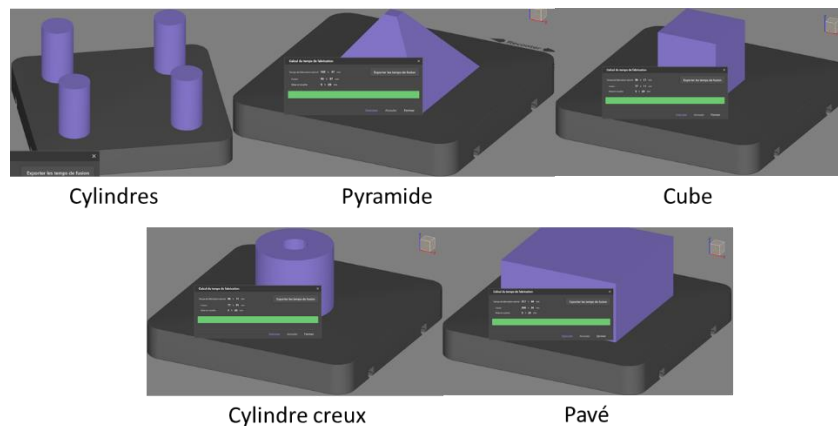


Figure 82 - Pièces simulées

Les paramètres sont identiques pour toutes les pièces (Tableau 54).

Paramètres		
Epaisseur couche	mm	0,04
Largeur trait laser / Diamètre de spot	mm	0,07
Ecart vecteur	mm	0,04
Taux de recouvrement %		0,43
Vitesse de balayage pièce	mm/min	90000,00
Vitesse de balayage support	mm/min	90000,00
Nombre de lasers		1,00
Temps préparation d'une mise en couche	min	0,15
Temps d'une mise en couche donné	min	0,22

Tableau 54 - Paramètres de fabrication sur la machine A

Pour chaque pièce, le volume pièce, la hauteur et le nombre de pièces par plateau sont saisis. Toutes les pièces sont fabriquées sans support.

Le Tableau 55 présente les résultats des calculs sur l'ensemble de ces pièces. Le premier temps calculé est le temps de mise en couche. Nous comparons le temps obtenu avec le temps donné par le logiciel sur une machine A et nous obtenons une erreur de 0%.

Les temps de lasage calculés sont comparés aux temps de lasage donnés par la simulation. Nous obtenons une erreur de -2% pour la pyramide et une erreur de 0% pour les autres pièces.

Nous obtenons donc, sur l'ensemble du temps de fabrication, qui est la somme du temps de mise en couche et du temps de lasage, une erreur de -1% pour la pyramide et de 0% sur les autres pièces.

Nom de la pièce		Cylindres	Pyramide	Cube	Cylindre creux	Pavé
Pièce						
Volume pièce	mm3	994479,00	1231333,00	1000000,00	996949,00	4000000,00
Volume support	mm3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hauteur	mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Nombre de pièces par plateau		4	1	1	1	1
Mise en couche						
Nombre de couches		2500,00	2500,00	2500,00	2500,00	2500,00
Temps préparation mise en couche	min	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Temps mise en couche	min	550,00	550,00	550,00	550,00	550,00
Temps mise en couche donné	min	549,00	549,00	549,00	549,00	549,00
Erreur		0%	0%	0%	0%	0%
Méthode 1						
Temps laser						
Section moyenne	mm2	9944,79	12313,33	10000,00	9969,49	40000,00
Temps pour une couche pièce	min	2,76	3,42	2,78	2,77	11,11
Temps pour une couche support	min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Temps laser (pour une pièce)	min	6906,10	8550,92	6944,44	6923,26	27777,78
Temps laser donné (pour une pièce)	min	6933,00	8424,00	6947,00	6928,00	27777,00
Erreur pour une pièce		0%	-2%	0%	0%	0%
Temps fabrication						
Temps fabrication une pièce	min	7456,10	9100,92	7494,44	7473,26	28327,78
Temps fabrication donné pour une pièce	min	7482,00	8973,00	7496,00	7477,00	28326,00
Erreur pour une pièce		0%	-1%	0%	0%	0%

Tableau 55 - Calcul sur les pièces simulées

Les résultats sont conformes aux temps obtenus par simulation. Notre modèle est donc validé sur des pièces géométriquement simples. Les pièces fabriquées industriellement ont des géométries plus complexes. Nous allons maintenant appliquer ce modèle sur des pièces industrielles.

4.2. Application sur des pièces industrielles

Le modèle est désormais confronté à des pièces industrielles dont les temps réels de fabrication sont connus. Les données et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 56.

Nom de la pièce		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Pièce								
Volume pièce	mm3	160000,00	350000,00	655000,00	177410,00	1403226,00	7300000,00	7300000,00
Volume support	mm3	90000,00	5000,00		121648,00	574686,00		
Hauteur	mm	94,06	180,00	215,00	107,12	146,34	320,00	320,00
Nombre de pièces par plateau		1	1	1	1	1	1	1
Paramètres								
Epaisseur couche	mm	0,03	0,06	0,06	0,04	0,045	0,04	0,05
Largeur trait laser / Diamètre de spot	mm	0,08	0,10	0,10	0,09	0,07	0,07	0,07
Ecart vecteur	mm	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
Taux de recouvrement %		0,50	0,50	0,50	0,56	0,29	0,29	0,29
Vitesse de balayage pièce	mm/min	60000,00	45000,00	45000,00	90000,00	90000,00	90000,00	108000,00
Vitesse de balayage support	mm/min	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00
Nombre de lasers		1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00
Temps préparation d'une mise en couche	min				0,15	0,05		
Temps d'UNE mise en couche donné	min	0,15	0,23	0,13	0,07	0,05	0,13	0,14
Mise en couche								
Nombre de couches		3135,43	3000,00	3583,33	2678,00	3252,00	8000,00	6400,00
Temps préparation mise en couche	min	0,00	0,00	0,00	401,70	162,60	0,00	0,00
Temps mise en couche	min	470,32	700,00	477,78	178,53	162,60	1040,00	896,00
Temps mise en couche donné	min	492,00	780,00	498,00	187,60	173,43	1036,80	900,00
Erreur		4%	10%	4%	5%	6%	0%	0%
Temps laser								
Section moyenne	mm2	1700,99	1944,44	3046,51	1656,18	9588,81	22812,50	22812,50
Temps pour une couche pièce	min	0,71	0,86	1,35	0,46	2,13	5,07	4,22
Temps pour une couche support	min	0,27	0,01	0,00	0,32	0,87	0,00	0,00
Temps construction laser pièce	min	2222,22	2592,59	4851,85	1232,01	6929,51	40555,56	27037,04
Temps construction laser support	min	833,33	18,52	0,00	844,78	2837,96	0,00	0,00
Temps laser (pour une pièce)	min	3055,56	2611,11	4851,85	2076,79	9767,47	40555,56	27037,04
Temps laser donné (pour une pièce)	min	2340,00	1832,20	2580,00	1123,63	10706,75	32580,00	21300,00
Erreur pour une pièce		-31%	-43%	-88%	-85%	9%	-24%	-27%
Temps fabrication								
Temps fabrication une pièce	min	3525,87	3311,11	5329,63	2255,33	9930,07	41595,56	27933,04
Temps fabrication donné pour une pièce	min	2832,00	2612,20	3078,00	1311,23	10880,18	33616,80	22200,00
Erreur pour une pièce		-25%	-27%	-73%	-72%	9%	-24%	-26%

Tableau 56 - Calcul sur les pièces industrielles

Le temps de mise en couche qui est lié directement au nombre de couches et au temps unitaire de mise en couche est à nouveau validé. Les erreurs sont inférieures à 10% et peuvent s'expliquer par l'ajout de couches en début de fabrication afin d'anticiper l'étape de découpage des pièces.

En ce qui concerne le temps de lasage, les écarts sont importants. Ils vont de -88% à 9%. Ils restent néanmoins équivalents voire moindre par rapport aux erreurs calculées à partir des modèles de la littérature (Tableau 53). Pour 6 pièces sur 7, le temps de lasage est surestimé. Le manque de données industrielles ne permet pas d'expliquer ces différences. Ces données pourraient permettre de déterminer des coefficients géométriques ou cinématiques afin de prendre en compte des paramètres géométriques, par exemple, que nous ne prenons pas en compte pour le moment.

5. CONCLUSION

Les modèles de la littérature nécessitent la connaissance de paramètres trop précis au stade de l'étude de faisabilité. De plus, lors de leur application, des écarts importants apparaissent. Nous nous appuyons sur ces différents modèles pour proposer une nouvelle modélisation qui permet de prendre en compte l'ensemble des paramètres nécessaires tout en ne travaillant qu'avec les données dont nous disposons au moment de l'étude de faisabilité. Le modèle proposé est cohérent avec le modèle publié dans les techniques de l'ingénieur par Pillot (2016). De plus, le modèle est validé sur des pièces géométriquement simples simulées sur le logiciel. En revanche, lors de l'application sur des pièces industrielles, les écarts vont de -88% à 9%. Au vu de la littérature et de la précision des données, ces écarts ne sont pas aberrants. Nous ne disposons pas des données nécessaires afin d'expliquer ces écarts ou d'affiner le modèle. Dans le modèle de calcul de coût, l'utilisateur a le choix d'utiliser le temps de lasage calculé par l'estimateur de temps de lasage ou de saisir un temps de lasage.

CHAPITRE 6. APPLICATION

Le modèle de coût global présenté dans le CHAPITRE 4, est désormais appliqué sur deux pièces industrielles.

1. PRESENTATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE

L'outil informatique se présente sous la forme d'un fichier Excel. Ce fichier est composé de trois onglets pour saisir les données, d'un onglet qui concerne les temps en fonction de la complexité et d'un onglet de calcul des coûts. Les trois onglets de saisie sont :

- « Machine » : données concernant la machine et les coûts liés ;
- « Pièce » : données sur les dimensions, la reconception, la préparation, la poudre, le plateau, le réglage de la machine et les post-traitements ;
- « Industrialisation » : données sur l'OF et sur la validation de la pièce.

L'onglet « Complexité » contient pour chaque degré de complexité et chaque étape (reconception, préparation, nettoyage, détensionnement, découpe, usinage, sablage, autre, traitement thermique) le temps nécessaire.

L'onglet « Coûts » présentent l'ensemble des coûts calculés.

La présentation de l'outil sera plus détaillée au cours de l'application du modèle à des pièces industrielles.

2. APPLICATION A DES PIECES INDUSTRIELLES

Nous allons maintenant appliquer notre modèle sur deux pièces industrielles.

Les données concernant la machine, les complexités et l'industrialisation sont les mêmes pour les deux pièces.

La première étape consiste à saisir les paramètres de la machine utilisée pour fabriquer les pièces (Tableau 57). La machine B nécessite un investissement de 1 000 000 € amortis sur 7 ans. Elle consomme 20kW/h en fonctionnement. Les frais annuels de maintenance sont estimés à 25 000 €. Une machine de fabrication additive peut tourner en continu ce qui représente 8760h par an. Une fois que les fermetures, les arrêts de maintenance et les temps non productifs sont enlevés, les industriels considèrent que la machine peut être utilisée 5000h en lasage. Le temps d'intervention manuelle entre deux lancements afin de retirer un plateau et de lancer la fabrication du plateau suivant est de 2h.

La machine		
Données	Unité	Valeur
Nom machine		B
Coût d'achat et d'installation	€	700 000,00 €
Coût des fonctions annexes	€	300 000,00 €
Durée d'amortissement	An	7
Consommation	kW/h	20
Frais annuels de maintenance	€	25 000,00 €
Nombre d'heures d'utilisation	H/an	5000
Temps intervention manuelle	h	2

Tableau 57 - Données sur la machine

Il faut ensuite rentrer les paramètres de coûts horaires liés à l'opérateur, à la consommation électrique et au gaz d'inertage (Tableau 58).

Coûts		
Données	Unité	Valeur
Coût horaire opérateur	€/h	90,00 €
Coût kWh	€	0,15 €
Coût horaire du gaz d'inertage	€/h	0,40 €

Tableau 58 - Données sur les coûts

Viennent ensuite les données qui concernent l'industrialisation, avec d'une part les données concernant le plateau à fabriquer et d'autre part les données concernant la phase de validation des pièces (Tableau 59).

Dans les deux cas, il n'y a qu'une seule pièce par plateau, le temps de placement est donc nul. Il est prévu de réaliser 100 pièces ce qui représente 100 plateaux. 5 pièces tests sont nécessaires pour réaliser l'ensemble des tests de validation dont le coût est de 10 000 €.

L'industrialisation		
L'OF		
Données	Unité	Valeur
Nombre pièces par plateau		1
Temps placement	h	0
Taux de rebut	%	10%

La validation		
Données	Unité	Valeur
Nombre de pièces prévues		100
Nombre de plateaux		100
Nombre de pièces test		5,00
Tests de validation	€	10 000,00 €

Tableau 59 - Industrialisation

Afin de calculer le coût de reconception et de post-traitements, il faut remplir le tableau de complexité (Tableau 60). Pour chaque niveau de complexité et pour chaque étape, un temps en heure est défini. Dans ce cas, il n'y a pas de post-traitement supplémentaire à réaliser donc la colonne « Autre » ne contient pas d'information.

Complexité									
Complexité	Reconception	Préparation	Nettoyage	Détensionnement	Découpe	Usinage	Sablage	Autre	Traitement thermique
1	15	5	0,2	2	1	2	0,1	0	3
2	30	10	0,3	4	1,5	2,5	0,25	0	3,5
3	50	15	0,4	6	2	3	0,5	0	4
4	75	20	0,5	8	2,5	3,5	1	0	4,5
5	100	25	1	10	3	4	2	0	5

Tableau 60 - Temps en fonction du degré de complexité

2.1. Pièce 1

2.1.1. Présentation de la pièce

Il faut ensuite saisir l'ensemble des données sur la pièce étudiée :

- les données dimensionnelles et celles liées à la reconception et à la préparation ;
- les données liées à la poudre ;
- les données liées au plateau utilisé ;
- les paramètres de réglage de la machine ;
- les données liées aux post-traitements.

Pour des questions de confidentialité, toutes les valeurs ne sont pas données.

La pièce 1 a une hauteur de 94mm pour un volume de 160 000 mm³ avec 90 000 mm³ de support. La reconception et la préparation sont considérées de complexité 1.

Il s'agit d'une pièce en titane dont la densité est de 4.2 g/cm³ et le prix au kilo est d'environ 350€. La poudre brûlée, non recyclable, représente 20% du volume de la pièce et des supports. Dans ce cas industriel, le traitement de la poudre n'est pas pris en compte, il est fait en temps masqué et le coût est considéré négligeable.

Le plateau coûte 1000 € et il est utilisable 10 fois. Entre chaque utilisation, un temps de traitement de 2h à 90 € de l'heure est nécessaire. Le coût horaire comprend le coût des machines et le coût opérateur.

Dans le cas de cette pièce, le temps de lasage est connu. Donc nous utilisons le temps de lasage donné pour cette pièce.

La poudre est recyclée, le facteur est mis à 1. Le volume de poudre utilisé est donc le volume de poudre minimal.

Une fois lasée, la pièce 1 doit être nettoyée et détensionnée. Puis, elle est séparée du plateau par l'opération de découpe, sablée et usinée. Pour chaque opération, un degré de complexité est défini par l'utilisateur et le tableau de complexité permet d'obtenir les temps associés.

Le traitement thermique est réalisé par lot de 4 plateaux. Un lancement coûte 1000€ donc le prix au plateau est égal à 250€.

2.1.2. Analyse des coûts

Une fois que toutes les données sont saisies, l'ensemble des calculs de coûts est fait.

Afin d'avoir une analyse visuelle rapide, un diagramme représentant la répartition des coûts est tracé (Figure 83).

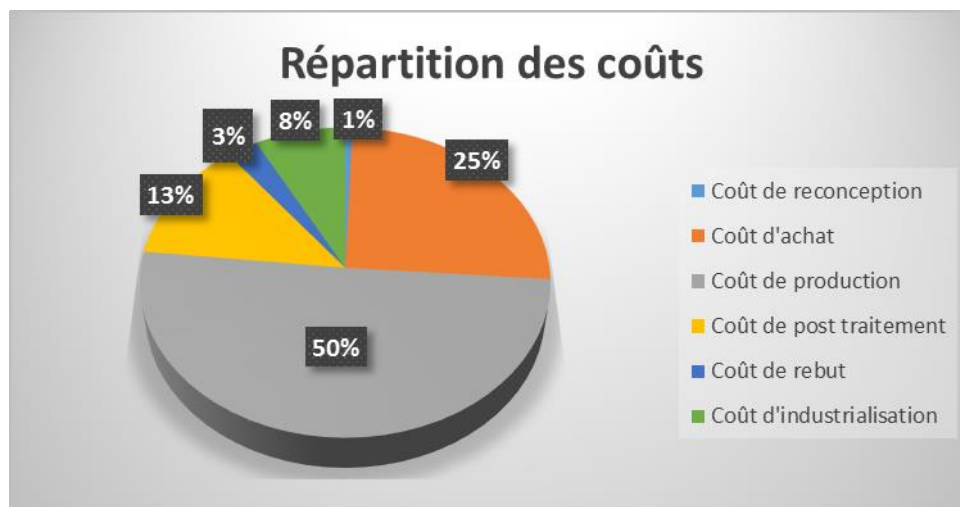


Figure 83 - Répartition des coûts

Comme évoqué dans la bibliographie, le coût de production est le coût prépondérant. Il représente 50% du coût total. Le coût d'achat représente également une part importante du coût total puisqu'il correspond à 25% du coût total. Le coût de post-traitement et le coût d'industrialisation représentent une part significative à hauteur, respectivement, de 13% et 8%. En revanche, les coûts de reconception et de rebut représentent une part non significative de 1% et 3%, respectivement, du coût total.

A partir d'un benchmark extérieur et de calculs internes, l'industriel a obtenu un coût objectif pour cette pièce. Le chiffrage ne prend pas en compte la phase d'industrialisation. Nous allons analyser le coût de revient d'une pièce. Afin de calculer l'écart entre notre valeur calculée et le coût objectif de l'industriel, le coût plateau est retiré car il n'est pas pris en compte dans le chiffrage industriel. L'écart sur le coût de revient est de 12%. Cet écart peut s'expliquer par une structure de coût différente. En effet, dans les chiffrages, les coûts pris en compte ne sont pas toujours exactement les mêmes. Des structures de coût spécifiques à chaque société peuvent faire varier les coûts de structure par exemple.

2.2. Pièce 2

2.2.1. Présentation de la pièce

La pièce 2 a une hauteur de 180 mm pour un volume de 350 000 mm³ avec 5 000 mm³ de support. La reconception et la préparation sont considérées de complexité 1.

Il s'agit d'une pièce en titane dont la densité est de 4.2 g/cm³ et le prix au kilo tourne autour de 350€. La poudre brûlée, non recyclable, représente 20% du volume de la pièce et des supports. Dans ce cas industriel, le traitement de la poudre n'est pas pris en compte, il est fait en temps masqué et le coût est considéré négligeable.

Le plateau coûte 1000 € et il est utilisable 10 fois. Entre chaque utilisation, un temps de traitement de 2h à 90 € de l'heure est nécessaire. Le coût horaire comprend le coût des machines et le coût opérateur.

Dans le cas de cette pièce, le temps de lasage est connu. Donc nous utilisons le temps de lasage donné pour cette pièce.

La poudre est recyclée donc le facteur est mis à 1. Le volume de poudre utilisé est donc le volume de poudre minimal.

Une fois lasée, la pièce 2 doit être nettoyée et détensionnée. Puis elle est séparée du plateau par l'opération de découpe, sablée et usinée. Pour chaque opération, un degré de complexité est défini par l'utilisateur et le tableau de complexité permet d'obtenir les temps associés.

Le traitement thermique est réalisé par lot de 4 plateaux. Un lancement coûte 1000€ donc le prix au plateau est de 250€.

2.2.2. Analyse des coûts

Une fois toutes les données saisies, l'ensemble des calculs de coûts est fait.

Afin d'avoir une analyse visuelle rapide, un diagramme représentant la répartition des coûts est réalisé (Figure 84).

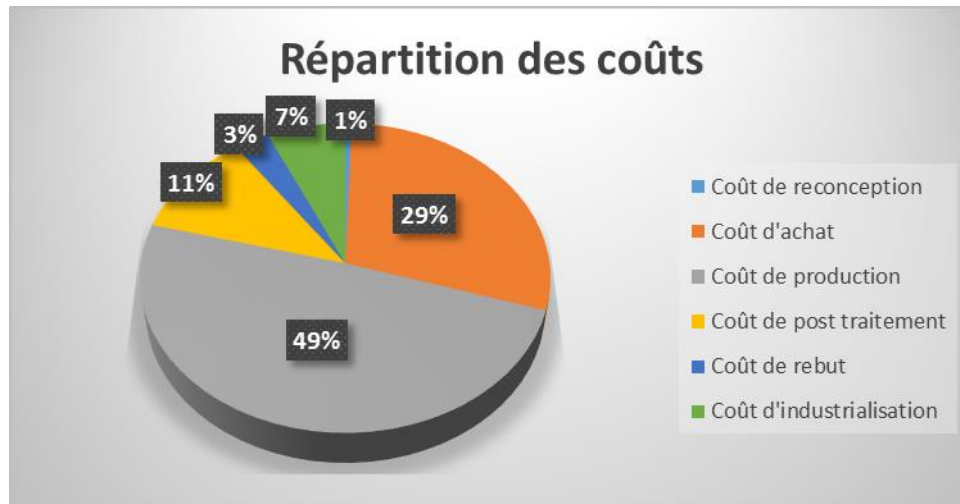


Figure 84 - Répartition des coûts

De même que pour la pièce 1, le coût de production est le coût prépondérant. Il représente 49% du coût total. Le coût d'achat représente également une part importante du coût total puisqu'il correspond à 29% du coût total. Le coût de post-traitement et le coût d'industrialisation représentent une part significative à hauteur, respectivement, de 11% et 7%. En revanche, les coûts de reconception et de rebut représentent une part non significative de, respectivement, 1% et 3% du coût total.

La même démarche est réalisée par l'industriel pour obtenir un coût objectif.

Le chiffrage ne prend pas en compte la phase d'industrialisation. Nous allons analyser le coût de revient d'une pièce. Afin de calculer l'écart entre notre valeur calculée et le coût objectif de l'industriel, le coût plateau est retiré car il n'est pas pris en compte dans le chiffrage industriel. L'écart sur le coût de revient est de 16%. Les raisons de cet écart sont les mêmes que pour la pièce 1.

3. CONCLUSION

Notre modèle de coûts a tendance à surestimer le coût de revient d'une pièce. Cet écart peut s'expliquer par une structure de coût différente. En effet, dans les chiffrages, les coûts pris en compte ne sont pas toujours exactement les mêmes. Des structures de coût spécifiques à chaque société peuvent faire varier les coûts de structure par exemple. De plus, les chiffrages donnés à titre comparatif sont réalisés sur des pièces existantes alors que notre chiffrage est fait à une étape où la pièce n'est pas précisément connue. Avec l'utilisation des niveaux de complexité, les coûts de reconception, de préparation et de post-traitements sont estimés.

CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. CONCLUSION

L'objectif est de permettre aux entreprises de disposer d'un outil permettant de calculer le prix de revient complet d'une pièce avec une première approche macro-économique pour pouvoir décider de (re)concevoir cette pièce en vue d'une production en fabrication additive. Cet outil doit reposer sur un modèle de coût fiable qui satisfait les deux contraintes principales suivantes :

- Couvrir l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements, pour permettre d'estimer le bénéfice d'un changement de procédé ou de sa mise en œuvre ;
- Permettre de prendre des décisions au début de l'étude de faisabilité, alors que toutes les informations nécessaires ne sont pas disponibles ou connues précisément.

Plusieurs méthodes d'évaluation du coût de revient d'une pièce en fabrication additive sont proposées dans la littérature. L'analyse de ces modèles fait apparaître que toutes les méthodes n'utilisent pas le même paramétrage, ce qui influe sur le périmètre étudié et sur la fiabilité des résultats. Chaque modèle prend en compte des paramètres spécifiques en fonction de l'objectif recherché.

Notre étude se situe au niveau de l'étude de faisabilité afin de savoir s'il est économiquement pertinent de prévoir de fabriquer la pièce en fabrication additive alors que les articles de la littérature se situent au niveau de la phase de fabrication, lorsque la pièce est entièrement prête à être produite en fabrication additive. Nous ne connaissons pas précisément certains paramètres utilisés dans la littérature et aucun modèle ne prend en compte l'ensemble des paramètres que nous souhaitons considérer dans notre modèle.

A partir de la bibliographie, nous avons établi un nouveau modèle de coût adapté à notre problématique. Nous proposons un modèle de coût original qui prend en compte l'ensemble du processus, de la conception à la pièce finie. Pour cela, des classes de complexité sont proposées pour estimer le coût des phases de conception et de post-traitements. Les modèles proposés dans la littérature sont adaptés à ce cas d'emploi. Ainsi, ce modèle de coût permet de prendre des décisions au niveau tactique, quant à la mise en œuvre de la fabrication additive pour la pièce étudiée.

L'analyse de la littérature montre qu'un des paramètres critiques concerne l'estimation du temps de lasage nécessaire à la fabrication d'une pièce. Le coût de fabrication de la pièce est directement proportionnel au temps de production et donc au temps de lasage (Mahadik et Masel 2018). Le temps de lasage est un facteur qui a un fort impact sur le coût de production et donc sur le coût global de la pièce (Byun et Lee 2005). Le nombre de paramètres à prendre en compte rend le temps de lasage difficile à calculer avec précision. Hällgren *et al.* (2016) ajoutent que le temps de lasage est difficile à prévoir car il dépend de la forme de la pièce et du matériau.

Les modèles de la littérature nécessitent la connaissance de paramètres trop précis au stade de l'étude de faisabilité. De plus, lors de leur application, des écarts importants apparaissent. Nous nous appuyons sur ces différents modèles pour proposer une nouvelle modélisation qui permet de prendre en compte l'ensemble des paramètres nécessaires en travaillant avec les données disponibles au moment de l'étude de faisabilité. Le modèle proposé est cohérent avec le modèle publié dans les techniques de l'ingénieur par Pillot (2016). De plus, le modèle est validé sur des pièces géométriquement simples simulées sur un logiciel de fabrication additive. En revanche, lors de l'application sur des pièces industrielles, les écarts vont de -88% à 9%. Ces écarts restent conformes aux écarts produits par la littérature. Nous ne disposons pas des données nécessaires afin d'expliquer ces écarts ou d'affiner le modèle. Dans le modèle de calcul de coût, l'utilisateur a le choix d'utiliser le temps de lasage calculé par l'estimateur de temps de lasage ou de saisir un temps de lasage.

L'étude bibliographique des coûts en fabrication additive montre que la fabrication additive a un impact positif sur l'ensemble des coûts liés à la fabrication. Néanmoins, pour l'instant, les coûts liés à l'investissement et à l'achat des matières premières sont plus importants que pour les procédés traditionnels. Cette affirmation est confirmée par l'application de notre modèle sur des pièces industrielles. En effet, le coût de production est le coût prépondérant, il représente la moitié du coût total. Le coût d'achat représente également une part importante du coût total puisqu'il correspond à environ un quart du coût total.

Notre modèle de coûts a tendance à surestimer le coût de revient d'une pièce industrielle. Cet écart peut s'expliquer par une structure de coût différente. En effet, dans les chiffrages, les coûts pris en compte ne sont pas toujours exactement les mêmes. Des structures de coût spécifiques à chaque société peuvent faire varier les coûts de structure par exemple. De plus, les chiffrages donnés à titre comparatif sont réalisés sur des pièces existantes alors que notre chiffrage est fait à une étape où nous ne connaissons pas précisément la pièce. Avec l'utilisation des niveaux de complexité, les coûts de reconception, de préparation et de post-traitements sont estimés.

En nous appuyant sur la littérature, nous proposons un modèle de coût qui permet d'estimer le coût de revient d'une pièce au moment de l'étude de faisabilité. Il s'appuie soit sur un temps de lasage donné soit sur un temps de lasage calculé grâce à l'estimateur de temps de lasage proposé. Il donne des résultats cohérents avec la réalité qui permettent d'aider le décideur dans son choix technologique pour une pièce.

2. PERSPECTIVES

Il reste encore difficile aujourd'hui d'estimer précisément le temps de lasage d'une pièce. Les modèles proposés dans la littérature et l'estimateur proposé donnent des écarts importants avec les temps de lasage réels. Une étude plus fine de la géométrie des pièces et de leur temps de lasage pourrait permettre d'affiner le modèle, grâce à des coefficients expérimentaux par exemple.

Le modèle proposé prend en compte l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements. En revanche, il ne permet pas de considérer les gains réalisables grâce à la fabrication additive. Si la comparaison s'arrête au coût de revient de la pièce, la fabrication additive est souvent plus chère mais lorsque d'autres coûts, hors fabrication sont inclus, ou lorsque d'autres indicateurs que le coût sont pris en compte, la fabrication additive peut devenir plus intéressante.

Weller *et al.* (2015) estiment que la réduction des temps de réception de la commande et de traitement, du délai de livraison, du coût marginal de production, des coûts de conception par l'amélioration des produits, des coûts d'installation supplémentaires sur les produits nouvellement modifiés, des coûts d'installation directs, et des coûts liés au gaspillage selon la configuration ne conduit pas nécessairement à une augmentation significative des coûts après les investissements initiaux dans les systèmes où la fabrication additive est utilisée.

En combinaison avec un processus make-to-order, le temps total de réalisation peut être réduit et les coûts de reconfiguration et de stocks peuvent être éliminés. Par contre les coûts marginaux de production restent constants après les investissements. Néanmoins, des débits plus élevés, une meilleure qualité, et moins de lots défectueux peuvent justifier de payer plus cher les machines et avoir des technologies plus avancées.

D'autres éléments, abordés au niveau opérationnel peuvent également avoir un impact sur les coûts en fabrication additive. Si la pièce à réaliser est un ensemble de pièces ou si le client commande plusieurs pièces, le coût de production d'une pièce peut dépendre de la répartition des différentes pièces sur les plateaux. Par exemple, est-il plus rentable de produire des plateaux de chaque référence ou de répartir des pièces de références différentes sur chaque plateau ? Les coûts de production sont directement associés aux lots de pièce. Deux facteurs influent directement sur les lots : la répartition des pièces par plateau et la taille économique des lots pour les traitements thermiques qui sont nécessaires pour les pièces métalliques. Il peut être intéressant de prendre en compte ces facteurs dans le calcul du prix de revient d'une pièce ou d'un produit.

Les technologies par enlèvement de matière sont aujourd'hui, économiquement, plus viables mais pour certains domaines (médical, dentaire, automobile, aéronautique) la personnalisation de masse, l'allègement et la réduction de la supply chain rendent la fabrication additive économiquement valable (White et Lynskey 2013).

Des coûts spécifiques à chaque application peuvent rendre la fabrication additive plus compétitive. Par exemple, en aéronautique, la fabrication additive peut permettre de réduire le coût lié à l'immobilisation de l'avion.

Il faudrait donc poursuivre l'analyse pour prendre en compte les avantages et les apports de la fabrication additive comme la diminution du nombre de pièces, l'ajout de fonctionnalités et la diminution des coûts tout au long de la supply chain. Ces avantages peuvent avoir un effet positif sur le coût global d'un produit, sur les coûts de personnalisation, de stockage, de changement de série ou encore de transport.

Partie IV

Niveau opérationnel

PARTIE IV. NIVEAU OPERATIONNEL

TABLE DES NOTATIONS	195
CHAPITRE 1. INTRODUCTION : LES DIFFERENTES PROBLEMATIQUES D'ORDONNANCEMENT EN FABRICATION ADDITIVE	199
1. DES COMMANDES AUX ORDRES DE FABRICATION	200
2. TRAITEMENT THERMIQUE PAR LOT DE PLATEAUX	201
3. POST-TRAITEMENT PAR LOT DE PIECES	201
4. POST-TRAITEMENTS PAR PIECE	201
5. OBJECTIF ET VERROUS	201
6. PARTIE TRAITEE DANS CES TRAVAUX	202
7. ORGANISATION DE LA PARTIE.....	202
CHAPITRE 2. BIN PACKING ET ORDONNANCEMENT	203
1. ORDONNANCEMENT EN FABRICATION ADDITIVE	203
2. BIN PACKING ET ORDONNANCEMENT	206
3. BIN PACKING	206
3.1. <i>Placement des pièces en fabrication additive</i>	206
3.2. <i>Typologie des problèmes de découpe et de placement</i>	206
3.3. <i>Méthodes</i>	207
4. ORDONNANCEMENT	207
4.1. <i>Définitions</i>	207
4.2. <i>Problèmes d'ordonnancement</i>	207
4.3. <i>Méthodes</i>	208
5. PLACEMENT DANS LA LITTERATURE	209
CHAPITRE 3. ETAT DE L'ART : OPTIMISATION ET SIMULATION	210
1. LES METHODES EXACTES	210
2. LES METHODES APPROCHEES : LES HEURISTIQUES	210
3. LES METHODES APPROCHEES : LES METAHEURISTIQUES	210
3.1. <i>Recuit simulé</i>	210
3.2. <i>Recherche Tabou</i>	211
3.3. <i>Les algorithmes évolutionnistes</i>	211
3.3.1. Les algorithmes génétiques.....	211
3.3.2. Les algorithmes de colonies de fourmis	212
3.4. <i>Entropie croisée</i>	213
3.5. <i>Méthodes d'optimisation multimodale</i>	213
3.5.1. Méthodes de niche.....	214
3.5.2. Essais particuliers	214
4. SIMULATION	215
4.1. <i>Méthodes d'évaluation de la performance</i>	215
4.2. <i>Simulation à événement discret</i>	216
5. OPTIMISATION VIA SIMULATION	216
CHAPITRE 4. ETAT DE L'ART : DECISION MULTICRITERE.....	218
1. DEFINITION : CRITERE.....	218
2. FAMILLE DE CRITERES : EXHAUSTIVITE, COHESION, NON REDONDANCE	218
3. AIDE A LA DECISION MULTICRITERE	218
4. METHODES D'EVALUATION ET D'AGREGATION	219
5. METHODES BASEES SUR LE CRITERE UNIQUE DE SYNTHESE	220
5.1. <i>Multi Attribute Utility Theory</i>	220

5.2.	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	220
5.3.	<i>Analytic Network Process</i>	220
5.4.	<i>SIMOS</i>	221
5.5.	<i>TOPSIS</i>	221
6.	METHODES DE SURCLASSEMENT DE SYNTHESE	221
6.1.	<i>PROMETHEE</i>	221
6.2.	<i>ELECTRE</i>	222
7.	CHOIX D'UNE METHODE MULTICRITERE.....	222
CHAPITRE 5. FORMALISATION MATHEMATIQUE		223
1.	NOTATIONS.....	223
2.	DONNEES D'ENTREE	223
2.1.	<i>Les commandes</i>	223
2.2.	<i>Les machines</i>	223
2.3.	<i>Les plateaux</i>	223
2.4.	<i>Les gammes</i>	224
2.5.	<i>Les compatibilités</i>	224
3.	BIN PACKING	224
3.1.	<i>Notations</i>	224
3.2.	<i>Variables de décision</i>	224
3.3.	<i>Variables liées</i>	225
3.4.	<i>Contraintes</i>	227
4.	ORDONNANCEMENT	228
4.1.	<i>Variables de décision</i>	228
4.2.	<i>Contraintes</i>	228
5.	EVALUATION	228
5.1.	<i>Respect des due dates</i>	228
5.2.	<i>Taux d'utilisation</i>	229
5.3.	<i>Coût de production</i>	229
CHAPITRE 6. APPROCHE PROPOSEE.....		230
1.	SCHEMA DE PRINCIPE	230
2.	DONNEES D'ENTREE	230
3.	EVALUATION MULTICRITERE : SIMULATION ET AHP.....	230
4.	OPTIMISATION	231
4.1.	<i>Des plateaux aux OF</i>	231
4.2.	<i>Des pièces aux OF</i>	232
CHAPITRE 7. EVALUATION MULTICRITERE ET SIMULATION		233
1.	MODELE DE SIMULATION	233
1.1.	<i>Hypothèses</i>	233
1.2.	<i>Cadre expérimental</i>	233
1.2.1.	<i>Planifications des variables d'entrée</i>	233
1.2.2.	<i>Paramètres du modèle</i>	233
1.2.3.	<i>Variables de sortie</i>	234
1.2.4.	<i>Conditions d'initialisation de la simulation</i>	234
1.2.5.	<i>Condition de terminaison de la simulation</i>	234
1.2.6.	<i>Compression et collecte des résultats</i>	234
2.	METHODE D'EVALUATION MULTICRITERE	234
2.1.	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	234
2.1.1.	<i>Etape 1</i>	236
2.1.2.	<i>Etape 2</i>	236
2.1.3.	<i>Etape 3</i>	237
2.1.4.	<i>Etape 4</i>	238

2.1.5. Etape 5	238
2.2. Application	239
3. LA FONCTION D’EVALUATION	240
CHAPITRE 8. DES PLATEAUX AUX OF : ALGORITHME GENETIQUE	241
1. LES ALGORITHMES GENETIQUES EN PLANIFICATION ET EN ORDONNANCEMENT	241
2. LES ALGORITHMES GENETIQUES APPLIQUES A DES PROBLEMES MULTI-OBJECTIFS	241
3. LE PRINCIPE DE L’ALGORITHME GENETIQUE DEVELOPPE	242
4. CREATION DE LA POPULATION INITIALE	242
5. EVALUATION DES INDIVIDUS	243
6. SELECTION DE LA POPULATION	243
6.1. <i>Sélection par loterie biaisée (wheel)</i>	243
6.2. <i>Sélection par tournoi</i>	243
6.3. <i>Sélection élitiste</i>	244
6.4. <i>Processus de sélection proposé</i>	244
7. CREATION DES NOUVEAUX INDIVIDUS	244
7.1. <i>Croisements</i>	245
7.1.1. Le croisement en un point.....	245
7.1.2. Croisement en deux points : Order Crossover (OX).....	245
7.1.3. Croisement en deux points : Linear Order Crossover (LOX)	246
7.2. <i>Mutations</i>	246
7.2.1. Mutation machine : échange de deux plateaux	246
7.2.2. Mutation machine : changement d’un plateau	247
7.2.3. Mutation de séquençement : permutation de deux plateaux	247
7.2.4. Mutation de séquençement : déplacement d’un plateau	247
7.3. <i>Processus de création des nouveaux individus</i>	247
8. CRITERE D’ARRET	249
CHAPITRE 9. DES PLATEAUX AUX OF : ENTROPIE CROISEE	250
1. CODAGE DES SOLUTIONS	250
2. INITIALISATION DE LA MATRICE DE PROBABILITE	251
3. CREATION D’UN ENSEMBLE DE SOLUTIONS POSSIBLES	252
4. SELECTION DES MEILLEURES	253
5. MISE A JOUR DE LA MATRICE DE PROBABILITES	254
CHAPITRE 10. COMPARAISON DES ALGORITHMES	255
1. CAS D’ETUDE.....	255
1.1. <i>Dimensionnement</i>	255
1.2. <i>Les commandes</i>	255
1.3. <i>Les données pièces</i>	256
1.4. <i>L’atelier</i>	257
1.5. <i>Les OF</i>	259
2. REGLAGE DE L’ALGORITHME GENETIQUE	260
3. REGLAGE DE L’ENTROPIE CROISEE	261
4. RESULTATS DE L’ALGORITHME GENETIQUE.....	262
5. RESULTATS DE L’ENTROPIE CROISEE.....	263
6. COMPARAISON	265
7. CONCLUSION.....	265
CHAPITRE 11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	266
1. CONCLUSION.....	266
2. PERSPECTIVES.....	267
2.1. <i>Double entropie croisée</i>	267
2.2. <i>Réglage des algorithmes</i>	269

2.3. *Evolution de l'évaluation* 269
2.4. *Moteur d'optimisation* 270
2.5. *Ordonnement en fabrication additive* 270

TABLE DES NOTATIONS

P : Paramètres, V : Variables

$\partial_{coût}$	Poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de coût	P
∂_{retard}	Poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de retard	P
∂_{taux}	Poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de taux d'utilisation	P
a	Indice de la ligne au sein de l'OF	
c	Indice de la ligne au sein de la commande	
C_{prod}^{tot}	Coût total de production	P
C_{prod_l}	Coût de production de l'OF l	P
C_{setup_m}	Coût de setup de la machine m	P
$coef$	Coefficient lié à la vitesse de détensionnement qui dépend du matériau	P
$commande_{a,l}$	Commande à laquelle appartient la ligne a de l'OF l	V
cop_m	Coût opératoire de la machine m	P
$cout_{max}$	Coût maximal lors de la première itération	V
d_i	Due date de la commande i	P
df_i	Date de sortie de la commande i	P
$debit$	Débit de l'aspirateur utilisé	P
e_m	Efficacité de la machine m	P
h_j^{couche}	Hauteur de couche pour la pièce j	P
$h_m^{machine}$	Hauteur maximale acceptée par la machine m	P
$h_j^{pièce}$	Hauteur de la pièce j	P
HC	Coût horaire des opérateurs	P
i	Indice du numéro de commande	
j	Indice de la référence de pièce	
k	Indice de la référence de plateau	
l	Indice du numéro de l'OF	
$largeur_j^{pièce}$	Largeur de la pièce j	P
$largeur_k^{pla}$	Largeur du plateau k	P
L_m	Liste ordonnée d'OF affectée à la machine m	V
$longueur_j^{pièce}$	Longueur de la pièce j	P
$longueur_k^{pla}$	Longueur du plateau k	P
m	Indice du numéro de la machine de fabrication additive	
$mult_{cout}$	Coefficient multiplicateur de l'indicateur de coût	P
$mult_{retard}$	Coefficient multiplicateur de l'indicateur de retard	P

n	Index du numéro de la pièce	
nb_com	Nombre de commandes	P
$nb_ligne_com_i$	Nombre de lignes dans la commande i	P
$nb_ligne_OF_l$	Nombre de lignes de l'OF l	V
nb_ma	Nombre de machines	P
nb_OF	Nombre d'OF	V
nb_{OF_m}	Nombre d'OF dans la liste ordonnée L_m affectée à la machine m	V
$nb_pièce_total$	Nombre de pièces total	P
nb_pla	Nombre de plateaux	P
nb_ref	Nombre de références de pièces	P
$O_{n,k}$	Placement de la pièce n par rapport à la largeur du plateau k utilisé pour l'OF l	V
OC_m	Coût opératoire de la machine m	P
$OF_{m,n}$	Le $n^{ième}$ OF de la liste ordonnée L_m affectée à m	V
p_j	Référence de la poudre de la pièce j	P
p_l	Poudre de l'OF l	V
$PB_{n,z}$	Placement vertical de la pièce n par rapport à la pièce z	V
$PL_{n,z}$	Placement latéral de la pièce n par rapport à la pièce z	V
pla_l	Référence du plateau de l'OF l	V
$plateau_machine_{k,m}$	Compatibilité entre le plateau k et la machine m	P
$plateau_poudre_{k,p}$	Compatibilité entre le plateau k et la poudre p	P
$poudre_machine_{p,m}$	Compatibilité entre la poudre p et la machine m	P
qp_j	Quantité de poudre pour la pièce j	P
$qté_{c,i}^{com}$	Quantité associée à la référence de la pièce de la ligne c de la commande i	P
$qté_{a,l}^{OF}$	Quantité associée à la référence de la pièce de la ligne a de l'OF l	V
$ref_{c,i}^{com}$	Référence de la pièce de la ligne c de la commande i	P
$ref_{a,l}^{OF}$	Référence de la pièce de la ligne a de l'OF l	V
$ref_n^{pièce}$	Référence de la pièce n	P
$retard$	Retard (indicateur)	V
$retard_i$	Retard pour la commande i	V
$retard_{max}$	Retard maximal lors de la première itération	V
ST_m	Temps de setup de la machine m	P
$surf_j$	Surface de la pièce j $s_j = largeur_j * longueur_j$	P
$surface_l$	Surface occupée par les pièces de l'OF l sur le plateau	V
t_p	Temps de préparation	P

$taux_m$	Taux d'utilisation de la machine m	V
$taux_d'utilisation$	Taux d'utilisation (indicateur)	V
$tps_decoupage_l$	Temps de découpage pour l'OF l	V
$tps_lasage_j^{pièce}$	Temps de lasage de la pièce j	P
$tps_lasage_l^{OF}$	Temps de lasage pour l'OF l	V
$tps_mise_en_couche_j$	Temps de mise en couche de la pièce j	P
$tps_nettoyage_j^{pièce}$	Temps de nettoyage de la pièce j	P
$tps_nettoyage_l^{OF}$	Temps de nettoyage pour l'OF l	V
$tps_recup_poudre_l$	Temps de récupération de poudre pour l'OF l	V
$tps_refroidissement_l$	Temps de refroidissement pour l'OF l	V
tps_tth_j	Temps de traitement thermique de la pièce j	P
tps_tth_l	Temps de traitement thermique pour l'OF l	V
v_j	Volume de la pièce j $v_j = s_j * h_j^{pièce}$	P
v_l^{OF}	Volume total de l'OF l	V
$v_l^{plateau}$	Volume total de l'OF l	V
$vitesse_{fil}$	Vitesse du fil de la machine de découpe en mm^2/min	P
$vitesse^{ref}$	Vitesse de refroidissement	P
$vitesse_m^{vol}$	Vitesse de lasage de la machine m en cm^3/h	P
(x_n, y_n)	Coordonnées de l'angle en bas à gauche de la pièce n	V
$X_{n,l}$	Affectation de la pièce n à l'OF l	V
Y_l	Existence de l'OF l	V
$Z_{l,m}$	Affectation de l'OF l à la machine m	V

CHAPITRE 1. INTRODUCTION : LES DIFFÉRENTES PROBLÉMATIQUES D'ORDONNANCEMENT EN FABRICATION ADDITIVE

Les temps de fabrication très longs en fabrication additive ont plusieurs conséquences sur l'organisation des ateliers en termes de flux, de dimensionnement et de planification des ressources secondaires. Lors de la prise en compte du processus global, la fabrication additive devient le poste goulot, les flux aval sont irréguliers. Les prétraitements et les post-traitements font que les flux amont et aval sont désynchronisés. De plus, pour fabriquer des pièces à cadences industrielles, il faut multiplier le nombre de machines. Par ailleurs, le processus de fabrication additive nécessite une intervention humaine importante aux changements de production. Les temps d'intervention des ressources secondaires sont bien inférieurs au temps de lasage sauf en cas de nettoyage complet de la machine pour un changement de poudre, par exemple.

Pour que les ateliers de fabrication additive soient efficaces, il est nécessaire d'apprendre à gérer ses différentes spécificités. Les flux désynchronisés doivent être gérés en amont et en aval. L'utilisation des machines doit être optimisée afin d'en limiter le nombre du fait de l'investissement important que cela représente. Et les ressources secondaires doivent être dimensionnées et organisées afin de diminuer les temps improductifs sur les machines de fabrication additive.

L'optimisation de l'ordonnancement fait partie des leviers d'action pour gérer au mieux, au quotidien, les ateliers de fabrication additive. L'ordonnancement consiste à organiser la réalisation des tâches dans le temps et à leur affecter les ressources nécessaires. Il en résulte un planning d'exécution des tâches ainsi qu'un planning d'allocation des ressources. Une tâche est une entité définie par une durée et par une ressource nécessaire. L'objectif est de définir la date de début de chaque tâche ou du lancement en début de flux en prenant en compte les dates dues et les contraintes liées aux ressources.

Pour qu'un ordonnancement soit efficace il doit remplir plusieurs conditions. Tout d'abord, il faut respecter les délais demandés par le client. Il doit également maximiser le taux d'utilisation des machines. Et enfin, il doit minimiser le prix de revient des pièces. Il faut un ordonnancement efficace pour optimiser les productions d'un point de vue économique.

Ces éléments nous amènent à poser la problématique suivante :

Comment réaliser un ordonnancement optimal en prenant en compte les spécificités de la fabrication additive ?

Afin de contrôler la désynchronisation des flux, quatre étapes d'ordonnancement ont été identifiées au sein du processus de fabrication additive (Figure 85) :

- Le lancement des plateaux sur les machines de fabrication additive, une fois ceux-ci constitués ;
- Le traitement thermique par lot de plateaux ;
- Les post-traitements par lot de pièces ;
- Les post-traitements par pièce.

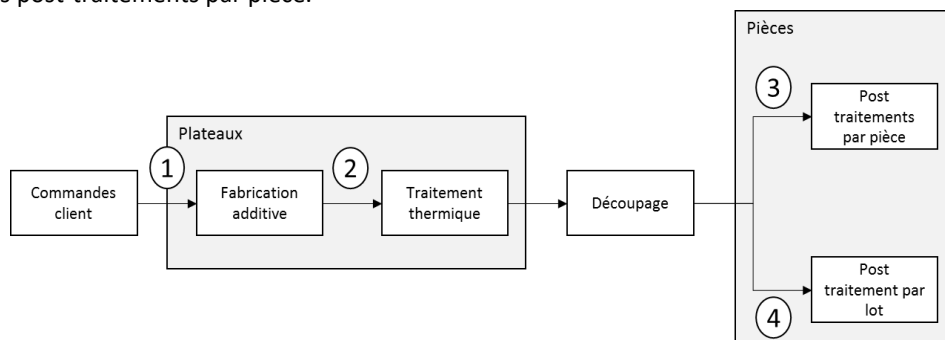


Figure 85 - Etapes d'ordonnancement en fabrication additive

1. DES COMMANDES AUX ORDRES DE FABRICATION

La première étape concerne la répartition des différentes lignes de commandes et des pièces sur les plateaux, l'allocation de ces plateaux aux machines ainsi que leur séquençement.

Lorsque les machines ne sont pas dédiées à un matériau, l'étape de nettoyage est une problématique importante. Le temps de changement de poudre varie selon les machines mais ne descend pas en dessous d'une journée pour l'instant. De plus, les machines de fabrication additive fonctionnent en 3X8 et ne nécessitent pas la présence continue d'un opérateur pendant son fonctionnement. C'est pourquoi, lors de la planification, il est important de faire attention à la date de fin du lasage, pour que cela soit synchronisé sur une présence opérateur afin de perdre le moins de temps de fonctionnement machine.

Les questions auxquelles nous devons répondre pour cette étape sont :

- Comment répartir les lignes de commandes par plateau ?
- Combien de pièces attribuer à chaque plateau ?
- Dans quel ordre lancer les plateaux ?
- Sur quelle machine lancer le plateau ?

Lorsque plusieurs commandes ayant des références de pièces différentes doivent être produites, leur coût de production peut dépendre de la répartition des différentes pièces sur les plateaux et du lead time. Se pose alors la problématique de l'affectation des pièces d'une même référence aux différents plateaux. Par exemple, est-il plus efficace de faire des plateaux composés de la même référence ou de mélanger des références sur chaque plateau (Figure 86) ?

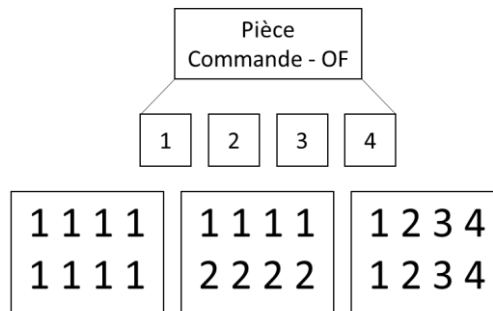


Figure 86 - Répartition des pièces sur les plateaux

Il faut donc regrouper et placer les pièces sur les plateaux, affecter les plateaux aux différentes machines de fabrication additive et les ordonnancer pour obtenir les meilleures performances (Figure 87). La répartition des pièces sur les plateaux peut avoir un impact sur l'affectation et l'ordonnancement des plateaux sur les machines. C'est pourquoi, les problèmes ne sont pas traités de façon séquentielle.

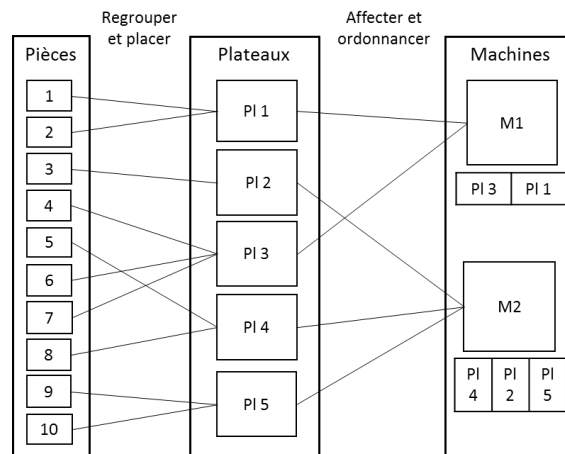


Figure 87 - Regroupement, allocation et séquençement

2. TRAITEMENT THERMIQUE PAR LOT DE PLATEAUX

Après l'étape de fabrication additive, les plateaux sont nettoyés avant d'être envoyés au traitement thermique. Les machines de traitement thermique fonctionnent souvent par lots. Il convient alors de répondre à cette étape à la question suivante :

- Comment lotir les plateaux pour le traitement thermique ?

Il est intéressant pour baisser, notamment, le coût du traitement thermique de le remplir le plus possible. Cela suppose que des plateaux attendent d'être regroupés. Ce qui peut conduire à un non-respect des délais de fabrication. Un compromis doit donc être trouvé entre attendre pour mieux remplir le four et mettre en route, sans attendre, le four dès qu'il est disponible.

Les coûts de production à considérer concernent également les coûts liés au post-traitement des pièces. Par exemple, le prix du traitement thermique ne dépend pas toujours du nombre de plateaux. Le coût d'utilisation d'un four d'une capacité de 6 plateaux est le même pour le traitement d'un plateau que celui de 6 plateaux. L'objectif est donc de le remplir au maximum. C'est pourquoi, faire le plus de pièces possibles sur un plateau n'est pas forcément le plus rapide et le plus rentable. Par exemple, si le traitement thermique (TTH) a une capacité de 6 plateaux, il vaut mieux planifier, par semaine, 3 plateaux moins remplis pour faire le TTH au bout de 2 semaines que 2 plateaux remplis pour faire le TTH au bout de 3 semaines. Il est donc nécessaire de mener une réflexion sur les post-traitements pour déterminer les tailles économiques de lot.

3. POST-TRAITEMENT PAR LOT DE PIÈCES

Après l'étape de découpage, les pièces sont séparées du plateau. Les pièces doivent ensuite subir des post-traitements. Certains post-traitements s'effectuent par lot de pièces. Pour un même post-traitement, si plusieurs machines sont disponibles, se pose alors la question de l'affectation et du séquençement des lots sur les machines. Les questions auxquelles il faut répondre sont donc :

- Comment lotir les pièces pour les post-traitements par lot ?
- Comment affecter et séquencer les lots de pièces sur les machines ?

4. POST-TRAITEMENTS PAR PIÈCE

D'autres post-traitements s'effectuent par pièce. Dans ce cas, il faut définir la répartition des pièces sur les différentes machines et dans quel ordre réaliser les pièces sur chaque machine.

- Comment répartir les pièces pour les post-traitements par pièce (politique de file d'attente) ?

5. OBJECTIF ET VEROUS

L'objectif est de proposer :

- Une répartition des différentes pièces sur les plateaux ;
- Une liste ordonnée d'OF affectée à chaque machine ;
- Des règles de lotissement de plateaux avant le traitement thermique par plateaux ;
- Des règles de lotissement de pièces avant les post-traitements par pièce ;
- Une répartition des pièces sur les machines de post-traitements par pièce.

Au niveau opérationnel, nous devons donc lever les verrous suivants :

- Comment traduire la notion d'efficacité dans ce contexte ?
- Comment prendre en compte les différents objectifs du décideur qui sont parfois contradictoire ?
- Comment résoudre CONJOINTEMENT le problème de répartition des pièces clients sur les plateaux, le problème d'affectation des plateaux aux machines de fabrication additive et leur séquençement sur la machine ?

6. PARTIE TRAITÉE DANS CES TRAVAUX

L'ordonnement en fabrication additive est peu abordé dans la littérature, ces travaux constituent une première approche. La composition des plateaux et la manière dont la production est lancée sur les différentes machines jouent un rôle important sur l'efficacité de l'atelier. Pour une première étape, nous avons décidé de nous concentrer sur la répartition des différentes pièces sur les plateaux et sur l'obtention de la liste ordonnée d'OF affectée à chaque machine.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, notre objectif sur le niveau opérationnel est donc de proposer aux exploitants un outil d'aide à la décision permettant de passer d'une liste de commandes multi-références à une composition de plateaux et un ordonnancement de ces plateaux pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.

La répartition des pièces sur les plateaux revient à résoudre un problème de bin packing et l'affectation des plateaux aux machines ainsi que leur séquençage correspond à un problème d'ordonnement.

7. ORGANISATION DE LA PARTIE

Nous allons dans un premier temps, faire un état de l'art de l'ordonnement en fabrication additive, sur les problèmes de bin packing et d'ordonnement ainsi que sur leur résolution conjointe. Une fois notre problème situé dans la littérature, un état de l'art sur l'optimisation, la simulation ainsi que sur la décision multicritère est présenté. Après avoir formalisé mathématiquement ce problème, nous proposons et nous développons notre approche appliquée ensuite sur un cas industriel.

CHAPITRE 2. BIN PACKING ET ORDONNANCEMENT

L'ordonnancement en fabrication additive et la résolution conjointe des problèmes de bin packing et d'ordonnancement sont peu abordés dans la littérature. Après avoir présenté un état de l'art sur le problème de bin packing et sur le problème d'ordonnancement, nous positionnerons notre problème par rapport à la littérature.

1. ORDONNANCEMENT EN FABRICATION ADDITIVE

Seulement deux articles abordent la problématique de l'ordonnancement en fabrication additive.

Tout d'abord, Li *et al.* (2017) sont les premiers à s'intéresser à l'ordonnancement en fabrication additive. Ils proposent une formalisation mathématique du problème et développe une heuristique fin de le résoudre. Dans leur approche, les pièces sont allouées aux machines puis elles sont regroupées sur les plateaux (Figure 88). De plus, les due dates ne sont pas prises en compte.

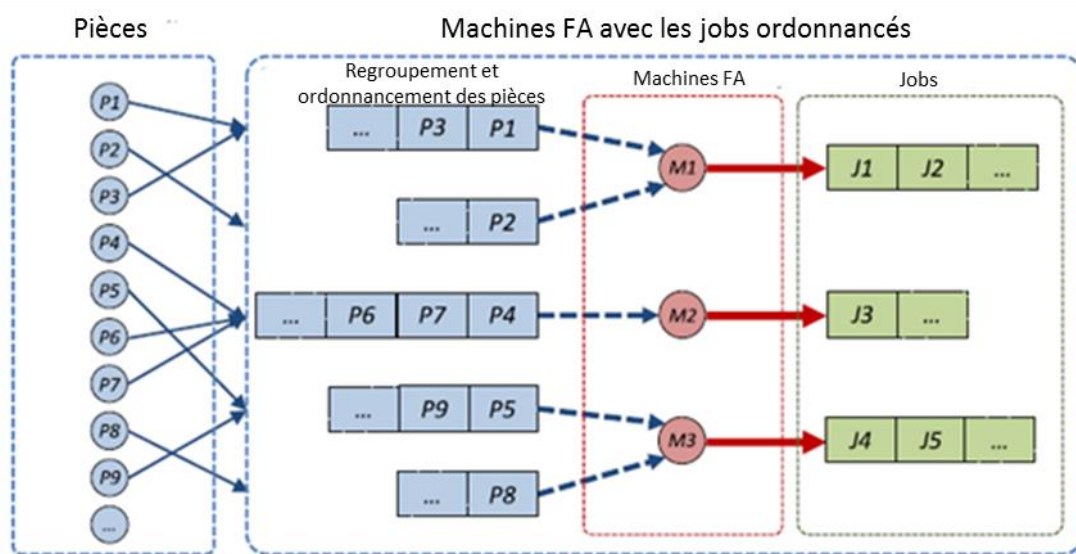


Figure 88 - Méthode de Li *et al.* (2017)

Ils développent une heuristique dont le principe est représenté par la Figure 89. L'indicateur pris en compte pour la sélection des pièces est le coût moyen espéré d'un OF temporaire. Seul le coût est pris en compte dans l'ensemble de l'algorithme. Pour le placement des pièces, seule la surface est prise en compte. Les deux sous problèmes identifiés sont traités séquentiellement, les pièces sont affectées aux machines puis elles sont regroupées. Le partitionnement est donc optimal pour une affectation des pièces aux machines qui est supposée optimale.

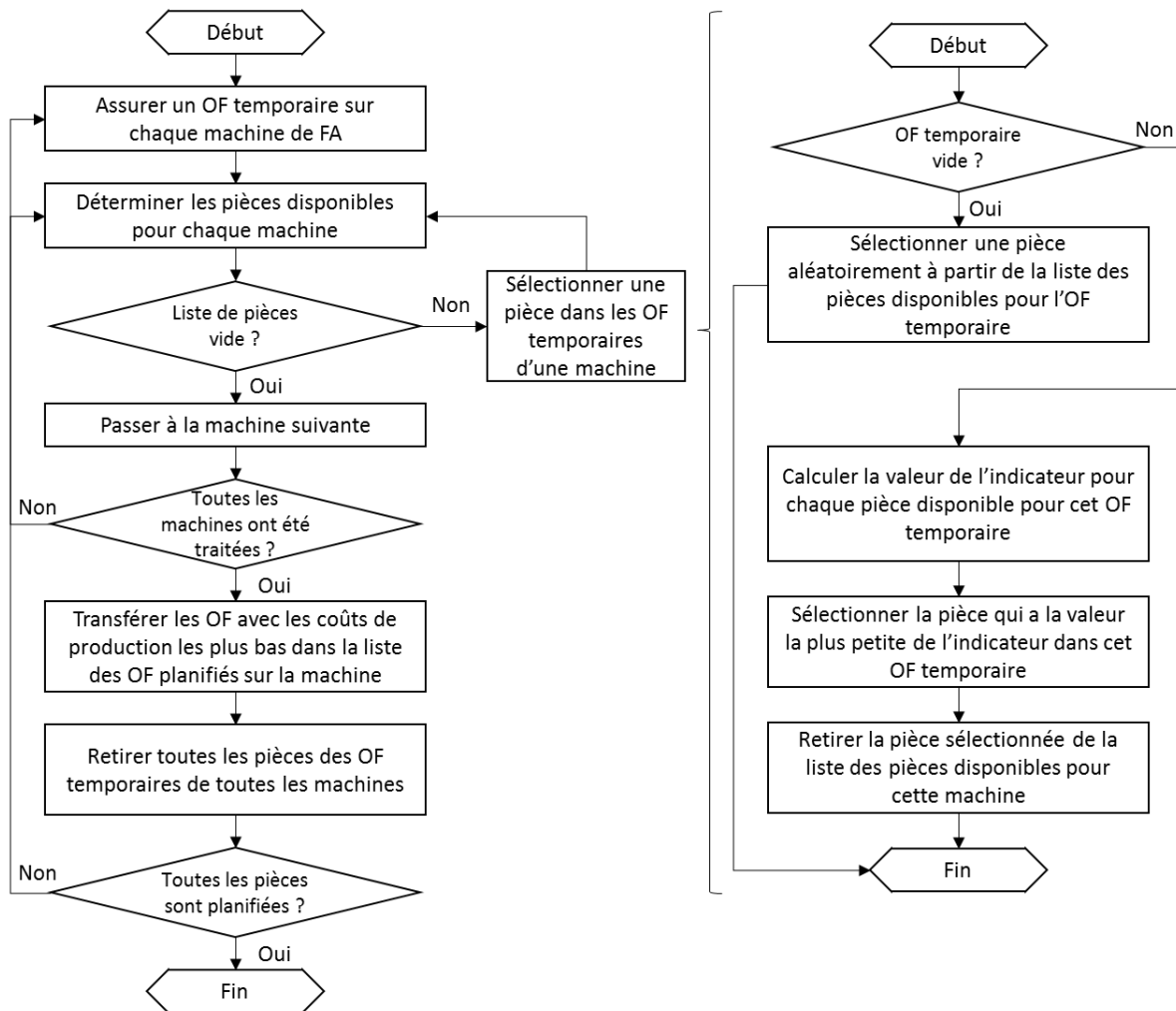


Figure 89 - Heuristique développée par Li et al. (2017)

Chergui et al. (2018) décomposent le problème en deux sous-problèmes. Le premier sous problème correspond au regroupement de l'ensemble des pièces avec des due dates, des hauteurs, des aires, des volumes et des clients différents et leur affectation à un OF. Chaque OF correspond à une opération, un temps opératoire déterministe et une due date. Ensuite, il faut trouver comment placer de manière optimale ces pièces dans l'espace de fabrication, défini par une surface sur laquelle les pièces peuvent être positionnées et une hauteur maximale, en considérant le temps opératoire de chaque OF et sa due date. Le second sous problème est l'ordonnement des OF sur un ensemble de machines de fabrication additive parallèles identiques.

Le premier sous problème est formalisé par un *binary integer quadratic programming problem* (BIQP). La fonction objectif correspond à la minimisation du total des différences des due dates théoriques entre les pièces d'un même OF. Pour le placement des pièces, la seule contrainte est que la somme des surfaces de chaque pièce soit inférieure à la surface de fabrication. Une contrainte garantit que le temps opératoire de chaque OF est inférieur à la due date de chaque pièce affectée à l'OF.

Le second sous problème est formalisé par un *mixed integer linear programming* (MILP). La fonction objectif correspond à la minimisation du retard de l'ensemble des OF.

Une heuristique est proposée pour résoudre conjointement les deux sous-problèmes. Le principe de l'heuristique est présenté Figure 90.

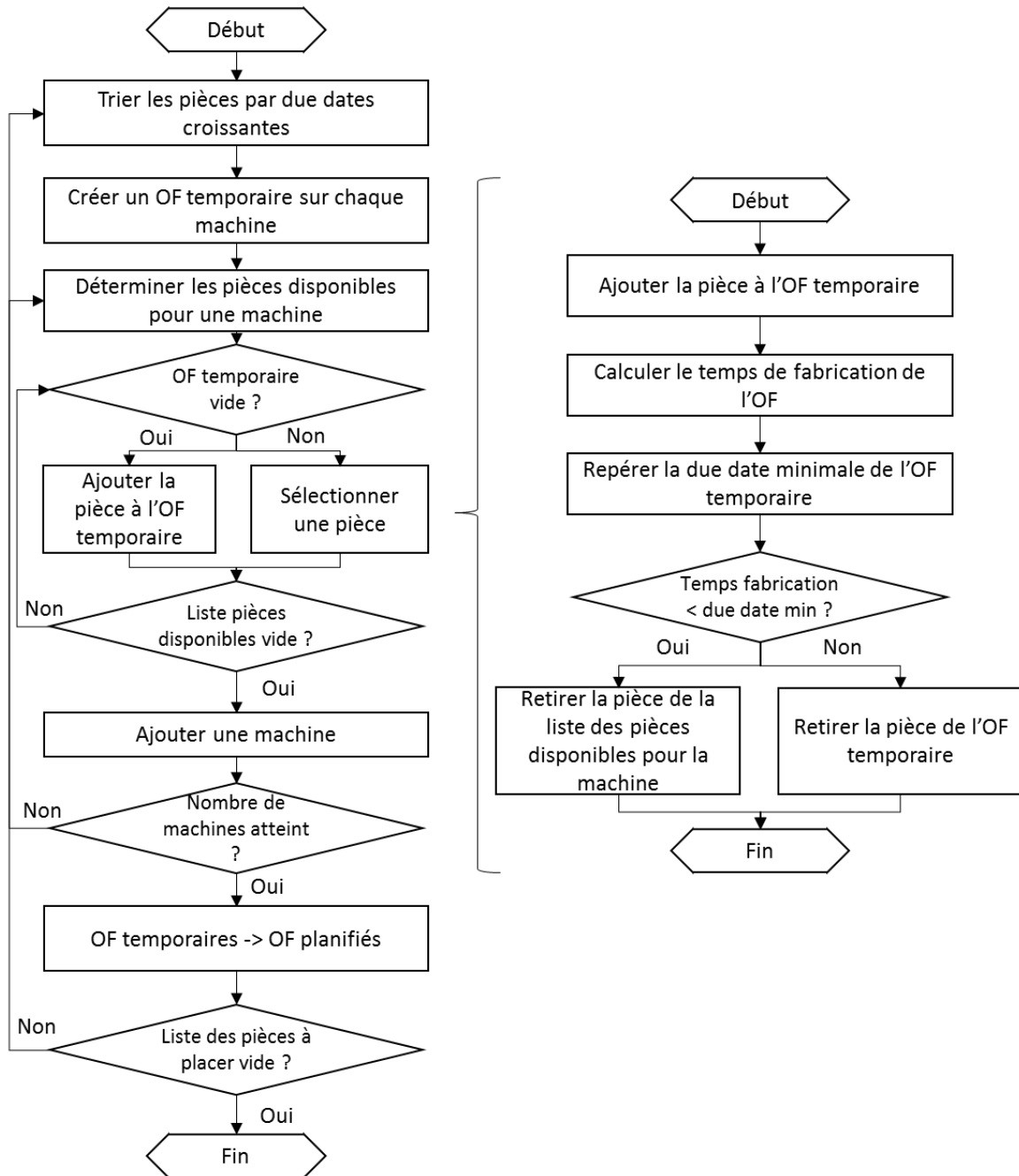


Figure 90 - Heuristique développée par Chergui *et al.* (2018)

Ils montrent l'impact direct du nombre de machines sur le pourcentage de pièces en retard et le compromis nécessaire entre la hauteur des investissements nécessaires pour livrer de gros volumes sur des courtes durées à l'heure et le fait de livrer certaines pièces en retard mais en limitant les investissements. Ils mettent aussi en évidence la nécessité de développer des méthodes propres à la fabrication additive pour la planification et l'ordonnancement.

Les deux étapes traitées par Chergui *et al.* (2018) correspondent aux deux étapes que nous avons identifiées. Cependant, dans le premier sous problème, seulement les surfaces des pièces sont prises en compte lors du choix des pièces disponibles pour une machine. Pour le second sous-problème, le retard est le seul indicateur considéré et les machines sont toutes identiques.

2. BIN PACKING ET ORDONNANCEMENT

Peu d'articles abordent à la fois la problématique du bin packing et la problématique de l'ordonnancement. Parmi eux, Li et Zhang (2018) résolvent à la fois un problème de bin packing 2D et un problème de séquençement sur une machine. Ils utilisent trois méthodes différentes : des heuristiques basées sur les séquences, un algorithme génétique biaisé à clé aléatoire et un « hybrid bin loading algorithm ». Dans leurs perspectives, ils évoquent le fait de passer à un problème de machines parallèles. Ce que nous souhaitons faire dans le cadre de ces travaux.

Matin *et al.* (2017) proposent un modèle MILP pour résoudre simultanément un problème d'allocation de pièces à des lots et un problème de séquençement des lots sur les machines. Leur objectif est de minimiser le makespan. Le problème étant NP-difficile, sa résolution exacte fonctionne sur des problèmes de taille réduite. Pour les problèmes de plus grandes tailles, ils proposent une optimisation par essaim particulière. Le seul paramètre dimensionnel pris en compte est la largeur des pièces, il n'y a pas de notion de placement. Ils ne considèrent pas les paramètres liés aux commandes, aux coûts et à la compatibilité des pièces et des machines.

3. BIN PACKING

La répartition des pièces sur les plateaux correspond à un problème de bin packing.

3.1. Placement des pièces en fabrication additive

Un certain nombre de méthodes ont été proposées pour résoudre ce problème en 2D (Zhang *et al.*, 2016) et en 3D (Gogate et Pande, 2008). Pour toutes ces méthodes, les pièces sont réparties sur un seul plateau, soit en présélectionnant un groupe de pièces suffisamment réduit, soit en résolvant le problème du sac à dos dans le but de placer le plus de pièces possible dans l'espace disponible. Le choix entre le bin packing 2D et le bin packing 3D est principalement déterminé par le problème à résoudre, s'il est possible d'empiler les objets à placer, il s'agira d'un bin packing 3D.

Dans le cas du SLM, la superposition de pièces n'est pas possible, nous considérons donc un problème de bin packing 2D.

L'orientation des pièces a un impact important sur le coût direct de fabrication (Byun et Lee, 2005). Plusieurs articles s'accordent sur le rôle important joué par l'orientation de la pièce (Zhang *et al.*, 2016) et essayent d'optimiser l'orientation des pièces avant de les répartir sur les plateaux. Cet impact est lié au nombre de couches qui augmente en fonction de la hauteur de la pièce et au volume des supports qui peut fortement évoluer en fonction de l'orientation. Lors du placement d'un lot de pièces différentes sur une machine, l'orientation de chaque pièce détermine le nombre de pièces qui peut entrer sur un plateau ainsi que le coût et le temps de fabrication du lot (Rickenbacher *et al.*, 2013). Griffiths *et al.* (2019) résolvent simultanément le problème d'orientation des pièces et le problème de bin packing. Ils travaillent avec des machines identiques. Leur objectif est de minimiser le coût calculé à partir du modèle de Ruffo et Hague (2007).

Deux pièces identiques fabriquées selon deux orientations différentes vont avoir un état de surface, une précision sur certaines dimensions et des propriétés mécaniques différentes (Ahn *et al.*, 2007). L'orientation de posage impacte la résistance élastique, le module d'Young, le coefficient de Poisson et la résistance mécanique des pièces. La rugosité des surfaces de la pièce dépend également de l'orientation des surfaces par rapport à l'orientation de la pièce (Canellidis *et al.*, 2009).

Ces éléments font souvent partie du cahier des charges du client. Dans le milieu aéronautique, par exemple, ces éléments participent à la certification de la pièce. Dans nos travaux, l'orientation selon z des pièces sera donc considérée comme connue et fixe. Il est possible de modifier l'orientation selon x et selon y.

3.2. Typologie des problèmes de découpe et de placement

La typologie des problèmes de découpe et de placement est proposée par Dyckhoff et Finke (1992). Elle est composée de 4 paramètres : la dimension du problème, le type d'allocation, la nature du conteneur et la nature des composants. Le problème abordé dans cet article est un problème à 2 dimensions avec tous les objets et une sélection de conteneurs ; les conteneurs ont des tailles différentes et les objets ont des formes différentes.

Wascher *et al.* (2007) ont modifié la typologie pour intégrer les problèmes récents de découpe et de placement. Le problème de bin packing à 2 dimensions (2BP) a 2 spécificités : l'orientation (R pour les cas non-orientés et O pour les cas orientés) et la contrainte guillotine (G si elle est prise en compte, F sinon). L'orientation définit s'il est possible de pivoter selon z les objets à placer ou pas. La contrainte guillotine impose un découpage de la surface de placement de bout en bout.

Dans nos travaux, les pièces prises en compte ne sont pas orientées, elles peuvent être pivotées de 90 degrés selon z et la contrainte guillotine n'est pas utilisée. Par conséquent, nous devons résoudre un problème 2BP|R|F.

3.3. Méthodes

Diverses heuristiques et métaheuristiques sont utilisées pour résoudre ce problème NP-complexe. Jakobs (1996) utilise un algorithme génétique pour le placement de polygones. Les résultats sont concluants mais cette méthode nécessite de placer toutes les pièces dès le départ. Or, nous allons voir que dans notre approche, nous avons une liste figée de pièces aussi mais nous devons les placer au fur et à mesure de la création des solutions. Faroe *et al.* (2003) développent une recherche locale guidée pour le problème de bin packing à 3 dimensions. Dans le cas de la fusion sur lit de poudre, les pièces ne peuvent pas être superposées donc nous travaillons en 2D. Dowsland (1993) propose des techniques de recuit simulé pour les problèmes de placement. De même que pour l'algorithme génétique, le recuit simulé nécessite de connaître l'ensemble des pièces placées. Dans notre cas, il faudrait relancer une optimisation pour chaque plateau où la pièce peut être placée et pour chaque orientation à chaque qu'une pièce est placée, ce qui augmenterait considérablement le temps de calcul. Hong *et al.* (2014) utilisent une heuristique hybride pour les problèmes à 2 dimensions et Cui *et al.* (2015) implémentent une heuristique séquentielle pour le problème de placement à 2 dimensions. Les deux approches sont proches mais Hong *et al.* (2014) travaillent avec la contrainte guillotine, ce qui n'est pas le cas de Cui *et al.* (2015). L'approche de Cui *et al.* (2015) est proche de la nôtre. C'est pourquoi nous allons partir de cette heuristique pour construire notre heuristique de construction.

4. ORDONNANCEMENT

4.1. Définitions

L'ordonnancement consiste à organiser la réalisation des tâches dans le temps et à leur affecter les ressources nécessaires. Ces affectations dépendent de la durée des tâches, des prédécesseurs et des ressources disponibles. Il en résulte un planning d'exécution des tâches ainsi qu'un planning d'allocation des ressources.

L'ensemble des tâches ou des activités est caractérisé par une durée, un mode d'exécution et un ensemble de machines qui peut les réaliser. Un ensemble de ressources est nécessaire. Elles peuvent être dédiées ou non et en quantité limitée ou non. L'objectif d'un ordonnancement est de déterminer la localisation des tâches dans le temps (date de lancement, durée, date de fin) et l'affectation des ressources (identité et séquençement) en prenant en compte les contraintes liées aux ressources et au temps.

Les contraintes liées au temps sont : le respect des dates et la prise en compte des dates de disponibilité, des précédences et du mode préemptif. En mode non préemptif, un ordonnancement attribue, à chaque tâche, un seul intervalle d'exécution et une machine alors qu'en mode préemptif, un ordonnancement attribue à chaque tâche : plusieurs intervalles d'exécution et une machine pour chaque intervalle. En mode non préemptif les tâches ne peuvent pas être interrompues alors qu'en mode préemptif, les tâches peuvent être interrompues puis reprises sur la même machine ou sur une autre machine. Dans les 2 cas, les ordonnancements doivent être réalisés tels que les contraintes de temps soient satisfaites et tels que, à chaque instant, une ressource exécute au plus une tâche et une tâche est exécutée par au plus une machine.

4.2. Problèmes d'ordonnancement

Les problèmes d'ordonnancement peuvent être de 3 types différents : les problèmes d'ordonnancement à une machine ou à m machines ou les problèmes d'ordonnancement d'atelier. Les deux derniers types peuvent être divisés en sous-catégories (Figure 91).

Dans les problèmes d'ordonnancement à une machine, un séquençement des tâches doit être déterminé. Pour résoudre ces problèmes, les règles de Smith et de Jackson et l'algorithme de Moore-Hodgson peuvent être utilisés (Moore, 1968).

Dans les problèmes d’ordonnement à m machines, en plus du séquençement, les tâches doivent être affectées à une machine. Deux sortes de problèmes se distinguent : les problèmes à machine parallèles lorsque les machines sont identiques et les problèmes à machines dédiées lorsque les machines sont différentes.

Les problèmes d’ordonnement d’atelier sont divisés en 3 catégories : le flow shop, le job shop et l’open shop. Les trois prennent en compte n tâches, m machines dédiées et des jobs i composés de n_i opérations. Chaque opération nécessite une machine. Leurs caractéristiques communes sont que deux opérations du même job ne peuvent pas être réalisées en même temps, deux opérations nécessitant la même machine ne peuvent pas être exécutées en même temps et les contraintes de précédence entre les opérations doivent être respectées. Le critère à minimiser est souvent la fonction régulière correspondant aux dates de fin de chaque job (Abedinnia *et al.*, 2017). La différence entre les trois se fait au niveau des gammes de fabrication des pièces. Le problème n’est pas le même si toutes les pièces ont la même gamme ou pas et si toutes les pièces ont une gamme de fabrication donnée ou pas.

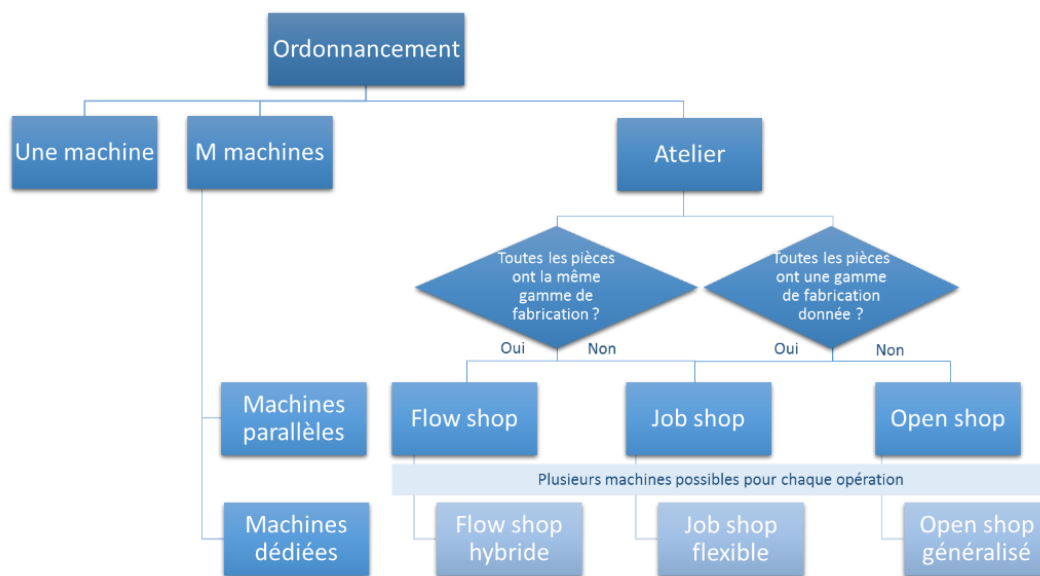


Figure 91 - Les problèmes d'ordonnement

4.3. Méthodes

Pour les problèmes à une machine, les méthodes utilisées sont : les heuristiques gloutonnes (Gonçalves *et al.*, 2016), les essais particulière (Low *et al.*, 2010), la recherche tabou (Pacheco *et al.*, 2012) et les algorithmes génétiques (Monch *et al.*, 2005). Ces derniers sont réalisés avec des croisements à un ou plusieurs points et plusieurs mutations : permutation de 2 jobs, déplacement d’un job, déplacement d’une séquence de jobs et des mouvements de recherche locale. La recherche locale génétique peut également être utilisée, le génétique pour la diversification et la recherche locale pour améliorer les solutions (Sioud, 2011).

Pour les problèmes à machines parallèles, les mêmes heuristiques peuvent être utilisées en ajoutant des mouvements de voisinage comme le fait d’affecter un job à une autre machine ou de déplacer 2 jobs de 2 machines différentes. Pour les algorithmes génétiques, un chromosome est associé à une affectation et une séquence de jobs (Bitar, 2015).

Pour les problèmes d’ordonnement d’atelier, les métaheuristiques utilisées sont les métaheuristiques basées sur le voisinage (recherche tabou (Haouari et M’Hallah, 1997), essais particuliers (Liu *et al.*, 2013)), les algorithmes évolutionnaires (Jia *et al.*, 2007) et d’autres méthodes comme la programmation dynamique (Silva et Souza, 2019) ou la programmation sous contrainte (Escobet *et al.*, 2019).

5. PLACEMENT DANS LA LITTÉRATURE

Dans nos travaux, les pièces prises en compte ne sont pas orientées et la contrainte guillotine n'est pas utilisée. Par conséquent, nous devons résoudre un problème 2BP|R|F.

L'ordonnancement que nous voulons réaliser est un ordonnancement à machines parallèles avec contrainte d'éligibilité. Parmi les contraintes classiques d'ordonnancement, ce problème doit respecter :

- La contrainte d'éligibilité : un plateau n'est pas compatible avec toutes les machines ;
- L'absence de précedence : seulement une opération doit être réalisée ;
- Le mode non-préemptif : il est impossible d'interrompre la machine en fonctionnement ;
- A $t=0$, toutes les machines sont disponibles ;
- La capacité machines : un plateau ;
- Les contraintes de setup : entre deux plateaux, il y a soit un temps de nettoyage machine ou un temps de changement de poudre ;
- Les ressources auxiliaires : opérateurs.

CHAPITRE 3. ETAT DE L'ART : OPTIMISATION ET SIMULATION

Le problème de bin packing et le problème d'ordonnancement sont des problèmes d'optimisation combinatoire. Le choix de la méthode de résolution dépend du contexte du problème : temps d'étude possible, temps de calcul...

Les problèmes d'optimisation peuvent être résolus par des méthodes exactes ou des méthodes approchées. Lorsque les problèmes sont NP-difficiles. L'utilisation de méthodes exactes entraîne des temps de calculs non raisonnables. Pour résoudre ces problèmes, des heuristiques et des métaheuristiques sont utilisées. Elles représentent un compromis entre la qualité des solutions et le temps de calcul, l'objectif est de trouver une solution approchée, en essayant de faire en sorte qu'elle soit la meilleure possible dans un temps acceptable.

1. LES METHODES EXACTES

Les méthodes exactes ont été développées dans la 0.

2. LES METHODES APPROCHEES : LES HEURISTIQUES

Une heuristique est un algorithme approché qui permet de trouver des solutions réalisables dans un temps polynomial. Une heuristique est développée pour résoudre un problème donné, elle s'appuie sur la structure de ce problème afin de le résoudre.

Une bonne heuristique est de complexité raisonnable et elle fournit des solutions proches de l'optimum tout en étant simple à mettre en œuvre.

3. LES METHODES APPROCHEES : LES METAHEURISTIQUES

Contrairement aux heuristiques qui sont rattachées à un problème, les métaheuristiques s'adaptent et s'appliquent à de nombreux problèmes d'optimisation. Elles sont souvent inspirées de processus naturels issus de la biologie, la physique ou de l'éthologie.

La plupart des métaheuristiques utilisent des processus aléatoires et itératifs afin d'explorer l'espace de recherche pour garantir l'obtention d'une bonne solution.

Lors de l'utilisation des métaheuristiques, deux questions sont à se poser : le choix de la méthode et le réglage des paramètres. Ces choix dépendent du problème donné.

3.1. Recuit simulé

La méthode du recuit simulé a été développée par (Kirkpatrick *et al.*, 1983). Elle s'appuie sur les travaux de (Metropolis *et al.*, 1953). Il s'agit d'une analogie avec le procédé métallurgique de recuit simulé. Le principe de ce procédé est d'utiliser les cycles de chauffage et de refroidissement d'un métal afin d'améliorer sa qualité. En jouant sur l'organisation des molécules, la structure obtenue est régulière. Cette méthode utilise également la notion de température : un métal refroidit trop rapidement présente des défauts microscopiques alors qu'un métal refroidit lentement présente une structure ordonnée. La fonction objectif correspond à l'énergie du matériau.

Le principe de cet algorithme consiste à :

- Définir une solution initiale ;
- Générer une solution proche, un voisin ;
- Evaluer la solution obtenue :
 - Si la fonction objectif est améliorée, cette solution devient la solution courante ;
 - Si la fonction objectif est dégradée, la solution est acceptée selon une probabilité d'acceptation calculée suivant la distribution de Boltzmann. Si elle est acceptée, elle devient la solution courante sinon la solution initiale reste la solution courante.

- Adapter la température ;
- Reprendre à l'étape 2 ;
- Arrêter l'algorithme lorsque T atteint un seuil fixé.

Le paramètre de température T est introduit dans l'algorithme. La température est élevée au début de l'algorithme afin de sortir des optima locaux puis elle diminue en fonction d'une stratégie propre au problème à résoudre. Afin d'assurer la convergence, la température doit diminuer lentement. Le choix de la température est important pour garantir l'équilibre entre l'intensification et la diversification des solutions dans l'espace de recherche.

Cette méthode présente l'avantage d'accepter une dégradation de la fonction objectif qui pourra mener ultérieurement à une amélioration. Elle permet d'explorer une plus grande partie de l'espace des solutions et d'éviter les optima locaux.

L'un de ses inconvénients est de ne considérer qu'un seul voisin et de faire intervenir des paramètres intrinsèques au recuit simulé tels que la valeur initiale de température et le coefficient de décroissance de la température. Le réglage de ces paramètres peut nécessiter de nombreux tests.

3.2. Recherche Tabou

La recherche tabou est une procédure de recherche contrainte et une méthode à mémoire développée par Glover (1990). A chaque étape, il faut résoudre un nouveau problème d'optimisation en excluant une partie de l'espace de solutions. A chaque itération, le principe est le suivant :

- Explorer le voisinage de la solution courante ;
- Choisir la meilleure solution ;
- Ajouter cette solution dans la liste des solutions testées dans un passé proche.

Cette méthode présente l'avantage d'éviter les optima locaux. Le risque est de tourner sur les mêmes solutions, la mémorisation des solutions déjà évaluées dans la liste permet d'éviter cet écueil. La liste tabou a une taille limitée qui dépend du problème à résoudre et de sa taille. Cette liste est gérée en FIFO, lorsqu'elle est pleine et qu'il faut ajouter une solution, la solution la plus ancienne est supprimée. Par rapport au recuit simulé, le paramétrage est simplifié. Il y a la taille de la liste et le nombre d'itérations. L'un des inconvénients de la recherche tabou peut résider dans la mémoire nécessaire à son fonctionnement.

3.3. Les algorithmes évolutionnistes

Les algorithmes évolutionnistes sont basés sur des analogies avec les phénomènes d'évolution naturelle : l'héritage génétique et le principe de survie du plus fort de Darwin (Back *et al.*, 1997). Ils font partie des algorithmes à population. Ils permettent de travailler avec un ensemble de solutions appelé population d'individus. En alternant les étapes d'évaluation et de reproduction, ils vont faire évoluer la population vers une population supposée contenir de meilleures solutions.

Les algorithmes évolutionnistes sont utilisés dans de nombreux domaines. Ils permettent de traiter à la fois les facteurs quantitatifs et qualitatifs d'un système (Azadivar et Tompkins 1999). Ils peuvent être adaptés à des problèmes d'optimisation multi objectifs notamment dans (Alberto *et al.*, 2002) ou être utilisés pour des problèmes d'optimisation multimodale (Singh et Deb 2006).

3.3.1. Les algorithmes génétiques

La première description des algorithmes génétiques a été écrite par Holland (1975). Reeves (1995) décrit l'analogie entre l'algorithme et les phénomènes d'évolution naturels.

Les algorithmes génétiques sont des procédures d'exploration inspirées des mécanismes génétiques qui guident l'évolution naturelle : mutation, croisements, sélection.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes à population. La population est l'ensemble des individus, c'est-à-dire, l'ensemble des solutions potentielles. Chaque individu correspond à un chromosome (une solution potentielle) qui est composé de gènes (variables à optimiser) dont l'allèle correspond à la valeur du gène.

Back *et al.* (1997) présentent les différentes étapes de l'algorithme. Le principe est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers, de lui appliquer différents opérateurs d'évolution et de la soumettre à une sélection. Comme dans un phénomène d'évolution naturelle, la population tend à s'améliorer. Les individus qui se reproduisent sont les individus qui sont le plus adaptés à leur milieu.

Les différentes étapes de l'algorithme génétique sont : la création de la population initiale, l'évaluation des individus, la vérification du critère d'arrêt, la sélection de la population et la création des nouvelles solutions (Figure 92).

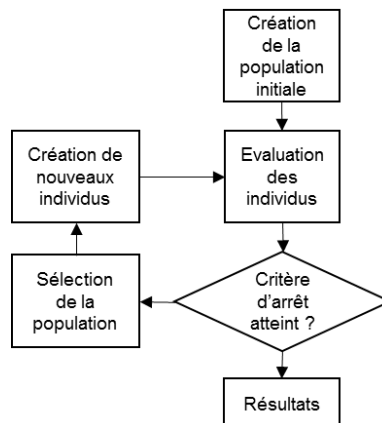


Figure 92 - Algorithme génétique

Les paramètres à régler dans un algorithme génétique sont : le nombre d'itérations, la taille de la population, les paramètres liés à la sélection et les probabilités de croisement et de mutation.

Les algorithmes génétiques sont utilisés dans un grand nombre de problèmes : dans des problèmes d'optimisation multi-objectif (Fonseca et Fleming, 1993), (Van Veldhuizen et Lamont, 1998), dans des problèmes d'ordonnancement (Perkgoz *et al.*, 2007) et plus particulièrement dans les problèmes d'ordonnancement de flow shops (Reeves, 1995) par exemple.

3.3.2. Les algorithmes de colonies de fourmis

Les algorithmes des colonies de fourmis sont plus récents que les algorithmes génétiques. Ils ont été proposés pour la première fois par Dorigo *et al.* (1991) pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Ils sont nés suite à une constatation des biologistes : une fourmi toute seule ne parvient pas à résoudre des problèmes alors qu'un ensemble de fourmis parvient à résoudre des problèmes complexes. Chez les fourmis, ces problèmes correspondent à des problèmes de choix lors de l'exploitation des sources de nourriture : elles parviennent à trouver le plus court chemin entre le nid et la source de nourriture. La communication des fourmis se fait grâce aux phéromones qu'elles peuvent déposer au sol. Plus les fourmis ont emprunté le même chemin, plus la quantité de phéromones déposée est importante.

Lors de l'implémentation d'un algorithme de colonies de fourmis, les paramètres à régler sont : le nombre de fourmis, l'importance relative entre phéromones et visibilité et la vitesse d'évaporation des phéromones.

Les algorithmes de colonies de fourmis sont utilisés pour résoudre des problèmes de voyageur de commerce (Dorigo et Gambardella, 1997), d'ordonnancement (Engin et Güc, 2018) et sur un ensemble de problèmes combinatoires (Zlochin *et al.*, 2004).

3.4. Entropie croisée

L'entropie croisée est une méthode récente créée en 1997 par Rubinstein (1997). L'entropie croisée est une approche de type Monte Carlo pour l'optimisation continue et combinatoire. Cette méthode d'optimisation a été développée pour estimer les probabilités d'événements rares dans des contextes statistiques complexes. Cette méthode continue peut être adaptée à des problèmes discrets en transformant un modèle déterministe en un modèle stochastique. L'entropie croisée est une procédure itérative : chaque itération est composée de deux phases : la génération d'un échantillon de solutions aléatoire selon un mécanisme probabiliste et la mise à jour des paramètres probabilistes en conservant seulement les meilleures solutions.

Les étapes de la méthode de l'entropie croisée sont :

- l'initialisation de la loi de probabilités représentative du problème ;
- le tirage d'un échantillon de valeurs suivant cette loi ;
- l'évaluation des valeurs tirées ;
- la sélection des meilleurs et la mise à jour de la loi de probabilités à partir des meilleures valeurs.

Ces étapes sont répétées jusqu'à atteindre le critère d'arrêt. Ce critère d'arrêt peut être un nombre maximal d'itérations ou un nombre d'itérations où le quantile est le même (Figure 93).

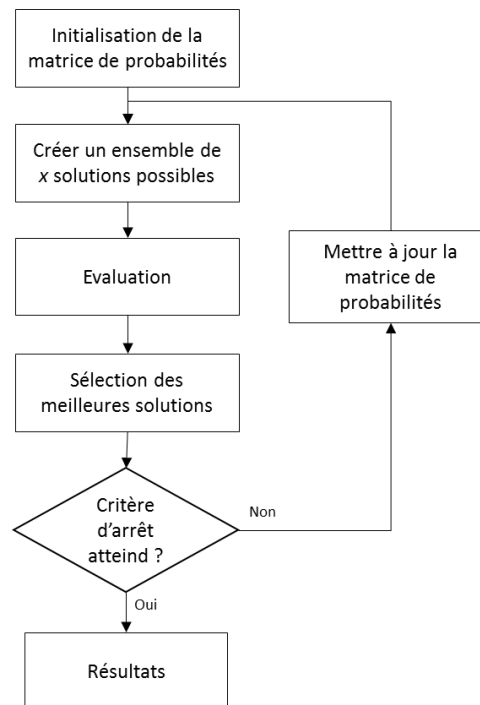


Figure 93 - Méthode de l'entropie croisée

Pour implémenter un algorithme d'entropie croisée, il faut choisir les paramètres qui vont conditionner la convergence de la méthode. Ces paramètres sont : le paramètre de sélection, la loi d'échantillonnage et le critère d'arrêt.

L'avantage de l'entropie croisée est son adaptation à des données difficiles à formaliser. Son principal inconvénient réside dans le temps de calcul important.

3.5. Méthodes d'optimisation multimodale

Une fonction est unimodale lorsqu'elle n'admet qu'un seul optimum. Une fonction multimodale a plusieurs optima locaux. L'optimum global est le plus petit, pour les problèmes de minimisation, ou, le plus grand, dans les problèmes de maximisation. Des points comme les points d'inflexion et de discontinuité peuvent poser des difficultés lors de la résolution.

Pour résoudre ces problèmes, des techniques d'optimisation multimodale ont été développées ainsi que de nouvelles heuristiques. Parmi ces méthodes, nous trouvons les méthodes de niche (Yu et Suganthan, 2010) dont

le but est de limiter la dérive génétique. Ces méthodes évitent de rester sur un optimum local. Elles ont été initialement introduites dans les algorithmes génétiques, afin de limiter la dérive génétique due à l'opérateur de sélection et d'explorer en parallèle différentes solutions, locales ou globales, situées dans des régions éloignées de l'espace.

3.5.1. Méthodes de niche

Les méthodes de niche sont basées sur une analogie avec les écosystèmes naturels. Dans la nature, une espèce correspond à un groupe d'individus qui a des caractéristiques biologiques semblables. Chaque espèce évolue pour remplir une niche écologique dans laquelle se trouvent des ressources à partager. Par analogie, une niche correspond à un optimum et les ressources représentent la qualité de cet optimum.

Les individus sont regroupés en espèce en utilisant la mesure de similarité qui est effectuée à partir d'un critère de distance et d'un seuil de voisinage. Il existe deux stratégies pour les méthodes de niche. La première est caractérisée par un voisinage explicite et nécessite un seuil de dissimilarité. Il s'agit de la modification de la structure de certaines régions de l'espace de recherche pour prévenir la convergence de l'algorithme vers ces régions. Cette stratégie de niche englobe les techniques de remplissage, de partage et les méthodes hybrides. La seconde stratégie est caractérisée par un voisinage implicite et ne nécessite pas de seuil de dissimilarité. La similarité est définie selon plusieurs critères en comparant les individus. Cette stratégie englobe les techniques de surpeuplement, d'îlots et de populations isolées.

Plusieurs méthodes de niche sont développées dans la littérature (Glibovets et Gulayeva, 2013):

- les techniques de partage (Imrani et Bouroumi, 2000) ;
- les techniques de niche séquentielle ;
- les techniques de niche dynamique ;
- les procédures d'éclaircissement ;
- les procédures de surpeuplement (Harik, 1995).

3.5.2. Essaims particuliers

Les particules correspondent à un ensemble d'individus disposés de façon aléatoire et homogène qui se déplacent dans l'espace de recherche. Chaque particule correspond à une solution potentielle. Une vitesse aléatoire est associée à chaque particule. Au départ, l'essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, ensuite :

- chaque particule évalue la qualité de sa position et se souvient de la meilleure position qu'elle a atteinte ;
- chaque particule communique avec des informatrices qui sont d'autres particules et regarde la meilleure performance de chacune. Le choix des particules avec lesquelles communique une particule peut se faire de différentes façons : les plus proches, aléatoirement...
- chaque particule choisit la meilleure performance parmi toutes ces performances, elle modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et elle se déplace en conséquence. La vitesse est modifiée en utilisant une combinaison linéaire de trois tendances :
 - La tendance « aventureuse » : la particule conserve sa vitesse actuelle ;
 - La tendance « conservatrice » : la particule se rapproche de sa meilleure position déjà trouvée ;
 - La tendance « panurgienne » : la particule s'oriente vers la meilleure informatrice.

Le choix entre les tendances est fait grâce à un coefficient de confiance, pour favoriser l'exploration de l'espace de recherche. Ce coefficient est modifié aléatoirement (Trelea, 2003).

Les essaims particuliers sont surtout utilisés pour les problèmes non linéaires, continus ou mixtes. Il est facile à programmer et il est robuste (Clerc, 2003).

4. SIMULATION

Toutes les méthodes d'optimisation comportent une étape d'évaluation afin de comparer les solutions entre elles. Il existe différentes méthodes d'évaluation de la performance dont la simulation fait partie.

4.1. Méthodes d'évaluation de la performance

Les différentes méthodes pour évaluer les performances d'un système sont présentées Figure 94.

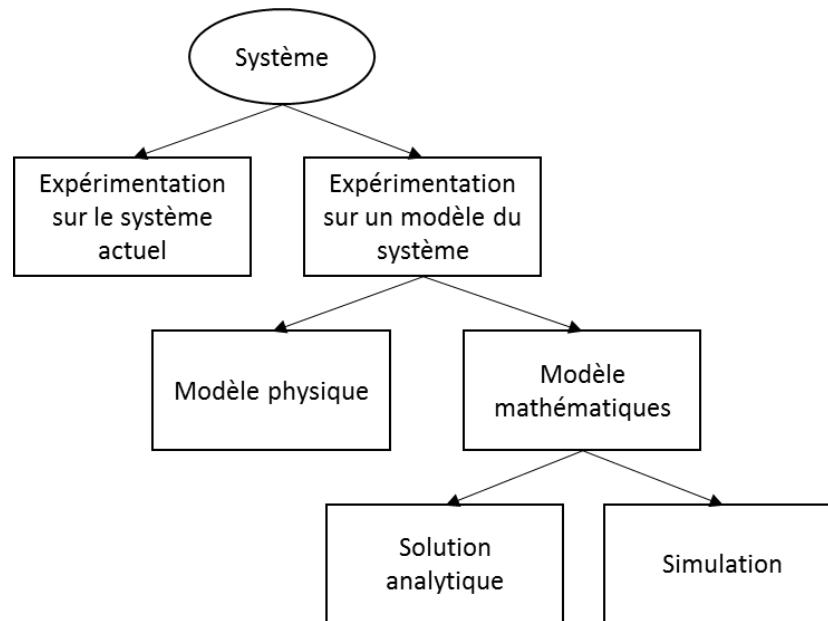


Figure 94 - Méthodes d'évaluation de la performance (Law et Kelton, 1991)

L'expérimentation sur le système actuel est utilisée lorsque qu'il est possible et pas trop onéreux d'altérer le système physique et d'observer le résultat. Néanmoins, cette solution est rarement réalisable car elle est souvent coûteuse ou nécessite une interruption de l'utilisation du système. Dans ce cas, il est souvent nécessaire de construire un modèle qui représente le système. La question de la précision avec laquelle le modèle représente la réalité se pose toujours.

Une fois que la décision de faire l'expérimentation sur un modèle est prise, il faut choisir entre un modèle physique et un modèle mathématique. Le modèle physique correspond à un modèle où le système réel est représenté par une réplique ou une maquette : les voitures pour les tests aérodynamiques, les cockpits déconnectés de l'avion pour réaliser des tests... Ces modèles sont recommandés pour certaines applications mais ils sont peu utilisés sur des problèmes d'ingénierie ou de production. La plupart des modèles correspond à des modèles mathématiques qui représentent un système par ses relations logiques et quantitatives qui peuvent être modifiées pour voir comment le modèle réagit. Ces modèles requièrent des moyens informatiques pour être utilisés.

Une fois que le modèle mathématique est construit, la question de son utilisation pour réponse à un problème donné se pose. Si le modèle est assez simple, il est possible de travailler avec les relations et les quantités pour obtenir une solution analytique exacte. Lorsque les solutions analytiques deviennent complexes à obtenir ou nécessitent des ressources informatiques trop importantes, le système est étudié au travers d'une simulation. Le modèle de simulation permet de travailler avec les variables d'entrée afin d'obtenir les variables de sortie et d'évaluer les performances d'un système tant au niveau de la structure physique que du système de décision.

Un modèle de simulation peut être statique ou dynamique, déterministe ou stochastique, continu ou discret. Contrairement au modèle dynamique qui évolue au cours du temps, le modèle statique représente un modèle à un instant t . Le modèle déterministe ne contient pas de probabilité et d'aléatoire, ce qui est le cas du modèle stochastique. Le fait que le modèle de simulation soit continu ou discret dépend du modèle mathématique et de l'objectif de l'étude (Law et Kelton, 1991).

Dans nos travaux, dans le cadre d'un ordonnancement, l'expérimentation sur le système réel n'est pas réalisable tout comme l'utilisation d'un modèle physique. Le nombre de paramètres et de relation entre toutes les entités du système ne permet pas d'utiliser des méthodes analytiques. Nous allons donc réaliser une expérimentation sur un modèle logico-mathématique en utilisant la simulation. Le modèle de simulation développé est un modèle dynamique, déterministe et à évènement discret.

4.2. Simulation à évènement discret

La simulation à évènement discret s'appuie sur une modélisation d'un système qui évolue au cours du temps, l'état des variables change instantanément à des instants distincts du temps. Un évènement correspond à un changement d'état d'un objet. Les évènements sont contingents, leur apparition dépend des évènements antérieurs et de l'état du système. Lorsqu'un évènement a lieu, l'état des objets associés est mis à jour, ce qui peut définir de nouveaux évènements.

Une étude de simulation se compose de plusieurs étapes présentées Figure 95.

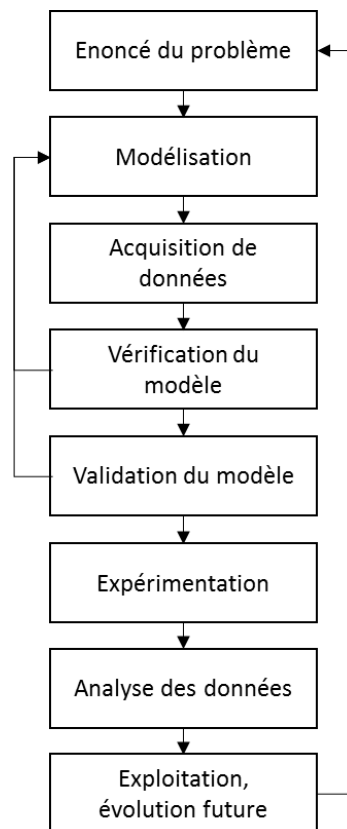


Figure 95 - Etapes d'une étude de simulation (Claver *et al.*, 1997)

5. OPTIMISATION VIA SIMULATION

La simulation n'est qu'un outil d'évaluation de la performance. Afin de trouver les solutions optimales, il faut coupler la simulation à une optimisation. L'usage direct de la simulation par une approche essais-erreurs peut permettre de tester plusieurs scénarios. Cependant, lorsque le nombre de possibilités devient trop élevé, il est nécessaire d'optimiser via simulation le système. Les concepts de l'optimisation via simulation sont posés dans les années 80. En 1992, Azadivar et Tompkins (1999) proposent un tutoriel pour l'utilisation de l'optimisation via simulation.

L'objectif est de déterminer les meilleures valeurs possibles pour un vecteur d'entrées d'un modèle de simulation afin d'optimiser une fonction objectif. Le module d'optimisation fournit des solutions au module de simulation afin qu'il les évalue. Le module d'optimisation utilise les résultats du module de simulation afin de continuer son processus de parcours de l'espace des solutions.

Les méthodes d'optimisation pouvant être couplées à la simulation sont (Fu *et al.*, 2005):

- Ranking and selection : cette méthode s'applique lorsque le nombre d'alternatives est fixe, elle consiste à trier la liste d'alternatives. Cette méthode est simple mais son temps d'exécution est long ;
- Méthodes basées sur le gradient : elles consistent à estimer le gradient de la fonction objectif afin de déterminer une direction de recherche. Elles concernent principalement les problèmes à variables continues ;
- Méthodologie de surface de réponse : elle est basée sur le principe de construction d'un (ou plusieurs) modèles mathématiques appelés « métamodèle ». Chaque métamodèle vise à explorer une partie de l'espace de recherche. La surface de réponse est explicitée par une fonction mathématique. Contrairement aux méthodes basées sur le gradient, la méthodologie de surface de réponse est une méthode relativement efficace d'optimisation via simulation en raison du nombre d'évaluations du modèle de simulation requis. Cependant, en raison des caractéristiques d'exploration, la méthodologie de surface de réponse a tendance à être extrêmement sensible aux optima locaux ;
- Recherche aléatoire : à chaque itération, une solution est choisie aléatoirement. Si elle est meilleure elle remplace la solution courante. Les avantages de cette méthode sont la recherche d'un optimum global et son application presque toujours possible. Par contre, elle converge très lentement et explose sur des problèmes de grande dimension ;
- Optimisation stochastique : le principe est d'utiliser des variables aléatoires pour ne pas explorer la totalité de l'espace des solutions. Le décideur doit faire un choix entre plusieurs distributions des valeurs aléatoires. Le choix dépend de son aversion au risque ;
- Métaheuristiques.

Parmi les métaheuristiques, le recuit simulé a été utilisé plusieurs fois en optimisation via simulation. Alrefaei et Diabat (2009) développent un recuit simulé pour l'optimisation multicritère via simulation. Ils l'appliquent sur un problème multi objectif d'inventaire. Yegul *et al.* (2017) utilisent cette approche pour améliorer la configuration de lignes de production complexes. Ils proposent plusieurs approches d'optimisation : les colonies de fourmis, le recuit simulé et les méthodologies de surface de réponse. Les algorithmes génétiques sont également utilisés dans le cadre de l'optimisation via simulation. Azadivar et Tompkins (1999) génèrent les solutions grâce à un algorithme génétique et les évaluent grâce à un modèle de simulation. La particularité de leur approche est de travailler avec un modèle de simulation qui évolue au cours de l'optimisation. Wang (2005) développe un algorithme hybride basé sur un algorithme génétique et un réseau de neurones qui lui permet de trouver de meilleurs résultats que ce que la littérature proposée jusque-là.

Nos travaux correspondent à une optimisation via simulation. Nous allons utiliser des métaheuristiques pour réaliser l'optimisation et les solutions seront évaluées grâce à un modèle de simulation.

CHAPITRE 4. ETAT DE L'ART : DECISION MULTICRITERE

Un ordonnancement efficient doit répondre à plusieurs critères. Pour prendre en compte l'ensemble de ces critères, nous avons besoin d'une méthode d'aide à la décision multicritère.

L'objectif de l'aide à la décision multicritère est d'aider les décideurs à évaluer plusieurs options dans des situations où aucune possibilité n'est parfaite en conciliant des aspects souvent antagonistes afin qu'ils puissent prendre la décision qui satisfera au mieux leurs attentes.

Après avoir défini la notion de critère nous exposons les principes de l'aide à la décision multicritère pour finalement présenter les différentes méthodes proposées par la littérature.

1. DEFINITION : CRITERE

Pour résoudre un problème d'aide à la décision, le décideur et l'homme d'étude vont devoir évaluer les actions potentielles. Pour pouvoir le faire, ils vont utiliser des critères. Un critère doit permettre de mesurer les préférences du décideur vis-à-vis de chaque action relativement à un point de vue. Un critère correspond à une fonction à valeur réelle et peut être défini de différentes façons.

Selon Vincke (1989), un critère est une fonction, définie sur un ensemble d'actions, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue, lorsque le problème repose sur la considération de plusieurs critères.

Selon Fishburn (1977), une fonction critère correspond à une fonction à valeurs réelles dans un ensemble qui reflète une valeur des éléments de cet ensemble selon certains critères. Les fonctions critères représentent souvent une valeur subjective ou plus ou moins arbitraire.

Un critère permet donc de modéliser un point de vue. Il peut correspondre à l'agrégation de plusieurs sous-critères. Roy (1993) définit l'ensemble de ces sous critères comme le sous nuage des conséquences et définit un critère de la manière suivante : une fonction critère g est une fonction à valeurs réelles définie sur A , l'ensemble des actions, et pour un acteur. Cette fonction appréhende le sous nuage des conséquences $vg(A)$. Soit a une action de A , $g(a)$ est déterminé si et seulement si une évaluation $\Gamma g(a)$ est disponible. $\Gamma g(a)$ est le support de la fonction critère g . Chaque action a est représentée dans l'espace des critères $E = E_1 \dots E_n$ par un vecteur $[g_1(a); \dots; g_n(a)]$ appelé vecteur de performance. L'ensemble des actions de A est représentée par une matrice appelée matrice de performances.

2. FAMILLE DE CRITERES : EXHAUSTIVITE, COHESION, NON REDONDANCE

Une famille de critères est l'ensemble des critères considérés dans un problème multicritère. Une famille de critères est dite cohérente si elle respecte :

- L'exhaustivité : une famille de critères est exhaustive si lorsque deux actions a et b sont indifférentes pour les n critères, il n'existe pas d'argument permettant de préférer a à b ou b à a .
- La cohésion : si deux actions a et b sont indifférentes et qu'une performance de a est dégradée alors qu'une performance de b est améliorée pour obtenir les actions a' et b' , la condition de cohésion implique que, globalement, b' est au moins aussi bonne que a' . Les évaluations globales doivent être en cohésion avec les évaluations critère par critère.
- La non redondance : une famille de critères n'est pas redondante s'il n'existe pas de critères superflus. Un critère n'est pas superflu lorsque sa suppression entraîne le non-respect de la cohésion et de l'exhaustivité (Henriet, 2000).

3. AIDE A LA DECISION MULTICRITERE

Lorsque les méthodes d'optimisation ont été limitées par les approches monocritère, la notion de multicritère a été développée. Bouyssou (2003) parle de la crise de la recherche opérationnelle. Roy (1993) parle d'aide multicritère à la décision plutôt que d'aide à la décision multicritère. Elle permet d'aider à la décision en utilisant

plusieurs critères. Ces différents critères à prendre en compte sont souvent contradictoires (Vincke, 1989) et peuvent être aussi bien quantitatifs que qualitatifs. L'aide multicritère à la décision traite les problèmes mal posés qui traduisent le contexte de décision réel. Cette idée est justifiée par les analyses suivantes :

- Les problèmes de décision les plus complexes et les plus conflictuels comportent toujours des axes de signification communs aux acteurs et servant de base à la justification, la transformation et l'expression de leurs préférences ;
- Les critères permettent de gérer, dans chaque axe de signification, les éléments d'incertitude, d'imprécision et de mauvaise définition du problème ;
- La décision est toujours le résultat d'un compromis entre plusieurs objectifs conflictuels.

Selon Vansnick (1986), la formulation multicritère d'un problème de décision peut donc être définie à partir de trois ensembles :

- L'ensemble des actions potentielles pouvant être défini par extension avec des contraintes implicites ou par compréhension avec des contraintes explicites ;
- L'ensemble fini des critères d'évaluation généralement conflictuels ;
- L'ensemble des évaluations des performances des actions selon chacun des critères, représentées pour chaque action par un vecteur de performances.

Le processus d'aide à la décision multicritère peut être décomposé en quatre niveaux :

- La définition de l'objet de la décision ;
- L'élaboration et choix des critères ;
- La modélisation des préférences, évaluation des performances et agrégation ;
- L'analyse des résultats et élaboration d'une recommandation.

Nous allons nous concentrer, dans la suite de ce chapitre, sur les méthodes d'évaluation et d'agrégation.

4. METHODES D'ÉVALUATION ET D'AGREGATION

Dans un problème de décision, la première décision à prendre est le choix de la méthode utilisée. Ce choix dépend (Guitouni et Martel 1998) :

- Du nombre de décideurs ;
- De la compréhension du principe de la méthode par le décideur ;
- De la problématique de décision ;
- Du niveau de compensation accepté par le décideur.

Schärlig (1985) distingue plusieurs familles de méthodes :

- Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) et ses dérivés (AHP) ;
- Les méthodes de sur-classement de synthèse ;
- Les méthodes interactives du jugement local basées sur des agrégations locales.

Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) et ses dérivés (AHP) reposent sur un critère unique de synthèse. Le critère unique de synthèse correspond à l'agrégation de différents critères en un critère unique. Les actions potentielles sont ensuite évaluées uniquement par ce critère unique. L'utilisation du critère unique permet d'avoir un pré-ordre sur les actions potentielles. Ces méthodes sont basées sur une démarche descriptive. Elles permettent d'obtenir une unique fonction à optimiser à partir de l'agrégation de différents points de vue. Les méthodes diffèrent sur la façon d'agréger. Les méthodes qui correspondent sont : AHP, SMART, TOPSIS (Tacnet, 2009).

Une autre approche possible est le surclassement de synthèse. Cette approche consiste à établir des préférences critère par critère puis à agréger ces relations en une relation de surclassement global. Les méthodes de sur-classement de synthèse sont basées sur une démarche constructive. La première étape est d'établir des relations de surclassement pour représenter les préférences du décideur. La seconde étape est l'exploitation des résultats

pour aider le décideur. Les méthodes qui correspondent sont : ELECTRE, PROMETHEE, ORESTE, QUALIFLEX (Tacnet, 2009).

5. METHODES BASEES SUR LE CRITERE UNIQUE DE SYNTHESE

5.1. Multi Attribute Utility Theory

La théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) a été développée à la fin des années 60 par Keeney et Raiffa. Elle est dérivée de la théorie de l'utilité espérée elle-même dérivée de la théorie de la décision dans l'incertain. Elle cherche à mesurer l'utilité totale qui peut être tirée de chacune des actions potentielles. Elle est obtenue en combinant les utilités élémentaires de chaque action en fonction des différents critères. La somme pondérée est un cas particulier des méthodes de type MAUT (Bouyssou *et al.*, 2005).

Cette théorie repose également sur un axiome selon lequel un décideur qui doit évaluer un ensemble d'actions selon plusieurs critères essaie de maximiser une fonction dépendant de l'ensemble des critères (Vincke, 1989).

La difficulté principale de cette méthode réside dans la complexité d'estimer la fonction d'utilité et elle suppose l'homme totalement rationnel.

5.2. Analytic Hierarchy Process

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) a été développée par Saaty (1980). Elle repose sur trois principes :

- Elle utilise une décomposition et une représentation hiérarchique pour formuler un problème sous une forme multicritères ;
- Elle explicite les préférences entre critères selon un principe basé sur une échelle de ratio sémantique ;
- Les actions occupent le dernier niveau de la hiérarchie mais leur évaluation est faite sur le même principe que les autres niveaux de la hiérarchie.

L'objectif est de représenter le raisonnement humain. Il s'agit de décomposer le problème de décision par une approche analytique.

Les phases de construction d'un modèle de décision hiérarchique sont les suivantes (Saaty, 1980) :

- L'identification de la problématique : quelle est la nature de la décision ?
- L'identification de l'homme d'étude et discussion avec le décideur ;
- L'identification des critères ;
- La structuration des critères de façon descendante ;
- La construction du modèle ;
- La vérification de la cohérence des niveaux hiérarchiques ;
- Les évaluations des actions potentielles ;
- A chaque niveau de la hiérarchie, analyse de l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres (définir les priorités), vérification de la cohérence des jugements.

5.3. Analytic Network Process

L'Analytic Network Process (ANP) est une généralisation de la méthode AHP (Saaty, 2005). Elle permet de représenter des corrélations plus complexes entre les niveaux de décision. Alors que l'AHP propose un arbre de décision avec une comparaison par paire à chaque niveau, l'ANP permet d'avoir une structure de décision avec des comparaisons par paire généralisées sur l'ensemble l'arbre. Dubromelle *et al.* (2009) appliquent l'ANP à un problème d'ordonnancement dont le réseau est présenté sur la Figure 96.

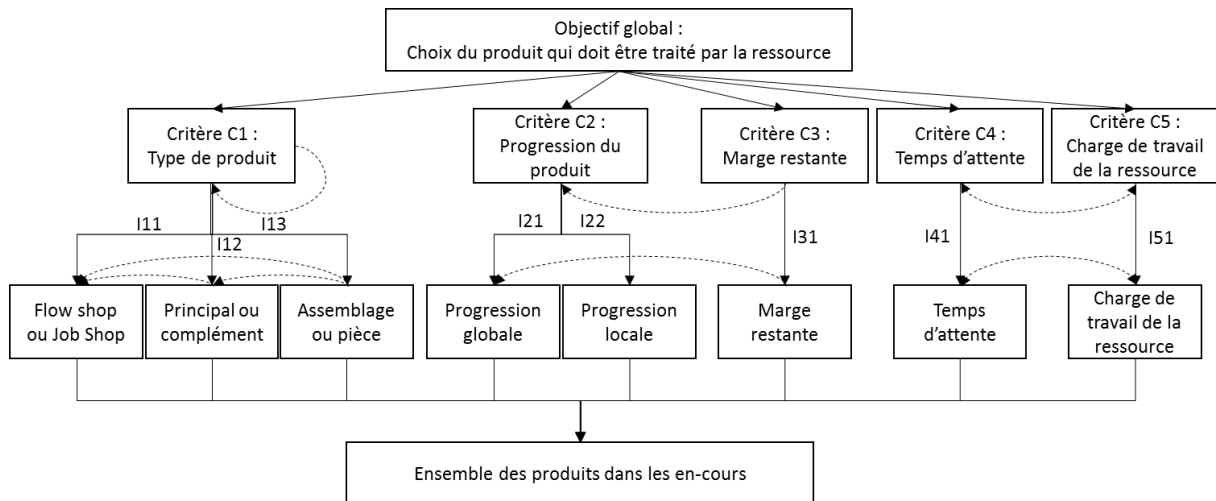


Figure 96 - Réseau ANP (Dubromelle *et al.*, 2009)

5.4. SIMOS

La méthode SIMOS aussi appelée technique du jeu de carte a été développée par Simos (1990). La première étape consiste à classer les critères, ce qui peut être fait à partir d'un jeu de carte contenant le nom des critères. Les décideurs peuvent également ajouter combien de fois un critère est plus important que le critère qui le précède. Ensuite, un poids est calculé à partir du rang de chaque critère. Cette méthode est utilisable avec un petit nombre de solutions. Dans la littérature, soit le groupe est simulé (Martin *et al.*, 1998) soit la méthode est appliquée sur un projet réel avec un nombre de décideurs fini (Bovy, 1994).

5.5. TOPSIS

La Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) a été développée par (Hwang et Yoon 1981). Elle permet de classer par ordre de choix un certain nombre d'alternatives en fonction d'un ensemble de critères. L'idée principale est construire une solution fictive idéale et une solution fictive anti-idéale et de choisir la solution qui est la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale.

L'avantage de cette méthode est sa simplicité d'implémentation. Les poids des critères sont déterminés *a priori* ou peuvent être calculés à partir d'autres méthodes telles que l'AHP.

6. METHODES DE SURCLASSEMENT DE SYNTHÈSE

Les principes des méthodes ELECTRE et PROMETHEE sont développés dans (Roy, 1991) et (Vincke, 1989). Elles consistent à comparer des solutions potentielles à un problème de décision, en présence de plusieurs critères. Elles utilisent des procédures d'agrégation multicritères fondées sur la construction puis l'agrégation de relation floues (Bouyssou *et al.*, 2005).

6.1. PROMETHEE

Dans la méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) (Brans et Mareschal, 2005), une fonction de préférence est définie pour chaque critère. Le principe est de construire une relation de surclassement évaluée traduisant une intensité de préférence.

Cette fonction permet de calculer pour chaque paire d'actions potentielles, un nombre compris entre 0 et 1 qui représente le degré de préférence. Une fois l'ensemble des relations de préférences floues obtenues, les étapes suivantes correspondent à l'agrégation de relations floues à l'aide d'une généralisation de la méthode de Borda caractérisée dans (Marchant, 1996). Des variantes de cette caractérisation sont proposées dans (Marchant, 1998).

6.2. ELECTRE

Les méthodes ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la REalité) utilisent une construction analogue à la méthode PROMETHEE mais elles autorisent des phénomènes de veto (Roy, 1991).

La première méthode est publiée en 1968. Elle consiste à comparer les actions par paire ordonnée en regardant quelle action surclasse l'autre. La relation de préférence définit des indices de concordance qui représentent le degré avec lequel une action est au moins aussi bonne qu'une autre et des indices de discordance qui représentent la différence entre les deux actions. Si un indice de discordance dépasse un certain seuil, appelé seuil de veto, il prend la valeur 1 et contraint la relation de préférence.

Les étapes de la méthode ELECTRE I sont :

- Les jugements : détermination des critères cohérents, attribution des poids, évaluation de chaque critère pour chaque action pour obtenir la matrice ;
- Les indices : comparaison des actions par paire ordonnée ;
- Le seuil de surclassement : détermination d'un seuil pour les indices de concordance et de discordance, conservation des paires ordonnées qui respectent les seuils.

L'avantage de cette méthode est de nécessiter peu d'informations.

ELECTRE I est ensuite développées pour aboutir à ELECTRE II, III, IV et ELECTRE Tri.

Selon la classification de Roy (1968), qui définit quatre problématiques de référence : le choix, le tri, le rangement et la description, ELECTRE I et IV répondent à la problématique de choix. Leur objectif est d'obtenir le plus petit sous ensemble tel que toutes les actions qui ne sont pas dans ce sous ensemble soient surclassées par au moins une action de ce sous-ensemble et tel que les actions de ce sous-ensemble de soient pas comparables entre elles. ELECTRE Tri répond à la problématique de tri. Quant à ELECTRE III, elle répond à la problématique de rangement. L'objectif est de ranger les alternatives de la meilleure à la moins bonne avec des possibles incomparabilités.

7. CHOIX D'UNE METHODE MULTICRITERE

Dans le cadre d'un bin packing et d'un ordonnancement, plusieurs critères peuvent être considérés et ils sont parfois contradictoires. Nous sommes bien dans le cadre d'une optimisation multicritère. Les critères choisis et leur importance dépendent du décideur. Il est nécessaire de réussir à traduire le raisonnement et les préférences du décideur au sein de l'évaluation des solutions.

Les méthodes de surclassement nécessitent une intervention importante du décideur et une comparaison régulière des solutions obtenues. Dans le cadre de notre optimisation, le décideur ne peut pas être sollicité tout au long de l'optimisation. C'est pourquoi, nous allons utiliser une méthode basée sur un critère unique de synthèse.

Afin d'obtenir un indicateur agrégé intégrable au moteur d'optimisation, la première approche la plus simple, parmi les méthodes basées sur un critère unique de synthèse, apparaît être la somme pondérée. Pour implémenter la somme pondérée, il est nécessaire de définir des poids à attribuer à chaque indicateur. Afin de traduire les préférences du décideur, nous proposons d'utiliser la méthode AHP.

CHAPITRE 5. FORMALISATION MATHÉMATIQUE

Nous allons maintenant nous appuyer sur l'étude bibliographique pour formaliser les données d'entrée, les variables de décision et les contraintes pour chacun des deux problèmes et la fonction objectif (Antomarchi et al., 2018).

1. NOTATIONS

Les commandes, les références de pièce, les OF, les plateaux et les machines sont désignés par :

i	Indice du numéro de commande
j	Indice de la référence de pièce
l	Indice du numéro de l'OF
k	Indice de la référence de plateau
m	Indice du numéro de la machine de fabrication additive

Le système étudié contient un certain nombre de chaque élément :

nb_com	Nombre de commandes
nb_ref	Nombre de références de pièces
nb_OF	Nombre d'OF
nb_pla	Nombre de plateaux
nb_ma	Nombre de machines

2. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée nécessaires à la résolution de ce problème concernent les commandes, les machines de fabrication additive, les plateaux, les gammes des pièces à fabriquer et les différentes compatibilités.

2.1. Les commandes

Dans notre ordonnancement, les tâches sont définies par une date de fin au plus tard qui correspond à la date demandée par le client. Chaque commande peut être composée de plusieurs types de pièces.

Soit d_i la due date de la commande i .

Soit $nb_ligne_com_i$ le nombre de ligne dans la commande i .

Soit $ref_{c,i}^{com}$ la référence de la pièce de la ligne c de la commande i .

Soit $qté_{c,i}^{com}$ la quantité associée.

Une ligne c de la commande i est caractérisée par le 2-uplet $\{ref_{c,i}^{com}; qté_{c,i}^{com}\}$

2.2. Les machines

Un type de machine est défini par une hauteur maximale et un coût opératoire.

$h_m^{machine}$	Hauteur de pièce maximale acceptée par la machine m
OC_m	Coût opératoire de la machine m en €/min

2.3. Les plateaux

Les plateaux sont définis par leurs dimensions.

$largeur_k^{pla}$	Largeur du plateau k
$longueur_k^{pla}$	Longueur du plateau k

2.4. Les gammes

Chaque type de pièce est défini par la poudre utilisée, ses dimensions et par un ensemble de temps.

p_j	Référence de la poudre de la pièce j
$largeur_j^{pièce}$	Largeur de la pièce j
$longueur_j^{pièce}$	Longueur de la pièce j
$h_j^{pièce}$	Hauteur de la pièce j
$surf_j$	Surface de la pièce j $surf_j = largeur_j * longueur_j$
v_j	Volume de la pièce j $v_j = surf_j * h_j^{pièce}$
h_j^{couche}	Hauteur de couche pour la pièce j
tps_tth_j	Temps de traitement thermique de la pièce j
$tps_nettoyage_j$	Temps de nettoyage de la pièce j
tps_lasage_j	Temps de lasage de la pièce j
$tps_mise_en_couche_j$	Temps de mise en couche de la pièce j

2.5. Les compatibilités

Les plateaux sont également en métal. Pour des questions de température et de réaction aux interfaces, toutes les poudres ne sont pas compatibles avec tous les plateaux.

Pour des questions de dimension et de système d'attache, les plateaux et les machines ne sont pas tous compatibles.

De même, certaines poudres peuvent être incompatibles avec certaines machines.

$$plateau_poudre_{k,p} = \begin{cases} 1 & \text{si le plateau } k \text{ est compatible avec la poudre } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$poudre_machine_{p,m} = \begin{cases} 1 & \text{si la poudre } p \text{ est compatible avec la machine } m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$plateau_machine_{k,m} = \begin{cases} 1 & \text{si le plateau } k \text{ est compatible avec la machine } m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

3. BIN PACKING

La formalisation du problème de bin packing est inspirée de la formalisation proposée par Li et Zhang (2018).

3.1. Notations

n	Index du numéro de la pièce
nb_piece_total	Nombre de pièces total
$ref_n^{pièce}$	Référence de la pièce n
(x_n, y_n)	Coordonnées de l'angle en bas à gauche de la pièce n

3.2. Variables de décision

Les variables de décision concernent l'affectation de la pièce à un OF et sa position sur le plateau.

$$X_{n,l} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } n \text{ est affectée à l'OF } l \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Y_l = \begin{cases} 1 & \text{si l'OF } l \text{ a été créé} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$PL_{n,z} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } n \text{ est placée à gauche de la pièce } z \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$PB_{n,z} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } n \text{ est placée en dessous de la pièce } z \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$O_{n,k} = \begin{cases} 1 & \text{si la pièce } n \text{ est placée de telle manière à ce que sa largeur soit parallèle à la} \\ & \text{largeur du plateau } k \text{ utilisé pour l'OF } l \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les variables de décision sont des variables binaires.

$$\forall l \in \{1, \dots, nb_OF\}, Y_l \in \{0,1\}$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, \forall l \in \{1, \dots, nb_OF\}, X_{n,l} \in \{0,1\}$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, O_{n,k} \in \{0,1\}$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, PB_{z,n}, PL_{z,n} \in \{0,1\}$$

La Figure 97 représente les différentes dimensions des plateaux et des pièces ainsi que le fonctionnement des coordonnées.

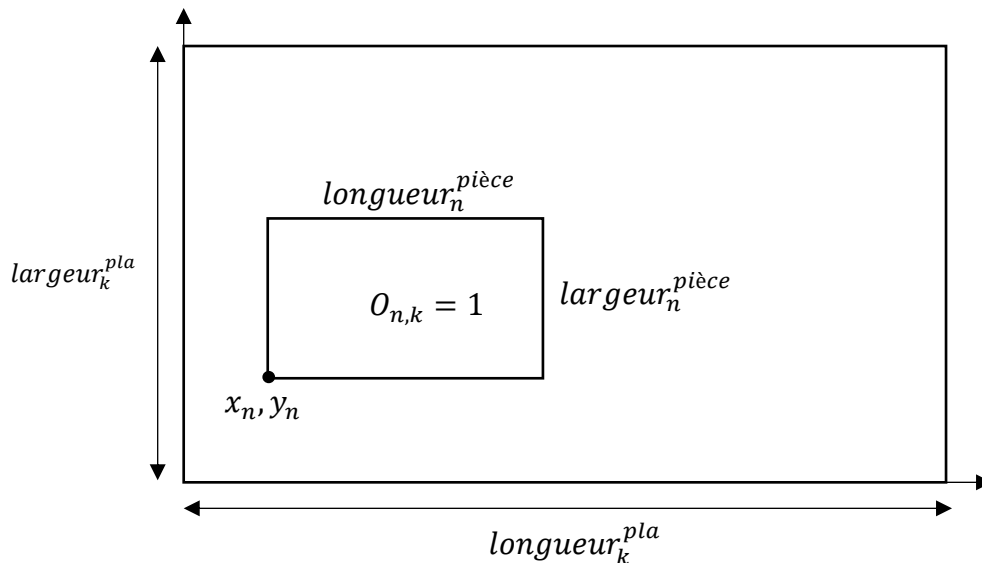


Figure 97 - Dimensions et coordonnées

3.3. Variables liées

Les variables liées sont les variables qui dépendent des variables de décision. Une fois qu'un OF est affecté à une machine,

pla_l	Référence du plateau de l'OF l
$nb_ligne_OF_l$	Nombre de lignes de l'OF l

Soit $ref_{a,l}^{OF}$ la référence de la pièce de la ligne a de l'OF l .

Soit $qté_{a,l}^{OF}$ la quantité associée.

Soit $commande_{a,l}$ la commande à laquelle appartient la ligne a de l'OF l .

Une ligne a de l'OF l est caractérisée par le 3-uplet $\{ref_{a,l}^{OF}; qté_{a,l}^{OF}; commande_{a,l}\}$.

Plusieurs variables sont calculées à partir des variables de décision :

v_l^{OF}	Volume total de l'OF l
p_l	Poudre de l'OF l
tps_lasage_l	Temps de lasage pour l'OF l
tps_tth_l	Temps de traitement thermique pour l'OF l
$tps_decoupage_l$	Temps de découpage pour l'OF l
$tps_refroidissement_l$	Temps de refroidissement pour l'OF l
$tps_recup_poudre_l$	Temps de récupération de poudre pour l'OF l
$tps_nettoyage_l$	Temps de nettoyage pour l'OF l

Le volume de l'OF l est calculé à partir du volume de chaque pièce contenue dans l'OF.

$$v_l^{OF} = \sum_{n=1}^{nb_piece_total} X_{n,l} * v_{ref_n}^{piece} \quad (148)$$

Le temps de lasage d'un OF l est calculé en additionnant le temps maximum de mise en couche des pièces présentes sur le plateau et le temps de lasage de chaque pièce.

$$tps_lasage_l^{OF} = \max_n(X_{n,l} * tps_mise_en_couche_{ref_n}^{piece}) + \sum_n X_{n,l} * tps_lasage_{ref_n}^{piece} \quad (149)$$

Le temps de détensionnement est le produit de la plus grande des plus petites largeurs des pièces présentes sur le plateau par un coefficient lié à la vitesse de détensionnement $coef$.

$$tps_tth_l = \max(\min_n(X_{n,l} * largeur_{ref_n}^{piece}) * coef \quad (150)$$

Le temps de découpage est calculé en fonction de la surface à découper et de la vitesse du fil de la machine de découpe $vitesse_{fil}$ en mm^2/min .

$$tps_decoupage_l = \frac{surface_l}{vitesse_{fil}} \quad (151)$$

Avec :

$$surface_l = \sum_{n=1}^{nb_piece_total} X_{n,l} * (largeur_{ref_n}^{piece} * longueur_{ref_n}^{piece}) \quad (152)$$

Le temps de refroidissement est le rapport entre le volume total de poudre et la vitesse de refroidissement $vitesse^{ref}$.

$$tps_refroidissement_l = \frac{v_l^{plateau}}{vitesse^{ref}} \quad (153)$$

Avec :

$$v_l^{plateau} = largeur_{pla_l}^{plateau} * longueur_{pla_l}^{plateau} * \max_n(X_{n,l} * h_{ref_n}^{piece}) \quad (154)$$

Le temps de récupération de poudre correspond au temps nécessaire pour récupérer la poudre non fusionnée. Il s'agit du rapport entre la différence du volume de poudre et du volume de l'OF et le débit de l'aspirateur utilisé $debit$ auquel un temps de préparation t_p est ajouté.

$$tps_recup_poudre_l = \frac{v_l^{plateau} - v_l^{OF}}{debit} + t_p \quad (155)$$

Le temps de nettoyage de l'OF correspond à la somme des temps unitaires de nettoyage des pièces présentes dans l'OF.

$$tps_nettoyage_l^{OF} = \sum_{n=1}^{nb_piece_total} X_{n,l} * tps_nettoyage_{ref_n}^{piece} \quad (156)$$

3.4. Contraintes

Une pièce ne peut pas être assignée à un OF qui n'a pas été créé.

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, \forall l \in \{1, \dots, nb_{OF}\}, X_{n,l} \leq Y_l \quad (157)$$

Chaque pièce est affectée à un et un seul OF.

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, \sum_{l=1}^{nb_{OF}} X_{n,l} = 1 \quad (158)$$

Une pièce ne peut pas être placée à l'extérieur d'un plateau.

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, x_n + largeur_{ref_n}^{pièce} O_{n,k} + longueur_{ref_n}^{pièce} (1 - O_{n,k}) \leq largeur_k^{pla} \quad (159)$$

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, y_n + longueur_{ref_n}^{pièce} O_{n,k} + largeur_{ref_n}^{pièce} (1 - O_{n,k}) \leq longueur_k^{pla} \quad (160)$$

Il faut également tenir compte de la contrainte de surface : les pièces d'un OF doivent rentrer sur le plateau attribué.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_ligne_OF_l\}, \sum_{\alpha, l} surf_{ref_OF_{\alpha, l}} \leq longueur_l^{pla} * largeur_l^{pla} \quad (161)$$

Deux pièces sur un même plateau ne peuvent pas se superposer.

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z \neq n, \quad (162)$$

$$x_z + largeur_{ref_z}^{pièce} O_{z,k} + longueur_{ref_z}^{pièce} (1 - O_{z,k}) \leq x_n + largeur_k^{pla} (1 - PL_{z,n})$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z \neq n, \quad (163)$$

$$y_z + longueur_{ref_z}^{pièce} O_{z,k} + largeur_{ref_z}^{pièce} (1 - O_{z,k}) \leq y_n + longueur_k^{pla} (1 - PB_{z,n})$$

$$\forall z, n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, z < n, \forall l \in \{1, \dots, nb_{OF}\}, \quad (164)$$

$$PL_{z,n} + PB_{z,n} + PL_{n,z} + PB_{n,z} \geq X_{z,l} + X_{n,l} - 1$$

Les coordonnées sont des valeurs positives ou nulles.

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, x_n, y_n \geq 0 \quad (165)$$

Tout d'abord, une contrainte sur la poudre doit être prise en compte : toutes les pièces d'un même OF doivent utiliser la même poudre.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_ligne_OF_l - 1\}, p_{ref_{\alpha, l}^{OF}} = p_{ref_{\alpha+1, l}^{OF}} \quad (166)$$

La poudre de la pièce à placer doit être compatible avec le plateau sur lequel la pièce est placée.

$$\forall n \in \{1, \dots, nb_pièce_total\}, \forall l \in \{1, \dots, nb_{OF}\}, X_{n,l} \leq plateau_poudre_{pla, l, p_{ref_n}^{pièce}} \quad (167)$$

Toutes les commandes doivent être complètes.

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, nb_com\}, \forall c \in \{1, 2, \dots, nb_ligne_com_i\}, qt_{c,i}^{com} = \sum_{\alpha,l} qt_{\alpha,l}^{OF} \cdot Z_{\alpha,l,i,c} \quad (168)$$

$$Avec : Z_{\alpha,l,i,c} = \begin{cases} 1 & \text{si } ref_{\alpha,l}^{OF} = ref_{c,i}^{com} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

4. ORDONNANCEMENT

Nous allons maintenant formaliser le problème d'ordonnancement.

4.1. Variables de décision

La première variable de décision concerne l'affectation des OF aux machines.

$$\forall l \in \{1, \dots, nb_{OF}\}, \forall m \in \{1, \dots, nb_{ma}\}, Z_{l,m} = \begin{cases} 1 & \text{si l'OF } l \text{ est affecté à la machine } m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Soit L_m la liste ordonnée d'OF affectée à la machine m .

$$\forall m \in \{1, \dots, nb_{ma}\}, L_m = (OF_{m,n} ; n \in \{1, \dots, nb_{OF_m}\}) \text{ où } nb_{OF_m} = |L_m|$$

4.2. Contraintes

L'ordonnancement doit respecter plusieurs contraintes, certaines sont liées intrinsèquement à l'ordonnancement, d'autres sont liées à la fabrication additive.

La hauteur des pièces d'un OF ne doit pas dépasser la hauteur maximale acceptée par la machine.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_{ligne_{OF_l}}\}, h_{ref_{\alpha,l}^{OF}}^{piece} \leq h_{ma_l}^{machine} \quad (169)$$

Le plateau choisi pour un OF doit être compatible avec la machine choisie.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, Z_{l,m} \leq plateau_machine_{p_{ref_{\alpha,l}^{OF},m}} \quad (170)$$

La poudre des pièces de l'OF l doit être compatible avec la machine à laquelle cet OF est affecté.

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, \forall \alpha \in \{1, 2, \dots, nb_{ligne_{OF_l}}\}, \forall m \in \{1, \dots, nb_{ma}\}, Z_{l,m} \leq poudre_machine_{p_{ref_{\alpha,l}^{OF},m}} \quad (171)$$

5. EVALUATION

Pour qu'un ordonnancement soit efficient il doit remplir plusieurs conditions. Tout d'abord, il faut qu'il permette de respecter les délais demandés par le client. Il doit également maximiser le taux d'utilisation des machines. Et enfin, il doit minimiser le prix de revient des pièces.

5.1. Respect des due dates

Le respect de la due date d'une commande i est calculé à partir des dates de sortie des OF l (ds_l) qui contiennent les pièces de la commande i . La date à laquelle la commande i est terminée (df_i) est la date de sortie de l'OF l qui contient la dernière pièce de la commande i . L'objectif est de minimiser la somme de l'ensemble des retards.

Soit $d_{i,l}$ une variable binaire qui indique si l'OF l contient une pièce de la commande i .

$$retard = \sum_{i=1}^{nb_com} retard_i \quad (172)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, nb_com\}, df_i = \max_l(d_{i,l} * ds_l) \quad (173)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, nb_com\}, retard_i = \begin{cases} df_i - d_i & \text{si } df_i - d_i \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (174)$$

5.2. Taux d'utilisation

L'objectif est de maximiser la moyenne de tous les taux d'utilisation $taux_m$.

$$taux_d'utilisation = \frac{\sum_{m=1}^{nb_ma} taux_m}{nb_ma} \quad (175)$$

5.3. Coût de production

Les coûts de production prépondérants sont les coûts liés à l'utilisation de la machine sur une longue durée et les coûts de setup qui correspondent à des coûts engendrés par du temps à non-valeur ajoutée. Le coût total de production de l'ensemble des OF C_{prod}^{tot} est la somme des coûts de production de chaque OF l : C_{prod_l} et des coûts de setup de chaque machine : C_{setup_m} . L'objectif est de le minimiser.

Pour calculer le coût de setup, le temps de setup de chaque machine m , ST_m , et le coût horaire des opérateurs HC sont nécessaires.

$$C_{prod}^{tot} = \sum_{l=1}^{nb_{OF}} C_{prod_l} + \sum_{m=1}^{nb_{ma}} C_{setup_m} \quad (176)$$

$$\forall l \in \{1, 2, \dots, nb_{OF}\}, C_{prod_l} = aff_{l,m} * temps_lasage_{l,m} * OC_m \quad (177)$$

$$\forall m \in \{1, \dots, nb_{ma}\}, C_{setup_m} = ST_m * HC \quad (178)$$

CHAPITRE 6. APPROCHE PROPOSEE

Après avoir formalisé mathématiquement le problème et en s'appuyant sur les méthodes proposées dans la littérature, nous allons développer notre approche proposée pour résoudre les problèmes de bin packing et d'ordonnement.

1. SCHEMA DE PRINCIPE

Les données d'entrée permettent d'alimenter un moteur d'optimisation qui répartit les pièces sur les plateaux, affecte les plateaux aux machines en les séquençant et évalue chaque solution en utilisant un modèle de simulation. L'optimisation s'arrête lorsque les résultats sont estimés satisfaisants, le critère d'arrêt dépend de la méthode utilisée.

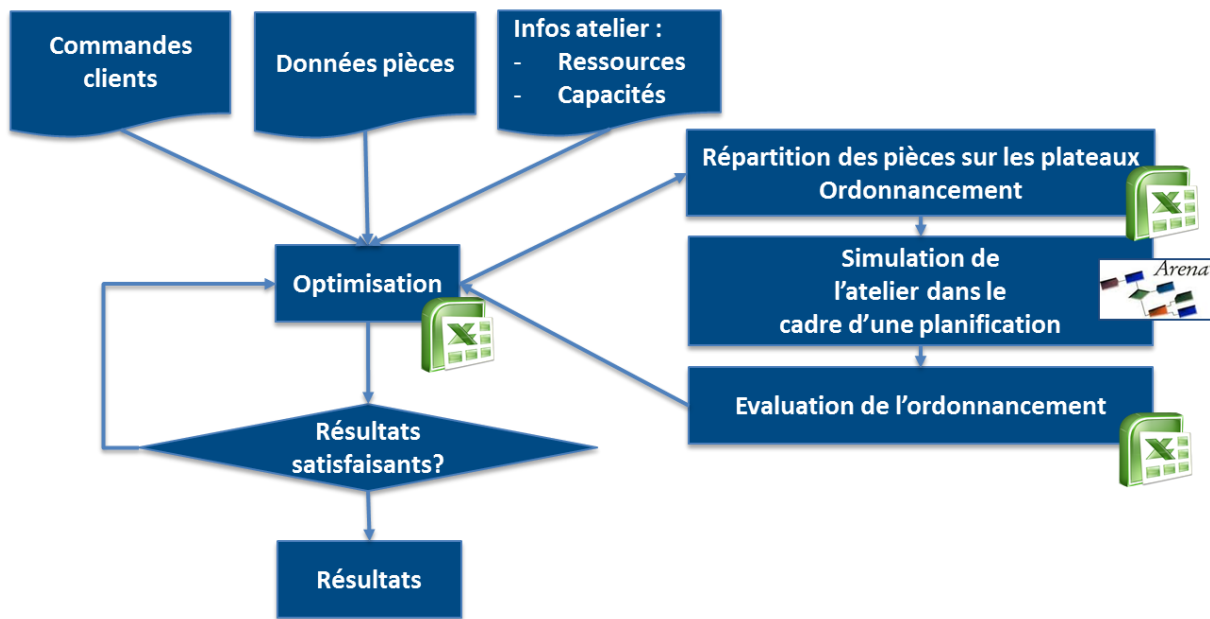


Figure 98 - Approche proposée

2. DONNEES D'ENTREE

Les données d'entrée correspondent aux commandes des clients, aux données sur les pièces et aux données liées à l'atelier.

La fabrication additive est un procédé qui doit encore faire ses preuves. Dans certains secteurs comme l'aéronautique ou le spatial, ce n'est pas la pièce qui est qualifiée mais la composition du plateau. Deux niveaux de données d'entrée sont donc possibles : soit la composition des plateaux est fixée par les certifications ou les exigences du client soit les pièces peuvent être mélangées. Par conséquent, soit il faut résoudre conjointement le problème de bin packing et d'ordonnement soit il faut résoudre le problème d'ordonnement.

3. EVALUATION MULTICRITERE : SIMULATION ET AHP

Nous avons vu, dans le cadre d'un ordonnancement, que l'expérimentation sur le système réel n'est pas réalisable tout comme l'utilisation d'un modèle physique. Le nombre de paramètres et de relations entre toutes les entités du système ne permet pas d'utiliser des méthodes analytiques. Nous allons donc réaliser une expérimentation sur un modèle logico-mathématique en utilisant la simulation. Le modèle de simulation développé est un modèle dynamique, déterministe et à événement discret.

L'évaluation prend en compte trois critères : le respect des due dates, le taux d'utilisation des machines de fabrication additive et le coût de production. Afin de considérer ces trois critères, nous allons utiliser une

méthode d'aide à la décision multicritère. L'Analytic Hierarchy Process (AHP) permet de modéliser le mécanisme de prise de décision humain tout en étant facile à prendre en main. L'AHP est la seule méthode qui permet de prendre en compte la cohérence des préférences du décideur. Elle permet de prendre en compte l'indépendance et l'interdépendance des critères d'évaluation considérés (Pujo et Ounnar 2008). De plus, l'AHP a démontré sa robustesse à travers plusieurs domaines d'application (Dubromelle *et al.*, 2009). Pour ces raisons, l'AHP est la méthode choisie pour réaliser l'évaluation multicritère.

L'évaluation multicritère et la simulation sont développées dans le CHAPITRE 7.

4. OPTIMISATION

Nous allons donc réaliser deux optimisations : une dans le cas où les données d'entrée sont les plateaux déjà formés et une autre où les données d'entrée sont les pièces.

4.1. Des plateaux aux OF

Dans le cas où les plateaux sont déjà formés, il s'agit de résoudre le problème d'ordonnancement. Pour cela, nous utilisons un algorithme génétique et une entropie croisée.

Un algorithme génétique est développé dans une première approche. Les étapes de l'algorithme génétique sont : la création de la population initiale, l'évaluation des individus, la vérification du critère d'arrêt, la sélection de la population et la création des nouvelles solutions (Figure 99). L'algorithme génétique proposé est détaillé étape par étape dans le CHAPITRE 8.

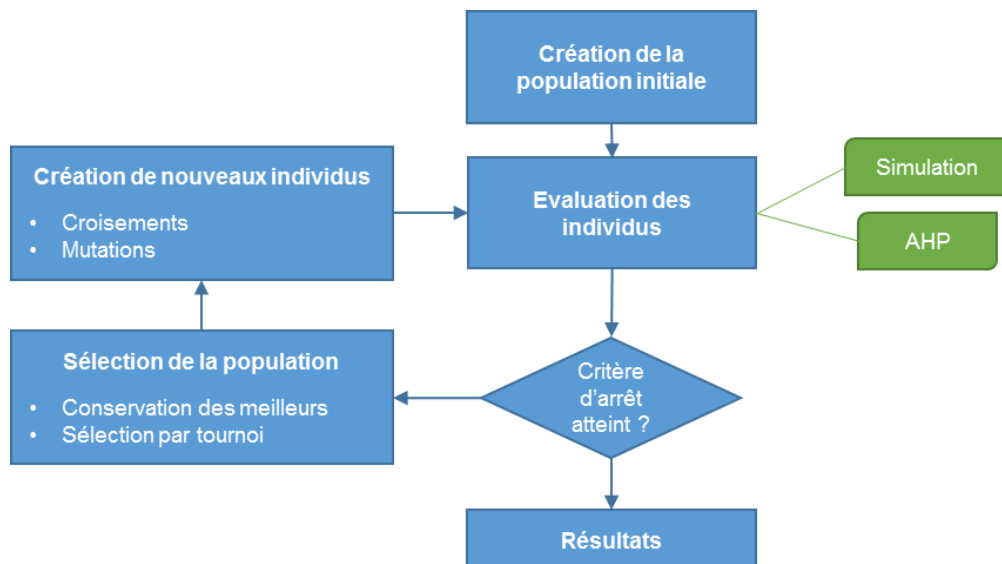


Figure 99 - Algorithme génétique

Afin d'obtenir des connaissances supplémentaires sur les associations de plateaux qui permettent d'obtenir un ordonnancement performant, une entropie croisée est développée. Cette méthode a démontré son intérêt dans de nombreuses applications (De Boer *et al.*, 2005).

Dans l'entropie croisée plateau/OFF, pour chaque solution, les plateaux sont affectés à des places sur chaque machine. Chaque solution est évaluée. Cette évaluation permet de sélectionner les meilleurs afin de mettre à jour la matrice de probabilité (Figure 100). L'entropie croisée développée est présentée dans le CHAPITRE 9.

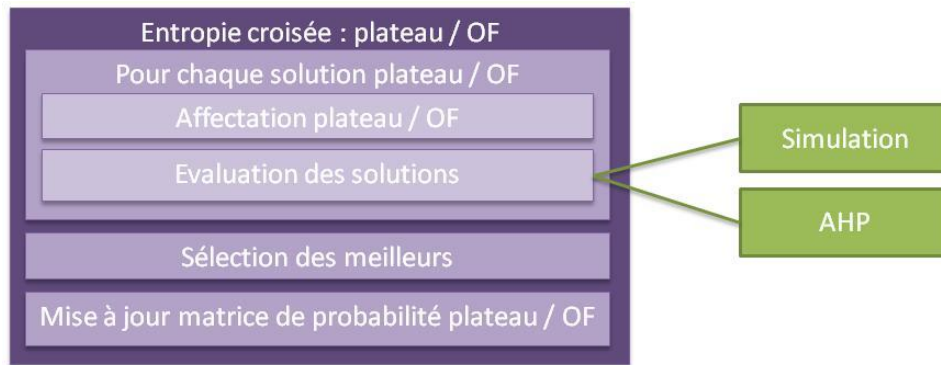


Figure 100 - Entropie croisée plateau/OF

Les deux algorithmes sont appliqués sur un cas industriel et les résultats obtenus sont comparés dans le CHAPITRE 10.

4.2. Des pièces aux OF

Pour optimiser la répartition des pièces sur les plateaux, les ensembles de pièces qui donnent les meilleurs résultats doivent être favorisés. L'entropie croisée permet d'apprendre quels sont ces ensembles de pièces, à partir des meilleures solutions.

Nous allons donc ajouter une boucle d'entropie croisée, qui permet de répartir les pièces sur les plateaux, autour de la première boucle d'entropie croisée qui permet d'affecter les plateaux aux machines et de les séquencer (Figure 101).

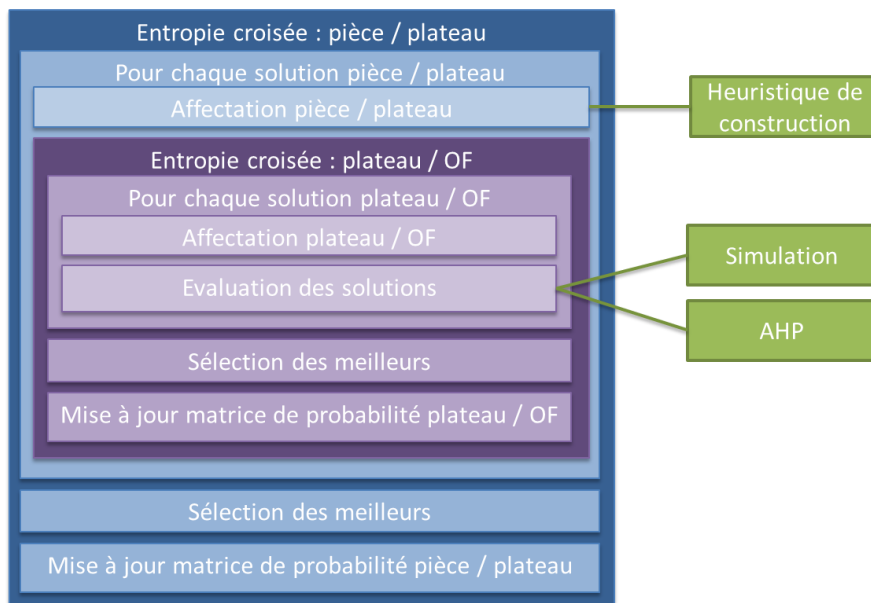


Figure 101 - Entropies croisées

Afin de placer les pièces sur les plateaux en prenant en compte leur géométrie, l'heuristique de construction de i est utilisée.

CHAPITRE 7. EVALUATION MULTICRITERE ET SIMULATION

Pour évaluer les différents ordonnancements, les indicateurs de performances utilisés sont en lien avec les temps et les ressources. Les indicateurs choisis sont le respect des dates du client, le taux d'utilisation des différentes ressources et le coût total de la réalisation de l'ensemble des commandes.

L'évaluation est réalisée grâce à un modèle de simulation. Une méthode d'évaluation multicritère est utilisée pour prendre en compte les trois critères choisis.

1. MODELE DE SIMULATION

L'évaluation est réalisée à partir des équations ((172),(175),(176)). Les données nécessaires à ces calculs sont issues des résultats obtenus à partir d'un modèle de simulation développé sur le logiciel Arena®.

Le modèle de simulation prend en compte les opérations de l'arrivée des plateaux jusqu'aux pièces finies avant expédition. Le modèle représente un atelier qui est multi-pièce, multi-poudre, multi-plateau et multi-machine. En fonction du type de machines, l'étape de nettoyage de l'ensemble plateau/pièces peut se faire à l'intérieur de la machine.

Avant l'étape de découpe, le modèle fonctionne à l'échelle du plateau, à partir de cette étape, le modèle fonctionne à l'échelle de la pièce. Les post-traitements sont simulés et les flux sont désynchronisés. Les données d'entrée de ce modèle sont les temps de chaque opération, le nombre de ressources, les gammes de chaque pièce, la composition de chaque OF et la liste ordonnée d'OF sur chaque machine.

1.1. Hypothèses

Les hypothèses faites pour développer ce modèle sont :

- L'atelier est multi-poudre ;
- Les transferts entre les machines sont effectués avec des modules manuels ;
- Les modules de chargement et de déchargement ne sont pas dédiés à une poudre et n'ont pas besoin d'être nettoyés entre deux plateaux ;
- Les machines de nettoyage sont considérées comme propres et ne sont pas dédiées à des poudres ;
- Le nettoyage des filtres des machines se fait en temps masqué ;
- Les pannes et les aléas ne sont pas pris en compte ;
- Le planning des ressources secondaires n'est pas pris en compte, il y a une présence atelier sur tout le temps d'ouverture de l'atelier ;
- Le modèle est déterministe ;
- A part les machines de fabrication additive, toutes les opérations sont gérées en FIFO ;
- La poudre est toujours en quantité suffisante.

1.2. Cadre expérimental

1.2.1. Planifications des variables d'entrée

Les variables d'entrée sont :

- La composition des OF ;
- L'ordonnement des OF sur chaque machine de fabrication additive.

1.2.2. Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle sont :

- La taille des lots de plateau pour le détensionnement ;
- Le nombre de plateaux de chaque type.

1.2.3. Variables de sortie

Les variables de sortie sont :

- Les taux d'utilisation des machines de fabrication additive ;
- Les temps de setup (temps de changement de poudre et temps de nettoyage de la machine) des machines de fabrication additive ;
- La date de sortie de chaque pièce.

1.2.4. Conditions d'initialisation de la simulation

A $t=0$, toutes les machines sont disponibles. Les machines de fabrication additive sont considérées comme sortant d'un changement de poudre. Il n'y a aucun en-cours. Le stock de plateaux neufs est plein.

1.2.5. Condition de terminaison de la simulation

La simulation se termine lorsque toutes les pièces ont été fabriquées.

1.2.6. Compression et collecte des résultats

La collecte des résultats se fait sur l'ensemble du temps de simulation. Les données sont recueillies dans un fichier Excel afin d'être exploitées lors de l'évaluation des solutions testées. Les résultats sont des résultats optimistes pour les due dates.

Les données de sortie utilisées pour évaluer les solutions sont :

- La date de sortie de chaque OF l : ds_l ;
- Le taux d'utilisation de chaque machine m : $taux_m$;
- Le temps de setup de chaque machine m : ST_m .

2. METHODE D'EVALUATION MULTICRITERE

2.1. Analytic Hierarchy Process

Cette méthode, proposée par Saaty (1980) comprend 5 principes : la décomposition d'un problème de prise de décision complexe en une structure hiérarchique, la comparaison deux-à-deux, le calcul des valeurs de priorité relative, la vérification de la cohérence du jugement et un score de synthèse pour chaque solution.

L'AHP est implémenté à travers deux phases : la configuration et l'évaluation (Pujo et Ounnar 2008). La phase de configuration consiste à comparer par paire les éléments de chaque niveau pour obtenir l'importance relative de chaque élément. L'analyse des matrices obtenues permet de vérifier la cohérence. Si le résultat est cohérent, les matrices sont converties en vecteurs priorité qui permettent d'avoir les poids de chaque indicateur et de chaque critère. La phase d'exploitation permet d'obtenir les vecteurs qui donnent l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif global.

Cette méthode se décompose en 5 étapes (Saaty, 1990) :

- Etape 1 : Décomposition du problème en une structure hiérarchique ;
- Etape 2 : Comparaison binaire des critères et sous-critères pour chaque niveau ;
- Etape 3 : Détermination du poids de chacune des solutions vis-à-vis de chaque sous-critère puis des critères ;
- Etape 4 : Vérification de la cohérence du jugement lors de chaque étape de comparaison ;
- Etape 5 : Calcul de la performance relative de chacune des solutions.

Le processus de décision de l'AHP est présentée Figure 102. La démarche de calcul pour déterminer la performance relative des critères par rapport à l'objectif global, des sous-critères par rapport aux critères et des alternatives par rapport aux sous-critères est identique. Après avoir calculé le vecteur priorité qui permet d'obtenir les poids, il faut vérifier la cohérence du raisonnement réalisé pour chaque étape de comparaison. Cette démarche est décrite Figure 103.

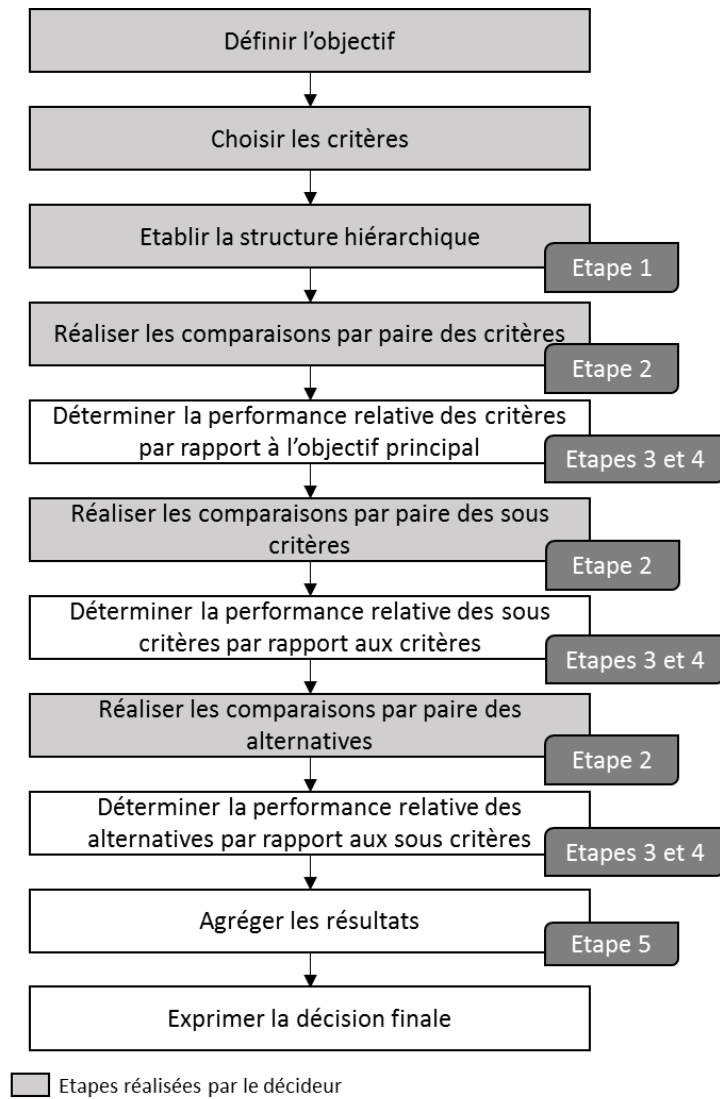


Figure 102 - Processus de décision de l'AHP

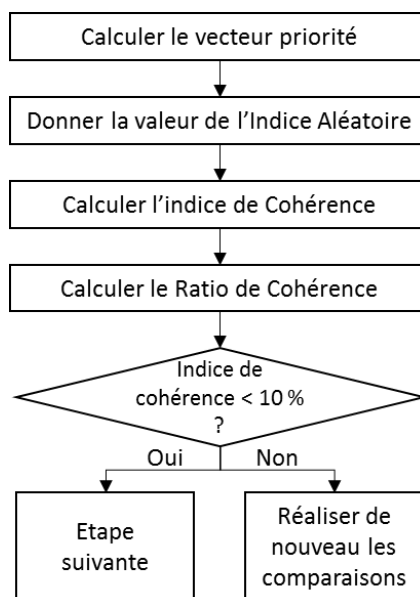


Figure 103 - Détermination de la performance relative

2.1.1. Etape 1

La structure hiérarchique est composée, au premier niveau, de l'objectif du problème. Ensuite, les critères et les sous critères constituent les niveaux intermédiaires. Et enfin, le dernier niveau est composé des solutions aussi appelées alternatives (Figure 104).

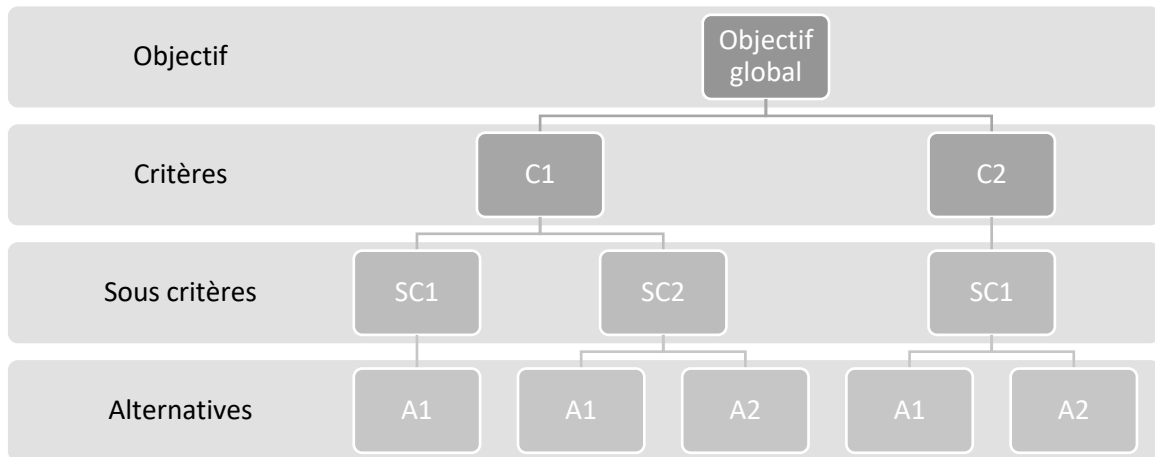


Figure 104 - Structure hiérarchique

Dubromelle *et al.* (2009) modélisent le problème par une structure hiérarchique à 4 niveaux : l'objectif global, les critères, les indicateurs et les alternatives.

- Niveau 1 : la définition de l'objectif général permet de mettre en avant les différents critères à prendre en compte pour la prise de décision ;
- Niveau 2 : les différents critères doivent être définis de manière très précise car le décideur s'appuie sur leur définition pour les évaluer et les comparer ; ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs ;
- Niveau 3 : les critères peuvent être divisés en sous critères qui expriment chacun une part différente de la complexité du critère apparenté ;
- Niveau 4 : les alternatives et les solutions proposées.

Cette structure hiérarchisée permet d'obtenir une représentation complète et claire du problème de décision, et de regrouper l'ensemble des informations nécessaires à celle-ci.

2.1.2. Etape 2

Trois étapes de comparaison sont nécessaires. Tout d'abord, la comparaison des critères par paire est effectuée. Puis, pour chaque critère, les sous-critères sont à leur tour comparés deux à deux. Enfin, les alternatives sont à leur tour comparées par paire.

Ces trois étapes de comparaison sont réalisées à l'aide de l'échelle de Saaty (Tableau 61) (Saaty, 1987).

Degrés d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
Principe de réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé à l'élément j , alors j aura la valeur inverse lorsqu'on le compare à i

Tableau 61 - Echelle des valeurs de (Saaty, 1987)

Le décideur pondère les critères, les sous-critères et les alternatives les uns par rapport aux autres au moyen d'une matrice de préférence $[E]$. Soit n le nombre d'éléments à comparer, les éléments pouvant être les critères, les sous-critères ou les alternatives. Les éléments e_{ij} correspondent à la comparaison d'une paire (Tableau 62).

	E_1	.	.	.	E_n
E_1	1	.	.	.	e_{1n}
.	.				.
.	.				.
E_n	$1/e_{1n}$				1

Tableau 62 - Priorisation des indicateurs

2.1.3. Etape 3

La matrice de préférence permet d’obtenir le vecteur priorité qui représente :

- L’importance relative des critères par rapport à l’objectif global ;
- L’importance relative des sous-critères par rapport aux critères ;
- L’importance relative des alternatives par rapport aux sous-critères.

Le vecteur priorité peut s’obtenir de deux façons différentes :

- Calcul du vecteur propre de la matrice de préférence ;
- Calcul à partir d’une estimation du vecteur propre (Triantaphyllou, 1995).

La première méthode de calcul est la plus précise mais elle est difficile à calculer notamment en milieu industriel où les moyens de calcul sont souvent limités. Le niveau de précision de la deuxième méthode n’est pas connu mais cette estimation est souvent utilisée dans la littérature.

Supposons que la matrice de comparaison obtenue est la matrice suivante :

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \tag{179}$$

Afin de calculer le vecteur priorité, il faut suivre les étapes suivantes :

- Sommer chaque colonne ;

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow [1.53 \quad 4.5 \quad 8] \tag{180}$$

- Normaliser la matrice en divisant les éléments de chaque colonne par la somme respective de ces colonnes ;

$$\begin{bmatrix} 1/1.53 & 3/4.5 & 5/8 \\ 0.33/1.53 & 1/4.5 & 2/8 \\ 0.2/1.53 & 0.5/4.5 & 1/8 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.65 & 0.66 & 0.62 \\ 0.22 & 0.22 & 0.25 \\ 0.13 & 0.11 & 0.12 \end{bmatrix} \tag{181}$$

- Calculer la moyenne des lignes de la matrice normalisée en divisant la somme de chacune des lignes par le nombre total d’éléments sur chaque ligne.

$$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.66 & 0.62 \\ 0.22 & 0.22 & 0.25 \\ 0.13 & 0.11 & 0.12 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Vecteur priorité} : \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.23 \\ 0.12 \end{bmatrix} \tag{182}$$

Pour la suite, la valeur propre sera utilisée. Elle se calcule à partir de la matrice de comparaison et du vecteur priorité.

$$0.65 \begin{bmatrix} 1 \\ 1/3 \\ 1/5 \end{bmatrix} + 0.23 \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1/2 \end{bmatrix} + 0.12 \begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1.95 \\ 0.69 \\ 0.37 \end{bmatrix} \tag{183}$$

Il faut ensuite diviser les éléments du vecteur de la somme pondérée obtenu par la priorité correspondante :

$$\begin{bmatrix} 1.95/0.65 \\ 0.69/0.23 \\ 0.37/0.12 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3.007 \\ 3.003 \\ 3.002 \end{bmatrix} \quad (184)$$

En faisant la moyenne des valeurs obtenues dans ce vecteur, la valeur propre λ_{max} est obtenue.

$$\lambda_{max} = \frac{3.007 + 3.003 + 3.002}{3} = 3.004 \quad (185)$$

2.1.4. Etape 4

Une fois que le décideur a réalisé les comparaisons et que le vecteur priorité est calculé, il faut vérifier la cohérence du raisonnement.

La première étape consiste à déterminer la valeur de l'Indice Aléatoire (IA) qui est indiquée par le Tableau 63. Elle dépend de n , le nombre d'éléments considérés.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tableau 63 - Indice Aléatoire

Dans l'exemple $IA = 0.58$.

Il faut ensuite calculer l'Indice de Cohérence (IC). Cet indice est le rapport entre la différence de la valeur propre avec le nombre d'éléments considérés et le nombre d'éléments considérés moins un (Equation (186)).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (186)$$

Dans l'exemple, $IC = 0.002$.

La dernière étape est de calculer le Ratio de Cohérence (RC) qui correspond entre l'indice de cohérence et l'indice aléatoire (Equation (187)).

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (187)$$

Dans l'exemple, $RC = 0.0035$.

Selon Saaty, si $RC < 0.1$, le raisonnement du décideur est cohérent. Dans le cas inverse, il conseille de réalisation à nouveau l'étape de comparaison (Saaty, 1990).

2.1.5. Etape 5

Une fois que toutes les étapes précédentes ont été réalisées et que tous les raisonnements sont cohérents, il est possible de déterminer la performance relative de chacune des alternatives.

Pour calculer l'importance relative des sous-critères par rapport à l'objectif global, il faut multiplier l'importance relative du sous critère par rapport au critère par l'importance relative du critère par rapport à l'objectif principal. Et enfin, pour calculer l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif global, il faut multiplier l'importance relative des alternatives par rapport aux sous critères avec l'importance relative des sous-critères par rapport à l'objectif global (Figure 105).

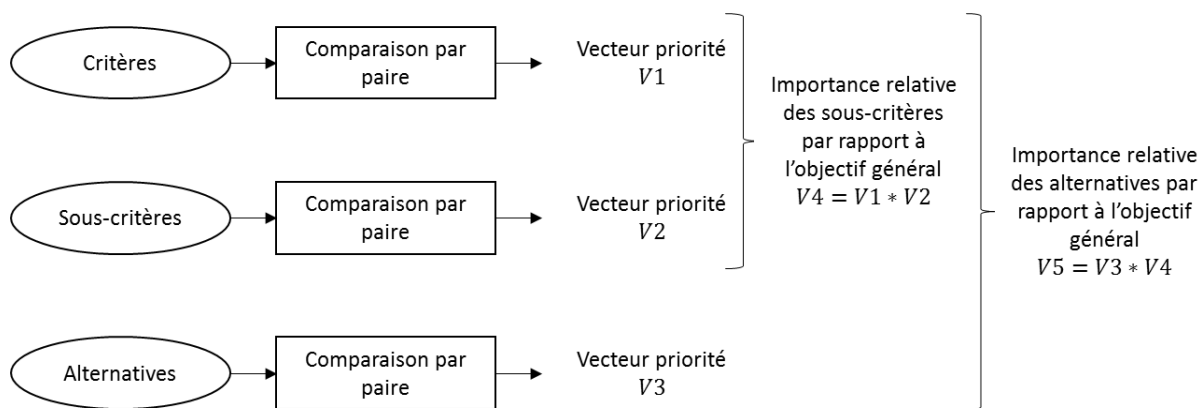


Figure 105 - Lien entre les vecteurs priorités

Une fois l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif général connue, la meilleure alternative est celle qui a le poids le plus important.

2.2. Application

Dans notre cas, l'objectif global est la répartition des pièces sur les plateaux ainsi que l'affectation des OF aux machines et leur séquençement. Les critères considérés sont le respect des due dates, le taux d'utilisation des machines de fabrication additive et le coût de production. Ce dernier est décomposé en deux coûts : le coût machine et le coût de setup. Ce qui nous amène à la structure hiérarchique présentée Figure 106.

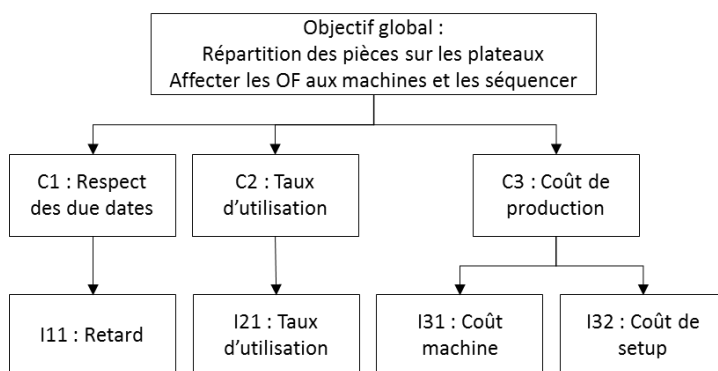


Figure 106 - Structure hiérarchique de l'AHP

Afin de déterminer les poids utilisés dans nos tests, une AHP est réalisée.

Les critères sont comparés deux à deux (Tableau 64). Le retard et le coût de production sont considérés comme aussi important l'un que l'autre. Le taux d'utilisation est considéré deux fois moins important que le retard et le coût de production.

Comparaison des critères					
	Retard	Taux d'utilisation	Coût de production	Vecteur priorité	Incohérence
Retard	1	2	1	40,00%	0,00%
Taux d'utilisation	0,5	1	0,5	20,00%	OK
Coût de production	1	2	1	40,00%	

Tableau 64 - AHP : Comparaison des critères

Le raisonnement est cohérent les poids choisis sont donc :

- Poids de l'AHP pour le retard : 0.4 ;
- Poids de l'AHP pour le coût de production : 0.4 ;
- Poids de l'AHP pour le taux d'utilisation : 0.2.

3. LA FONCTION D'ÉVALUATION

L'objectif est de minimiser le retard et le coût mais de maximiser le taux d'utilisation des machines. Dans la fonction d'évaluation, c'est donc le complément du taux d'utilisation des machines qui est pris en compte.

Le taux d'utilisation des machines est compris entre 0 et 1 alors que le retard et le coût peuvent atteindre de grandes valeurs. Afin de pouvoir les comparer entre eux, le retard et le coût sont normalisés. Pour cela, la valeur calculée pour une solution est divisée par la valeur la plus importante de l'indicateur ($retard_{max}, cout_{max}$) à la première itération multipliée par un coefficient multiplicateur ($mult_{retard}, mult_{cout}$) afin de s'assurer qu'il n'est pas possible d'obtenir une valeur plus grande.

La fonction d'évaluation s'écrit donc ainsi :

Soit ∂_{retard} le poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de retard.

Soit ∂_{taux} le poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de taux d'utilisation des machines.

Soit $\partial_{coût}$ le poids de l'AHP rattaché à l'indicateur de coût.

$$\begin{aligned}
 evaluation = & \partial_{taux} * (1 - \text{taux d'utilisation}) + \partial_{retard} * \frac{retard}{retard_{max} * mult_{retard}} \\
 & + \partial_{coût} * \frac{C_{prod}^{tot}}{cout_{max} * mult_{cout}}
 \end{aligned} \tag{188}$$

Au cours de l'optimisation, chaque solution est évaluée grâce au modèle de simulation. Ce modèle de simulation permet d'obtenir les données nécessaires au calcul des trois indicateurs : le retard, le taux d'utilisation des machines et le coût. Ces trois indicateurs sont ensuite agrégés en un macro-indicateur par l'intermédiaire de poids définis grâce à la méthode AHP.

CHAPITRE 8. DES PLATEAUX AUX OF : ALGORITHME GENETIQUE

Dans ce chapitre, nous présentons les algorithmes génétiques appliqués en planification et en ordonnancement ainsi que sur des problèmes multi-objectifs. Puis, nous présentons le principe de l'algorithme génétique. Et enfin, étape par étape nous allons exposer l'algorithme que nous avons développé.

1. LES ALGORITHMES GENETIQUES EN PLANIFICATION ET EN ORDONNANCEMENT

Perkgoz *et al.* (2007) veulent développer un modèle multi-objectif pour optimiser le contrôle du lead-time d'un système d'assemblage à plusieurs étages grâce aux algorithmes génétiques. Après modélisation du système avec des fonctions objectifs qui sont le total des coûts opératoires du système par période, le lead time moyen, la variance du lead time et la probabilité que le lead time ne dépasse pas un certain seuil, ils appliquent un algorithme génétique avec deux chaînes utilisant la relaxation continue basée sur la solution de référence. La comparaison avec une technique d'approximation discrète montre l'efficacité de l'approche génétique.

Kianfar et Mokhtari (2009) souhaitent travailler simultanément sur le lead time et sur un problème de taille de lot dans un système d'assemblage. La fonction objectif est la somme de la production, des coûts de stockage, du lead time et du coût des retards.

Ben Ammar (2014) utilise un algorithme génétique sur un problème de planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour les systèmes d'assemblage à plusieurs niveaux. L'indicateur de performance choisi est l'espérance du coût total moyen qui est égal à la somme du coût de stockage des composants, du coût de rupture et du coût de stockage du produit fini. La méta heuristique basée sur l'algorithme génétique a permis de résoudre des problèmes de taille importante avec un bon compromis entre la qualité des résultats obtenus et le temps de calcul.

2. LES ALGORITHMES GENETIQUES APPLIQUES A DES PROBLEMES MULTI-OBJECTIFS

Fonseca et Fleming (1993) formulent, discutent et généralisent les algorithmes génétiques pour l'optimisation multi-objectif. Ils présentent la théorie et la modification du fitness pour permettre l'intervention d'un décideur externe. Van Veldhuizen et Lamont (1998) organisent, présentent et analysent les algorithmes évolutionnistes multi-objectifs développés jusque-là. Zitzler *et al.* (2000) comparent différents algorithmes évolutionnistes à partir de résultats empiriques et en les appliquant à un même problème. Deb (1999) étudie les problèmes qui peuvent être rencontrés en utilisant les algorithmes génétiques, ils peuvent avoir du mal à converger vers le front de Pareto. Pour cela, il construit des problèmes multi-objectifs à partir de problèmes mono-objectifs difficiles. Deb *et al.* (2000) proposent un tri non-dominé basé sur un algorithme génétique multi-objectif (NSGA-II) qui permet de ne pas rencontrer les trois problèmes habituels : la complexité de l'algorithme, l'approche non-élitiste et la nécessité de spécifier un paramètre commun. Les résultats montrent que cet algorithme permet de trouver de meilleures solutions et des solutions plus proches du front de Pareto.

Horn *et al.* (1994) indiquent qu'un algorithme génétique est facilement modifiable pour faire face à un problème multi-objectif ; il suffit d'intégrer la notion de domination de Pareto pour l'opérateur de sélection. Ils développent un algorithme basé sur ce principe et ils montrent son efficacité à trouver et à maintenir une population optimale de Pareto sur deux problèmes artificiels et un problème ouvert.

Knowles et Corne (1999) simplifient le schéma d'évolution pour les problèmes multi-objectifs en développant « the Pareto archived evolution strategy (PAES) ». Ils utilisent la recherche locale et un archivage des solutions déjà trouvées.

La littérature montre que les algorithmes génétiques ont permis d'obtenir de bons résultats sur des problèmes de planification et d'ordonnancement ainsi que sur des problèmes multi-objectifs. C'est pourquoi nous avons choisi de développer un algorithme génétique pour répondre à notre problématique.

3. LE PRINCIPE DE L'ALGORITHME GENETIQUE DEVELOPPE

Le principe de l'algorithme génétique est de reproduire l'évolution d'une population d'individus au cours des générations en lui appliquant des opérateurs génétiques et en les sélectionnant. Les individus qui se reproduisent sont ceux qui sont le plus adaptés à leur milieu, ce qui permet à la population de s'améliorer (Back *et al.*, 1997). L'algorithme génétique est donc une analogie entre la génétique et les cas industriels. L'analogie au niveau du vocabulaire est présentée dans le Tableau 65.

Génétique	Algorithme génétique	Cas industriel
Population	Ensemble d'individus	Ensemble d'affectation et de séquencement
Chromosome	Individu	Une affectation et un séquencement
Gène	Partie d'un individu	Une association plateau / machine
Génération	Itération	Itération

Tableau 65 - Vocabulaire de l'algorithme génétique

Les différentes étapes de l'algorithme génétique sont : la création de la population initiale, l'évaluation des individus, la vérification du critère d'arrêt, la sélection de la population et la création des nouvelles solutions (Figure 107).

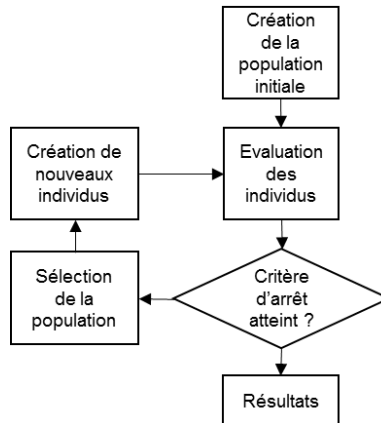


Figure 107 - Algorithme génétique

Nous allons maintenant détailler chaque étape de l'algorithme génétique développé.

4. CREATION DE LA POPULATION INITIALE

La première étape de l'algorithme est de créer la population initiale. Chaque individu est codé par un chromosome qui correspond à une solution possible. Chaque chromosome correspond à un point de l'espace de recherche. Le résultat de l'algorithme dépend en partie de la qualité du codage.

Le choix du codage dépend du problème à résoudre, du choix des opérateurs et de l'évaluation des individus.

Les gènes peuvent être codés en binaire, par des valeurs réelles, des valeurs qualitatives ou encore par des vecteurs, des matrices ou des arbres.

Les individus sont codés par deux vecteurs : un vecteur correspondant aux OF et un vecteur correspondant aux machines (Figure 108). L'ordre est le même pour les deux vecteurs et il correspond à l'allocation des OF aux machines et l'ordre d'apparition de gauche à droite permet d'obtenir le séquencement sur chaque machine.

OF	2	4	6	8	1	3	5	7	9
Machines	1	1	2	2	1	4	3	2	4

Figure 108 - Codage

Selon Mitchell (1998), le choix de la population initiale conditionne la rapidité de convergence de l'algorithme. L'un des problèmes est de choisir la taille de la population initiale. Si la population choisie est trop grande, le temps de calcul et la mémoire nécessaires vont être importants mais si la population choisie est trop petite, l'algorithme va converger trop rapidement.

Il existe plusieurs possibilités pour générer la population initiale. Elle peut être générée de manière aléatoire ou par la technique de Génération Spécifique de la Population Initiale (GSPI). La population générée par cette méthode est composée de 5% d'optima locaux obtenus en appliquant une recherche locale sur des individus générés de manière aléatoire et de 95% de meilleurs voisins d'individus générés de manière aléatoire.

La population initiale est créée grâce à un algorithme glouton. Dans un premier temps, les plateaux sont tirés au sort afin de créer le vecteur correspondant aux OF. Puis, pour chaque OF, une machine est tirée au sort, si le plateau de l'OF et la machine sont compatibles l'OF est affecté à la machine sinon une autre machine est tirée au sort. Ainsi, le deuxième vecteur correspondant aux machines est créé.

5. EVALUATION DES INDIVIDUS

Pour chaque solution, il faut calculer une fonction d'évaluation appelée fitness. La fonction fitness est une fonction des variables de sortie du modèle définie par (Yunker et Tew 1994), et Syrjakow et Szczerbicka (1994). C'est une fonction de performance qui décrit le mérite de l'individu et qui est calculée à partir de données contenues dans un chromosome. La fonction fitness correspond à la capacité d'adaptation d'un individu à son environnement.

Les individus dont la valeur de la fonction fitness est faible ont une forte probabilité d'être éliminés lors de la sélection.

L'évaluation est détaillée dans le CHAPITRE 7.

6. SELECTION DE LA POPULATION

Lorsque le critère d'arrêt n'est pas atteint, une nouvelle population qui correspond à la génération suivante doit être créée. Pour cela, il faut sélectionner les individus qui passent d'une génération à l'autre. Cette sélection peut se faire par loterie biaisée, par tournoi ou de façon élitiste.

6.1. Sélection par loterie biaisée (wheel)

Comme dans une loterie, chaque individu correspond à un secteur de la roue et l'angle de chaque secteur est proportionnel à la valeur de la fonction fitness. Pour un individu, la chance d'être sélectionné est donc proportionnelle à sa performance, c'est-à-dire, à la valeur de sa fonction fitness. La roue tourne et lorsqu'elle s'arrête, un curseur pointe l'un des secteurs (Ene *et al.*, 2016).

Cette méthode présente des inconvénients : sa variance peut être importante, des individus avec une fonction fitness importante peuvent ne pas être conservés dans les parents et à l'inverse il est possible de perdre de la diversité à cause d'un individu trop important.

6.2. Sélection par tournoi

Le principe de la sélection par tournoi est de confronter les individus pour garder les meilleurs mais aussi pour avoir plus de chance que des individus de moins bonne qualité puissent participer à l'amélioration de la population. Les individus sont choisis au hasard dans la population, il est possible de les confronter deux à deux comme d'en confronter un certain nombre. Le meilleur individu a une probabilité entre 0.5 et 1 de remporter le tournoi. Il est possible de conserver uniquement le vainqueur ou de conserver un certain nombre d'individus parmi les meilleurs. Il est possible de créer beaucoup de tournois ou de créer des tournois avec beaucoup de participants.

Cette méthode permet d'obtenir les résultats les plus satisfaisants (Karakatic et Podgorelec, 2015).

6.3. Sélection élitiste

Dans cette méthode de sélection, les individus sont sélectionnés selon leur performance. Les individus sont classés par ordre décroissant et les meilleurs sont conservés. Ils peuvent être sélectionnés à deux niveaux : lors de la reproduction, les meilleurs individus sont gardés pour que les opérateurs leur soient appliqués et lors de la sélection de la population suite à la création des nouveaux individus (Pachauri et Srivastava, 2013).

L'inconvénient de cette méthode est sa convergence rapide et prématurée.

6.4. Processus de sélection proposé

Le processus de sélection est réalisé en trois étapes. La première étape consiste à conserver les meilleurs individus tels qu'ils sont dans la nouvelle population. Ensuite, une sélection par tournoi envoie les gagnants directement dans la nouvelle population. Ces deux premières étapes permettent de conserver des individus de la population N dans la population N+1. Enfin, des individus sont sélectionnés, aléatoirement, afin de créer de nouveaux individus grâce aux opérateurs de croisement et de mutation. Chaque tirage d'individu effectué est un tirage avec remise.

Le nombre de meilleurs conservés n_m et le nombre d'individus sélectionnés par tournoi n_s font partie des paramètres d'entrée de l'algorithme. La population N+1 doit être composée du même nombre d'individus n que la population N donc le nombre d'individus sélectionnés pour créer les nouveaux individus est complémentaire de ces deux paramètres ($n - n_m - n_s$).

Les individus sélectionnés pour créer les nouveaux individus ont une probabilité P_c d'être croisés. Que les individus soient croisés ou pas, ils sont ajoutés à la population intermédiaire. Chaque individu de la population N+1 a une probabilité P_m d'être muté.

L'ensemble du processus de sélection est présenté sur la Figure 109.

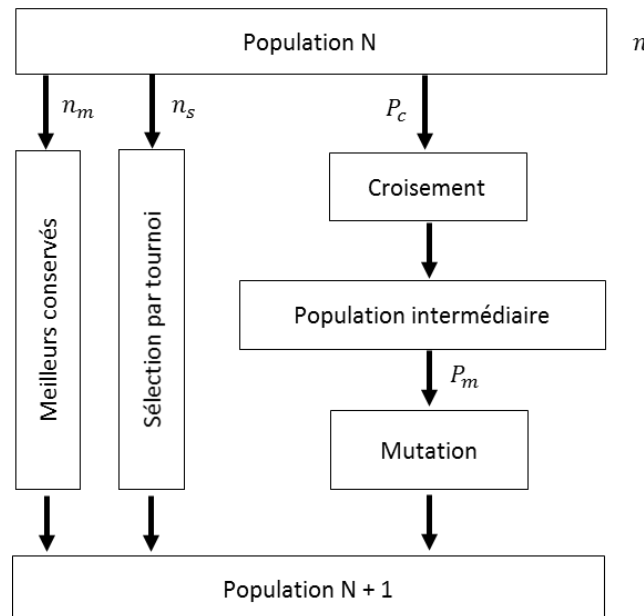


Figure 109 - Processus de sélection

7. CREATION DES NOUVEAUX INDIVIDUS

A partir de chaque génération, il faut créer de nouveaux individus pour générer une nouvelle génération. Pour cela, il faut utiliser des opérateurs. Barnier *et al.* (2014) expliquent que la création de ces nouveaux individus s'effectue par croisement et par mutation.

7.1. Croisements

Les croisements se font à partir de deux parents et correspondent à l'échange d'une partie de chaque parent. Ils permettent d'obtenir des chromosomes enfants à partir d'une partie de chacun de leurs chromosomes parents, il faut vérifier que les enfants soient des solutions réalisables.

Il existe plusieurs types de croisement, ils dépendent du nombre de points de croisement. Goldberg (1989) présente le croisement en un point alors que Deb et Agrawal (1994) présente le croisement simultané en deux points dans un espace de recherche continu. Le nombre de points de croisement ainsi que la probabilité de croisement permettent de faire varier la diversité.

Trois types de croisements sont réalisés : un croisement en un point, un croisement en deux points (OX) et un croisement en deux points (LOX) (Haj-Rachid *et al.*, 2010).

7.1.1. Le croisement en un point

Le croisement en un point correspond au découpage des parents en un point déterminé aléatoirement. Les parties à gauche du point des deux parents sont conservées. Pour remplir la partie droite du parent 1 afin d'obtenir l'enfant 1, les OF qui n'ont pas été réalisés dans la partie gauche du parent 1 sont inscrits dans la partie droite suivant leur ordre d'apparition dans le parent 2 en partant du point de découpage (Figure 110).

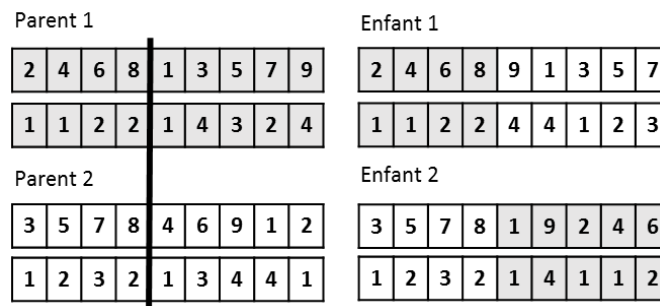


Figure 110 - Croisement 1X

7.1.2. Croisement en deux points : Order Crossover (OX)

Le croisement en deux points OX consiste à choisir aléatoirement deux points (Dauzere-Peres et Sevaux, 2000). La partie comprise entre les deux points est conservée. Les positions restantes sont remplies à partir de l'autre parent en inscrivant dans l'enfant 1 les OF non réalisés dans la partie centrale suivant leur ordre d'apparition dans le parent 2 en partant du deuxième point de découpage (Figure 111). La Figure 112 représente l'application du croisement OX à notre cas.

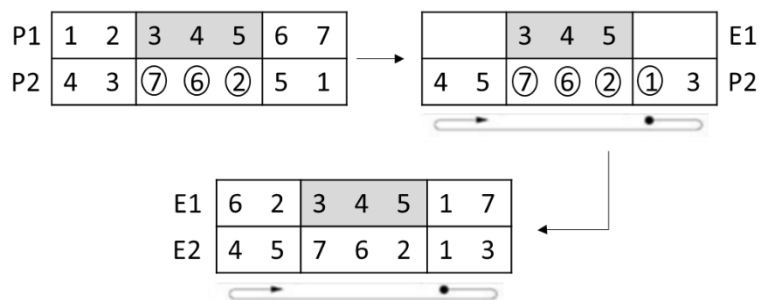


Figure 111 - Croisement en 2 points : OX

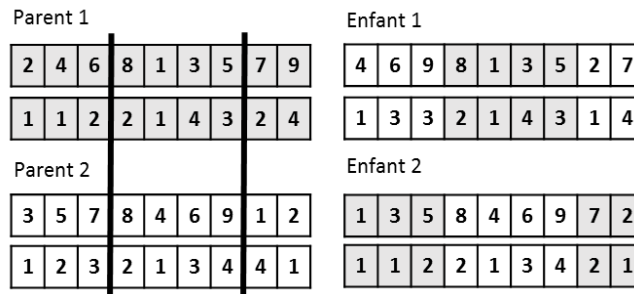


Figure 112 - Application du croisement OX

7.1.3. Croisement en deux points : Linear Order Crossover (LOX)

Le croisement en deux points LOX consiste à choisir aléatoirement deux points (Dauzere-Peres et Sevaux 2000). La partie comprise entre les deux points est conservée. Les positions restantes sont remplies à partir de l'autre parent en inscrivant dans l'enfant 1 les OF non réalisés dans la partie centrale suivant leur ordre d'apparition dans le parent 2 en partant de la première position du vecteur (Figure 113). La Figure 114 représente l'application du croisement OX à notre cas.

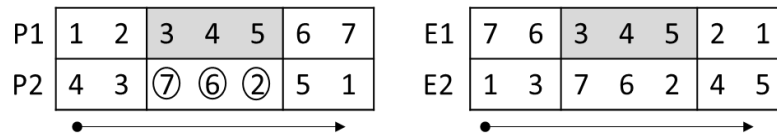


Figure 113 - Croisement en 2 points : LOX

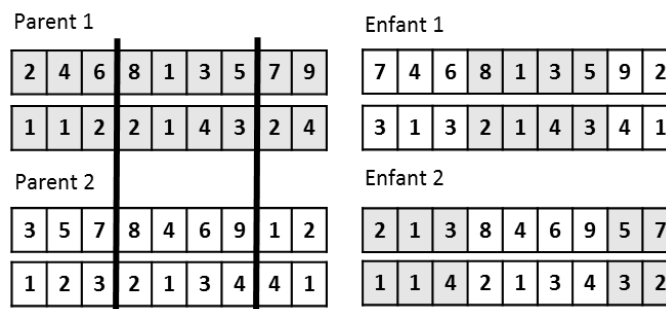


Figure 114 - Application du croisement LOX

7.2. Mutations

Les mutations se font à partir d'un seul parent et correspondent à un changement sur un gène du chromosome.

Goldberg (1989) présente le principe des mutations et Michalewicz *et al.* (1992) présentent les mutations uniformes.

L'opérateur de mutation permet de garantir la diversité et de limiter les risques de convergence prématurée. Il permet également d'éviter la dérive génétique.

7.2.1. Mutation machine : échange de deux plateaux

Cette mutation consiste à intervertir deux machines (Figure 115). Cela revient à changer deux plateaux de machines.

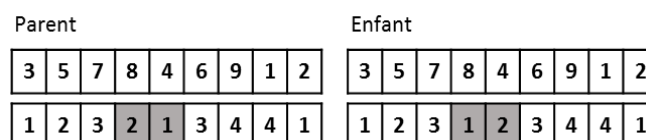


Figure 115 - Mutation machine : échange de deux plateaux

7.2.2. Mutation machine : changement d'un plateau

Cette mutation consiste à changer la machine d'un OF (Figure 116). Cela revient à changer un OF de machine.

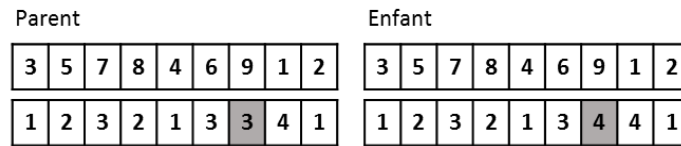


Figure 116 - Mutation machine : changement d'un plateau

7.2.3. Mutation de séquençement : permutation de deux plateaux

Cette mutation consiste à intervertir deux plateaux sur la même machine (Figure 117).

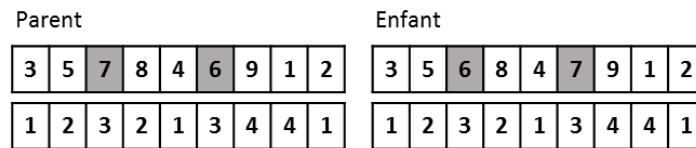


Figure 117 - Mutation de séquençement : permutation de deux plateaux

7.2.4. Mutation de séquençement : déplacement d'un plateau

Cette mutation consiste à déplacer un plateau (avec le numéro de machine correspondant) au sein de l'individu (Figure 118).

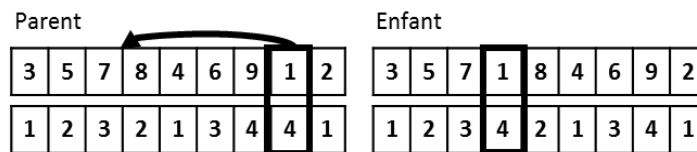


Figure 118 - Mutation de séquençement : déplacement d'un plateau

7.3. Processus de création des nouveaux individus

Les opérateurs génétiques choisis sont donc trois types de croisement et quatre types de mutation. Le processus de création des nouveaux individus est présenté Figure 119. Si la probabilité P_c indique que les deux individus sélectionnés doivent être croisés, le type de croisement dépend des probabilités P_{c1}, P_{c20}, P_{c2L} . De même, si la probabilité P_m indique que l'individu sélectionné doit être muté, le type de mutation dépend des probabilités $P_{mm1}, P_{mm2}, P_{ms1}, P_{ms2}$.

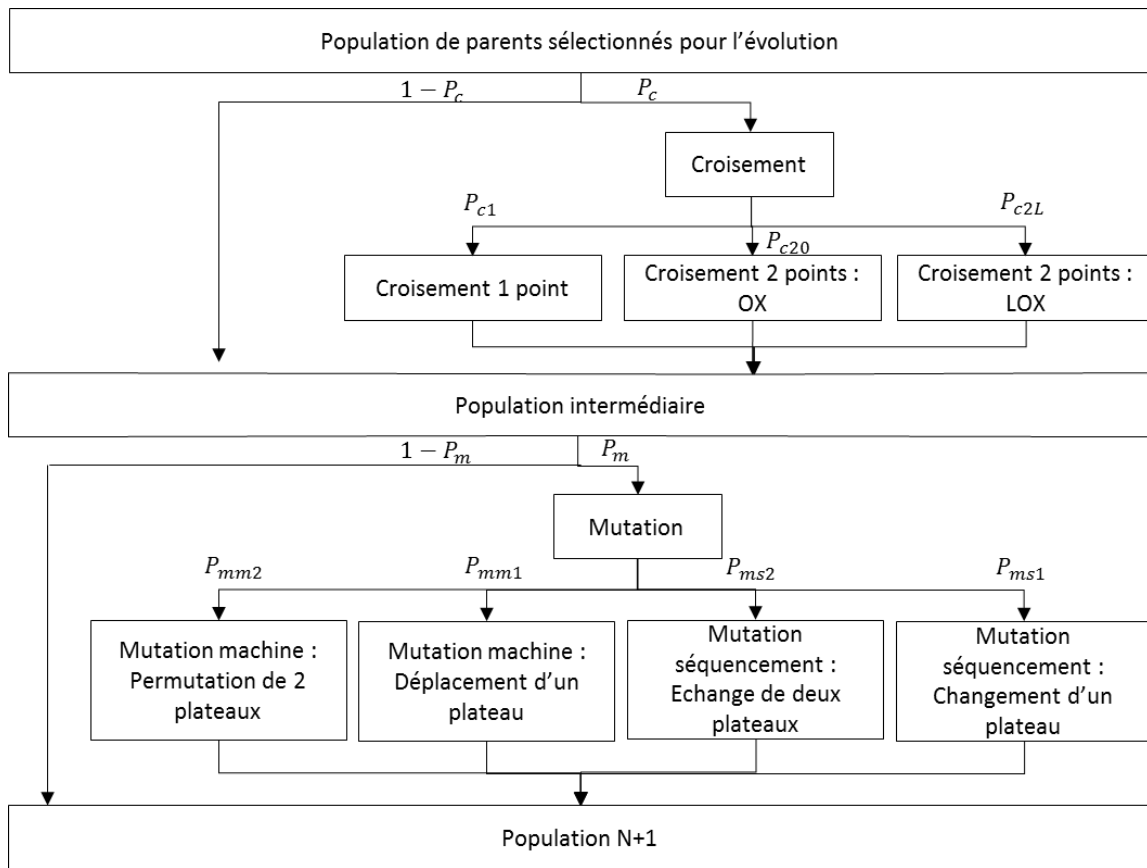


Figure 119 - Processus de création des nouveaux individus

La valeur de chaque probabilité fait partie des paramètres d'entrée. Les probabilités P_{c2L} et P_{ms2} dépendent de la valeur des probabilités de chaque type de croisement et de mutation (Equations (189) et (190)).

$$P_{c2L} = 1 - P_{c1} - P_{c20} \quad (189)$$

$$P_{ms2} = 1 - P_{mm1} - P_{mm2} - P_{ms1} \quad (190)$$

Si un croisement doit être effectué, une probabilité P_i est tirée au sort. Sa valeur détermine le type de croisement réalisé selon le principe de probabilités cumulées utilisées (Figure 120).

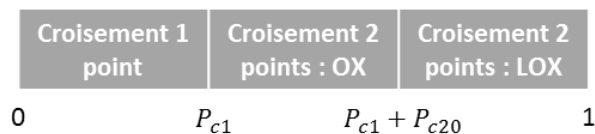


Figure 120 - Probabilités cumulées pour les croisements

De la même façon, si une mutation doit être effectuée, une nouvelle probabilité est tirée au sort et détermine le type de mutation réalisé (Figure 121).

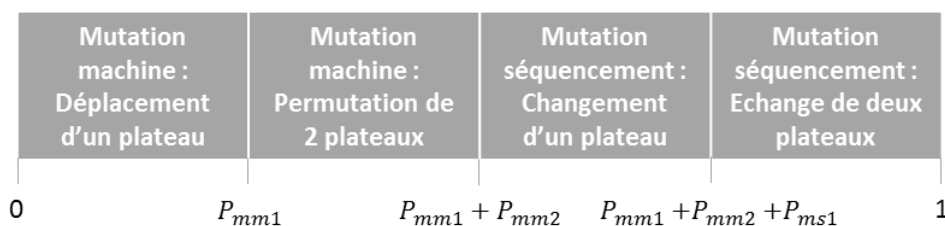


Figure 121 - Probabilités cumulées pour les mutations

8. CRITERE D'ARRET

Le critère d'arrêt aussi appelé critère de convergence peut être de différentes natures. Il peut s'agir du taux minimum d'adaptation de la population au problème (fitness), du temps de calcul ou du nombre d'itérations. Le critère d'arrêt choisi est le nombre d'itérations.

L'algorithme génétique présenté dans ce chapitre est ensuite réglé dans le CHAPITRE 10.

CHAPITRE 9. DES PLATEAUX AUX OF : ENTROPIE CROISEE

Avant de présenter les résultats obtenus grâce à l'algorithme génétique, nous allons présenter l'algorithme d'entropie croisée développé pour résoudre le même problème. Nous pourrions ensuite comparer les résultats obtenus.

La Figure 122 rappelle les différentes étapes de l'entropie croisée (Rubinstein, 1999). Nous allons détailler chaque étape de l'entropie croisée que nous proposons. L'étape d'évaluation est détaillée dans le CHAPITRE 7.

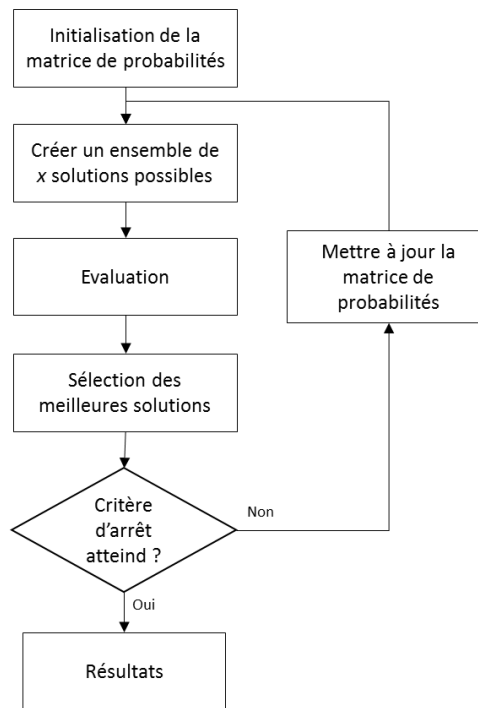


Figure 122 - Méthode de l'entropie croisée

1. CODAGE DES SOLUTIONS

Les solutions sont codées par un vecteur où chaque élément correspond à l'affectation d'un plateau à un OF. Chaque OF est défini par un numéro de machine. Sur l'exemple présenté Figure 123, quatre plateaux doivent être réalisés. Le plateau 2 est affecté à l'OF 2 qui est rattaché à la machine 1. Le plateau 3 quant à lui est affecté à l'OF 8 qui est rattaché à la machine 2. Nous obtenons ainsi l'affectation de chaque plateau à une machine et le séquençement des OF sur chaque machine. En effet, la prise en compte du numéro de l'emplacement auquel les plateaux sont affectés permet d'obtenir le séquençement. Reprenons notre exemple. Sur la machine 1, les plateaux sont réalisés dans cet ordre : plateau 2 puis plateau 4. De même, sur la machine 2, le plateau 1 sera réalisé avant le plateau 3.

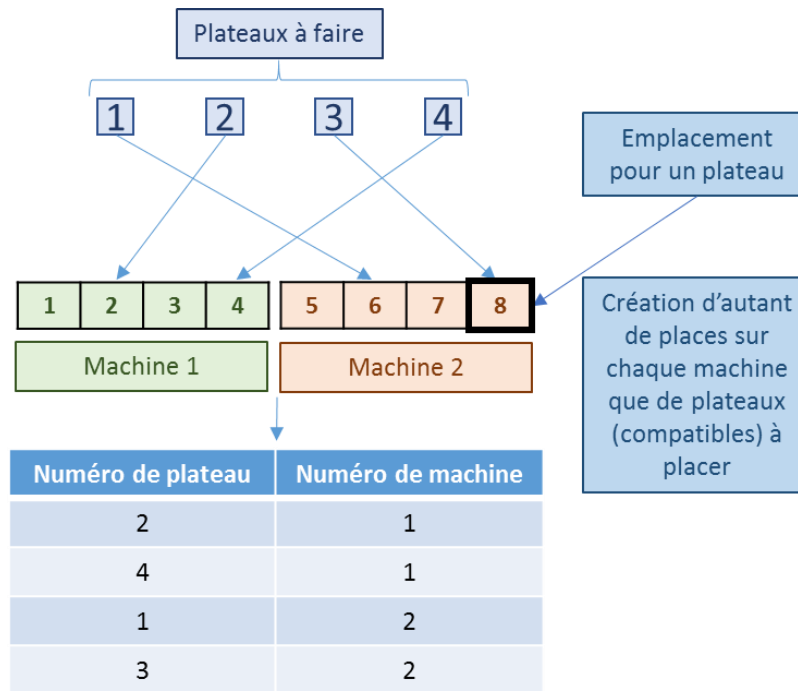


Figure 123 - Codage

2. INITIALISATION DE LA MATRICE DE PROBABILITE

L'entropie croisée repose sur l'utilisation des probabilités. Au fur et à mesure des itérations, la probabilité d'apparition d'un événement évolue en fonction de son impact sur la fonction objectif. Ces probabilités sont représentées par une matrice, définie sur la Figure 124, qui permet de faire le lien entre les plateaux et l'OF auquel ils sont affectés.

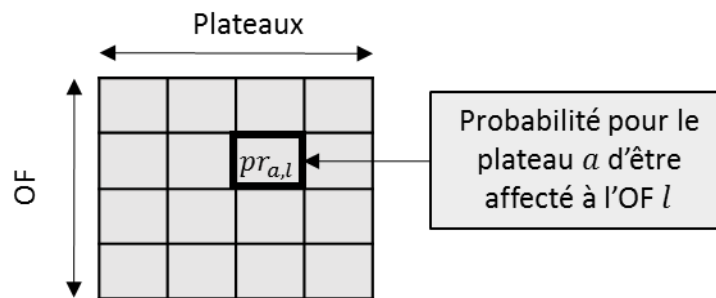


Figure 124 - Matrice de probabilités

$pr_{a,l}$ correspond à la probabilité pour le plateau a d'être allouée à l'OF l . Elle est calculée à partir du nombre de fois où un plateau a est alloué à OF l divisé par le nombre de meilleures solutions conservées.

Lors de l'initialisation de la matrice de probabilités toutes les associations plateaux/OF possibles sont considérées équiprobables. La valeur de cette probabilité est égale à l'inverse du nombre d'emplacements disponibles. Ce nombre d'emplacements dépend du nombre de machines et du nombre de plateaux à placer. Pour chaque machine, il est créé autant d'emplacements que de plateaux compatibles à placer. Les compatibilités prises en compte sont la compatibilité entre le type de plateau et la machine et la hauteur maximale acceptée par chaque machine. Si nous avons 10 plateaux à placer sur 2 machines et que 5 plateaux sont compatibles avec chaque machine, nous allons créer 5 emplacements devant chaque machine.

La procédure permettant de créer les places pour les plateaux et d'initialiser la matrice de probabilités est présentée ci-dessous.

Vérification que tous les plateaux peuvent être réalisés sur une machine

Repérage de la hauteur maximale des pièces de chaque plateau

Vérification des compatibilités poudre/machine, plateau/machine et hauteurs

Si un plateau ne peut pas être réalisé, affichage d'un message erreur et arrêt de la procédure

Création des places pour les plateaux

Pour toutes les machines

 Pour tous les plateaux

 Vérification des compatibilités poudre/machine, plateau/machine et des hauteurs

 Créer une place

 Attribuer le numéro de la machine

 Indiquer qu'elle est vide

 Fin Pour

Fin Pour

Initialisation matrice de probabilité plateau/OF

Pour chaque emplacement

 Pour chaque plateau

 probabilité = 1 / nombre d'emplacements

 Fin Pour

Fin Pour

3. CREATION D'UN ENSEMBLE DE SOLUTIONS POSSIBLES

Le nombre de solutions à créer fait partie des paramètres d'entrée. A chaque itération, les solutions possibles sont créées à partir de la matrice de probabilités. Le numéro d'un plateau est tiré aléatoirement puis il est affecté à un emplacement en fonction de la matrice de probabilités.

La procédure qui permet de choisir le numéro du plateau à placer est la suivante :

Tirage aléatoire d'un numéro de plateau

Vérification que le plateau n'a pas déjà été placé

Si non, enregistrement du numéro de plateau

Si oui, nouveau tirage

Une fois le numéro de plateau choisi, il faut l'affecter à un emplacement. La procédure d'affectation est la suivante :

Tirage au sort d'une probabilité

Borne 1 = 0

Borne 2 = probabilité pour le plateau d'être affecté à l'emplacement 1

Pour chaque emplacement

 Si la probabilité est comprise entre les bornes

 Si la place est occupée Alors nouveau tirage

 Si la place est libre, si le plateau, la poudre et la hauteur max sont compatibles avec la machine

 Alors

 Enregistrement dans le vecteur solution

 Indication que la place est occupée

- Attribution du numéro de place au plateau
- Attribution du numéro de la machine au plateau
- Sinon nouveau tirage
- Sinon incrémentation des bornes de probabilités
- Borne 1 = Borne 2
- Borne 2 = probabilité pour le plateau d'être affecté à l'emplacement suivant

Fin pour

4. SELECTION DES MEILLEURES

Une fois que les solutions ont été créées, il faut sélectionner les meilleures. Le nombre de meilleures solutions sélectionnées fait partie des paramètres d'entrée. La sélection se fait à la fois dans l'ensemble des solutions qui viennent d'être créées et dans l'ensemble des meilleures solutions de l'itération précédente.

La Figure 125 présente un exemple de sélection des meilleures solutions dans un cas où 3 itérations sont réalisées avec 6 solutions créées et 4 solutions conservées. A la première itération, 6 solutions sont créées (vert). Parmi elles, les 4 meilleures sont sélectionnées. Les meilleures sont entourées en rouge. Lors de la deuxième itération, 6 nouvelles solutions sont créées (jaune). Les 4 meilleures sont identifiées puis comparées avec les 4 meilleures solutions de l'itération précédente. Parmi ces 8 solutions, les 4 meilleures sont conservées. Pour la troisième itération, 6 nouvelles solutions sont créées (gris). Les 4 meilleures solutions de cette itération sont identifiées puis elles sont comparées avec les 4 meilleures conservées à l'issue de l'itération précédente. Parmi ces 8 solutions, les 4 meilleures sont conservées. Il en est de même pour toutes les itérations. La matrice de probabilité plateau/OF est mise à jour à partir de ces meilleures solutions.

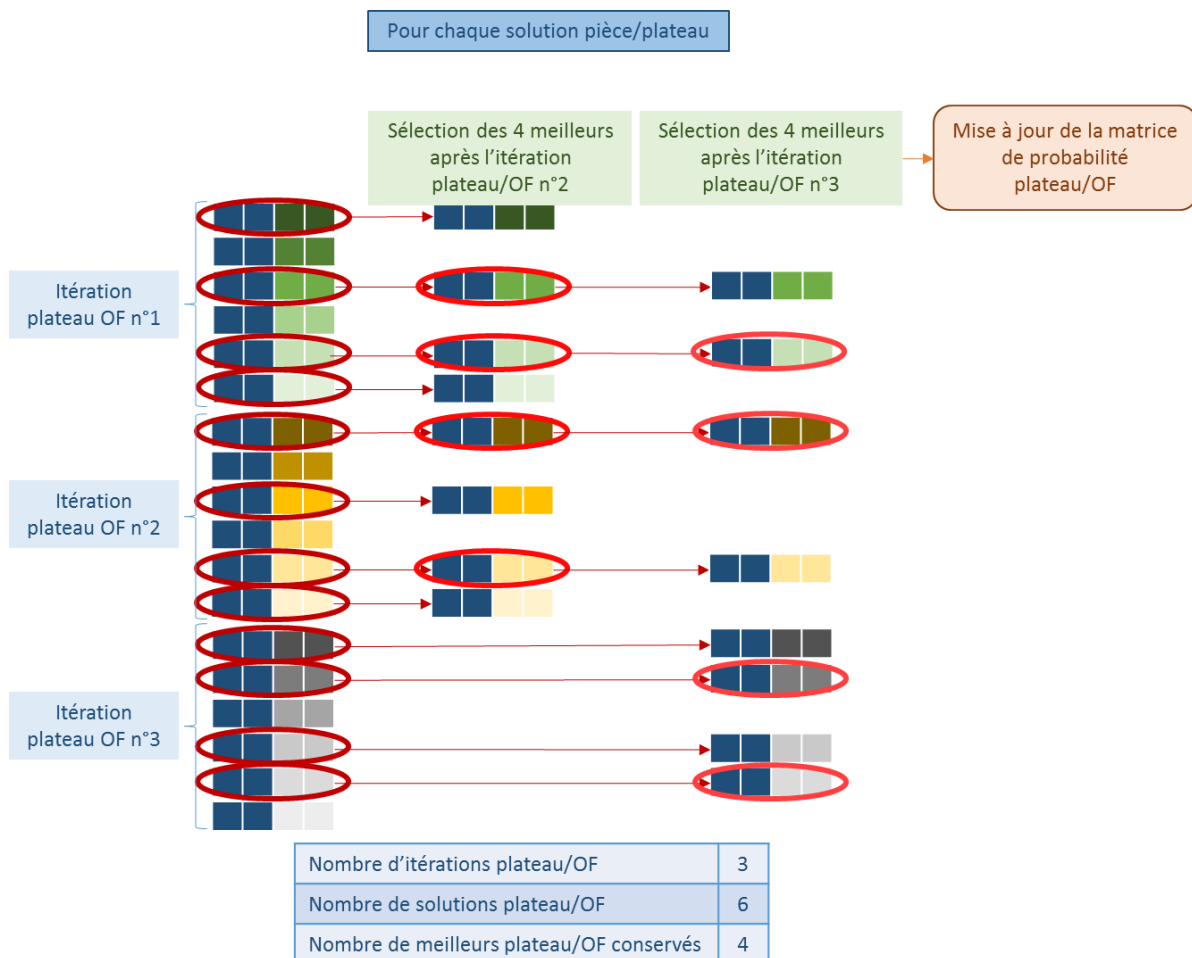


Figure 125 - Sélection des meilleurs

5. MISE A JOUR DE LA MATRICE DE PROBABILITES

Une fois que les meilleures solutions ont été sélectionnées, la matrice de probabilité peut être mise à jour. Pour cela, il faut compter le nombre de fois où un plateau est affecté à un même emplacement. La probabilité qu'un plateau α soit affecté à un emplacement l correspond au rapport entre le nombre de fois où le plateau α a été affecté à cet emplacement l et le nombre de meilleures solutions conservées.

La procédure qui permet de mettre à jour la matrice de probabilités est la suivante :

```
Pour tous les plateaux
  Pour tous les emplacements
    Pour toutes les meilleures solutions
      Si un plateau est attribué à cette place
        Alors incrémentation du nombre de fois
      Fin Pour
    Probabilité = nombre de fois / nombre de meilleurs
  Fin Pour
Fin Pour
```

L'entropie croisée développée dans ce chapitre est ensuite réglée et comparée avec l'algorithme génétique dans le CHAPITRE 10.

CHAPITRE 10. COMPARAISON DES ALGORITHMES

Maintenant que nous avons développé l'algorithme génétique et l'entropie croisée, nous allons présenter le cas d'étude sur lequel nous allons appliquer chaque algorithme afin de les régler et de comparer leurs résultats.

1. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude est issu de la concaténation de données industrielles.

1.1. Dimensionnement

Nous considérons 7 types de pièces fabriquées avec 3 poudres différentes. L'atelier est composé de 9 machines de 2 types de machines qui utilisent chacun un type de plateau différent. 112 OF doivent être réalisés sur ces machines (Tableau 66).

	Cas étudié
Nombre de types de pièces	7
Nombre de types de poudres	3
Nombre de types de plateaux	2
Nombre de types de machines	2
Nombre de machines	9
Nombre d'OF	112

Tableau 66 - Dimensionnement du cas d'étude

1.2. Les commandes

Le carnet de commandes, composé de 112 commandes client, s'étale sur 2 mois. Les temps de lasage sont très longs et nécessite un horizon d'ordonnancement plus long que les procédés usuels. Il est partiellement présenté dans le Tableau 67. Pour chaque commande, la date et la quantité par type de pièces sont spécifiées.

Commandes								
Numéro de commande	Date	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4	Pièce 5	Pièce 6	Pièce 7
1	7							1
2	7				4			
3	11							1
4	12				4			
5	12		1					
6	13	1						
7	13							1
8	13							1
9	13							1
10	13							1
11	13							1
12	14				4			
13	14							1
14	14	1						
15	14	1						
16	15				4			
17	15		1					
18	16							1
19	16	1						
20	16							1

Tableau 67 - Commandes client

1.3. Les données pièces

Le Tableau 68 présente les gammes de fabrication des 7 types de pièces.

Gammes de fabrication								
Pièces	Etape	1	2	3	4 (3Bis)	5	6	7
Matériau		TA6v	TA6v	TA6v	TA6v	Inconel 718	Inconel 718	Maraging
Longueur projetée		160	160	100	100	50	50	55
Largeur projetée		160	160	100	100	46	40	56
Hauteur		94	180	215	215	240	240	40
Temps de mise en couche		511	801	526	526	288	288	66,6
Temps de lasage		1850	1832	2172	2172	900	2790	1056
Nettoyage	Externalisé	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
1	Taille de lot	12	12	4	4	12	6	1
	Chargement (min)	1	1	0	0	2	2	2
	Temps pièce (min)	15	15	7200	7200	5	5	5
	Déchargement (min)	0	0	0	0	2	2	2
Traitement thermique	Externalisé	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui
2	Taille de lot	12	12	4	4			
	Chargement (min)							
	Temps (min)	7200	7200	7200	7200			60
	Déchargement (min)							
Usinage	Externalisé	Non	Non	Non	Non			
3	Taille de lot							
	Chargement (min)							
	Temps pièce (min)	15	5	10	10			
	Déchargement (min)							
Autre post traitement	Externalisé	Non				Non	Non	Non
4	Taille de lot							
	Chargement (min)							
	Temps (min)	15				12	12	60
	Déchargement (min)							
Contrôle	Externalisé	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
5	Taille de lot							
	Chargement (min)							
	Temps (min)	1	1	1	1	1	1	1
	Déchargement (min)							
Opération 1		1	1	1	1	1	1	1
Opération 2		2	2	2	2	4	4	2
Opération 3		4	3	3	3	5	5	4
Opération 4		3	5	5	5			5
Opération 5		5						

Tableau 68 - Gammes de fabrication

1.4. L'atelier

Les ressources présentes dans l'atelier sont détaillées dans le Tableau 69. Le Tableau 70 correspond à la matrice des distances entre les différentes zones de l'atelier.

Ressources		Ressources	
Plateau	Ressources	Modules	Ressources
Nettoyage plateau	1	Chargement	2
Usinage plateau	1	Déchargement	2
Contrôle plateau	1		
Démagnétisation	1		
		Numéro machine FA	Type
Post traitements	Ressources	1	1
Détensionnement par plateau	1	2	1
Nettoyage par plateau	1	3	1
Découpage	1	4	1
Nettoyage pièce	1	5	2
Traitement thermique	1	6	2
Usinage pièce	1	7	2
Autre post traitement	1	8	2
Contrôle pièce	1	9	2
		10	
		11	
Opérateur	Ressources	12	
Opérateur zone confinée	1	13	
Opérateur	1	14	
		15	
Données	Valeur	16	
Coût main d'œuvre (€)	50	17	
Débit aspirateur (mm ³ /min)	3200000	18	
Temps préparation (min)	10	19	
Vitesse découpe (mm ² /min)	280	20	

Tableau 69 - Ressources

Distances en m										
Distances entre machines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Position repos module chargement	0	25	2	2	24	34	33	0	0	13
2. Module déchargement	25	0	0	0	4	8	0	0	0	13
3. Zone poudre	2		0	0	0	0	0	0	0	0
4. Zone plateau	2			0	0	0	34	0	0	13
5. Nettoyage plateau	24	4			0	4	0	0	0	15
6. Détensionnement	34	8			4	0	3	0	0	19
7. Découpage	33			34		3	0	5	0	0
8. Post traitement pièce							5	0	0	0
9. Contrôle									0	0
10. Machine FA	13	13		13	15	19				0

Tableau 70 - Distances

Les trois poudres étant de familles différentes, tous les changements de poudre correspondent à des nettoyages longs (Tableau 71). Le temps de détention est donné pour chaque famille de poudre La poudre 1 est le TA6V, la poudre 2 est l'inconel 718 et la poudre 3 est le maraging.

Nettoyage en fonction des poudres			
	Poudre 1	Poudre 2	Poudre 3
Poudre 1	0	2	2
Poudre 2	2	0	2
Poudre 3	2	2	0

Tableau 71 - Nettoyage en fonction des changements de poudre

	Temps de détention
Poudre 1	240
Poudre 2	240
Poudre 3	180

Tableau 72 - Temps de détention

Les plateaux de type 1 sont plus grands donc le temps d'usinage est plus long et ils sont moins nombreux que les plateaux de type 2 (Tableau 73).

Temps Plateaux			
Plateaux	Etape	1	2
Nettoyage plateaux	Chargement (min)	1	1
	Opération (min)	10	10
	Déchargement (min)	1	1
Usinage plateaux	Chargement (min)	5	5
	Opération (min)	45	25
	Déchargement (min)	5	5
Contrôle plateaux	Chargement (min)	1	1
	Opération (min)	5	5
	Déchargement (min)	1	1
Démagnétisation	Chargement (min)	1	1
	Opération (min)	2	2
	Déchargement (min)	1	1

Tableau 73 - Données sur les plateaux

Pour les post-traitements par plateau, les temps de chargement et de déchargement sont donnés dans le Tableau 74.

Post traitement par plateau	Etapes	Temps en min
Nettoyage	Chargement	1
	Déchargement	1
Détentionnement	Chargement	1
	Déchargement	1
Découpage	Chargement	5
	Déchargement	5

Tableau 74 - Données sur les post-traitements

Les temps et les données pour chaque type de machine sont indiqués par le Tableau 75.

Temps Machine			
Machines		1	2
Temps chargement (min)		30	30
Temps déchargement (min)		60	60
Préparation (min)		30	30
Nettoyage court (min)		30	30
Nettoyage moyen (min)	Avec opérateur		
	Sans opérateur		
Nettoyage long (min)	Avec opérateur		
	Sans opérateur		
	Avec opérateur	1440	1440
Nettoyage interne ou externe		Interne	Interne
Données machines			
Données		1	2
Hauteur max (mm)		350	280
Coût horaire (€/h)		100	150
Vitesse de refroidissement (mm ³ /min)		180	120
Délai de réapprovisionnement		1	

Tableau 75 - Données sur les machines

Chaque type de machine est compatible avec un seul type de plateau. Les poudres sont compatibles avec tous les plateaux et toutes les machines (Tableau 76).

Compatibilités								
Compatibilité Plateaux / Machines				Compatibilité Poudres / Machines				
		Machines					Machines	
		1	2	3			1	2
Plateaux	1	1	0		Poudres	1	1	1
	2	0	1			2	1	1
Compatibilité Poudres / Plateaux								
		Poudres						
		1	2	3				
Plateaux	1	1	1	1				
	2	1	1	1				

Tableau 76 - Compatibilités

1.5. Les OF

Lorsque la composition des plateaux est fixée, la liste des OF à réaliser avec les références et les temps associés (Tableau 77) et la composition des plateaux (Tableau 78) font partie des données d'entrée.

Plateau	Réf plateau	Réf poudre	Lasage	Refroidissement	Récupération poudre	Nettoyage	Détentionnement	Découpage
1 à 18	2	1	1850	120	15	15	240	92
19 à 36	2	1	1832	120	14	15	240	92
37 à 52	2	1	8688	120	12	15	240	143
53 et 54	1	2	11088	180	13	15	240	100
55 à 58	1	2	5688	180	14	15	240	50
59 à 62	1	2	17028	180	14	15	240	43
63 à 112	1	3	1122	180	15	15	180	11

Tableau 77 - Liste des OF à réaliser

L'extrait du tableau de composition des plateaux présenté dans le Tableau 78 permet de savoir quelle quantité de chaque référence est présente sur le plateau et à quelle commande est rattachée chaque pièce. Par exemple, le plateau 53 est composé de 12 pièces de référence 5 qui appartiennent à la commande 95.

Composition des plateaux			
Plateau	Référence	Quantité	Commande
1	1	1	6
19	2	1	5
37	3	4	21
45	4	4	2
53	5	12	95
55	5	6	24
59	6	6	23
63	7	1	1

Tableau 78 - Composition des plateaux

2. REGLAGE DE L'ALGORITHME GENETIQUE

Une fois que l'algorithme génétique est développé, il faut régler les différents paramètres afin de garantir sa convergence. Pour obtenir la valeur de chaque paramètre plusieurs expérimentations sont réalisées.

Des expérimentations préalables ont permis de déterminer que le nombre d'individus gardés et le nombre d'individus sélectionnés par tournoi n'ont pas un impact significatif sur les résultats. Afin de favoriser l'innovation, ces valeurs sont fixées à :

- Le nombre d'individus gardés : 10% ;
- Le nombre d'individus sélectionnés par tournoi : 10%.

L'objectif est maintenant de régler les paramètres suivants :

- La probabilité de croisement ;
- La probabilité de mutation.

Afin de régler les paramètres de probabilité, le nombre d'individus dans une population est fixé à 100. Cette taille de population correspond à une taille de population classique. L'expérimentation est réalisée avec 120 itérations.

Les valeurs possibles pour chaque paramètre sont présentées dans le Tableau 79.

Probabilité	Valeurs		
Croisement	0,4	0,6	0,8
Mutation	0,2	0,5	0,8

Tableau 79 - Valeurs des probabilités de croisement et de mutation

Quatre expérimentations sont réalisées, les probabilités fixées pour chaque expérimentation sont synthétisées dans le Tableau 80.

Probabilité	1	2	3	4
Croisement	0,6	0,6	0,4	0,8
Mutation	0,2	0,8	0,5	0,5

Tableau 80 - Expérimentation : Valeurs des paramètres

Pour chaque expérimentation et pour chaque itération, la valeur la plus basse du macro-indicateur est conservée. Le graphique (Figure 126) représente son évolution en fonction du numéro de l'itération.

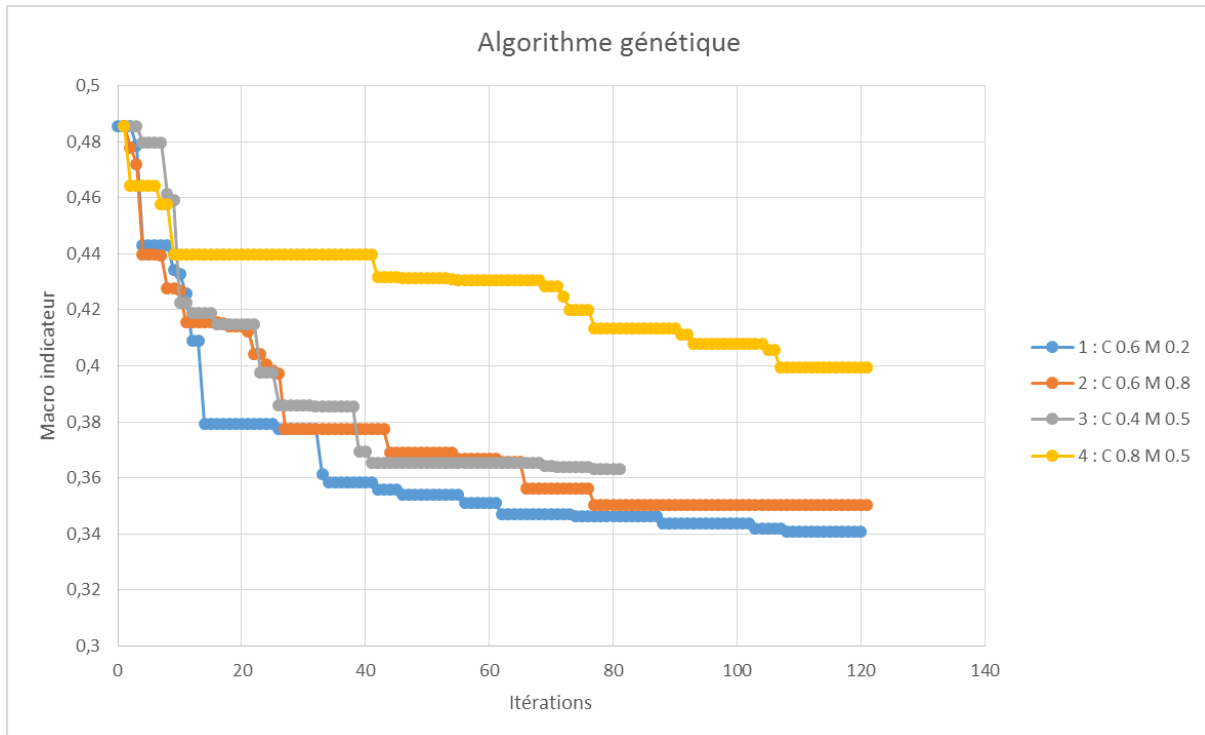


Figure 126 - Réglage de l'algorithme génétique

Les expérimentations 1 et 2 permettent de conclure sur la probabilité de mutation. Les valeurs obtenues et les vitesses de convergence sont proches. La probabilité de mutation a peu d'influence sur la convergence de l'algorithme. Au vu des courbes, la probabilité de mutation est fixée à 0,2.

Les expérimentations 3 et 4 permettent de conclure que la probabilité de croisement ne doit pas être trop élevée et ne doit pas être fixée à 0,8 car la vitesse de convergence de l'expérimentation 4 est plus faible que celle de l'expérimentation 3. La probabilité de mutation a peu d'impact sur la convergence et les résultats des expérimentations 1, 2 et 3 sont assez proches. La probabilité de croisement est donc fixée à 0,6.

Les valeurs des paramètres sont donc :

- Le nombre d'individus gardés : 10% ;
- Le nombre d'individus sélectionnés par tournoi : 10% ;
- La probabilité de croisement : 0,6 ;
- La probabilité de mutation : 0,2.

3. REGLAGE DE L'ENTROPIE CROISEE

Une fois que l'entropie croisée est développée, il faut régler les différents paramètres afin de garantir sa convergence. Le pourcentage des meilleurs gardés est de 20%.

Les calculs sont arrêtés au bout de 22 itérations.

Le paramètre d'entrée de l'entropie croisée à régler est : le nombre de solutions plateau / OF créées à chaque itération. Afin de régler ce paramètre, trois expérimentations sont réalisées (Tableau 81).

Expérimentations	1	2	3
Nombre de solutions	600	300	100

Tableau 81 - Entropie croisée : Expérimentations

Pour chaque expérimentation et pour chaque itération, la valeur la plus basse du macro-indicateur est conservée. Le graphique (Figure 127) représente l'évolution de cette valeur en fonction du numéro de l'itération.



Figure 127 - Réglage de l'entropie croisée

La vitesse de convergence de l'expérimentation 3 est plus lente que celles des expérimentations 1 et 2. Une population de 100 solutions n'est pas suffisante. La vitesse de convergence des expérimentations 1 et 2 est similaire. Pour une vitesse de convergence similaire, l'expérimentation 1 nécessite l'évaluation du double d'individus. Le nombre de solutions plateau / Of créées à chaque itération est donc fixé à 300.

4. RESULTATS DE L'ALGORITHME GENETIQUE

Nous allons analyser les résultats de l'expérimentation réalisée avec le réglage suivant :

- Le nombre d'itérations : 120 ;
- Le nombre d'individus : 100 ;
- Le nombre d'individus gardés : 10% ;
- Le nombre d'individus sélectionnés par tournoi : 10% ;
- La probabilité de croisement : 0,6 ;
- La probabilité de mutation : 0,2.

Parmi les 10 meilleures solutions gardées, les solutions 5 à 10 sont identiques. Le Tableau 82 synthétise les résultats obtenus pour les 5 meilleures solutions.

Indicateurs	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Retard (min)	1200116,4	1203996,34	1217420,9	1314263,16	1256418,42
Taux	40,73%	40,74%	40,24%	39,75%	39,60%
Coût	633 190,48 €	633 879,53 €	627 527,46 €	605 997,02 €	617 353,96 €
Macro indicateur	0,340840557	0,341187689	0,341252321	0,341683574	0,341929133

Tableau 82 - Résultats de l'AG : Valeurs des indicateurs

Les résultats obtenus montrent que le modèle cherche un compromis entre les 3 indicateurs. La solution 4 est moins chère que la solution 1 mais le retard est plus important et le taux d'utilisation est plus faible.

Le calcul des écarts entre la solution 1 et les autres solutions montre que les écarts sont faibles (Tableau 83). La plus grande différence se fait au niveau du retard.

Indicateurs	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Retard (min)	0,32%	1,42%	8,69%	4,48%
Taux	0,03%	-1,21%	-2,48%	-2,86%
Coût	0,11%	-0,90%	-4,49%	-2,57%
Macro indicateur	0,10%	0,12%	0,25%	0,32%

Tableau 83 - Ecart entre les solutions

Pour chaque solution, nous obtenons une liste ordonnée d'OF sur chaque machine. La solution 1 est représentée par le Tableau 84.

Machine	Type	Taux d'utilisation	Liste ordonnée d'OF																
			59	61	46	72	69	37	6	41	29	8	30	47	99	25	70	44	32
1	1	42,1%	59	61	46	72	69	37	6	41	29	8	30	47	99	25	70	44	32
2	1	32,8%	56	3	54	92	39												
3	1	27,0%	85	48	27	43	82	90	76	35	38	102	65	66	63				
4	1	43,0%	16	91	71	60	78	34	40	79	31	9	42						
5	2	36,5%	97	19	13	5	55	109	52	28	88	94	45	110	80				
6	2	48,5%	4	108	51	7	95	111	101	89	104	105	81	107	33	15	67	1	74
7	2	48,1%	96	64	57	103	11	26	12	98	87	18	73						
8	2	36,6%	83	49	50	21	58	68	112	75	84	93	17	2	10	77			
9	2	51,9%	106	53	36	86	100	24	23	62	20	14	22						

Tableau 84 - Résultats de l'AG : Solution 1

La comparaison de l'affectation et du séquençage des OF dans chaque solution montre que les différences se situent au niveau du séquençage et non au niveau de l'affectation des plateaux aux machines.

5. RESULTATS DE L'ENTROPIE CROISEE

Nous allons analyser les résultats de l'expérimentation réalisée avec le réglage suivant :

- Le nombre d'itérations de l'entropie plateau / OF : 25 ;
- Le nombre de solutions plateau / OF créées : 300 ;
- Le nombre de meilleurs conservés plateau / OF : 20%.

Nous allons comparer la meilleure solution de l'itération 25, la dernière itération réalisée et la meilleure solution de l'itération 23, qui a donné la meilleure solution parmi toutes les solutions évaluées. Le Tableau 85 indique la valeur des indicateurs et du macro-indicateur pour ces deux solutions ainsi que l'écart entre les deux. La différence se fait essentiellement sur le taux d'utilisation des machines qui est plus important dans la solution de l'itération 23.

	Sol 1 IT 23	Sol 1 IT 25	Ecart
Retard (min)	1378655,46	1351150,86	2,00%
Taux	35,74895207	33,10197408	7,40%
Coût	802 135,67 €	802 812,97 €	-0,08%
Macro indicateur	0,407011041	0,410941082	-0,97%

Tableau 85 - Meilleure solution des itérations 23 et 25

Pour chaque solution, nous obtenons une liste ordonnée d'OF affectés à chaque machine. Le Tableau 86 et le Tableau 87 présentent la meilleure solution obtenue, respectivement, à l'itération 23 et à l'itération 25. Les OF dont le numéro est écrit en rouge correspondent aux OF dont au moins une pièce les composant fait partie d'une commande terminée en retard.

Machine	Type	Taux d'utilisation	Liste OF																				
1	1	21,62299107	75	74	71	88	76	68	69														
2	1	54,68370589	92	59	55	60	72	53	87	91	73	89	94	70	83	64	78	65	108	77	106		
3	1	55,9808929	57	81	58	56	54	84	62	93	103	61	98	86	97	67	107	66	80	82	110	63	
4	1	43,06766121	95	109	90	99	100	101	102	111	112	79	104	96	105	85							
5	2	21,98414357	6	37	7	20	41	45	38	47	9												
6	2	30,83271061	4	3	50	5	23	21	51	19	46	22	17	24	28	11	2						
7	2	43,96100996	52	39	27	29	26	36	31	8	1	14	32										
8	2	28,83386233	25	16	18	10	30	33	34	15													
9	2	20,77359106	12	40	49	48	43	42	13	35	44												

Tableau 86 - Meilleure solution de l'itération 23

Machine	Type	Taux d'utilisation	Liste OF																						
1	1	22,39867445	55	109	75	88	76	74	81	68	69														
2	1	37,29570363	82	61	91	59	60	94	84	89	99	73	70	64	78	103	65	106							
3	1	45,5345917	72	92	58	56	54	86	62	57	77	98	97	67	107	66	80	71	110	101	63				
4	1	56,68225037	93	53	108	96	87	105	83	112	95	100	102	79	104	90	111	85							
5	2	9,342855491	5	4	48	39	41	45	9	21															
6	2	22,87299442	24	27	37	23	20	19	22	46	28	26													
7	2	13,4184999	42	7	52	2	51	29	36	31	8														
8	2	47,62338378	25	16	38	33	14	3	6	32	30	17	10												
9	2	42,74881302	1	34	12	40	15	50	47	49	43	13	35	11	44	18									

Tableau 87 - Meilleure solution de l'itération 25

Les OF en vert correspondent aux OF placés sur la même machine dans les deux solutions. La matrice de probabilités est trop importante pour être donnée mais nous allons en analyser une partie. Dans les deux solutions, les OF 22, 23 et 24 sont affectés à la machine 6. Il en est de même pour les OF 74, 75 et 76 qui sont affectés à la machine 1. Le Tableau 88 et le Tableau 89 présentent pour chaque OF la probabilité d'être affecté à un certain numéro de place. L'OF n°22 peut être affecté à la place 301 avec une probabilité de 0,25. Chaque numéro de place est caractérisé par un type de plateau et un numéro de machine. Les places 13, 19, 22 et 24 correspondent à des places disponibles sur la machine 1. Les places 299, 301, 310, 311, 319 et 321 correspondent à des places disponibles sur la machine 6. Les OF 22, 23 et 24 ont une probabilité importante d'être affectés à la machine 6 et les OF 74, 75 et 76 ont une probabilité importante d'être affectés à la machine 1. Les OF 22, 23 et 24 ainsi que les OF 74, 75 et 76 ont la même composition et utilisent la même poudre. L'outil indique qu'il est cohérent de les réaliser sur la même machine.

OF n°22		OF n°23		OF n°24	
Numéro place	Probabilité	Numéro place	Probabilité	Numéro place	Probabilité
301	0,250	310	0,400	299	0,450
311	0,033	356	0,067	321	0,233
319	0,067	359	0,400	330	0,133
325	0,350	421	0,050	349	0,117
332	0,117	441	0,033	462	0,067
376	0,150	476	0,050		
403	0,017				
443	0,017				

Tableau 88 - Extrait de la matrice de probabilité pour les OF 22, 23 et 24

OF n°74		OF n°75		OF n°76	
Numéro place	Probabilité	Numéro place	Probabilité	Numéro place	Probabilité
19	0,317	13	0,767	22	0,167
24	0,200	75	0,100	53	0,683
59	0,350	110	0,050	93	0,150
115	0,017	218	0,083		
141	0,117				

Tableau 89 - Extrait de la matrice de probabilité pour les OF 74, 75 et 76

Alors, que l'entropie croisée a été choisie pour la notion d'apprentissage, cette analyse montre bien que grâce à l'analyse des solutions et de la matrice de probabilités il est possible de déterminer des ensembles de plateaux qui permettent d'améliorer les performances de l'atelier.

6. COMPARAISON

Des raisons informatiques font que les expérimentations pour réaliser les réglages des algorithmes et l'analyse des résultats n'ont pas pu être réalisées de manière complète. Nous allons analyser les résultats obtenus mais des tests complémentaires seront réalisés par la suite.

Pour pouvoir comparer les résultats des deux algorithmes, le même nombre d'individus est utilisé. Dans le cas de l'entropie croisée, 22 itérations sont réalisées avec une population de 300 individus ce qui représente un total de 6600 individus testés. Dans le cas de l'algorithme génétique, les 6600 individus testés sont atteints lors de la 38^{ème} itération. Le meilleur macro-indicateur à la 38^{ème} itération de l'algorithme génétique a une valeur de 0,358. A la 22^{ème} itération de l'entropie croisée, le meilleur macro-indicateur obtenu a une valeur de 0,411. L'algorithme génétique permet donc d'obtenir de meilleurs résultats.

Néanmoins, l'entropie croisée intègre la notion d'apprentissage, ce qui n'est pas le cas de l'algorithme génétique. En effet, l'entropie croisée, par l'intermédiaire de la matrice de probabilités, permet d'apprendre les associations de plateaux et les associations plateaux/machines, au cours des itérations, qui permettent d'être plus performant et qui diminuent la performance. Cet apprentissage peut permettre de définir des règles pour l'ordonnement en fabrication additive. C'est pour cette raison que l'étape de répartition des pièces sur les plateaux est également optimisée grâce à une entropie croisée.

7. CONCLUSION

Des expérimentations ont permis de régler les paramètres d'entrée de l'algorithme génétique et de l'entropie croisée. Pour chaque algorithme, la meilleure solution obtenue est analysée. La comparaison des résultats montre que l'algorithme génétique permet d'obtenir de meilleurs résultats pour l'affectation plateau / OF. En revanche, l'algorithme génétique ne permettant pas d'apprendre au cours des itérations, l'entropie croisée est choisie pour intégrer l'étape d'affectation des pièces aux plateaux.

CHAPITRE 11. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. CONCLUSION

Dans le cadre de ces travaux de recherche, notre objectif sur le niveau opérationnel est de proposer aux exploitants un outil d'aide à la décision permettant de passer d'une liste de commandes multi-références à une composition de plateaux et un ordonnancement de ces plateaux pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.

L'ordonnancement en fabrication additive et la résolution conjointe des problèmes de bin packing et d'ordonnancement sont peu abordés dans la littérature. Dans nos travaux, les pièces prises en compte ne sont pas orientées, elles peuvent pivoter de 90 degrés autour de la verticale et la contrainte guillotine n'est pas utilisée. Par conséquent, nous devons résoudre un problème 2BP|R|F. L'ordonnancement à réaliser est un ordonnancement à machines parallèles avec contrainte d'éligibilité qui doit respecter une partie des contraintes classiques d'ordonnancement.

Le problème de bin packing et le problème d'ordonnancement sont des problèmes d'optimisation combinatoire. Les problèmes d'optimisation peuvent être résolus par des méthodes exactes ou des méthodes approchées. Les méthodes choisies sont l'algorithme génétique et l'entropie croisée.

Toutes les méthodes d'optimisation comportent une étape d'évaluation afin de comparer les solutions entre elles. Il existe différentes méthodes d'évaluation de la performance dont la simulation fait partie. Dans le cadre d'un bin packing et d'un ordonnancement, plusieurs critères peuvent être considérés et ils sont parfois contradictoires. Afin d'obtenir un indicateur agrégé intégrable au moteur d'optimisation et de traduire les préférences du décideur, nous utilisons la méthode AHP.

Après avoir formalisé mathématiquement le problème et en s'appuyant sur les méthodes proposées dans la littérature, nous proposons une méthode originale.

Les données d'entrée permettent d'alimenter un moteur d'optimisation qui affecte les plateaux aux machines en les séquençant et évalue chaque solution en appliquant la méthode AHP aux résultats obtenus grâce au modèle de simulation. Deux moteurs d'optimisation sont proposés : un algorithme génétique et une entropie croisée.

Des expérimentations ont permis de régler les paramètres d'entrée de l'algorithme génétique et de l'entropie croisée. Après avoir analysé la meilleure solution obtenue grâce aux deux algorithmes, nous pouvons conclure que l'algorithme génétique permet d'obtenir de meilleurs résultats pour l'affectation plateau / OF. En revanche, l'entropie croisée intègre la notion d'apprentissage, ce qui n'est pas le cas de l'algorithme génétique. Cet apprentissage peut permettre de définir des règles pour l'ordonnancement en fabrication additive que ce soit au niveau de l'affectation plateaux / machines, du séquençement ou de l'affectation pièces / plateaux. C'est pour cette raison que l'étape de répartition des pièces sur les plateaux est également optimisée grâce à une entropie croisée.

Nous obtenons donc un outil d'aide à la décision qui permet d'affecter les plateaux aux machines et de les séquençer pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.

2. PERSPECTIVES

2.1. Double entropie croisée

Si les pièces ne sont pas critiques ou soumises à des contraintes particulières, les fabricants peuvent mettre des pièces différentes de plusieurs clients sur les plateaux. Il en est de même lorsque les pièces critiques sont en phase de certification.

Les étapes à suivre pour cette seconde entropie croisée sont les mêmes que pour l'entropie croisée présentée. Les solutions sont codées par un vecteur où chaque élément correspond à l'affectation d'une pièce à une place qui correspond à un plateau à fabriquer et auquel est attachée une référence plateau.

Dans cette seconde entropie croisée, la matrice de probabilités fait le lien entre les pièces et les plateaux auxquels elles sont affectées (Figure 128).

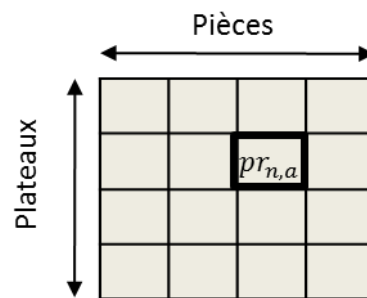


Figure 128 - Matrice de probabilités

$p_{r_{n,a}}$ correspond à la probabilité pour la pièce n d'être allouée au plateau a . Elle est calculée à partir du nombre de fois où une pièce n est allouée à un plateau a divisé par le nombre de meilleures solutions conservées y .

Lors de l'initialisation de la matrice de probabilités toutes les associations pièces / plateaux possibles sont considérées équiprobables. La valeur de cette probabilité est égale à l'inverse du nombre de plateaux disponibles. Ce nombre de plateaux dépend du nombre de plateaux de chaque type et du nombre de fois où ils peuvent être réutilisés. Il est créé autant de places que de plateaux disponibles de chaque référence multipliées par leur nombre d'utilisations possibles.

Le nombre de solutions à créer fait partie des paramètres d'entrée. A chaque itération, les solutions possibles sont créées à partir de la matrice de probabilités. Le numéro d'une pièce est tiré aléatoirement puis elle est affectée à une place en fonction de la matrice de probabilités.

L'ensemble des solutions possibles est créé en utilisant une heuristique de construction.

Une pièce est choisie aléatoirement dans l'ensemble des pièces à placer. Elle est affectée à un plateau selon la matrice de probabilités (Figure 128). Si la pièce peut être placée sur ce plateau, la meilleure place est recherchée en utilisant l'heuristique de Cui *et al.* (2015). Si la pièce ne peut pas être placée, elle est affectée à un autre plateau toujours selon la matrice de probabilités. Ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les pièces soient placées (Figure 129).

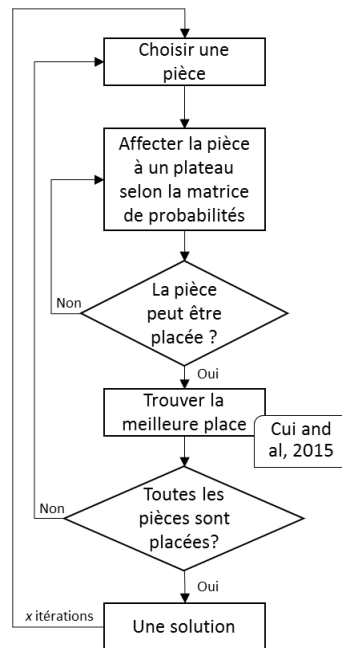


Figure 129 - Heuristique de construction

Cui *et al.* (2015) implémentent une heuristique séquentielle pour le problème de bin packing en deux dimensions. Cette heuristique est basée sur les notions de positions possibles et d'enveloppe (Figure 130). Toutes les pièces sont assimilées à un rectangle dont les dimensions correspondent aux dimensions de l'enveloppe de l'aire projetée de la pièce sur le plateau. Les pièces peuvent être tournées de 90°.

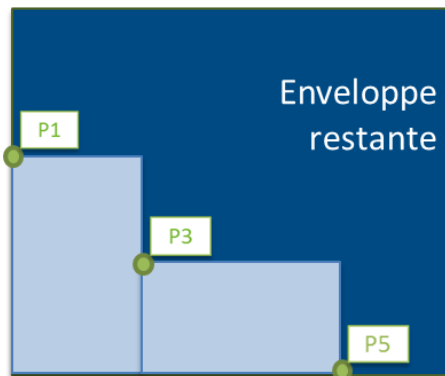


Figure 130 - Positions possibles et enveloppe

Les positions possibles correspondent aux points où l'angle en bas à gauche de chaque pièce peut être placé (P1, P3 et P5), il faut ensuite vérifier que la pièce est compatible avec la place disponible. L'enveloppe correspond à l'aire disponible sur le plateau pour placer les pièces (zone bleue foncée). La meilleure position est celle qui permet de minimiser la différence entre la surface avant et la surface après le placement de la pièce. Si, quand une pièce est placée, un de ses bords définis avec les bords du plateau ou avec les bords d'une autre pièce une surface trop petite pour qu'une pièce soit placée, l'aire de cette surface est déduite de l'aire de l'enveloppe.

Une fois que les solutions ont été créées, il faut sélectionner les meilleures. Le nombre de meilleures solutions sélectionnées fait partie des paramètres d'entrée. La sélection se fait à la fois dans l'ensemble des solutions qui viennent d'être créées et dans l'ensemble des meilleures solutions de l'itération. Mise à jour de la matrice de probabilités

Une fois que les meilleures solutions ont été sélectionnées, la matrice de probabilité peut être mise à jour. Pour cela, il faut compter le nombre de fois où une pièce est affectée à une même place. La probabilité qu'une pièce soit affectée à une place correspond au rapport entre le nombre de fois où la pièce a été affectée à cette place et le nombre de meilleures solutions conservées.

Les deux entropies croisées que nous venons de développer sont imbriquées, la première afin d'optimiser la répartition des pièces sur les plateaux et la seconde pour optimiser l'allocation et le séquençement des plateaux sur les machines (Figure 101).

Une fois que cette double boucle d'entropie croisée est développée, il faut régler les différents paramètres afin de garantir sa convergence. Les paramètres d'entrée de l'entropie croisée à régler sont :

- Le nombre d'itérations de l'entropie pièce / plateau ;
- Le nombre de solutions pièce / plateau créées ;
- Le nombre de meilleurs conservés pièce / plateau ;
- Le nombre d'itérations de l'entropie plateau / OF ;
- Le nombre de solutions plateau / OF créées ;
- Le nombre de meilleurs conservés plateau / OF.

Cette méthode a été implémentée, il est maintenant nécessaire de la tester sur un cas d'étude pour l'éprouver.

2.2. Réglage des algorithmes

Afin d'effectuer le réglage de l'algorithme génétique et de l'entropie croisée, des plans d'expérience complets n'ont pas pu être réalisés. Des expérimentations supplémentaires pourraient permettre de régler plus finement les algorithmes.

De plus, dans le cas de l'algorithme génétique, les différents croisements et les différentes mutations sont considérés équiprobables. La probabilité de croisement et la probabilité de mutation permettent de déterminer si un croisement ou une mutation doit être effectué. Si c'est le cas, un seul des trois croisements puis une seule des quatre mutations peuvent être réalisés. Afin de régler l'algorithme, il faut déterminer l'impact de ces différents opérateurs génétiques sur la performance. Les paramètres à régler sont :

- La probabilité de croisement en un point P_{c1} ;
- La probabilité de croisement en deux points (OX) P_{c20} ;
- La probabilité de croisement en deux points (LOX) P_{c2L} ;
- La probabilité de mutation machine : échange de deux plateaux P_{mm2} ;
- La probabilité de mutation machine : changement d'un plateau P_{mm1} ;
- La probabilité de mutation de séquençement : permutation de deux plateaux P_{ms2} ;
- La probabilité de mutation de séquençement : changement d'un plateau P_{ms1} .

2.3. Evolution de l'évaluation

La fonction objectif prend en compte le retard, le coût et le taux d'utilisation. Il peut être envisagé de faire évoluer leur formule ou d'ajouter de nouveaux indicateurs.

La méthode d'évaluation multicritère utilisée est l'AHP car il est nécessaire de réussir à traduire le raisonnement et les préférences du décideur au sein de l'évaluation des solutions. L'importance attribuée à chaque critère dépend du décideur. Il pourrait être intéressant de réaliser une AHP avec différents décideurs et de voir l'impact du raisonnement et des préférences de chacun sur les résultats obtenus. Il est également possible de faire de l'AHP multi-décideur.

Afin d'améliorer l'étape d'évaluation il est possible de faire évoluer le modèle de simulation. L'écart entre le temps de fabrication et le temps d'intervention de l'opérateur pose un problème de planification et d'allocation des ressources secondaires. Les opérateurs font partie des ressources partagées qui peuvent générer des temps de blocage sur les machines de fabrication additive. L'objectif est de trouver une organisation qui permet de réduire les temps d'attente de l'opérateur tout en évitant l'arrêt des machines à cause d'une absence d'opérateur. Une des évolutions possibles est donc la prise en compte du planning des opérateurs au sein du modèle de simulation.

La gestion de la poudre tout au long de la ligne soulève de nombreux problèmes. La poudre inutilisée lors de la fabrication est réutilisable. Pour des problèmes de qualité et de caractéristiques mécaniques, elle n'est recyclable qu'un certain nombre de fois. Il faut gérer la durée de vie de la poudre ainsi que sa traçabilité. En effet, la traçabilité est un élément fondamental pour l'industrie aéronautique, ils demandent le certificat d'atomisation

ce qui contraint la gestion de la poudre. La gestion de la poudre pourrait être ajoutée au modèle afin de prendre en compte les problématiques liées à l'approvisionnement de la poudre.

2.4. Moteur d'optimisation

Les méthodes d'optimisation choisies sont l'algorithme génétique et l'entropie croisée. Il pourrait être intéressant de tester d'autres métaheuristiques ou de développer une heuristique afin de comparer les performances et de voir si l'une des méthodes permet d'obtenir de meilleurs résultats en moins de temps.

Afin de diminuer le temps de calcul, il est peut également être envisagé de paralléliser les calculs.

2.5. Ordonnancement en fabrication additive

Plusieurs étapes d'ordonnancement ont été identifiées en fabrication additive :

- Le lancement des plateaux sur les machines de fabrication additive, une fois ceux-ci constitués ;
- Le traitement thermique par lot de plateaux ;
- Les post-traitements par lot de pièces ;
- Les post-traitements par pièce.

Nos travaux de recherche se sont concentrés sur la première étape en permettant d'obtenir une liste ordonnée d'OF affectée à chaque machine. La double entropie croisée doit être réglée afin d'obtenir la répartition des différentes pièces sur les plateaux. La suite de ces travaux consiste à faire évoluer les méthodes afin de prendre en compte l'ensemble du processus de fabrication additive et d'obtenir également :

- Des règles de lotissement de plateaux avant le traitement thermique par plateaux ;
- Des règles de lotissement de pièces avant les post-traitements par pièce ;
- Une répartition des pièces sur les machines de post-traitements par pièces.

Partie V

Conclusion générale et perspectives

PARTIE V. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CHAPITRE 1. CONCLUSION	274
1. NIVEAU STRATEGIQUE	274
2. NIVEAU TACTIQUE	275
3. NIVEAU OPERATIONNEL	276
4. CONCLUSION GENERALE	277
CHAPITRE 2. PERSPECTIVES	278
1. NIVEAU STRATEGIQUE.....	278
2. NIVEAU TACTIQUE	278
3. NIVEAU OPERATIONNEL	279
4. PERSPECTIVES GENERALES.....	280

CHAPITRE 1. CONCLUSION

La fabrication additive est un domaine en plein essor. Initialement, ce procédé était considéré comme un outil de prototypage et fabrication rapide. Le prototypage et les pièces détachées deviennent des utilisations courantes de la fabrication additive. Des évolutions technologiques permettent d'envisager la fabrication additive comme un outil de production industriel. Ainsi, intégrés à l'usine du futur ou l'industrie 4.0, les nouveaux procédés de fabrication additive offrent des nouvelles perspectives industrielles et économiques intéressantes.

L'étendue de domaines dans lesquels la fabrication additive peut être utilisée est l'une des richesses qui mène au développement actuel de ce nouveau procédé.

Afin que la fabrication additive puisse être utilisée en tant que procédé industriel, il est nécessaire d'anticiper l'intégration des entreprises qui utilisent la fabrication additive au sein des supply chains. Les chaînes de valeur et l'écosystème liés à la fabrication additive sont différents de ceux des procédés traditionnels. Il faut donc parvenir à intégrer cette nouvelle technologie dans les entreprises existantes ou créer de nouveaux ateliers. Cette intégration est liée au business model de l'entreprise ou à son évolution. L'intégration du client au centre du business model entraîne l'amplification du changement du modèle centralisé vers un modèle décentralisé. Pour l'instant, les modèles sont surtout centralisés, les modèles distribués se répandront en fonction de l'évolution de la fabrication additive.

La fabrication additive simplifie l'organisation de la supply chain mais son intégration amène de nombreuses questions sur la réorganisation de la supply chain ainsi que sur l'organisation interne des entreprises. Ces étapes sont cruciales dans la réussite de l'utilisation de la fabrication additive et ce sont les industriels qui feront les bons choix organisationnels qui persisteront sur le marché. Les impacts de la fabrication additive sur la supply chain montrent la nécessité de continuer les travaux de recherche sur la supply chain de fabrication additive et sur l'organisation industrielle afin de la rendre plus rentable et de tirer le meilleur parti de ses avantages.

L'industrialisation de la fabrication additive est donc en cours dans un contexte incertain. Pour que la fabrication additive puisse être industrialisée à grande échelle, il est nécessaire de réduire les coûts et d'augmenter la productivité.

Pour que la fabrication additive devienne un procédé clé dans l'industrie 4.0, les industriels doivent disposer d'outils d'aide à la décision pour les trois niveaux de décision.

1. NIVEAU STRATEGIQUE

La conception d'un atelier de production fait partie des décisions stratégiques d'une entreprise. Des décisions fortes pluriannuelles d'investissement, de sélection de machines et de choix d'organisation sont à prendre lors de cette étape avec des enjeux économiques, de rentabilité et de réponses aux marchés importants. Il est donc demandé aux décideurs de se positionner aujourd'hui sur un atelier pour un système et une organisation qui seront effectifs après une phase de ramp-up et une mise en place progressive du système final.

Il s'agit alors de définir à un instant t , un système qui devra :

- Etre efficient lorsque la production sera installée ;
- Répondre à la phase transitoire de montée en charge avec une mise en place progressive du système de production tout en étant efficient à chaque échéance.

L'objectif de ces travaux de recherche dans le cadre de cette thèse est donc de définir une méthode d'optimisation multicritères pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimal sur le long terme et sur le court terme. Il s'agit de proposer un ***outil d'aide à la décision qui identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte :***

- ***Des incertitudes du développement du marché des pièces fabriquées additivement ;***
- ***Des incertitudes liées aux développements des machines de fabrication additive ;***
- ***De l'attitude du décideur face à tous ces risques.***

Parmi les décisions stratégiques, les investissements font partie des décisions fortes à prendre dans le cadre de la fabrication additive. Dans nos travaux, nous considérons les investissements productifs et plus précisément les investissements d'expansion et d'innovation. A moyen et à long termes, il est possible de faire des investissements de modernisation. Nous nous situons au niveau de la phase de planification des investissements. L'horizon d'investissement à long terme que nous prenons est une source de risque mais également une source d'avantage concurrentiel.

Parmi l'ensemble des décisions stratégiques, nos travaux se concentrent sur les décisions qui concernent la planification stratégique. Les décisions stratégiques étant prises à long terme et le contexte de la fabrication additive étant incertain tant au niveau du marché que de la technologie, les décisions sont prises dans un contexte incertain et risqué.

Le problème est formalisé par un programme mixte en nombres entiers. La fonction objectif choisie est la maximisation du profit net qui intègre différents coûts pour être le plus complet possible. La littérature montre que ces problèmes sont généralement résolus à l'aide d'un algorithme de programmation linéaire basé sur la séparation et l'évaluation. Nous utilisons le solveur Gurobi qui se base sur cette méthode.

L'application du problème mixte en nombres entiers est réalisée dans un cas déterministe et sur un cas industriel. Dans les deux cas, l'analyse des résultats montre que le comportement du modèle est cohérent. L'application du modèle sur les quatre scénarii avec des évolutions différentes sur la demande et sur la capacité des machines démontre qu'il est important de prendre en compte ces évolutions incertaines.

Afin de prendre en compte les évolutions incertaines, les incertitudes sont intégrées au modèle grâce à des scénarii. Les scénarii concernent : la demande, l'amélioration du temps disponible et le coût des machines. L'analyse des résultats obtenus par l'application du modèle aux trois scénarii permettant d'intégrer les incertitudes montre que le modèle a un comportement cohérent.

Nous obtenons donc une méthode d'optimisation pour la conception modulaire d'un système de production intégrant la fabrication additive en présence de données incertaines qui soit optimale sur le long terme et sur le court terme. L'outil d'aide à la décision développé identifie la stratégie pluriannuelle et optimale d'investissement en tenant en compte des incertitudes liées au développement du marché à travers les scénarii de demande et des incertitudes liées aux développements des machines à travers les scénarii de temps disponible et de coût des machines.

2. NIVEAU TACTIQUE

Une fois l'atelier conçu, l'industriel doit pouvoir identifier les pièces qu'il est pertinent de faire selon un procédé additif. En effet, les industriels s'interrogent maintenant sur son intérêt pour une production plus standardisée de pièces complexes et coûteuses dans le cadre d'une fabrication usuelle (usinage, assemblage mécano-riqueté...).

Toutes les pièces ne sont pas forcément des candidates pertinentes pour la fabrication additive. Il est donc nécessaire pour le décideur de disposer d'un **outil permettant d'estimer le prix de revient d'une pièce en fabrication additive de la conception jusqu'à la finition complète de la pièce.**

Cet outil doit reposer sur un modèle de coût fiable qui satisfait les deux contraintes principales suivantes :

- La prise en compte de l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements, pour permettre d'estimer le bénéfice d'un changement de procédé ou de sa mise en œuvre ;
- La possibilité de prendre des décisions au début de l'étude de faisabilité, alors que toutes les informations nécessaires ne sont pas disponibles ou connues précisément.

A partir de la bibliographie, nous avons établi un nouveau modèle de coût adapté à notre problématique. Nous proposons un modèle de coût original qui prend en compte l'ensemble du processus, de la conception à la pièce finie. Pour cela, des classes de complexité sont proposées pour estimer le coût des phases de conception et de post-traitements. Les modèles proposés dans la littérature sont adaptés à ce cas d'emploi.

L'analyse de la littérature montre qu'un des paramètres critiques concerne l'estimation du temps de lasage nécessaire à la fabrication d'une pièce. Les modèles de la littérature nécessitent la connaissance de paramètres trop précis au stade de l'étude de faisabilité. De plus, lors de leur application, des écarts importants apparaissent. Nous nous appuyons sur ces différents modèles pour proposer une nouvelle modélisation qui permet de prendre en compte l'ensemble des paramètres nécessaires en travaillant avec les données disponibles au moment de l'étude de faisabilité. Le modèle proposé est cohérent avec le modèle publié dans les techniques de l'ingénieur par Pillot (2016). De plus, le modèle est validé sur des pièces géométriquement simples simulées sur un logiciel de fabrication additive. En revanche, lors de l'application sur des pièces industrielles, les écarts vont de -88% à 9%. Ces écarts restent conformes aux écarts produits par la littérature. Nous ne disposons pas des données nécessaires afin d'expliquer ces écarts ou d'affiner le modèle. Des travaux complémentaires pourraient permettre de définir un modèle plus précis en définissant des coefficients expérimentaux par exemple.

Notre modèle de coûts a tendance à surestimer le coût de revient d'une pièce industrielle. Cet écart peut s'expliquer par une structure de coût différente. En effet, dans les chiffrages, les coûts pris en compte ne sont pas toujours exactement les mêmes. Des structures de coût spécifiques à chaque société peuvent faire varier les coûts de structure par exemple. De plus, les chiffrages donnés à titre comparatif sont réalisés sur des pièces existantes alors que notre chiffrage est fait à une étape où nous ne connaissons pas précisément la pièce. Avec l'utilisation des niveaux de complexité, les coûts de reconception, de préparation et de post-traitements sont estimés.

Ainsi, nous avons développé un modèle de coût qui permet de couvrir l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements et de prendre des décisions au début de l'étude de faisabilité, alors que toutes les informations nécessaires ne sont pas disponibles ou connues précisément. L'outil permet de prendre des décisions au niveau tactique, quant à la mise en œuvre de la fabrication additive pour la pièce étudiée. Il donne des résultats cohérents avec la réalité qui permettent d'aider le décideur dans son choix technologique pour une pièce.

3. NIVEAU OPERATIONNEL

Une fois l'atelier de fabrication additive installé, il est crucial de disposer d'outils d'aide à la décision pour son pilotage au quotidien. Notre objectif sur le niveau opérationnel dans le cadre de ces travaux de recherche est donc de proposer aux exploitants ***un outil d'aide à la décision permettant de passer d'une liste de commandes multi-références à une composition de plateaux et un ordonnancement de ces plateaux pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.***

Plusieurs étapes d'ordonnancement sont identifiées tout au long du processus. Ces travaux se concentrent sur l'affectation des pièces aux plateaux, sur l'affectation des plateaux aux machines et sur leur séquençement. Ces deux étapes correspondent à un problème de bin packing et à un problème d'ordonnancement. L'objectif est de résoudre conjointement ces deux problèmes. La répartition des pièces sur les plateaux peut avoir un impact sur l'affectation et l'ordonnancement des plateaux sur les machines. C'est pourquoi, les problèmes ne sont pas traités de façon séquentielle.

L'ordonnancement en fabrication additive et la résolution conjointe des problèmes de bin packing et d'ordonnancement sont peu abordés dans la littérature. Dans nos travaux, nous devons résoudre un problème de bin packing 2BP|R|F. L'ordonnancement que nous voulons réaliser est un ordonnancement à machines parallèles avec contrainte d'éligibilité qui doit respecter une partie des contraintes classiques d'ordonnancement.

Ces deux problèmes à résoudre sont des problèmes d'optimisation combinatoire. Toutes les méthodes d'optimisation comportent une étape d'évaluation afin de comparer les solutions entre elles. Parmi les différentes méthodes d'évaluation de la performance, nous utilisons la simulation. Dans le cadre d'un bin packing et d'un ordonnancement, plusieurs critères peuvent être considérés et ils sont parfois contradictoires. Afin d'obtenir un indicateur agrégé intégrable au moteur d'optimisation et de traduire les préférences du décideur, nous utilisons la méthode AHP.

Nous nous concentrons d'abord sur l'étape d'affectation des plateaux aux machines et de leur séquençement. Les données d'entrée permettent d'alimenter un moteur d'optimisation qui affecte les plateaux aux machines en les séquençant et évalue chaque solution en appliquant la méthode AHP aux résultats obtenus grâce au modèle de simulation. Deux moteurs d'optimisation sont proposés : un algorithme génétique et une entropie croisée.

Des expérimentations ont permis de régler les paramètres d'entrée de l'algorithme génétique et de l'entropie croisée. Après avoir analysé la meilleure solution obtenue grâce aux deux algorithmes, nous pouvons conclure que l'algorithme génétique permet d'obtenir de meilleurs résultats pour l'affectation plateau/OF. En revanche, l'entropie croisée intègre la notion d'apprentissage, ce qui n'est pas le cas de l'algorithme génétique. Cet apprentissage peut permettre de définir des règles pour l'ordonnancement en fabrication additive que ce soit au niveau de l'affectation plateaux/machines, du séquençement ou de l'affectation pièces/plateaux. C'est pour cette raison que l'étape de répartition des pièces sur les plateaux est également optimisée grâce à une entropie croisée.

Nous obtenons donc un outil d'aide à la décision qui permet d'affecter les plateaux aux machines et de les séquençer pour que l'atelier soit efficient et les commandes clients satisfaites.

4. CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ces travaux est de réaliser des outils d'aide à la décision multicritère pour la conception modulaire et l'ordonnancement d'ateliers de fabrication additive, des outils d'aide à la décision intégrés pour la conception des ateliers 4.0. La fabrication additive est en train d'évoluer d'un outil utilisé pour le prototypage vers un procédé industriel. Ces outils doivent aider les entreprises à prendre des décisions pendant cette phase d'industrialisation et lorsque la production est installée.

A l'issue de ces travaux de thèse, nous proposons trois outils d'aide à la décision qui permettent de faire des choix parmi plusieurs scénarii d'investissement possibles, de définir les pièces économiquement intéressantes à (re)concevoir pour la fabrication additive et d'aider à l'ordonnancement afin d'améliorer l'efficacité d'un atelier. Ces outils s'appuient sur des méthodes d'optimisation, des méthodes d'évaluation multicritère et des méthodes de prise en compte du caractère imparfait des informations.

CHAPITRE 2. PERSPECTIVES

Nous venons de conclure sur chaque partie de la thèse puis de façon générale. Cette étape de conclusion nous a permis de voir l'aboutissement de nos travaux. Nous allons maintenant voir comment améliorer nos approches et les outils d'aide à la décision proposés et comment aller plus loin.

1. NIVEAU STRATEGIQUE

L'outil d'aide à la décision développé au niveau stratégique constitue une première étape afin de répondre à la problématique posée. Afin de valider cette première étape, il faudrait appliquer le modèle intégrant les incertitudes sur le cas industriel.

Nous avons vu que la linéarisation de la productivité crée des écarts entre les résultats obtenus et les résultats réels. Il serait intéressant de réaliser des expérimentations afin de déterminer l'intervalle de discrétisation qui permet d'obtenir les résultats les plus proches de la réalité en un temps raisonnable.

La fonction objectif est pour l'instant monocritère, elle ne considère que le critère de coût. De nombreux critères peuvent être pris en compte dans l'évaluation d'un scénario d'investissement. Une fonction objectif multicritère pourrait ainsi être définie. De plus, parmi ces critères, certains sont qualitatifs. Une réflexion sur la méthode à utiliser afin de les prendre en compte serait intéressante.

La méthode d'optimisation utilisée est la méthode de séparation et d'évaluation. Il s'agit d'une méthode exacte d'optimisation. Il pourrait être envisagé d'utiliser un autre moteur d'optimisation. En effet, dans le cas de problèmes de grande taille, le temps de calcul risque d'être important. Le temps de calcul est moins contraignant pour le niveau stratégique que pour le niveau opérationnel. Il est possible d'attendre plusieurs jours pour prendre une décision importante qui engage une entreprise financièrement et à long terme. Cependant, la question de l'utilisation de métaheuristiques ou d'heuristiques pourrait se poser.

Plusieurs sources d'incertitudes ont été identifiées. L'outil développé prend en compte : l'évolution de la demande, les améliorations des temps de cycle et l'évolution du coût des machines. Les promesses sur l'utilisation de nouveaux matériaux et les incertitudes sur le développement et la disponibilité des modules complémentaires et des machines ne sont pas encore prises en compte. Une réflexion doit être menée afin de savoir si leur intégration peut être faite au sein des scénarii ou s'il faut utiliser d'autres méthodes d'intégration des incertitudes.

Les caractéristiques des décideurs ont un impact sur le niveau d'acceptation du risque. C'est pourquoi, il est important de prendre en compte l'attitude du décideur face au risque. Cette dernière doit être intégrée au sein de la méthode d'optimisation. De plus, une décision est souvent basée sur la confiance. En fonction de la réputation et des résultats des fournisseurs de machines, le décideur va leur faire plus ou moins confiance. Le niveau de confiance du décideur par rapport aux fournisseurs de machines et par rapport aux promesses faites peut avoir un impact important sur la décision prise. Une réflexion importante doit être menée afin d'étudier comment prendre en compte ce niveau de confiance au sein de la méthode d'optimisation.

2. NIVEAU TACTIQUE

A la suite de ce travail, trois perspectives principales apparaissent.

La première concerne l'estimateur de temps de lasage. Il reste encore difficile aujourd'hui d'estimer précisément le temps de lasage d'une pièce. Les modèles de la littérature et l'estimateur proposés donnent des écarts importants avec les temps de lasage réels. Une étude plus fine de la géométrie des pièces et de leur temps de lasage pourrait permettre d'affiner le modèle, grâce à des coefficients expérimentaux par exemple.

Il s'agit ensuite de la prise en compte de la supply chain globale. Le modèle proposé prend en compte l'ensemble du processus de la conception de la pièce aux post-traitements. En revanche, il ne permet pas de considérer les gains réalisables grâce à la fabrication additive. Si la comparaison s'arrête au coût de revient de la pièce, la

fabrication additive est souvent plus chère mais lorsque d'autres coûts, hors fabrication sont inclus, ou lorsque d'autres indicateurs que le coût sont pris en compte, la fabrication additive peut devenir plus intéressante :

- La prise en compte de la réduction du délai de livraison, du coût marginal de production, des coûts de personnalisation, des coûts de transport, des coûts d'assemblage et des coûts d'intégration des fonctions ne conduit pas nécessairement à une augmentation significative des coûts après les investissements initiaux dans les systèmes où la fabrication additive est utilisée.
- En combinaison avec un processus make-to-order, le temps total de réalisation peut être réduit et les coûts de reconfiguration et de stocks peuvent être éliminés. Par contre les coûts marginaux de production restent constants après les investissements. Néanmoins, des débits plus élevés, une meilleure qualité, et moins de lots défectueux peuvent justifier de payer plus cher les machines et avoir des technologies plus avancées.

La dernière perspective concerne la prise en compte des avantages de la fabrication additive :

- Dans certains domaines (médical, dentaire, automobile, aéronautique) la personnalisation de masse, l'allègement des pièces et la réduction de la supply chain peut rendre la fabrication additive économiquement plus intéressante que les procédés usuels ;
- Des coûts spécifiques à chaque application peuvent aussi rendre la fabrication additive plus compétitive. Par exemple, en aéronautique, la fabrication additive peut permettre de réduire le coût lié à l'immobilisation de l'avion.

Il faudrait donc poursuivre l'analyse pour prendre en compte les avantages et les apports de la fabrication additive comme la diminution du nombre de pièces, l'ajout de fonctionnalités et la diminution des coûts tout au long de la supply chain. Ces avantages peuvent avoir un effet positif sur le coût global d'un produit, sur les coûts de personnalisation, de stockage, de changement de série ou encore de transport.

3. NIVEAU OPERATIONNEL

A la suite de ce travail, cinq perspectives principales apparaissent.

Tout d'abord, il s'agit d'expérimenter la double entropie croisée qui a été implémentée. En effet, l'algorithme génétique et l'entropie croisée développés permettent de réaliser l'affectation des plateaux aux machines et leur séquençement mais il ne permet pas de réaliser l'affectation des pièces aux plateaux. Afin de réaliser à la fois l'affectation des pièces aux plateaux, l'affectation des plateaux aux machines et leur séquençement, une double entropie croisée a été développée. Il faut maintenant réaliser les expérimentations afin d'effectuer son réglage et de pouvoir analyser les résultats.

La deuxième perspective concerne le réglage des algorithmes. Afin d'effectuer le réglage de l'algorithme génétique et de l'entropie croisée, des plans d'expérience complets n'ont pas pu être réalisés. Des expérimentations supplémentaires pourraient permettre de régler plus finement les algorithmes. De plus, dans le cas de l'algorithme génétique, les différents croisements et les différentes mutations sont considérés équiprobables. La probabilité de croisement et la probabilité de mutation permettent de déterminer si un croisement ou une mutation doit être effectué. Si c'est le cas, un seul des trois croisements puis une seule des quatre mutations peuvent être réalisés. Afin de régler l'algorithme, il faut déterminer l'impact de ces différents opérateurs génétiques sur la performance.

Une évolution possible des algorithmes développés concerne l'évaluation :

- La fonction objectif prend en compte le retard, le coût et le taux d'utilisation. Il peut être envisagé de faire évoluer leur formule ou d'ajouter de nouveaux indicateurs.
- La méthode d'évaluation multicritère utilisée est l'AHP. Il pourrait être intéressant de réaliser une AHP avec différents décideurs et de voir l'impact du raisonnement et des préférences de chacun sur les résultats obtenus. Il est également possible de faire de l'AHP multi-décideur.
- Le modèle de simulation peut être amélioré en prenant en compte :

PARTIE V - Conclusion générale et perspectives

- Le planning des opérateurs afin de trouver une organisation qui permet de réduire les temps d'attente de l'opérateur tout en évitant l'arrêt des machines à cause d'une absence d'opérateur.
- La gestion de la poudre afin de prendre en compte les problématiques liées à l'approvisionnement de la poudre.

Les méthodes d'optimisation choisies sont l'algorithme génétique et l'entropie croisée. Il pourrait être intéressant de tester d'autres métaheuristiques ou de développer une heuristique afin de comparer les performances et de voir si l'une des méthodes permet d'obtenir de meilleurs résultats en moins de temps. Afin de diminuer le temps de calcul, il est peut également être envisagé de paralléliser les calculs.

La dernière perspective concerne plus largement l'ordonnancement en fabrication additive. Plusieurs étapes d'ordonnancement ont été identifiées en fabrication additive :

- Le lancement des plateaux sur les machines de fabrication additive, une fois ceux-ci constitués ;
- Le traitement thermique par lot de plateaux ;
- Les post-traitements par lot de pièces ;
- Les post-traitements par pièce.

Nos travaux de recherche se sont concentrés sur la première étape en permettant d'obtenir une liste ordonnée d'OF affectée à chaque machine. La double entropie croisée doit être réglée afin d'obtenir la répartition des différentes pièces sur les plateaux. La suite de ces travaux consiste à faire évoluer les méthodes afin de prendre en compte l'ensemble du processus de fabrication additive et d'obtenir également :

- Des règles de lotissement de plateaux avant le traitement thermique par plateaux ;
- Des règles de lotissement de pièces avant les post-traitements par pièce ;
- Une répartition des pièces sur les machines de post-traitements par pièce.

4. PERSPECTIVES GENERALES

Dans ces travaux, nous avons développé des outils pour aider les entreprises à prendre des décisions pendant la phase d'industrialisation de la fabrication additive et lorsque la production est installée. Pour que la fabrication additive puisse être industrialisée à grande échelle, il est nécessaire de réduire les coûts et d'augmenter la productivité. Nos travaux se concentrent sur le scénario d'investissement, le choix des pièces à (re)concevoir sur des critères économiques et sur l'ordonnancement.

Afin d'accompagner les entreprises dans l'industrialisation de la fabrication additive, des outils pour d'autres domaines peuvent être développés. En effet, il existe d'autres leviers d'action pour réduire les coûts et augmenter la productivité. La fabrication additive simplifie l'organisation de la supply chain tout en amenant de nouvelles questions. Son intégration amène de nombreuses questions sur la réorganisation de la supply chain ainsi que sur l'organisation interne des entreprises. Les impacts de la fabrication additive sur la supply chain montrent la nécessité de continuer les travaux de recherche sur la supply chain de fabrication additive et sur l'organisation industrielle afin de la rendre plus rentable et de tirer le meilleur parti de ses avantages.

BIBLIOGRAPHIE

- Abedinnia, H., Glock, C. H., and Schneider, M. D. (2017). Machine scheduling in production : A content analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 50, 279–299. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.016>
- Ahn, D., Kim, H., and Lee, S. (2007). Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 47, 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>
- Al-Najjar, B., and Alsyof, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *Int. J. Production Economics*, 84, 85–100. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00380-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00380-8)
- Alberto, I., Azcárate, C., Mallor, F., and Mateo, P. M. (2002). Optimization with simulation and multiobjective analysis in industrial decision-making: A case study. *European Journal of Operational Research*, 140(2), 373–383. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00075-9)
- Alrefaei, M. H., and Diabat, A. H. (2009). A simulated annealing technique for multi-objective simulation optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 215, 3029–3035. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.09.051>
- Ansoff, H. I. (1979). *Strategic Management* (Wiley, New).
- Antomarchi, A.-L., Durieux, S., and Duc, E. (2018). Scheduling in additive manufacturing. In 12th International Conference on Modeling, Optimization and SIMulation. Toulouse, France.
- Antomarchi, A.-L., Durieux, S., and Duc, E. (2019). Impact de la fabrication additive sur la supply chain : Etat des lieux et diagnostics. *Logistique and Management*. (En cours de soumission)
- Antomarchi, A.-L., Guillaume, R., Durieux, S., Thierry, C., and Duc, E. (2019). Capacity planning in additive manufacturing. In 9th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control. Berlin, Allemagne.
- Arya, R., Singh, P., and Bhati, D. (2018). A fuzzy based branch and bound approach for multi-objective linear fractional (MOLF) optimization problems. *Journal of Computational Science*, 24, 54–64.
- ASTM International. (2013). F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Rapid Manufacturing Association. <https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>
- Azadivar, F., and Tompkins, G. (1999). Simulation optimization with qualitative variables and structural model changes: A genetic algorithm approach. *European Journal of Operational Research*, 113(1), 169–182. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00430-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00430-X)
- Back, T., Fogel, D.B., and Michalewicz, Z. (1997). *Handbook of evolutionary computation* (IOP Publis).
- Barahona, F., Bermon, S., and Oktay, G. (2005). Robust Capacity Planning in Semiconductor Manufacturing. In *Naval Research Logistics* (pp. 1–22).
- Barnier, N., and Brisset, P. (2014). *Optimisation par algorithme génétique sous contraintes*.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., and Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015>
- Baumers, M., Wildman, R., and Ashcroft, I. (2012). Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering.

- Beaman, J. J. (2013). 3D printing, additive manufacturing, and solid freeform fabrication: The technologies and applications of the past, present and future. In NSF Workshop on Frontiers of Additive Manufacturing Research and Education. Arlington, VA.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming* (Princeton).
- Ben Ammar, O. (2014). *Planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour les systèmes d'assemblage à plusieurs niveaux*. PhD Thesis, Ecole des Mines de Saint Etienne.
- Bendato, I., Cassettari, L., Mosca, R., Williams, E., and Mosca, M. (2017). A stochastic methodology to evaluate the optimal multi-site investment solution for photovoltaic plants. *Journal of Cleaner Production*, 151, 526–536.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Beyer, H. G., and Sendhoff, B. (2007). Robust optimization - A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(33–34), 3190–3218. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.03.003>
- Bhasin, V., and Bodla, M. (2014). *Impact of 3D Printing on Global Supply Chains by 2020*. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Bitar, A. (2015). *Ordonnancement sur machines parallèles appliqué à la fabrication de semi-conducteurs : ateliers de photolithographie*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Bogers, M., Hadar, R., and Bilberg, A. (2015). Business Models for Additive Manufacturing: Exploring Digital Technologies, Consumer Roles, and Supply Chains. *Technological Forecasting & Social Change*, 1–59.
- Bourell, D. L. D., Beaman, J. J., Leu, M. C., and Rosen, D. W. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. In *US-Turkey Workshop on Rapid Technologies* (pp. 5–11). Retrieved from <http://iweb.tntech.edu/rrpl/rapidtech2009/bourell.pdf>
- Bouyssou, D, Gent, U., and Perny, P. (2005). *Théorie du choix social et aide multicritère à la décision*.
- Bouyssou, Denis. (2003). La “crise de la recherche opérationnelle”, 25 ans après. *Mathématique & Sciences Humaines*, 41(161), 7–27. <https://doi.org/10.4000/msh.2877>
- Bovy, P. H. (1994). Concertation : facteur d'amélioration des projets. *Revue Générale Des Routes et Des Aéroports*, (Hors série n°2), 92–99.
- Brans, J.-P., and Mareschal, B. (2005). Promethee Methods. In *International Series in Operations Research and Management Science* (pp. 163–186).
- Byun, H. S., and Lee, K. H. (2005). Determination of the optimal part orientation in layered manufacturing using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/00207540500031857>
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., and Garret, B. (2012). Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. *Atlantic Council*, 1–16.
- Canellidis, V., Giannatsis, J., and Dedoussis, V. (2009). Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 714–730. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2006-y>
- Chan, H. K., Griffin, J., Lim, J. J., Zeng, F., and Chiu, A. S. F. (2018). The impact of 3D Printing Technology on the supply chain : Manufacturing and legal perspectives. *International Journal of Production Economics*, 205, 156–162.

- Chergui, A., Hadj-hamou, K., and Vignat, F. (2018). Computers & Industrial Engineering Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.048>
- Claver, J.-F., G elinier, J., and Pitt, D. (1997). *Gestion de flux en entreprise* (Herm es-L).
- Clerc, M. (2003). Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particuliers. *J3eA*, 3, 1–16. <https://doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004007>
- Cohen, D., Sargeant, M., and Somers, K. (2014). 3D printing takes shape. *McKinsey Quarterly*, 1–6.
- Coleman, L., and Casselman, R. M. (2016). Optimizing decisions using knowledge risk strategy. *Journal of Knowledge Management*, 20(5), 936–958. <https://doi.org/10.1108/JKM-11-2015-0465>
- Comets, F., and Meyre, T. (2006). *Calcul stochastique et modèles de diffusions* (Dunod).
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2001). *Introduction to Algorithms* (MIT Press).
- Cotteleer, M. J. (2014). 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth.
- Croft, A. (1996). Advances in production technology. *Concrete (London)*, 30, 39–48. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12304-2>
- Cui, Y., Cui, Y., and Tang, T. (2015). Sequential heuristic for the two-dimensional bin-packing problem. *European Journal of Operational Research*, 240, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.032>
- Dantzig, G. . (1951). Application of the Simplex Method to the Transportation Problem. In *Activity Analysis of Production and Allocation* (John Wiley, pp. 339–347).
- De Boer, P., Kroese, D., Mannor, S., and Rubinstein, R. (2005). A Tutorial on the Cross-Entropy Method. *Annals of Operations Research*, 19–67.
- Dean, J. W., and Sharfman, M. (1996). Does decision process matter ? A study of strategic decision-making effectiveness. *Academy of Management Journal*.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI, Conference, Paris, France*, 849–858.
- Deb, K. (1999). Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test functions. In *Evolutionary Computation* (pp. 205–230).
- Deb, K., and Agrawal, R. B. (1994). Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. *Complex Systems*.
- Defraeye, M., and Nieuwenhuyse, I. Van. (2016). A branch-and-bound algorithm for shift scheduling with stochastic nonstationary demand. *Computers & Operations Research*, 65, 149–162.
- Dellino, G., Kleijnen, J. P. C., and Meloni, C. (2010). Robust optimization in simulation: Taguchi and Response Surface Methodology. *International Journal of Production Economics*, 125(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.12.003>
- Dentcheva, D., Pr kopa, A., and Ruszczycki, A. (2002). Bounds for probabilistic integer programming problems. *Discrete Applied Mathematics*, 124(1–3), 55–65. [https://doi.org/10.1016/S0166-218X\(01\)00329-8](https://doi.org/10.1016/S0166-218X(01)00329-8)
- Di Angelo, L., and Di Stefano, P. (2011). A neural network-based build time estimator for layer manufactured objects. *International Journal of Manufacturing Technology*, 215–224. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3284-8>
- Doltsinis, I., and Kang, Z. (2004). Robust design of structures using optimization methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(23–26), 2221–2237. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.12.055>

- Dorigo, M., and Gambardella, L. M. (1997). Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. In *IEEE Transactions on evolutionary computation* (Vol. 1, pp. 53–66).
- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A. (1991). Positive feedback as a search strategy, (June).
- Dorval, C. (1981). Choix des investissements. *Techiques de l'ingénieur, l'entreprise Industrielle, Management*, vol.AG2.
- Dowsland, K. A. (1993). Some experiments with simulated annealing techniques for packing problems. *European Journal of Operational Research*, 68(3), 389–399. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90195-S](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90195-S)
- Dubois, D., and Prade, H. (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy Sets and Systems*, 3(1), 37–48. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(80\)90004-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(80)90004-4)
- Dubois, D., and Prade, H. (2006). La théorie des possibilités. *REE*, (8).
- Dubromelle, Y., Louati, T., Ounnar, F., and Pujo, P. (2009). AHP / ANP a Decision Making Service in PROSIS Model. *IFAC Proceedings Volumes*. <https://doi.org/10.3182/20100701-2-PT-4011.00025>
- Dyckhoff, U., and Finke. (1992). *Cutting and Packing in Production and Distribution : Typology and Bibliography*. Springer-Verlag, New York.
- Elbanna, S., and Naguib, R. (2009). How much does performance matter in strategic decision making? *International Journal of Productivity and Performance Management*, 58(5), 437–459. <https://doi.org/10.1108/17410400910965715>
- Ene, S., Küçükoglu, I., Aksoy, A., and Oztürk, N. (2016). A genetic algorithm for minimizing energy consumption in warehouses. *Energy*, 114, 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.045>
- Engin, O., and Güc, A. (2018). A new hybrid ant colony optimization algorithm for solving the no-wait flow shop scheduling problems. *Applied Soft Computing*, 72, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.002>
- Escobet, T., Puig, V., Quevedo, J., Palá-schönwälder, P., Romera, J., and Adelman, W. (2019). Optimal batch scheduling of a multiproduct dairy process using a combined optimization / constraint programming approach. *Computers and Chemical Engineering*, 124, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.08.040>
- Faroe, O., Pisinger, D., and Zachariasen, M. (2003). Guided Local Search for the Three-Dimensional Bin-Packing Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 15(3), 267–283. <https://doi.org/10.1287/ijoc.15.3.267.16080>
- Fishburn, P. C. (1977). A survey multiattribute/multicriterion evaluation theory. In *Conference on Multiple Criteria Problem Solving - Theory, Methodology and Solving*. Buffalo.
- Fonseca, C. M., and Fleming, P. J. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Icga*, 416–423. <https://doi.org/citeulike-article-id:2361311>
- Francioni, B., Musso, F., and Cioppi, M. (2015). Decision-maker characteristics and international decisions for SMEs. *Management Decision*, 53, 2226–2249. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/MRR-09-2015-0216>
- Fu, M. C., Glover, F. W., and April, J. (2005). Simulation optimization : A review, new developments, and applications. In *Winter Simulation Conference*. Orlando. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574242>
- Fumey, M. (2001). Méthode d'évaluation des risques agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>

- Geng, N., and Jiang, Z. (2009). A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3639–3655.
- Geraedts, J., Doubrovski, E., Verlinden, J., and Stellingwerff, M. (2012). Three views on additive manufacturing: business, research and education. In *Proceedings of TMCE* (pp. 1–15).
- Glibovets, N. N., and Gulayeva, N. M. (2013). A review of niching genetic algorithms for multimodal function optimization. *Cybernetics and Systems Analysis*, 49(6), 815–820. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9570-8>
- Glock, C. H., and Grosse, E. H. (2015). Decision support models for production ramp-up: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 53(21), 6637–6651. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1064185>
- Glover, F. (1990). Tabu Search: A Tutorial. In *Special Issue on the Practice of Mathematical Programming (Interfaces)*, pp. 74–97.
- Gogate, A. S., and Pande, S. S. (2008). Intelligent layout planning for rapid prototyping. *International Journal of Production Research*, 46, 5607–5631. <https://doi.org/10.1080/00207540701277002>
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms and Walsh Functions: Part I, A Gentle Introduction. *Complex Systems*, 3, 129–152.
- Gonçalves, T. C., Valente, J. M. S., and Schaller, J. E. (2016). Metaheuristics for the single machine weighted quadratic tardiness scheduling problem. *Computers and Operation Research*, 70, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.004>
- Gourc, D. (1999). Le management des risques en contexte projet : Quelles problématiques. In *Ecole d'été - Gestion scientifique du risque*. Albi, France.
- Griffiths, V., Scanlan, J. P., Eres, M. H., Martinez-Sykora, A., and Chinchapatnam, P. (2019). Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM). *European Journal of Operational Research*, 334–352.
- Guillaume, R. (2011). Gestion des risques dans les chaînes logistiques : planification sous incertitude par la théorie des possibilités. PhD Thesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II.
- Guitouni, A., and Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3)
- Gurevsky, E. (2011). Conception de lignes de fabrication sous incertitudes: analyse de sensibilité et approche robuste. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00820619/>
- Haj-Rachid, M., Bloch, C., Ramdane-Cherif, W., and Chatonnay, P. (2010). Différents opérateurs évolutionnaires de permutation : sélections, croisements et mutations.
- Hällgren, S., Pejryd, L., and Ekengren, J. (2016). Additive Manufacturing and High Speed Machining - Cost Comparison of short Lead Time Manufacturing Methods. 26th CIRP Design Conference, 50, 384–389. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.049>
- Haouari, M., and M'Hallah, R. (1997). Heuristic algorithms for the two-stage hybrid flowshop problem. *Operation Research Letters*, 21, 43–53.
- Harik, G. (1995). Finding multimodal solutions using restricted tournament selection. *Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms*, 24–31. <https://doi.org/10.1.1.51.9292>

- He, F., Yang, J., and Li, M. (2018). Vehicle scheduling under stochastic trip times : An approximate dynamic programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96, 144–159.
- Henriet, L. (2000). *Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision*. PhD Thesis, Université Paris Dauphine.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (MIT Press). MIT Press.
- Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., and Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21, 687–697. <https://doi.org/10.1108/17410381011063996>
- Hong, S., Zhang, D., Lau, H. C., Zeng, X., and Si, Y. W. (2014). A hybrid heuristic algorithm for the 2D variable-sized bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.049>
- Hood, S. J., Bermon, S., and Barahona, F. (2003). Semiconductor Manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 16(2), 273–280.
- Hopkinson, N., and Dickens, P. (2013). Analysis of Rapid Manufacturing — Using Layer Manufacturing Processes for Production. *Mechanical Engineering Science*, 217, 31–39.
- Horn, J., Nafpliotis, N., and Goldberg, D. E. (1994). A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. In *Conference on Evolutionary Computation* (Vol. 1, pp. 82–87).
- Hwang, C. ., and Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making : methods and applications a state-of-the-art survey* (Springer). New-York.
- Imrani, A. El, and Bouroumi, A. (2000). A fuzzy clustering-based niching approach to multimodal function optimization. *Journal of Cognitive Systems Research* 1, 119–133. [https://doi.org/10.1016/S1389-0417\(99\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1389-0417(99)00013-3)
- Ingole, D. S., Kuthe, A. M., Thakare, S. B., and Talankar, A. S. (2009). Rapid prototyping - A technology transfer approach for development of rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, 15(4), 280–290. <https://doi.org/10.1108/13552540910979794>
- Jakobs, S. (1996). On genetic algorithms for the packing of polygons. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 165–181. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00166-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00166-9)
- Jansen, R. J. G., Curşeu, P. L., Vermeulen, P. A. M., Geurts, J. L. A., and Gibcus, P. (2013). Information processing and strategic decision-making in small and medium-sized enterprises: The role of human and social capital in attaining decision effectiveness. *International Small Business Journal*, 31(2), 192–216. <https://doi.org/10.1177/0266242611406762>
- Janssen, R., Blankers, I., Moolenburgh, E., and Posthumus, B. (2014). *TNO: The Impact of 3-D Printing on Supply Chain Management*. The Hague, Netherlands: TNO, 28, 24. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000137>
- Jia, H. Z., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., and Zhang, Y. F. (2007). Integration of genetic algorithm and Gantt chart for job shop scheduling in distributed manufacturing systems. *Computers and Industrial Engineering*, 53, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.024>
- Jukna, S., and Schnitger, G. (2016). On the optimality of Bellman – Ford – Moore shortest path. *Theoretical Computer Science*, 628, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.03.014>
- Karabuk, S., and Wu, S. D. (2003). Coordinating Strategic Capacity Planning in the Semiconductor Industry. *Operations Research*, 239–849.

- Karakatic, S., and Podgorelec, V. (2015). A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 27, 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.005>
- Kersten, W., Blecker, T., and Ringle, C. (2015). Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains. In *Proceeding of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)-20* (p. 600).
- Khajavi, S. H., Partanen, J., and Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>
- Kianfar, F., and Mokhtari, G. (2009). Lot Sizing and Lead Time Quotations in Assembly Systems. *Industrial Engineering*, 16(2), 100–113.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220, 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Klahn, C., Leutenecker, B., and Meboldt, M. (2014). Design for additive manufacturing - Supporting the substitution of components in series products. In *24th CIRP Design Conference* (Vol. 21, pp. 138–143). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.145>
- Knowles, J., and Corne, D. (1999). The Pareto Archived Evolution Strategy : A New Baseline Algorithm for Pareto Multiobjective Optimisation. *Congress on Evolutionary Computation*.
- Kopf, R., Gottwald, J., Jacob, A., Brandt, M., and Lanza, G. (2018). Cost-oriented planning of equipment for selective laser melting (SLM) in production lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67, 471–474.
- Kopf, R., Schlesinger, L., Peters, S., and Lanza, G. (2016). Adjusting the Factory Planning Process when Using Immature Technologies. *Procedia CIRP*, 41, 1011–1016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.064>
- Kruth, J.-P., Leu, M. C., and Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- Lambert-Faivre, Y. (1991). *Risques et assurances des entreprises (Précis Dai)*.
- Law, A. M., and Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis* (McGraw-Hill).
- Lefèvre, G. (2017). L'aéronautique confirme sa prédominance comme secteur vertical des applications de fabrication additive. Retrieved July 13, 2017, from <http://www.a3dm-magazine.fr/laeronautique-confirme-predominance-secteur-vertical-applications-de-fabrication-additive/>
- Li, Q., Kucukkoc, I., and Zhang, D. Z. (2017). Production planning in additive manufacturing and 3D printing. *Computers and Operations Research*, 83, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.013>
- Li, X., and Zhang, K. (2018). Single batch processing machine scheduling with two-dimensional bin packing constraints. *International Journal of Production Economics*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.11.015>
- Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M., and Koch, R. (2012). Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 23, 177–188. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Liu, B. (2002). *Theory and Practice of Uncertain Programming* (Springer).
- Liu, Y., Fan, Y., and Liu, B. (2013). A Workshop Scheduling and Optimization Method Based on Multi-Process Workflow Simulation. In *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control* (Vol. 46, pp. 1738–1743). Saint Petersburg, Russia: IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00039>
- Lockamy, A., and McCormack, K. (2004). Linking SCOR planning practices to supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 24, 1192–1218. <https://doi.org/10.1108/01443570410569010>

- Low, C., Hsu, C., and Su, C. (2010). A modified particle swarm optimization algorithm for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance. *Expert Systems With Applications*, 37, 6429–6434. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.075>
- Mahadik, A., and Masel, D. (2018). Implementation of Additive Manufacturing Cost Estimation Tool (AMCET) Using Break-down Approach. In *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (Vol. 17, pp. 70–77). Columbus, OH, USA: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.014>
- Manners-Bell, J., and Lyon, K. (2012). The Implications of 3D Printing for the Global Logistics Industry. *Transport Intelligence*, 1–6.
- Marchant, T. (1996). Valued Relations Aggregation with the Borda Method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(June 1995), 127–132.
- Marchant, T. (1998). Cardinality and the borda score. *European Journal of Operational Research*, 108(2), 464–472. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00164-1)
- Marmuse, C., and Montaigne, X. (1989). *Management du risque* (Vuibert).
- Martin, N., St-Onge, B., and Waab, J. . (1998). Geographic tools for efficient decisions in watershed management. *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis : A Geographic Information Sciences Approach*, 309–334.
- Matin, H. N. Z., Salmasi, N., and Shahvari, O. (2017). Makespan minimization in flowshop batch processing problem with different batch compositions on machines. *International Journal of Production Economics*, 193, 832–844. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.015>
- Mayer, R. J., Painter, M. K., and DeWitte, P. S. (1994). IDEF Family of methods for concurrent engineering and business re-engineering applications. (College St).
- Mellor, S. (2014). *An Implementation Framework for Additive Manufacturing*. PhD Thesis, University of Exeter.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., and Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 1087–1092.
- Mhiri, E. (2016). *Planification de la production à capacité finie dans un contexte à forte variabilité, application à l'industrie des semi-conducteurs*. PhD Thesis, Université Grenoble Alpes.
- Michalewicz, Z., Janikow, C. Z., and Krawczyk, J. B. (1992). A modified genetic algorithm for optimal control problems. *Computers & Mathematics with Applications*, 23, 83–94.
- Minguella-Canela, J., Muguza, A., Lumbierres, D. R., Javier Heredia, F., Gimeno, R., Guo, P., ... Webb, S. (2017). Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating additive manufacturing to product supply chains. In *Manufacturing Engineering Society International Conference*. Vigo, Spain.
- Mokasdar, A. (2012). *A Quantitative Study of the Impact of Additive Manufacturing in the Aircraft Spare Parts Supply Chain*. Master of Science, University of Cincinnati.
- Monch, L., Balasubramanian, H., Fowler, J. W., and Pfund, M. E. (2005). Heuristic scheduling of jobs on parallel batch machines with incompatible job families and unequal ready times. *Computers & Operations Research*, 32, 2731–2750. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.04.001>
- Moore, J. M. (1968). An n job, one machine sequencing algorithm for minimizing the number of late jobs. *Management Science*, 102–109.
- Mortureux, Y. (2001). La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. *Techniques de l'Ingénieur*, 33(0), 17.
- Mourgues, N. (1995). *L'évaluation des investissements* (Edition Ec).

- Mourtzis, D., Papakostas, N., Makris, S., Xanthakis, V., and Chryssolouris, G. (2008). Supply chain modeling and control for producing highly customized products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 451–454. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.106>
- Munguia Valenzuela, F. J. (2009). *RMADS : Development of a concurrent Rapid Manufacturing Advice System*. PhD Thesis, University of Catalonia.
- Pachauri, A., and Srivastava, G. (2013). Automated test data generation for branch testing using genetic algorithm : An improved approach using branch ordering , memory and elitism. *The Journal of Systems & Software*, 86(5), 1191–1208. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.11.045>
- Pacheco, J., Angel-Bello, F., and Alvarez, A. (2012). A multi-start tabu search method for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times. *Journal of Scheduling*, 661–673. <https://doi.org/10.1007/s10951-012-0280-2>
- Papadakis, V. M. (1998). Strategic Investment Decision Processes and Organizational Performance : An Empirical Examination. *British Journal of Management*, 9, 115–132.
- Perkgoz, C., Azaron, A., Katagiri, H., Kato, K., and Sakawa, M. (2007). A multi-objective lead time control problem in multi-stage assembly systems using genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 180(1), 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.024>
- Petrick, I. J., and Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing : How Economies of One Create New Rules of Competition. *Research Technology Management*, 12–16. <https://doi.org/10.5437/08956308X5606193>
- Piazza, M. C., and Alexander, S. E. (2015). *Additive Manufacturing: a Summary of the Literature Center for Economic Development*.
- Pillot, S. (2016). Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques. *Techniques de l'ingénieur*, BM7900(0).
- Pujo, P., and Ounnar, F. (2008). Pull System Control For Job Shop Via A Holonic , Isoarchic & Multicriteria Approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 15799–15804. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02671>
- Reeves, C. R. (1995). A genetic algorithm for flowshop sequencing. *Computers and Operations Research*, 22(1), 5–13. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)E0014-K](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)E0014-K)
- Reeves, P., Tuck, C., and Hague, R. (2011). Additive Manufacturing for Mass Customization. In *Mass Customization: Engineering and Managing Global Operations* (pp. 275–289). <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-489-0>
- Rickenbacher, L., Spierings, A., and Wegener, K. (2013). An integrated cost-model for selective laser melting (SLM). *Rapid Prototyping Journal*, 19(3), 208–214. <https://doi.org/10.1108/13552541311312201>
- Rosat, S., Quesnel, F., Elhallaoui, I., and Soumis, F. (2017). Dynamic penalization of fractional directions in the integral simplex using decomposition : Application to aircrew scheduling. *European Journal of Operational Research*, 263, 1007–1018.
- Rosen, D. W. (2007). Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design space. *Eighteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, 402–415.
- Rouen, I. (2015). *Fabrication additive métallique : technologies et opportunités*.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *RAIRO - Operations Research - Recherche Opérationnelle*, 2(V1), 57–75. Retrieved from <http://eudml.org/doc/104443>
- Roy, B. (1991). The outranking foundations approach and the methods. *Theory and Decision*, 31, 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>

- Roy, B. (1993). Decision science or decision aid science? *European Journal of Operational Research*, 66, 184±203.
- Roy, B. (2010). Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 629–638. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.036>
- Rubinstein, R. (1999). The Cross-Entropy Method for Combinatorial and Continuous Optimization. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 1, 127–190. <https://doi.org/10.1007/s11009-008-9101-7>
- Rubinstein, R. Y. (1997). Optimization of computer simulation models with rare events. *European Journal of Operational Research*, 89–112.
- Ruffo, M., and Hague, R. (2007). Cost estimation for rapid manufacturing simultaneous production of mixed components using laser sintering. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (pp. 1585–1591).
- Ruffo, M., Tuck, C., and Hague, R. (2006). Cost estimation for rapid manufacturing - Laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 220(9), 1417–1427. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM517>
- Rusjan, B. (2005). Model for manufacturing strategic decision making. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(8), 740–761. <https://doi.org/10.1108/01443570510608583>
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* (McGraw Hill). New York.
- Saaty, Thomas L. (1987). The analytic hierarchy process - What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161–176.
- Saaty, Thomas L. (1990). How to make a decision : The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9–26.
- Saaty, Thomas L. (2005). *The Analytic Network Process*.
- Salvator, M., and Gondé, P. (1981). *Gestion des assurances de l'entreprise (CLET)*.
- Savage, L. (1972). *The foundations of statistics* (Courier Do).
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères - Panorama de l'aide à la décision multicritère*. (Presses po).
- Schröder, M., Falk, B., and Schmitt, R. (2015). Evaluation of cost structures of additive manufacturing processes using a new business model. In *7th Industrial Product-Service Systems Conference* (Vol. 30, pp. 311–316). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.144>
- Sevaux, M., and Dauzere-Peres, S. (2000). A Genetic Algorithm to Minimize the weighted number of late jobs on a single machine. *European Journal of Operational Research*.
- Shabbir, A. (2002). Semiconductor tool planning via multi-stage stochastic programming. *Proceedings of the International Conference on Modeling and Analysis in Semiconductor Manufacturing*, 153, 157.
- Silva, T. A. O., and Souza, M. C. De. (2019). Surgical scheduling under uncertainty by approximate dynamic programming. *Omega*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.05.002>
- Simon, H. (1950). Administrative behavior. *AJN The American Journal of Nursing*, 50(2), 46–47.
- Simos, J. (1990). *Evaluer l'impact sur l'environnement: Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation* (Presses po).
- Singh, G., and Deb, K. (2006). Comparison of Multi-Modal Optimization Algorithms, 1305–1312.
- Sioud, A. (2011). *Approches hybrides pour la résolution d'un problème d'ordonnement industriel*. PhD Thesis, Université du Québec.

- Smets, P. (1991). Varieties of Ignorance and the Need for Well-founded Theories. *Information Sciences*, 135–144.
- Solimanpur, M., and Jafari, A. (2008). Optimal solution for the two-dimensional facility layout problem using a branch-and-bound algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, 55, 606–619. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.01.018>
- Sölveling, G., and Clarke, J. (2014). Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound methods. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 45, 119–137.
- Sreedevi, R., and Saranga, H. (2017). International Journal of Production Economics Uncertainty and supply chain risk : The moderating role of supply chain flexibility in risk mitigation. *International Journal of Production Economics*, 193(July 2015), 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.07.024>
- Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., YHFuh, J., Soon Hong, G., and Chiu, A. (2015). A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. In *43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME (Vol. 1, pp. 308–319)*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>
- Sureeyatanapas, P., Sriwattananusart, K., Niyamosoth, T., Sessomboon, W., and Arunyanart, S. (2018). Supplier selection towards uncertain and unavailable information : An extension of TOPSIS method. *Operations Research Perspectives*, 5, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2018.01.005>
- Swaminathan, J. M. (2000). Tool capacity planning for semiconductor fabrication facilities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*.
- Syrjakow, M., and Szczerbicka, H. (1994). Optimization of simulation models with REMO. In *European Simulation Multiconference (pp. 1–3)*.
- Tacnet, J.-M. (2009). *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information*. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Trelea, I. C. (2003). The particle swarm optimization algorithm: Convergence analysis and parameter selection. *Information Processing Letters*, 85(6), 317–325. [https://doi.org/10.1016/S0020-0190\(02\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0020-0190(02)00447-7)
- Triantaphyllou, E. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications : Some challenges. *International Journal of Industrial Engineering : Applications and Practice*, 35–44.
- Tripathy, P. K., Dash, R. K., and Tripathy, C. R. (2015). A dynamic programming approach for layout optimization of interconnection networks. *Engineering Science and Technology , an International Journal*, 18, 374–384.
- Van Veldhuizen, D. A., and Lamont, G. B. (1998). Multiobjective evolutionary algorithm research: A history and analysis. Technical Report TR-98-03, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio., 1998, 1–88.
- Vansnick, J. C. (1986). On the problem of weights in multiple criteria decision making (the noncompensatory approach). *European Journal of Operational Research*, 24(2), 288–294. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90051-2)
- Verhulst, J. (2015). *Analyse de l'état et de l'avenir du marché de l'impression 3D*. Master Thesis. Louvain School of Management, Université catholique de Louvain.
- Vincke, P. (1989). *L'aide multicritère à la décision (Éditions d)*. Bruxelles.
- Wang, K. (2007). A resource portfolio model for equipment investment and allocation of semiconductor testing industry. *European Journal of Operational Research*, 179, 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.006>
- Wang, L. (2005). A hybrid genetic algorithm – neural network strategy for simulation optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 170, 1329–1343. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.01.024>

- Wäscher, G., Haußner, H., and Schumann, H. (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, 1109–1130. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>
- Wei, L., Hu, Q., Lim, A., and Liu, Q. (2018). A best-fit branch-and-bound heuristic for the unconstrained two-dimensional non-guillotine cutting problem. *European Journal of Operational Research*, 270, 448–474.
- Weller, C., Kleer, R., and Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>
- White, G., and Lynskey, D. (2013). *Economic Analysis of Additive Manufacturing for Final Products: an Industrial Approach*, 1–11.
- Wikner, J., and Rudberg, M. (2005). Introducing a customer order decoupling zone in logistics decision-making. *International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management*, 221–224. <https://doi.org/10.1080/13675560500282595>
- Wilson, J. O. (2006). *Selection for rapid manufacturing under epistemic uncertainty*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Xie, W., and Sahinidis, N. V. (2008). A branch-and-bound algorithm for the continuous facility layout problem. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 1016–1028. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.05.003>
- Xu, F., Loh, H. T., and Wong, Y. S. (1999). Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. *Rapid Prototyping Journal*.
- Yang, S. S., Yang, F., Wang, K., and Chandra, Y. (2009). Optimising resource portfolio planning for capital-intensive industries under process-technology progress. *International Journal of Production Research*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/00207540701644185>
- Yegul, M. F., Erenay, F. S., and Yavuz, M. (2017). Improving configuration of complex production lines via simulation-based optimization. *Computers & Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.019>
- Yu, E. L., and Suganthan, P. N. (2010). Ensemble of niching algorithms. *Information Sciences*, 180, 2815–2833. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.04.008>
- Yunker, J. M., and Tew, J. D. (1994). Simulation optimization by genetic search. *Mathematics and Computers in Simulation*, 37(1), 17–28. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(94\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0378-4754(94)90055-8)
- Zadeh, L. a. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zellweger, T. (2007). Time horizon, costs of equity capital, and generic investment strategies of firms. *Family Business Review*, 20(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/j.1741-6248.2007.00080.x>
- Zhang, Y., and Bernard, A. (2013). Generic build time estimation model for parts produced by SLS. In *International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Leiria, Portugal. <https://doi.org/10.1201/b15961-10>
- Zhang, Y., Gupta, R. K., and Bernard, A. (2016). Two-dimensional placement optimization for multi-parts production in additive manufacturing. *Robotics and Computer-*, 102–117.
- Zitzler, E., Deb, K., and Thiele, L. (2000). Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms : Empirical Results. In *Evolutionary Computation (Vol. 8, pp. 173–195)*.
- Zlochin, M., Birattari, M., Meuleau, N., and Dorigo, M. (2004). Model-Based Search for Combinatorial Optimization : A Critical Survey. *Annals of Operations Research*, 131, 373–395.

ANNEXES

IDEF 3 : CARTES D'IDENTITE

USED AT:	ANALYST:	DATE:			WORKING	REVIEWER:	DATE:	
	PROJECT:				DRAFT			
	NOTES:		REV:		RECOMMENDED			
					RELEASED			
UOB N° 1	UOB Name	Approvisionner en poudre		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:	La poudre est dans des conteneurs						
	Constraints:							
	Resources:							
	Description:							
UOB N° 2	UOB Name	Approvisionner en plateforme		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:	Une quantité fixe est mise au départ. Un réapprovisionnement peut être nécessaire si un plateau n'est plus conforme.						
	Constraints:							
	Resources:							
	Description:							
UOB N° 3	UOB Name	Contrôler la qualité de la poudre		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:							
	Constraints:	Exigences qualité?						
	Resources:	Contrôleur Machines de test de la granulométrie						
	Description:							
UOB N° 4	UOB Name	Produire		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:							
	Constraints:	Une pièce est produite à partir d'un même conteneur.						
	Resources:							
	Description:	La pièce est entièrement produite sur une seule et même machine.						
UOB N° 5	UOB Name	Contrôler la pièce		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:							
	Constraints:							
	Resources:	Contrôleur Machines de contrôle						
	Description:							
UOB N° 8	UOB Name	Fabriquer		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:	5,3h entre 2 plateaux (objectif : 3,4 / 0,9 / 0,5)						
	Constraints:							
	Resources:	Machine de FA						
	Description:							
UOB N° 9	UOB Name	Nettoyer la machine et les filtres		UOB Label :				
	Objects:							
	Facts:							
	Constraints:							
	Resources:	Circuit d'aspiration						
	Description:							
CONTEXT-SETTING		ITEM DESCRIBED:				FORM TYPE:		
REFERENCE: Scenario 1								

Tableau 90 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 1)

USED AT:	ANALYST:	DATE:	WORKING	REVIEWER:	DATE:
	PROJECT:		DRAFT		
	NOTES:	REV:	RECOMMENDED		
			RELEASED		
UOB N° 10	UOB Name	Détentionner pièce + plateforme	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:	4 à 8h à 400/500°C			
	Constraints:				
	Resources:	Four			
	Description:				
UOB N° 11	UOB Name	Découper	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Machine pour découper Système de manutention			
	Description:				
UOB N° 12	UOB Name	Nettoyer la pièce	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Opérateur Aspirateur			
	Description:				
UOB N° 13	UOB Name	Post-traiter	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Machines			
	Description:	Traitement thermique, usinage (dépend de la nuance de la poudre et des caractéristiques recherchées), sablage, tribofinition...			
UOB N° 14	UOB Name	Mettre la machine sous atmosphère	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:	Les poudres sont réactives			
	Resources:	Machine de FA Circuit d'inertage			
	Description:				
UOB N° 15	UOB Name	Effectuer le lasage	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:	20 à 150h			
	Constraints:				
	Resources:	Machine de FA			
	Description:				
UOB N° 16	UOB Name	Refroidir	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:	La température monte à 800°C (la poudre ne peut pas être aspirée à haute température)			
	Resources:	Machine de FA Circuit de refroidissement			
	Description:				
CONTEXT-SETTING	ITEM DESCRIBED:			FORM TYPE:	
REFERENCE: Scenario 1					

Tableau 91 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 2)

USED AT:	ANALYST:	DATE:	WORKING	REVIEWER:	DATE:
	PROJECT:		DRAFT		
	NOTES:	REV:	RECOMMENDED		
			RELEASED		
UOB N° 17	UOB Name	Récupérer la poudre	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Machine de FA Aspirateur inerté			
	Description:				
UOB N° 18	UOB Name	Nettoyer l'ensemble pièce / plateforme	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:	Un plateau en acier pèse 30kg. Un plateau complet pèse 350kg dont 200kg de poudre.			
	Constraints:	Le transport ne peut pas être manuel. La manutention des pièces dans l'espace de travail implique des contraintes ergonomiques.			
	Resources:				
	Description:				
UOB N° 19	UOB Name	Nettoyer la machine	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:	A chaque changement de poudre ou de pièce ?			
	Constraints:				
	Resources:	Machine de FA			
	Description:				
UOB N° 20	UOB Name	Nettoyer le système de filtration	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Machine de FA Circuit de filtration			
	Description:				
UOB N° 22	UOB Name	Nettoyer la poudre	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:	La poudre est réutilisable entre 5 et 10 fois			
	Resources:	Machines de nettoyage			
	Description:				
UOB N° 24	UOB Name	Tamiser la poudre	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Tamis			
	Description:				
UOB N° 25	UOB Name	Stocker la poudre	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:	La poudre est réactive			
	Resources:	Conteneurs			
	Description:				
UOB N° 29	UOB Name	Mettre en géométrie les plateformes	UOB Label :		
	Objects:				
	Facts:				
	Constraints:				
	Resources:	Machine d'usinage			
	Description:	Surfaçage			
CONTEXT-SETTING		ITEM DESCRIBED:		FORM TYPE:	
REFERENCE: Scenario 1					

Tableau 92 - IDEF 3 : Carte d'identité (Partie 3)