

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE
ÉCOLE DOCTORALE N°620 SCIENCES DU NUMERIQUE ET DE L'INGENIEUR

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : MÉCANIQUE DES SOLIDES, GÉNIE MÉCANIQUE, PRODUCTIQUE, TRANSPORT ET GÉNIE CIVIL

Spécialité : **Matériaux, Mécanique, Structures**

Présentée et soutenue publiquement par

Marjorie JACQUES-HULIN

Le 19 décembre 2019

Développement d'une méthode de conception de moules hybrides en fonderie

Thèse dirigée par **M. Hervé BONNEFOY**

JURY

M. Régis BIGOT,	Professeur des Universités, HDR,	Arts et Métiers Paritech, ENSAM-Metz,	Président
M. Hervé BONNEFOY,	Maître de conférences, HDR,	EiSINe - Campus Sup Ardenne,	Directeur de thèse
M. Pascal MOGNOL,	Professeur des Universités, HDR,	ENS Rennes – Campus de Ker Lann,	Rapporteur
M. Pascal LAFON,	Professeur des Universités, HDR,	UTT Troyes,	Rapporteur
Mme. Anne MERTENS,	Chargée de cours,	Université de Liège,	Examineur
M. Samir ALLAOUI,	Professeur des Universités, HDR,	EiSINe - Campus Sup Ardenne,	Examineur
M. Geoffrey SIMON,	Ingénieur,	La Fonte Ardennaise,	Invité

Remerciements

J'adresse tout particulièrement ma reconnaissance à mon directeur de thèse M. Hervé BONNEFOY, pour m'avoir accordé sa confiance et m'avoir transmis ses connaissances afin de mener à bien cette thèse. Je le remercie pour tout le temps qu'il m'a consacré ainsi que la patience qu'il a su avoir.

Je tiens à remercier les fondeurs, pour m'avoir accordé leur temps afin de me transmettre leurs connaissances et leur expérience indispensable dans ces travaux de recherche.

Je remercie Madame et Messieurs les membres du jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance.

Je remercie M. Régis BIGOT pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de thèse, M. Pascal LAFON, Professeur à L'UTT de Troyes et M. Pascal MOGNOL, Professeur à L'ENS de Rennes pour avoir accepté de rapporter ma thèse.

Je remercie Mme. Anne MERTENS d'avoir fait le déplacement depuis la Belgique pour examiner cette thèse ainsi que M. Geoffrey SIMON pour avoir apporté sa vision de fondeur sur ces travaux de recherche.

Je tiens également à remercier l'Agence Nationale de la Recherche qui a financé le projet MONARCHIES (Projet-ANR-15-CE08-0037) dont ma thèse fait partie. Je remercie également tous les membres du projet.

Je remercie également l'ensemble de mes collègues de L'Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux (ITheMM) et de L'École d'ingénieurs en Sciences Industrielles et Numérique (EiSINe) de Charleville-Mézières pour m'avoir transmis leurs connaissances, m'avoir accordé leur aide, leur soutien et ainsi contribuer au bon déroulement de cette thèse.

Je tiens à remercier plus particulièrement, M. Vincent MARQUET pour son aide précieuse en CAO de moules de fonderie ainsi que M. Stéphane BUET pour son aide à la mise en place de nombreux essais.

A titre plus personnel, je tiens à remercier ma famille qui m'a toujours soutenue dans tous mes projets. Enfin, je remercie mon Mari, qui m'a apporté son soutien inconditionnel tout au long de ma thèse, qui a su me rassurer et m'encourager dans les moments difficiles.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Liste des figures :	6
Liste des tableaux :	9
Liste des équations	10
Table des annexes :	11
Abréviations - Acronymes	12
Glossaire.....	14
Introduction Générale.....	15
1.1 Contexte industriel	15
1.2 Contexte de l'étude.....	16
Chapitre 1 : Etude Bibliographique.....	20
1.1 Les procédés de fabrication additive	20
1.1.1 Définition de la fabrication additive.....	20
1.1.2 Historique du procédé	20
1.1.3 Evolution de l'intérêt pour la fabrication additive	23
1.1.4 Une croissance exponentielle	24
1.1.5 La conception pour la fabrication additive (DFAM)	25
1.1.6 Chaîne numérique de la fabrication additive.....	25
1.2 Procédés de fabrication additive pour la fonderie	26
1.2.1 La fabrication additive « directe » de moule et noyaux	27
1.2.2 Moules multi matériaux	31
1.2.3 Moules architecturés	31
1.2.4 Conformal cooling.....	33
1.3 Procédés conventionnels de fonderie	34
1.3.1 Moulage en sable.....	35
1.3.2 Eléments constitutifs d'un moule en sable	36
1.4 Concept d'outillages hybrides	42
1.4.1 Définition du concept hybride	42
1.4.2 Méthodes de conception d'outillage hybride	43
Chapitre 2 : Propriétés mécaniques et dimensionnelles des moules et noyaux en fabrication additive sable.....	49
2.1 Définition du procédé de fabrication.....	49
2.1.1 Caractéristiques de l'imprimante	49

2.1.2 Principe de fonctionnement.....	49
2.2 Propriétés du sable	52
2.2.1 Granulométrie du sable	52
2.2.2 Masses volumiques	54
2.3 Propriétés mécaniques des moules et des noyaux	57
2.3.1 Résistance en flexion 3 points	57
2.3.2 Résistance en compression.....	58
2.3.3 Influence des paramètres sur les propriétés mécaniques.....	59
2.4 Perte au feu.....	69
2.5 Aptitude au débouillage	72
2.6 Comparaison des propriétés mécaniques avec d'autres procédés	75
2.6.1 Essais sur des éprouvettes imprimées en 3D avec de la résine furanique.....	75
2.6.2 Essais sur des éprouvettes fabriquées par procédé boîte froide traditionnel avec de la résine phénolique.....	78
2.6.3 Synthèse sur les propriétés des différents procédés	80
2.7 Précision dimensionnelle de l'imprimante 3D sable.....	82
2.7.1 Influence de la position spatiale suivant l'axe Z d'impression sur la précision dimensionnelle	83
Chapitre 3 : Méthodologie de conception des moules en impression 3D sable.....	93
3.1 Processus traditionnel d'étude de moulage en sable	93
3.2 Les nouvelles perspectives de conception de pièce en fonderie via l'impression.....	96
3.2.1 Attentes des fondeurs par rapport à l'impression 3D sable.....	96
3.2.2 Autres attentes des industriels : la réalisation d'outillages intégrant le «conformal cooling ».....	97
3.3 Formalisation des règles métiers	98
3.4 Processus d'étude de moulage pour l'impression 3D	105
3.5 Application des règles métiers et du processus de moulage	108
3.5.1 Pièce 1 : Carter renvoi d'angle	108
3.5.2 Pièce 2 : Chapeau	110
3.5.3 Pièce 3 : Mélangeur.....	113
3.5.4 Pièce : Outillage de vulcanisation	115
3.6 Etude de coût de production des moules en impression 3D.....	116
3.6.1 Méthode de calcul du coût de production de moule par impression.....	116
3.6.2 Exemples de calcul de coût de production de moules.....	118
Chapitre 4 : Méthodologie et outils pour la conception de moules hybrides.....	125
4.1 Démarche générale	125

4.2 Outils pour la conception hybride	126
4.2.1 Indices de complexité globale de la pièce	126
4.2.2 Indice de complexité des surfaces internes	132
4.2.3 Indice de complexité des surfaces externes.....	136
4.2.4 Implémentation dans un logiciel CAO : Rhinocéros	141
4.3 Validations de la méthodologie.....	142
4.3.1 Pièce 1 : Carter 2 en Fonte à graphite lamellaire (EN GJL 250)	142
4.3.2 Pièce 2 : Chapeau en alliage d'aluminium Al Si 13.....	143
4.3.3 Pièce 3 : Le mélangeur en laiton	145
4.3.4 Pièce 4 : Carter 3 en Fonte à graphite lamellaire (EN GJL 250)	146
4.4 Limites technico-économiques.....	149
Conclusions générales et perspectives	153
Bibliographie.....	156
Annexes.....	165

Liste des figures :

Figure 1.2-1 : Domaine d'étude	16
Figure 1.1-1: « Hype cycle for 3D printing,2018 » Gatner report analysts: Michael Shanler Pete Basiliere [DNA19]	23
Figure 1.1-2: Les organisations à croissance exponentielle [ISMA14].....	24
Figure 1.1-3 : Chaîne numérique de la fabrication additive.....	26
Figure 1.1-4 : Chaîne de valeur de la fabrication additive	26
Figure 1.2-1 : Digramme FAST de la fabrication additive appliquée à la fonderie.....	27
Figure 1.2-2:Schéma de principe du procédé par projection de liant [FAB19].....	28
Figure 1.2-3:Schéma de principe du procédé par frittage laser [FAB19].....	29
Figure 1.2-4:Structure de moule en coque imprimée [SHA17].....	31
Figure 1.2-5:Moules avec des structures creuses [DEN18].....	32
Figure 1.2-6:Exemple de structure lattice obtenue par fonderie	32
Figure 1.2-7: Exemple de systèmes d'alimentation [SAM19]	33
Figure 1.2-8: Outillage de grande dimension avec du conformal cooling réalisé par le CTIF [MAC17].....	33
Figure 1.3-1:Schéma récapitulatif des procédés de fonderie [FAC99] [COR03] [FON17] [ROC04] [DOU04].....	34
Figure 1.3-2 : Exemple de plaque modèle de la fonderie Vignon (a.) et d'un noyau accompagné de sa demie boîte à noyau pour une pièce de robinetterie de la fonderie de la Hunaudière (b.).....	35
Figure 1.3-3 : Constitution d'un moule en sable	36
Figure 1.3-4: Etapes de modelage d'un moule en châssis [MAR06].....	36
Figure 1.3-5:Eléments constitutifs d'un moule [FAC99].....	37
Figure 1.3-6: Les différents types de masselotte.....	37
Figure 1.3-7: différents types de plan de joint	38
Figure 1.3-8 : Moulage en chape.....	38
Figure 1.3-9: Exemples de filtre (a. mousse céramique ; b. céramique extrudée ; c. céramique pressée. d. fibre tissée)	39
Figure 1.3-10: Exemple de manchon et de refroidisseurs	39
Figure 1.3-11:Exemples de support de noyau non fusible et fusible	39
Figure 1.3-12:Courbes de dilatation des sables [JAS99].....	41
Figure 1.4-1: Exemple de machine hybride de chez DMG Mori la « LASERTEC 65 3D hybrid » [DMG19].....	42
Figure 1.4-2: Principe du procédé hybride de fabrication de moule en sable [IKO16].....	43
Figure 1.4-3: Décomposition en octree [WIK17].....	45
Figure 2.1-1:Cycle de construction des pièces par impression 3D sable	50
Figure 2.1-2: Axes de l'imprimante suivant une vue interne de la machine	50
Figure 2.1-3:Schématisation des axes machine en vue de coupe de l'espace de construction .	51
Figure 2.2-1 vue à la binoculaire de la morphologie des grains de sable	52
Figure 2.2-2:Indice de finesse du sable (AFS).....	54
Figure 2.2-3: Vue 3D de la disposition des éprouvettes.....	55
Figure 2.2-4: Vue 2D du premier et second niveau d'éprouvettes.	56
Figure 2.3-1:Dimensions de l'éprouvette de flexion.....	57
Figure 2.3-2:Résultats des essais de flexion 3 points.....	58
Figure 2.3-3:Résultats des essais de compression.....	59

Figure 2.3-4:Paramètres pouvant influencer les propriétés mécaniques	59
Figure 2.3-5:Influence de la direction de fabrication sur les propriétés mécaniques	61
Figure 2.3-6:Influence de la température d'étuvage sur les propriétés mécaniques	61
Figure 2.3-7:Influence du temps d'étuvage sur les propriétés mécaniques.	62
Figure 2.3-8:Influence du stockage sur les propriétés mécaniques.....	62
Figure 2.3-9:Influence du paramètre d'étuvage	63
Figure 2.3-10:Influence du paramètre d'étuvage après une sortie rapide de la machine	64
Figure 2.3-11:Influence de la largeur du faisceau	65
Figure 2.3-12:Schéma du placement des éprouvettes dans l'espace de construction avec leurs résultats.....	66
Figure 2.3-13:Photographies des stries observées sur les éprouvettes	66
Figure 2.3-14: Photographies des différentes structures	67
Figure 2.3-15:Influence de la structure de l'éprouvette	68
Figure 2.3-16:Influence de l'épaisseur de paroi	68
Figure 2.4-1: Echantillons de sable avant la perte au feu.....	70
Figure 2.5-1:Matériels d'essai d'aptitude au débouillage	73
Figure 2.5-2:Dégradation des échantillons en fonction du temps	73
Figure 2.5-3:Aptitude au débouillage des noyaux en impression 3D comparés aux traditionnels	74
Figure 2.5-4:Aptitude au débouillage des noyaux structurés.....	74
Figure 2.5-5:Influence des paramètres sur l'aptitude au débouillage	75
Figure 2.6-1 : Imprimante Smax de chez EXone	76
Figure 2.6-2:Eprouvettes en sable imprimées avec le procédé résine furanique	76
Figure 2.6-3:Eprouvettes en moulage par procédé boîte froide	79
Figure 2.6-4: Résistance mécanique en traction et flexion des éprouvettes en sable [NYE16a]	80
Figure 2.6-5:Dureté des éprouvettes en sables [NYE16a]	80
Figure 2.6-6: Effet de l'étuvage sur la résistance en flexion 3 pts [MIT18]	81
Figure 2.6-7 : Comparatif des différents procédés	82
Figure 2.7-1:Schématisation des prises de mesure sur l'éprouvette	83
Figure 2.7-2:Résultats des mesures des largeurs d'éprouvettes.....	85
Figure 2.7-3:Résultats des mesures des longueurs d'éprouvettes.....	86
Figure 2.7-4:Résultats des mesures des hauteurs d'éprouvettes	86
Figure 2.7-5:Résultats des mesures de rectitude de la ligne 2.....	87
Figure 2.7-6:Résultats des mesures de rectitude de la ligne 3.....	88
Figure 2.7-7:Résultats des mesures de rectitude de la ligne 4.....	88
Figure 3.1-1:Processus d'étude de moulage traditionnel	95
Figure 3.2-1 : Photographie d'un moule ouvert chez la fonderie Vignon.....	96
Figure 3.2-2:FAST d'outillage en conformal cooling par la fonderie	97
Figure 3.3-1:Exemple de marquage en creux.....	98
Figure 3.3-2:Exemple de nécessité d'accès pour le nettoyage.....	99
Figure 3.3-3:Exemple de moule dans la VX1000	100
Figure 3.3-4:Exemple de plans d'accès pour le moule d'une bride de fixation	101
Figure 3.3-5:Exemple de plots et de détrompeurs.....	102
Figure 3.3-6 : Illustration du risque de porte-à-faux	103
Figure 3.3-7: Illustration du problème d'élancement de noyaux	103
Figure 3.3-8: Photographie d'une partie de moule dont les noyaux sont solidaires	103

Figure 3.3-9:Elements de manutention sur les moules	104
Figure 3.3-10:Exemples d'événements et de tirage d'air	104
Figure 3.3-11: Schématisation de la structure en étoile	105
Figure 3.4-1:Processus d'étude de moulage I3D	107
Figure 3.5-1:Définition numérique du carter	108
Figure 3.5-2:Zones fonctionnelles du carter	109
Figure 3.5-3: Définition numérique du moule pour le carter	109
Figure 3.5-4: Placement du moule dans l'imprimante.....	110
Figure 3.5-5:DFN du chapeau	110
Figure 3.5-6: Surfaces internes extraites du chapeau	111
Figure 3.5-7: DFN du moule destiné à l'impression.....	111
Figure 3.5-8: Représentation du plan de morçèlement.....	112
Figure 3.5-9: Vus des détrompeurs, plot de positionnement et poignées.	112
Figure 3.5-10:DFN du mélangeur (vue de gauche pièce complète et vue de droite pièce coupée)	113
Figure 3.5-11:Grappe du mélangeur	114
Figure 3.5-12:Moule du mélangeur.....	114
Figure 3.5-13: Partie de noyau en impression test à gauche ; à droite DFN comportant les tiges	115
Figure 3.5-14: DFN outillage de vulcanisation (vue de gauche la DFN pièce et de droite vu de la géométrie des canaux)	115
Figure 3.5-15: Grappe de l'outillage et son noyau	116
Figure 3.6-1: DFN de la pièce Chapeau	118
Figure 3.6-2:Remplissage du volume de la machine avec les demis moule	119
Figure 3.6-3: DFN mélangeur	119
Figure 3.6-4:Remplissage de l'imprimante avec les huit moules	120
Figure 3.6-5 : Graphique de l'évolution des coûts	121
Figure 3.6-6: Disposition du moule pour l'impression.....	121
Figure 3.6-7: Calcul paramétrique du coût d'impression de moules	122
Figure 4.1-1: Démarche générale de conception hybride.....	125
Figure 4.2-1: Sélection de la valeur seuil du coefficient de complexité pièce.....	131
Figure 4.2-2: Complexité en fonction du coût de l'outillage [CHO06]	131
Figure 4.2-3: Sélection de la valeur seuil de l'indice de complexité CNint.....	136
Figure 4.2-4 : Exemple des boîtes de calcul utilisées dans Grasshopper pour l'indice CFestimated.....	141
Figure 4.3-1: DFN carter 1	142
Figure 4.3-2: Représentation des noyaux du carter	142
Figure 4.3-3: DFN du moule hybride obtenu	143
Figure 4.3-4: Analyse des surfaces externes	144
Figure 4.3-5:DFN moule chapeau	145
Figure 4.3-6 : DFN du mélangeur	145
Figure 4.3-7: DFN du moule du mélangeur	146
Figure 4.3-8: DFN du carter	146
Figure 4.3-9: DFN de la grappe du carter	147
Figure 4.3-10: DFN du moule pour impression 3D	148
Figure 4.4-1 : Coûts du Chapeau.....	150
Figure 4.4-2:Coûts du carter.....	150

Figure 4.4-3: Photographies des noyaux en traditionnel du carter.....	151
---	-----

Liste des tableaux :

Tableau 1.1-1 : Synthèse des procédés de fabrication [PIP17]	21
Tableau 1.1-2 : Synthèse des procédés de fabrication [PIP17] (suite)	22
Tableau 1.2-1:Tableau récapitulatif des constructeurs en fabrication additive directe [ENV17] [EOS17] [EXO17] [SEN17] [VOX17]	30
Tableau 1.3-1: Caractéristiques des pièces moulées en sable en fonction de l'alliage [FAC99]	35
Tableau 1.3-2:Liants en fonction de leur type de durcissement [DOU04]	40
Tableau 1.3-3: Les différents types de sable [JAS99] ;[CTI19b]	41
Tableau 2.1-1:Caractéristiques de l'imprimante 3D sable utilisée	49
Tableau 2.2-1:Résultats du tamisage.....	53
Tableau 2.2-2:Pesées des échantillons de sable non lié	55
Tableau 2.2-3:Récapitulatifs des masses volumiques obtenues.....	56
Tableau 2.3-1:Facteurs contrôlés	60
Tableau 2.4-1:Masses relevées des échantillons	69
Tableau 2.4-2:Résultats calculés de perte au feu	71
Tableau 2.4-3:Résultats des essais avec un pourcentage en masse de liant réalisé manuellement	72
Tableau 2.6-1:Résultats des éprouvettes suivant X.....	77
Tableau 2.6-2:Résultats des éprouvettes suivant Y	77
Tableau 2.6-3:Comparatif des résultats obtenus	78
Tableau 2.6-4:Résultats de perte au feu avec la résine furanique	78
Tableau 2.6-5:Résultats des essais	79
Tableau 2.7-1:Resultat du test de Student comparant les moyennes	84
Tableau 2.7-2:Résultats des mesures MMT	84
Tableau 2.7-3:Déviations mesurées par rapport à la cote nominale.....	89
Tableau 2.7-4:Précision dimensionnelle de la machine suivant ses axes.....	89
Tableau 2.7-5:Tableau des défauts de rectitude avec l'imprimante.....	90
Tableau 4.2-1: Calculs de complexité pièce.....	129
Tableau 4.2-2: Indices de complexité en fonction de différentes DFN pièce	130
Tableau 4.2-3:Exemple de calculs de NSI	133
Tableau 4.2-4:Exemple de calcul N_{DEB}	134
Tableau 4.2-5 : Calculs de la complexité noyau	135
Tableau 4.2-6:Analyses des contre-dépouilles	139
Tableau 4.2-7:Analyses des contre-dépouilles (suite).....	140
Tableau 4.3-1:Indices de complexité pièce	144
Tableau 4.3-2:Indice de complexité des surfaces internes.....	144
Tableau 4.3-3: Calcul de $CF_{estimated}$ pour le carter	147
Tableau 4.3-4: Calcul de C_{Nint} pour le carter.....	147
Tableau 4.3-5: Analyse des surfaces externes.....	148
Tableau 4.4-1:Résultats la table 1 de Taguchi	167

Liste des équations

Équation 3.6-1 : Calcul du coût du sable C_s	117
Équation 3.6-2: Calcul du coût du liant C_l	117
Équation 3.6-3: Calcul du coût des consommables total	117
Équation 3.6-4: Coût du temps de production.....	118
Équation 3.6-5: Calcul du coût total d'impression	118
Équation 4.2-1: Indice de complexité $C_{Festimated}$ de Durgesh et Bhallamudi [DUR10]	126
Équation 4.2-2: Ratio de volumes pièce.....	126
Équation 4.2-3: Ratio de surfaces	126
Équation 4.2-4: Nombre de noyau	126
Équation 4.2-5: Ratio de volume noyau	127
Équation 4.2-6: Ratio d'épaisseurs	127
Équation 4.2-7: Ratio de profondeur d'empreinte	127
Équation 4.2-8: Ratio de volumes noyau	132
Équation 4.2-9: Ratio de surfaces	132
Équation 4.2-10: Ratio d'épaisseurs.....	132
Équation 4.2-11: Indice de sinuosité	133
Équation 4.2-12: Indice de débouabilité.....	133
Équation 4.2-13 : Calcul de la complexité des noyaux	134
Équation 4.2-14: Indice de contre-dépouilles	137

Table des annexes :

ANNEXE A : Résultats des masses volumiques obtenues en fonction de leur position.....	165
ANNEXE B : Plan d'expériences des éprouvettes en flexion	166
ANNEXE C : Resultats du plan d'expérience	167
ANNEXE D : Tableau des conditions expérimentales	168
ANNEXE E : Plan d'expérience des étuvages	168
ANNEXE F : Plan d'expériences des éprouvettes architecturées.....	168
ANNEXE G : Premier plan d'expérience selon un table L9 de Taguchi	169
ANNEXE H : Second plan d'expérience selon un table L9 de Taguchi	169
ANNEXE I : Résultats des essais de débourrabilité.....	170
ANNEXE J : Résultats des essais de débourrabilité	170
ANNEXE K : Check-list avant lancement d'impression	170
ANNEXE L : Check-list du moule de carter à renvoi d"angle	172
ANNEXE M : Check-list pour l'étude de moulage du chapeau	173
ANNEXE N : Check-list Moule du mélangeur	174
ANNEXE O : Règles de conceptions et défauts dans les pièces de fonderie.....	174

Abréviations - Acronymes

3MF	3D Manufacturing Format, format de fichiers 3D incluant des paramètres de texture, couleur, mailles...
AMF	Additive Manufacturing File, format d'impression open source, proposant un format natif de la couleur, des matériaux, des treillis et optionnellement la gestion de patches triangulaires courbés.
BJ	Binder Jetting, procédé par projection de goutte de liant.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CLAD	Construction Laser Additive Directe, procédé de fabrication par dépôt sous énergie concentrée.
CTIF	Centre Technique Industriel de la Fonderie
DED	Direct Energy Deposition, procédé de fabrication par dépôt sous énergie concentrée.
DFN	Définition de Formes Numérisées
DFAM	Design For Additive Manufacturing
DLP	Digital Light Processing, procédé d'impression par photopolymérisation.
DLMD	Direct Laser Melting Deposition, procédé de fabrication par dépôt sous énergie concentrée
EBM	Electron Beam Melting, fusion du métal sur lit de poudre par faisceau d'électrons.
EPI	Equipement de Protection Individuel
FAST	Functionality Analysis System Technique
FDM	Fused Deposition Melting, procédé par dépôt de fil fondu.
HIP	High Isostatic Pressure, compression isostatique à chaud afin d'améliorer les propriétés d'un matériau.

IGES	Initial Graphic Exchange Specification, format d'exportation de données graphiques.
LOM	Laminated Object Manufacturing, fabrication additive d'objet par le découpage et le collage de feuilles.
SLA	StereoLithography Apparatus, procédé d'impression par photopolymérisation.
SLM	Selective Laser Melting, procédé d'impression par fusion laser du métal.
SLS	Selective Laser Sintering, procédé par frittage laser
STEP	Standard for the Exchange of Product Data (Format standard pour l'échange de fichier de CAO)
STEP-NC	Standard for the Exchange of Product Data Numerical Control, ce format étend la norme STEP pour y inclure la standardisation des phases de production par commande numérique.
STL	Standard Tessellation Language (Format standard de tessellation de surface)
TMS	Trouble Musculosquelettique
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing, fusion d'un fil métallique par arc électrique.

Chape *	Partie de châssis sans barre utilisée : soit pour exécuter une partie de moule entre deux joints dans le cas de moules à joints multiples ; soit lorsqu'elle est fixée sur une partie de châssis ou une autre chape, pour en augmenter la hauteur.
Châssis *	Cadre en bois, en fonte, en acier ou en aluminium, de forme ronde, carrée, rectangulaire ou polygonale qui retient la masse de sable dans laquelle se pratiquent le moulage et la coulée des pièces.
Contre-dépouille *	Inclinaison d'une paroi, par rapport à l'axe de démoulage ou de remmoulage dans un sens tel qu'elle s'oppose à cette opération.
Débourrabilité *	Aptitude à enlever le sable constitué par le noyau après coulée et refroidissement de la pièce.
Décochage*	Séparation de la pièce coulée de son moule.
Dépouilles *	Pente que l'on donne à certaines parois verticales d'un modèle pour faciliter sa sortie du moule.
Grappe *	Ensemble des pièces attenantes au même jet de coulée. Celle-ci est constituée de la pièce de son système d'alimentation et de solidification
Masselotte *	Réserve de métal liquide devenant après refroidissement une masse excédentaire de métal.
Remmoulage *	Opération d'assemblage des différentes parties constituant le moule.
Surface de joint *	Surface de séparation commune de deux parties constitutives d'un moule.

** Définitions issues du grand dictionnaire terminologique (<http://www.granddictionnaire.com>)*

Introduction Générale

1.1 Contexte industriel

Cette thèse s'inscrit dans un projet plus global, le projet **MONARCHIES** (**M**oules et **N**oyaux **ARCH**itecturés par **Impr**ession 3D **S**able). Ce projet est financé par l'Agence National de la Recherche, pour répondre au grand défi sociétal de stimuler le renouveau industriel. Ce projet est en partenariat avec plusieurs fonderies, dont la fonte Ardennaise, la fonderie Vignon, la fonderie Rocroyenne d'Aluminium et la fonderie Brousseval et Montreuil. Les travaux de recherche ont été confiés aux trois laboratoires suivants le Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et innovAtion (LAMPA) pour son expertise en fonderie, l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) pour ses compétences sur la DFAM et l'Institut de Thermique, Mécanique, Matériaux (ITheMM) pour son savoir-faire sur la chaîne de valeur de la fabrication additive notamment en fonderie.

Ce projet a pour but de faire monter en gamme les petites et moyennes entreprises de fonderie en leur proposant une méthodologie pour la conception et la réalisation de moules imprimés en 3D sable et de moules hybrides. La maîtrise de cette nouvelle technologie permettrait aux fondeurs de renforcer leur compétitivité face aux pays « low cost ». Dans le cadre de ce projet, un état des besoins des fondeurs a été réalisé afin de bien répondre à leurs attentes et aux exigences de production de moules par impression 3D sable.

L'impression 3D sable de moule ouvre de nouveaux marchés aux métiers de la fonderie. En effet, de nouveaux types de pièces jusqu'alors irréalisables en procédé conventionnel sont accessibles tel que la fabrication d'outillage contenant du conformal cooling ou la fabrication de pièces optimisées topologiquement. L'obtention de pièces par fonderie offre un large panel d'alliages métalliques dont la mise en œuvre est maîtrisée assurant ainsi une santé matière optimale des pièces coulées. L'impression 3D permet d'obtenir le moule de la pièce en sable, sans outillage, tout en maîtrisant la santé matière de la pièce coulée par le procédé conventionnel de fonderie. Contrairement à d'autres procédés de fabrication additive telle que la fusion sélective sur lit de poudre métallique où la structure métallographique et les propriétés mécaniques sont différentes des procédés classiques.

D'autre part, l'impression 3D sable offre la possibilité d'une réactivité importante pour répondre aux marchés de la pièce de rechange et de la réalisation d'échantillons initiaux avant

la production en série. En cela, l'impression 3D sable constitue un réel atout pour accroître la compétitivité des fonderies.

1.2 Contexte de l'étude

Le coût de production des imprimantes 3D sable reste très élevé par rapport aux moyens conventionnels. Cette technologie est en voie de développement mais le coût d'achat, d'implantation et des consommables restent très élevés. De ce fait, l'impression 3D sable doit être utilisée de manière stratégique afin d'optimiser les coûts de production et de respecter les délais. La fabrication additive aujourd'hui de moule en fonderie est donc limitée à des moules avec un niveau de complexité élevé, à des pièces unitaires ou à la production de très petite série. Dans ce cadre, la fabrication de moules hybrides permet d'élargir le champ d'utilisation de l'impression 3D sable pour des moyennes séries et de pouvoir fabriquer des pièces plus complexes. La combinaison des procédés traditionnels et d'impression 3D permet d'optimiser le coût de production en fonction du niveau de complexité des pièces et du nombre à produire. La figure ci-dessous (*Figure 1.2-1*) présente le domaine d'application des différents procédés de fabrication des moules.

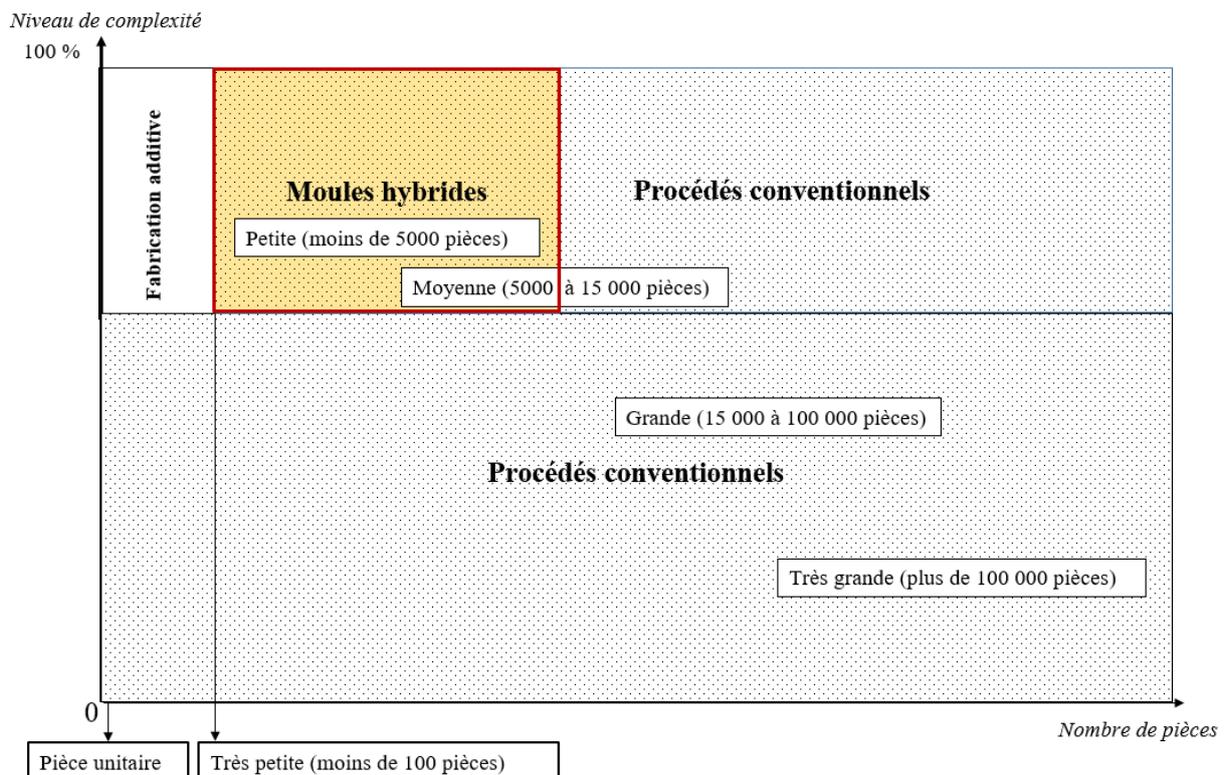


Figure 1.2-1 : Domaine d'étude

Les travaux de recherche vont définir une méthodologie de conception des moules hybrides en sable, basée sur des indices de complexité et des limites technico-économiques des différents

procédés de fabrication. Cette thèse comprend une étude bibliographique des procédés de fabrication additive, des procédés conventionnels de fonderie et de l'hybridation des procédés afin de bien situer les travaux de thèse. La seconde partie de la thèse porte sur la caractérisation mécanique et dimensionnelle des différents procédés de moulage en sable notamment l'impression 3D afin de définir leurs limites et leurs capacités. A partir de ces caractéristiques et des règles métiers inhérentes à l'impression 3D sable, le troisième chapitre élabore une méthode de conception de moule traditionnel ainsi qu'une méthode de conception de moules dédiée à l'impression 3D sable. A partir des résultats des travaux de recherche, le chapitre 4 présente une méthode de conception de moules hybrides basée sur les indices de complexité des surfaces de la pièce et sur les limites technico-économiques des procédés conventionnels de moulage en sable et de l'impression 3D.

La première partie est une étude bibliographique sur la fabrication additive pour des usages en fonderie et sur les moyens conventionnels de fonderie. L'hybridation des technologies permet de proposer des solutions innovantes notamment au niveau de la fonderie. Quelques méthodes d'aide à la conception d'outillages hybrides ont été recensées pour des outillages d'emboutissage et d'injection combinant les procédés d'usinage et de fabrication additive. L'étude bibliographique montre l'absence de méthode d'aide à la conception de moules hybrides de fonderie et montre l'intérêt d'effectuer des travaux de recherche sur la conception des moules hybrides de fonderie. Ces moules hybrides combineront l'impression 3D sable et les procédés conventionnels de fonderie en moulage sable.

La deuxième partie présente la technologie d'impression 3D sable permettant de réaliser des moules. Pour utiliser efficacement cette technologie, il convient de caractériser les moules aux niveaux mécaniques et dimensionnelles. De nombreux plans d'expériences ont été déployés faisant varier les paramètres de fabrication, de stockage et d'étuvage. La caractérisation mécanique s'est faite à partir d'essais de flexion trois points et de compression sur des éprouvettes fabriquées par l'imprimante 3D avec un liant phénolique. Une comparaison des propriétés mécaniques a été menée sur d'autres procédés conventionnels de fonderie et sur d'autres imprimantes avec du liant furanique. L'étude de capacité de l'imprimante VX1000 a permis de déterminer la capacité intrinsèque de cette machine au niveau dimensionnelle et des défauts de formes.

La troisième partie présente le processus d'étude de moulage en fonderie traditionnelle établi à partir du recueil du savoir-faire des fondeurs. Dans cette partie, les règles métiers inhérentes à l'impression 3D sable ont été établies à partir des travaux de l'ITHEMM et d'études de cas. Ces

règles métiers ont permis d'établir une méthodologie d'étude de moulage pour les moules réalisés entièrement par impression 3D sable. Cette méthode a été testée et validée sur de nombreux cas industriels. L'étude a été complétée par le calcul du coût de fabrication des moules par une méthode analytique et paramétrique où le calpinage a une incidence forte sur ces coûts. Ce chapitre a donc permis d'établir les limites technico-économiques de l'impression 3D sable.

Enfin, la quatrième partie de ces travaux est dédiée à la mise en place d'une méthodologie de conception de moules hybrides de fonderie. Cette méthodologie s'appuie sur des indices de complexité, sur la caractérisation des moules imprimés et sur la méthodologie de conception des moules imprimés. Un premier indice de complexité globale est calculé sur la pièce suivi de deux indices locaux relatifs aux surfaces internes et externes de la grappe. Le choix optimal des procédés de fabrication obtenu par cette méthode est défini à partir de valeurs seuil de ces indices de complexité. Cette méthode a été testée sur de nombreux cas industriels. Les tests réalisés avec la méthode montrent quelques axes de progrès à mettre en place afin de rendre cette méthode robuste. Une étude complémentaire des coûts permet d'évaluer le nombre de pièces à produire en fonction du procédé.

Chapitre 1

Etude bibliographique

Ce premier chapitre a pour objectif de réaliser une étude bibliographique sur les procédés de fabrication additive dédiés à la fonderie, sur les procédés traditionnels de fonderie et sur les méthodes et moyens d'hybridation. Après un rappel du principe de la fabrication additive et de la chaîne numérique dédiée à cette technologie, les différentes applications de la fabrication additive pour la fonderie ont été décrites. Une étude des différentes imprimantes 3D dédiées à la fonderie a été présentée avec leur différentes caractéristiques et leurs différents liants. Ensuite, l'étude s'est focalisée plus particulièrement sur le moulage conventionnel en sable au niveau des moules, des sables et des liants. Ce chapitre se termine par une présentation de l'hybridation des procédés de fabrication et de quelques méthodes de conception d'outillages hybrides.

1.1 Les procédés de fabrication additive

1.1.1 Définition de la fabrication additive

La fabrication additive est un procédé de fabrication par ajout de matière. La norme EN ISO/ASTM 52900 :2017 [AFN17] définit la fabrication additive comme « *procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces, à partir de données de modèle en 3D, en général, couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication de mise en forme* ». La fabrication additive à son origine, était utilisée pour le prototypage rapide. Ces prototypes permettaient de valider des designs, des fonctions et des procédés de fabrication dans la phase de développement d'un nouveau produit. Actuellement, la fabrication additive est utilisée pour la fabrication de pièces de production ou de maintenance et pour la fabrication rapide d'outillages. La technologie d'impression 3D n'est pas une fin en soi mais un procédé qui doit être intégré au sein de l'écosystème productif. Aujourd'hui, la fabrication additive est considérée de plus en plus comme un procédé à part entière, un grand nombre de grands groupes tels que Ariane espace l'intègre en tant que tel dans leur base de données, à considération égale par rapport à d'autres procédés de fabrication comme les procédés de forge et de fonderie.

1.1.2 Historique du procédé

La fabrication additive est née dans les années 80, des suites de nombreux travaux de recherche dans le monde entier. La fabrication, couche par couche, révèle un réel intérêt pour la fabrication de pièces complexes et la réalisation de pièces avec la bonne matière et le bon procédé. Le principe de la fabrication des pièces, couche par couche, s'affranchit de la complexité de fabrication des pièces 3D telles que des surfaces en contre dépouille ou des formes internes inaccessibles. Ces pièces complexes, réalisées par usinage, requièrent de nombreux posages de pièces, des outils spéciaux, des machines-outils cinq axes et sont sujettes à de nombreuses dispersions.

Les premiers dépôts de brevets se font en parallèle en France et aux Etats Unis, sur le procédé de stéréolithographie par les français Alain Le Méhauté, Olivier de Witte et Jean-Claude André et Chuck Hull aux Etats Unis, le procédé se nomme stéréolithographie, le terme d'impression 3D n'est pas encore utilisé [AND84] [HUL84]. Ce procédé permet la fabrication d'objet 3D par la polymérisation d'une résine, couche par couche, via une source d'énergie laser. Le

premier fabricant de machines sur le marché est 3D Systems et développe le format STL (Standard Tessellation Language), format standard d'échange de fichier entre la CAO et la machine de fabrication additive. A noter que ce standard est encore largement utilisé actuellement malgré l'arrivée de nouveaux formats tels que AMF, STEP-NC, 3MF..... Ces formats intègrent des couleurs, des matériaux, des textures et toute autre information de conception imprimable qui n'est pas disponible dans le format STL. De nombreuses autres avancées technologiques et de nombreux autres procédés feront leur apparition et sont listés dans les tableaux ci-dessous (*Tableau 1.1-1 ; Tableau 1.1-2*) et dont la classification fait l'objet d'une norme, la norme ISO 17296-2 [AFN15].

<i>Famille de procédé</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Photopolymérisation de résine SLA/DLP	Photopolymères (possibilités d'inclure des charges métalliques ou céramiques) Cire	Vitesse de fabrication État de surface	Nécessité d'utiliser des supports compliqués à retirer
Projection de gouttes de matière	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Photopolymères Cire	Vitesse de fabrication (Compromis avec la qualité de la pièce) Supports non nécessaires Nombreux matériaux (Polymères) disponibles	Prix élevé des machines
Projection de liant/ binder jetting (BJ)	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Métaux Minéraux (Sable, pierre...)	Nombreux matériaux disponibles Supports non nécessaires Vitesse de fabrication	Prix élevé des machines Précision et rugosité inférieures aux autres technologies
Frittage laser sélectif (Selective Laser Sintering-SLS)	Polymère (surtout PA et dérivés) Métaux (plutôt en SLM) Céramique	Supports non nécessaires (Polymère) Matériaux identiques (ou proches) des matériaux utilisés classiquement	Porosité des pièces Traitement thermique nécessaire Rugosité importante

Tableau 1.1-1 : Synthèse des procédés de fabrication [PIP17]

<i>Famille de procédé</i>	<i>Matériaux</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Fusion laser Sélective (Selective Laser Melting SLM)	Métaux uniquement	Matériaux identiques (ou proches) des matériaux utilisés classiquement	Nécessité d'utiliser des supports compliqués à retirer Prix élevé des machines (Le plus élevé)
Fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting-EBM)	Métaux uniquement (Surtout titane et chrome cobalt)	Fusion sous vide (peu ou pas d'oxydation) Supports mécaniques non nécessaires	Rugosité importante des pièces Porosité résiduelle (Mais possibilité HIP)
Projection de poudres dans un flux d'énergie (DLMD/CLAD)	Métaux uniquement	Possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions Possibilité de combiner les matériaux Vitesses de construction élevées	Prix élevé des machines Formes avec peu (ou pas) de détails
Dépôt de fil fondu (Fused Deposition Modelling)	Polymères	Procédé bon marché Nombreux polymères disponibles	Faibles propriétés mécaniques des pièces Vitesse de fabrication peu élevée Rugosité importante des pièces
Assemblage de couches Stratoconception / LOM	Tous matériaux en Plaques	Possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions Possibilité de combiner les matériaux	Nécessité d'assembler les couches Pertes dues à la découpe (ou usinage) des différentes strates

Tableau 1.1-2 : Synthèse des procédés de fabrication [PIPI17] (suite)

Ces nombreuses avancées technologiques permettent aujourd'hui de réaliser des pièces de production par fabrication additive et non plus seulement des prototypes.

1.1.3 Evolution de l'intérêt pour la fabrication additive

La courbe du hype Cycle de Gartner 2018 (Figure 1.1-1) met en lumière les technologies émergentes de l'impression 3D. Cette courbe évalue l'état de maturité des différentes innovations technologiques qui franchit cinq phases : la percée technologique, le pic de hype, une phase de désillusion, appelée vallée de la mort, un développement éclairé et enfin l'ère de la maturité. Toutes les technologies ne parcourent pas la courbe à la même vitesse et un jeu d'icônes permet à Gartner d'indiquer si la technologie s'imposera à 2 ans, 5 ans, 10 ans ou plus.

Selon cette courbe, la fabrication additive sable au même titre que la fabrication additive des pièces métalliques par procédé indirect (Metal Injection Molding) fait partie des techniques de fabrication du type « binder jetting » et se situent sur la pente du développement éclairé. Compte tenu de l'engagement financiers des grands groupes internationaux de l'impression sur cette technologie 3D tels que EPSON, HP, STRATASYS, ..., ce nouveau procédé va connaître un développement exponentiel et conquérir de nouvelles parts de marchés en fabrication additive. La production de moules et de noyaux, par cette technologie, destinée à la fonderie, est donc un nouveau moyen de production, à part entière, pour les fonderies de demain.

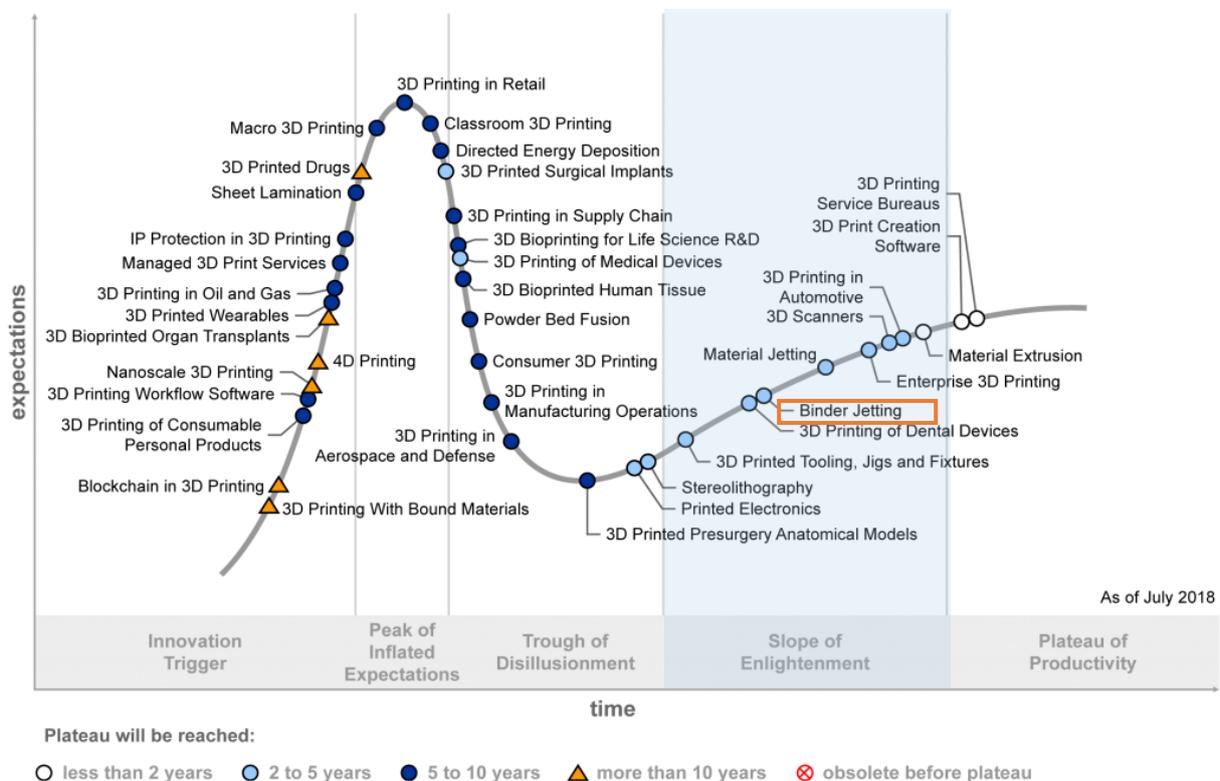


Figure 1.1-1: « Hype cycle for 3D printing, 2018 » Gartner report analysts: Michael Shanler Pete Basiliere [DNA19]

1.1.4 Une croissance exponentielle

L'évolution de la fabrication additive comme les autres technologies numériques (big data, IoT, IA, cobotique...) obéissent aux lois d'évolution exponentielle [ISMA14]. La figure ci-après (Figure 1.1-2) montre qu'au départ, ces technologies ont une croissance décevante souvent imperceptible malgré leur doublement tous les ans, mais une fois le pied de la courbe atteint, cette croissance devient exponentielle et ne cesse de croître. Il est donc important de suivre et de tester cette technologie d'impression 3D au risque d'être dépassé. Des entreprises comme Kodak ou Nikon n'ont pas su prendre ce virage à temps et ont subi des pertes financières énormes compromettant leur avenir. Les fonderies devront impérativement intégrer dans leur stratégie, la maîtrise de la chaîne numérique et de l'impression 3D sable afin d'assurer leur pérennité et leur développement [BON16].

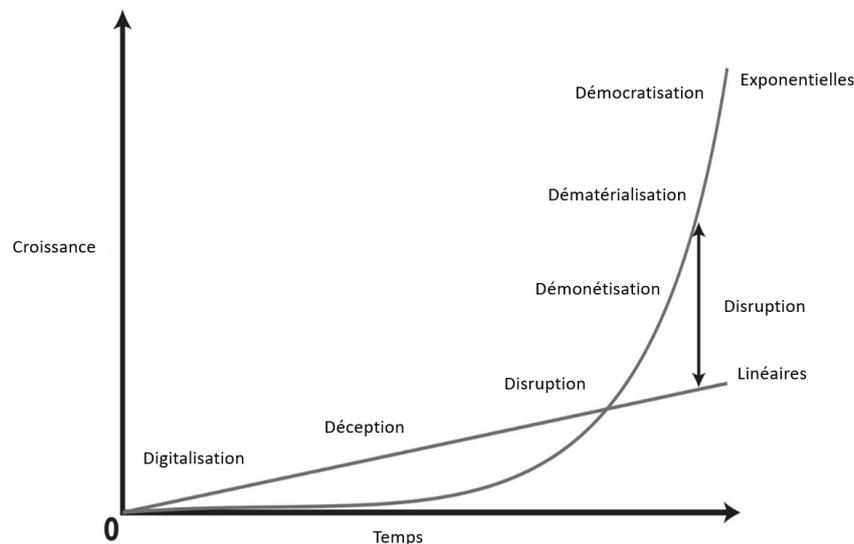


Figure 1.1-2: Les organisations à croissance exponentielle [ISMA14]

La productivité des machines de fabrication additive reste pour le moment très limitée, due aux faibles cadences de production des machines actuelles, au coût d'achat important de ces machines et au coût élevé des consommables. Ces machines exigent également des locaux aménagés et le port d'EPI. Aujourd'hui, les pièces considérées comme rentables sont des pièces complexes produites en petite série et à haute valeur ajoutée. Dans le cadre de cette thèse, une nouvelle approche de la fabrication additive est proposée, utilisant celle-ci en complément des autres procédés conventionnels de fonderie dans le cas de la réalisation de moules hybrides. Dans ce contexte, la fabrication hybride a tout son sens pour optimiser au maximum la production et obtenir un coût minimum par pièce produite, en sélectionnant le procédé adapté aux types de pièces à produire. Le concept d'hybridation des procédés est de plus en plus utilisé notamment en fabrication additive afin de développer les innovations de rupture.

1.1.5 La conception pour la fabrication additive (DFAM)

La fabrication additive réalise les pièces, couche par couche, s'affranchissant ainsi de la complexité des pièces 3D. Les concepteurs doivent penser autrement, avec la possibilité d'intégrer de nouvelles fonctions sur la pièce et de combiner efficacement plusieurs pièces en une seule, tout en garantissant la faisabilité de cette nouvelle pièce. Le concept de la DFAM est de concevoir les pièces en exploitant au maximum les capacités de la technologie de fabrication additive. Cette méthode de conception pour la fabrication additive permet de s'affranchir des règles de conceptions traditionnelles et de concevoir les pièces d'une nouvelle manière [ASA18]. A partir des surfaces fonctionnelles et des contraintes mécaniques, physiques, ... la nouvelle méthode assiste l'ingénieur dans sa démarche innovante de conception tout en intégrant les règles métiers inhérentes au procédé de fabrication additive retenu. Toutes les opportunités offertes par la fabrication additive sont prises en compte telle que la possibilité de concevoir des pièces avec un haut niveau de complexité sans augmenter globalement les coûts de production. Cette méthode permet une plus grande liberté de conception augmentant ainsi les fonctionnalités des pièces par des gradients fonctionnels de matériaux, la réalisation de formes organiques et de structure lattice issue de l'optimisation topologique [PON14]. L'intégration de ce concept est donc fondamentale pour la définition de méthode de conception en fabrication additive.

1.1.6 Chaîne numérique de la fabrication additive

La Chaîne numérique de la fabrication additive débute toujours par la réalisation d'un modèle numérique [BON10]. Il peut être soit réalisé à l'aide de logiciel de conception assistée par ordinateur, soit par rétroconception à l'aide de scanner 3D, générant un nuage de points et des courbes utilisés pour concevoir la DFN. Une fois le modèle défini, celui-ci est sauvegardé dans un format d'échange standard, souvent le STL. Ce fichier est ensuite prétraité, pour orienter l'objet dans le volume de construction de la machine, le découper en strate et générer les supports pour soutenir les surfaces en porte à faux ou ayant un angle très faible par rapport au plateau de construction. D'autres opérations peuvent être réalisées pour corriger les erreurs du fichier et tenir compte du retrait de la pièce. Enfin, le logiciel configure les paramètres de fabrication en fonction de la machine et du matériau utilisé. Après cette étape, le fichier est transféré à l'imprimante 3D et la fabrication peut alors débuter. A la fin de la production, la pièce subit des opérations de post traitement telles que le retrait des supports, les traitements thermiques ou chimiques, le dépoufrage, l'usinage etc... La figure ci-dessous (*Figure 1.1-3*) résume les différentes étapes constituant la chaîne numérique de la fabrication additive.

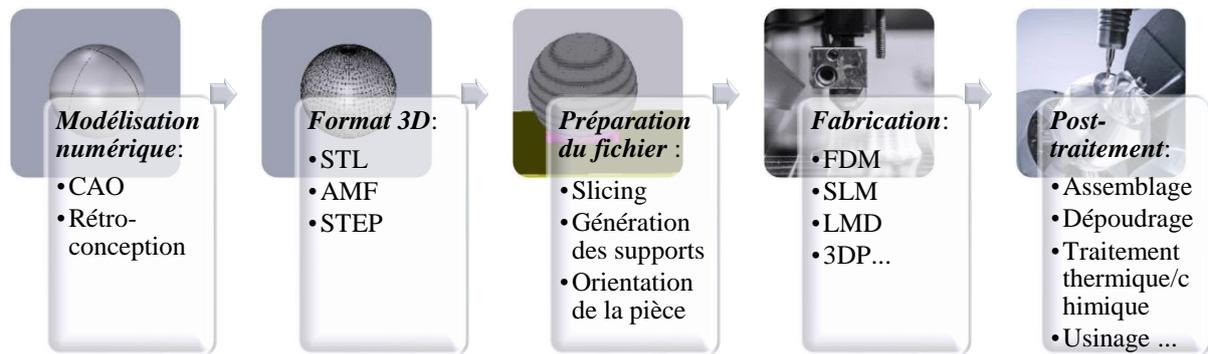


Figure 1.1-3 : Chaîne numérique de la fabrication additive

La mise en œuvre d'un processus de production par fabrication additive métallique ne s'arrête pas à l'installation et l'utilisation d'une imprimante. L'ensemble des maillons de la chaîne de valeur doit être pris en compte lors de la réalisation d'un produit en fabrication additive. La chaîne de valeur en fabrication additive implique d'intégrer simultanément de nombreuses compétences notamment en matériau, en conception et en fabrication. En général, les entreprises ne possèdent pas toutes ces expertises et doivent se faire accompagner face à cette technologie disruptive (Figure 1.1-4) [HUL19].



Figure 1.1-4 : Chaîne de valeur de la fabrication additive

1.2 Procédés de fabrication additive pour la fonderie

La fabrication additive est de plus en plus utilisée dans le domaine de la fonderie. Dans un premier temps, elle s'est imposée dans le secteur du modelage pour sa rapidité à produire des modèles, plaques modèles et boîtes à noyau. Les premiers équipements à être utilisés ont été la stratoconception développée par le CIRTES, qui permet la réalisation de plaques modèles dans divers matériaux tels que le bois, les polymères, l'aluminium..., par l'assemblage de plaques usinées dans ces matériaux.

La fabrication additive en fonderie peut être utilisée de deux manières, la première est la fabrication additive « directe », les moules et les noyaux sont imprimés en sable. La seconde, la fabrication additive « indirecte », permet de créer des modèles et des outillages qui vont servir à la réalisation de moules et de noyaux. Selon la norme ISO 17296-2 [AFN15], le procédé

d'impression 3D sable est répertorié comme « indirect » car il fournit le moule et non la pièce qui sera obtenue après la coulée du métal dans le moule.

L'utilisation de la fabrication additive en fonderie permet de réaliser des modèles permanents ou perdus, des outillages tels que les boîtes à noyaux, les plaques modèles [DIN07], des moules imprimés en sable ainsi que des moules métalliques appelés coquilles. Ces différents procédés utilisables en fonderie sont résumés dans le diagramme FAST ci-dessous (Figure 1.2-1).

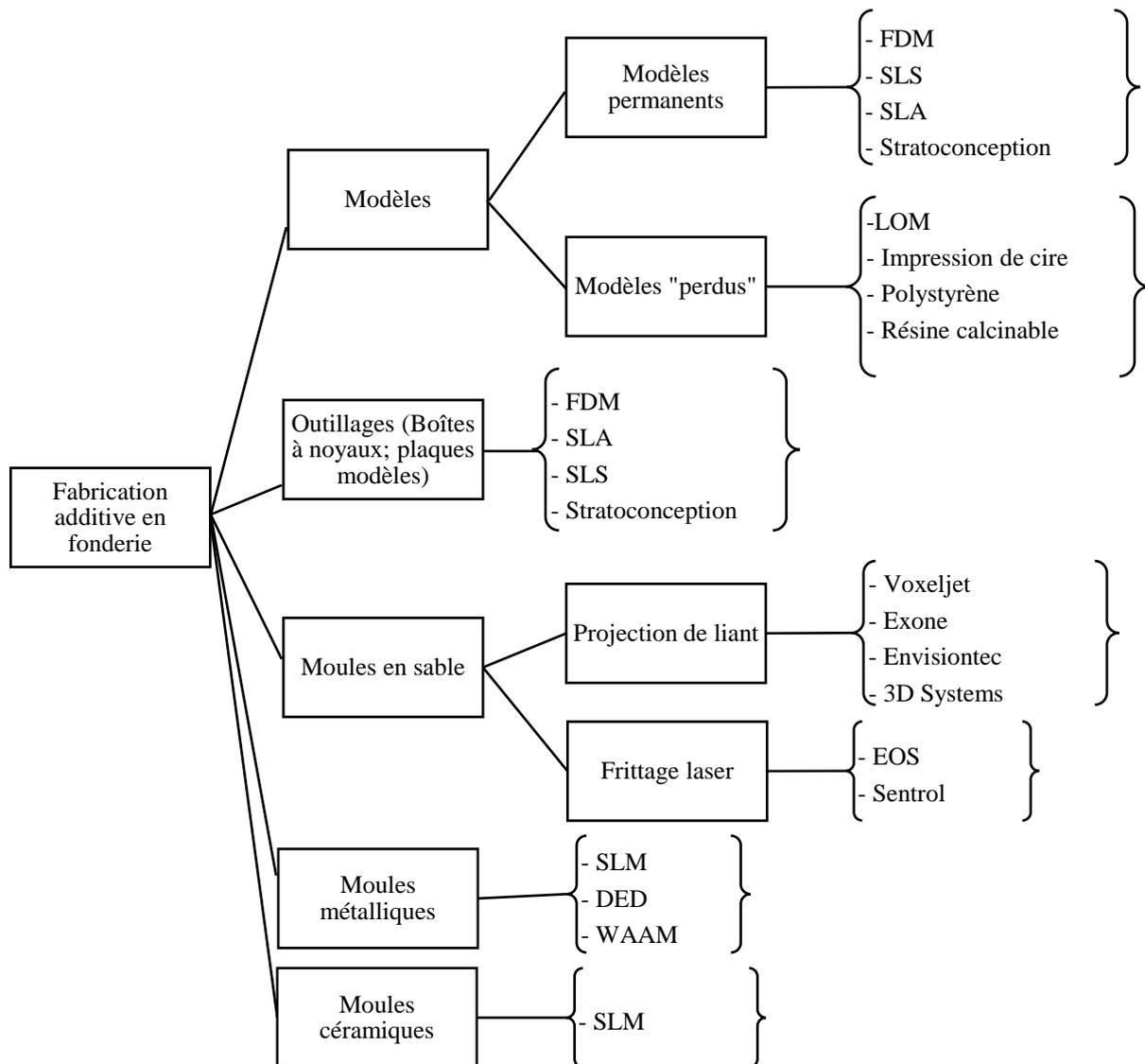


Figure 1.2-1 : Diagramme FAST de la fabrication additive appliquée à la fonderie

1.2.1 La fabrication additive « directe » de moule et noyaux

1.2.1.1 Le procédé par projection de liant/ Binder jetting

Le procédé par projection de liant, consiste à déposer sélectivement du liant sur une couche de poudre via une tête d'impression. Le processus de polymérisation du liant va permettre

l'agglomération des grains de poudre entre eux formant ainsi la pièce. Une nouvelle couche de poudre est déposée et le procédé se répète ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la pièce finale. En fin d'impression, la pièce est dépoudrée par aspiration et nettoyée. La figure (Figure 1.2-2) ci-dessous schématise le principe d'impression par dépôt de liant.

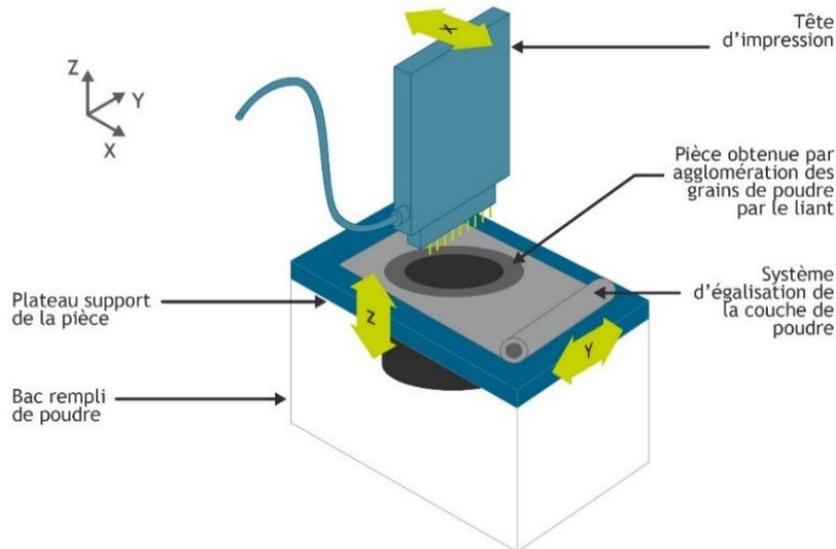


Figure 1.2-2: Schéma de principe du procédé par projection de liant [FABI19]

La poudre utilisée pour l'impression 3D de moule est du sable de silice. Avec ce sable, différents types de polymérisation sont possibles en fonction du liant utilisé.

Dans le cas d'une résine furanique, la polymérisation se fait à froid par la réaction entre le sable préenrobé d'acide sulfonique (catalyseur) et la déposition de l'alcool furfurylique sur ce sable. Dans le cas d'une résine phénolique ou de liant inorganique, la polymérisation se fait à chaud. Pour la résine phénolique, le bac de l'imprimante est chauffé à 100°C et chaque couche de sable est polymérisée à l'aide d'une rampe d'infrarouge.

Pour les liants inorganiques, la réaction se fait par la dépose d'eau sur du silicate alcalin. L'ajout d'adjuvants ainsi qu'un traitement thermique permet d'améliorer leurs propriétés de tenue mécanique. A la fin de l'impression, le bac de construction dans lequel se trouve la pièce est dépoudré afin de récupérer le sable non lié et de nettoyer la pièce.

Trois constructeurs de machines ont été recensés dont deux machines en coordonnées cartésiennes Voxeljet et Exone et une à structure poly articulée Envisiontec. Une nouvelle tendance de machines à structure robotique émerge sur le marché, permettant d'accroître le volume de construction et pouvant accueillir différents effecteurs. La technologie Nopatech usine à l'aide d'un robot 6 axes l'empreinte de la pièce ainsi que le système d'alimentation dans

un bloc en sable à prise rapide. Cette technologie développée par la fonderie Saguenay permet de produire, sans outillage, en petite série des pièces en fonte.

1.2.1.2 Le procédé par frittage laser (SLS)

Le procédé de fusion laser, consiste à la fusion sélective par une source laser du liant enrobant les grains du lit de poudre pour former les différentes strates composant la pièce. Dans le cas de l'impression 3D de moule, la poudre est remplacée par du sable préenrobé d'une résine. Les grains de sable se lient aux endroits désirés sous l'action de l'énergie apportée par le laser. Le rendement de ces machines est très faible comparé aux machines utilisant la projection de liant. Ce faible rendement est dû à la faible vitesse de balayage du laser. De ce fait, ces procédés sont de moins en moins utilisés sur le marché dont deux constructeurs ont été recensés EOS et Sentrol constructeur Coréen. La figure (Figure 1.2-3) ci-dessous illustre le principe du frittage laser.

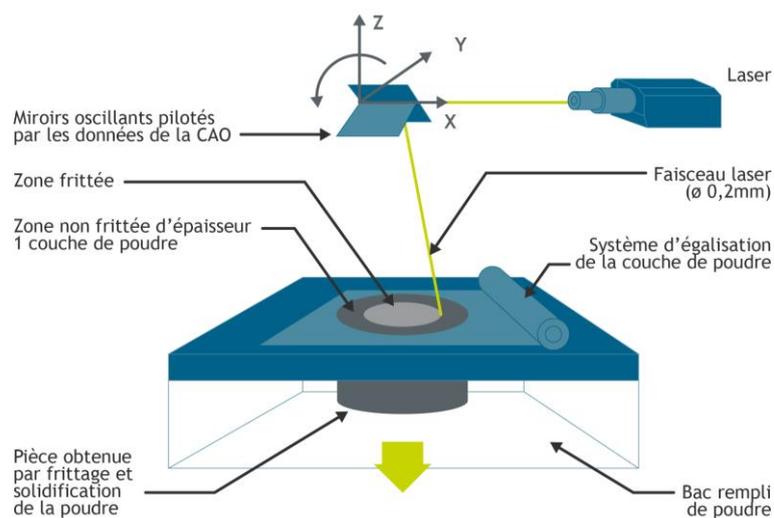


Figure 1.2-3: Schéma de principe du procédé par frittage laser [FAB19]

1.2.1.3 Les différents types de machines fonctionnant avec du sable

Un recensement de toutes les technologies de fabrication additive a été réalisé afin de recueillir les possibilités et les limites technologiques de chaque machine. A partir de ces données et du cahier des charges, l'ingénieur pourra choisir le type d'imprimante le plus adapté à la pièce à produire. Le tableau (Tableau 1.2-1) ci-dessous récapitule les caractéristiques des machines d'impression 3D sable existant à l'heure actuelle sur le marché.

Fabricant	Machine	Volume de construction XYZ (mm)	Résolution	Epaisseur de couche minimale (µm)	Vitesse d'impression verticale
Voxeljet					
	VX 200	300 x 200 x 150	300 dpi	300	2.5 L/h
	VX500	500 x 400 x 300	600 dpi	300	3 L/h
	VX1000	1000 x 600 x 500	600 dpi	300	7.5 L/h
	VX2000	2000 x 1000 x 1000	300 dpi	300	47 L/h
	VX4000	4000 x 2000 x 1000	300 dpi	300	123 L/h
ExOne					
	M-Flex	400 x 250 x 250	100 µm	100	30 à 60s/couche
	M-Print	800 x 500 x 400	150µm	150	60s/couche
	S-Print	800 x 500 x 400	100 µm	240 à 500	16 à 36 L/h
	S-Max	800 x 500 x 400	100 µm	280 à 500	60 à 85 L/h
	S-Max+	1800 x 1000 x 700	100 µm	280 à 500	60-85 L/h
	Exerial	2200 x 1200 x 700	100 µm	280 à 500	300-400 L/h
Innovent	160 x 65 x 65	100 µm	100	30 à 60s/couche	
EOS					
	EOSINT S250	720 x 380 x 3 80	/	/	/
EnvisionTEC					
	RAM Viridis 3D	305 x 610 x 914 610 x 610 x 1219 610 x 914 x 828 914 x 914 x 828		200 à 500	
Sentrol					
	SENTROL 3D SS150	150x150x100	/	200-400	/
	SENTROL 3D SS600	600 x 400 x 400	/	200-400	/
	SENTROL 3D SS1800	1800 x 1 200	/	200-400	/
	SENTROL 3D SS400G	400 x 400 x 400	/	200-400	/

Tableau 1.2-1: Tableau récapitulatif des constructeurs en fabrication additive directe [ENV17] [EOS17] [EXO17] [SEN17] [VOX17]

Les imprimantes 3D font partie des procédés propres appelés écotecnologies. En effet, ces machines permettent de réduire la masse des pièces par l'optimisation topologique [ARC19], les émissions et les dégagements de gazeux pour les liants inorganiques pendant la coulée et de limiter la consommation de sable [SIV19] ; [NYE16b].

1.2.1.4 Les moules en céramique

L'utilisation du procédé SLM permet également d'obtenir des moules en céramique par procédé direct. La fusion de l'alumine P172 SB (99.7%purity) de chez Alcan est rendu possible par l'ajout de 0.1 % en volume de graphite colloïdale. Celui-ci ne réagit pas avec l'alumine évitant ainsi la formation d'autres composés et présente une très haute absorptivité permettant la fusion ou le frittage de la céramique. La conception des moules doit respecter les règles métiers du procédés SLM [JAC17] et les moules fabriqués ont une densité maximale de 90%. Une fois les post-traitements effectués (dépoudrage, enlèvement des supports), l'alliage métallique peut être coulé dans le moule céramique imprimé. La porosité liée au procédé de fabrication devient un atout permettant d'assurer la perméabilité du moule. L'utilisation de ce procédé permet, d'une part, l'optimisation de structure lattice contribuant au contrôle du refroidissement de la pièce coulée [JUS14] et d'autre part, de réaliser des parties de moules afin d'orienter la solidification de la pièce coulée dans le cas de moules hybrides.

1.2.2 Moules multi matériaux

L'utilisation de l'imprimante 3D, permet de réaliser des moules avec des sables présentant des propriétés thermiques différentes. L'utilisation de ces sables à des endroits ciblés dans le moule permet de contrôler la solidification de la pièce et d'optimiser la mise au mille par un système de masselotte moins conséquent. Cette impression multi-matériau élargit également le panel des formes réalisables sur les pièces moulées tels que des variations d'épaisseurs ou des raccords de paroi à angle droit uniquement en utilisant un gradient thermique du moule [LEN18].

1.2.3 Moules architecturés

1.2.3.1 Structures creuse et en coque

L'utilisation de moule avec une structure en coque augmente la vitesse de refroidissement de la pièce moulée et contribue à l'uniformité de ce refroidissement. D'autre part, la quantité de sable et de liant utilisée est réduite par la morphologie de ces moules, ayant pour conséquence une réduction de masse et de coût. La figure (*Figure 1.2-4*) ci-dessous illustre le concept de moule en coque [SHA17].



Figure 1.2-4: Structure de moule en coque imprimée [SHA17]

Des structures de moule avec des cavités ont permis d'optimiser le refroidissement et le système d'alimentation. Le refroidissement est contrôlé soit par le passage d'air dans les cavités, soit en obturant ces cavités pour jouer un rôle d'isolant [DEN18]. La figure (Figure 1.2-5) ci-dessous représente les moules à structures creuses.

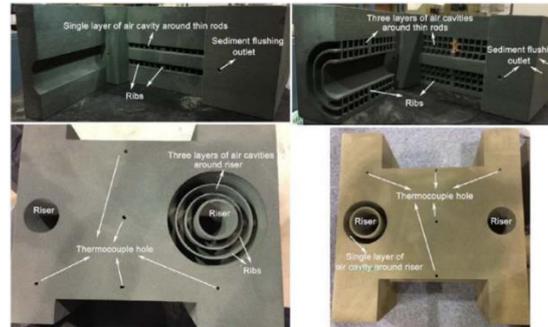


Figure 1.2-5: Moules avec des structures creuses [DEN18]

1.2.3.2 Structure cellulaire

L'impression 3D sable offre de nouvelles possibilités de conception de structure lattice ou alvéolaire en fonderie. Ces architectures sont idéales, pour l'allègement des structures, pour l'absorption d'énergie en cas d'impact et pour les échanges thermiques. Ces structures sortent directement de fonderie avec une attention particulière à porter sur le débouillage du sable. La figure ci-dessous (Figure 1.2-6) montre un exemple de ce type de structure [SNE15].

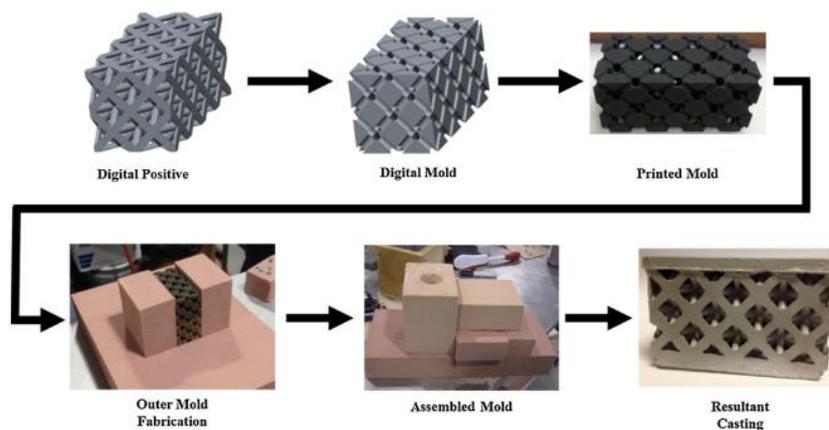


Figure 1.2-6: Exemple de structure lattice obtenue par fonderie

1.2.3.3 Nouvelles possibilités d'alimentation des moules

La liberté de conception des imprimantes 3D offre de nouvelles possibilités d'architecture des canaux et de systèmes d'alimentation pour les pièces coulées (Figure 1.2-7). La santé matière de la pièce coulée dépend du contrôle de la vitesse et de la température du matériau coulé ainsi que du « piégeage » des impuretés. Le système d'alimentation et les canaux ci-dessous assurent

une vitesse constante d'arrivée du métal dans le moule, garantissant le remplissage de la totalité de l'empreinte ainsi que la fonction d'emprisonnement des impuretés [SAM18] ; [SAM19] [WAL19].

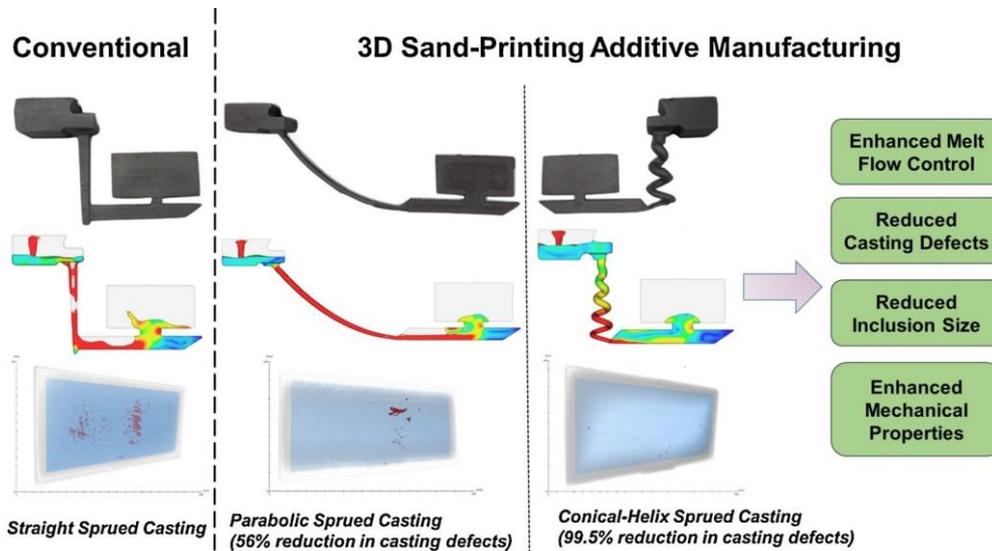


Figure 1.2-7: Exemple de systèmes d'alimentation [SAM19]

1.2.4 Conformal cooling

Le conformal cooling consiste à réaliser des canaux au plus près des surfaces moulantes afin de favoriser les échanges thermiques. Ces canaux de régulation des outillages peuvent être fabriqués soit par le procédé SLM, soit par le procédé de fonderie. Les noyaux réalisés par impression 3D sable, remmoulés dans le moule formeront le circuit de régulation après la coulée de la pièce et le décochage de ceux-ci. [MAC17]. La figure (Figure 1.2-8) ci-dessous représente un outillage intégrant le conformal cooling conçu par le CTIF.



Figure 1.2-8: Outillage de grande dimension avec du conformal cooling réalisé par le CTIF [MAC17]

1.3 Procédés conventionnels de fonderie

Le travail de cette thèse se concentre essentiellement sur les procédés de moulage en sable. Le moulage consiste à verser un métal liquide qui s'écoule par gravité ou sous pression dans un moule dans lequel il se solidifie en prenant la forme de l'empreinte réalisée dans la cavité du moule. Les moules se composent le plus souvent d'une empreinte supérieure et d'une empreinte inférieure moulant les surfaces externes de la pièce. Les noyaux réalisent les formes creuses intérieures ou les surfaces extérieures en contre-dépouilles de la pièce. Le schémas (*Figure 1.3-1*) ci-dessous récapitule tous les procédés ainsi que les modèles utilisés pour ceux-ci et le tableau (*Tableau 1.3-1*) donne les caractéristiques des pièces moulées en sable selon le type alliage coulé.

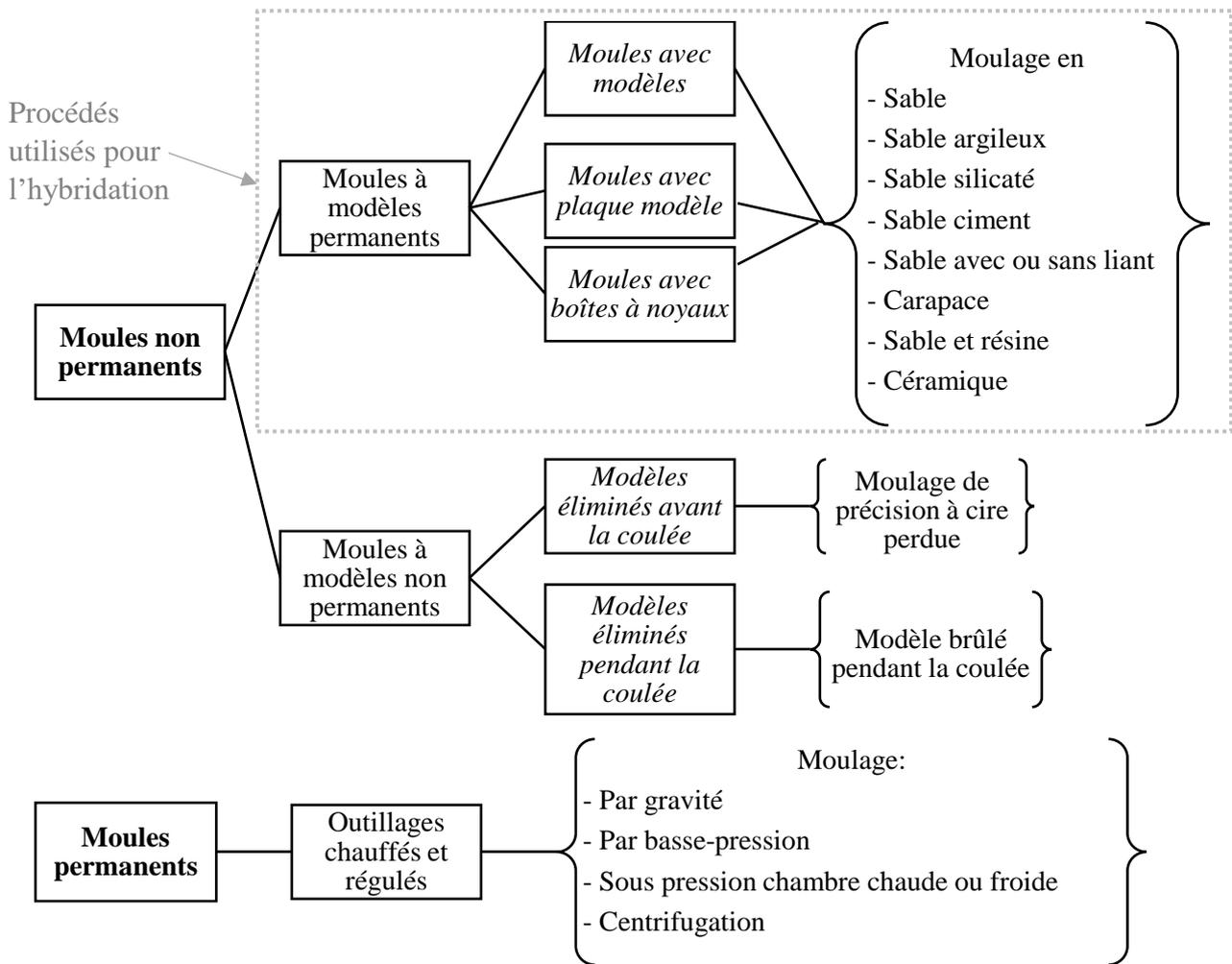


Figure 1.3-1: Schéma récapitulatif des procédés de fonderie [FAC99] [COR03] [FON17] [ROC04] [DOU04]

Technique	Outillage	Procédé de moulage	Caractéristiques	Alliage d'aluminium	Alliage de cuivre	Alliages ferreux			Alliages de magnésium	Alliages de zinc	
						Aciers moulés	Fonte G.L et G.S	Fonte malléables			
Moulage en moule non permanent	Modèle permanent	Moulage en sable silico argileux à vert	Fabrication	Unitaire à en série	Unitaire à en série	Unitaire à en série	Unitaire à en série	Moyenne série à en série	Unitaire à moyenne série	Unitaire	
			Masse max kg	2000	1500	100	1000	100	300	50	
			Précision	± 1,5	± 1,7	± 3	± 2	± 1,5	± 0,8	± 0,5	
			Ra µm	12	20	25	20	20	10	10	
		Moulage en sable aggloméré à froid par liant chimique	Fabrication	Unitaire à en série	Unitaire à en série	Unitaire à en série	Unitaire à en série				
			Masse max kg	2000	50000	> 1.10 ⁵	1.10 ⁵				
			Précision	± 1,2	± 1,5	± 1,5	± 1,5				
			Ra µm	12	20	25	20				
		Moulage carapace	Fabrication	Moyenne série	Moyenne série	Moyenne série à en série	Moyenne série à en série			Moyenne série	
	Masse max kg		20	100	200	400			15		
	Précision		± 0,6	± 0,5	± 0,7	± 0,6			± 0,6		
	Ra µm		4	5	8	7			4		
	Masse max kg		5	50	100	100			1,5		
	Précision		± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,4			J14		
	Ra µm		1,5	1,6	2	1,6			1,5		
	Ra µm		10	15	12						

Tableau 1.3-1: Caractéristiques des pièces moulées en sable en fonction de l'alliage [FAC99]

1.3.1 Moulage en sable

Pour fabriquer des moules en sable, il faut réaliser des outillages telles que des plaques modèles pour mouler les surfaces externes de la pièce et des boîtes à noyaux pour obtenir les surfaces internes de la pièce. La figure ci-dessous représente un exemple de plaque modèle et de boîte à noyau (Figure 1.3-2).



Figure 1.3-2 : Exemple de plaque modèle de la fonderie Vignon (a.) et d'un noyau accompagné de sa demi boîte à noyau pour une pièce de robinetterie de la fonderie de la Hunaudière (b.)

Le sable enrobé de liant est déposé sur la plaque modèle avec son châssis. Ensuite, le sable est tassé en fonction du type de sable et de liant, par une solution hydraulique ou pneumatique. Le demi-moule terminé est habillé de ses accessoires, filtre, manchon entretoise. La même

opération est répétée pour le moule supérieur. Les boîtes à noyaux servent à fabriquer les différents noyaux. A la fin du processus, les noyaux sont positionnés dans le moule inférieur et le moule supérieur vient coiffer le moule inférieur. La figure ci-dessous est l'exemple d'un moule fermé (*Figure 1.3-3*).

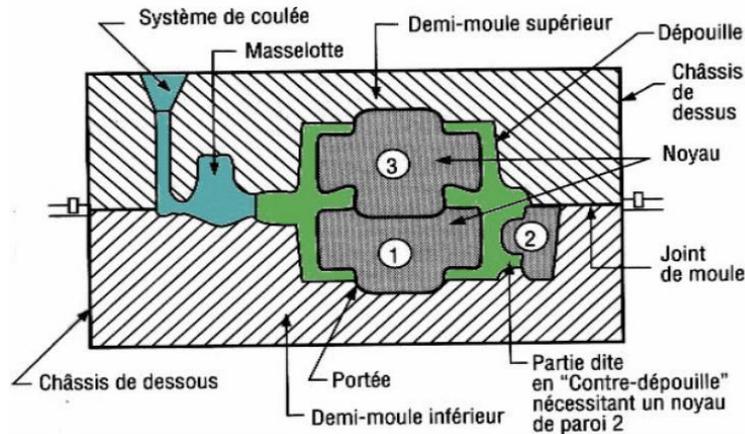


Figure 1.3-3 : Constitution d'un moule en sable

Une fois le moule fermé la coulée peut alors être effectuée après refroidissement du métal, l'opération de décochage peut être réalisée. Enfin, les opérations de post-traitement peuvent être effectuées sur la pièce comme l'ébarbage, l'ébavurage et les traitements thermique. La figure (*Figure 1.3-4*) ci-dessous schématise ces étapes.

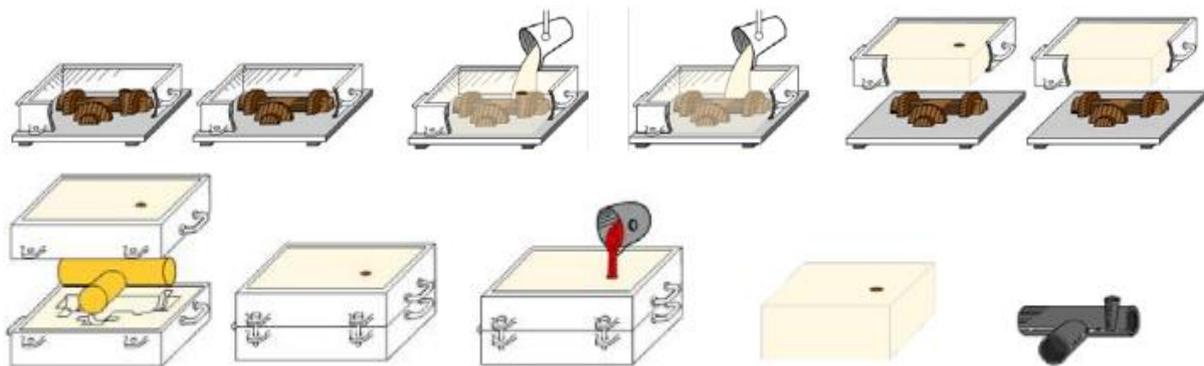


Figure 1.3-4: Etapes de modelage d'un moule en châssis [MAR06]

1.3.2 Eléments constitutifs d'un moule en sable

Pour garantir le bon remplissage de la pièce et la bonne santé matière de celle-ci, le moule en sable doit incorporer un système d'alimentation et un système de solidification. Le système d'alimentation comprend un entonnoir, une descente de coulée, des canaux d'alimentation et des attaques de coulée. L'entonnoir reçoit le métal fondu qui descend dans la descente de coulée vers le bassin de décantation. Ce bassin évite les turbulences et retient les crasses. Le canal

principal distribue le métal vers les attaques de coulée qui distribuent le métal dans l’empreinte. Des tirages d’air ou des évents sont à prévoir si nécessaire. Les systèmes de remplissage et de solidification sont représentés ci-dessous (*Figure 1.3-5*).

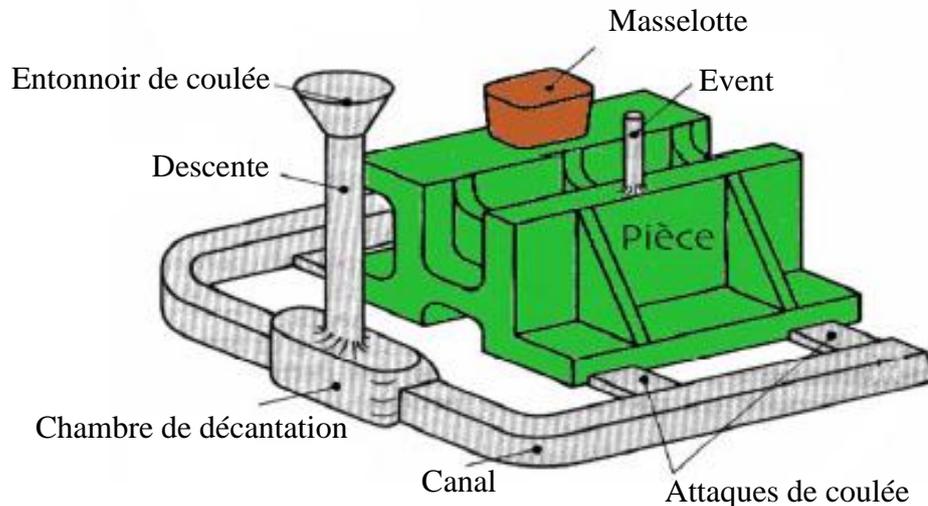


Figure 1.3-5:Eléments constitutifs d'un moule [FAC99]

Le système de solidification se compose, de masselottes, de manchons exothermique et endothermique. Les masselottes assurent une réserve de métal liquide pour alimenter la pièce durant son refroidissement pour compenser le retrait volumique. Elles sont placées près des parties massives de la pièce et leur raccordement avec la pièce doit permettre un bon approvisionnement en métal liquide. On distingue les masselottes débouchantes (nommée encore exothermiques), borgnes et borgnes latérales, représentée ci-après (*Figure 1.3-6*)

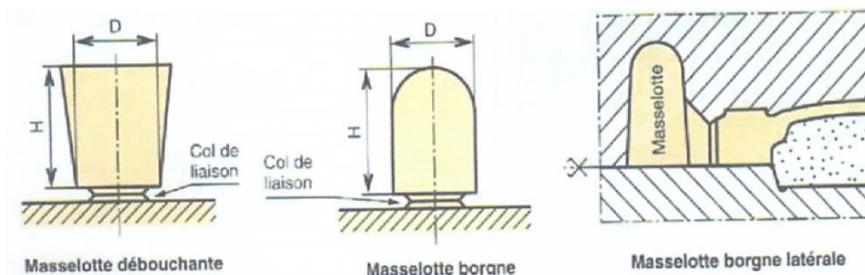


Figure 1.3-6: Les différents types de masselotte

Les noyaux permettent soit de mouler les parties internes de la pièce, noyaux numéroté 1 et 3 sur la figure (*Figure 1.3-3*) soit de mouler les surfaces externes en contre-dépouilles de la pièce et sont appelés noyaux de paroi noyau numéroté 2 sur la figure (*Figure 1.3-3*). Ces contre-dépouilles sont des inclinaisons de paroi suivant la direction de démoulage empêchant le démoulage du modèle ou le remmoulage des noyaux. Les portées assurent la stabilité du noyau lors de sa mise en place dans le moule.

Les dépouilles sont des angles de dégagements donnés aux parois verticales du modèle permettant d'extraire la plaque modèle de l'empreinte ou une pièce du moule. Par conséquent, celles-ci sont présentes sur la pièce. La valeur usuelle de ces dépouilles est comprise entre 2 à 5 % en fonction de l'alliage utilisé.

Les surépaisseurs d'usinage sont appliquées sur les surfaces fonctionnelles de la pièce afin de constituer une épaisseur suffisante de matière pour usiner ces surfaces afin qu'elles répondent aux exigences de précision dimensionnelle de la pièce.

Le plan de joint est la surface de séparation entre le moule supérieur et le moule inférieur. Celui-ci contient la plus grande surface projetée de la pièce ou le plan de symétrie de celle-ci. Le plan de joint peut être décroché ou plan en fonction des formes de la pièce à mouler. La figure ci-après illustre ce cas, sur la première figure les deux bras de la pièce ne sont pas au même niveau engendrant un plan de joint brisé, la modification de géométrie de la pièce de la seconde figure permet de simplifier le plan de joint (*Figure 1.3-7*)

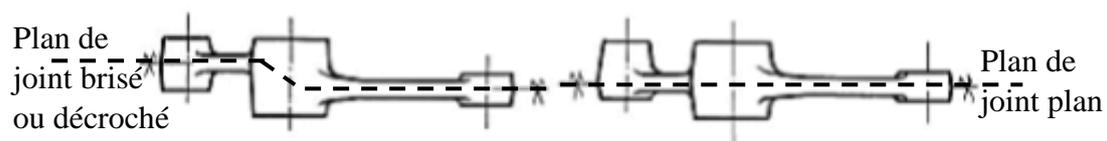


Figure 1.3-7: différents types de plan de joint

Le moule peut être constitué de plusieurs parties, dans ce cas de plans de joints multiples, on parle de moulage en chape. La chape constituant la partie supplémentaire entre le moule supérieur et inférieur. La figure ci-dessous illustre ce cas (*Figure 1.3-8*).

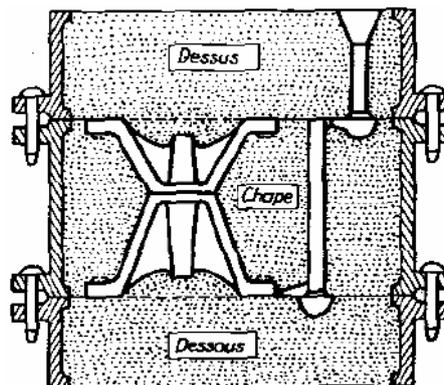


Figure 1.3-8 : Moulage en chape

1.3.2.1 Dispositifs à insérer dans le moule

Les filtres sont placés en bas de la descente de coulée, permettant l'engorgement du canal de descente afin de contrôler l'écoulement du métal en fusion et de retenir les crasses. Ces filtres

peuvent être présents sous différentes formes et différentes nuances de matériau (mousse céramique, ou en céramique extrudée, pressée ou fibres tissées) (Figure 1.3-9).

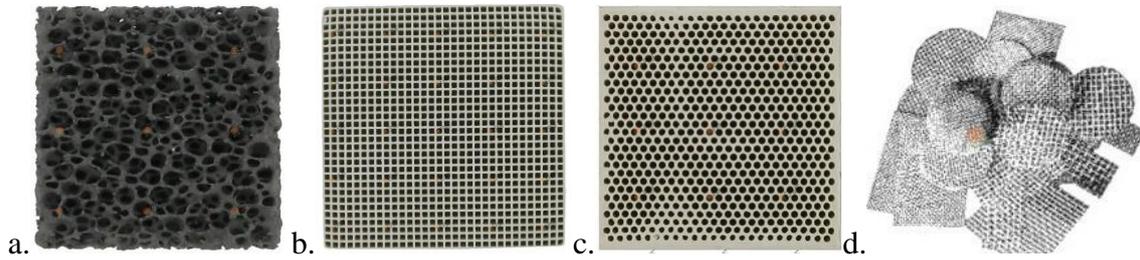


Figure 1.3-9: Exemples de filtre (a. mousse céramique ; b. céramique extrudée ; c. céramique pressée. d. fibre tissée)

La thermique du moule peut être assurée par des manchons exothermique ou endothermique et des refroidisseurs dont le rôle est d'accélérer le refroidissement ou de maintenir en température. La simulation numérique de solidification permettra d'optimiser ces composants et leur position sur la grappe de fonderie. (Figure 1.3-10).



Figure 1.3-10: Exemple de manchon et de refroidisseurs

Lors de la coulée du matériau, il faut s'assurer du maintien en position des noyaux qui seront soumis à la pression métallo statique du matériau liquide. Différents moyens peuvent être utilisés, comme le collage des noyaux sur leurs portées, l'utilisation de supports fusibles ou l'emploi d'entretoises (Figure 1.3-11). Les supports fusibles et la colle peuvent générer des dégagements gazeux, créant des défauts sur la pièce.

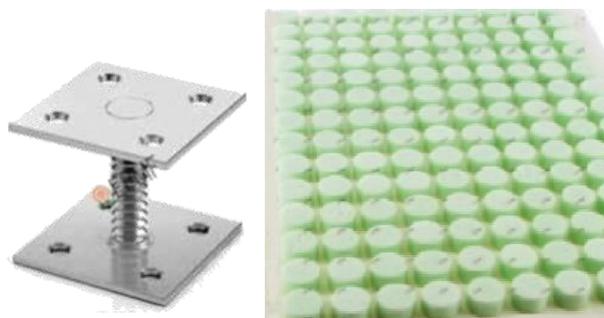


Figure 1.3-11: Exemples de support de noyau non fusible et fusible

Pour limiter les réactions chimiques du métal sur le moule et améliorer l'état de surface de la pièce coulée, des couches d'enduit peuvent être déposées. Ces enduits peuvent être de différentes compositions soit à base de graphite, soit de zircon, soit de farine de silice dilués dans de l'eau ou de l'alcool. La couche d'enduit est ensuite séchée soit par étuvage, soit par flambage ou soit à l'air libre en fonction de l'enduit utilisé.

1.3.2.2 Les liants

Les liants ajoutés au sable doivent assurer une malléabilité du sable pour confectionner les empreintes et les noyaux. Enfin une fois la prise du sable, celui-ci doit assurer la tenue mécanique du sable pendant la coulée. Le tableau ci-dessous est un résumé des différents liants utilisés en fonderie (*Tableau 1.3-2*).

Type de durcissement	Liants	Appellation	Moulage	Noyautage	Observation
Durcissement "plastique"	<i>Minéraux</i> Argile naturelle ou synthétique (bentonite)+eau	"Sable à vert" (silice+10% argile + poussière de charbon pour la fonte)	Oui	Non	Moulage à main Moulage machine recyclage aisé
Durcissement thermique	<i>Organiques</i> Résine formophénolique Résine furanique et sels d'ammonium Huile de lin+ amidon ou dextrin + eau	Croning ou boîte chaude (200°C à 300°C) Cuisson à 230°C (huile de lin)	Possible	Surtout (noyaux creux épais de 20mm)	Attention à la tolérance dimensionnelle (contraction au refroidissement)
Durcissement chimique auto-durcissant	<i>Minéraux</i> Ciment ,plâtre, silicate et argile <i>Organiques</i> Résines furaniques + acide Polyuréthane (résine phénolique + MDI + catalyseur amine) Résine phénolique + ester organique	Boîte froide ou boîte tiède Alphaset (phénolique) Pepset (polyuréthanes)	Oui	Oui	Moulage en motte ou châssis
Durcissement chimique gazage	Résine phénolique+ MDI + gaz amine Résine phénol-formaldéhyde+CO2 Résine furanique ou époxy/acrylique + peroxyde organique+SO2 Silicate de sodium+CO2	Michelson, Carsil, Solosil, Isocur, Bétaset etc...	Possible	Surtout (noyaux creux épais de 20mm)	Très commun pour le noyautage
Durcissement physique	Congélation / Vide	V process	Oui	Non	Peu commun

MDI : diisocyanate de diphenylméthane

Tableau 1.3-2: Liants en fonction de leur type de durcissement [DOU04]

1.3.2.1 . Les sables

Le sable de silice est le sable le plus utilisé en fonderie. Néanmoins, d'autres types de sable peuvent être utilisés en fonction des matériaux coulés (fonte, acier, laiton, alliage d'aluminium, ...). Ces sables sont sélectionnés pour faciliter leur mise en œuvre, leur tenue pendant la coulée, leur propriété réfractaire, leur perméabilité, leur réactivité avec la pièce coulée et de leur aptitude au débouillage. Tous ces types de sable sont présentés dans le tableau en fonction du prix, de la densité et de leur température de fusion (*Tableau 1.3-3*) ci-dessous.

Type	Silice	Chromite	Kerphalite	Olivine	Zircon
Prix	Faible	Élevé	Élevé	Moyen	Elevé
Densité	2.6	4.5	3.1	3.5	4.5
Température de fusion (°C)	1725°C	2100 °C	1850°C	1850°C	2300°C

Tableau 1.3-3: Les différents types de sable [JAS99] ;[CTI19b]

La courbe de dilatation linéique des sables en fonction de la température (*Figure 1.3-12*), présente un pic de dilatation très important pour le quartz, lié à la transformation allotropique du quartz α en quartz β à 573 °C. Cette transformation entraîne des ruptures de moules générant des défauts du type galle, queue-de-rat, gerce [CAM11] (*ANNEXE O*). Des adjuvants sont introduits dans la composition du quartz pour absorber cette dilatation.

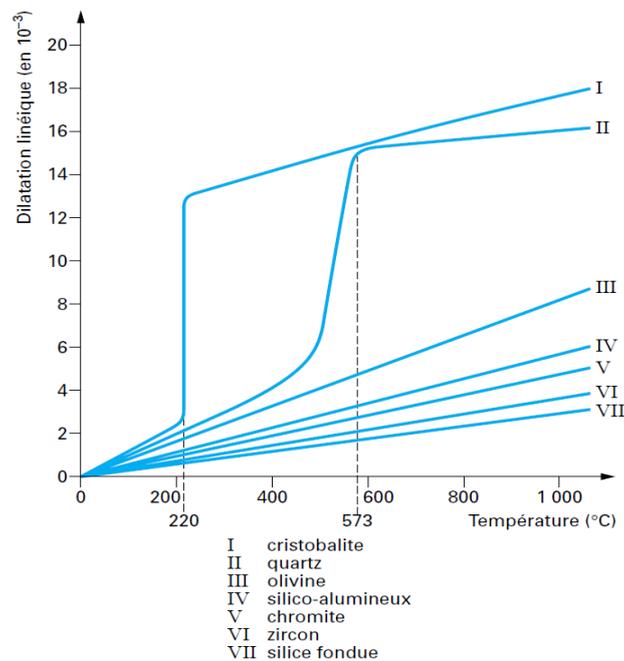


Figure 1.3-12: Courbes de dilatation des sables [JAS99]

1.4 Concept d'outillages hybrides

1.4.1 Définition du concept hybride

Le mot hybride désigne l'association de deux éléments de nature différente. L'hybridation la plus connue est celle de la voiture hybride couplant l'énergie thermique en rase campagne et l'énergie électrique en ville. En industrie, il peut se traduire par la combinaison de deux procédés ou de deux principes pour converger vers une solution technologique innovante répondant à une problématique (exemple : procédé additif par DED et procédé soustractif par usinage). La société DMG Mori a réalisé une machine alliant fabrication additive et soustractive permettant d'obtenir une pièce finie à la sortie du processus [JOS16]. (Figure 1.4-1).



Figure 1.4-1: Exemple de machine hybride de chez DMG Mori la « LASERTEC 65 3D hybrid » [DMG19]

Le terme hybride peut aussi concerner l'association de différents matériaux, comme la fabrication de moule avec différents sables cités précédemment [BON19] [LEN18].

Les fonderies doivent accroître leur productivité et celle-ci passe par la baisse des coûts. Une des solutions envisagées pour répondre à l'objectif de compétitivité est l'hybridation de différents procédés de moulage. On peut mentionner la combinaison de l'usinage du moule par un robot à partir d'un bloc moulé en sable à prise rapide, l'impression 3D sable et le moulage conventionnels, ...

Un autre procédé hybride, alliant fabrication additive et soustractive a été développé pour réaliser des moules. Le principe consiste à polymériser le liant d'une couche de sable et à usiner ensuite sur cette couche la cavité représentant les surfaces moulantes [IKO16]. La figure (Figure 1.4-2) ci-dessous montre le principe de ce procédé.

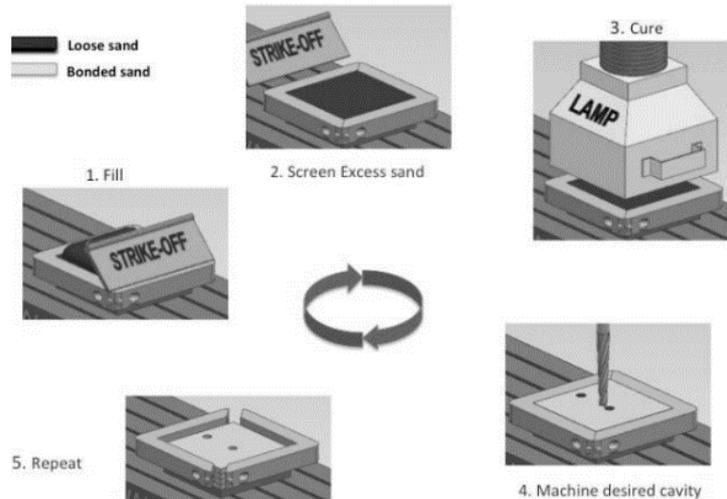


Figure 1.4-2: Principe du procédé hybride de fabrication de moule en sable [IKO16]

1.4.2 Méthodes de conception d'outillage hybride

La réalisation d'outillages hybrides ou modulaires [KER09a] consiste à découper un outillage en plusieurs modules pour lesquels on recherchera le moyen de production le plus technico économiquement viable. La décomposition d'un outillage en module ne doit pas négliger la phase d'assemblage finale avec la création de dispositifs de repositionnement et de fixation. Ce concept d'outillage hybride permet donc de concevoir et fabriquer un outillage dont les caractéristiques en termes de coût –délai –qualité –flexibilité sont améliorées par rapport à une conception monobloc.

Kerbrat propose une méthodologie en 6 étapes [KER09b]. Le point de départ de la méthodologie est le modèle CAO de l'outillage, dans sa forme monobloc (étape 1). Une première analyse de la complexité de fabrication est effectuée (étape 2). Puis l'application simultanée des points de vue modulaires et hybrides (étape 3) permet la création d'un nouveau modèle CAO de l'outillage modulaire hybride (étape 4). A partir de ce modèle CAO, une analyse de la complexité de la fabrication est effectuée (étape 5) en utilisant les mêmes procédures qu'à l'étape 2. La dernière étape concerne la comparaison des deux analyses de complexité de fabrication dans le but de quantifier le gain apporté par la conception modulaire hybride.

1.4.2.1 Méthode de décomposition d'un modèle CAO

La décomposition d'une analyse précise de la complexité de fabrication requiert une double approche : globale et locale. L'analyse locale consiste à étudier l'outillage, parties par parties.

Il est donc nécessaire de choisir une méthode de décomposition des parties constituant l'outillage. Les méthodes de décomposition s'appuient sur les entités d'usinage, sur l'analyse des fichiers STL et sur la décomposition en octree.

Approche par entité d'usinage :

« Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu » [VIL03]. Les modeleurs de CAO intègrent directement cette notion d'entité ou de feature pour des formes géométriques simples associant un processus d'usinage. Parfois le concepteur d'outillage ne dispose pas du format natif de CAO mais d'un format standard tel que le format IGES, STEP ou STL. Une extraction de features doit être réalisée par la reconnaissance d'entités à partir d'une représentation numérique du produit [RIV11] [HUA06]. Cette méthode implique une très bonne connaissance des différentes technologies de fabrication de la part des concepteurs. Elle n'est pas adaptée aux outillages hybrides du fait de la présence de formes géométriques gauches et de la combinaison des procédés de fabrication par ajout et enlèvement de matière.

Format STL :

Le format STL, acronyme initialement tiré de STereoLithography, se rattache à Surface Tessellation Language [DAN08], Il s'agit d'un maillage des surfaces par des triangles orientés à l'extérieur de la matière d'une définition numérique. Ce type de format, couramment utilisé, présente néanmoins de nombreux inconvénients dont la perte d'informations due à la simplification par triangulation de la pièce et d'autres données précisées lors de la création du modèle CAO. L'analyse locale sur un format STL ne respecte l'exactitude morphologique de la CAO de l'outillage de départ et n'est pas adéquat pour une analyse de complexité de fabrication par ajout de matière. Ce format manque de précision mais peut fournir rapidement des informations sur les surfaces en contre dépouille par rapport à une direction de démoulage en fonderie.

La décomposition volumique du modèle en octree :

La première étape consiste à définir le niveau 0 de la décomposition. Il s'agit de la cellule cubique ou parallélépipédique qui englobe la totalité de la forme à décomposer. Cette cellule compose la racine de la décomposition et est nommé « Octant 0 ». La création du niveau 1 de la décomposition s'opère par une subdivision de l'octant 0 en 8 cellules, repérées « Octant 1 » à « Octant 8 » (*Figure 1.4-3*). L'ordre de numérotation des octants est important puisqu'il

permet de connaître facilement la position et les dimensions d'un octant uniquement avec son identifiant numérique. Le processus de décomposition, s'arrête lorsque tous les octants sont blancs ou noirs, ou lorsque le niveau de décomposition maximal souhaité est atteint. Les octants blancs étant ceux en dehors de la pièce et les noirs ceux à l'intérieur de la matière de la pièce. Cette décomposition en octree du modèle CAO est utilisée pour l'analyse locale de la complexité de fabrication d'un outillage. Cette méthode est précise, facile d'accès et sans ambiguïté de décomposition mais demande beaucoup de mémoire.

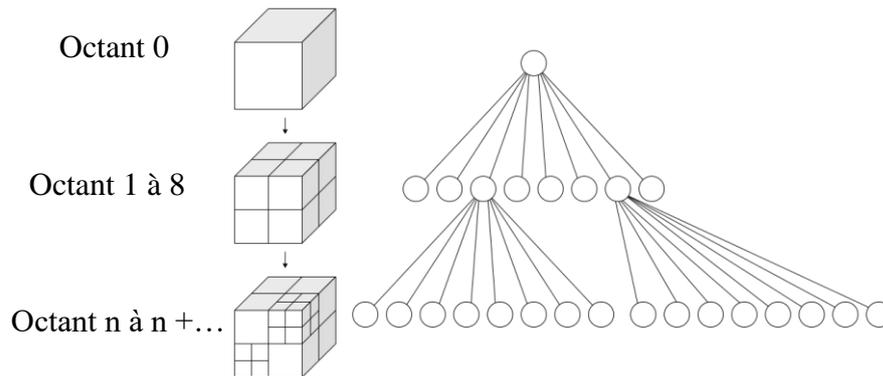


Figure 1.4-3: Décomposition en octree [WIKI17]

1.4.2.2 Définition de la complexité

La définition selon le Larousse 2019 est la suivante :

« *Complexité* : Caractère de ce qui est complexe, qui comporte des éléments divers qu'il est difficile de démêler. »

« *Complexe* : Qui contient plusieurs parties ou plusieurs éléments combinés d'une manière qui n'est pas immédiatement claire pour l'esprit ; compliqué, difficile à comprendre. »

Ces définitions gardent un sens large, qui appliquées au contexte de l'analyse de pièce peut se traduire par des difficultés de fabrication de la pièce liées à différents éléments : le produit, le procédé ou le contexte économique [ELM03]. On peut considérer trois types de complexité :

- La difficulté du produit par son matériau, sa précision dimensionnelle, et ses formes géométriques
- La difficulté du procédé par les quantités à produire, les limites des équipements et de leur précision

- La difficulté opérationnelle liée à la gestion des opérations de production dont l'ordonnancement, le conditionnement, le stockage...

La complexité est vue comme la difficulté de création des formes, d'obtention des caractéristiques attendues et de réalisation des tolérances spécifiées, selon la définition de S.Y. Yang [YAN03].

Le niveau de complexité d'un produit peut être évalué à différentes échelles, soit dans sa globalité donc il s'agira d'un indice global, soit une partie seulement de la pièce, il s'agira alors d'un indice local.

L'indice global permet alors de fixer une première tendance de la complexité. Pour un outillage, il faut considérer des paramètres globaux tels que son volume, son encombrement maximal qui vont impacter fortement le temps de fabrication, le coût et la qualité de fabrication.

L'indice local permet d'affiner la complexité et de la localiser. Pour un outillage, un indice de complexité de fabrication pourrait prendre en compte la valeur des rayons de courbures des surfaces de raccordement.

Le but de la méthodologie est de proposer une conception modulaire hybride d'outillages afin de réduire la complexité de fabrication. Il est donc nécessaire de baser la méthodologie sur une analyse très fine de la fabricabilité, liées aux difficultés de fabrication.

En conclusion, on peut dire qu'il existe peu de méthodes robustes et fiables de conception hybride ayant pour objectif de faciliter la fabrication d'outillage et encore moins au niveau de la conception des moules hybrides de fonderie en sable.

Conclusion du chapitre 1 : *Etude bibliographique*

Ce chapitre a permis de rappeler le principe de la fabrication additive ainsi que de préciser ses opportunités. En fabrication additive, la chaîne de valeur implique de recourir à de nombreuses compétences et de maîtriser la chaîne numérique. La veille sur les imprimantes 3D sable montre que celles-ci s'appuient sur deux principes à savoir le binder jetting et le Selective Laser Sintering.

Les imprimantes reposant sur le principe du binder jetting sont de plus en plus utilisées au détriment du principe SLS. De nouvelles machines de type robot permettent d'usiner directement l'empreinte dans des blocs de sable à prise chimique ou de déposer différents liants et différentes poudres pour obtenir des moules à gradient de propriété. Une étude des différents procédés de moulage en sable est présentée avec les différents liants, les différents sables et la précision dimensionnelle obtenues sur les pièces moulées. Cette étude se termine par une présentation des procédés hybrides ainsi que par les méthodes de conception des outillages hybrides. La méthode fait appel à des indices de complexité globale et à des indices de complexité locale caractérisant la fabricabilité des surfaces constituant le moule. Cette étude montre l'intérêt de concevoir une méthodologie pour la réalisation des moules hybrides en fonderie sachant que cette problématique n'est pas traitée.

Chapitre 2

Propriétés mécaniques et dimensionnelles des moules et noyaux en fabrication additive sable

La qualité des pièces de fonderie dépend essentiellement des caractéristiques des moules et de la maîtrise du remplissage et de la solidification du matériau en fusion. Ce chapitre se focalise sur les propriétés des moules et noyaux réalisés par impression 3D sable utilisant un liant phénolique. Après la description de l'imprimante 3D et du sable, les différentes propriétés mécaniques, physiques et dimensionnelles ont été étudiées sur des éprouvettes représentatives des moules et noyaux utilisés en fonderie. Une comparaison de ces différentes propriétés a été conduite sur les procédés conventionnels de fonderie et sur d'autres types d'imprimantes 3D sable. Cette caractérisation viendra enrichir les règles métiers inhérentes à ce nouveau procédé de fabrication de moules et contribuera à optimiser la méthodologie de conception des moules hybrides.

Chapitre 2 : Propriétés mécaniques et dimensionnelles des moules et noyaux en fabrication additive sable

2.1 Définition du procédé de fabrication

2.1.1 Caractéristiques de l'imprimante

Dans le cadre de la thèse, une imprimante 3D sable VX1000 de chez Voxeljet est utilisée pour la fabrication des moules et noyaux en sable. Les caractéristiques de cette machine sont listées dans le tableau ci-dessous (*Tableau 2.1-1*). Les propriétés des moules et noyaux dépendent du réglage des paramètres de cette machine. Toutes les propriétés mécaniques ont été testées avec le même jeu de paramètres et les valeurs de ces paramètres s'inscrivent dans l'étendue préconisée par le fournisseur.

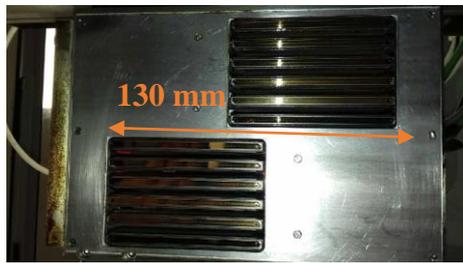
<i>Imprimante Voxeljet VX1000</i>	
<i>Dimension de l'espace de construction</i>	1000×600×500 mm
<i>Type de sable</i>	Sable de silice Référence GS 140 Taille de grain moyen : 140µm
<i>Type de liant</i>	Résine phénolique Référence PDB-Binder-type A
<i>Epaisseur de couche utilisée</i>	250 µm-300 µm
<i>Pourcentage moyen de liant en masse</i>	6% - 7%
<i>Précision de la machine</i>	600 dpi
<i>Température de chauffe du bac de construction</i>	90°C
<i>Largeur du faisceau de la tête d'impression</i>	 <i>Photographie du dessous de la tête d'impression</i>

Tableau 2.1-1:Caractéristiques de l'imprimante 3D sable utilisée

2.1.2 Principe de fonctionnement

La réalisation des moules par impression 3D se fait par un étalement du sable, couche par couche, à l'aide d'une lame racleuse, suivi d'un dépôt sélectif de liant par une tête d'impression

afin d'obtenir les surfaces moulantes. La machine répète le même cycle jusqu'à l'obtention de la pièce finale (*Figure 2.1-1*).

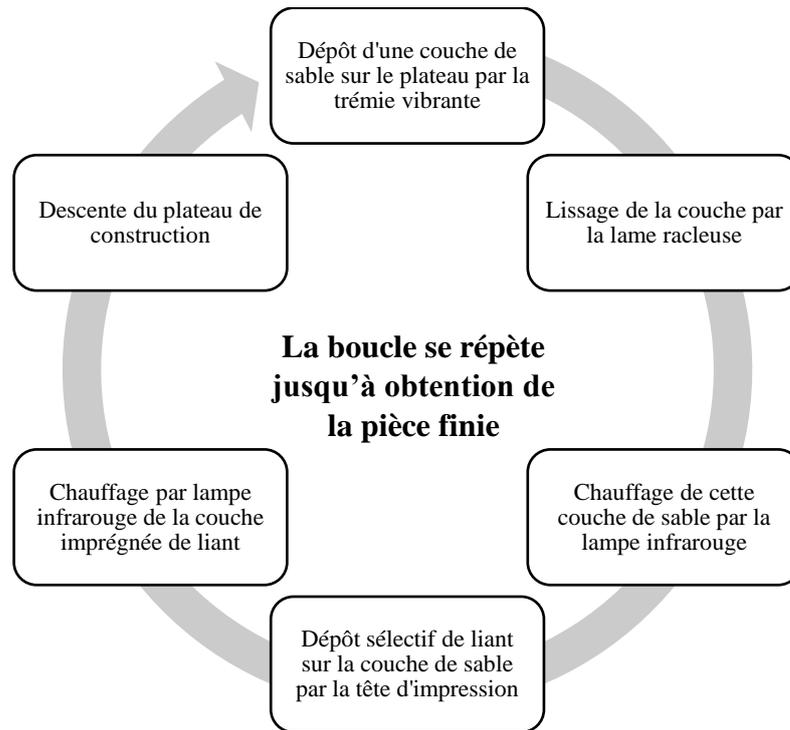


Figure 2.1-1: Cycle de construction des pièces par impression 3D sable

L'affectation des axes sur l'imprimante 3D est définie de la manière suivante : la tête d'impression est fixée sur l'axe X, Y est l'axe de la lame racleuse et de la lampe infrarouge et enfin Z est l'axe de descente du plateau de construction (*Figure 2.1-2*). L'affectation des axes de la machine, ainsi que les modes de balayage de celle-ci, doivent être identifiés afin de repérer leurs éventuelles influences sur les propriétés mécaniques et dimensionnelles des moules et des noyaux.

Le temps par couche est identique puisqu'un mur de 5 mm d'épaisseur est construit sur toute la longueur du plateau de construction suivant les deux cotés selon X, la tête d'impression doit donc parcourir toute la surface du plateau pour chaque couche.

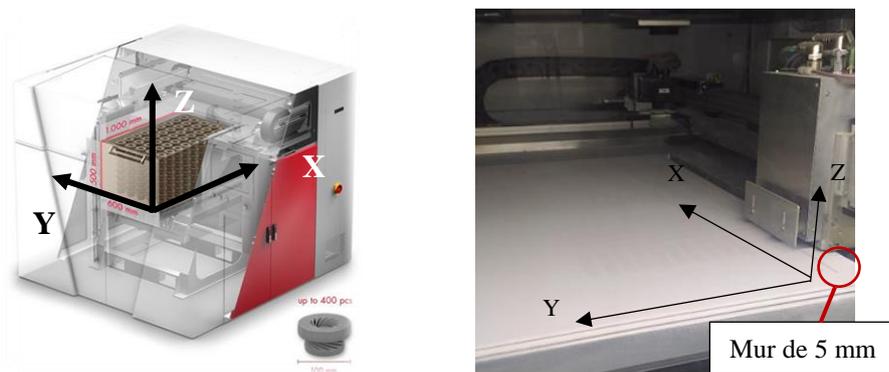


Figure 2.1-2: Axes de l'imprimante suivant une vue interne de la machine

Le dépôt de sable se fait dans un seul sens suivant l'axe Y positif. La trémie vibrante permet la descente du sable sur le plateau de construction, puis la lame racleuse vient aplanir les grains déposés afin d'obtenir une couche de 250 μm .

Le dépôt de liant sur le sable se fait en aller suivant l'axe Y positif, ensuite la tête revient à sa position de départ, se décale d'un pas de 130mm selon l'axe X, correspondant à une largeur de faisceau, puis redépose du liant en aller suivant l'axe Y positif. Le processus se répète ainsi de suite jusqu'à balayer la totalité de la surface du plateau de construction (Figure 2.1-3).

Le passage de la lampe infrarouge s'effectue en deux temps, un premier où la lampe passe selon Y négatif pour polymériser la couche en cours après le dépôt de liant et un second passage après le dépôt du sable non lié pour chauffer celui-ci suivant l'axe Y positif. La trémie vibrante étant suivi de la lame racleuse et de la lampe, le dépôt de sable et le chauffage de celui-ci s'effectuent en parallèle. Le plateau de construction descend suivant l'axe Z négatif.

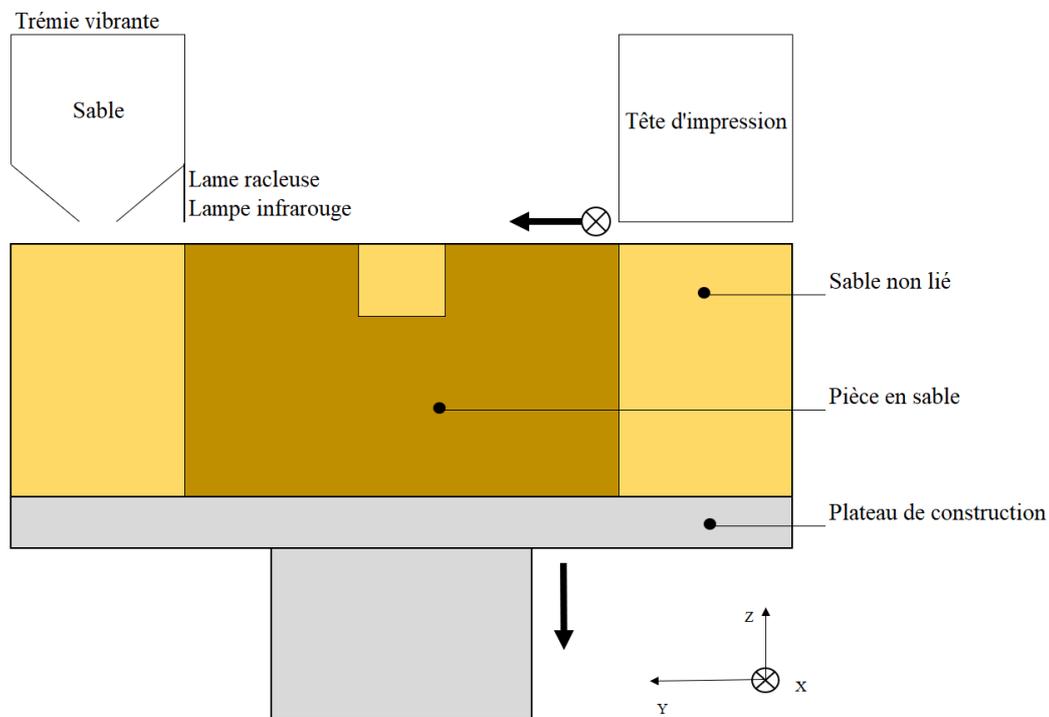


Figure 2.1-3: Schématisation des axes machine en vue de coupe de l'espace de construction

Une rampe de chauffe est utilisée pour compenser la montée en température du sable au fur et à mesure de l'avancée du processus de construction. Cette rampe permet d'obtenir une homogénéité de chauffe sur toutes les couches construites. L'espace de construction est chauffé à 90° C permettant de supprimer l'humidité contenue dans le sable. La machine répète le même cycle jusqu'à obtention de la pièce finale (Figure 2.1-1).

2.2 Propriétés du sable

2.2.1 Granulométrie du sable

Le sable utilisé dans l'imprimante pour les expérimentations est un sable de silice de morphologie anguleuse avec une granulométrie moyenne de 140 μm (Figure 2.2-1). La morphologie du sable agit sur sa coulabilité ainsi que sur sa facilité d'épandage.

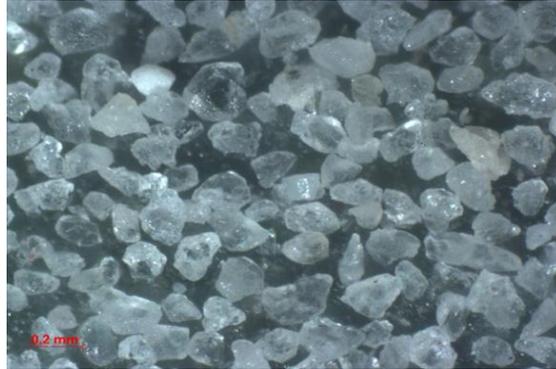


Figure 2.2-1 vue à la binoculaire de la morphologie des grains de sable

La granulométrie du sable influence la qualité de la pièce finale coulée dans le moule. Plus les grains seront gros, plus la rugosité de la peau de pièce coulée augmentera et plus les risques d'abreuvage vont croître. L'abreuvage se traduit par la pénétration de l'alliage en fusion entre les grains de sable, provoquant ainsi des inclusions de sable dans la pièce finale. A l'inverse, plus le sable est fin, plus sa perméabilité diminue, ce qui augmente le risque d'emprisonnement de gaz dans la matière coulée et génère des défauts de types porosités et soufflures dans la pièce. Enfin, plus la finesse du sable augmente, plus la quantité de liant à introduire dans le sable est importante.

Pour déterminer la granulométrie d'un sable en fonderie, on utilise un indice de finesse correspondant à un numéro de tamis fictif possédant une ouverture de maille correspondant à 50% de la courbe de distribution cumulative des refus. Les refus sont les quantités de sable ne pouvant pas passer à travers ce tamis. La taille des grains de sable est alors déterminée par leur capacité à passer au travers d'un maillage métallique. Cette méthode ne prend pas en compte la morphologie des grains pour le calcul de cet indice de finesse, seul le plus petit diamètre du grain compte.

Un indice de finesse sur deux types de sable a été effectué : un sable ayant fait plusieurs cycles dans la machine d'impression et un sable neuf. Le cycle du sable dans la machine se traduit par un passage dans une première trémie puis dans une vis sans fin pour être acheminé jusqu'à une seconde trémie, où le sable descend par vibration sur le plateau de construction de la machine

et est étalé à l'aide d'une lame racleuse sur le plateau de construction. En fin d'impression, le sable non lié est aspiré du bac de construction, puis retourne dans la première trémie.

Le calcul de l'indice de finesse consiste à multiplier le refus en pourcentage sur un tamis par le numéro du tamis précédent, ensuite la somme des produits est divisée par la masse de l'échantillon tamisé. Ces résultats sont listés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 2.2-1*). Plus l'indice de finesse est élevé plus le sable est fin.

Calculs des Indices de finesse :

$$\text{Indice de finesse} = \frac{\text{Total produit}}{\text{Total refus}}$$

Tableau obtenu après tamisage :

Numéro de Tamis N (ASTM)	Mailles en μm	Refus en Sable neuf %	Refus en Sable Usé %	Coefficient multiplicateur	Produit Sable neuf	Produit Sable usé
12	1700	0,00	0,00	5	0	0
20	850	0,00	0,00	10	0	0
30	600	0,00	0,00	20	0	0
45	425	0,00	0,01	30	0	0,3
50	300	0,04	0,05	40	1,6	2
70	212	0,82	0,64	50	41	32
100	150	13,99	12,63	70	979,3	884,1
140	106	67,61	62,38	100	6761	6238
200	75	16,85	19,41	140	2359	2717,4
270	53	0,59	2,50	200	118	500
Fines	0	0,09	2,38	300	27	714
Total		99,99	100		10286,9	11087,8
Indice de finesse		102	110			

Tableau 2.2-1: Résultats du tamisage

Soit pour le sable neuf :

$$\text{Indice de finesse sable neuf} = 10286,9/99,99 = 102,879$$

Soit pour le sable usé :

$$\text{Indice de finesse sable usé} = 11087,8/100 = 110,878$$

Cet indice révèle que le sable, après plusieurs cycles dans la machine, s'érode très légèrement avec un indice AFS de 102,879 pour le sable neuf et 110,878 pour le sable usé. Cet indice correspond à un sable très fin, le pourcentage de refus par tamis montre également une faible dispersion de taille de grain, puisque la majeure partie de l'échantillon de sable est refusé à l'ouverture de maille 106 μm (*Figure 2.2-2*). Cette dispersion est favorable à un bon état de

surface au niveau des pièces coulées, néanmoins elle ne permet pas un bon compactage du sable, favorise le phénomène de vitrification du sable et diminue la perméabilité des moules produits. De plus, la corrélation de ces résultats avec l'épaisseur de couche de 250 μm , déposée par la machine est cohérente avec la granulométrie du sable. Le phénomène d'érosion du sable est compensé par le mélange de sable neuf avec du sable usé pour le lancement d'un nouveau lot.

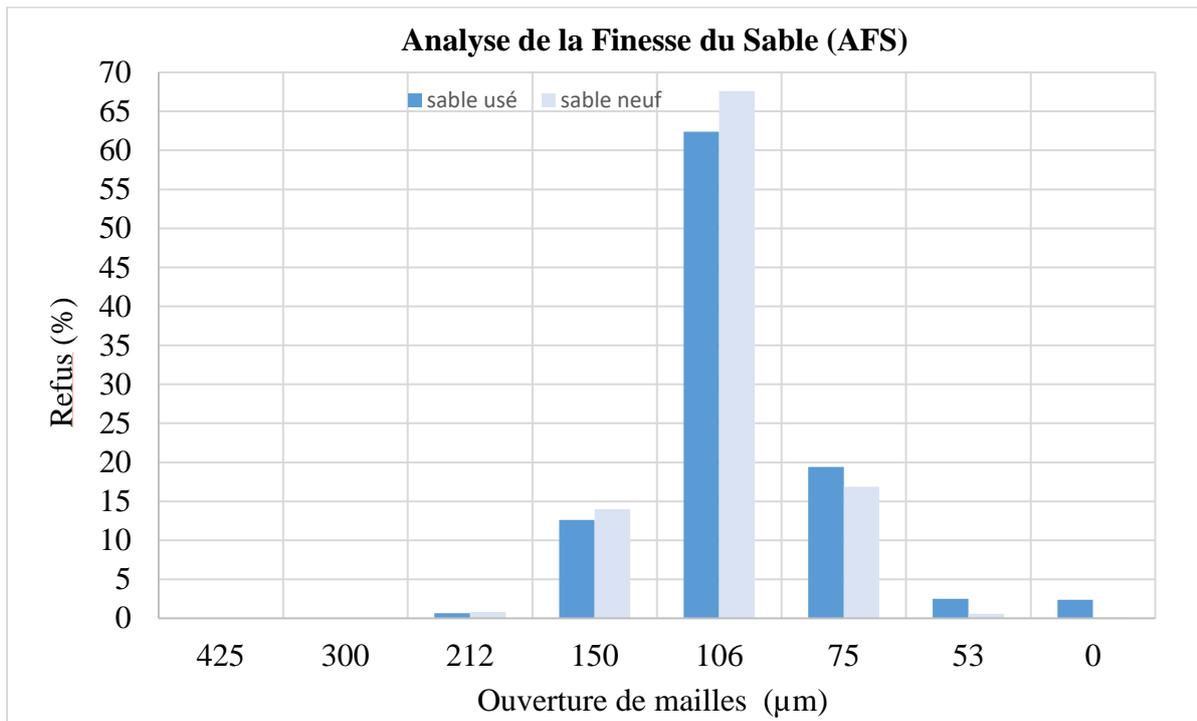


Figure 2.2-2: Indice de finesse du sable (AFS)

2.2.2 Masses volumiques

La masse volumique du sable non lié ainsi que des pièces imprimées en sable doivent être quantifiées afin de pouvoir estimer la masse des pièces produites ainsi que leur porosité. En fonction de cette masse, il faut prévoir les moyens de manutention nécessaires pour les moules et les noyaux produits. L'estimation de la masse des pièces produites par impression permettra également de définir la nécessité de morceler le moule ou le noyau ayant une massivité importante. La mesure de cette masse volumique est corrélée à la porosité des pièces imprimées.

2.2.2.1 Masse volumique du sable non lié

La masse volumique du sable non lié a été mesurée, en utilisant le remplissage d'un volume connu. La balance a été tarée, puis le sable a été pesé avec une balance de précision $\pm 0,01\text{g}$. La masse volumique moyenne du sable non lié a été évaluée à $1,45 \text{ g/cm}^3$ d'après la moyenne de 8 pesées (Tableau 2.2-2).

<i>Pesée</i>	<i>Masse volumique</i>
1	1,45 g/cm ³
2	1,43 g/cm ³
3	1,46 g/cm ³
4	1,47 g/cm ³
5	1,45 g/cm ³
6	1,45 g/cm ³
7	1,44 g/cm ³
8	1,45 g/cm ³
Moyenne	1,45 g/cm³
Ecart-type	0,012

Tableau 2.2-2: Pesées des échantillons de sable non lié

2.2.2.2 Masse volumique du sable lié en fonction de sa direction de fabrication

Une mesure de la masse volumique des produits imprimés en fonction de l'orientation des échantillons sur le plateau de construction a été réalisée (Figure 2.2-3 ; Figure 2.2-4). Cette mesure permet de déterminer les variations de la masse volumique des pièces en fonction de leur orientation dans la machine. La variation de cette masse volumique doit être quantifiée car elle peut modifier les propriétés mécaniques et dimensionnelles des pièces produites.

La masse volumique des échantillons obtenus, a été calculée par la pesée de ceux-ci avec une balance de précision +/- 0,01g. Le volume des éprouvettes varie en fonction de leur marquage réalisé par l'imprimante 3D, celui-ci a donc été estimé d'après un logiciel CAO.

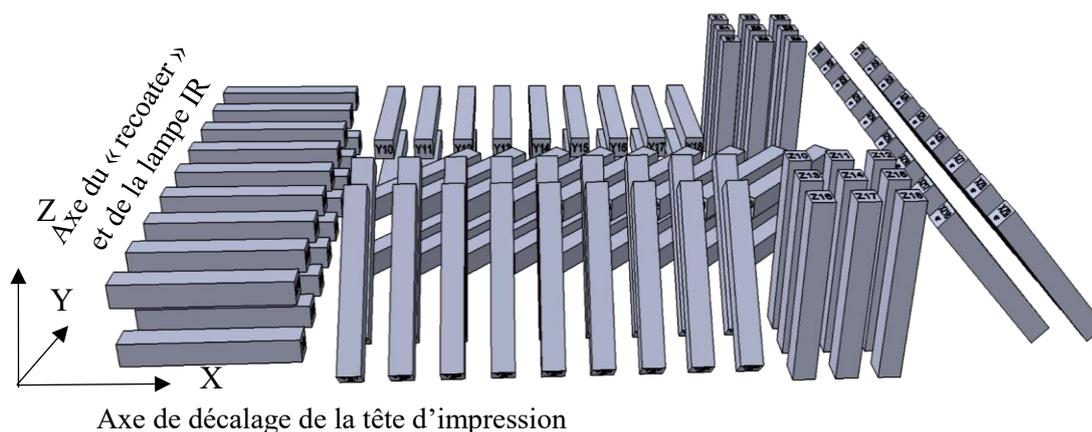


Figure 2.2-3: Vue 3D de la disposition des éprouvettes

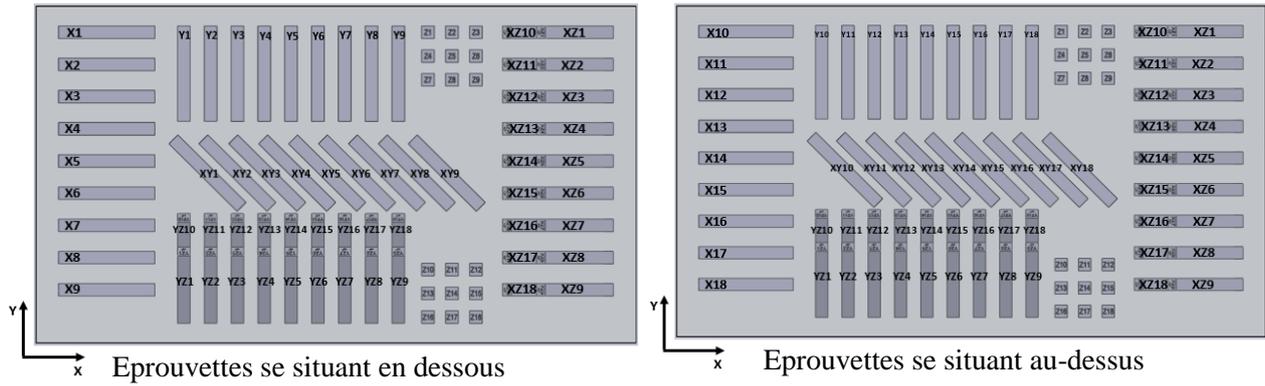


Figure 2.2-4: Vue 2D du premier et second niveau d'éprouvettes.

La différence entre la masse volumique des éprouvettes du dessus et celle du dessous n'excède pas 1%, ce facteur de position spatiale n'est donc pas influent. La différence de masse volumique entre les éprouvettes imprimées suivant les directions X et 45°XZ est 3% plus élevée par rapport aux autres directions (Tableau 2.2-3). Cet écart reste très faible au vu de la dispersion des résultats, ces résultats permettent de conclure que la masse volumique reste homogène quel que soit la position de l'éprouvette dans l'espace (ANNEXE A).

<i>Direction des éprouvettes</i>	<i>Moyennes des masses volumique (kg/m³)</i>	<i>Ecart-types</i>
X en dessous	1268,71	2,57
X au-dessus	1283,20	5,78
Y en dessous	1240,57	8,01
Y au-dessus	1238,60	9,93
Z	1251,21	12,661
45° XY	1253,14	6,62
45° YZ	1241,25	8,37
45° XZ	1282,76	8,43

Tableau 2.2-3: Récapitulatifs des masses volumiques obtenues

Le fait d'épandre le sable sans compactage, couche par couche, crée une porosité importante. Cette porosité a été estimée à environ 50% en faisant la différence entre la masse théorique d'une éprouvette totalement pleine de sable et la masse réelle obtenue. La masse volumique du sable lié est moins importante que le sable non lié avec une masse volumique calculée de 1,26 g/cm³ en moyenne. Cette masse volumique est également moins importante que celle des sables utilisés en moulage traditionnel qui est de 1,6 g/cm³. La flottabilité sera donc plus importante avec les noyaux en impression 3D dû à la poussée d'Archimède provoquée par le métal en fusion. La conception d'ancrage suffisant des noyaux devra être assurée afin de maintenir les noyaux en position durant la coulée.

2.3 Propriétés mécaniques des moules et des noyaux

Les moules et les noyaux lors de la coulée sont soumis principalement à des contraintes de flexion et de compression. Les contraintes de flexion sont principalement exercées sur les noyaux et les parties en porte-à-faux du moule par la pression métallo-statique. Les contraintes de compression s'exercent sur les surfaces moulantes lors de la coulée et sur les surfaces des noyaux lors de la solidification du métal. Pour caractériser les propriétés mécaniques des moules et noyaux issues de la fabrication additive, un essai de flexion 3 points et un essai de compression entre deux tas plats seront mis en œuvre.

Les performances mécaniques annoncées par Voxeljet des pièces produites par impression, sont de 2,5 à 5 MPa de tenue en flexion, cette valeur servira de référence pour les résultats obtenus. La tenue mécanique des moules et des noyaux doit être un compromis entre élasticité et résistance maximale. Plus le noyau aura une élasticité élevée, plus il sera facile de le manipuler en évitant la casse, en revanche plus il y aura de risque de déformation lors de la coulée. A contrario, plus sa résistance sera élevée, plus il aura une rupture brutale et un comportement fragile, engendrant des risques de casse au moment du dessablage, du remmoulage et lors de la poussée du métal.

2.3.1 Résistance en flexion 3 points

2.3.1.1 Protocole

Les essais de flexion ont été réalisés en suivant la recommandation technique du bureau de normalisation des industries de la fonderie (B.N.I.F) numéro 487-Décembre 1999. Un essai de flexion trois points a été réalisé sur des barreaux de sable dont les dimensions sont les suivantes : section carrée de 22,36 mm d'arête avec une longueur de l'éprouvette de 170 mm, soit un rapport d'élancement de 7,6 (*Figure 2.3-1*). La distance entre les deux appuis est de 150 mm suivant la recommandation technique. Les essais de flexion ont été réalisés sur une machine de flexion Instron bi-colonne 3360 utilisant le logiciel BlueHill. La vitesse de sollicitation utilisée est de 5mm/min.

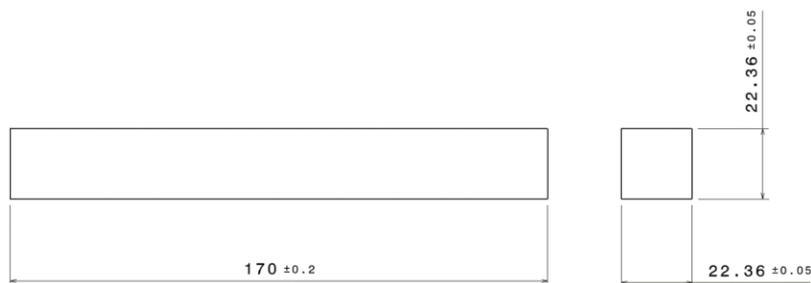


Figure 2.3-1: Dimensions de l'éprouvette de flexion

2.3.1.2 Résultats d'essais

Une rupture fragile a été observée sur toutes les éprouvettes. Les résultats montrent un écart de plus de 20% pour le module de Young entre les éprouvettes imprimées selon l'axe X et celles selon l'axe Y et un écart de quasi 30% pour la résistance en flexion entre les éprouvettes imprimées suivant l'axe X et celles imprimées suivant l'axe Y. Il montre également un écart de 40% de la contrainte en flexion et du module de Young entre les éprouvettes imprimées suivant la direction Z et la direction Y. L'écart de la contrainte en flexion et du module de Young est de 23 % entre les éprouvettes selon Z et celles selon X. Néanmoins, les résultats obtenus pour la contrainte en flexion sont compris dans les spécifications du fournisseur de 2,5 à 5 MPa. L'imprimante est donc dans ses conditions optimales de production pour mener différentes campagnes d'essais. (Figure 2.3-2).

Direction	Contrainte Maximale (MPa)	Ecart- type	Module de Young (MPa)	Ecart- type
X	3,87	0,13	1673	52
Y	5,30	0,18	2155	96
Z	2,96	0,13	1264	41

Figure 2.3-2: Résultats des essais de flexion 3 points

2.3.2 Résistance en compression

2.3.2.1 Protocole

Des éprouvettes cylindriques d'une hauteur de 50 mm et d'un diamètre de 50 mm ont été imprimées suivant les directions X, Y et Z de l'imprimante. Ces cylindres ont été sollicités en compression entre deux tas plats à une vitesse de 5 mm/min. Les essais ont été réalisés sur une série de 5 cylindres par direction d'impression.

2.3.2.2 Résultats d'essais

Les éprouvettes ont toutes une rupture à 45°. La résistance maximale en compression est de 5,7 MPa en moyenne pour les éprouvettes imprimées selon la direction Y. Une différence de 20% de résistance en compression est constatée entre les éprouvettes imprimées suivant l'axe Y et celles suivant l'axe X ainsi qu'une différence de 12% entre les éprouvettes imprimées suivant l'axe Z et suivant l'axe Y (Figure 2.3-3). Cette différence s'explique par l'orientation des strates qui ne permet pas d'obtenir une résistance optimale suivant les axes X et Z.



Direction	Contrainte maximale (MPa)	Ecart type
X	4,6	0,28
Y	5,7	0,23
Z	5,0	0,16

Figure 2.3-3: Résultats des essais de compression

2.3.3 Influence des paramètres sur les propriétés mécaniques

La sollicitation la plus critiques sur les moules et noyaux est la flexion. L'étude de l'influence des différents paramètres (process, stockage) a été conduite sur les essais de flexion trois points. Plusieurs campagnes d'essais ont été menées afin de déterminer les paramètres influents sur les propriétés mécaniques des éprouvettes (Figure 2.3-4).

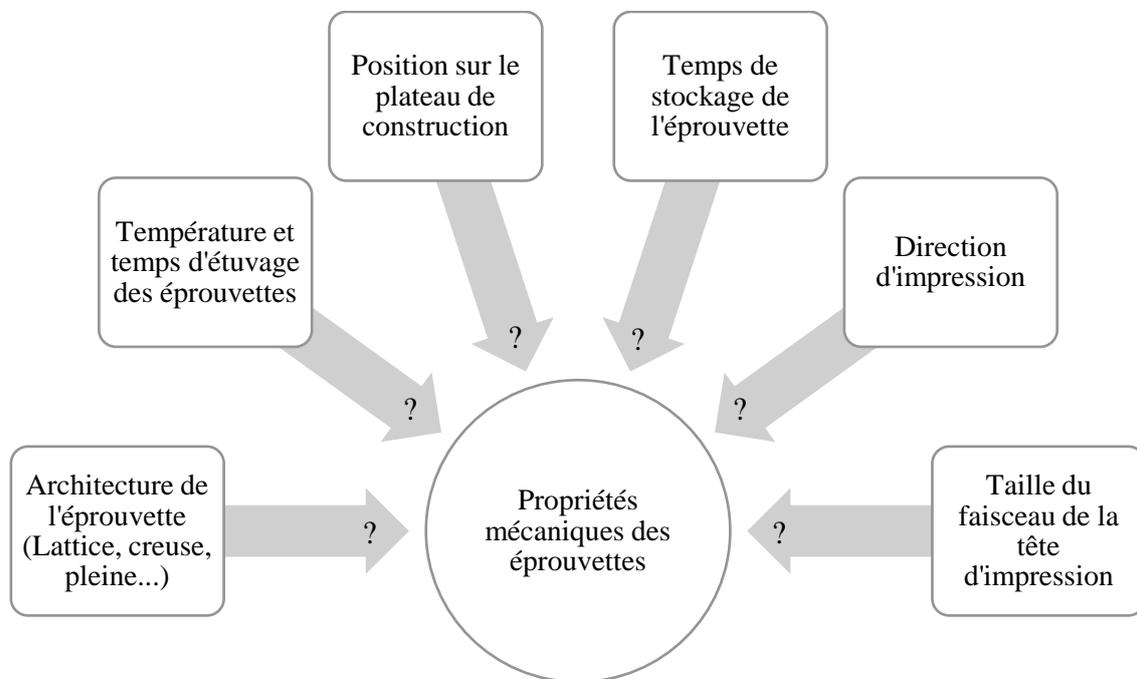


Figure 2.3-4: Paramètres pouvant influencer les propriétés mécaniques

2.3.3.1 Plan d'expériences avec différents paramètres contrôlés

Dans un premier temps, deux plans d'expériences ont été réalisés en parallèle, respectant une table de Taguchi L9 (ANNEXES B-C). Ces plans permettent d'évaluer l'influence de la température d'étuvage, du temps d'étuvage, de la direction d'impression et du temps de stockage sur les propriétés mécaniques des éprouvettes en sable (Tableau 2.3-1).

La disposition des éprouvettes est celle vue précédemment lors de la mesure des masses volumiques (Figure 2.2-3).

Pour respecter les conditions de répétabilité et de reproductibilité, 6 éprouvettes sont testées pour chaque niveau du plan d'expériences.

Les éprouvettes sont imprimées suivant les conditions suivantes :

Un taux de liant de 7% en masse.

Une hauteur de couche de 250 μm .

Un mélange de sable neuf et de sable recyclé de granulométrie moyenne de 140 μm .

La tête d'impression imprimant que dans le sens aller.

La température et le taux d'humidité pouvant influencer les caractéristiques mécaniques des moules et noyaux, ces paramètres ont été relevés pour chaque lot (ANNEXE D).

Paramètres	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Direction d'impression	X	Y	Z
Direction d'impression à 45° selon différents plans	XY	YZ	XZ
Condition d'étuvage	Sans étuvage	140°C	160°C
Temps d'étuvage	1h	2h	3h
Durée de stockage	Pas de stockage	3 jours	14 jours

Tableau 2.3-1: Facteurs contrôlés

La direction de fabrication a un fort impact sur les propriétés mécaniques, avec un écart de plus de 50% pour la contrainte de flexion suivant les directions X et Y. On retrouve également cet écart entre les directions Z et Y. L'écart est de 30% pour le module de Young entre les directions X et Y, et entre les directions Z et Y (Figure 2.3-5). Ces écarts ont déjà été constatés précédemment.

La charge est appliquée parallèlement aux strates des éprouvettes imprimées suivant Z, ce qui explique leur moins bonne tenue mécanique par rapport à Y. La différence constatée entre la direction X et la direction Y peut être expliquée par différentes hypothèses. Première hypothèse, au vu de la configuration de la machine avec un faisceau d'impression de largeur de 130 mm et la longueur de 170 mm de l'éprouvette, la tête d'impression doit imprimer les éprouvettes suivant la direction X en deux passages de tête, ce qui pourrait expliquer les différences de propriétés mécaniques entre X et Y. Seconde hypothèse, l'influence de la position dans l'espace de construction de la machine n'a pas été pris en compte pour ces essais et peut influencer les propriétés mécaniques. Enfin dernière hypothèse, l'orientation des strates a également un impact sur les éprouvettes selon l'axe X et Y. Des essais complémentaires seront donc nécessaires pour infirmer ou confirmer ces hypothèses.

Orienter les éprouvettes à 45° selon les plans XY et YZ permet une amélioration de 40% de la contrainte maximale de flexion admissible et une amélioration de 10% du module de Young

par rapport à X. Ces valeurs restent néanmoins inférieures de 30% à celles obtenues suivant la direction Y.

Les résultats de celles orientées à 45° selon XZ, se rapprochent du comportement des éprouvettes en X. Ces phénomènes sont dus à l'orientation des strates induite par le procédé, en fonction de l'orientation de la construction de l'éprouvette dans la machine, les strates ne sont pas sollicitées de la même manière. En fonction de cette sollicitation, la fragilité de l'éprouvette varie ainsi que son élasticité.

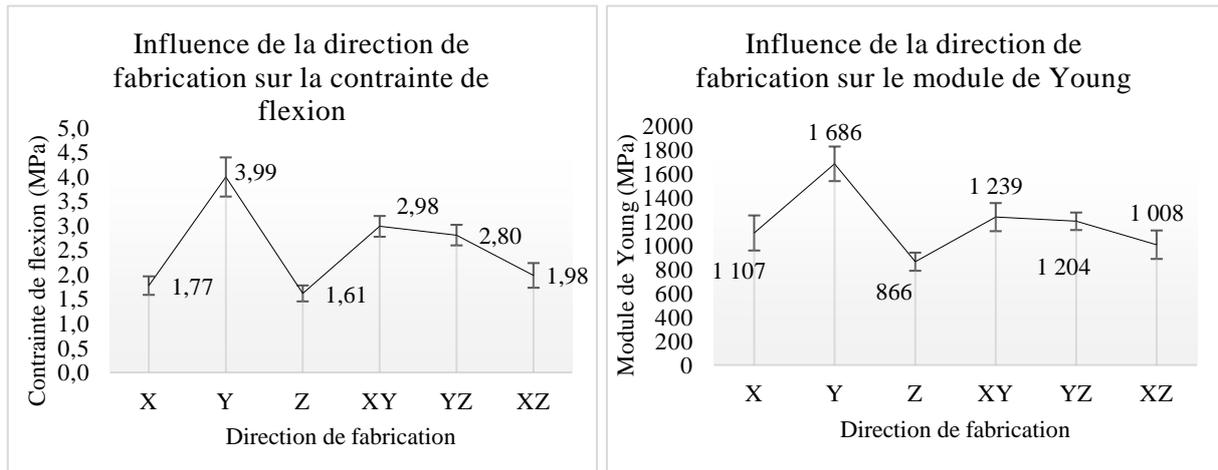


Figure 2.3-5: Influence de la direction de fabrication sur les propriétés mécaniques

L'étuvage à différentes températures ne permet pas d'améliorer les propriétés mécaniques. Cette opération aurait pu permettre de terminer la polymérisation de la résine et d'enlever l'humidité de l'éprouvette. Or les résultats montrent une diminution de la contrainte de flexion de 20% à 30% par rapport aux éprouvettes n'ayant subi aucun étuvage ainsi qu'une diminution de 15 à 20% du module de Young (Figure 2.3-6). L'étuvage génère donc une dégradation des propriétés mécaniques.

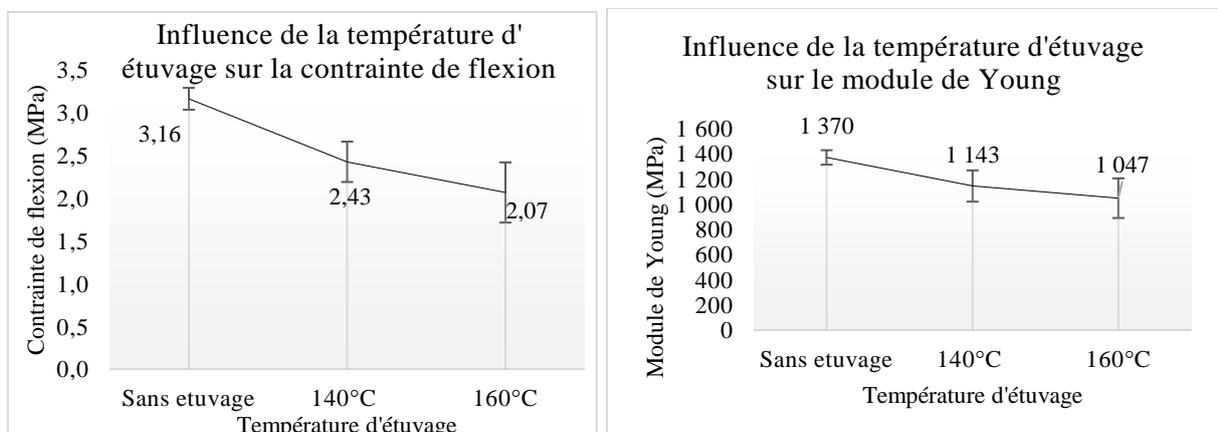


Figure 2.3-6: Influence de la température d'étuvage sur les propriétés mécaniques

Le temps d'étuvage dégrade les propriétés mécaniques et ce quel que soit la durée. Les propriétés commencent à chuter de 10% après 3h d'étuvage (*Figure 2.3-7*). Des essais supplémentaires seront donc effectués afin de déterminer l'influence du temps et des températures d'étuvage sur cette diminution de propriétés mécaniques.

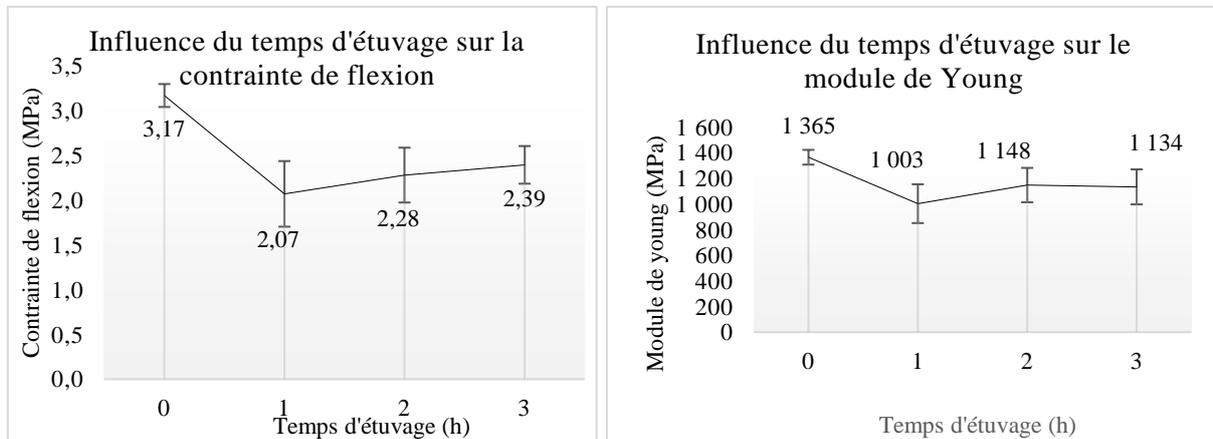


Figure 2.3-7: Influence du temps d'étuvage sur les propriétés mécaniques.

Les éprouvettes ont été stockées dans une salle à température et hygrométrie contrôlées, les relevés ont donné une température de stockage de 20°C et une hygrométrie de 37 % avec un point de rosé à 7°C. Les résultats montrent que les éprouvettes peuvent être stockées jusqu'à trois jours sans subir d'importantes baisses de leurs propriétés mécaniques. Un stockage de 14 jours fait chuter les propriétés mécaniques de l'éprouvette de 30 % (*Figure 2.3-8*). Les observations visuelles montrent qu'après un stockage au-delà de trois jours, le sable composant les éprouvettes imprimées devient plus friable. La limite de stockage pour les moules imprimés est estimée à une semaine ce qui est réaliste pour l'industrie. La limite de stockage des moules traditionnels est d'une semaine, au-delà de ce délai les moules sont inexploitable. Les moules traditionnels et imprimés ont donc la même durée limite de stockage.

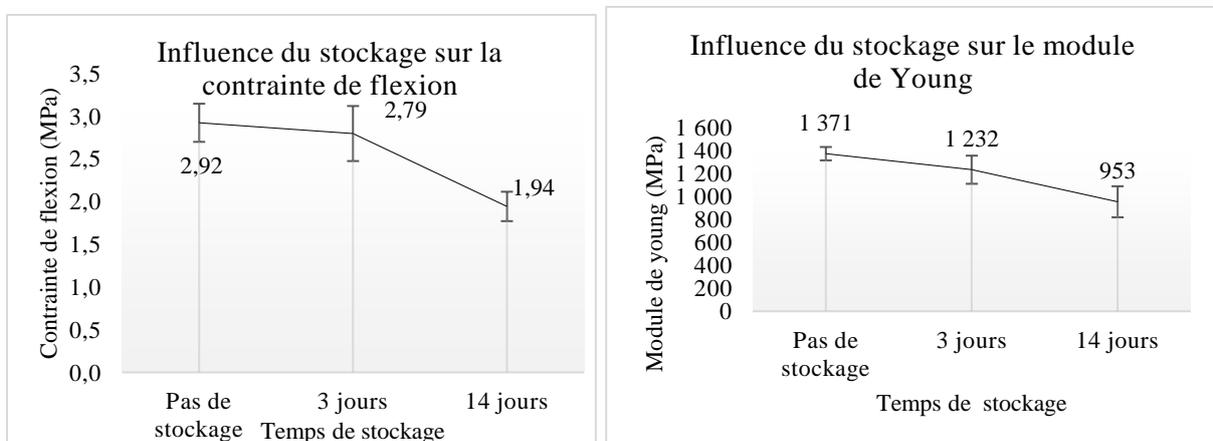


Figure 2.3-8: Influence du stockage sur les propriétés mécaniques

2.3.3.2 Influence du paramètre d'étuvage

Afin de mieux appréhender les effets de l'étuvage sur les éprouvettes, un nouveau plan d'expériences suivant une table L9 Taguchi a été lancé (ANNEXE E). Les températures de ce plan sont de 110°C et de 140°C. Les temps d'étuvage sont de 1 heure, de 2 heures et de 3 heures. Le plan contient également une configuration d'éprouvette n'ayant subi aucun étuvage. Les éprouvettes ont toutes été imprimées dans la même direction Y. Seuls, les paramètres de temps et de température d'étuvage ont été étudiés. Voxeljet préconise un étuvage à 140°C pendant 1h. Cette configuration a donc été retenue ainsi qu'une température à 110°C, afin de se situer au-dessus de la température d'évaporation de l'eau. Ensuite, deux temps d'étuvage seront appliqués pour assurer un temps d'étuvage suffisant. Les conditions expérimentales sont de 21°C pour la température d'essais avec un pourcentage d'humidité de 27% et un point de rosée de 1,5°C. Chaque lot est composé de 6 éprouvettes. Les éprouvettes sont restées trois jours dans le bac de l'imprimante, et ont été stockées une nuit après dessablage avant sollicitation. L'effet de l'étuvage sur les propriétés mécaniques reste très faible de l'ordre de 10% d'amélioration après une heure d'étuvage (Figure 2.3-9). Ces résultats s'expliquent par le maintien du chauffage dans le bac après la fin de l'impression. Le chauffage par la lampe infrarouge et par le bac d'impression durant son refroidissement sont suffisants pour polymériser entièrement la résine. L'étuvage, après le temps d'attente imposé dans le bac, se révèle donc inutile.

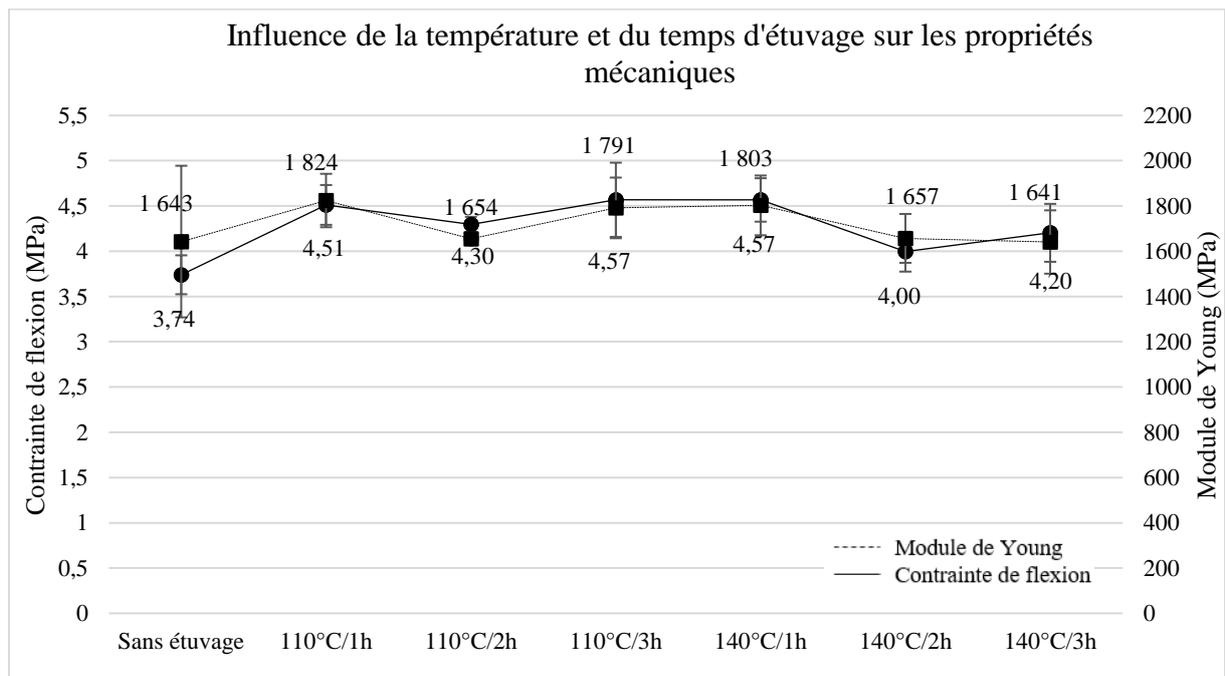


Figure 2.3-9: Influence du paramètre d'étuvage

2.3.3.3 Influence du temps d'attente dans le bac de la machine avant dessablage

Pour vérifier l'hypothèse émise précédemment, des essais ont été réalisés en enlevant les éprouvettes du bac de construction directement en fin d'impression. Une fois les éprouvettes dessablées, elles ont été séparées en 4 lots. Un premier lot a été sollicité aussitôt après dessablage, un second a subi un étuvage de 10 min à 140°C, un troisième un étuvage de 30 min à 140°C et un dernier un étuvage d'une heure à 140°C. Les lots ont été sollicités à une température ambiante de 27°C et une hygrométrie de l'air ambiant de 40%.

Les éprouvettes sorties directement après impression ont de moins bonnes propriétés mécaniques que celles ayant séjourné dans le bac d'impression de la machine.

Les résultats révèlent qu'un étuvage s'avère utile pour améliorer la résistance en flexion, des éprouvettes sorties juste après impression. Les améliorations de la résistance à la flexion apparaissent après au moins 30 minutes d'étuvage à 140°C (Figure 2.3-10). L'hypothèse émise précédemment se vérifie donc par ces résultats. Le module de flexion ne subit aucune variation significative (inférieur à 5%) à la suite des différents temps d'étuvage. Ces résultats peuvent s'expliquer par la réaction de polymérisation qui se termine avec une évaporation totale de l'eau qui permet d'assécher au maximum l'éprouvette et d'obtenir sa résistance maximale en flexion. Le module d'élasticité ne varie pas puisqu'il dépend de la liaison entre le liant et les grains établie par la chauffe de la lampe infrarouge.

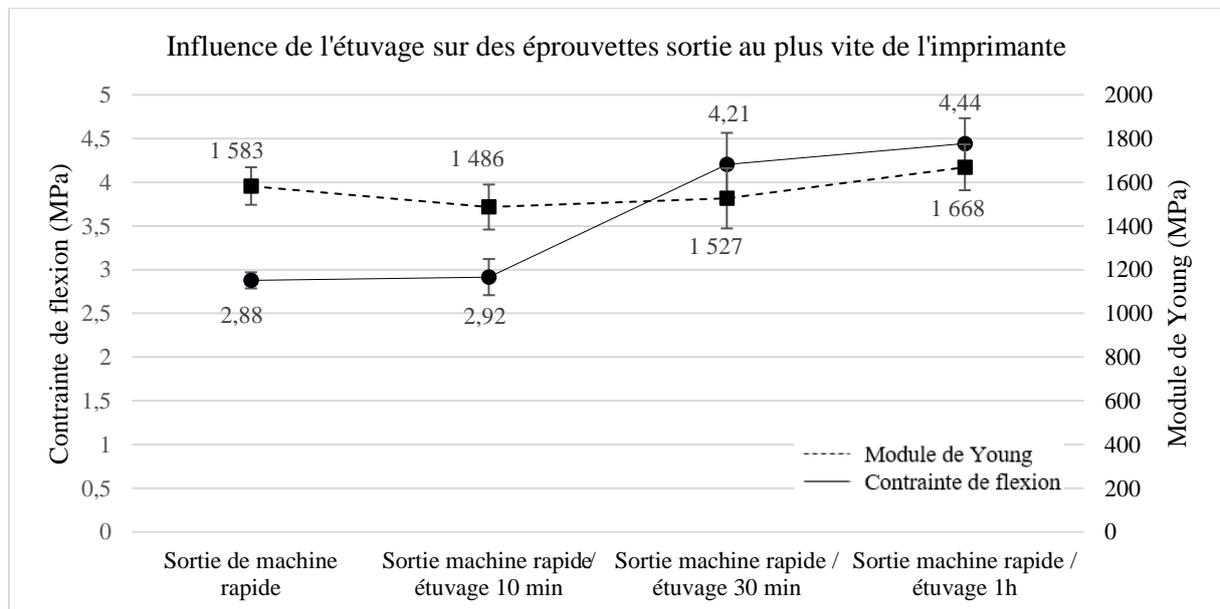


Figure 2.3-10: Influence du paramètre d'étuvage après une sortie rapide de la machine

Pour optimiser le procédé, il faut donc attendre un minimum de trente minutes pour que les pièces dans le bac de la machine obtiennent leur résistance maximale. La résine est un

thermodurcissable, une fois la réaction totale, son état ne change plus avant sa température de dégradation. Pour des raisons de sécurité, les opérateurs attendent le refroidissement total du bac de la machine ce qui explique l'inefficacité des étuvages précédent. Au vu du processus d'impression et des valeurs des paramètres d'impression, l'étuvage n'est donc pas nécessaire malgré les recommandations du fabricant d'imprimante.

2.3.3.4 Influence de largeur de faisceau d'impression

La largeur de faisceau déposant le liant étant de 130 mm, les éprouvettes ont été réduites à une longueur de 110 mm, afin que la longueur du faisceau les recouvre totalement. Ces éprouvettes ont été sollicitées en flexion 3 points avec une distance entre les supports de 90 mm. Le rapport d'élanement n'étant plus le même qu'avec les éprouvettes précédentes alors les résultats ne seront que qualitatifs. Malgré l'impression en une seule largeur de faisceau, un écart de 30% subsiste entre les éprouvettes imprimées en Y et celles imprimées en X (*Figure 2.3-11*). L'impression en plusieurs passages n'est donc pas la cause de la différence entre les propriétés mécaniques.

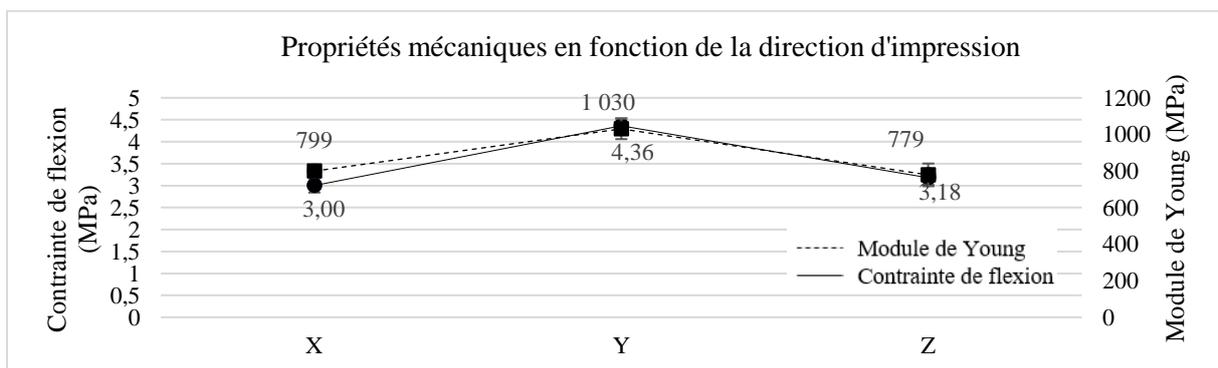


Figure 2.3-11: Influence de la largeur du faisceau

2.3.3.5 Influence de la position des éprouvettes sur le plateau de construction

L'imprimante ayant un problème technique (dépôt de liant), les propriétés mécaniques ne sont pas optimales, néanmoins elles permettent d'avoir un aperçu de l'ensemble du bac de construction. Le module d'élasticité et la résistance en flexion sont toujours plus élevés selon Y et ce quel que soit la position de l'éprouvette dans l'espace de construction (*Figure 2.3-12*). La première rangée d'éprouvette a un comportement mécanique dégradé par rapport au reste du plateau de construction. Cette observation n'est pas à prendre en compte puisqu'elle est due à un dérèglement de la machine. La position spatiale sur un même niveau n'a donc pas d'influence sur les propriétés mécaniques.

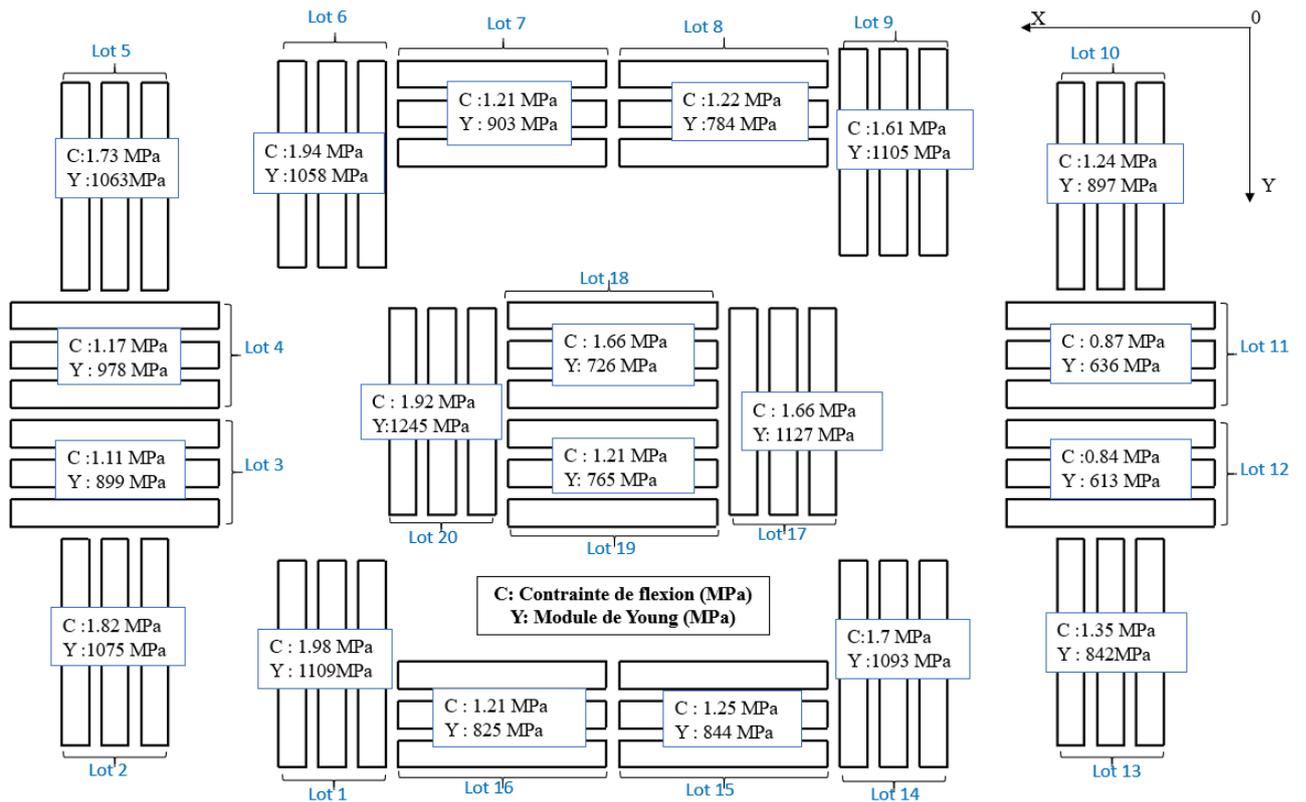


Figure 2.3-12: Schéma du placement des éprouvettes dans l'espace de construction avec leurs résultats

Une différence de structure est observée entre les éprouvettes imprimées selon la direction X et celles imprimées selon l'axe Y. Les éprouvettes imprimées suivant X sont plus striées que les éprouvettes imprimées suivant l'axe Y. Lors de l'essai de flexion 3 points, une rupture fragile des éprouvettes est constatée (Figure 2.3-13).

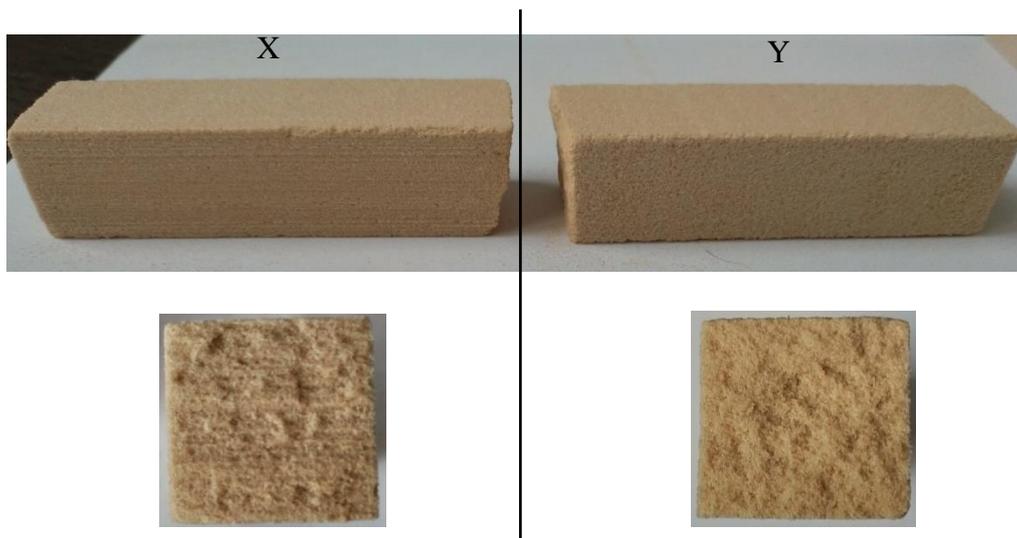


Figure 2.3-13: Photographies des stries observées sur les éprouvettes

Cette observation, permet de conclure que seul l'étalement du sable provoque cette différence entre les éprouvettes en X et celle en Y. L'étalement du sable et le dépôt du liant se font suivant

l'axe Y, la plus petite section de l'éprouvette imprimée suivant l'axe X se trouve donc plus fragile dû à l'orientation de ses strates. Cette contrainte est inhérente au procédé d'impression et ne peut être évitée. Néanmoins, ce phénomène peut être limité en évitant de disposer les petites sections suivant l'axe X par exemple lors de la fabrication de noyaux.

2.3.3.6 Influence de l'architecture de l'éprouvette

Les noyaux imprimés n'ont pas le même comportement à chaud que les noyaux en fabrication traditionnel. Des essais ont été menés par le laboratoire de recherche LAMPA de l'ENSAM d'Angers, partenaires du projet Monarchies. Leurs essais montrent que les pièces de fonderie sont de meilleures qualités lorsque les noyaux comportent une structure creuse favorisant les dégagements gazeux. Les noyaux réalisés par impression 3D ne dégageraient pas plus de gaz mais auraient un mode de dégradation totalement différent de ceux obtenus par des moyens traditionnels. Des essais sont actuellement en cours afin de comprendre ce mode de dégradation. La réalisation de différentes structures internes (lattice, étoile, tube,...) présente plusieurs avantages. Ces structures permettent de faciliter les dégagements gazeux, d'alléger le noyau ou le moule dans le cas de moule et noyaux massifs et de faciliter la débarrassabilité des noyaux. Ces différentes architectures réduisent la consommation de sable et de liant lors de la fabrication. Ces structures permettent également d'insérer d'autres types de sable, comme par exemple du sable chargé de particules métalliques pour faire varier la conductivité thermique des moules et obtenir une solidification dirigée. L'intégration de capteurs dans les moules ou dans les pièces de fonderie ainsi que l'adjonction de dispositifs d'aspiration des gaz ouvrent la voie à des produits intelligents.

Des essais de flexion 3 points ont été menés sur des éprouvettes avec des architectures creuses, en lattice et creuses pleines de sable non lié et des épaisseurs de paroi de 2,4 et 6 mm (*Figure 2.3-14*). Un plan d'expériences Taguchi L9 (*ANNEXE F*) a été déployé pour déterminer le comportement mécanique des pièces imprimées possédant de telles structures.



Figure 2.3-14: Photographies des différentes structures

Ces différentes structures montrent une diminution des caractéristiques mécaniques de plus de 40% pour le module d'élasticité et de plus de 30% pour la contrainte en flexion par rapport aux éprouvettes pleines. Les structures creuses, en lattice et pleine de sable non lié ont la même

résistance en flexion, seul leur module d'Young diffère (Figure 2.3-15). Le choix de la structure doit donc s'effectuer en fonction de l'élasticité nécessaire pour garantir le remmoulage, l'évacuation des gaz et la conductivité thermique recherchée.

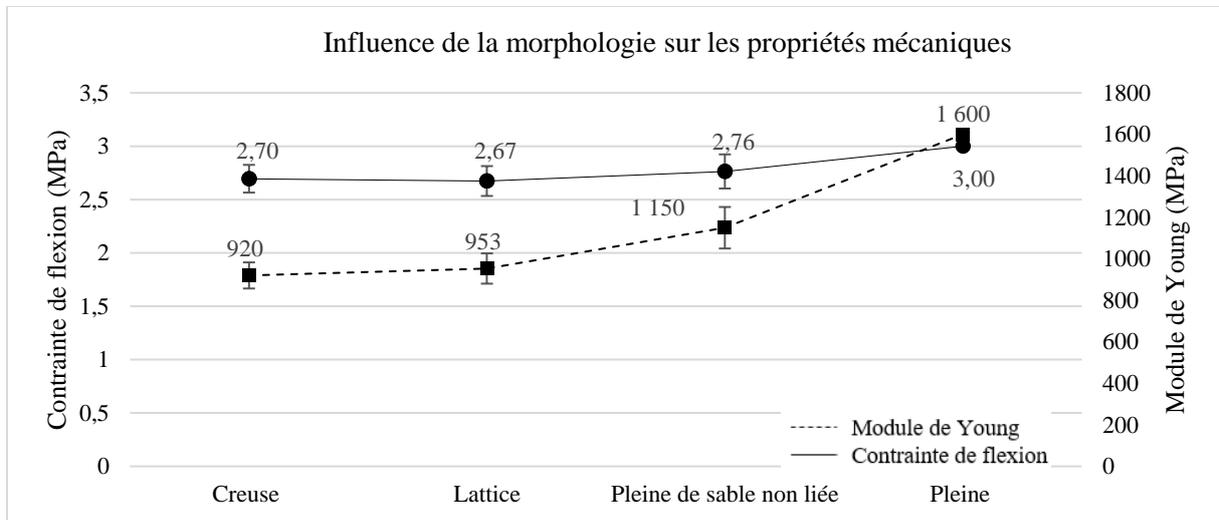


Figure 2.3-15: Influence de la structure de l'éprouvette

Les résultats permettent de conclure que la paroi de 2 mm est trop fine pour assurer une résistance mécanique suffisante. Les épaisseurs de 4 et 6 mm peuvent donc être utilisées en fonction de la résistance mécanique et du module d'élasticité nécessaire pour la pièce à imprimer (Figure 2.3-16).

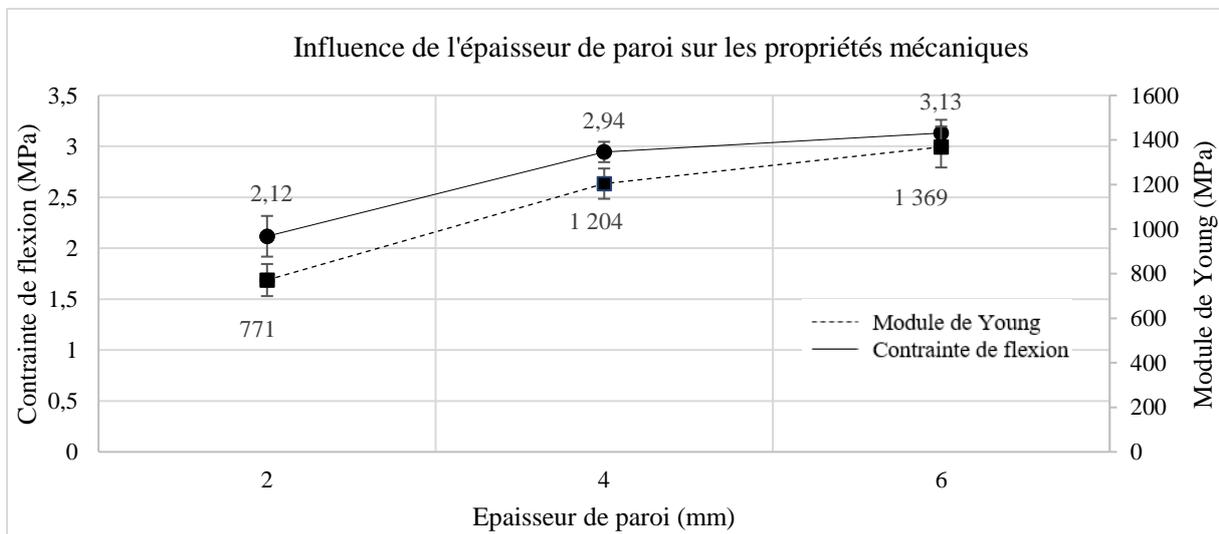


Figure 2.3-16: Influence de l'épaisseur de paroi

Tous ces essais permettront de concevoir des moules et noyaux avec des propriétés mécaniques optimisées en fonction du besoin inhérent à la pièce coulée.

2.4 Perte au feu

Les essais de perte au feu sont réalisés pour quantifier le taux de liant présent dans le sable imprimé. La quantité de liant a une influence sur les propriétés mécaniques, sur les dégagements gazeux pendant la coulée, ainsi que sur la dégradation des moules et noyaux pendant la coulée. Le taux de liant en masse introduit dans le sable, lors de l'impression, est compris entre 6 et 7%. Ce taux de liant est calculé en fonction de l'ouverture du piézoélectrique contrôlant la distribution du liant par la tête d'impression sur le sable. Par conséquent, ce taux est variable en fonction de l'état de l'usure de la tête et de la viscosité du liant. D'autre part, la quantité de liant introduite en masse est calculée avec du liant non polymérisé, or la polymérisation a lieu durant le procédé d'impression, le taux de liant en sortie de machine est donc inconnu.

2.4.1.1 Protocole

Les essais de perte au feu sont réalisés suivant la recommandation technique B.N.I.F n°489-DECEMBRE 1999 « Détermination de la perte au feu d'un sable cru ou polymérisé ». Des creusets en porcelaine sont chauffés à 900°C pendant 2 heures puis refroidis en dessiccateur pour enlever toute trace d'humidité de ceux-ci. Les creusets sont alors pesés à vide après refroidissement, soit une première masse M1. Ensuite, les échantillons de sable pesant entre 10 et 15 g sont introduits dans les creusets et sont de nouveau pesés soit une masse M2. Ces échantillons sont calcinés pendant 2h à 900°C sans ouvrir le four. Les creusets sont enlevés du four et placés en dessiccateur pour refroidissement. Après refroidissement, la masse est à nouveau mesurée soit une masse M3 (Tableau 2.4-1). Les échantillons sont pesés avec une balance dont la précision de +/- 0,01g près.

Echantillon	<i>Masse du creuset vide M1 (g)</i>	<i>Masse du creuset plein M2 (g)</i>	<i>Masse du creuset après refroidissement M3 (g)</i>
1SS	24,49	34,99	34,94
2SS	24,28	34,45	34,39
3SB	24,48	33,88	33,59
4SB	24,14	33,72	33,40
5SL	24,23	34,2	33,92
6SL	24,1	34,00	33,73

Tableau 2.4-1: Masses relevées des échantillons

La formule suivante permet de quantifier le pourcentage de liant contenu dans le sable par la différence de masse :

$$PF(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100$$

M_1 : Masse du creuset vide

M_2 : Masse du creuset plein

M_3 : Masse du creuset après refroidissement

Les essais sont réalisés deux à deux pour minimiser les effets d'hétérogénéité du matériau.

2.4.1.2 Essais

Une première mesure a été réalisée sur du sable sans liant ayant subi plusieurs cycles d'impression nommé « SS », le but étant de quantifier l'eau contenue dans le sable. Ensuite, deux mesures de perte au feu ont été réalisées, une sur du sable sous forme de cube directement sortie d'impression nommé « SL » et une autre sur du sable sorti d'impression sous forme de cube et broyé nommé « SB » (Figure 2.4-1).

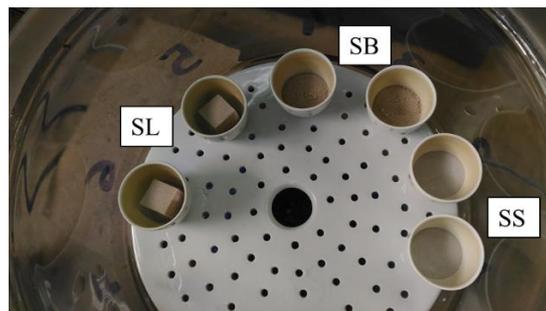


Figure 2.4-1: Echantillons de sable avant la perte au feu

Une autre série de mesures a été effectuée en introduisant le liant manuellement dans le sable pour éliminer les effets de la lampe infrarouge et connaître le pourcentage de liant se volatilissant après la réaction de polymérisation et après la perte au feu.

2.4.1.3 Résultats d'essais

- Essais de perte au feu sur les échantillons imprimés :

Les essais sur le sable recyclé montrent un pourcentage d'humidité en masse de 0,53% en moyenne. Ce pourcentage peut varier en fonction des conditions de stockage du sable. L'espace de conception contenant le sable étant chauffé et le sable passant sous les infrarouges à chaque couche déposée, cette humidité n'influe pas sur le procédé d'impression. En revanche, cette reprise d'humidité est un phénomène qui se produira une fois les échantillons imprimés et

stockés. Celle-ci influencera la qualité des pièces coulées, d'où le délai d'utilisation limité d'utilisation des moules à une semaine après impression de ceux-ci, suite aux résultats déterminés par les essais de flexion.

La perte au feu des échantillons issus de l'imprimante 3D est de 3% en moyenne. Ce pourcentage est donc le pourcentage de liant contenu finalement dans les pièces imprimées en sable (*Tableau 2.4-2*). Sachant que le réglage de liant de la machine pour l'impression des échantillons est de 6,5% en masse, il y a donc environ 3,5% de liant qui se volatilise lors de la réaction de polymérisation du liant.

Echantillon	<i>Perte au feu PF (%)</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
1SS	0,48	0,53	0,08
2SS	0,59		
3SB	3,09	3,21	0,18
4SB	3,34		
5SL	2,81	2,77	0,06
6SL	2,73		

Tableau 2.4-2: Résultats calculés de perte au feu

- Essais à température de polymérisation et de perte au feu sur un mélange fait manuellement :

Ces essais ont été réalisés pour confirmer les observations précédentes. Dans un premier temps, un creuset contenant 10,01 g de sable et 0,69g de liant soit en 6,45% de liant en masse a été porté à la température de chauffe de la lampe Infrarouge soit 110°C pendant 2 h. Ensuite, un second creuset, contenant un mélange de 10,04 g de sable et 0,68g de liant soit 6,34% de liant en masse a été porté à température de perte au feu soit à 900°C pendant 2h.

La réaction de polymérisation est une réaction de polycondensation durant laquelle il y a évaporation de l'eau. Le liant est stocké à une température entre 6 et 7 °C afin de stopper la réaction de polymérisation du liant. Par conséquent, dès que le liant est à température ambiante, la réaction de polymérisation s'enclenche. Les résultats montrent que durant la phase de polymérisation, le pourcentage de liant perdu est d'environ 4%, il reste donc 2,24% de liant après la phase de polymérisation (*Tableau 2.4-3*). Les résultats du second essai montrent un pourcentage de perte de liant de 6,27% soit un écart de 0.07% par rapport au pourcentage de liant introduit (*Tableau 2.4-3*). Cet écart est non significatif et est dû aux erreurs de mesure de masse avec la balance de précision à +/-0,01g près.

Test	Masse du creuset vide M1 (g)	Masse du creuset plein M2 (g)	Masse du creuset après refroidissement M3 (g)	Perte au feu PF (%)
Polymérisation	24,48	35,17	34,72	4,21
Perte au feu	22,86	33,55	32,88	6,27

Tableau 2.4-3: Résultats des essais avec un pourcentage en masse de liant réalisé manuellement

2.5 Aptitude au débouillage

L'aptitude au débouillage se définit par le temps nécessaire pour enlever le sable emprisonné dans une pièce par vibration après la coulée et le refroidissement de la pièce. Les noyaux doivent tenir suffisamment longtemps pour assurer les formes géométriques de la pièce coulée, mais ils doivent également se dégrader suffisamment pour se désagréger et être enlevés plus facilement après refroidissement de la pièce coulée.

2.5.1.1 Protocole

En l'absence de protocole normalisé, les instructions techniques du laboratoire de la fonderie du Groupe PSA ont été suivies pour caractériser l'aptitude au débouillage des noyaux issus de l'impression 3D. Ces recommandations ont été suivies afin de comparer les résultats obtenus avec les noyaux fabriqués par méthode traditionnelle.

Un morceau de noyau est introduit dans un creuset en porcelaine fermé pour simuler l'emprisonnement du noyau dans la pièce coulée. Deux températures de chauffe sont nécessaires pour réaliser ces essais, une première à 450°C pour simuler l'aptitude au débouillage d'un noyau avec une coulée d'alliage d'aluminium et une seconde à 700°C pour simuler la température d'une coulée d'acier. Neuf échantillons de masse connue sont introduits dans différents creusets fermés et sont mis dans le four à température de 450°C ou 700°C en fonction du type d'alliage simulé. Un premier échantillon est sorti au bout de 20min de chauffe, celui-ci est alors déposé dans un tamis d'ouverture de maille de 1mm. Ce tamis est vibré pendant 30 secondes à une fréquence de 25 Hz. La masse de sable retenue sur le tamis est pesée ainsi que la masse passée au travers (*Figure 2.5-1*). Le processus est répété ensuite toutes les 5 minutes de chauffe supplémentaire, jusqu'à ce que la totalité de l'échantillon contenue dans le creuset en sortie de four soit passée entièrement au travers des mailles du tamis après vibration de celui-ci. Le temps de chauffe, pour lequel les résidus sont inférieur à 0,1 g sur le tamis après vibration, est considéré comme le temps nécessaire pour débouiller le noyau de la pièce coulée.

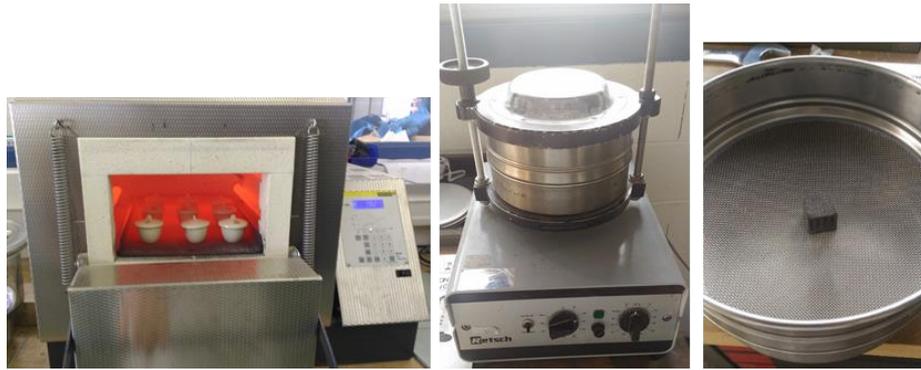


Figure 2.5-1: Matériels d'essai d'aptitude au débouillage

Selon les sources de la fonderie du Groupe PSA, le temps nécessaire pour débouiller un noyau avec un alliage de type aluminium est de 60 minutes et 40 minutes pour un acier. Ces valeurs vont nous servir de référence pour caractériser l'aptitude au débouillage des pièces réalisées par impression 3D sable.

2.5.1.2 Plan d'expériences

Deux plans d'expériences ont été réalisés, un premier permettant de contrôler les facteurs de température de chauffe de l'échantillon et la direction d'impression de l'échantillon (*ANNEXE G*). Le second permettra d'analyser l'influence de la direction des strates, de l'architecture de l'éprouvette, de la température de chauffe ainsi que l'épaisseur de paroi de l'éprouvette (*ANNEXE H*). Pour chaque configuration du plan d'expériences L9, 9 creusets sont mis en chauffe pour l'essai d'aptitude au débouillage.

2.5.1.3 Résultat d'essais

L'influence de la direction des strates n'est pas mesurable car les échantillons sont trop dégradés pour permettre leur orientation sur le tamis en fonction de leur direction de fabrication. Ce paramètre est donc exclu de l'étude.

- Premier plan d'expérience :

Les essais se sont déroulés en deux campagnes pour les températures de 450°C et 700°C (*ANNEXE I-J*). La première température n'a pas permis d'aboutir à un temps de débouillabilité suffisant avec neuf creusets soit 60 minutes d'essais (*Figure 2.5-2*).

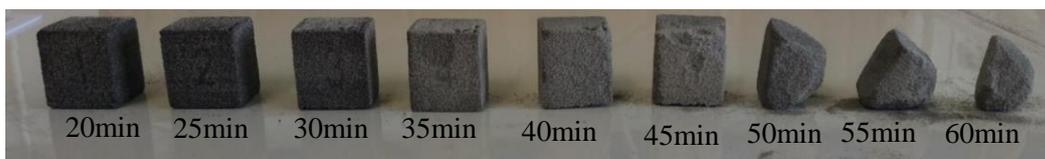


Figure 2.5-2: Dégradation des échantillons en fonction du temps

Les résultats permettent de conclure que pour un noyau imprimé en 3D, le temps de débouillage est estimé à 90 minutes pour une pièce en aluminium, 65 minutes pour une pièce en acier et enfin 45 minutes si la température de perte au feu est atteinte. Soit un temps de débouillabilité de 30% plus élevé avec les éprouvettes réalisées par la fabrication additive qu'avec les noyaux obtenus par les procédés traditionnels (*Figure 2.5-3*).

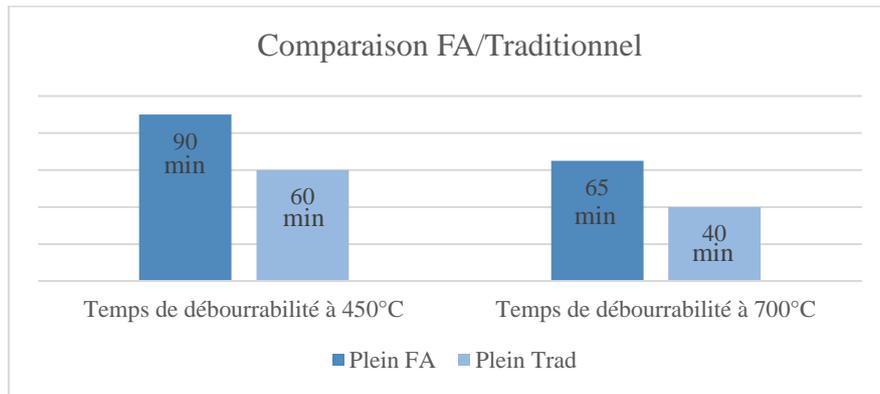


Figure 2.5-3: Aptitude au débouillage des noyaux en impression 3D comparés aux traditionnels

Le pourcentage de résine phénolique étant aux environs de 3% en impression 3D, la cohésion du sable est donc beaucoup plus importante qu'en traditionnel où le taux de liant est proche de 1%.

- Second plan d'expériences :

Ce plan d'expérience a pour but de quantifier l'influence de l'architecture des noyaux sur leur aptitude au débouillage. Les résultats montrent que l'architecture des noyaux permet de diminuer les temps de débouillage des noyaux d'une pièce (*Figure 2.5-4*). Par conséquent, cela permet, d'une part de diminuer le temps de décochage après la coulée des pièces, d'autre part, l'utilisation de structure doit être choisie en fonction des paramètres de résistance mécanique et d'évacuation des gaz pendant la coulée.

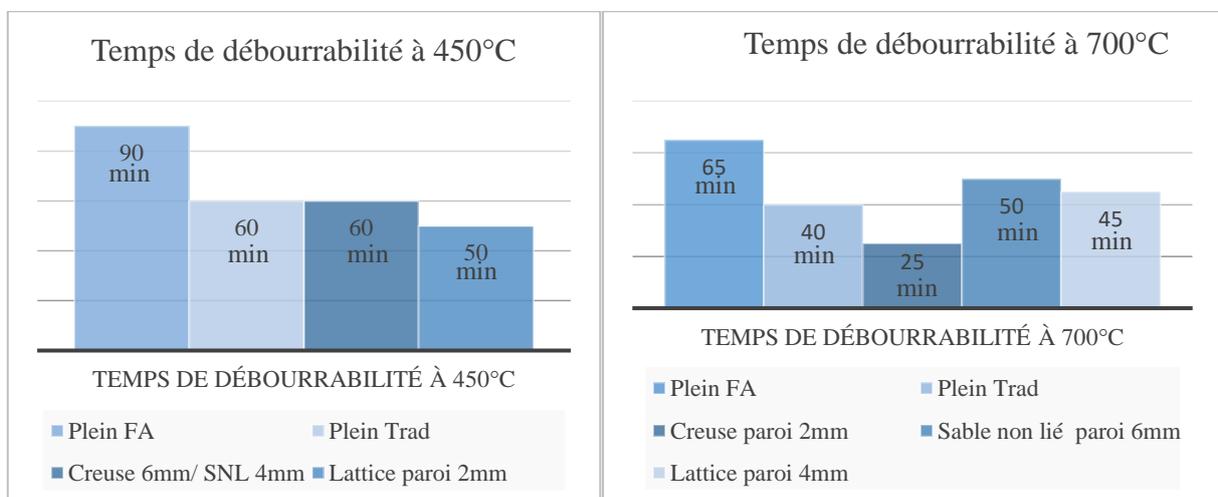


Figure 2.5-4: Aptitude au débouillage des noyaux structurés

Les résultats montrent que plus la température de coulée est élevée, plus le noyau aura tendance à chauffer et plus le temps de débouillage diminue. Plus la masse de l'éprouvette est réduite, suite à des structures lattice ou des noyaux creux, plus le temps de débouillage diminue (*Figure 2.5-5*). Ces paramètres sont à prendre en compte dans la conception de noyaux complexes pour permettre un débouillage efficace après refroidissement de la pièce. Ces résultats sont à corréliser avec les essais mécaniques, pour trouver le bon compromis, entre une résistance suffisante du noyau pendant la coulée et sa dégradation rapide pour faciliter le débouillage du noyau, lors du post-traitement.

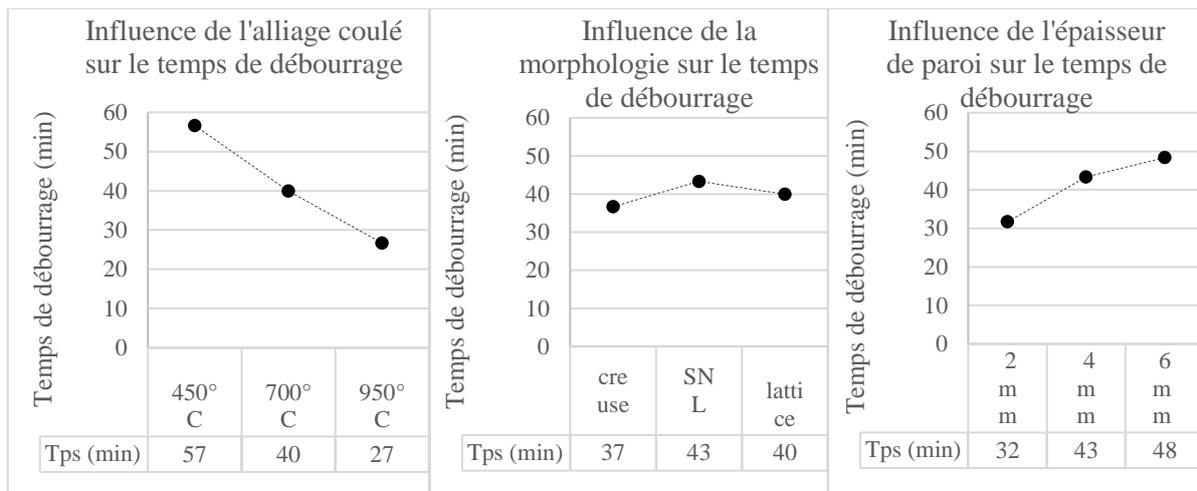


Figure 2.5-5: Influence des paramètres sur l'aptitude au débouillage

2.6 Comparaison des propriétés mécaniques avec d'autres procédés

La mise en place d'une méthodologie de conception de moules hybrides, nécessite d'acquérir de bonnes connaissances sur les propriétés mécaniques de plusieurs procédés. De ce fait, des essais ont été menés sur des éprouvettes imprimées avec du liant furanique et des éprouvettes issues du procédé de boîte froide (Ashland). Seuls, les essais de perte au feu et de flexion trois points ont été réalisés sur les éprouvettes avec un liant furanique compte tenu de leur importance vue précédemment et respectent les protocoles utilisés précédemment. Les essais de flexion ont été réalisés sur les éprouvettes issues du procédé Ashland, mais pas la perte au feu sachant que le taux de liant était connu.

2.6.1 Essais sur des éprouvettes imprimées en 3D avec de la résine furanique

Une série d'éprouvettes a été fabriquée par impression 3D sable avec un procédé de prise à froid avec de la résine furanique. L'imprimante utilisée est une EXOne de type S-Max dont l'épaisseur des couches déposées est de 280 μm . Le sable pré enduit d'un activateur d'acide

sulfonique est épanché sur une couche, ensuite, une tête d'impression vient déposer sélectivement la résine furanique, ce qui enclenche la réaction de polymérisation. L'imprimante à un espace de construction de dimensions de 1800x1000x700 mm. Le sable est étalé suivant le sens Y positif, la tête d'impression imprime une fois en aller et une fois en retour suivant la direction X en s'incrémentant d'un pas correspondant à la largeur de tête (*Figure 2.6-1*). Des essais de flexion et de perte au feu ont été réalisés sur des éprouvettes imprimées avec ce procédé. Ces essais permettront de comparer les caractéristiques des deux procédés d'impression 3D et de choisir le procédé en fonction des contraintes de fabrication à respecter.



Figure 2.6-1 : Imprimante Smax de chez EXone

2.6.1.1 Essais de flexion 3 points sur les éprouvettes en sable avec liant furanique

Une série de 10 éprouvettes imprimées suivant X (X01-X10) et de 10 éprouvettes imprimées suivant l'axe Y (Y01-Y10) ont été réalisées et testées (*Figure 2.6-2*). La distance entre les appuis est de 150 mm, la vitesse de sollicitation est de 5mm/min. Les éprouvettes prismatiques ont une longueur de 170mm et une section carrée d'arête de 22,6mm.

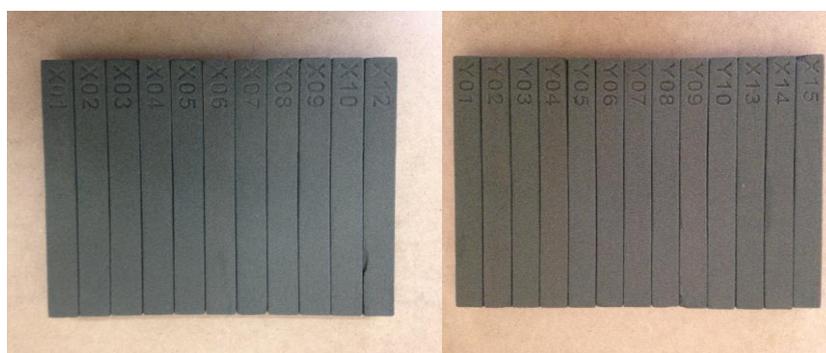


Figure 2.6-2: Eprouvettes en sable imprimées avec le procédé résine furanique

La différence des propriétés mécaniques entre les éprouvettes imprimées suivant la direction X et celle suivant la direction Y sont de 8,5% pour la contrainte en flexion et de 2% pour le module de Young. Ces pourcentages exprimant la différence de propriétés mécaniques entre les directions d'impression sont inférieurs à ceux obtenus avec le procédé phénolique. Les éprouvettes imprimées avec le liant furanique ont donc une meilleure homogénéité au niveau des propriétés mécaniques (*Tableau 2.6-2 ;Tableau 2.6-4*).

Eprouvette	Contrainte de flexion (MPa)	Module de Young (MPa)
X01	3,03	1251,2
X02	3,11	1229,47
X03	2,85	1141,47
X04	2,88	1241,29
X05	3	1245,41
X06	3,2	1203,92
X07	3,19	1198,02
X08	2,95	1150,8
X09	3,12	1134,67
X10	3,2	1302,69
Moyennes	3,053	1209,894
Ecart-types	0,131	54,728

Tableau 2.6-1:Résultats des éprouvettes suivant X

Eprouvette	Contrainte de flexion (MPa)	Module de Young (MPa)
Y01	3,13	1193,38
Y02	2,99	1162,62
Y03	2,86	1106,51
Y04	3,13	1158,79
Y05	3,27	1260,08
Y06	3,53	1333,56
Y07	3,08	1235,29
Y08	3,06	1201,85
Y09	3,24	1290,09
Y10	3,5	1335,23
Moyennes	3,179	1227,74
Ecart-types	0,212	76,944

Tableau 2.6-2:Résultats des éprouvettes suivant Y

Les résultats montrent que le module d'Young ainsi que la résistance en flexion des éprouvettes imprimées avec la résine phénolique sont plus élevées quelle que soit la direction X ou Y. Pour les résultats suivant la direction d'impression X, les éprouvettes avec le liant phénolique ont un module de Young 25% plus élevé que les éprouvettes obtenues avec le liant furanique. La résistance en flexion est plus élevée de 15% pour les éprouvettes en phénolique selon la direction X que les éprouvettes avec liant furanique. Pour la direction Y, il y a une différence de plus de 40% sur le module de Young et sur la résistance à la flexion (*Tableau 2.6-3*). Ces

essais permettent de conclure que les éprouvettes sorties de la machine ont des propriétés mécaniques plus élevées avec le procédé d'impression utilisant le liant phénolique. Les écarts-types sont quasi identiques pour les deux procédés, les deux machines ont donc la même précision.

		Liant phénolique	Liant furanique
Epreuve X	Moyenne de Module de Young (MPa)	1673	1210
	Ecart-type du Module de Young	52	54
	Moyenne de la résistance de flexion maximale (MPa)	3.9	3.2
	Ecart-type de la résistance de flexion maximale	0.13	0.13
Epreuve Y	Moyenne de Module de Young (MPa)	2155	1228
	Ecart-type du Module de Young	96	76
	Moyenne de la résistance de flexion maximale (MPa)	5.3	3.2
	Ecart-type de la résistance de flexion maximale	0.18	0.21

Tableau 2.6-3: Comparatif des résultats obtenus

2.6.1.2 Essais de perte au feu sur les éprouvettes en sable avec liant furanique

Une perte au feu a également été réalisée afin de déterminer le pourcentage de liant réel dans les pièces imprimées. Les éprouvettes ont été calcinées à 800°C pendant 4h. Deux échantillons ont été prélevés et mesurés avec une balance de précision de +/- 0,001g près.

Les échantillons contiennent un pourcentage de liant de 1.9345 % (Tableau 2.6-4) ce qui correspond à 1% de liant en moins que sur les éprouvettes en sable avec la résine phénolique. Suite à un retour d'expérience, les moules et noyaux imprimés en sable avec le liant furanique présentent moins de problème de dégazage et une meilleure perméabilité que ceux réalisés en résine phénolique.

	Echantillon 1	Echantillon 2
Masse avant calcination (g)	14.993	15.000
Masse après calcination (g)	14.703	14.710
Perte au feu (%)	1.938	1.931
Moyenne	1.9345 %	

Tableau 2.6-4: Résultats de perte au feu avec la résine furanique

2.6.2 Essais sur des éprouvettes fabriquées par procédé boîte froide traditionnel avec de la résine phénolique

Les éprouvettes ont été conçues au sein du laboratoire sable du groupe PSA. Celles-ci ont été fabriquées par le procédé de moulage en boîte froide également connu sous le nom de procédé Ashland. Le sable est durci par un gaz catalyseur. Le sable de silice est mélangé avec deux

résines, une résine phénolique et un isocyanate. Ensuite, la prise se fait par le gaz catalyseur le DMEA (Di-Méthyl-Ethyl-Amine). Le taux de liant est de 0,55% et le sable qui compose les éprouvettes est régénéré et 100% broyé. La longueur des éprouvettes est de 180 mm avec une section carrée de 25,5 mm (*Figure 2.6-3*). Six échantillons ont été testés en flexion 3 points sur la machine du laboratoire PSA, ainsi que six dans le laboratoire polymère de l’EiSINe. Les essais se sont déroulés en simultanés à l’EiSINe et au laboratoire PSA, pour permettre la comparaison des résultats obtenus.



Figure 2.6-3:Éprouvettes en moulage par procédé boîte froide

Les résultats montrent un écart de 5% entre les résultats de la fonderie PSA et les résultats obtenus au laboratoire de l’EiSINe. Cet écart est jugé non significatif d’après un test de Student pour comparer les moyennes et d’après l’expertise de la technicienne en charge des essais de flexion au laboratoire PSA. Ceci permet de conclure que le protocole d’essai de flexion est fiable et permet de comparer les différents résultats obtenus. La tenue mécanique des éprouvettes obtenues par impression avec liant phénolique suivant la direction d’impression X (*Tableau 2.6-5*) est comparable à celle du procédé à boîte froide. Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes imprimées suivant l’axe Y restent 30% plus élevées, par rapport aux éprouvettes obtenues par le procédé de boîte froide. Ce constat explique la difficulté de débouillage des noyaux fabriqués par impression avec le liant phénolique par rapport aux noyaux traditionnels.

Eprouvette	Contrainte de flexion (MPa)	Module de Young (MPa)
1	3,58	1561,38
2	3,55	1765,17
3	3,56	1537,02
4	3,57	1523,92
5	3,59	1451,7
6	3,44	1591,46
Moyenne	3,55	1571,78
Ecart-type	0,05	105,65

Tableau 2.6-5:Résultats des essais

2.6.3 Synthèse sur les propriétés des différents procédés

Afin de compléter, l'étude des propriétés mécaniques des moules et des noyaux par impression 3D, une analyse bibliographique des travaux a été menée dans ces domaines. Les travaux recensés en impression 3D sable se concentrent uniquement sur l'impression avec un liant furanique. L'article de Nyembwe.K et al [NYE16a], porte sur la caractérisation du sable avec liant furanique imprimé avec une Voxeljet VX1000. Il s'agit de la comparaison entre des éprouvettes réalisées par fabrication additive (AM) et des éprouvettes réalisées en moulage main (HR) avec étuvage et sans étuvage. L'étuvage est réalisé à 110°C pendant 2 heures. Ces éprouvettes ont subi des essais de traction, de flexion 3 points, de dureté, de friabilité et de rugosité. Les conclusions montrent que l'étuvage améliore de 50 % la résistance en flexion, en traction et la friabilité des éprouvettes en fabrication additive. Ces propriétés sont comparables aux éprouvettes fabriquées par moulage main avec 1% de liant (Figure 2.6-4). Il a été également constaté que l'étuvage n'avait aucun effet sur la dureté et sur l'état de surface des pièces produites en sable (Figure 2.6-5). Ces travaux de recherche montrent que la fabrication des éprouvettes sur l'imprimante VX1000 avec le liant furanique, sont plus sujettes au risque d'abreuvement induisant des défauts matières sur la pièce.

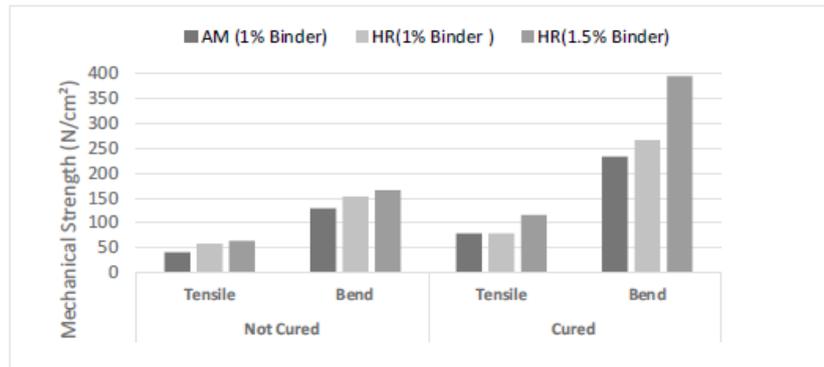


Figure 2.6-4: Résistance mécanique en traction et flexion des éprouvettes en sable [NYE16a]

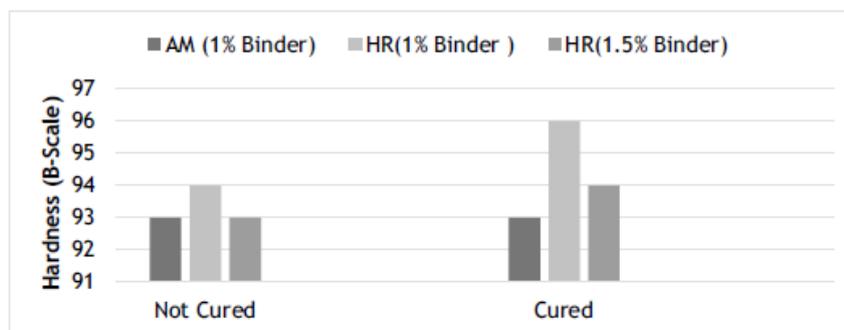


Figure 2.6-5: Dureté des éprouvettes en sables [NYE16a]

L'article de Hackney.P.M et Wooldridge. R [HAC17] se focalise sur la caractérisation de pièces produites par impression 3D sable avec de la résine furanique et l'imprimante S-Print de chez Exone. Les conclusions de cet article sont :

La précision dimensionnelle des éprouvettes est meilleure suivant l'axe Y puis Z et enfin X.

La densité des éprouvettes varie en fonction de la position dans l'espace de construction de la machine à cause des modes de balayage de la machine.

Les essais de traction révèlent une rupture fragile sur les éprouvettes. Les échantillons résistent en traction à une contrainte de 1,9 MPa.

Les essais de compression ont révélé une résistance à la charge comprise entre 11,5 et 12,5 kN avec une contrainte maximale de 5,86 MPa.

Les articles de Mitra.S et al [MIT18] [MIT19], caractérisent les moules et noyaux imprimés avec un liant furanique sur une imprimante Exone S-print. Ces travaux de recherche montrent que l'augmentation de la quantité de liant accroît la résistance mécanique. La recommandation du temps de traitement de 2h à 110°C a été vérifiée et confirmée. Ce traitement optimise la résistance en flexion des éprouvettes ainsi que la perméabilité (Figure 2.6-6).

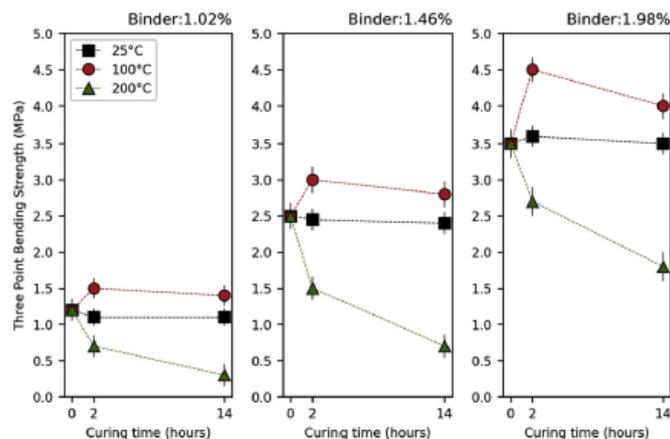


Figure 2.6-6: Effet de l'étuve sur la résistance en flexion 3 pts [MIT18]

Tous ces articles ont permis de comparer les valeurs des différentes caractéristiques des moules obtenues à partir de différents essais et des différents moyens de production.

Les propriétés mécaniques des éprouvettes imprimées en sable avec une résine furanique sont comparables à celles obtenus par le procédé de boîte froide en moulage traditionnel. Les éprouvettes avec 1,98% de liant furanique et après étuvage à 100°C pendant 2h ont des propriétés mécaniques semblables à celles avec le liant phénolique. La résistance en compression est également semblable pour les procédés d'impression furanique et phénolique. Le taux de liant reste le plus élevé pour le procédé d'impression avec résine phénolique. Néanmoins, l'impression avec résine phénolique est celle ayant les meilleures propriétés

mécaniques. Le procédé furanique impose un étuvage après la sortie des pièces de la machine, afin d'obtenir leurs propriétés mécaniques maximales. Enfin, le procédé phénolique présente un taux de liant important générant des problèmes de dégazage.

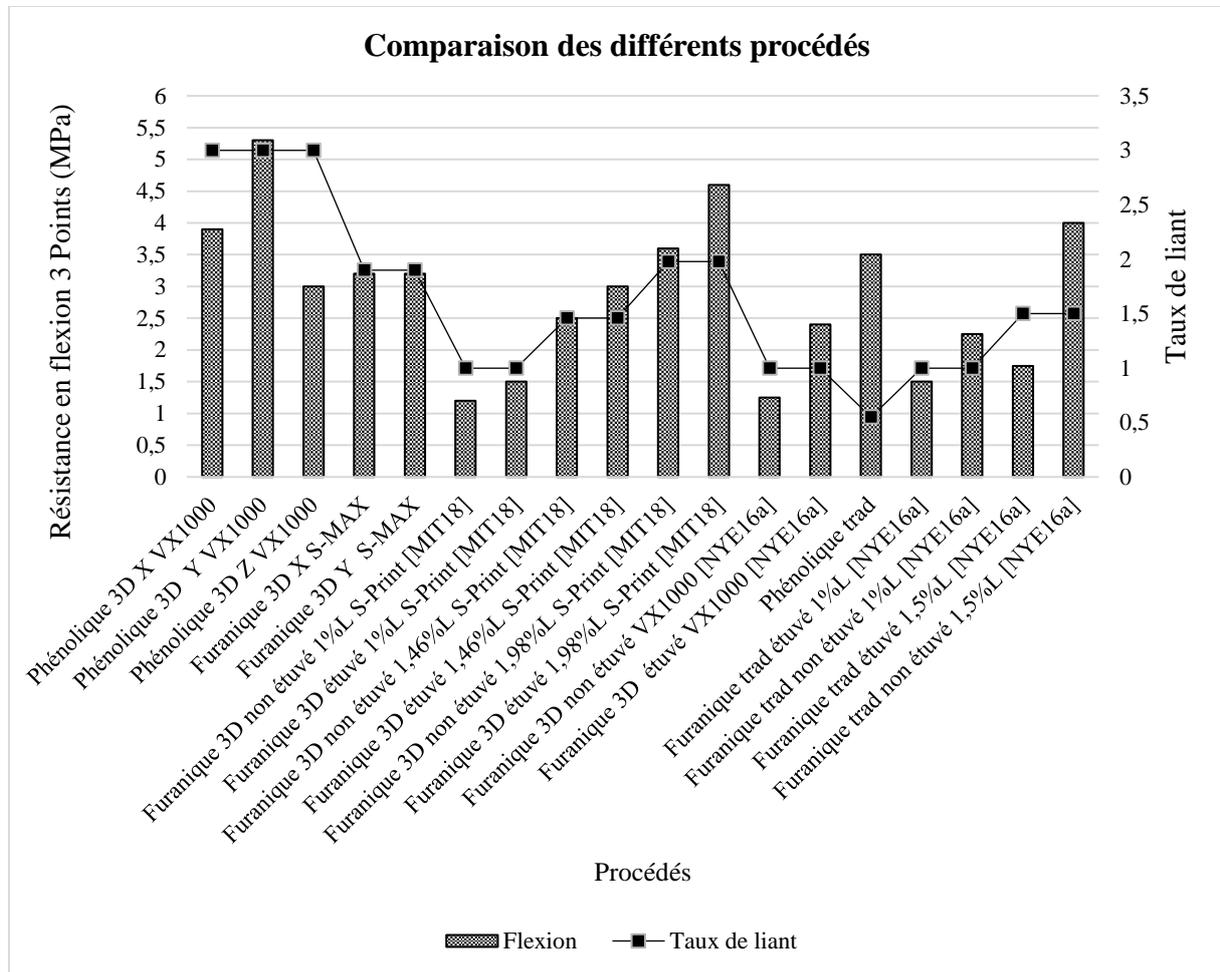


Figure 2.6-7 : Comparatif des différents procédés

2.7 Précision dimensionnelle de l'imprimante 3D sable

La capacité est l'aptitude d'un procédé ou d'un moyen de production à respecter des spécifications dimensionnelles et géométriques, d'après la norme ISO 22514-1 [AFN14]. Celle-ci est mesurée à partir de différents indicateurs C_P , C_{P_k} , P_P , ... exprimés sous forme de rapport entre l'intervalle de tolérance et la variabilité de la machine. On peut également définir la capacité intrinsèque d'un procédé appelée également variabilité qui est égale à 6σ .

La capacité machine a été réalisée à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle sur un lot d'éprouvettes de flexion imprimées suivant différentes directions et selon la disposition spatiale vue précédemment (Figure 2.2-3). La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est un modèle Mistral de chez DEA, rétrofitée par HEXAGON. Le programme de mesure a été

réalisé sur le logiciel PCDMIS 2010 afin de palper les mêmes points sur chaque éprouvette. Ces mesures obtenues permettent de fixer les limites de précision ou la dispersion de l'imprimante VX1000 pour la fabrication des moules et des noyaux. Ainsi en fonction de la précision recherchée pour les moules et les noyaux à imprimer, il est possible de choisir le procédé ou l'orientation le plus adaptée.

Dans cette étude, l'influence de la direction d'impression et de la position spatiale des éprouvettes suivant l'axe Z ont été étudiées afin de définir la précision dimensionnelle de la VX1000.

2.7.1 Influence de la position spatiale suivant l'axe Z d'impression sur la précision dimensionnelle

Les éprouvettes disposées selon les directions, X, Y et XY 45° ont été imprimées sur deux niveaux. Les éprouvettes de 1 à 9 se situent sur le niveau inférieur et celles de 10 à 18 se trouvent sur le niveau supérieur. Chaque éprouvette est mesurée avec les mêmes points de palpation. Les rectitudes ont été mesurées avec un minimum de 10 points palpés par ligne. Les mesures suivantes ont été réalisées : la rectitude des faces latérales et supérieures de l'éprouvette (Lignes 2, 3, 4), la longueur de l'éprouvette (Point 2 à point 3 disposés en vis à vis), la hauteur (ligne 2 à point 5) ainsi que la largeur (ligne 4 à ligne 3) (*Figure 2.7-1*). Les cotes nominales de l'éprouvette sont de 170 mm pour la longueur et de 22,36 mm pour la hauteur et la largeur.

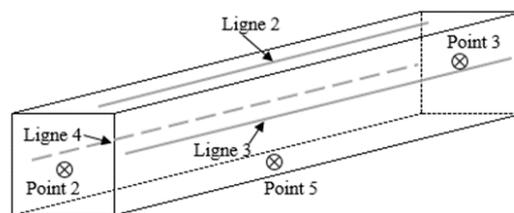


Figure 2.7-1: Schématisation des prises de mesure sur l'éprouvette

Après vérification que les valeurs mesurées suivent une loi normale par le test de Shapiro-Wilk et le test de Cramer-Von Mises pour confirmer les résultats, un test de Student a été effectué afin de comparer les moyennes des résultats obtenus entre les valeurs des éprouvettes situées en dessous et celles situées au-dessus. Les hypothèses sont les suivantes :

H_0 vérifiée soit $p\text{-value} > 0.05$: Les moyennes sont identiques par conséquent la position au niveau supérieur ou inférieur est non significative sur les mesures.

H_1 vérifié soit $p\text{-value} < 0.05$: Les moyennes sont différentes par conséquent la position des éprouvettes dans le bac de construction impacte les résultats de mesure.

Les résultats permettent de conclure que les moyennes sont différentes pour le niveau supérieur et inférieur. L'hypothèse H_1 est retenue pour la rectitude de la ligne 2 des éprouvettes

imprimées selon la direction X, la distance entre le point 2 et la ligne 5 pour les directions X, Y, XY45° (Tableau 2.7-1). Le phénomène d'empilage a donc une influence sur ces mesures.

Eprouvette selon la direction/p-value	Rectitude ligne 2	Rectitude ligne 3	Rectitude ligne 4	Distance ligne 3 à ligne 4	Distance ligne 2 à point 5	Distance point 2 à point 3
X	0,03	0,3	0,7	0,7	$5,6 \cdot 10^{-11}$	0,6
Y	0,6	0,07	0,3	0,1	$9,6 \cdot 10^{-9}$	0,6
XY45°	0,6	0,9	0,1	0,3	$3,0 \cdot 10^{-10}$	0,8

Tableau 2.7-1: Resultat du test de Student comparant les moyennes

La distance entre la ligne 2 et le point 5 correspond à la hauteur de l'éprouvette. La hauteur est orientée suivant l'axe Z de la machine, donc selon l'empilement des couches. Les résultats montrent que l'empilement successif des couches, tasse les éprouvettes situées en dessous, réduisant leur hauteur par rapport à celles du dessus qui subissent moins cet effet.

En revanche, ce phénomène améliore la rectitude des éprouvettes se situant en dessous pour la direction X. Celles-ci se trouvent comprimées par l'étalement du sable sur toute sa longueur, ce qui entraîne une diminution du défaut de forme de rectitude. Ce phénomène est observable que suivant la direction X, car les autres éprouvettes sont comprimées suivant leur largeur, ce qui n'est pas suffisant pour améliorer la rectitude (Tableau 2.7-2).

Eprouvettes	Rectitude ligne 2 moyenne du défaut de forme (mm)	Distance ligne 2 à point 5 moyenne de la mesure obtenue (mm)
X dessous	0,083	21,889
X dessus	0,138	22,340
Y dessous	/	22,053
Y dessus	/	22,427
XY 45° dessous	/	22,004
XY 45° dessus	/	22,406

Tableau 2.7-2: Résultats des mesures MMT

2.7.1.1 Influence de la direction sur la précision dimensionnelle

Les résultats montrent que les éprouvettes imprimées suivant X ont les largeurs les plus éloignées de la cote nominale. La largeur de l'éprouvette X est construite suivant l'axe Y de la machine, qui est l'axe d'étalement du sable et de déposition du liant. La largeur des éprouvettes imprimées selon X est donc contrôlée par la vitesse de la tête d'impression et l'ouverture et fermeture du piézoélectrique distribuant le liant. La synchronisation entre le dépôt de liant et de la vitesse de la tête peut donc engendrer des imprécisions sur cette largeur.

En revanche, les éprouvettes imprimées suivant Y et Z ont leur largeur suivant l'axe X de la machine. La synchronisation entre la vitesse de la tête et le dépôt de liant n'entre donc pas en jeu suivant cet axe. L'imprimante est donc plus précise pour des dimensions se trouvant selon

son axe X. De plus, ce phénomène de synchronisation entre l'ouverture de la tête et sa vitesse est également limité quand les éprouvettes sont orientées à 45° suivant le plan XY. Ce phénomène, combiné à l'engagement progressif du recoater sur la surface en cours d'impression, limite les micro-déplacements et permet ainsi d'avoir les meilleurs résultats dimensionnels sur ces éprouvettes.

L'orientation à 45° suivant les autres plans permet également de limiter ces phénomènes sans être optimum. Les résultats ne montrent pas un très grand écart entre cette orientation et celle suivant Y et Z, ce qui permet de conclure que seule l'orientation à 45° suivant le plan XY permet d'obtenir la meilleure précision dimensionnelle (*Figure 2.7-2*).

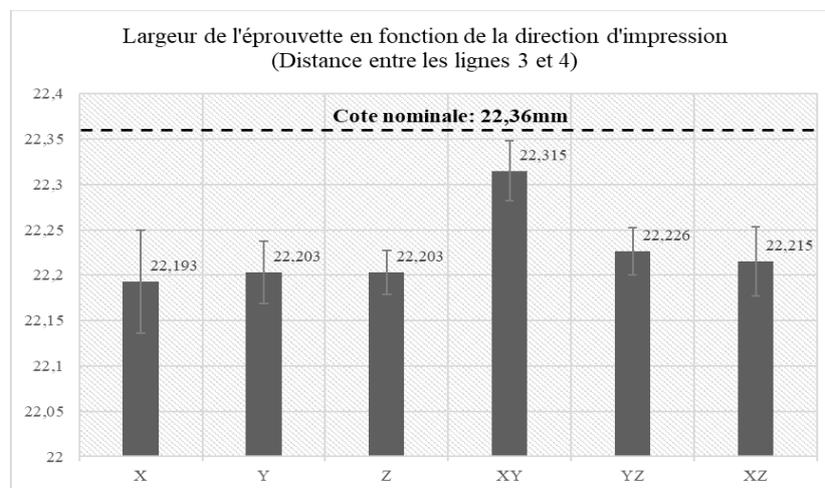


Figure 2.7-2: Résultats des mesures des largeurs d'éprouvettes

Les résultats de la longueur confirment les observations précédentes. Les longueurs positionnées suivant l'axe X de l'imprimante sont les plus proches de la valeur nominale. Les moins bons résultats sont constatés sur les éprouvettes disposées suivant l'axe Z. La longueur de l'éprouvette se trouvant suivant l'axe Z, dépend donc de l'épaisseur de couche de sable déposée par la machine. La taille moyenne de grain est de 140 µm et l'épaisseur des couches de 250 µm, il y a donc un peu plus d'un grain et demi par couche, ce qui est impossible. Les variations de hauteur dépendent de la granulométrie du sable, de sa morphologie ainsi que de la valeur de la hauteur qui doit être un multiple de l'épaisseur des couches. Ces paramètres ne peuvent donc pas être contrôlés et engendrent des variations de mesure importantes suivant l'axe Z (*Figure 2.7-3*). Par exemple, dans le cas des éprouvettes la hauteur est de 22,36 mm soit un nombre de couche de 89,44 pour une épaisseur de couche déposée de 250 µm. Physiquement l'imprimante ne peut pas déposer 0,44 couche, elle en déposera 89 soit une épaisseur de 22,25 mm. Le nombre de couche déposé va agir sur la précision suivant l'axe Z.

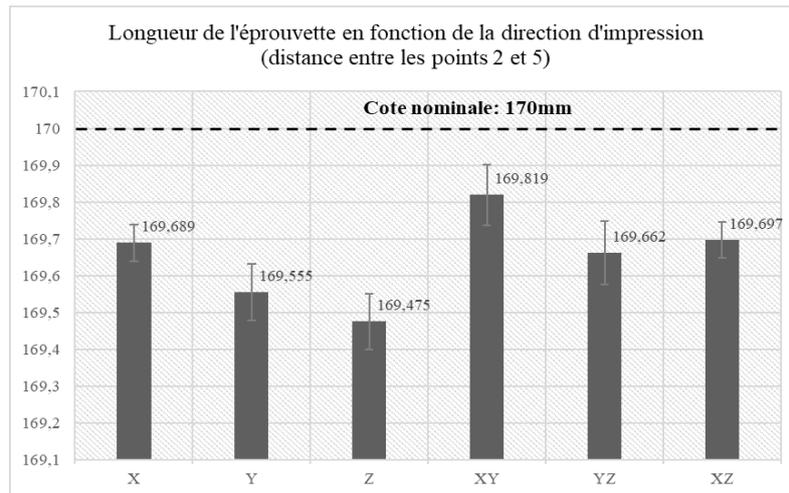


Figure 2.7-3: Résultats des mesures des longueurs d'éprouvettes

Les résultats montrent de très grands écart-types pour les éprouvettes construites suivant X, Y et XY45° (Figure 2.7-4). Ces écart-types sont dus à l'empilement des éprouvettes comme expliqué dans le point précédent avec les tests d'hypothèse. Par conséquent, les valeurs du tableau précédent (Tableau 2.7-2) doivent être utilisées pour comparer les distances obtenues. Les éprouvettes, suivant les directions Y et XY se situant sur le dessus, dépassent respectivement de 0,07 et de 0,05mm la cote nominale. Si le phénomène d'empilage n'est pas pris en considération, les éprouvettes se situant sur le dessus et imprimées suivant la direction X sont celles au plus proche de la cote nominale. En production normale, l'espace de construction de l'imprimante est rempli au maximum pour des questions de rentabilité. Au vu de l'influence de l'empilage sur les dimensions des pièces imprimées, il est difficile de conclure sur la précision dimensionnelle suivant l'axe Z puisque celle-ci est variable en fonction de la hauteur la pièce dans le bac de construction.

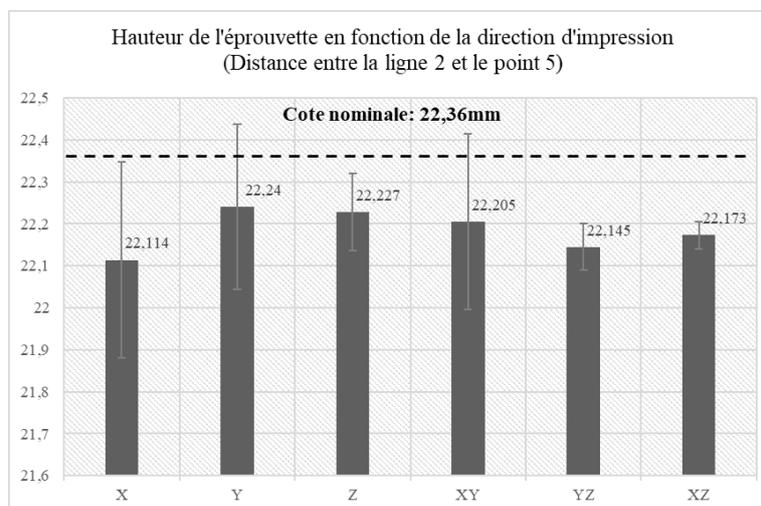


Figure 2.7-4: Résultats des mesures des hauteurs d'éprouvettes

Les résultats montrent que les défauts les plus importants de rectitude de la surface supérieure se trouvent sur les éprouvettes imprimées suivant la direction Z. De plus, les résultats de ces éprouvettes ont un très grand écart type, ce qui montre une mauvaise répétabilité. La rectitude de la face supérieure des éprouvettes imprimées suivant Z dépend de l'alignement suivant l'axe Y des sections d'éprouvettes imprimées en couche par couche. Cet alignement dépend une nouvelle fois de la synchronisation du dépôt de liant et de la vitesse de la tête. Sur une hauteur de 170 mm, ce défaut de rectitude est important par rapport aux autres éprouvettes.

En considérant l'écart-type de la moyenne des résultats obtenus et en faisant abstraction des phénomènes d'empilage, on peut conclure que la précision de la rectitude est la même pour les directions d'impression X, Y, XY45°, leurs faces supérieures se trouvant toutes au niveau du plan XY de la machine, le défaut de rectitude reste le même.

Les éprouvettes imprimées suivant une direction à 45° par rapport au plan YZ ont un défaut de forme de 0,034 mm de plus que les éprouvettes imprimées à 45° par rapport au plan XZ. Cette différence est une nouvelle fois due à l'orientation de l'empilage des strates.

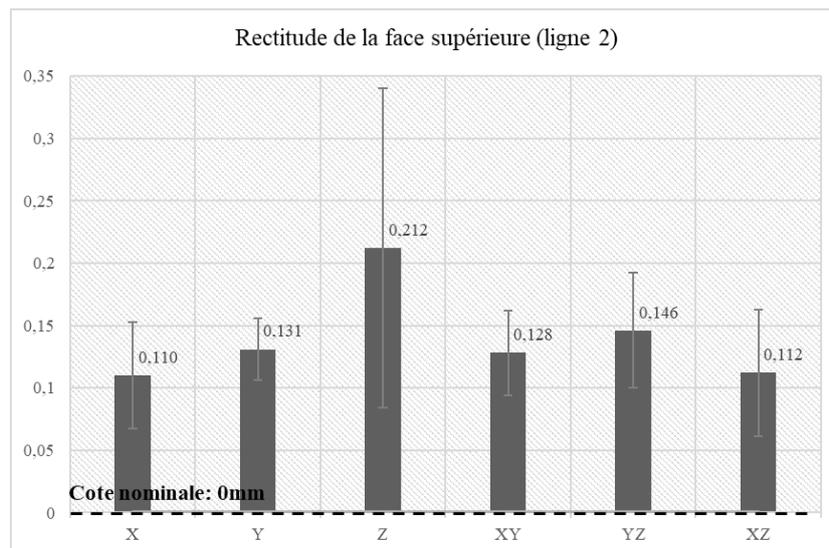


Figure 2.7-5: Résultats des mesures de rectitude de la ligne 2

Les résultats pour les faces latérales montrent une nouvelle fois que toutes les rectitudes qui dépendent de l'alignement des sections suivant Y ont une plus grande déviation que celles qui doivent s'aligner suivant X. Ainsi on obtient la plus grande précision dimensionnelle pour les rectitudes latérales des éprouvettes imprimées en Y, Z et YZ 45° et une moins bonne précision pour celles imprimées suivant X, XY 45° et XZ 45° avec un défaut moins important suivant XY car limité par leur orientation à 45° (Figure 2.7-6 ; Figure 2.7-7).

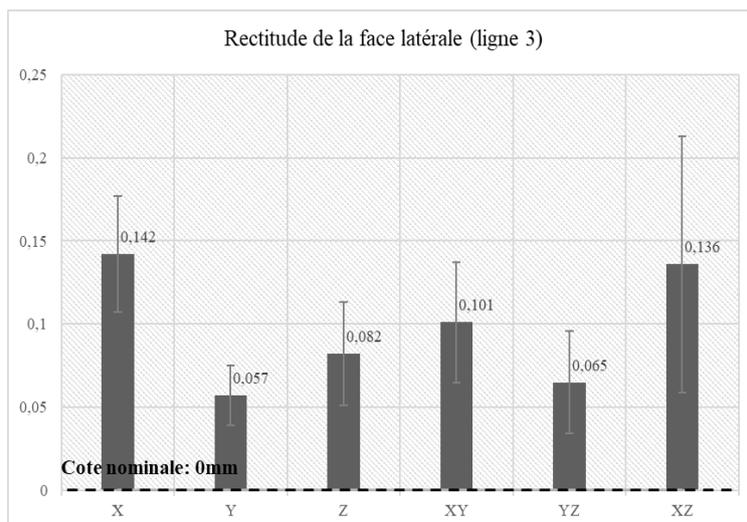


Figure 2.7-6: Résultats des mesures de rectitude de la ligne 3

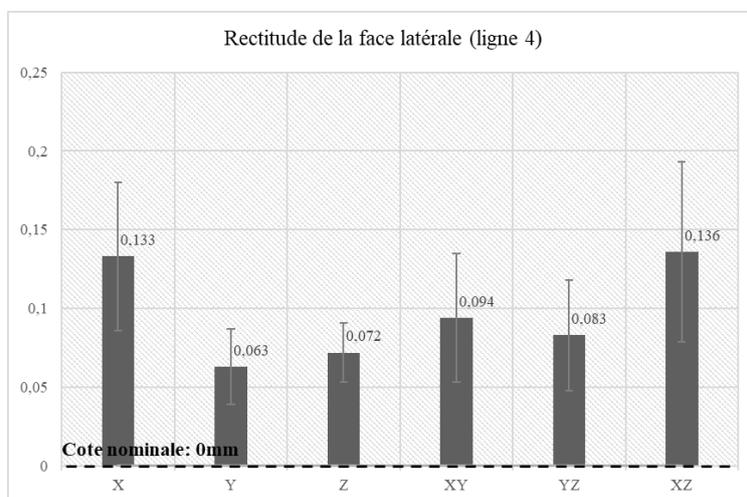


Figure 2.7-7: Résultats des mesures de rectitude de la ligne 4

Les résultats permettent d'établir les conclusions suivantes :

L'imprimante est au plus proche des cotes nominales lorsque les éprouvettes sont orientées à 45° par rapport au plan XY. En revanche, le défaut de rectitude est plus prononcé lorsque les faces des éprouvettes se trouvent suivant l'axe Y de la machine puisque la précision dépend du décalage de la tête en X.

L'imprimante a donc une meilleure précision sur l'axe X puis sur l'axe Y et enfin sur l'axe Z.

2.7.1.2 Définition de la capabilité dimensionnelle de l'imprimante 3D

Une nouvelle série d'éprouvettes a été imprimée, afin d'estimer la capabilité dimensionnelle de la machine en fonction des axes de la machine. Les éprouvettes ont toutes été imprimées suivant la direction Y de la machine et sur un seul lit. Les mesures réalisées sont les mêmes que précédemment la longueur, la largeur, la hauteur ainsi que la longueur (Tableau 2.7-3). Le

défaut de forme mesuré est la rectitude car la longueur étant nettement plus élevée par rapport à la largeur, celle-ci est suffisante pour estimer le défaut des faces. Les intervalles de tolérance sont résumés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 2.7-4*).

Dimension	Largeur	Longueur	Hauteur
Axe sur lequel se situe la mesure	X	Y	Z
Cote nominal	22,36 mm	170 mm	22,36 mm
Déviation par rapport à la cote nominale (mm)	-0,102	-0,258	-0,439
	-0,092	-0,082	-0,464
	-0,074	-0,239	-0,435
	-0,111	-0,234	-0,498
	-0,109	-0,175	-0,486
	-0,088	-0,228	-0,457
	-0,08	-0,068	-0,493
	-0,142	-0,204	-0,478
	-0,045	-0,135	-0,524
	-0,153	-0,142	-0,464
	-0,107	-0,207	-0,465
	-0,07	-0,104	-0,528
	-0,089	-0,192	-0,466
	-0,07	-0,236	-0,423
	-0,074	-0,243	-0,382
	-0,097	-0,125	-0,49
-0,148	-0,132	-0,47	
-0,077	-0,242	-0,471	

Tableau 2.7-3: Déviations mesurées par rapport à la cote nominale

Les mesures révèlent que la machine à une meilleure précision suivant son axe X. La précision selon l'axe Y diffère de 0,1 mm. L'axe Z a la précision la moins bien contrôlée puisqu'elle dépend de la couche déposée et de la granulométrie du sable, paramètres variables (*Tableau 2.7-4*). Un compromis devra donc être trouvé pour produire des pièces avec une bonne résistance mécanique et une précision dimensionnelle optimale.

Axe de la machine	Capabilité dimensionnelle	
	Minimum	Maximum
X	- 0,1 mm	0 mm
Y	- 0,2 mm	0 mm
Z	- 0,5 mm	- 0,3 mm

Tableau 2.7-4: Précision dimensionnelle de la machine suivant ses axes

Les résultats des défauts de formes ont été complétés avec les résultats obtenus précédemment et récapitulés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 2.7-5*). Le défaut de rectitude le moins prononcé se trouve suivant les plans parallèles au plan YZ de la machine. L'imprimante

déposant le liant en aller suivant l'axe Y, les défauts de forme sont donc moins importants pour la rectitude se situant sur les plans parallèles au plan YZ de la machine. Le défaut de rectitude le plus important se situe suivant les plans parallèles au plan XZ de la machine. Ces rectitudes se situant au niveau de l'alignement des couches de sable les unes sur les autres le défaut de forme augmente. Enfin le défaut de forme est deux fois plus important suivant les plans parallèles au plan XY de la machine par rapport à ceux parallèle au plan YZ. Ce défaut est dû à l'étalement du sable qui est plus ou moins régulier en fonction de la granulométrie des grains de sable.

Axe d'impression de l'éprouvette	Plan de la machine	Défaut de forme : rectitude
Y	Suivant XY	0,150 mm
	Suivant YZ	0,07 mm
Z	Suivant YZ	0,08 mm
	Suivant XZ	0,210 mm
X	Suivant XY	0,135 mm
	Suivant XZ	0,130 mm

Tableau 2.7-5: Tableau des défauts de rectitude avec l'imprimante

Conclusion du chapitre 2 :

Propriétés mécaniques et dimensionnelles des moules et noyaux en fabrication additive sable.

Ce chapitre permet d'établir les premières règles de conception des moules et noyaux par impression 3D, à partir d'une caractérisation mécanique, dimensionnelle et physique des éprouvettes imprimées. Dans un premier temps, l'orientation des pièces dans l'espace de conception doit être optimisée afin de garantir les propriétés mécaniques du moule et dimensionnelles des pièces coulées. Dans un second temps, l'architecture des noyaux doit être adaptée à chaque type de pièce afin de faciliter le débouillage des noyaux après la coulée de la pièce. Les essais comparatifs avec d'autres procédés permettent de conclure que les moules et noyaux réalisés par fabrication additive possèdent des propriétés mécaniques similaires au procédé traditionnel suivant l'axe X de la machine et même supérieures suivant l'axe Y. Cette différence de propriétés constatées peut être utilisée pour optimiser la position des moules ou des noyaux dans le bac de construction en fonction des faibles épaisseurs de parois à réaliser. Le taux de liant est plus important en fabrication additive avec la résine phénolique qu'avec le procédé traditionnel ce qui engendre une cohésion beaucoup plus élevée du sable mais des temps de débouillage plus longs et un fort dégazage lors de la coulée, préjudiciable à la santé matière. Les noyaux imprimés avec des liants phénolique et furanique ou réalisés par boîte froide, compte tenu de leurs différentes propriétés, sont candidats à la réalisation des moules hybrides. La capacité machine a montré que la précision dimensionnelle de l'imprimante est optimale suivant l'axe X et que les défauts de rectitude sont les moins importants suivant l'axe Y. La caractérisation des moules réalisées dans ce chapitre 2, va contribuer à l'élaboration des règles métiers inhérentes à l'impression 3D et à la définition d'une méthodologie de conception des moules hybrides.

Chapitre 3

Méthodologie de conception des moules réalisés par impression 3D sable

La conception des moules en sable de fonderie relève du savoir-faire des fondeurs et de leur expérience acquise au cours de leur carrière. Ce savoir-faire n'est pas toujours formalisé dans un processus bien établi. Ce chapitre a pour objectif de formaliser les règles métiers inhérentes aux procédés de moulage traditionnel et aux procédés de fabrication additive de moule en sable. Ces règles sont indispensables à la création d'une méthodologie de conception de moule hybride. Pour ce faire, des études de cas industriels et un recueil du savoir-faire des fondeurs ont été réalisés auprès des fonderies partenaires de ce projet. Ensuite, des tests et des études de moulage ont été effectués sur l'imprimante 3D sable afin de définir les possibilités et les limites de cette technologie. Ces travaux montrent que l'imprimante 3D est adaptée à la réalisation de noyaux et de moules complexes pour des pièces unitaires ou des petites séries suivant des règles métiers différentes des procédés de fonderie conventionnels. La productivité de cette machine est assurée par l'optimisation du calepinage des différents éléments à imprimer dans le volume de construction de l'imprimante 3D.

Chapitre 3 : Méthodologie de conception des moules en impression 3D sable

L'expertise du moulage traditionnel nécessaire pour réaliser une nouvelle pièce de fonderie a été recueillie auprès des fonderies partenaires du projet MONARCHIES. À la suite de leurs réponses, nous avons pu établir un processus général d'étude de moulage.

3.1 Processus traditionnel d'étude de moulage en sable

Chaque fonderie a ses propres compétences et ses limites au niveau des dimensions et du poids des pièces ainsi qu'au niveau de la gamme des matériaux maîtrisés. Les fonderies partenaires coulent des pièces en fonte ou en acier ou en alliage d'aluminium ou en alliage de cuivre. Ce choix implique des équipements particuliers de fusion, de moulage et de manutention comme un cubilot, un four électrique, des châssis aux dimensions limitées ainsi que des moyens de manutention de poche de coulée. L'entreprise doit vérifier que la commande soit compatible avec ses infrastructures.

La solidification des pièces coulées s'accompagne d'un retrait sur la pièce en fonction du matériau. Le fondeur doit effectuer une homothétie sur la DFN de la pièce afin d'obtenir la pièce aux bonnes dimensions après la coulée. Ce retrait, fonction du matériau, est compris entre 0,4 à 2,5 %.

Le moulage de la pièce se fait à partir de plaques modèles pour les surfaces extérieures et des boîtes à noyaux pour les surfaces internes et pour les surfaces externes en contre-dépouille. Pour réaliser ces différents outillages, il faut définir les directions de démoulage et les plans de joint afin d'extraire le modèle du moule et d'assurer la jonction entre les châssis. Le joint est une surface qui contient la plus grande section projetée ou le plan de symétrie de la pièce. Il faut choisir un nombre minimal de joints, de préférence plans et perpendiculaires au sens de démoulage. Dans le cas de plusieurs joints, le moulage est appelé moulage en chape.

Pour des raisons économiques, le fondeur cherche à disposer le maximum de pièces dans le châssis. Ce nombre de pièces par moule dépend de la complexité des pièces à produire et des dimensions des châssis disponibles.

A partir de la direction de démoulage, l'habillage de la pièce consiste à placer un angle de dépouille sur les surfaces parallèles à cette direction afin de faciliter l'extraction du modèle. Les surfaces fonctionnelles requérant une grande précision dimensionnelle et un bon état de surface devront, si possible, appartenir à la même partie de moule ou être reprises par usinage.

Pour ce faire, il faut prévoir une surépaisseur d'usinage pour supprimer l'effet du moulage sur les surfaces et pour assurer une épaisseur de copeau minimum pour l'opération d'usinage.

La moulabilité de la pièce étant définie, il faut concevoir un système de remplissage et de solidification afin d'obtenir une pièce conforme tant au niveau dimensionnel qu'au niveau de la santé matière. Le système d'alimentation du métal dans le moule comprend la descente de coulée, le canal d'alimentation, l'attaque et les événements (*Figure 1.3-5*). Pendant la solidification, le métal subit une contraction et un apport de métal supplémentaire doit venir compenser cette réduction de volume par l'apport de masselottes situées au-dessus des parties massives de la pièce.

Le système de remplissage et d'alimentation est calculé en fonction de la pièce et de la matière à couler. Il faut prévoir dans le moule les emplacements pour des filtres, des manchons et des refroidisseurs. La grappe ainsi conçue est simulée numériquement afin d'optimiser le remplissage et la solidification de la pièce ainsi que la mise au mille.

A partir de la grappe optimisée, la conception des outillages se traduit par la réalisation des plaques modèles et des boîtes à noyaux. La conception de ces outillages en CAO se fait par copie des surfaces moulantes en surfacique ou par des opérations booléennes en fonction de la complexité de la pièce et des surfaces de joint. Souvent, cette étape est confiée au modelleur, au risque pour les fondeurs de se voir dépossédé d'une partie de leur expertise.

Cette méthodologie de moulage adaptée aux procédés traditionnels de fonderie, doit être intégralement appliquée au procédé d'impression 3D, quand il s'agit de valider la faisabilité du procédé de fonderie sur une présérie et d'obtenir un premier retour d'expérience pour la production sérielle (*Figure 3.1-1*).

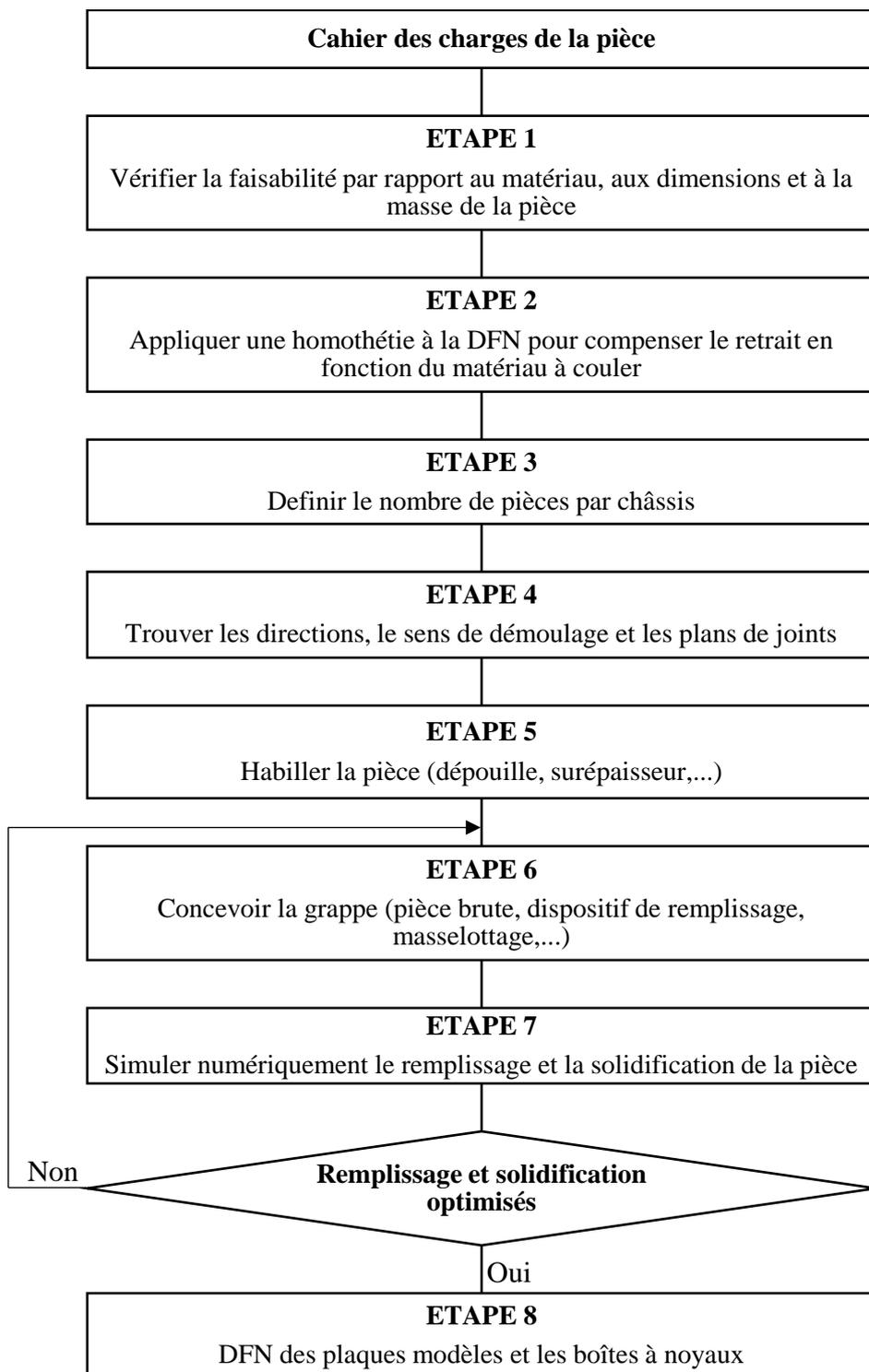


Figure 3.1-1: Processus d'étude de moulage traditionnel

3.2 Les nouvelles perspectives de conception de pièce en fonderie via l'impression

L'impression 3D ouvre de nouvelles possibilités de conception aux bureaux d'études. Celles-ci étaient impossibles auparavant à cause des contraintes inhérentes liées aux procédés classiques de fabrication. Cette partie dresse donc un bilan des attentes industriels par rapport à la technologie d'impression 3D sable.

3.2.1 Attentes des fondeurs par rapport à l'impression 3D sable

À la suite du recueil des attentes des fondeurs, plusieurs points d'intérêts pour la technologie 3D sont ressortis des entreprises dont :

La possibilité de pouvoir assembler plusieurs noyaux réalisés indépendamment en fonderie traditionnelle en un seul noyau. Ceci permettra de gagner du temps au niveau de l'opération de remoulage et de limiter les dispersions. De plus, la dépose des noyaux complexes dans le moule pourrait être robotisée.

Ci-après un exemple de moule pouvant être étudié dans le cadre de l'assemblage de noyaux, ce moule comporte plus d'une dizaine de noyaux (*Figure 3.2 1*).



Figure 3.2-1 : Photographie d'un moule ouvert chez la fonderie Vignon

La possibilité de concevoir directement dans le moule un marquage dédié à chaque pièce sur n'importe quelle surface de la pièce soit en relief ou en creux. Ce marquage garantit la traçabilité du produit et facilite le montage des pièces dans leur ensemble par l'adjonction de symboles ou de flèches précisant le sens de montage.

La possibilité de réduire la massivité des moules pour faciliter leur préhension et le portage des noyaux par les opérateurs. Ce gain de massivité peut se traduire par des noyaux creux ou par des structures lattices autour des surfaces moulantes.

Un autre aspect concerne la réduction du délai de fabrication. En effet, la fabrication additive permet de fabriquer des moules pour des petites séries ou pour des pièces unitaires dans un

temps très court sans la réalisation d'un outillage. Cette rapidité d'exécution permet également de recueillir un premier retour d'expérience pour les futures productions en série et d'accroître la réactivité des entreprises face à des clients de plus en plus exigeants.

3.2.2 Autres attentes des industriels : la réalisation d'outillages intégrant le «conformal cooling »

Le coût de l'impression 3D sable est relativement faible par rapport à d'autres procédés d'impression comme le SLM (Selective Laser Melting). Cette technologie permet d'obtenir des pièces complexes sans augmenter le coût de production et en limitant le temps de production. De plus, l'impression permet également d'obtenir des ébauches d'outillages complexes pour la fonderie, la forge et l'injection plastique intégrant un circuit de régulation sur le principe du conformal cooling. Hormis le faible coût, ce nouveau moyen de production constitue un réel avantage puisque la fonderie est un procédé maîtrisé et qu'elle dispose d'une large gamme de matériaux. De plus, la fonderie permet l'obtention de pièces de très grandes dimensions avec la possibilité d'y intégrer le conformal cooling. Un diagramme FAST (Function Analysis System Technique) a été élaboré afin de recenser les différentes solutions pour réaliser le conformal cooling en fonderie (Figure 3.2-2).

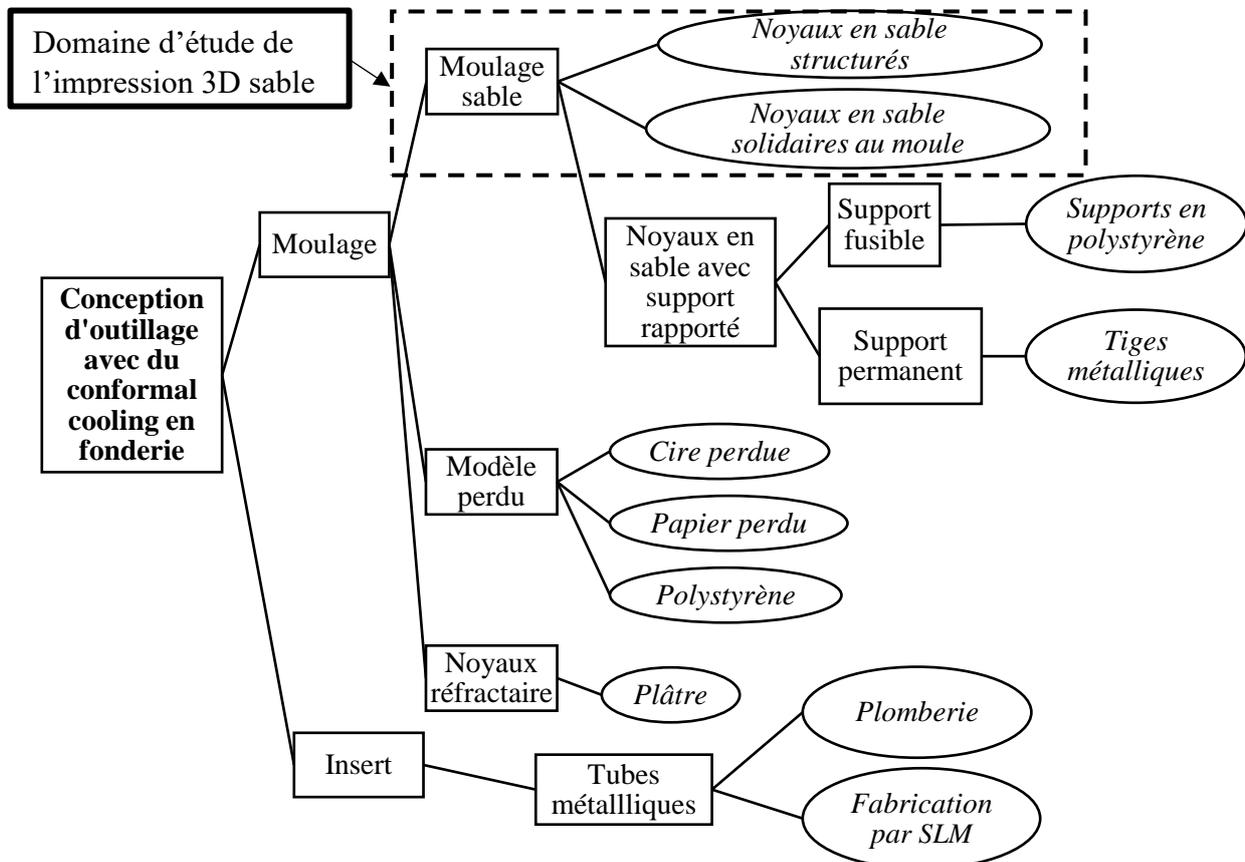


Figure 3.2-2: FAST d'outillage en conformal cooling par la fonderie

Les attentes de l'impression 3D de moules étant établies, les règles métiers doivent être formalisées afin de déterminer les limites et les possibilités de ce procédé.

3.3 Formalisation des règles métiers

L'impression 3D sable permet d'obtenir les moules et les noyaux sans la réalisation d'outillage telles que des boîtes à noyaux ou des plaques modèles. Par conséquent, les règles métiers de conception des moules par impression 3D sable ne dépendent plus des mêmes contraintes que celles des procédés traditionnels. Celles-ci doivent donc être formalisées pour les fondeurs. Des premiers travaux issus du laboratoire ITHEMM ont été réalisées afin d'établir les premières règles de conception des moules imprimés en sable [BON15]. Cette étude a été poursuivie et complétée dans le cadre de la thèse. Chaque règle métier est numérotées de **R1** à **R6** afin de pouvoir y faire référence par la suite.

3.3.1.1 Habillage de la pièce **R1**

Les dépuilles pour le moulage traditionnel permettent d'extraire le modèle du moule sans détériorer celui-ci. Pour l'impression 3D sable, les dépuilles ne sont pas nécessaires puisque les surfaces moulantes du moule et des noyaux sont obtenues directement, couche par couche, par ce nouveau procédé. Les surfaces en contre-dépuilles sont également directement réalisables par le moule sans la nécessité de concevoir des noyaux de paroi indispensables, pour les moyens conventionnels.

Les surépaisseurs d'usinage sont moins importantes, puisqu'il n'y a plus de dépuille et que la précision dimensionnelle des moules imprimées est supérieure à celle des procédés traditionnels.

Les repérages, motifs et autres identifications des pièces sont réalisables directement sur les moules et peuvent être dédiés à chaque pièce produite (*Figure 3.3-1*).

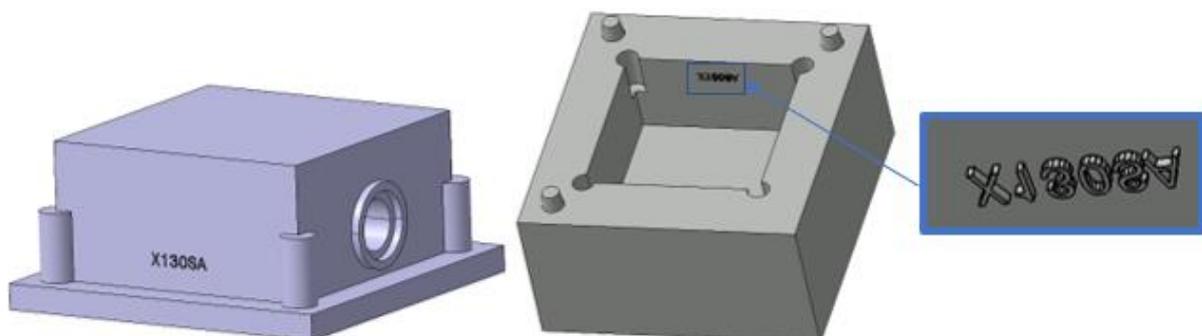


Figure 3.3-1: Exemple de marquage en creux

3.3.1.1 Morçèlement du moule

- Accessibilité aux surfaces **R2** :

La notion de plan de joint devient caduque puisqu'il n'y a pas de modèle à retirer. Il s'agit ici de trouver des plans d'accès aux surfaces moulantes permettant leur nettoyage et la dépose éventuel d'enduit. Ce nettoyage à l'aide d'un pinceau ou d'une soufflette à air comprimé est nécessaire pour garantir l'état de surface de la pièce moulée. Ces plans d'accès favoriseront également le passage d'outils nécessaires pour enduire les surfaces moulantes. Cet enduit évite l'apparition de certains défauts sur les pièces fabriquées (abreuvage, porosité, gales...). Cette couche peut être déposée au pinceau, par trempe ou par pulvérisation. Dans certains cas d'accessibilité difficile, le moule ou le noyau doit être morcelé afin de faciliter le nettoyage et la dépose d'enduit (*Figure 3.3-2*).

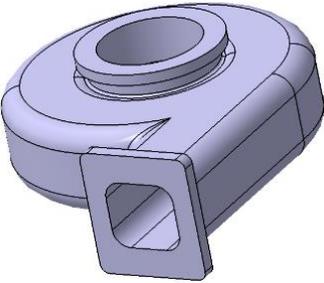
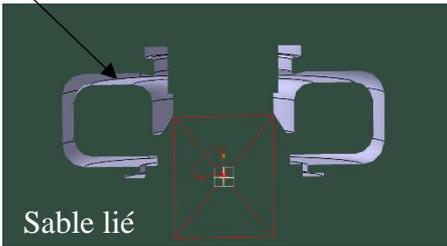
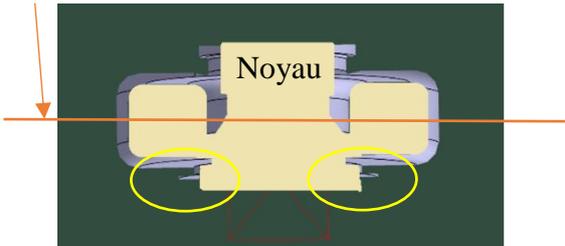
<i>Exemple d'accès aux surfaces dans un moule de carter de turbine de turbocompresseur</i>	
	
Cas où le moule est monobloc	Cas où le moule est coupé par un plan d'accès
<p>Sable non lié</p>  <p>Sable lié</p>	<p>Plan d'accès aux surfaces</p>  <p>Noyau</p>
<p>Dans ce cas un moule monobloc est réalisable. Néanmoins, l'ouverture constituée par le système d'alimentation ne permet pas l'évacuation du sable non lié. (Partie verte sable lié, partie grise sable non lié). Il faut donc une ouverture plus conséquente pour permettre un nettoyage assurant la qualité de la pièce coulée.</p>	<p>Pour assurer le nettoyage dans ce cas, il faut un plan de coupe. Cette situation met aussi en avant le fait que les contre-dépouilles entourées en jaune peuvent aussi gêner le nettoyage. Dans ce cas, la création d'un noyau est alors nécessaire pour le nettoyage des surfaces inférieures (entourées en jaune).</p>

Figure 3.3-2: Exemple de nécessité d'accès pour le nettoyage

- Espace de construction de l'imprimante **R3** :

Le morçèlement du moule ou des noyaux dépend du volume constructible de l'imprimante 3D. Dans le cas de l'utilisation de l'imprimante VX1000, l'espace de construction est de 1000x600x500 mm. A ce volume de construction, il faut retirer la largeur des deux murs de construction imposés par le fabricant soit un espace constructible réel de 970x560x500 mm.

Pour illustrer ce problème de morçelage, un moule avec les dimensions de 670x427x640 mm est retenu. Le volume du moule dépasse le volume constructible de l'imprimante, il devra donc être morçelé suivant l'axe Y et reconçu pour être imprimé (*Figure 3.3-3*). Ce morçèlement doit être conçu en évitant les bavures dans les zones fonctionnelles de la pièce à couler et en assurant un repositionnement des différentes parties par des plots de centrage.

Le morçelage est nécessaire lorsque le volume du moule dépasse le volume de construction mais également pour limiter le poids des parties de moules à manipuler.

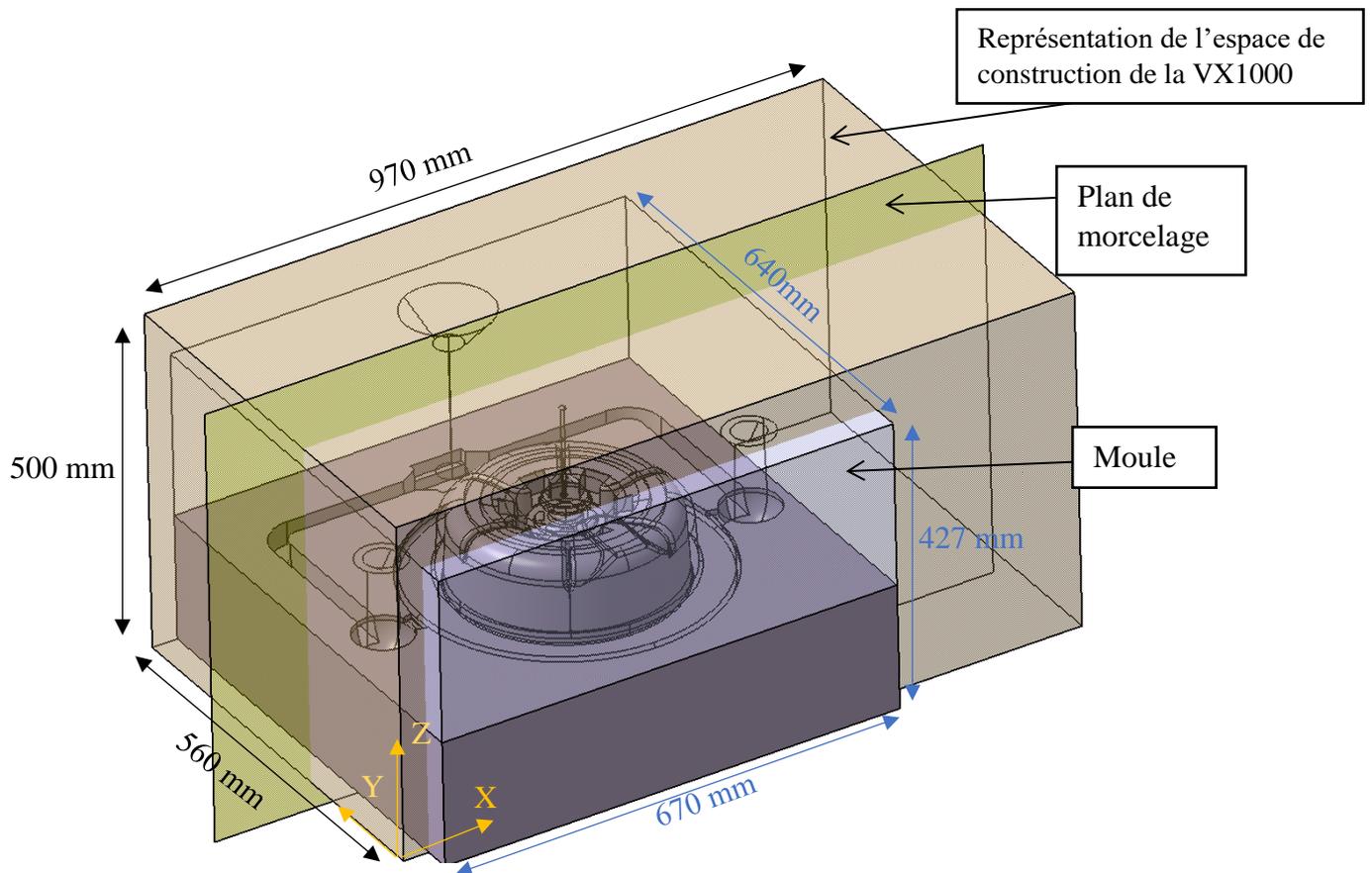


Figure 3.3-3: Exemple de moule dans la VX1000

- Mise en place de dispositifs dans le moule **R4** :

Pour assurer la qualité des pièces coulées et maîtriser la santé matière lors du refroidissement de la pièce, différents éléments peuvent être ajoutés dans le moule :

Les filtres permettant de retenir les impuretés contenues dans le métal en fusion et également de limiter la vitesse d'entrée du métal dans le moule. Pour maintenir ces filtres en place, des logements de forme prismatique sont conçus dans le moule.

Dans certaine zone du moule, souvent au niveau des masselottes, il est possible de mettre des manchons endothermique ou exothermique en fonction du besoin de conserver ou d'évacuer la chaleur. Ces dispositifs permettent de contrôler la direction de solidification de la pièce et d'éviter les problèmes de manque matière dû au mauvais placement du point chaud dans la pièce. De ce fait, il est nécessaire de prévoir des plans d'accès dans le moule pour insérer ces manchons de forme conique ou cylindrique.

Il est également possible de disposer des refroidisseurs dans le moule, pour le contrôle de la thermique de celui-ci. Ces refroidisseurs sont des pièces métalliques pour lesquelles, il faut prévoir un accès au logement recevant ces pièces.

L'exemple du moulage de la bride de fixation ci-après (*Figure 3.3-4*) montre la nécessité de créer deux plans d'accès, un pour la mise en place d'un manchon et d'un filtre représenté en vert et un autre représenté en orange permettant le nettoyage optimal de la surface moulante.

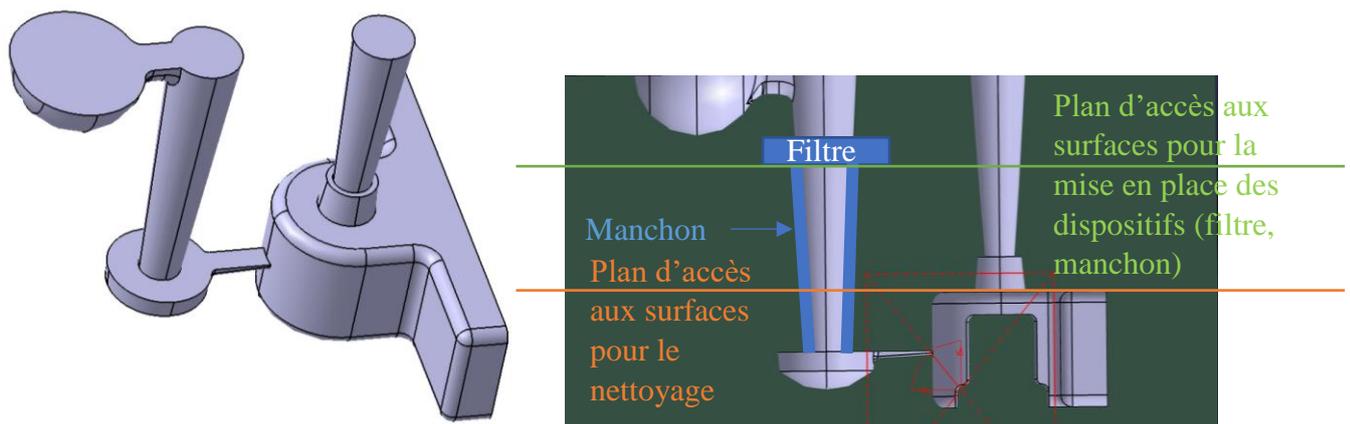


Figure 3.3-4: Exemple de plans d'accès pour le moule d'une bride de fixation

3.3.1.2 Assemblage du moule **R5**

Pour assurer l'étanchéité du moule lors de la coulée dans certain cas, un joint de colle est nécessaire entre les parties de moule. Dans ce cas, il faut concevoir une rainure permettant de contenir l'excédent de colle.

Le remmoulage des moules en impression 3D doit être assuré par la création de plots de positionnement en creux et en relief. Il faut également prévoir des détrompeurs, pour éviter les erreurs de remmoulage. Dans l'exemple ci-après (*Figure 3.3-5 a.*), les trois plots assurent simultanément le positionnement des moules ainsi que le bon indexage de la partie supérieure par rapport à la partie inférieure. Pour certaines formes de surfaces d'accès complexes, le remmoulage des différentes parties se fait directement sur celles-ci sans la nécessité de créer des plots (*Figure 3.3-5 b.*).

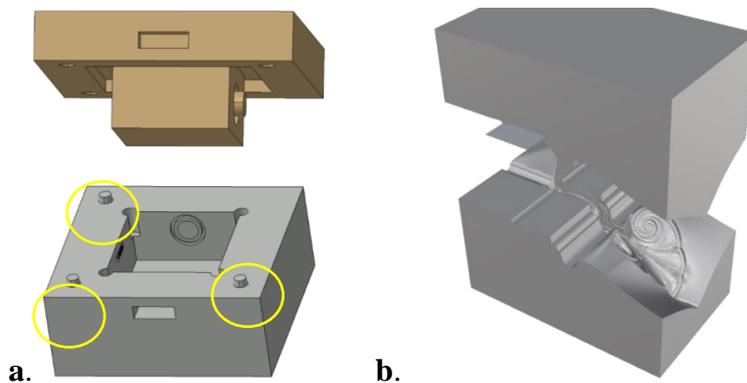


Figure 3.3-5: Exemple de plots et de détrompeurs

Les noyaux doivent avoir des portées suffisantes pour permettre leur maintien en position pendant la coulée. Si l'ancrage n'est pas suffisant, ceux-ci peuvent être collés. L'impression 3D permet également d'assembler plusieurs noyaux en un seul afin d'optimiser le temps de remmoulage. Il faut néanmoins prendre des précautions afin d'éviter la casse de ces noyaux qui pourrait subvenir à cause du porte-à-faux ou de l'élancement trop important. Le basculement du noyau peut être évité, en allégeant la partie moulante par des structures creuses, en augmentant la taille de sa portée, ou en insérant des entretoises. La figure (*Figure 3.3-6*) illustre le noyau en porte-à-faux, pour lequel la portée a été augmentée et la partie moulante évidée.

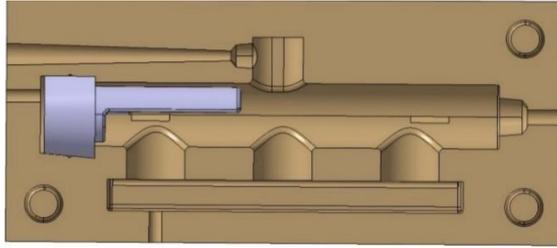


Figure 3.3-6 : Illustration du risque de porte-à-faux

L'élancement du noyau est défini par le ratio de sa longueur sur sa section. Ce problème d'élancement, induisant une certaine fragilité, peut être résolu de plusieurs manières, soit en modifiant la forme de la section (section circulaire à elliptique), soit en lui rajoutant des portées ou des supports intermédiaires, soit en le morcelant réduisant ainsi son élancement. La figure ci-dessous (Figure 3.3-7) représente la modélisation d'un moule contenant des noyaux destinés à réaliser des canaux de régulation. Chaque canal modélisé en vert et orange sur la figure a une entrée et une sortie, ce qui n'est pas suffisant pour garantir la solidité et le maintien des noyaux pendant la coulée. Pour ce cas, des supports intermédiaires ont été insérés dans le moule.

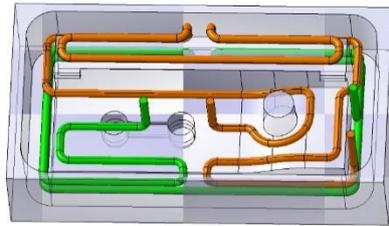


Figure 3.3-7: Illustration du problème d'élancement de noyaux

Toutefois ces modifications doivent être réalisées dans le respect du cahier des charges de la pièce car l'ajout de portées peut engendrer des trous supplémentaires dans la pièce qui devront être rebouchés. L'ajout de support tel que des entretoises métallique ou fusible peut engendrer des inclusions dans la pièce, préjudiciables dans certains cas à la santé matière de la pièce.

Les noyaux ne nécessitant pas un passage à l'enduit et ayant un espace suffisant pour le nettoyage, peuvent être solidaires du moule par leurs portées (Figure 3.3-8). Cette conception permet de réduire le temps de remoulage, d'augmenter la rigidité des surfaces moulantes et la précision dimensionnelle.



Figure 3.3-8: Photographie d'une partie de moule dont les noyaux sont solidaires

Pour les moules et noyaux de grandes dimensions, des éléments de manutention doivent être prévus, tels que des poignées rentrantes ou des alésages débouchants pour y introduire des barres de levage (formes entourées en jaune sur la figure ci-dessous) (*Figure 3.3-9*).

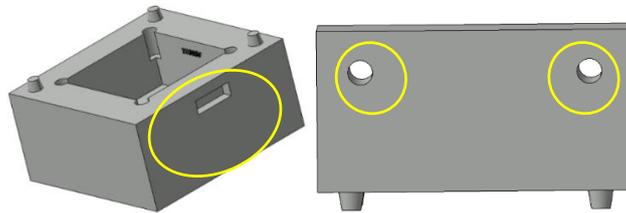


Figure 3.3-9: Elements de manutention sur les moules

3.3.1.3 Structures et dimensionnement des moules et noyaux **R6**

L'impression 3D permet d'élargir le champ des possibilités en conception et notamment de produire plus de pièces dans un seul moule et d'assembler plusieurs noyaux en un seul.

Les noyaux en fabrication additive contiennent 3% de liant en masse, ce qui est environ 3 fois plus important que les noyaux traditionnels. Leur mode de dégradation est différent, à la suite d'un retour d'expérience, il a été relevé que les moules permettant l'évacuation des dégagements gazeux produisaient des pièces de meilleure qualité métallurgique. Des événements et tirages d'air doivent donc être conçus afin de faciliter l'évacuation de ces dégagements gazeux. Ceux-ci seront réalisés directement par impression 3D. Ces tirages d'air seront obtenus par la fabrication de noyaux creux (*Figure 3.3-10 a.*) communiquant avec des alésages dans les parties de moule (*Figure 3.3-10 b.*).

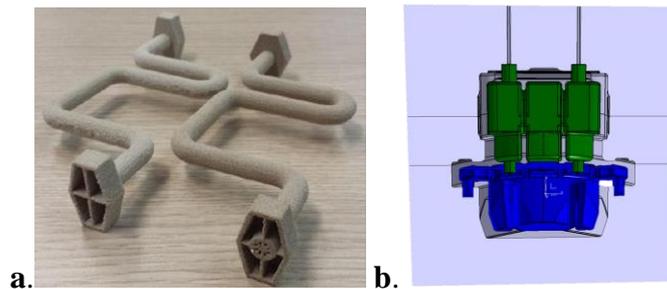


Figure 3.3-10: Exemples d'évents et de tirage d'air

Les noyaux creux facilitent l'évacuation des gaz, limitent les contraintes sur la pièce lors du refroidissement et facilitent la débarrassabilité des noyaux après la coulée. Par exemple, sur une structure interne du noyau en forme d'étoile (*Figure 3.3-11*) des amorces de rupture se créent sur le noyau lors du refroidissement du métal de la pièce, facilitant ainsi la contraction du métal et limitant ainsi les contraintes dans la pièce.



Figure 3.3-11: Schématisation de la structure en étoile

Le temps d'impression dépendant principalement de la hauteur du moule à réaliser. Il convient donc de limiter la hauteur des moules à produire afin de réduire le coût et le délai de production. Ce coût peut être optimisé en chargeant au maximum l'espace de construction de la VX1000 et en réduisant la hauteur du moule par la réalisation du système d'alimentation par des moyens conventionnels.

Les moules en impression 3D sont maintenus fermés pendant la coulée par le positionnement d'une charge sur le dessus de celui-ci. Par conséquent, il convient de s'assurer qu'une surface utile soit suffisante pour placer des charges.

Les épaisseurs de sable autour des surfaces moulantes et des systèmes de coulée et de solidification doivent être suffisantes pour résister aux contraintes thermomécaniques et à la pression métallo-statique. Par retour d'expérience, l'épaisseur conseillée autour des surfaces moulantes est de 50 mm. L'épaisseur minimale de paroi de noyaux, à la suite des essais de flexion, est de 4 mm. Le diamètre minimal de noyau dépend de son élancement et de son orientation par rapport à la pression métallo statique.

Enfin, les préconisations d'orientation et de stockage des pièces émises dans le chapitre 2 doivent être appliquées afin de garantir les propriétés fonctionnelles requises.

Le processus d'étude moulage dépend des règles métiers inhérentes au procédé d'impression 3D. Ces règles métiers pour l'impression 3D sont maintenant formalisées et peuvent alimenter le DFAM. Compte tenu des différences importantes par rapport au procédé de moulage conventionnel, un nouveau processus d'étude de moulage peut être élaboré.

3.4 Processus d'étude de moulage pour l'impression 3D

L'impression 3D permet la conception de formes plus complexes et d'ajouter de nouvelles fonctions aux moules et noyaux. De ce fait, les étapes de l'étude de moulage s'en trouvent modifiées.

Les premières étapes de l'étude de moulage en impression 3D consistent à appliquer une homothétie sur la pièce afin de compenser le retrait à l'état solide de l'alliage coulé et à définir les surépaisseurs d'usinage. Ensuite, le système d'alimentation et de solidification est conçu et

vérifié par simulation. Enfin les règles métiers sont appliqués étape par étape afin de morceler le moule.

Les moules conçus par impression 3D sont des moules en motte qui ne sont pas enfermés dans des châssis. Parfois, une opération supplémentaire de mise en châssis peut donc s'avérer utile pour des petits moules ou pour rapporter les systèmes d'alimentation par des moyens conventionnels.

La définition numérique des différentes parties du moule et des noyaux est conçue à partir de l'extraction des surfaces externes et internes de la grappe, des surfaces d'accès et des plans de morcelage. Le moule est constitué de différents blocs prismatiques dont les limites sont définies d'une part, par les surfaces moulantes, les surfaces d'accès et les plans de morcelage et d'autre part, par des plans respectant une épaisseur minimale de 50 mm par rapport aux surfaces moulantes. Les noyaux sont construits à partir des surfaces moulantes internes, des portées de noyau, des surfaces d'accès et des plans de morcelage.

Toutes ces étapes peuvent être résumées en un processus d'étude de moulage nommé I3D (*Figure 3.4-1*).

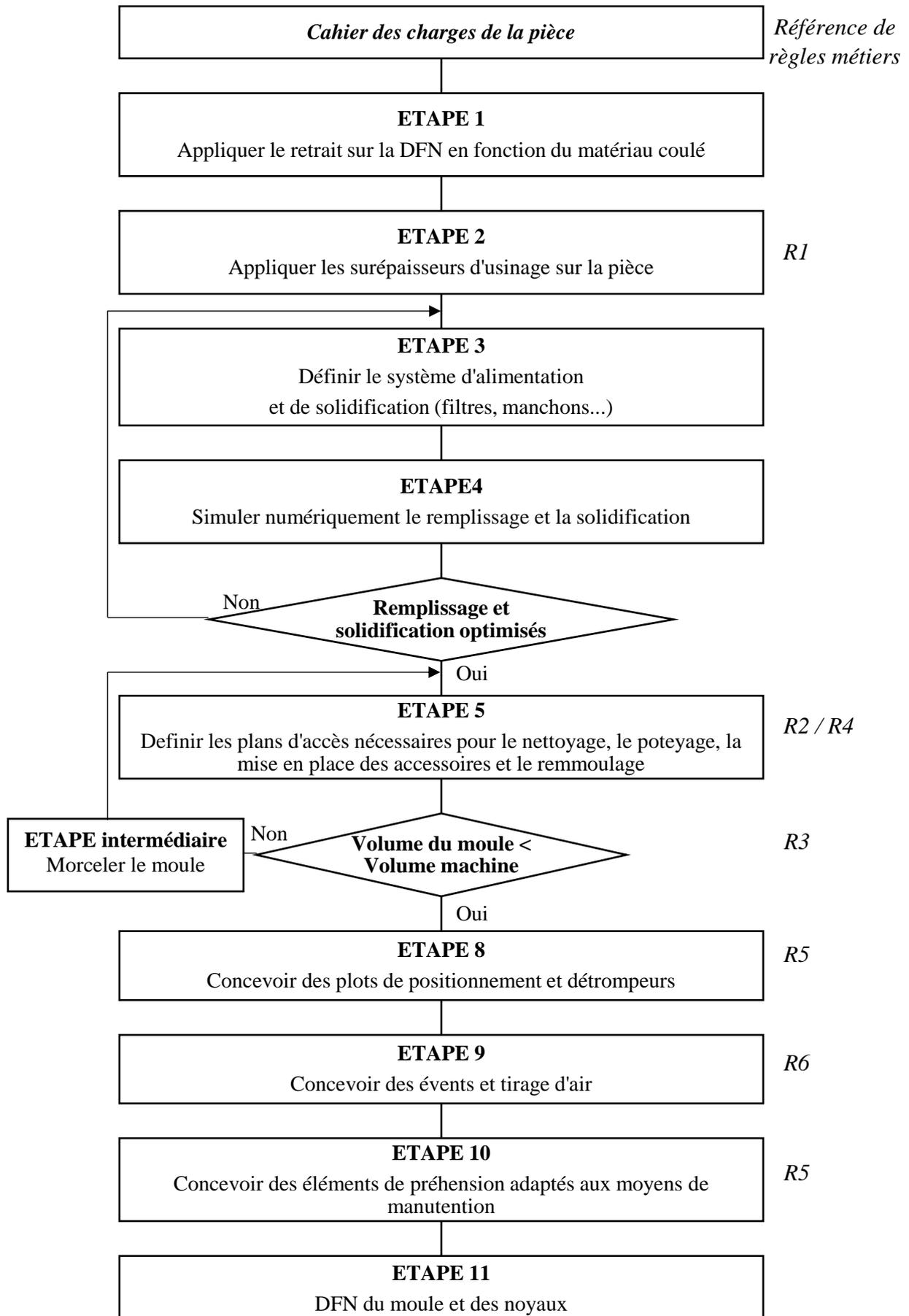


Figure 3.4-1: Processus d'étude de moulage I3D

3.5 Application des règles métiers et du processus de moulage

Afin de vérifier que les règles métiers de l'impression 3D ont été respectées pour concevoir les moules et valider la conception avant le lancement de son impression, une check-list a été créée (ANNEXE K). Cette check-list reprend les étapes du processus de moulage définies précédemment. Quatre pièces ont été sélectionnées pour l'application des règles métier, ces quatre pièces sont chacune dans un alliage différent et possèdent des morphologies différentes, mettant en application différentes règles. La première pièce est en fonte et possède un marquage. La seconde pièce est en alliage d'aluminium, possède un noyau complexe à concevoir, impose à insérer des dispositifs dans le moule et à réaliser un morcelage du moule avant impression compte tenu de sa taille importante. La troisième pièce est en laiton et comporte de nombreuses cavités impliquant des noyaux fragiles. Enfin, la dernière pièce est en alliage d'aluminium et correspond à un outillage de vulcanisation contenant un circuit de régulation.

3.5.1 Pièce 1 : Carter renvoi d'angle

Il s'agit de l'étude de moulage d'un carter à renvoi d'angle en fonte à graphite lamellaire de dénomination : EN GJL 250 (Figure 3.5-1).

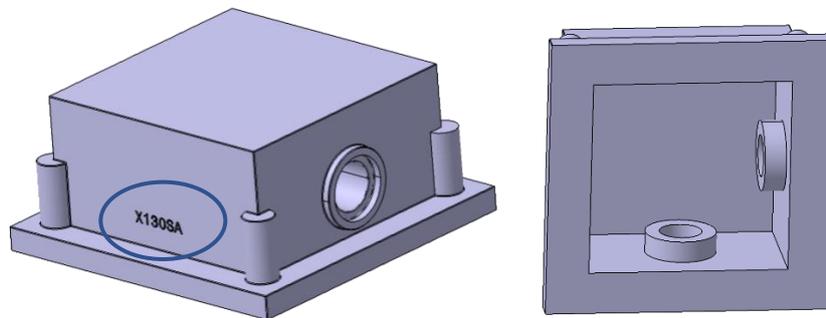


Figure 3.5-1: Définition numérique du carter

La cartographie des zones fonctionnelles de la pièce a été réalisée, afin de concevoir le moule (Figure 3.5-2). La conception du moule doit assurer une liaison appui plan sur la surface inférieure représentée en jaune, une liaison pivot glissant et deux appuis plans représentés en rose, ainsi que quatre trous de fixation représentés par des plots en vert sur la figure (Figure 3.5-2). Les principales difficultés de cette pièce se situent au niveau des alésages débouchant de part et d'autre, de la forme enveloppe impliquant des contre-dépouilles difficilement réalisables en moulage traditionnel (parties en rose) et de la présence du marquage en creux situé sur une face externe de la pièce, entouré en bleu sur la figure précédente (Figure 3.5-1).

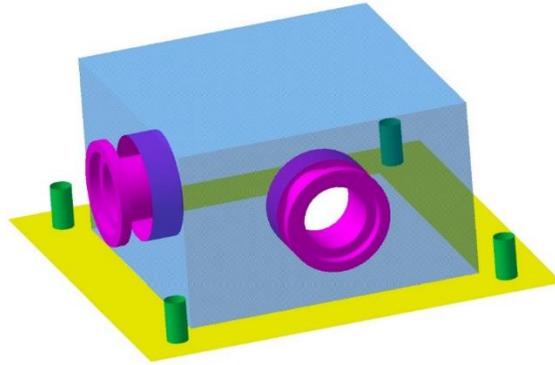


Figure 3.5-2: Zones fonctionnelles du carter

Pour cette première étude de moulage, le système de remplissage et de solidification n'a pas été pris en compte afin de simplifier l'étude. Compte tenu des possibilités de l'imprimante 3D sable, la conception d'un moule monobloc est réalisable tout en respectant les surfaces fonctionnelles. Le découpage du moule en deux parties s'avère nécessaire pour nettoyer les surfaces moulantes ainsi que les reliefs assurant le marquage de la pièce. Ce choix de conception implique un risque de toile dans les deux alésages, causé par le jeu de remmoulage entre la partie supérieure en marron et inférieure du moule en gris sur la figure ci-dessous (Figure 3.5-3).

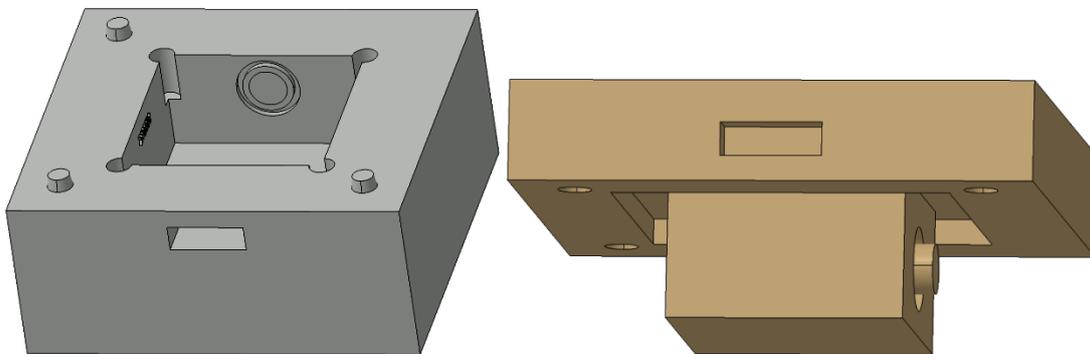


Figure 3.5-3: Définition numérique du moule pour le carter

Le plan d'ouverture du moule assure l'accès aux surfaces moulantes pour leur nettoyage et un éventuel accès pour le passage d'un enduit. Le volume enveloppe étant de 310x310x140mm pour la partie grise du moule et de 310x310x130mm pour la partie marron, la taille du moule est compatible avec le volume constructible de la machine (Figure 3.5-4).

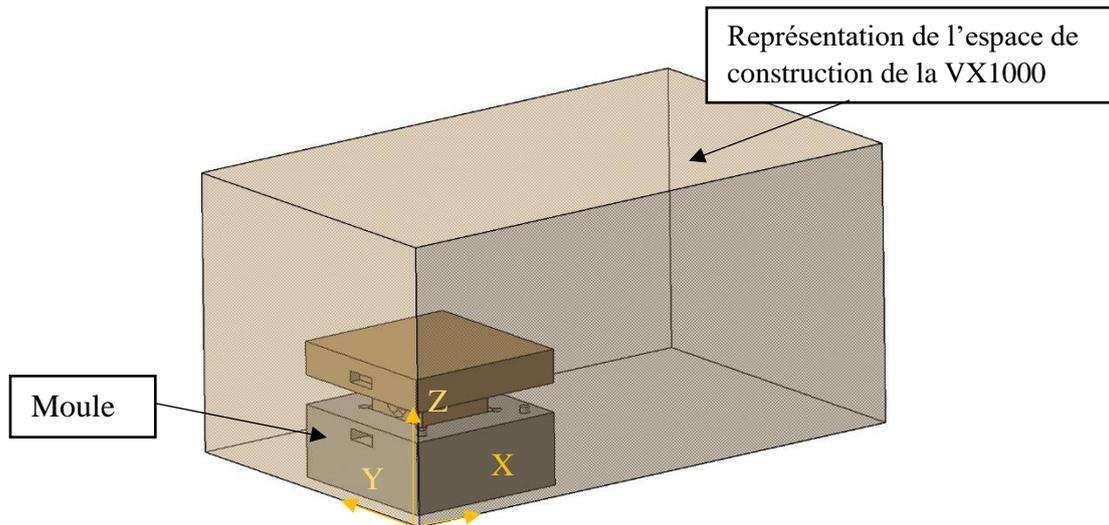


Figure 3.5-4: Placement du moule dans l'imprimante

Le placement de plusieurs moules reste à optimiser en fonction du nombre de moules à produire, pour réduire le temps et le coût de production. Les trois plots de positionnement assurent l'alignement de la partie supérieure et inférieure du moule, ainsi que le bon indexage entre ces deux parties de moule. Chaque partie de moule comporte des poignées rentrantes facilitant leur manutention par les opérateurs sachant que la masse de chaque partie est inférieure à 20 kilogrammes. Les dimensions du moule ont été optimisées en conservant une épaisseur minimale de 50 mm de sable entre les surfaces moulantes et le bord extérieur du moule, tout en assurant une forme prismatique du moule. La check-list a été vérifiée pour s'assurer que l'étude de moulage respecte les règles établies précédemment (ANNEXE L).

3.5.2 Pièce 2 : Chapeau

Il s'agit de l'étude de moulage d'une pièce nommée chapeau en aluminium de désignation Al Si 13 (Figure 3.5-5).

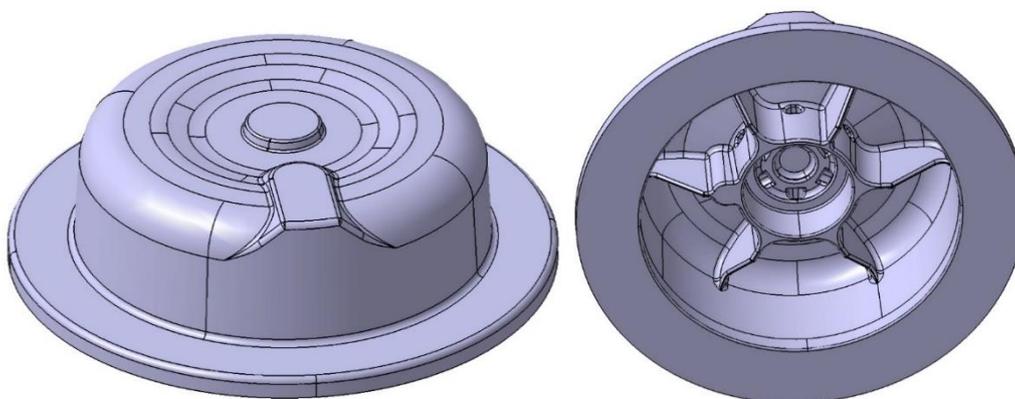


Figure 3.5-5:DFN du chapeau

Cette pièce ne comporte pas de difficultés particulières sur ses surfaces extérieures. Néanmoins, ses formes internes compliquent la conception du moule en moulage traditionnel, contraignant

le fondeur à concevoir plusieurs boîtes à noyaux pour les formes débouchantes en partie supérieure. L'impression 3D du moule de cette pièce permet d'obtenir les « 6 doigts » entourés en jaune sur la figure ci-dessous (*Figure 3.5-6*) en un seul noyau.

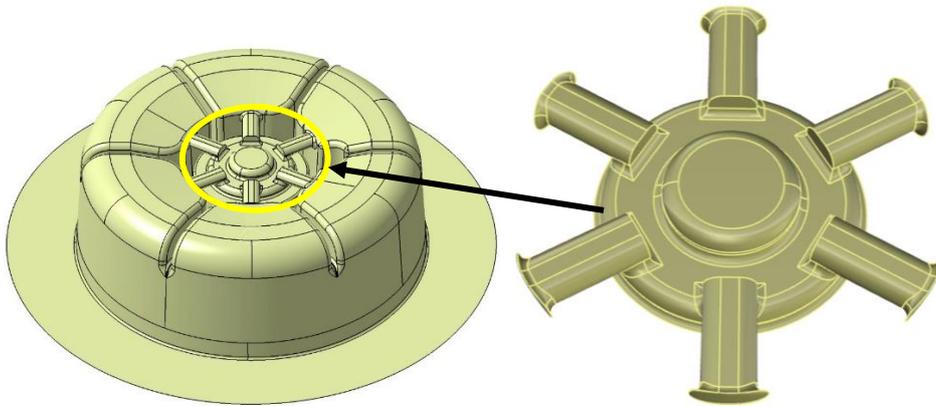


Figure 3.5-6: Surfaces internes extraites du chapeau

La contrainte d'accès aux surfaces pour le nettoyage des parties moulantes et la mise en place d'un filtre en bas de la descente de coulée et de manchons pour les masselottes, impose la conception d'un moule en deux parties (*Figure 3.5-7*).

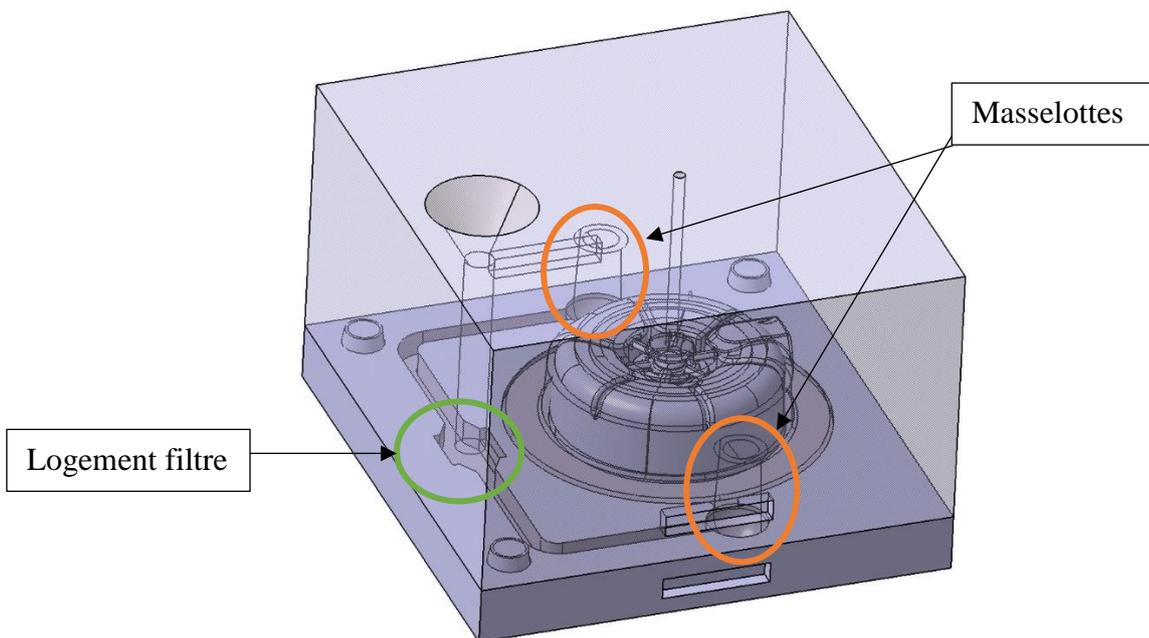


Figure 3.5-7: DFN du moule destiné à l'impression

La taille du moule est optimisée en respectant les limites acceptables pour la résistance de celui-ci durant la coulée. Les dimensions englobantes du moule sont de 683,5x660x456 mm. La dimension de ce moule n'est donc pas compatible avec la taille de l'espace de construction de l'imprimante VX1000. Deux solutions se présentent, soit changer d'imprimante et prendre

l'imprimante VX2000, offrant un espace de construction de 2000x1000x1000 mm ou soit morceler le moule pour le rendre compatible avec l'espace de construction de la VX1000, solution retenue pour l'étude. Le morçèlement du moule a été déterminé en choisissant un plan coupant la moitié de la pièce à couler et sans laisser de géométrie créant des parties fines en sable au niveau des « 6 doigts » (Figure 3.5-8).

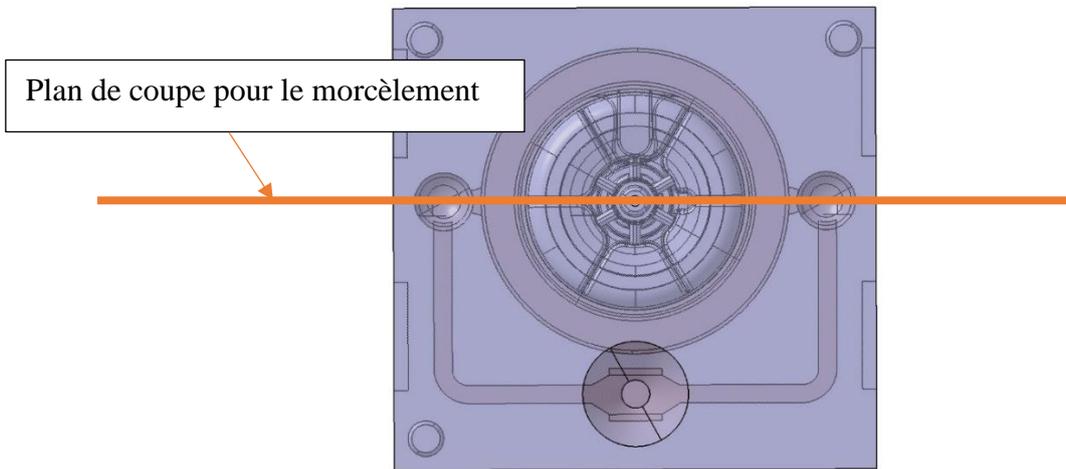


Figure 3.5-8: Représentation du plan de morçèlement

Les parties supérieure et inférieure ont été coupées selon le même plan afin de faciliter l'assemblage du moule. Le moule peut maintenant être imprimé en 2 lots d'impression dans la VX1000. Un premier lancement avec les parties gauches du moule ayant un encombrement de 683,5x383x475 mm et un second avec les parties droites ayant un encombrement de 683,5x276x475 mm. Des plots de positionnement, des détrompeurs ainsi que des poignées rentrantes ont été conçus sur chaque partie de moule, assurant ainsi le bon assemblage de chaque partie et leur maniabilité (Figure 3.5-9).

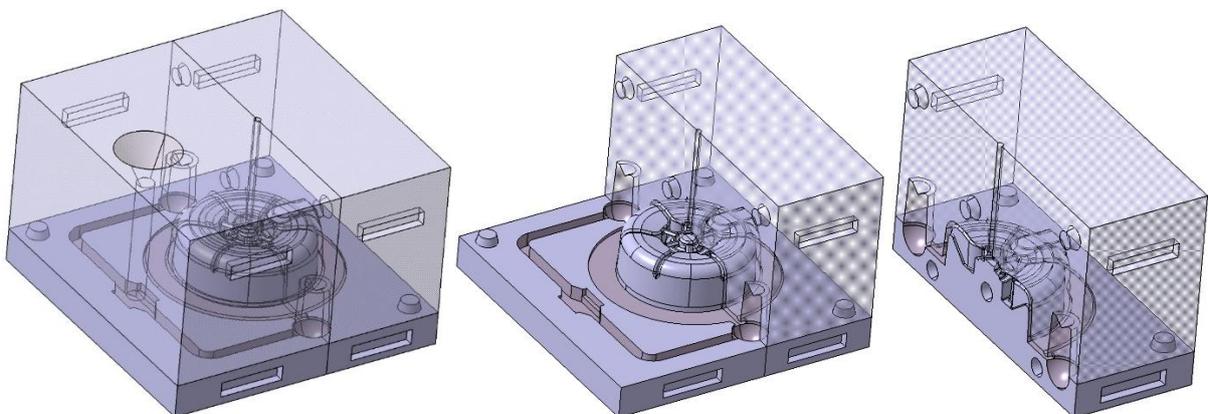


Figure 3.5-9: Vus des détrompeurs, plot de positionnement et poignées.

La masse des parties supérieures sont de 115 kg et 82 kg et celle des parties inférieures sont de 28 kg et 22 kg. La masse des parties supérieures étant importante, des moyens de préhension plus adaptés au système de levage devront être modélisés par des alésages débouchants permettant l'introduction de barre de levage. L'évacuation des gaz est assurée par un tirage d'air situé au centre du moule supérieur. De plus, une structure creuse peut être envisagée pour les parties inférieures du moule, limitant ainsi le dégazage et améliorant la débouabilité de la pièce. Pour optimiser la hauteur du moule, la partie extérieure de la pièce peut être fabriquée en moulage traditionnel, puisqu'elle ne comporte pas de contre-dépouille, contrairement à la partie inférieure. Ce choix dépendra du nombre de pièces à produire. En effet, pour une pièce unitaire, la fabrication d'une plaque modèle est trop onéreuse mais la réalisation d'un modèle par fabrication additive (FDM, SLA, SLS, ...) peut être envisagé pour un coût modique. La connaissance des critères de production s'avère indispensable pour choisir la solution optimale de conception de moule.

La check-list établie est donc validée pour une fabrication par impression sur la VX1000 (ANNEXE M).

3.5.3 Pièce 3 : Mélangeur

Il s'agit de l'étude de moulage d'un mélangeur en laiton CuZn42Al. Cette pièce comporte trois cavités dont deux reliées par des alésages de 11 mm de diamètre, entourés en orange sur la figure ci-dessous (Figure 3.5-10). Ce faible diamètre engendre une fragilité avec un risque important de rupture du noyau entre ces parties.

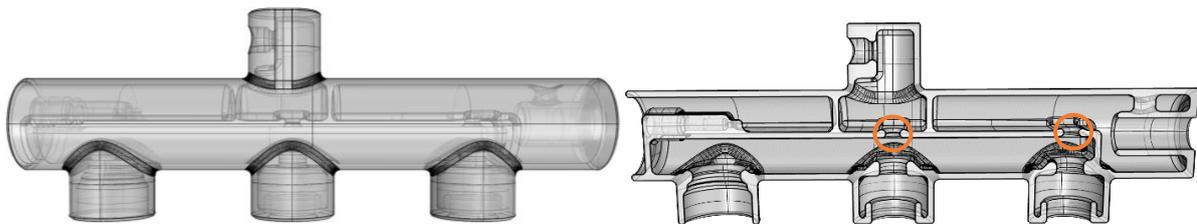


Figure 3.5-10:DFN du mélangeur (vue de gauche pièce complète et vue de droite pièce coupée)

Le système d'alimentation ainsi que les événements ont été modélisés afin de concevoir le moule (Figure 3.5-11).

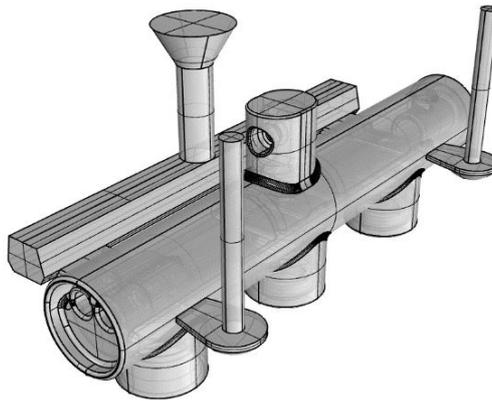


Figure 3.5-11: Grappe du mélangeur

La surface moulante ne nécessite pas un passage à l'enduit, les parties moulantes internes peuvent donc être rattachée au moule. Un plan d'accès passant par le plan médian de la pièce a été conçu afin de dessabler les surfaces moulantes (Figure 3.5-12). Les parties moulantes internes rattachées au moule sont creuses, facilitant le dégazage des noyaux pendant la coulée. De ce fait, des ouvertures ont été créées, d'une part pour enlever le sable non lié de ces parties, et d'autre part, pour évacuer les gaz lors de la coulée de la pièce. Les dimensions des parties de moules sont compatibles avec l'espace de construction de la VX1000, puisque leurs dimensions sont de 438x193,5x120 mm pour la partie contenant les noyaux et de 438x193,5x90 mm pour l'autre partie. Trois plots de positionnement ont été modélisés assurant l'alignement des deux parties de moule, ainsi que le bon indexage entre la partie supérieure et la partie inférieure. La masse des moules est respectivement de 12 kg et 9 kg, un opérateur peut donc manipuler chaque partie et transporter le moule fermé sans souci particulier. Néanmoins, des poignées rentrantes ont été modélisées sur les côtés de chaque partie de moule afin d'éviter une préhension par les noyaux. Le nombre de noyaux est optimisé puisque ceux-ci sont solidaires par leurs portées au niveau du moule. Les noyaux étant creux, la débourrabilité de la pièce est maîtrisée, ainsi que le risque de fissures sur la pièce lors du refroidissement du métal. Le moule est coulé en position verticale afin d'assurer une alimentation en source, le maintien du moule fermé se fait par deux serre-joints.

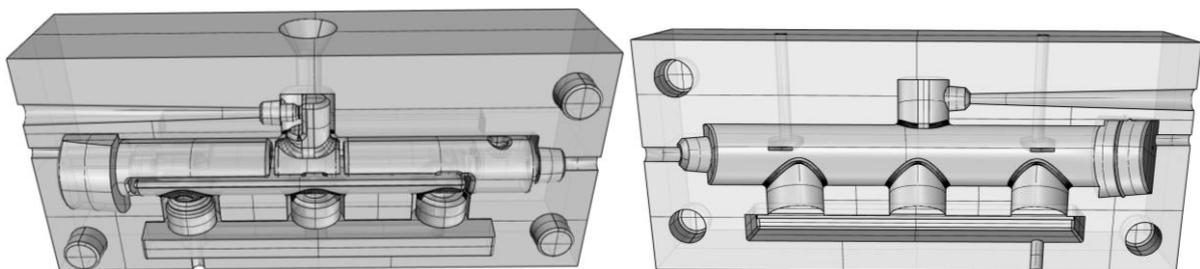


Figure 3.5-12: Moule du mélangeur

Tous les noyaux ont été évidés, avec un renfort de la partie la plus fragile des logements internes par l'insertion de tiges métalliques (*Figure 3.5-13*). Il s'est avéré que ces parties ont cassées durant le dessablage. Une nouvelle conception du noyau a donc été réalisée par des parties totalement pleines, pour assurer une meilleure résistance au détriment d'un décochage plus long.

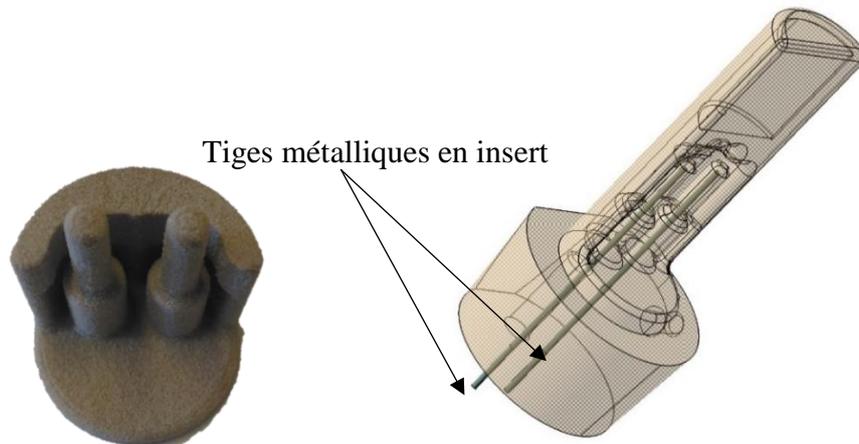


Figure 3.5-13: Partie de noyau en impression test à gauche ; à droite DFN comportant les tiges

La check-list est donc validée après une impression test entraînant une reconception du moule (*ANNEXE N*).

3.5.4 Pièce : Outillage de vulcanisation

Une étude de moulage a été réalisée pour vérifier si les règles métiers s'appliquaient également à ces nouvelles perspectives de conception des outillages.

L'outillage de vulcanisation comporte un circuit de régulation thermique permettant de contrôler la réaction de vulcanisation (*Figure 3.5-14*). La pièce moulée dans cet outillage est une pièce pleine en caoutchouc avec des surfaces sans dépouille et sans fonction esthétique. L'éjection de la pièce du moule se fera grâce au retrait de celle-ci. La difficulté réside dans la réalisation du noyau assurant le circuit de régulation du moule suivant le principe du conformal cooling. Ce circuit possède une entrée et une sortie qui serviront de portée au noyau réalisant cette forme.

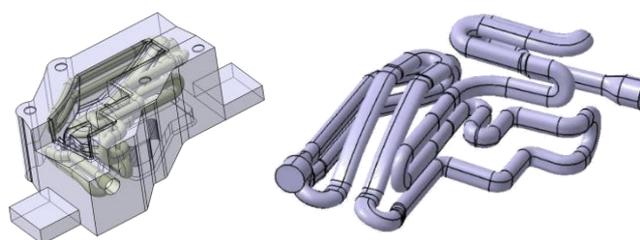


Figure 3.5-14: DFN outillage de vulcanisation (vue de gauche la DFN pièce et de droite vu de la géométrie des canaux)

Des essais sur des noyaux complexes et de grandes longueurs ont permis de définir un ratio de 0,08 à ne pas dépasser entre le diamètre du noyau et sa longueur au risque d'une rupture de ceux-ci ou d'une déformation importante, lors de la coulée de l'alliage d'aluminium. En fonction du ratio cité précédemment, le noyau de l'outillage étudié ne peut pas tenir mécaniquement que par ses deux portées. Le circuit de régulation a donc été modifié par un agrandissement de sa section afin d'augmenter sa résistance mécanique et par l'adjonction de trois portées de noyau aux endroits entourés en vert sur la figure partie droite ci-dessous (*Figure 3.5-15*). Ces modifications respectent le ratio défini précédemment et augmentent la rigidité du noyau lors de la coulée. Des trous supplémentaires seront donc présents sur l'outillage de vulcanisation et seront obturés pour assurer l'étanchéité du canal. Un noyau creux a été réalisé pour permettre l'évacuation des gaz à l'extérieur du moule lors la coulée et faciliter sa débouabilité. La conception du moule a été réalisée par le laboratoire et la coulée du moule par un partenaire du projet.

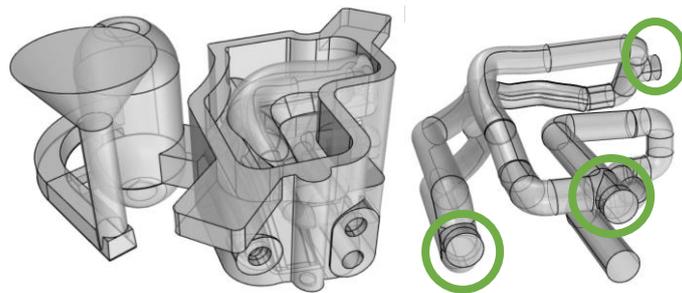


Figure 3.5-15: Grappe de l'outillage et son noyau

Les règles métiers et le processus d'étude de moulage permettent de définir les limites techniques du procédé d'impression nécessaires pour la conception des moules. Pour compléter les limites de ce procédé, une étude économique est présentée dans la suite de ce chapitre.

3.6 Etude de coût de production des moules en impression 3D

Les coûts étant une partie confidentielle dans la thèse, les valeurs données ne sont que des ordres de grandeurs purement indicatifs.

3.6.1 Méthode de calcul du coût de production de moule par impression

- Le coût horaire :

Le coût horaire comprend l'amortissement de la machine, la maintenance, le coût de l'énergie, le coût du nettoyant de la tête, le coût du traitement des déchets et le coût des EPI, celui-ci est estimé à 50 €/heure.

- Les consommables :

Le lancement d'un job d'impression consomme du sable de silice GS 14 et du liant phénolique. Le calcul du sable consommé se fait à partir du volume des moules et des noyaux à imprimer. La consommation du liant déposé est fonction de la masse à imprimer et est égal 6.5% de cette masse.

- L'estimation du temps de production :

Le temps de fabrication dépend essentiellement de la hauteur du job à réaliser sachant que quel que soit la taille des moules à imprimer, le recoater effectue un aller-retour complet.

Le coût de l'impression des moules comprend le coût des consommables, le coût de fabrication qui est fonction du coût horaire de l'imprimante et du temps de fabrication et du coût de dessablage. Ce coût sera modulé en fonction de la complexité des moules et noyaux à imprimer et du taux d'occupation de ces moules dans l'espace de construction

Le calcul du coût d'impression d'un moule se décompose en trois parties.

- Coût des consommables **Cc** :

Cs coût du sable :

$$Cs = V_{moule} \times m_{sable} \times P_{sable}$$

Équation 3.6-1 : Calcul du coût du sable Cs

V_{moule} : Volume du moule à imprimer

m_{sable} : Masse volumique du sable

P_{sable} : Prix du sable au kilogramme

Cl coût du liant :

$$Cl = \frac{\%liant \times V_{moule}}{100} \times P_{liant}$$

Équation 3.6-2: Calcul du coût du liant Cl

P_{liant} : Prix du liant au kilogramme

$\%liant$: Pourcentage de liant en masse

Soit

$$Cc = (Cs + Cl) \times Nb_{moule}$$

Équation 3.6-3: Calcul du coût des consommables total

Nb_{moule} : Nombre de moule à produire

- Coût du temps de production **Cp** :

$$\mathbf{Cp} = \frac{H_p}{v_{imp}} \times C_{hm}$$

Équation 3.6-4: Coût du temps de production

H_p : Hauteur du procédé (mm)

v_{imp} : Vitesse du procédé (mm/h)

C_{hm} : Coût horaire machine

- Coût total d'impression **Ct** :

$$\mathbf{Ct} = \mathbf{Cc} + \mathbf{Cp} + \mathbf{Fd}$$

Équation 3.6-5: Calcul du coût total d'impression

Fd : Forfait dessablage

Ces premières formules permettent de calculer un coût analytique qui sera appliqué sur différents moules.

3.6.2 Exemples de calcul de coût de production de moules

Dans cette partie, trois pièces ont été retenues des études de moulage précédentes. Les moules du chapeau, du mélangeur et de l'outillage de vulcanisation montrent l'influence des moules imprimés en plusieurs lots, du calepinage et des outillages complexes sur le coût de fabrication par impression 3D.

3.6.2.1 Coût de l'impression du moule de la pièce Chapeau :

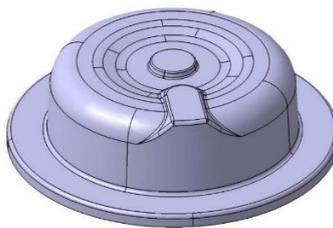


Figure 3.6-1: DFN de la pièce Chapeau

- Coût des consommables pour le moule :

Les dimensions du moule fermé sont de 685x660x460 mm, soit une masse de sable consommée de 270 kg pour le moule, soit 135€ de sable et 378€ de liant.

- Coût machine :

La fabrication du moule nécessite deux lancements d'impression, la hauteur totale du procédé est de 960 mm (*Figure 3.6-2*). Soit un temps d'impression pour les deux moules de 76,8 heures pour un coût machine de 3860 €.

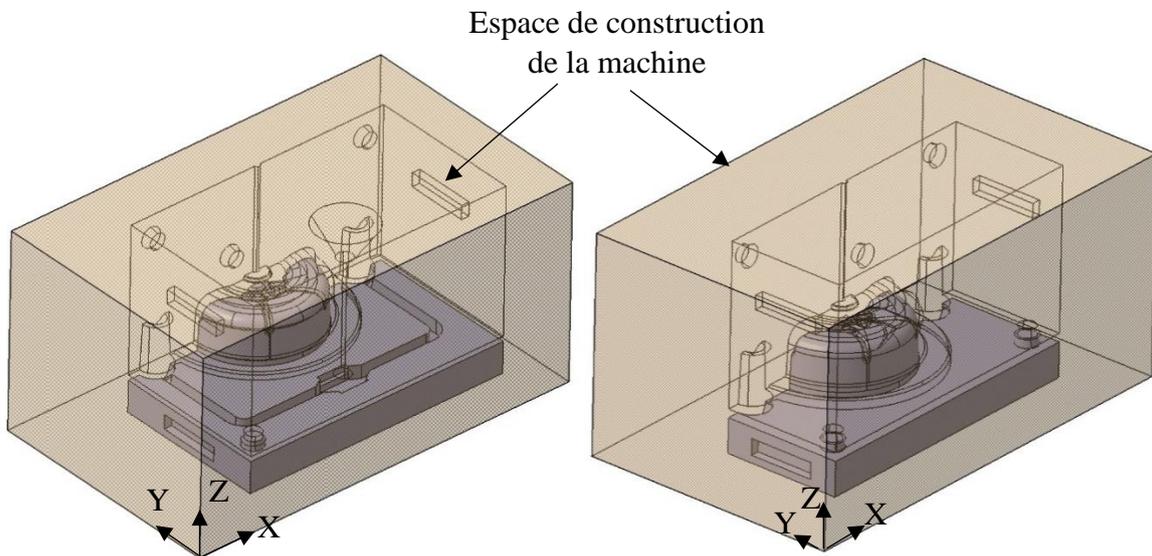


Figure 3.6-2: Remplissage du volume de la machine avec les demis moule

- Forfait dessablage :

Il faut dessabler deux volumes complets de machine soit 800 € de dessablage.

- Coût total :

Le prix de revient de la fabrication du moule pour la pièce « chapeau » est de 5173 €. Ce coût reste élevé et deux pistes peuvent être envisagées pour réduire ce coût :

La fabrication hybride combinant la réalisation des surfaces extérieures par des procédés traditionnels et les surfaces internes par impression 3D

Le remplissage optimal de l'espace de conception de l'imprimante 3D par le placement d'autres moules dans ce lot.

3.6.2.2 Coût de l'impression du moule de la pièce mélangeur

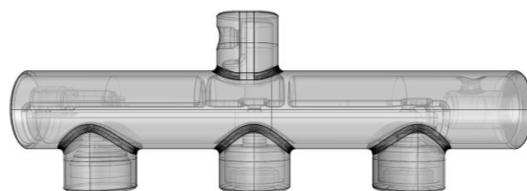


Figure 3.6-3: DFN mélangeur

- Coût des consommables pour le moule :

Les dimensions du moule fermé sont de 440x195x190 mm, soit une masse de sable de 21 kg par moule et une masse de 1kg de liant. Soit un coût des consommables par moule de 41€.

- Coût machine

L'espace de construction de la machine permet de placer huit moules (*Figure 3.6-4*). La hauteur du procédé est de 500mm. Le temps d'impression sera donc de 40 heures. Soit un coût machine de 2010 €.

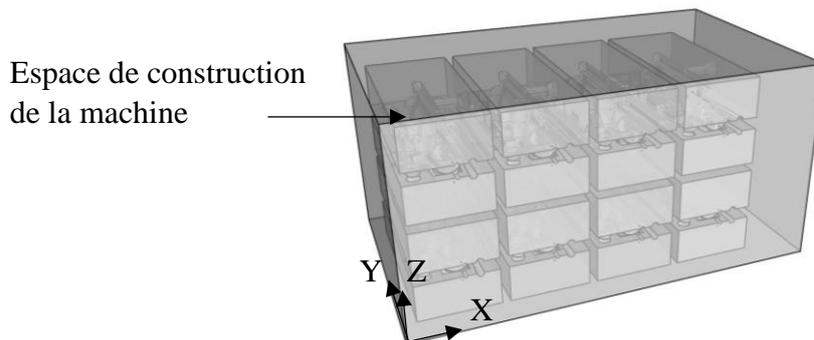


Figure 3.6-4: Remplissage de l'imprimante avec les huit moules

- Forfait dessablage :

Le forfait dessablage est de 400 € puisque la totalité de l'espace de construction est à dessabler.

- Coût total pour huit moules :

Soit un coût total pour huit moules de : $400+2010+30 \times 8+11 \times 8= 2738$ €.

Le graphique ci-dessous met en avant l'importance de l'opération de calpinage des moules dans l'espace de construction de la machine. Plus la hauteur du volume de construction sera remplie de moule, plus le prix de revient pour un seul moule sera minimal. Dans le cas du mélangeur, le calpinage est optimal tous les deux moules produits (*Figure 3.6-5*).

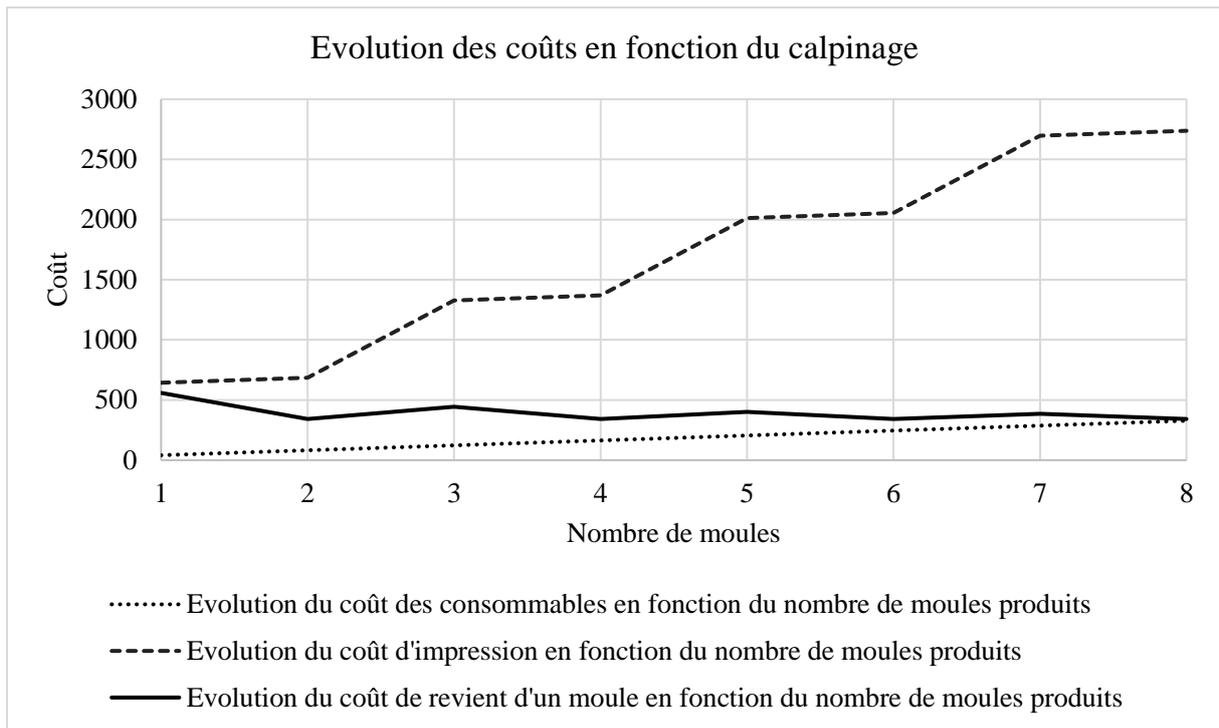


Figure 3.6-5 : Graphique de l'évolution des coûts

3.6.2.3 Coût d'impression du moule de l'ébauche d'outillage de vulcanisation

La hauteur du procédé a été optimisée en disposant la partie supérieure et inférieure du moule côte à côte comme le montre la figure ci-dessous (*Figure 3.6-6*).

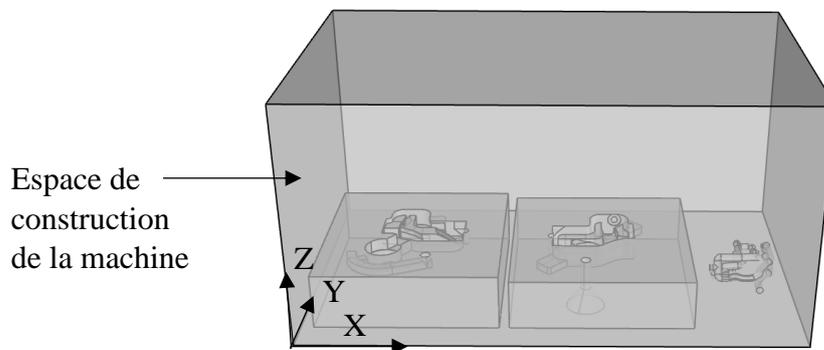


Figure 3.6-6: Disposition du moule pour l'impression

- Coût des consommables

Les dimensions du moule fermé pour produire l'outillage sont de 220x385x365mm. Soit 40Kg de sable et 3kg de liant, soit 76€ de consommable.

- Coût machine

Le temps d'impression est estimé à 12,4 h soit un coût machine de 623€.

- Forfait dessablage

Le forfait dessablage pour la hauteur de procédé est considéré à 200 €.

- Coût total

Ce qui fait un coût total de 899 €.

Le calcul des moules de manière analytique permet d'obtenir des coûts de revient précis qui peuvent s'avérer long sur des produits complexes. Néanmoins, ce mode de calcul n'est pas adapté à la réalisation d'un devis rapide. Un calcul de coût paramétrique correspond mieux aux exigences de réactivité que demande la production par fabrication additive. A partir d'un échantillon représentatif des coûts des moules réalisés par impression 3D, une régression linéaire permet de définir une relation entre le coût de moule et le volume imprimé en litre (Figure 3.6-7).

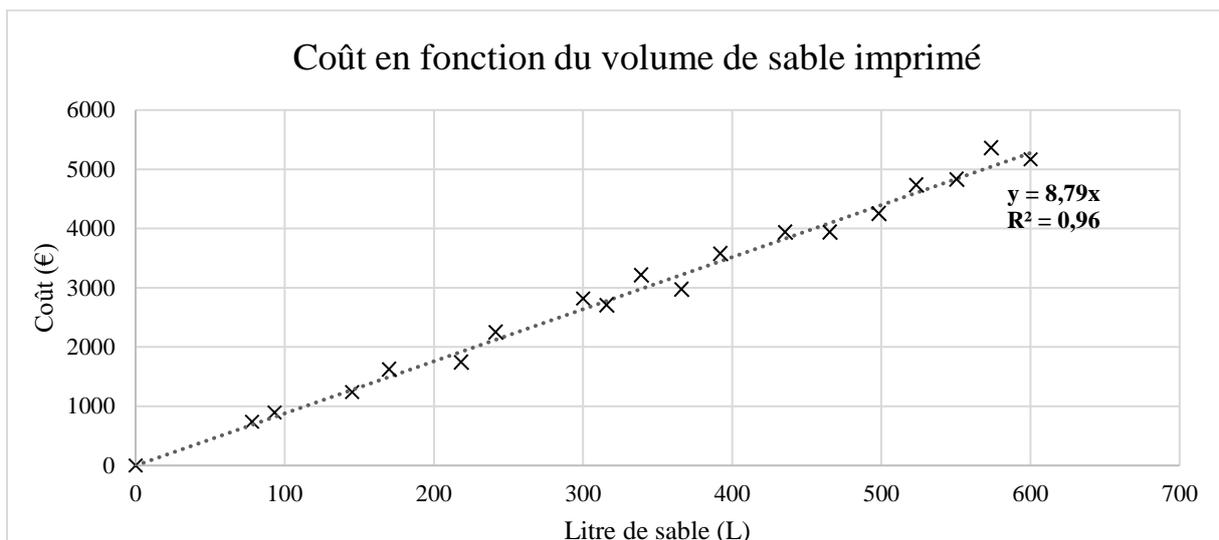


Figure 3.6-7: Calcul paramétrique du coût d'impression de moules

La réalisation des devis pour les moules imprimés se fait par l'application de la formule suivante:

$$\text{Coût du moule} = \text{Volume imprimé en litre} \times 8.79$$

Cette formule montre bien que la complexité du moule n'a pas d'influence sur le coût de fabrication en impression 3D.

Conclusion du chapitre 3 :

Méthodologie de conception des moules en impression 3D sable

Ce chapitre a permis de formaliser le processus de conception des moules en impression 3D ainsi qu'en moulage traditionnel. La méthodologie de conception des moules traditionnels a été élaborée à partir du recueil de l'expertise des fondeurs et validée par l'étude de différents cas industriels. La méthodologie de conception des moules réalisés par impression 3D a été élaborée à partir des résultats de la caractérisation des moules du chapitre 2, d'essais spécifiques et de la réalisation de moules présentant des morphologies représentatives des pièces de fonderie avec une large gamme de matériau. Les règles métiers inhérentes à l'impression 3D décrites dans ce chapitre fixent les limites de l'impression 3D et pourront être implémentées dans un logiciel de CAO. Une étude, sur les outillages réalisés par fonderie et intégrant le conformal cooling, a été présentée au niveau technique et économique et montre un réel intérêt dans le domaine des outillages régulés. Enfin, la dernière partie de ce chapitre définit les limites économiques de l'impression 3D et l'importance d'un calepinage optimal pour limiter le coût des produits imprimés en sable. Les règles métiers de l'impression 3D et la méthodologie de conception des moules pour l'impression 3D définis dans ce chapitre vont contribuer à établir une méthodologie de conception des moules hybrides.

Chapitre 4

Méthodologie et outils pour la conception de moules hybrides

La conception de moules hybrides en sable, combinant les procédés traditionnels et l'impression 3D, nécessite la mise en place d'une méthodologie permettant d'identifier les procédés les plus adaptés pour les surfaces moulantes en fonction de critères technico économiques. Dans ce chapitre, il s'agit de définir des outils de calcul de complexité pour la pièce complète, sur les surfaces moulantes internes et externes. Les indices retenus caractérisent la complexité des formes ainsi que leur fabricabilité suivant différents niveaux d'analyse de la grappe de fonderie. En dessous d'un certain seuil, la pièce ou des parties de pièces seront réalisées par des moules fabriqués par des moyens conventionnels et au-dessus de ce seuil, les moules seront réalisés par l'imprimante 3D sable. Les valeurs des différents seuils d'indice ont été définies à la suite d'études de cas et en fonction de la complexité des outillages nécessaires pour la fonderie conventionnelle. La dimension économique est très prégnante dans cette démarche et occupe une part importante dans la prise de décision finale sur les choix de procédés de fabrication. Enfin, la construction d'une démarche claire et structurée permettra à plus long terme, d'ouvrir des perspectives d'implémentation d'un outil d'aide à la conception des moules hybrides sur les logiciels de CAO.

Chapitre 4 : Méthodologie et outils pour la conception de moules hybrides

4.1 Démarche générale

La démarche générale s'appuie sur concept du DFAM intégrant les connaissances explicites de la fabrication additive, notamment de l'impression 3D sable, en vue d'assister l'ingénieur dans son processus de conception des moules de fonderie en sable. Cette méthode utilise des outils d'évaluation de la complexité géométriques et de fabricabilité de la pièce à mouler. Une première analyse globale de la complexité est effectuée par un indice agrégé nommé $CF_{estimated}$. En fonction du seuil de cet indice, une analyse locale de complexité est réalisée sur les surfaces internes et sur les surfaces externes de la grappe conduisant à définir le procédé de fabrication le plus adapté. L'indice de complexité des surfaces externes repose sur l'analyse d'un fichier STL de la grappe afin de définir les triangles en contre-dépouille par rapport à une direction de démoulage et de recenser le nombre d'îlot de triangle isolés. La figure ci-dessous (*Figure 4.1-1*) présente cette démarche générale d'analyse avec un seuil à franchir pour passer à l'étape suivante conduisant in fine à la solution optimale de fabrication. Chaque étape sera détaillée dans ce chapitre.

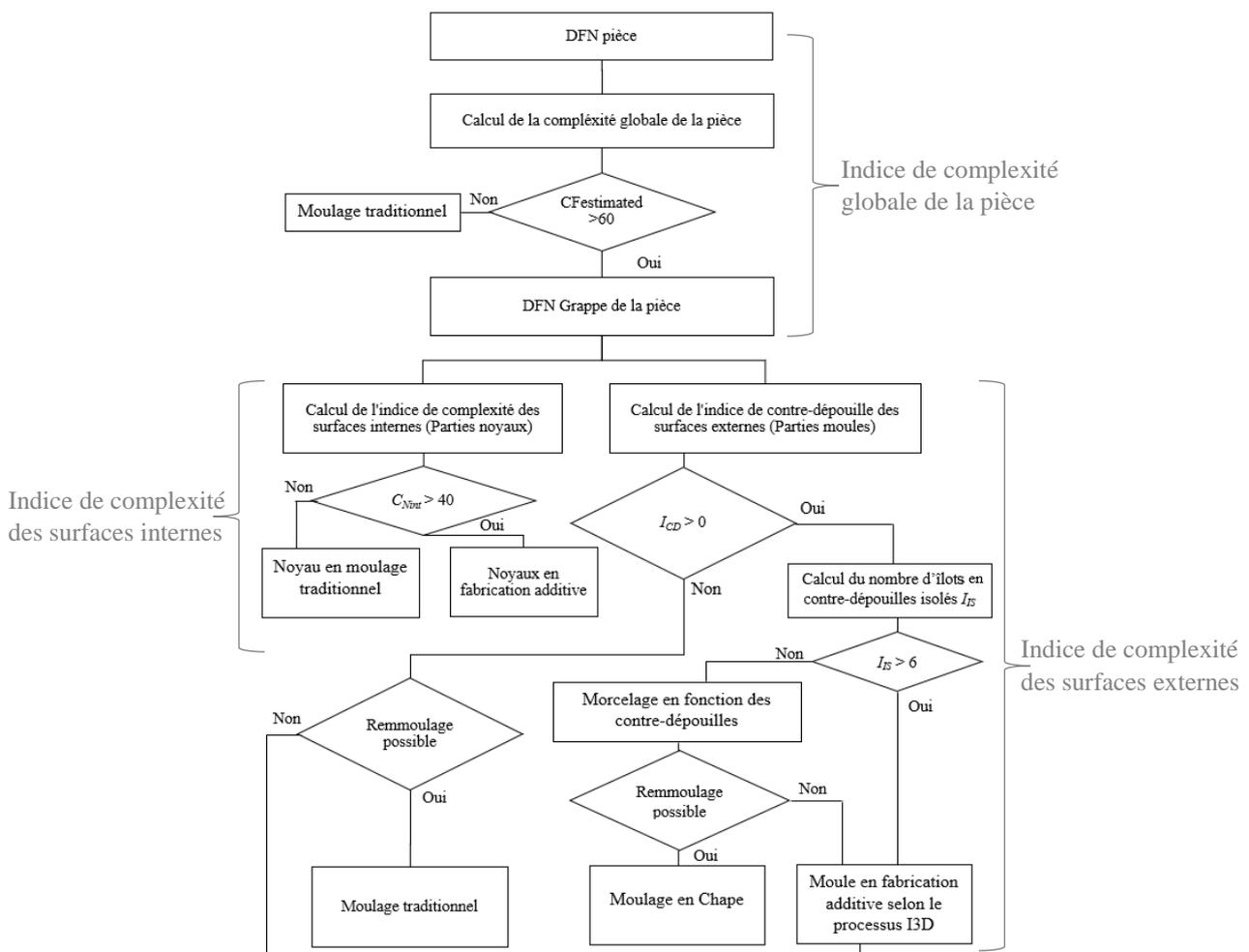


Figure 4.1-1: Démarche générale de conception hybride

4.2 Outils pour la conception hybride

4.2.1 Indices de complexité globale de la pièce

La première étape d'analyse se base sur la méthode de Durgesh Joshi et Bhallamudi Ravi [DUR10], qui permet de quantifier la complexité des outillages des pièces de fonderie par des critères géométriques et in fine par un critère global CF estimated. Celui-ci agrège différents indicateurs géométriques pondérés par un coefficient relatif au coût de fabrication défini à partir d'une régression multilinéaire et d'un échantillon représentatif de 40 pièces de fonderie.

Le critère global est exprimé par l'équation ci-dessous :

$$CF_{Estimated} = 5.7 + 10.8C_{PR} + 18C_{AR} + 32.7C_{NC} + 29C_{CR} + 6.9C_{TR} + 0.7C_{DR}$$

Équation 4.2-1: Indice de complexité CFestimated de Durgesh et Bhallamudi [DUR10]

Où C_{PR} est le ratio entre le volume pièce V_P et le volume enveloppe V_B de la pièce :

$$C_{PR} = 1 - \frac{V_P}{V_B}$$

Équation 4.2-2: Ratio de volumes pièce

Plus la différence entre ces deux volumes est importante, plus il est nécessaire de réaliser de nombreuses opérations d'usinage et plus la complexité est élevée.

Où C_{AR} est le ratio entre A_S la surface d'une sphère ayant le même volume que la pièce et A_P la surface de la pièce :

$$C_{AR} = 1 - \frac{A_S}{A_P}$$

Équation 4.2-3: Ratio de surfaces

Plus la surface fonctionnelle de l'outillage augmente, plus le coût d'usinage est élevé et plus la complexité est grande.

Où C_{NC} est une formule prenant en compte le nombre de noyaux N_C du moule :

$$C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + N_C}}$$

Équation 4.2-4: Nombre de noyau

Plus le nombre de noyaux sera élevé, plus le coût de l'outillage sera important ainsi que la complexité.

Où C_{CR} est le ratio entre le volume des noyaux par V_{C_i} par rapport au volume enveloppe de la pièce :

$$C_{CR} = 1 - \frac{\sum V_{C_i}}{V_b}$$

Équation 4.2-5: Ratio de volume noyau

Plus les noyaux sont de grandes tailles, plus la complexité diminue.

Où C_{TR} est le ratio entre l'épaisseur la plus fine T_{min} et la plus épaisse T_{max} de la pièce :

$$C_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Équation 4.2-6: Ratio d'épaisseurs

Un outillage à section mince sera plus difficile à usiner avec pour conséquence une augmentation de la complexité.

Où C_{DR} est le minimum de L, W et H respectivement la longueur, largeur et hauteur de la pièce et D_d la profondeur de l'empreinte :

$$C_{DR} = 1 - \frac{0.5(\min(L, W, H))}{D_d}$$

Équation 4.2-7: Ratio de profondeur d'empreinte

Les pièces avec un rapport de profondeur élevé augmentent la complexité.

Ce premier tri permet donc d'écartier les DFNs présentant un coût de production très faible, réservé à la fonderie traditionnelle. Pour quantifier la valeur du seuil de complexité, des calculs de complexité ont été effectués sur différents cas industriels.

4.2.1.1 Calcul de $CF_{estimated}$ sur différents types de pièces

L'étude a consisté à prendre plusieurs pièces dont l'étude de moulage a été réalisée, avec des formes relativement simples jusqu'à des formes plus complexes, et à calculer leur indice de complexité d'après l'équation précédente (*Équation 4.2-1*). Cet indice de complexité en dessous d'un seuil limite CFI, orientera les pièces vers le moulage traditionnel et au dessus de ce seuil une analyse complémentaire est nécessaire afin de définir les surfaces qui seront réalisées par fabrication additive ou par des moyens traditionnels.

Les pièces 3 et 4 du tableau (*Tableau 4.2-1*) sont des pièces très simples. La pièce 3 montre l'impact de l'indice de complexité d'une pièce ayant un très grand volume enveloppe par rapport à son volume pièce ($CF_{Estimated} = 29$). La pièce 4 présente le coefficient de complexité d'une pièce très simple, seul la morphologie de la surface influence le calcul de complexité ($CF_{Estimated} = 9$). Et enfin, la pièce 5 est caractérisée par une forme extérieure très simple mais contient un évidement à l'intérieur augmentant le coefficient de complexité ($CF_{Estimated} = 52$). Pour ces différentes pièces, le coefficient de complexité $CF_{Estimated}$ ne dépasse pas la valeur de 52.

Les pièces 6, 7 et 10 présentent des surfaces internes relativement complexes assurant un système de régulation ou le passage d'un fluide. Ces pièces comportent des cavités internes complexes à réaliser en fonderie traditionnelle mais seront réalisées facilement par impression 3D.

La pièce 8 est identique à la pièce 10 dont les cavités internes ont été retirées afin d'analyser la sensibilité de l'indice de complexité sur les surfaces internes à la pièce. Il en est de même avec la pièce 7 et 9. Le calcul de l'indice de complexité de ces différentes pièces a pour objectif de définir un seuil à partir duquel les pièces sont plus pertinentes à être étudiées en impression 3D ou par moule hybride.

La pièce 11 possède des difficultés de moulage notamment au niveau de ses surfaces externes ($CF_{Estimated} = 61$).

Les études de moulage de la pièce 1 et 2 ont été étudiées et d'après l'expertise des fondeurs, les cavités internes de ces pièces et le nombre de noyaux font que ces pièces seront dirigées vers la conception de moule hybride.

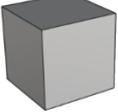
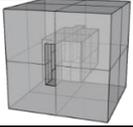
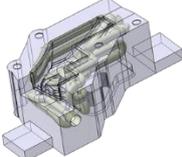
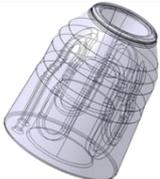
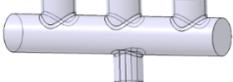
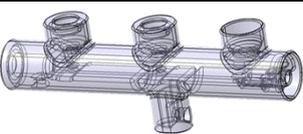
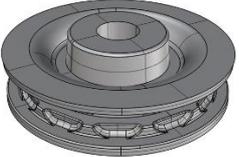
N°	DFN pièce	C _{PR}	C _{AR}	C _{NC}	C _{CR}	C _{TR}	C _{DR}	CF _{Estimated}
1	 Carter	0,83	0,84	0,55	0,7	0	0,18	68
2	 Carter	0,79	0,86	0,72	0,61	0	0,11	74
3		1	0,69	0	0	0	0	29
4		0	0,19	0	0	0	0	9
5		0,12	0,41	0,29	0,88	0,4	0	52
6	 Outillage de vulcaisation	0,66	0,68	0,29	0,97	0,98	0,04	70
7	 Outillage de plasturgie	0,54	0,57	0,5	0,85	0,74	0,4	68
8		0,55	0,41	0	0	0,72	0	24
9		0,51	0,4	0	0	0,65	0,18	23
10	 Mélangeur	0,82	0,86	0,42	0,73	0,97	0	72
11	 Roue à chaîne	0,66	0,67	0,29	0,72	0,81	0,71	61

Tableau 4.2-1: Calculs de complexité pièce

4.2.1.1 Influence de la conception sur la complexité de la pièce

La conception du carter de renvoi d'angle peut se décliner suivant deux DFNs suite aux négociations avec le donneur d'ordre (Tableau 4.2-2). Dans le premier cas, la DFN du carter n'est pas modifiée engendrant un indice de complexité de 75,1. Dans le second cas, la co-conception de la pièce, modifie la DFN et l'indice de complexité descend à 29. La collaboration entre donneurs d'ordres est indispensable afin de réduire les coûts et d'obtenir des produits optimisés.

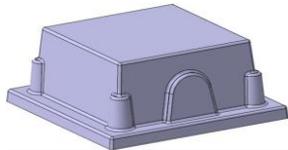
		
Pièce	Carter non modifié	Carter modifié
Ratio Volume C_{PR}	0,72	0,64
Ratio Surface C_{AR}	0,76	0,66
Ratio nombre de noyau C_{NC}	0,50	0,00
Ratio volume noyau C_{CR}	0,93	0,00
Ratio épaisseur C_{TR}	0,67	0,67
Ratio profondeur outillage C_{DR}	0,50	0,50
CF_{Estimated}	75,31	29,51

Tableau 4.2-2: Indices de complexité en fonction de différentes DFN pièce

4.2.1.2 Détermination du seuil limite CFI

Suite à ces études de cas, les pièces ayant un indice de complexité pièce supérieure à 60 passe le premier test et vont être étudiées de manière plus approfondie alors que celles ayant un indice de complexité inférieur à 60 seront dirigées vers la fonderie traditionnelle (Figure 4.2-1). Ce seuil de 60 est défini à partir des études de cas réalisées, de l'expertise des fondeurs et confirmé par l'étude de Chougule, R., and B. Ravi [CHO06].

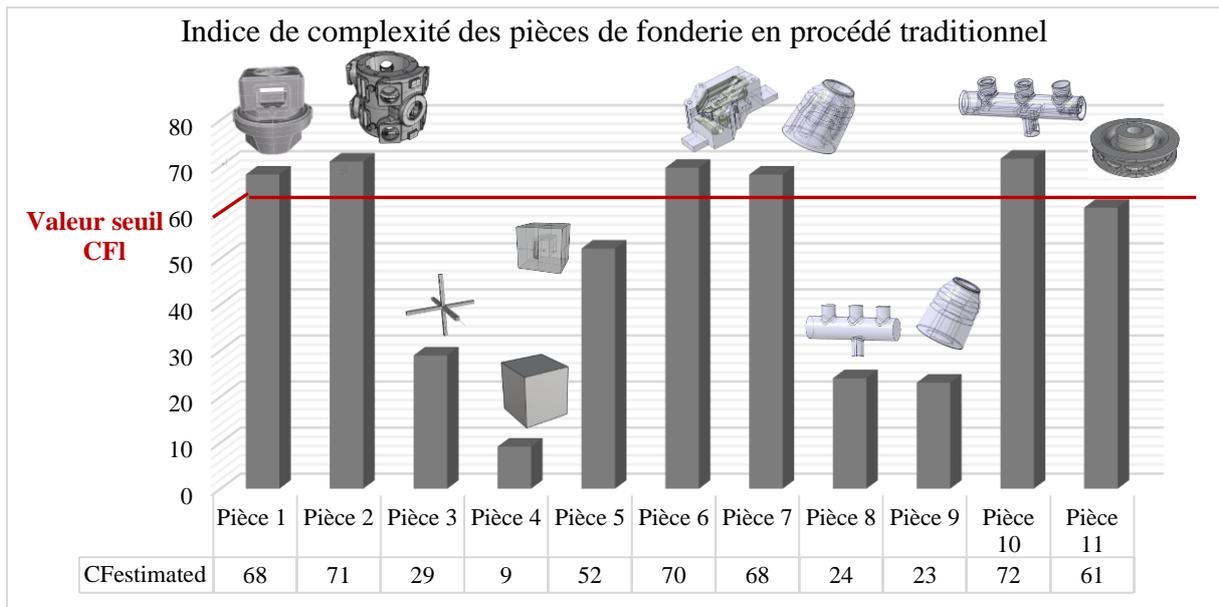


Figure 4.2-1: Sélection de la valeur seuil du coefficient de complexité pièce

En effet les travaux de Chougule, R., and B. Ravi [CHO06] montrent que le coût d'outillage croît de manière exponentielle à partir d'un seuil de complexité de 60 (Figure 4.2-2). Pour ce type de pièces, la conception du moule et des noyaux par impression 3D ou par une méthode hybride de fabrication doit être envisagée.

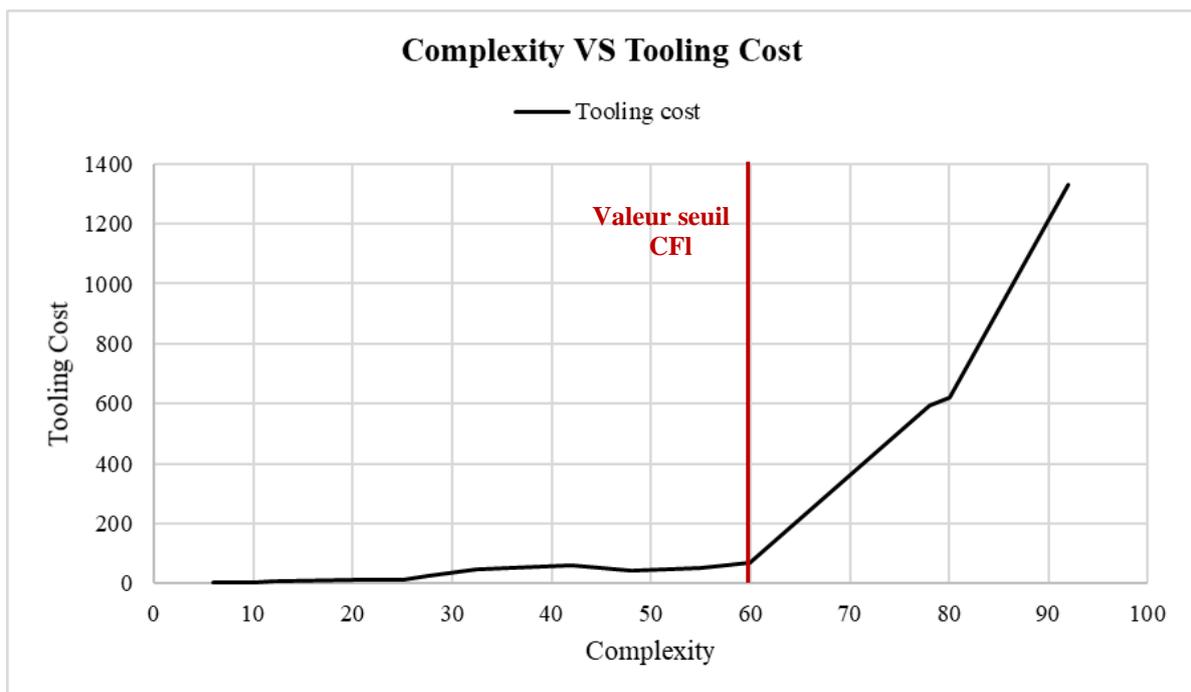


Figure 4.2-2: Complexité en fonction du coût de l'outillage [CHO06]

Ce premier tri étant effectué, les pièces dont l'indice de complexité global est supérieur à 60 (CFestimated) seront analysées, au niveau de la complexité des surfaces internes (noyau) et au niveau des surfaces externes (moule). Cette seconde analyse sera réalisée sur la grappe c'est-à-dire sur la pièce et ses systèmes d'alimentation et de masselottage.

4.2.2 Indice de complexité des surfaces internes

Le calcul de cet indice de complexité des surfaces internes CNint a pour objectif de définir le meilleur moyen de fabrication des noyaux.

4.2.2.1 Indices de complexité géométrique

Les indices de complexité des surfaces internes se basent sur le calcul de ratios de volumes, de surfaces et d'épaisseurs des noyaux suivant les formules du paragraphe 4.2. Ceux-ci caractérisent objectivement la morphologie des formes internes de la pièce mais doivent être complétés par des indices spécifiques de fabricabilité dont ceux de sinuosité et de déburrabilité.

Ces indices sont :

N_{PR} pour le ratio entre le volume d'enveloppe du noyau V_{Bn} et le volume noyau V_n .

$$N_{PR} = 1 - \frac{V_n}{V_{Bn}}$$

Équation 4.2-8: Ratio de volumes noyau

N_{AR} pour le ratio entre la surface d'une sphère ayant le même volume que le noyau A_S et la surface du noyau A_N .

$$N_{AR} = 1 - \frac{A_S}{A_N}$$

Équation 4.2-9: Ratio de surfaces

N_{TR} pour le ratio entre l'épaisseur minimale du noyau et celle maximale.

$$N_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Équation 4.2-10: Ratio d'épaisseurs

4.2.2.2 Indice de sinuosité

N_{SI} est un nouvel indice géométrique et qui correspond au ratio entre la longueur maximale de la boîte de contour du noyau nommée L_{maxBDC} et la longueur du noyau sans discontinuité nommée L_{noyau} (Équation 4.2-11). Soit la formule suivante :

$$N_{SI} = 1 - \frac{L_{maxBDC}}{L_{noyau}}$$

Équation 4.2-11: Indice de sinuosité

Les noyaux 1 et 2 (Tableau 4.2-3) sont très sinueux et l'indice N_{SI} , proche de 1, caractérise bien cette complexité. Par contre, le noyau 3 a un indice de 0 puisqu'il s'agit d'une forme cylindrique (Tableau 4.2-3).

	Noyau 1	Noyau 2	Noyau 3
			
Indice de sinuosité N_{SI}	0,90	0,89	0

Tableau 4.2-3: Exemple de calculs de N_{SI}

4.2.2.3 Indice de débarrassabilité

N_{DEB} est un indice de fabricabilité et caractérise la débarrassabilité des noyaux de fonderie. Cet indice est un ratio de volume entre le volume de sable facilement retirable de la pièce coulée (V_{slf}) et le volume du noyau (V_n) (Équation 4.2-12). Ce volume V_{slf} de sable est défini par la section de chaque ouverture multipliée par la longueur de sable parallèle à cette section.

$$N_{DEB} = 1 - \frac{V_{slf}}{V_n}$$

Équation 4.2-12: Indice de débarrassabilité

L'étude de la pièce 1 montre trois noyaux afin de réaliser les formes intérieures (Tableau 4.2-4). Le calcul de débarrassabilité de chaque noyau montre une variation de l'indice de 0 à 0,98. Le noyau 1 comporte plusieurs ouvertures, ce qui facilite son aptitude au débarrassage. Dans ce cas, le calcul de V_{slf} se fait à partir de l'union des volumes élémentaires débarrassables s'intersectant et non la somme des volumes élémentaires.

Pièce 1	Noyau 1	Noyau 2	Noyau 3
			
Indice de débouabilité N_{DEB}	0,6	0,98	0

Tableau 4.2-4: Exemple de calcul N_{DEB}

4.2.2.4 Calcul de C_{Nint}

Le calcul du critère de complexité des surfaces internes C_{Nint} est réalisé à partir d'une moyenne pondérée des indices de complexité présentés précédemment. Les nouveaux indices N_{SI} et N_{DEB} seront pondérés avec un poids de 3 alors que les autres indices déjà utilisés pour ($CF_{estimated}$) auront un poids de 1. Cette pondération de 3 sera réajustée dans le temps suite à l'analyse d'un panel de pièces plus conséquent. La complexité du noyau C_{Nint} est alors calculée par la formule suivante (Équation 4.2-13) :

$$C_{Nint} = \frac{(N_{PR} + N_{AR} + N_{TR} + 3N_{SI} + 3N_{DEB})}{9} \times 100$$

Équation 4.2-13 : Calcul de la complexité des noyaux

4.2.2.5 Evaluation de la valeur seuil C_{Nint} permettant le choix de conception de noyau

Le panel des pièces déjà étudiées a été élargi en introduisant de nouvelles formes simples afin de définir de manière expérimentale le seuil C_{Nint} (Tableau 4.2-5). Tous les noyaux ayant une forme simple et facilement débouable présentent un C_{Nint} inférieur à 40 % (Figure 4.2-3). Ce seuil sera affiné dans le temps par retour d'expérience et par la maîtrise des coûts de fabrication. Ceux-ci sont facilement réalisables par des moyens conventionnels tels que des boîtes à noyaux. Les autres noyaux ayant un C_{Nint} supérieur à 40 % sont candidats à la fabrication additive. D'autant plus que ces noyaux doivent être creux pour réaliser des tirages d'air ou présenter une architecture particulière telle qu'une forme en étoile, le seul moyen de fabrication possible est l'imprimante 3D. La partie fonctionnelle de la roue à chaîne 17 est réalisée par un noyau de paroi et présente un indice de complexité C_{Nint} de 41%.

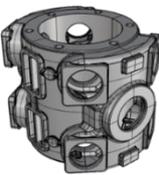
Pièce	N°	Noyau	N_{PR}	N_{AR}	N_{TR}	N_{SI}	N_{DEB}	C_{Nint}
/	1		0,21	0,13	0	0	0	4%
/	2		0,6	0,58	0,6	0	0	20%
/	3		0,55	0,39	0	0,7	0	34%
 Mélangeur	4		0,71	0,66	0,93	0,48	0,71	65%
	5		0,71	0,56	0,91	0,26	0,5	49%
 Outillage de plasturgie	6		0,43	0,13	0,1	0	0	7%
	7		0,29	0,12	0	0	0	4,5%
	8		0,94	0,75	0,93	0,9	0,89	89%
 Outillage de vulcanisation	9		0,93	0,76	0,95	0,89	0,94	90%
 Carter	10		0,82	0,79	0,98	0	0	29%
	11		0,6	0,15	0,51	0	0	14%
	12		0,81	0,68	0,98	0	0,4	40%
	13		0,88	0,74	0,95	0,7	0,9	82%
 Carter	14		0,24	0,35	0,98	0	0,6	37%
	15		0,57	0,47	0,92	0,68	0,98	77%
	16		0,53	0,33	0,93	0	0	20%
 Roue à chaîne	17		0,56	0,58	0,46	0,7	0	41%

Tableau 4.2-5 : Calculs de la complexité noyau

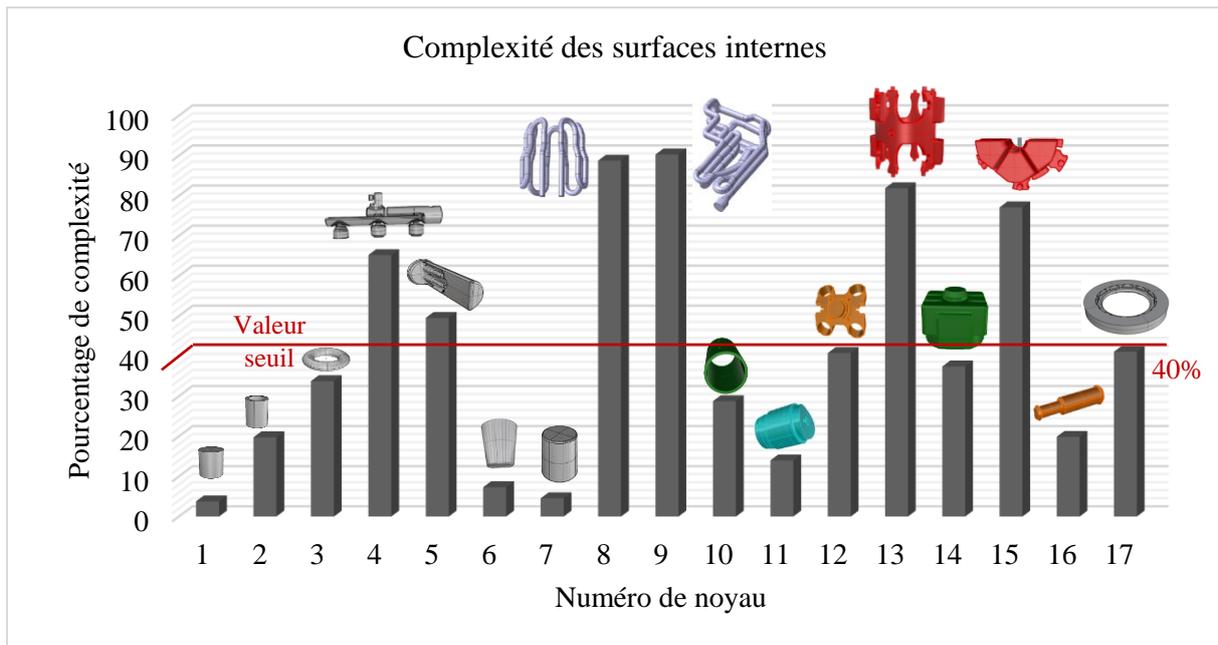


Figure 4.2-3: Sélection de la valeur seuil de l'indice de complexité CNint

4.2.3 Indice de complexité des surfaces externes

Les surfaces extérieures à la pièce doivent être démoulables c'est-à-dire ne pas présenter de surfaces en contre-dépouille par rapport à la direction de démoulage. Cette vérification s'effectue par l'analyse des normales des triangles de la pièce maillée sur un fichier maillé dans le format STL. Le choix de la direction de moulage est défini par une analyse des surfaces en contre-dépouilles suivant les trois directions principales, à partir d'un plan médian ou d'une surface de joint passant par la plus grande surface projetée de la pièce. Cette analyse montre une cartographie des îlots présentant des surfaces en contre-dépouille. En l'absence d'îlots en contre-dépouille, le moule sera réalisé par des moyens conventionnels. Pour une présence importante d'îlots en contre-dépouille et très distants entre eux, le moule sera réalisé en fabrication additive. Pour un nombre restreint d'îlots en contre-dépouille, la recherche d'une surface de joint passant par ces îlots permettra d'envisager un moulage conventionnel en chape. Le nombre de chapes en fonderie doit être limité afin d'éviter les lignes de joint sur la pièce et de respecter la précision dimensionnelle requise. De ce fait, le nombre d'îlots isolés maximum pouvant être réalisé par moulage en chape a été limité à 6, en considérant deux surfaces de joint contenant 3 îlots en contre-dépouilles à différentes altitudes.

4.2.3.1 Indice de présence de contre-dépouille I_{CD}

Les orifices et les ouvertures des pièces (alésage, poche, ...) sur la DFN, doivent être bouchés, afin de prendre que les surfaces externes et de les mailler pour déterminer l'indice I_{CD} (Équation 4.2-14). Cet indice intègre le rapport du nombre de triangles sans contre-dépouille et du nombre total de triangles de la pièce. Si I_{CD} vaut 0, ceci indique que les surfaces externes de la pièce ne présentent aucune contre dépouille alors le moule peut être conçu de manière traditionnelle suivant la direction selon laquelle cette valeur a été trouvée. Si cet indice est différent de zéro alors il faut localiser les zones en contre-dépouilles.

$$I_{CD} = 1 - \frac{\text{nombre de triangles sans contre-dépouilles}}{\text{nombre de triangles de la pièce maillée}}$$

Équation 4.2-14: Indice de contre-dépouilles

4.2.3.2 Indice du nombre d'îlots isolés I_{IS}

Un îlot est considéré comme isolé, si tous les triangles qui le compose n'ont aucune connexion avec les autres. Chaque îlot isolé est comptabilisé donnant l'indice I_{IS} . Un nombre important d'îlots isolés sera révélateur d'une pièce contenant de nombreuses contre-dépouilles localisées à différents endroits.

Toutefois, quand des îlots sont situés dans une même zone, séparée par deux surfaces de joints suivant la direction étudiée alors I_{IS} ne comptabilise qu'un seul îlot pour ce cas.

4.2.3.3 Calculs de ces indices

Les tableaux ci-après (Tableau 4.2-6 ; Tableau 4.2-7) montre le calcul de ces différents indices pour différentes pièces. Les indices I_{CD} des surfaces externes du mélangeur (surface externe 1) et des outillages intégrant le conformal cooling (surfaces externes 2 et 3) valent 0, ce qui permet de conclure que ces surfaces externes peuvent être réalisées par les procédés traditionnels. La direction de démoulage pour ces surfaces externes est définie respectivement par l'axe X pour le mélangeur et l'outillage de plasturgie et par l'axe Z pour l'outillage de vulcanisation.

Les surfaces externes du carter 1 (surface externe 4) ont de nombreux îlots en contre-dépouille et ceci, quelle que soit la direction de démoulage choisie. L'impression 3D est donc le procédé le plus adapté pour cette surface externe 4.

Les surfaces externes du carter 2 suivant les différentes directions de démoulage testées (surfaces externes 5) ont toutes un indice I_{CD} supérieur à 0. Néanmoins, la direction de

démoulage suivant l'axe X ne comporte qu'un seul îlot en contre-dépouille. La réalisation de ces surfaces externes pourra donc être obtenue par un moulage en chape.

La valeur de la complexité globale de la roue à chaîne est définie par un indice $CF_{\text{estimated}}=61$. L'indice de complexité des surfaces externes I_{CD} est égal à 0,36 et renvoie vers une solution de fabrication par moulage en chape ou par l'ajout d'un noyau de paroi. Pour cette étude, le noyau de paroi par rapport au moulage en chape est justifié par la faible hauteur des surfaces moulantes et l'absence de déport sur les surfaces d'engrainement. Le moulage des surfaces externes hormis les surfaces d'engrainement de la chaîne est réalisé par des moyens conventionnels $I_{CD}=0$ ainsi que le noyau cylindrique central. Les surfaces d'engrainement sont obtenues à partir d'un noyau de paroi, réalisé par l'impression 3D, compte tenu de l'indice CN_{int} de 41%.

Pour chaque cas, le calcul des indices de complexité des surfaces externes a été effectué, selon les trois directions de démoulage, sans prendre en compte les directions de remmoulage des noyaux.

La prise en compte de ces directions de remmoulage permet de limiter le nombre de direction de démoulage à tester. Cette limitation est possible seulement si l'indice I_{CD} vaut 0 selon une des directions de démoulage compatible avec le remmoulage des noyaux (Cas des lignes grises du *Tableau 4.2-6*).

Sinon, l'étude de toutes les directions doit être réalisée afin d'identifier l'éventuelle nécessité de morceler le noyau, dans le cas où l'indice I_{CD} vaut 0 selon une direction de démoulage qui ne permet pas le remmoulage des noyaux.

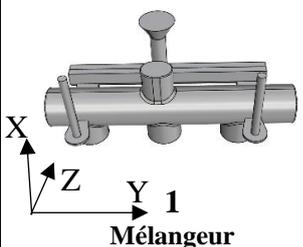
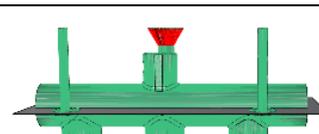
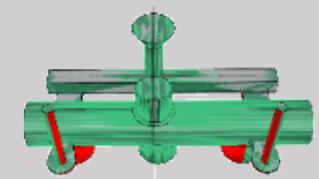
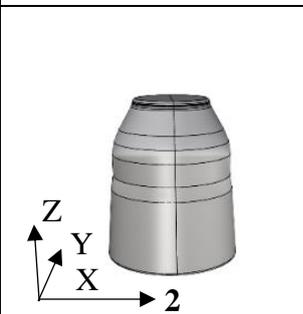
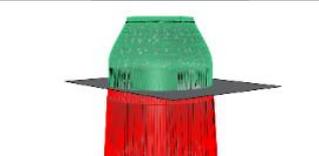
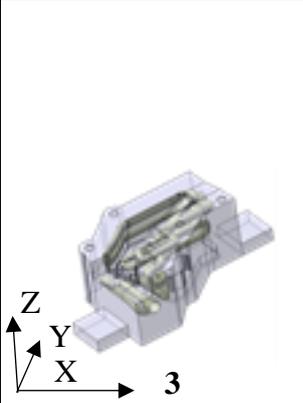
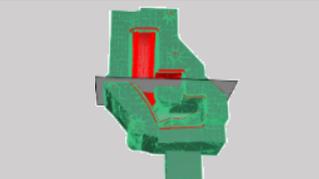
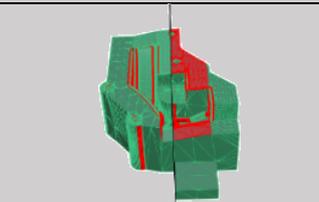
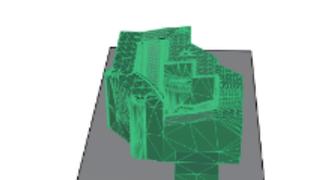
Surfaces externes	Zone en contre-dépouilles	Direction de démoulage	I _{CD}	I _{IS}
 <p>Mélangeur</p>		X Selon plan médian	0 Entonnoir de coulée non significatif	0
		Y Selon plan médian	0,23	8
		Z Selon plan médian	0,08	8
 <p>Outillage de plasturgie</p>		X Selon plan médian	0	0
		Z Selon plan médian	0,06	1
 <p>Outillage de vulcanisation</p>		X Selon plan médian	0,41	19
		Y Selon plan médian	0,5	19
		Z Selon la plus grande surface projetée	0	0

Tableau 4.2-6: Analyses des contre-dépouilles

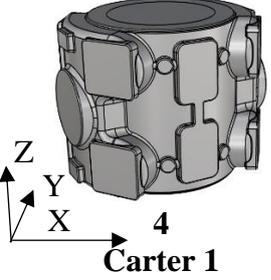
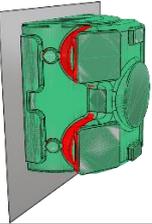
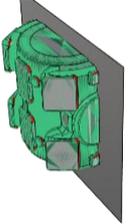
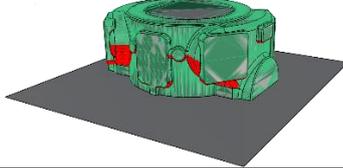
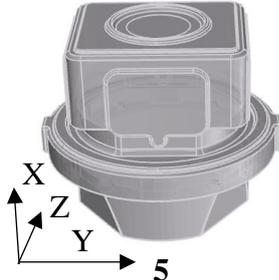
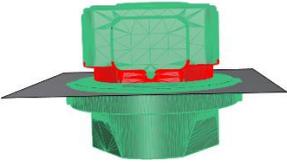
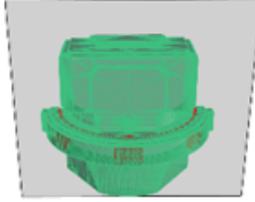
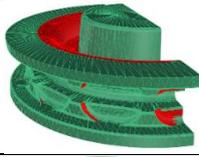
Surfaces externes	Zone en contre-dépouilles	Direction de démoulage	I _{CD}	I _{IS}
 <p>4 Carter 1</p>		X Selon plan médian	0,25	24
		Y Selon plan médian	0,1	12
		Z Selon plan médian	0,4	30
 <p>5 Carter 2</p>		X Selon plan médian	0,2	1
		Y Selon plan médian	0,19	7
		Z Selon plan médian	0,18	7
 <p>6 Roue à chaîne</p>		X Selon plan médian	0,72	8
		Z Selon plan médian	0,36	1

Tableau 4.2-7: Analyses des contre-dépouilles (suite)

4.3 Validations de la méthodologie

La méthodologie est testée sur 4 cas très différents afin de valider la méthodologie et d'envisager un large panel de procédés de fabrication tels que l'impression 3D, les procédés conventionnels de moulage, le moulage en chape et les noyaux de paroi. Ces cas d'étude illustrent les différentes morphologies de pièces ainsi que les différents matériaux coulés en fonderie.

4.3.1 Pièce 1 : Carter 2 en Fonte à graphite lamellaire (EN GJL 250)

L'indice de complexité globale du carter 2 (Figure 4.3-1) a un $CF_{\text{estimated}}=68$ (Tableau 4.2-1). L'alimentation de la pièce n'est pas intégrée dans cette étude pour des raisons de confidentialité.



Figure 4.3-1: DFN carter 1

L'indice de complexité des surfaces internes a également été calculé précédemment (Tableau 4.2-5). Deux des trois noyaux sont réalisés par fabrication additive en raison de difficultés de débouillage et des structures internes complexes de ces noyaux. Le noyau rouge représenté ci-dessous est creux ceci afin d'améliorer sa débouabilité. Le noyau vert est également creux afin de faciliter le dégazage du noyau rouge (Figure 4.3-2). Le dernier noyau de forme cylindrique est réalisé par des moyens conventionnels.

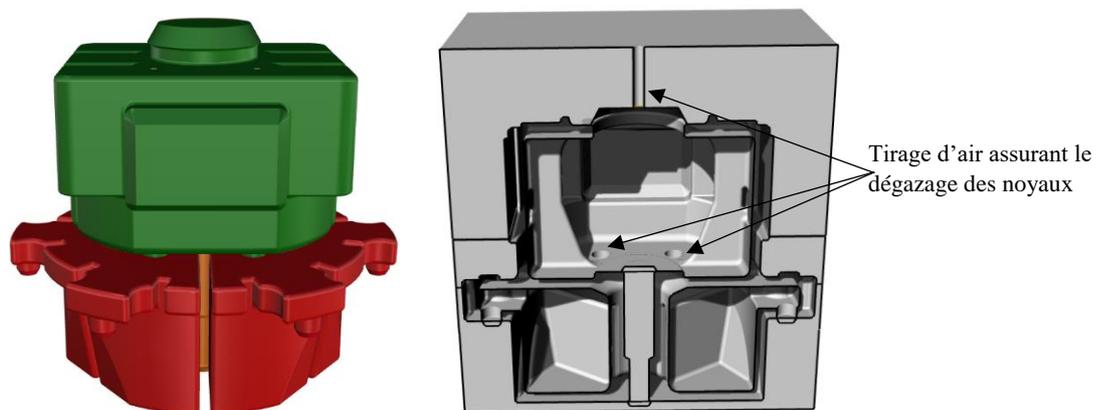


Figure 4.3-2: Représentation des noyaux du carter

Enfin, l'analyse des surfaces externes de la pièce (*Tableau 4.2-7*) renvoie à un moulage en chape. Le seul îlot des surfaces en contre-dépouille se situe sur la partie centrale de la pièce. Un moulage en chape en trois parties assurera le remmoulage des noyaux ainsi que le moulage de la forme extérieure (*Figure 4.3-3*).

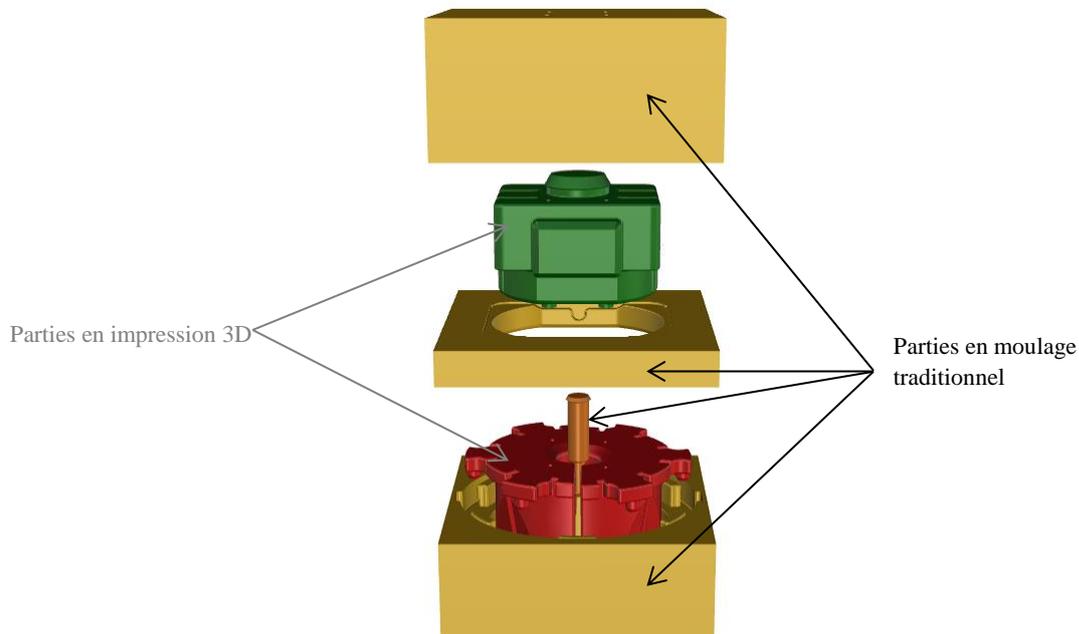


Figure 4.3-3: DFN du moule hybride obtenu

Le déploiement de la méthode a permis de définir le procédé optimal pour chaque partie du moule. Cependant, la méthode doit être améliorée au niveau des indices de complexité des noyaux sachant que celle-ci n'intègre pas les noyaux creux ainsi que les formes permettant le dégazage des noyaux lors de la coulée.

4.3.2 Pièce 2 : Chapeau en alliage d'aluminium Al Si 13

La conception du moule de cette pièce a été réalisée précédemment par impression 3D dans le chapitre 3 afin d'appliquer les règles métiers de l'impression 3D et de tester les calculs de coût analytique et paramétrique. L'objectif est d'appliquer la méthodologie de conception des moules hybrides. La complexité globale $CF_{\text{estimated}}$ est de 72,6 (*Tableau 4.3-1*). Le niveau de complexité de la pièce est élevé et montre l'intérêt de l'étude de cette pièce pour une nouvelle conception hybride.

	
Pièce	Chapeau
<i>Ratio Volume CPR</i>	0,85
<i>Ratio Surface CAR</i>	0,81
<i>Ratio nombre de noyau CNC</i>	0,5
<i>Ratio volume noyau CCR</i>	0,70
<i>Ratio épaisseur CTR</i>	0,9
<i>Ratio profondeur outillage CDR</i>	0,33
CFEstimated	72,6

Tableau 4.3-1: Indices de complexité pièce

La complexité des surfaces internes C_{Nint} est de 59% (Tableau 4.3-2). Ce noyau est donc fabriqué par impression 3D sable.

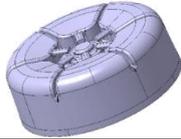
Noyau	
N_{PR}	0,33
N_{AR}	0,45
N_{TR}	0,9
N_{SI}	0,6
N_{DEB}	0,61
C_{Nint}	59%

Tableau 4.3-2: Indice de complexité des surfaces internes

Le calcul de I_{CD} vaut 0,01 pour les parties externes de la grappe, l'entonnoir de coulée présente une contre-dépouille qui sera éliminée par un élément démontable de forme conique sur la face opposée à l'empreinte (Figure 4.3-4). Avec cet élément démontable l'indice I_{CD} vaut 0. Le choix de la direction Z de démoulage assure le remoulage du noyau. Le moule sera donc réalisé par les moyens conventionnels et le noyau par impression 3D (Figure 4.3-5).

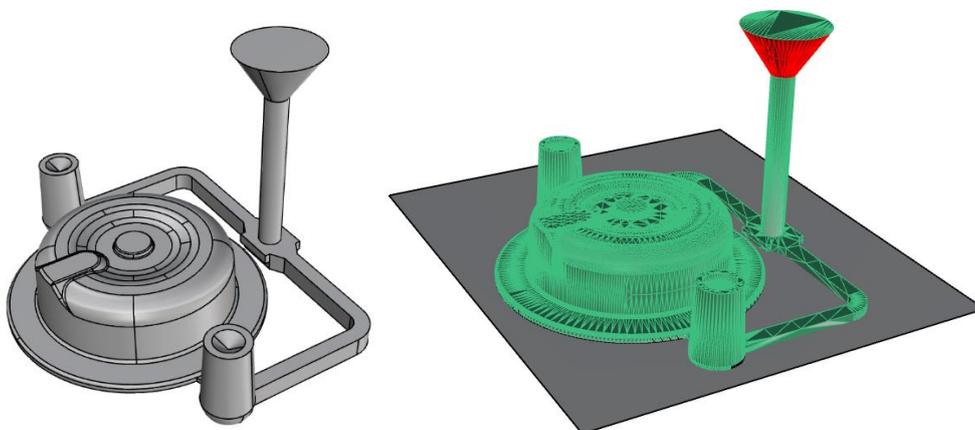


Figure 4.3-4: Analyse des surfaces externes

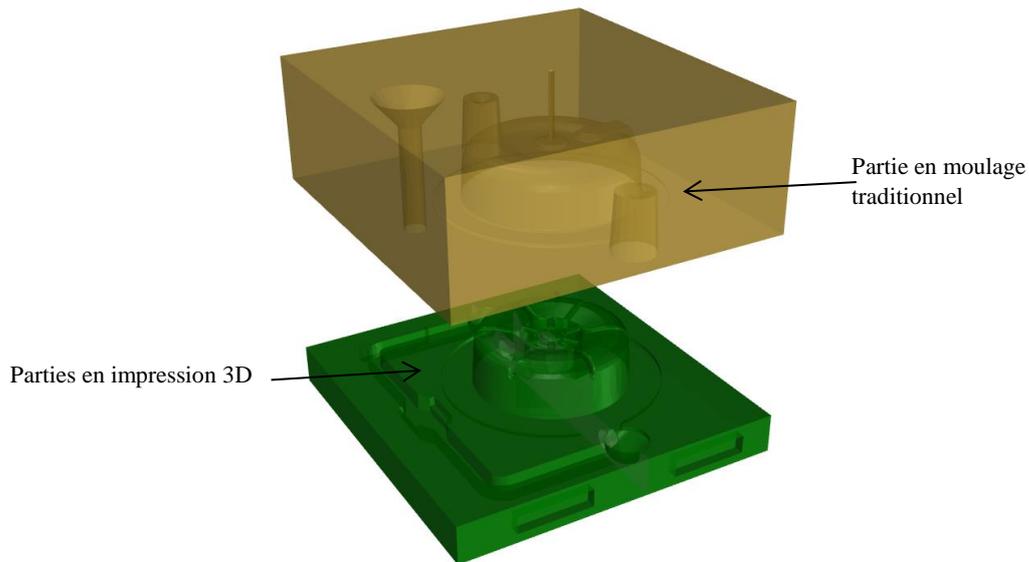


Figure 4.3-5:DFN moule chapeau

L'application de la méthode n'a posé aucun problème particulier et a permis d'aboutir à un choix optimal des procédés de fabrication.

4.3.3 Pièce 3 : Le mélangeur en laiton

L'étude de moulage, réalisée entièrement en impression 3D a été présentée dans le chapitre 3. L'application de la méthodologie de conception des moules hybrides permet d'optimiser le processus de fabrication et le coût du moule.

La complexité globale $CF_{estimated}$ du mélangeur (Figure 4.3-6) a été précédemment calculée à 72 (Tableau 4.2-1). L'étude de ses surfaces internes montre un niveau de complexité supérieur à 40% pour les deux noyaux internes (Tableau 4.2-5). De plus, les contraintes de débarrassabilité et de stabilité de ces noyaux imposent la réalisation de structures creuses.

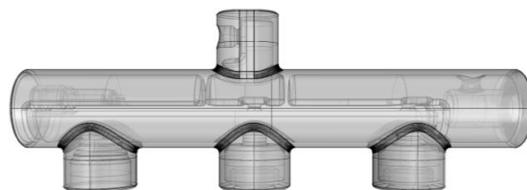


Figure 4.3-6 : DFN du mélangeur

L'étude des surfaces externes du mélangeur donne un indice I_{CD} à 0 selon la direction X de démoulage, en prenant en compte un entonnoir de coulée amovible. Le remoulage des noyaux est possible selon cette ouverture, les surfaces externes peuvent donc être réalisées en moulage traditionnel. Le moule est donc conçu en combinant le moulage traditionnel pour les parties externes et la fabrication additive pour les surfaces internes (Figure 4.3-7).

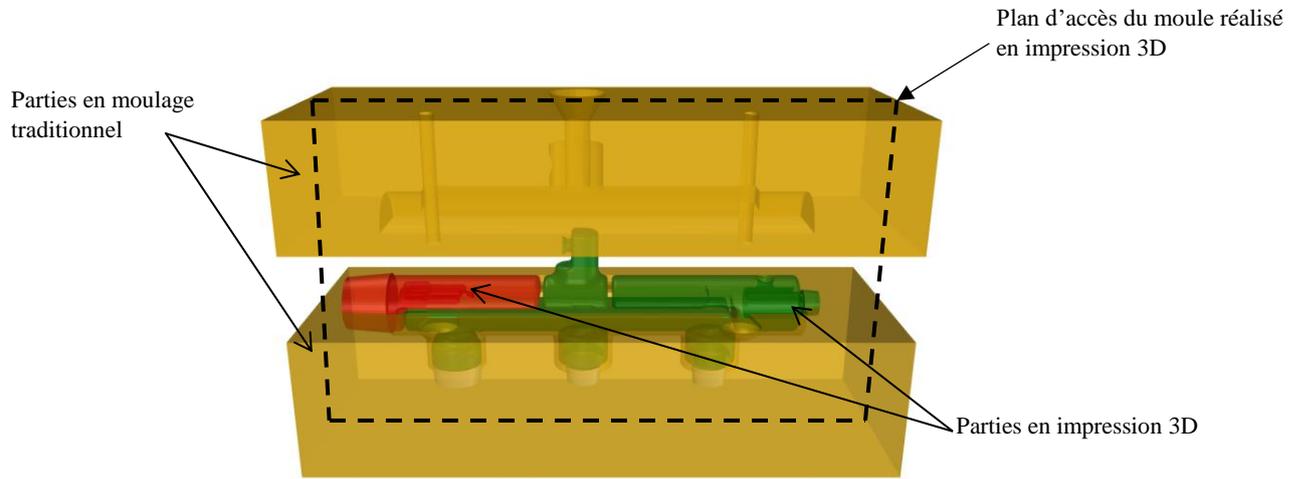


Figure 4.3-7: DFN du moule du mélangeur

Le plan d'ouverture du moule du mélangeur est différent de celui sélectionné pour la solution entièrement imprimée en chapitre 3. Dans le cas de la conception hybride, le plan d'ouverture du moule, réalisé en conventionnel, est choisi pour assurer le démoulage de la plaque modèle et le remmoulage des noyaux. Le moule réalisé entièrement par impression 3D à un plan d'accès perpendiculaire au plan d'ouverture du moule conventionnel afin de faciliter le nettoyage des noyaux solidaires du moule.

Cette étude de cas renforce les remarques émises pour les deux cas précédents à savoir que les indices de complexité doivent intégrer la structure des noyaux creux et l'entonnoir de coulée amovible.

4.3.4 Pièce 4 : Carter 3 en Fonte à graphite lamellaire (EN GJL 250)

La pièce ci-dessous (Figure 4.3-8) est également une pièce type « carter » comportant de nombreuses formes cylindriques dans différentes directions et situés sur différents plans ce qui complexifie son étude de moulage.

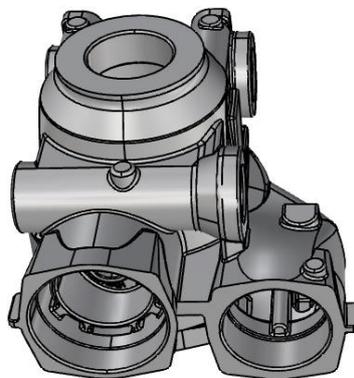


Figure 4.3-8: DFN du carter

L'analyse de la complexité globale de cette pièce $CF_{estimated}$ est de 78 (Tableau 4.3-3). Ce seuil étant supérieur à 60, l'analyse de la complexité de ses surfaces internes et externes doit être effectuée.

Pièce	Carter
Ratio Volume CPR	0,87
Ratio Surface CAR	0,83
Ratio nombre de noyau CNC	0,71
Ratio volume noyau CCR	0,69
Ratio épaisseur CTR	0,62
Ratio profondeur outillage CDR	0,3
CFEstimated	78

Tableau 4.3-3: Calcul de $CF_{estimated}$ pour le carter

Les surfaces internes de la pièce ont un indice de complexité C_{Nint} de 47%, le noyau de la pièce sera donc réalisé par impression 3D.

Noyau	
N_{PR}	0,66
N_{AR}	0,50
N_{TR}	0,98
N_{SI}	0,3
N_{DEB}	0,4
C_{Nint}	47 %

Tableau 4.3-4: Calcul de C_{Nint} pour le carter

Le calcul des indices de complexité des surfaces externes de la pièce sont effectués sur la grappe de la pièce (Figure 4.3-9).

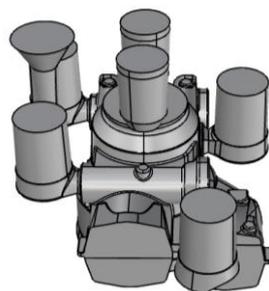


Figure 4.3-9: DFN de la grappe du carter

Le nombre d'îlots isolés en contre-dépouilles, selon toutes les directions testées, reste important. Les surfaces externes seront donc réalisées par impression 3D (*Tableau 4.3-5*).

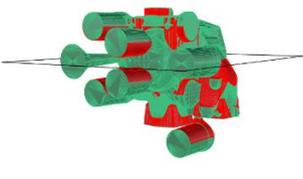
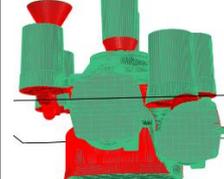
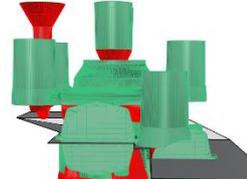
	Cas 1 : direction Z et le plan médian	Cas 2 : direction X et le plan médian	Cas 3 : direction Y et le plan médian	Cas 4 : Direction Y selon la plus grande surface projetée
				
I _{CD}	0,35	0,24	0,28	0,2
I _{IS}	15	18	12	9

Tableau 4.3-5: Analyse des surfaces externes

Le moule est donc fabriqué entièrement par impression 3D selon le processus I3D défini précédemment. Le moule est en cinq parties pour assurer le remmoulage du noyau et le nettoyage des surfaces moulantes. L'étude des surfaces externes conduisait à un moule en deux parties mais pour assurer le remmoulage du noyau des surfaces internes, il faut morceler le moule en 5 parties comme le montre la figure ci-dessous (*Figure 4.3-10*).

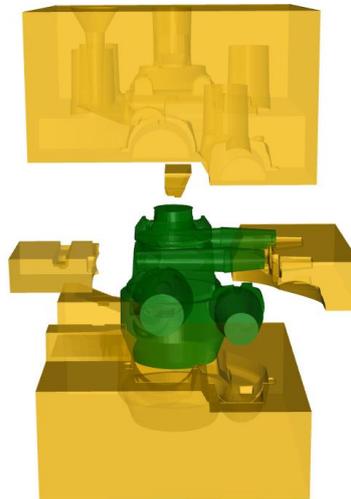


Figure 4.3-10: DFN du moule pour impression 3D

Compte tenu de la complexité de la pièce et de la petite série à produire, la méthode retient une solution de fabrication par impression 3D pour tout le moule. La méthode prévoit de tester le remmoulage des noyaux mais sans apporter de solution en cas d'interférence. Dans cette étude, le morcelage du moule extérieur s'est imposé afin de remmouler la partie supérieure du moule sur l'assemblage moule inférieur plus noyau.

4.4 Limites technico-économiques

Le délai pour obtenir un moule par impression est très court de l'ordre de quelques jours. La fabrication des outillages demande quelques semaines. Il s'agit souvent d'usiner des blocs de matière pour obtenir les plaques modèles et les boîtes à noyaux. L'impression 3D est d'abord choisie pour des raisons de délai et ensuite de coût en fonction du nombre de pièces à fabriquer. En fonderie traditionnelle, le coût de production des moules dépend du coût de l'outillage, des consommables et du coût de moulage. Pour que l'impression 3D ou que l'hybridation des procédés soit rentable, il faut que le coût la fabrication avec ces procédés, en fonction du nombre de pièces à produire, soit inférieur au coût de fabrication obtenu par des procédés conventionnels de fonderie. Dans cette partie, le coût du chapeau et du carter 3 seront étudiés selon les informations disponibles et diffusables. Les valeurs de ces coûts sont des ordres de grandeurs indicatifs.

L'étude de moulage du chapeau dans le chapitre 3 nous a conduit à une solution d'impression 3D sable dans un contexte de délais réduit. L'étude présentée consiste à définir le seuil de rentabilité d'un moule hybride. Le coût de la solution hybride intègre l'impression 3D pour le noyau et un procédé conventionnel pour les surfaces externes. Le coût du noyau imprimé est de 527 € et le coût de la plaque modèle en LAB pour les surfaces externes est de 1000 €. Le coût de production pour n pièces suivant la méthode hybride est : $y_1 = 620x + 1000$. Le coefficient de 620 représente le coût du noyau imprimé en 3D et le coût de production du moule conventionnel pour les surfaces extérieures. Le coût de production pour n pièces en moulage conventionnel est : $y_2 = 150x + 3000$. Le coefficient 150 représente le coût du moule complet en traditionnel et les 3000 € représente le coût de l'outillage. Le coût de production de n pièces en impression 3D est : $y_3 = 5000x$. Sur le graphique (*Figure 4.4-1*) on constate que la solution en impression 3D n'est jamais rentable et est recommandée pour des commandes urgentes. Pour cette pièce, la solution hybride est rentable jusque 5 pièces et ensuite c'est la méthode conventionnelle qui prend le relais.

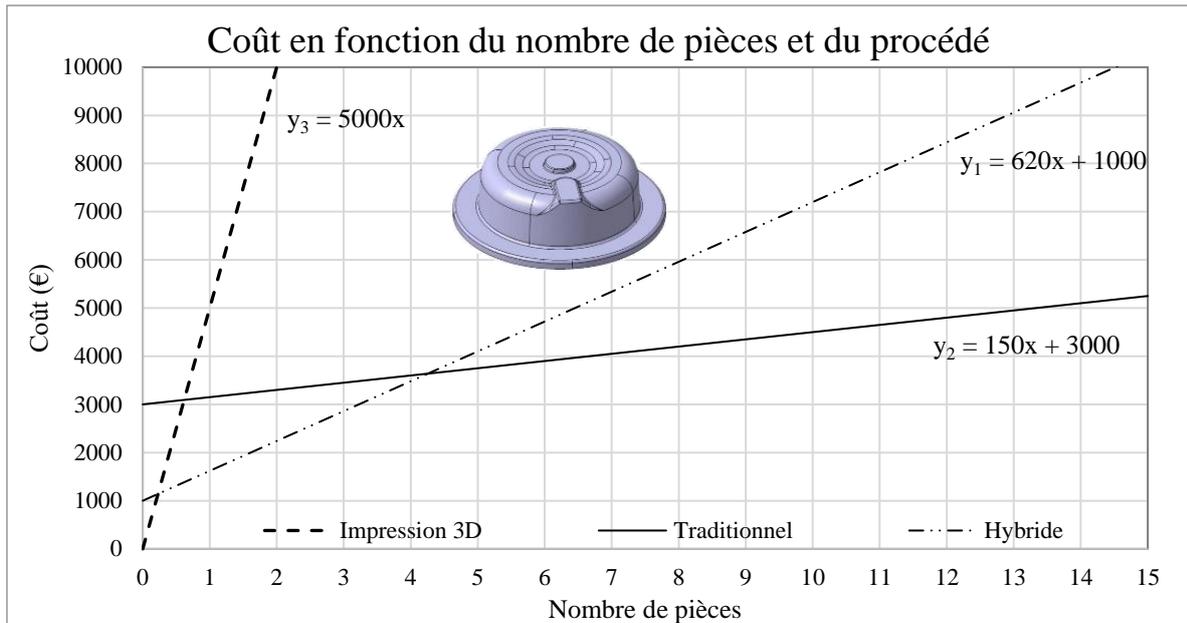


Figure 4.4-1 : Coûts du Chapeau

Le carter a des structures internes et externes, très complexes. De ce fait, la méthodologie de conception de moules hybride aboutit à une solution de moule entièrement imprimée. Le coût de production de n pièce en impression 3D est : $y_1=3000x$. La complexité importante de cette pièce induit un coût de l’outillage pour la fabrication traditionnelle assez élevé. Le coût de n pièces produites en moulage traditionnel et de : $y_2= 162x+16000$. Le coefficient de 162 représente le coût du moule complet en procédés conventionnel et les 16 000 € représente le coût de l’outillage. Le graphique ci-dessous (Figure 4.4-2) permet de constater que la solution entièrement en impression 3D est rentable jusque 5 pièces produites.

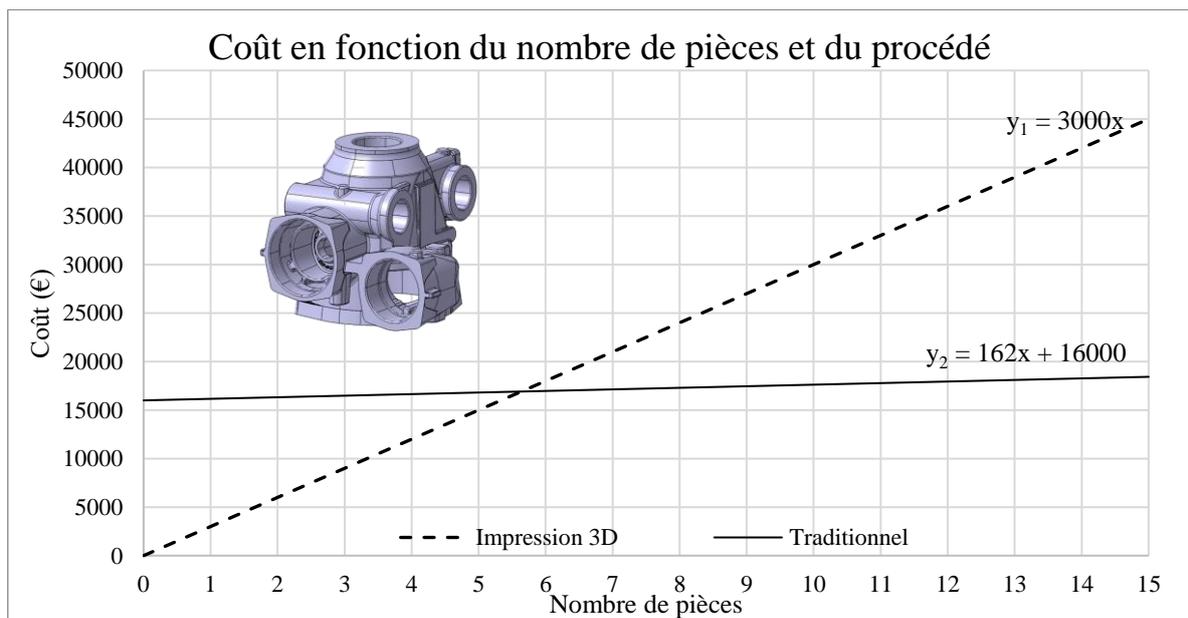


Figure 4.4-2: Coûts du carter

L'opération de remmoulage pour le moulage conventionnel, impose de mettre en position 11 noyaux dont 4 noyaux de paroi et 2 parties de moules alors que la solution par impression 3D ne doit positionner que 6 parties dont 5 réservées au moule. Cette solution d'impression 3D peut être intéressante dans le cadre de la robotisation du remmoulage des noyaux.



Figure 4.4-3: Photographies des noyaux en traditionnel du carter

Conclusion du chapitre 4 :

Méthodologie et outils pour la conception de moules hybrides

Ce chapitre, a permis d'établir une méthodologie de conception des moules hybrides afin de choisir les procédés de fabrication les plus adaptés en fonction de la complexité des surfaces de la pièce. La complexité de la pièce est d'abord évaluée par un indice de complexité globale de la pièce et est ensuite déclinée par deux indices locaux de complexité des surfaces internes et externes de la grappe. Les seuils de chaque indice de complexité ont été déterminés à partir d'un retour d'expérience et des travaux de recherches réalisés dans le domaine. Cette méthode s'appuie sur la caractérisation des moules, les règles métiers inhérentes à l'impression 3D sable et les calculs d'indices de complexité des surfaces de la pièce. Cette démarche intègre l'opération de remmoulage des différentes parties de moules et peut se traduire par un nouveau morcelage des blocs définis précédemment pour éliminer les problèmes d'interférences. Cette méthode a été testée sur de nombreux cas industriels et a permis de nous montrer les axes de progrès de cette méthode. Une étude technico-économique définit le seuil de rentabilité entre la réalisation des moules par impression 3D, la réalisation des moules par des moyens conventionnels et la réalisation des moules combinant ces deux procédés. La méthode proposée est très perfectible au niveau de la valeur des seuils de complexité, des règles métier définie au niveau qualitatif mais à préciser au niveau quantitatif et des surfaces de joints par rapport au nombre d'îlots en contre-dépouille.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions

L'étude bibliographique montre que peu ou très peu de travaux de recherche ont été réalisés sur l'hybridation des procédés de fonderie combinant les moyens conventionnels de fonderie avec l'impression 3D sable. Quelques méthodes d'aide à la conception d'outillages hybrides ont été recensées mais pas dans le domaine de la conception de moules hybrides de fonderie justifiant nos travaux.

Ces travaux de recherche ont permis de caractériser les moules fabriqués par impression 3D sable. Cette caractérisation des propriétés mécaniques, physiques et dimensionnelles permet de situer cette nouvelle technologie par rapport au moyens conventionnels de fonderie. Les propriétés mécaniques ainsi que la précision dimensionnelle dépendent de la direction de stratification. Cette anisotropie permettra d'orienter le moule dans le volume constructible de la machine en fonction des efforts exercés sur les surfaces moulantes par la pression métallostatique exercée lors de la coulée de la pièce. La connaissance des propriétés mécaniques du couples sable liant permettra de dimensionner l'épaisseur des moules et des noyaux.

La formalisation du processus d'étude de moulage traditionnel suite aux interviews des fondeurs partenaires du projet a permis de partager une vision commune de la fonderie et d'enclencher un processus collaboratif avec l'ensemble des acteurs impliqués dans ce projet. La définition des règles métiers inhérentes à l'impression 3D sable et de ses limites ont posé les bases à la définition d'une méthode de conception de moules réalisés par impression 3D. L'évaluation du coût de revient par une méthode paramétrique et l'ensemble des travaux précédents ont permis de définir les limites technico-économiques de l'impression 3D sable.

L'élaboration de la méthodologie de conception de moules hybrides s'appuie sur les caractéristiques des moules, sur la méthode de conception des moules réalisés par impression 3D sable et sur une analyse de la complexité de la pièce. Cette analyse de la complexité s'effectue sur la globalité de la pièce et ensuite de façon plus locale sur les surfaces internes et externes. Les différents seuils de complexité ont été définis expérimentalement et pour certains à partir d'une étude bibliographique. Cette méthode de conception de moules hybrides permet de choisir le procédé optimal de fabrication de chaque partie ou module du moule. L'application

de la méthodologie de conception sur différent cas d'étude a permis de valider cette méthode et de mettre en avant les améliorations à apporter à celle-ci.

Perspectives

Plusieurs axes d'amélioration de la méthodologie de conception ont été relevés en la testant sur des études de cas. La méthode doit être testée sur un plus grand nombre de pièces industrielles afin de consolider les valeurs des seuils définis pour la complexité internes et externes des surfaces. La valeur des pondérations des indices de complexité dans le calcul de la complexité globale et interne doit également être améliorée afin d'accroître la robustesse de la méthodologie.

La méthodologie établie traite les noyaux et les moules dans des processus parallèles ce qui peut engendrer des problèmes de remmoulage et un nouveau morcelage du moule pour supprimer les interférences lors de l'assemblage des différentes parties. Les différentes possibilités de direction de démoulage résultent de la faisabilité du remmoulage des noyaux.

La méthodologie de conception de moule hybride ne permet pas de faire la différence entre un moulage en chape et la création d'un noyau de paroi, dans le cas d'un faible nombre d'îlots isolés. L'ajout de critère supplémentaire de distance entre les deux surfaces délimitant les îlots isolés permettrait de choisir un moulage en chape ou par noyau de paroi. D'autre part, dans le cas d'un noyau de paroi celui-ci devra être analysé par les critères de complexité internes des surfaces afin de déterminer son procédé de fabrication.

Dans le cadre de l'usine 4.0, le remmoulage des différentes parties de moule pourrait être robotisées afin d'éviter l'apparition de TMS chez les opérateurs. Les noyaux seraient de plus en plus complexes afin de limiter leur nombre et devraient présenter une bonne rigidité pour permettre leur manipulation. Pour respecter ces deux contraintes, les noyaux doivent avoir une structure interne architecturée et être creux pour envisager la possibilité de dégazage lors de la coulée du matériau. Toutes ces caractéristiques ne peuvent être respectées que par la fabrication de ces noyaux par impression 3D sable d'autant plus que le binder jetting permet d'atteindre des cadences de production de 20 litres par heure, tout à fait adaptée à la grande série.

Le DFAM est l'ensemble des méthodes et outils permettant de prendre en compte les spécificités de la fabrication additive (technologiques, géométriques, ...) lors de la phase de conception. Les caractéristiques des moules, les règles métiers ainsi que les limites technico-économiques du procédé d'impression 3D sable définis dans ces travaux de recherche pourront

alimenter cette méthode. Toute cette connaissance pourra être implémentée soit dans un module spécifique de conception de moules hybrides assistée par ordinateur ou soit dans la chaîne numérique de la fonderie.

La méthodologie de conception hybride est actuellement basée sur la combinaison des procédés de fabrication conventionnels de la fonderie et de l'impression 3D sable. D'autres technologies de fabrication de moule, pouvant être intégrées dans le panel des moyens de fabrication des moules hybrides, émergent tels que l'usinage de blocs en sable à prise chimique, l'impression de moules en céramique et l'impression 3D de moule à gradient de propriétés. Les travaux de recherche [LEN18], intègrent des parties de moule avec un gradient fonctionnel de propriété permettant de diriger la solidification et d'éviter l'apparition de défaut de santé de matière.

Dans le cadre de l'amélioration de la conception des moules en impression 3D sable, l'optimisation topologique pourrait permettre d'optimiser les épaisseurs des parois de moule et la diffusion thermique par la création de structures lattices aux points chauds. Cette optimisation pourrait également être appliquée sur la pièce de fonderie sachant que l'imprimante 3D permet de fabriquer des formes organiques.

- [AFN14] AFNOR. *Méthodes statistiques dans la gestion de processus-Aptitude et performance-Partie 1 : Principes et concepts généraux*. ISO 22514-1 :2014, 2014, 23p.
- [AFN15] AFNOR. *Fabrication additive- Principes généraux- Partie 2 : vue d'ensemble des catégories des procédés et des matières premières*. ISO 17296-2 :2015, 2015, 8p.
- [AFN17] AFNOR. *Fabrication additive-Principes généraux-Terminologie*. NF EN ISO/ASTM 52900 :2017, 2017, 34p.
- [AND84] ANDRE.J et al. *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. Brevet français n°2567668, 16 juillet 1984.
- [ARC19] ARCH DAILY. *Arup Develops Affordable 3D-Printing Sand Casts for Complex Steel Structural Elements | ArchDaily* [en ligne]. THORNS, Ella, 2017. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.archdaily.com/880432/arup-develops-affordable-3d-printing-sand-casts-for-complex-steel-structural-elements>.
- [ASA18] ASADOLLAHI-YAZDI, Elnaz, GARDAN, Julien, LAFON, Pascal. Toward integrated design of additive manufacturing through a process development model and multi-objective optimization. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* [en ligne]. 2018, Vol 96, n° 9-12,4145-4164 p. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1880-6>.
- [BON10] BONNARD, Renan. *Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive* [en ligne]. Thèse de doctorat : Sciences de l'ingénieur. ENS Cachan – Antenne de Bretagne : Ecoles centrale de Nantes, 2010. [Consulté le 13/12/2016]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00585342>.
- [BON15] BONNEFOY.H , MARQUET.V, MEYRIEUX.J-E. *Mould design method with sand 3D printing* [PDF en ligne].2015[Consulté le 04/09/2017]. Disponible à

l'adresse:https://www.researchgate.net/publication/280554552_Mould_design_method_with_sand_3D_printing.

- [BON16]** BONNEFOY, Hervé. La fabrication additive, un des leviers de compétitivité, pour la fonderie du futur. *2ème symposium de la fabrication additive*, 2016 Charleville-Mézières.
- [BON19]** BONNEFOY, Hervé, DAMIENS, Alexandre. L'hybridation des technologies en fabrication additive. *Traitements & Matériaux magazine*, n°456 Janvier-Février 2019.
- [CAM11]** CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook*, 1^{er} édition. UK: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2011, ISBN-13: 978-1-85617-809-9.
- [CHO06]** CHOUGULE, R. G., RAVI. B. Casting cost estimation in an integrated product and process design environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [en ligne], 2006, 19:7, 676-688p. [Consulté le 28/09/2019]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1080/09511920500324605>.
- [COR03]** CORDEBOIS, Jean-Pierre et coll. *Fabrication par usinage*. Saint-Just-la-Pendue : DUNOD, 2003, ISBN 2 10 005586 0.
- [CTI19b]** CTIF. *Les différents sables de fonderie – MetalBlog* [en ligne]. France, 2019, ADDINI, Fabiola. [Consulté le 22/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://metalblog.ctif.com/2019/06/10/les-differents-sables-de-fonderie/>.
- [CUE96]** CUENIN, Pierre. Métallurgie des alliages de fonderie. *Techniques de l'ingénieurs* [en ligne], 1996. [Consulté le 29/03/2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42352210-m3520.pdf>
- [CUE97]** CUENIN, Pierre. Spécification Des Pièces de Fonderie. Normalisation Ingénierie. *Techniques de l'ingénieur* [en ligne], 1997. [Consulté le 23/03/2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42352210-m3540.pdf>.
- [DAN08]** DANJOU, Stéphane. KOEHLER, Peter. Bridging the gap between CAD and rapid technologies - Exigency of standardized data exchange. Papier de conference: *European Forum On Rapid Prototyping & Manufacturing*, Ecole Centrale de Paris – Châtenay-Malabry, 2008.

- [DEN18]** DENG, Chengyang, KANG Jinwu, SHANGGUAN, Haolong, HUANG, Tao, LIU, Zhiyong. Effect of hollow structures in sand mold manufactured using 3D printing. *Journal of Materials Processing Tech.* [en ligne], 2018, 255, 516-523 p. [Consulté le 08/11/2018]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.031>.
- [DIN07]** DINESH, RAVI. B. Rapid tooling route selection and evaluation for sand and investment casting. *Virtual and Physical Prototyping* [en ligne], 2007, 2 :4, 197-207p. [Consulté le 06/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1080/17452750701747088>.
- [DMG19]** DMG MORI. *LASERTEC 65 3D hybrid - Machines ADDITIVE MANUFACTURING de DMG MORI* [en ligne]. [Consulté le 24/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://fr.dmgmori.com/produits/machines/additive-manufacturing/procede-de-buse-de-pulverisation/lasertec-65-3d-hybrid>
- [DNA19]** 3Dnatives. *Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions - 3Dnatives* [en ligne]. France, 2013. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/>.
- [DOU04]** DOUR, Gilles. *Aides-Mémoire Fonderie*. 2^e édition. France: DUNOD, 2004, ISBN 978-2-10-076006-0.
- [DUR10]** DURGESH, Joshi, RAVI, Bhallamudi. Quantifying the Shape Complexity of Cast Parts. *Computer-Aided Design and Applications* [en ligne], 2010, vol. 7, no. 5, pp. 685–700. [Consulté le 06/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.3722/cadaps.2010.685-700>.
- [ELM03]** ELMARAGHY, W.H., URBANIC, R.J. Modelling of manufacturing systems complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [en ligne], 2003, vol 52/1, 363-366p. [Consulté le 08/11/2018]. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60602-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60602-7).
- [ENV17]** ENVISIOTEC. *Viridis3D Archives | EnvisionTEC* [en ligne]. USA, 2017. [Consulté le 27/11/2017]. Disponible à l'adresse : <https://enviontec.com/3d-printers/robotic-additive-manufacturing/>.

- [EOS17]** INDUSTRY PLAZA. *Special machines / Industrial suppliers* [en ligne]. [Consulté le 12/09/2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.industry-plaza.com/eosint-s-750-p49013.html>.
- [EXO17]** EXONE. *ExOne / Industrial 3D Printers – 3D Printing Systems* [en ligne]. Allemagne. [Consulté le 12/09/2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.exone.com/Systems>.
- [FAB19]** MECASTYLE. *Présentation par Mécastyle des différents process en fab additive* [en ligne]. France. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.fabrication-additive.fr/fabrication-additive-processus>.
- [FAC99]** FACY.G, POMPIDOU.M, *Précis de fonderie méthodologie, production et normalisation*, 2^e édition, Saint-Jean-de-Broye : AFNOR, 1999, ISBN 2-12-263221-6.
- [FON17]** FONDEURS ARDENNAIS. *La fonderie dans les Ardennes* [en ligne]. France. [Consulté le 13/09/2017]. Disponible à l'adresse : http://www.fonderie-ardennes.fr/index2.php?contenu=savoir_faire.
- [HAC17]** HACKNEY, Philip Mark, WOOLDRIDGE, Richard. Characterisation of direct 3D sand printing process for the production of sand cast mould tools. *Rapid Prototyping Journal* [en ligne], 2017, Vol. 23 Iss 1. [Consulté le 06/01/2017]. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0101>
- [HUA06]** HUANG, Z., XIE, B., MA, L. et al. Feature conversion based on decomposition and combination of swept volumes. *Computer-Aided Design* [en ligne], 2006, Vol. 38, p. 857-873. [Consulté le 08/10/2016]. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2006.04.011>.
- [HUL84]** HULL.C. *Apparatus for production of three-dimensional objets by stereolithographie*, brevet US 4,575,330, 8 août 1984.
- [HUL19]** HULIN, Marjorie, BONNEFOY, Hervé. Projet QUICKMOLD « La fabrication au service de la productivité en plasturgie ». *A3DM magazine*, n° Février-Mars, 2019.
- [IKO16]** IKONOMOV, Pavel, et al. 2016 ASEE Annual Conference & Exposition *Proceedings*. Hybrid Additive/Substraction Method for Rapid Casting

Prototypings with Light-Cured Sand. Conference paper ASEE's 123rd, New Orleans 2016. [Consulté le 05/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.18260/p.2550>.

- [ISM14]** ISMAIL, Salim. *Exponential organazitions*, First Diversion Books edition, Octobre 2014, ISBN:978-1-62681-358-8.
- [JAC17]** JACQUES, Marjorie, MARQUET, Vincent, BONNEFOY, Hervé, AUZENE, Delphine. *Technical-economy study of injection mould in plastics processing manufactured by SLM*. Conférence ICWAM 2017.
- [JAS99]** JASSON, Phillippe. Sables et Matériaux de Moulage de Fonderie. *Techniques de l'ingénieur* [en ligne], 1999. [Consulté le 23/03/2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42358210-m3575.pdf>.
- [JOS16]** FLYNN, Joseph M., et al. Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools - Research and Industrial Developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [en ligne], 2016, vol. 101, 79–101p. [Consulté le 13/12/2016]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.
- [JUS14]** JUSTE, Enrique, PETIT, Fabrice, LARDOT, Véronique, CAMBIER Francis. Shaping of ceramic parts by selective laser melting powder bed. *The Material science of additive Manufacturing* [en ligne], 2014, Vol 29, issue 17, 2086-2094 p. [Consulté le 19/10/2019]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.127>.
- [KER09a]** KERBRAT, Olivier. *Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication* [en ligne]. Thèse de doctorat : Génie mécanique. ENS Cachan – Antenne de Bretagne : Ecoles centrale de Nantes, 2009. [Consulté le 08/10/2016]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00439589>.
- [KER09b]** KERBRAT, Olivier, MOGNOL, Pascal, HASCOET, Jean-Yves. Méthode de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication. 11ème Colloque National AIP Primeca, La Plagne (France), 2009, 13 p

- [LEN18]** LE NEEL.T, MOGNOL.P, HASCOET.J.Y. *Design for Additive Manufacturing: Multi Material Sand Mold* [en ligne], Rapid&TCT conférence, 2018, Texas. [Consulté le 28/05/2018]. Disponible à l'adresse : <https://gem.ec-nantes.fr/wp-content/uploads/2019/02/Design-for-Multi-Materials-Molds-by-Additive-Manufacturing-Rapid3D.pdf>
- [MAC17]** MACKÉ-BART, Clotilde. Outillage de fonderie/ derniers développements, évolutions et perspectives. *La revue forge et fonderie*, 2017, n° décembre, 16-27p.
- [MAR06]** MARTIN, Lionel. *Intégration Du Métier de La Fonderie Dans Les Processus de Conception - Méthodologies et Outils Associés* [en ligne]. Thèse de doctorat : Génie mécanique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006. [Consulté le 07/12/17]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002137>.
- [MES19]** MES PIECES AUTO. *La chemise fonte GS - GL*. [Consulté le 24/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://www.mespiecesauto.com/chemise-fonte-gs-acier/>
- [MIT18]** MITRA, Saptarsee, DE CASTRO, Antonio Rodríguez, EL MANSORI, Mohamed. The effect of ageing process on three-point bending strength and permeability of 3D printed sand molds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [en ligne], 2018. [Consulté le 07/06/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2024-8>.
- [MIT19]** MITRA, Saptarsee, DE CASTRO, Antonio Rodríguez, EL MANSORI, Mohamed. On the rapid manufacturing process of functional 3D printed sand molds. *Journal of Manufacturing Processes* [en ligne], 2019, vol 42, 202-212 p. [Consulté le 07/06/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.034>.
- [NYE16a]** NYEMBWE.K, MASHILE.M, VAN TONDER.P.J.M, DE BEER.D.J, GONYA.E. Physical properties of sand parts produced using a Voxeljet vx1000 three-dimensional printer. *South African Journal of Industrial Engineering* [en ligne], 2016, Volume 27, 136-142 p. [Consulté le 20/04/2017]. Disponible à l'adresse: <http://dx.doi.org/10.7166/27-3-1661>.

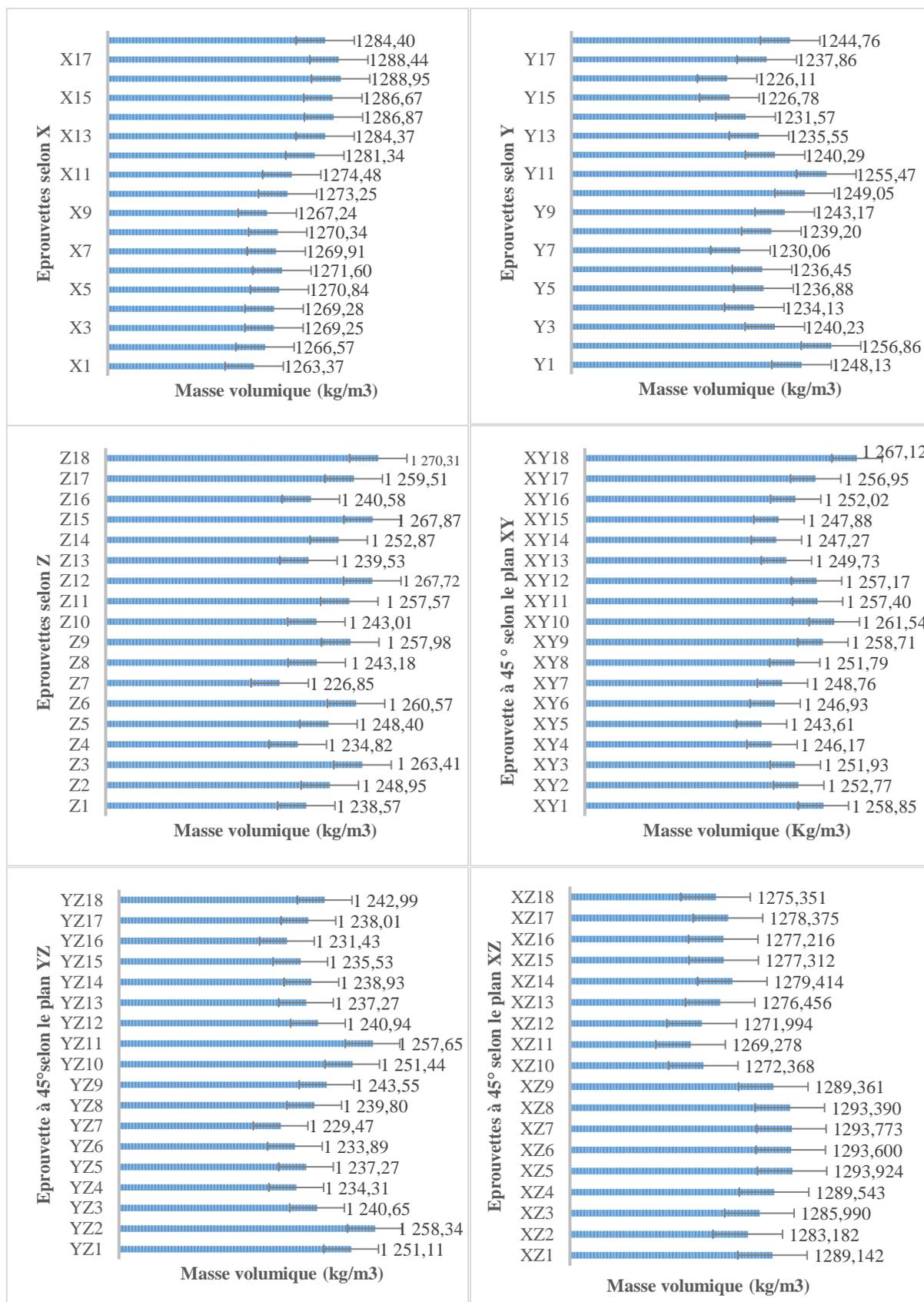
- [NYE16b]** NYEMBWE.K, OYOMBO.D, DE BEER.D.J, VAN TONDER.P.J.M. Suitability of a south African silica sand for three-dimensional printing of foundry moulds and cores. *South African Journal of Industrial Engineering* [en ligne], 2016, Volume 27, 230-237 p. [Consulté le 20/04/2017]. Disponible à l'adresse: <http://dx.doi.org/10.7166/27-3-1662>.
- [PON14]** PONCHE, Rémi, KERBRAT, Olivier, MOGNOL Pascal, HASCOET, Jean-Yves. A novel methodology of Design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [en ligne], 2014, 389-398p. [Consulté le 14/10/2019]. Disponible à l'adresse: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2013.12.001>.
- [PIP17]** PIPAME (Le Pôle Interministériel de Prospectives et d'Anticipation des Mutations Economiques), *Futur de la fabrication additive rapport final*, janvier 2017, ISBN 978-2-11-151552-9
- [RIV11]** RIVETTE. M., et al. Design of Hybrid Rapid Prototypes with Geometrical, Manufacturing and Assembly Points of View. *Virtual and Physical Prototyping* [en ligne], 2011, vol. 6, no. 4, 241–255p. [Consulté le 06/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.631107>.
- [ROC04]** ROCHIER.Y, REYNAUD.A. *La fonderie ses techniques ses possibilités*, Sévre : CTIF, 2004, ISBN : 978-2-7119-0208-8.
- [SAM18]** SAMA, Santosh Reddy, WANG Jiayi, MANOGHARAN Guha. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing. *Journal of Manufacturing Processes* [en ligne], 2018, Volume 34, Part B, 765-775 p. [Consulté le 08/11/2018]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.049>.
- [SAM19]** SAMA, Santosh Reddy, BADAMOB, Tony, LYNCHC Paul MANOGHARAN Guha. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing. *Additive Manufacturing* [en ligne], 2019, volume 25, 563-578 p. [Consulté le 10/07/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.009>.
- [SEN17]** SENTROL. *SENTROL CO., LTD* [en ligne]. Coréen. [Consulté le 12/09/2017]. Disponible à l'adresse : http://3dprinter.sentrol.net/_ENG/html/product01.php.

- [SHA17]** SHANGGUAN.H, KAN.J, DENG.C, HU.Y, HUANG.T.H. 3D-printed shell-truss sand mold for aluminum castings. *Journal of Material Processing Technology* [en ligne], 2017, 250, 247-253 p. [Consulté le 22/06/2017]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.010>.
- [SIV19]** SIVARUPAN,Tharmalingam, UPADHYAY,Meet, ALI, Yahia, EL MANSORI, Mohamed, DARGUSH, Mattew S. Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds. *Journal of cleaner production* [en ligne],2019, Volume 224, 411-420 p. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.158>.
- [SNE15]** SNELLING, Dean, et al. Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds. *Advanced Engineering Materials* [en ligne], 2015, 922–932p. [Consulté le 20/04/17]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1002/adem.201400524>.
- [STR19]** CIRTES. *Stratoconception, Fabrication Additive (Prototypage Rapide, Outillage Rapide, Impression 3D) – Procédé* [en ligne]. France. [Consulté le 20/09/2019]. Disponible à l'adresse:<https://www.stratoconception.com/procede>.
- [VIL03]** VILLENEUVE, François. *Génération automatique des processus de fabrication. Fabrication assistée par ordinateur*, Lavoisier, 2003, 295-350 p.
- [VOX17]** VOXELJET. *3D printing systems / industrial 3D printing* [en ligne]. Allemagne. [Consulté le 12/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/>.
- [WAL19]** WALKER, Jason M., PROKOP, Andrew, LYNAGH, Charles, VUKSANOVICH, Brian, CONNER, Brett, ROGERS, Kirk, THIEL, Jerry, MACDONALD, Eric. Real-time process monitoring of core shift during metal casting with wireless sensing and 3D sand printing. *Additive Manufacturing* [en ligne], 2019, Volume 27, 54-60 p. [Consulté le 10/07/2019]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.018>.
- [WIK17]** WIKIPEDIA. *Octree* [en ligne]. [Consulté le 11/09/2017]. Disponible à l'adresse : <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree>.

[YAN03] YANG, S.Y, et al. Selection of optimal material and operating conditions in composite manufacturing.PartII: complexity, representation of characteristics and decision making. *Internationnal Journal of Machine Tools&Manufacture* [en ligne], 2003,175-184 p. [Consulté le 08/09/2017]. Disponible à l'adresse : [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00133-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00133-5).

Annexes

ANNEXE A : Résultats des masses volumiques obtenues en fonction de leur position



ANNEXE B : Plan d'expériences des éprouvettes en flexion

Table 1	Facteurs contrôlés			
	Direction d'impression	Condition d'étuvage	Temps d'étuvage	Durée de stockage
	A	B	C	D
Lot 1 : X1 X2 X3 X4 X5 X6	X	Sans étuvage	1h (N.A) *	Pas de stockage
Lot 2 : X7 X8 X9 X10 X11 X12	X	140°C	2h	3 jours
Lot 3 : X13 X14 X15 X16 X17 X18	X	160°C	3h	14 jours
Lot 4 : Y1 Y2 Y3 Y4 Y5 Y6	Y	Sans étuvage	2h (N.A)	14 jours
Lot 5 : Y7 Y8 Y9 Y10 Y11 Y12	Y	140°C	3h	Pas de stockage
Lot 6 : Y13 Y14 Y15 Y16 Y17 Y18	Y	160°C	1h	3 jours
Lot 7 : Z1 Z2 Z3 Z4 Z5 Z6	Z	Sans étuvage	3h (N.A)	3 jours
Lot 8 : Z7 Z8 Z9 Z10 Z11 Z12	Z	140°C	1h	14 jours
Lot 9 : Z13 Z14 Z15 Z16 Z17 Z18	Z	160°C	2h	Pas de stockage
Table 2	Facteurs contrôlés			
	Direction d'impression	Condition d'étuvage	Temps d'étuvage	Durée de stockage
	A	B	C	D
Lot 1 : XY1 XY2 XY3 XY4 XY5 XY6	XY 45°	Sans étuvage	1h (N.A)	Pas de stockage
Lot 2 : XY7 XY8 XY9 XY10 XY11 XY12	XY 45°	140°C	2h	3 jours
Lot 3 : XY13 XY14 XY15 XY16 XY17 XY18	XY 45°	160°C	3h	14 jours
Lot 4 : YZ1 YZ2 YZ3 YZ4 YZ5 YZ6	YZ 45°	Sans étuvage	2h (N.A)	14 jours
Lot 5 : YZ7 YZ8 YZ9 YZ10 YZ11 YZ12	YZ 45°	140°C	3h	Pas de stockage
Lot 6 : YZ13 YZ14 YZ15 YZ16 YZ17 YZ18	YZ 45°	160°C	1h	3 jours
Lot 7 : XZ1 XZ2 XZ3 XZ4 XZ5 XZ6	XZ 45°	Sans étuvage	3h (N.A)	3 jours
Lot 8 : XZ7 XZ8 XZ9 XZ10 XZ11 XZ12	XZ 45°	140°C	1h	14 jours
Lot 9 : XZ13 XZ14 XZ15 XZ16 XZ17 XZ18	XZ 45°	160°C	2h	Pas de stockage

ANNEXE C : Resultats du plan d'expérience

Conditions	Eprouv vettes	Contrainte de la flexion à maximum charge (MPa)	Module de Young (MPa)	Charge maximale (N)
Pas d'étuvage /Pas de stockage	Lot 1 : selon X	\bar{x} = 3,028 σ = 0,093	\bar{x} = 1533,243 σ = 37,114	\bar{x} = 151,272 σ = 4,637
Etuvage: 2h/140°C stockage 3 jours	Lot 2 : selon X	\bar{x} = 1,712 σ = 0,293	\bar{x} = 1015,00 σ = 237,660	\bar{x} = 85,492 σ = 14,645
Etuvage: 3h/160°C stockage 14 jours	Lot 3 : selon X	\bar{x} = 1,098 σ = 0,180	\bar{x} = 771,502 σ = 166,190	\bar{x} = 54,827 σ = 9,001
Pas d'étuvage/stockage 14 jours	Lot 4 : selon Y	\bar{x} = 4,270 σ = 0,063	\bar{x} = 1717,060 σ = 68,126	\bar{x} = 213,285 σ = 3,182
Etuvage : 3h/140°C pas de stockage	Lot 5 : selon Y	\bar{x} = 4,147 σ = 0,244	\bar{x} = 1788,577 σ = 62,179	\bar{x} = 207,072 σ = 12,137
Etuvage: 1h/160°C stockage 3 jours	Lot 6 : selon Y	\bar{x} = 3,552 σ = 0,9919	\bar{x} = 1552,873 σ = 304,196	\bar{x} = 177,503 σ = 45,900
Pas d'étuvage /stockage 3 jours	Lot 7 : selon Z	\bar{x} = 2,087 σ = 0,187	\bar{x} = 928,543 σ = 44,836	\bar{x} = 104,135 σ = 9,355
Etuvage: 1h/140°C stockage 14 jours	Lot 8 : selon Z	\bar{x} = 1,005 σ = 0,136	\bar{x} = 681,142 σ = 112,787	\bar{x} = 50,193 σ = 6,677
Etuvage : 2h/160°C pas de stockage	Lot 9 : selon Z	\bar{x} = 1,747 σ = 0,167	\bar{x} = 987,722 σ = 70,256	\bar{x} = 87,265 σ = 8,320

\bar{x} : moyenne arithmétique ; σ : Ecart-type

Tableau 4.4-1: Résultats la table 1 de Taguchi

Conditions	Eprouv tes	Contrainte de la flexion à maximum charge (MPa)	Module de Young (MPa)	Charge maximale (N)
Pas d'étuvage /Pas de stockage	Lot 1 : selon XY	\bar{x} = 3,787 σ = 0,142	\bar{x} = 1534,880 σ = 62,659	\bar{x} = 189,185 σ = 7,112
Etuvage: 2h/140°C stockage 3 jours	Lot 2 : selon XY	\bar{x} = 3,743 σ = 0,296	\bar{x} = 1474,173 σ = 73,278	\bar{x} = 187,087 σ = 14,727
Etuvage: 3h/160°C stockage 14 jours	Lot 3 : selon XY	\bar{x} = 1,415 σ = 0,199	\bar{x} = 709,265 σ = 217,375	\bar{x} = 70,783 σ = 9,951
Pas d'étuvage /stockage 14 jours	Lot 4 : selon YZ	\bar{x} = 2,825 σ = 0,227	\bar{x} = 1202,853 σ = 88,198	\bar{x} = 141,148 σ = 11,427
Etuvage : 3h/140°C pas de stockage	Lot 5 : selon YZ	\bar{x} = 2,907 σ = 0,219	\bar{x} = 1267,175 σ = 101,215	\bar{x} = 145,072 σ = 10,966
Etuvage: 1h/160°C stockage 3 jours	Lot 6 : selon YZ	\bar{x} = 2,678 σ = 0,180	\bar{x} = 1143,448 σ = 30,646	\bar{x} = 133,755 σ = 8,927
Pas d'étuvage /stockage 3 jours	Lot 7 : selon XZ	\bar{x} = 2,997 σ = 0,057	\bar{x} = 1275,435 σ = 44,041	\bar{x} = 149,595 σ = 2,812
Etuvage: 1h/140°C stockage 14 jours	Lot 8 : selon XZ	\bar{x} = 1,037 σ = 0,229	\bar{x} = 634,228 σ = 158,401	\bar{x} = 51,765 σ = 11,473
Etuvage: 2h/160°C pas de stockage	Lot 9 : selon XZ	\bar{x} = 1,908 σ = 0,471	\bar{x} = 1115,172 σ = 155,583	\bar{x} = 95,315 σ = 23,576

ANNEXE D : Tableau des conditions expérimentales

<i>Lot des plans 1 et 2</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Humidité (%)</i>	<i>Point de rosé (°C)</i>
1	19	30	1,2
2	23	35	6,6
3	23	36	7,3
4	23	36	7,2
5	19	31	1,7
6	23	35	6,7
7	22	35	6,5
8	23	35	7,5
9	22	33	5

ANNEXE E : Plan d'expérience des étuvages

Numéro de lot	Température d'étuvage (°C)	Temps d'étuvage (h)
1	Sans étuvage	4 (N.A*)
2	Sans étuvage	2 (N.A)
3	Sans étuvage	3 (N.A)
4	110	1
5	110	2
6	110	3
7	140	1
8	140	2
9	140	3

*N.A : Non applicable

ANNEXE F : Plan d'expériences des éprouvettes architecturées

Numéro de lot	Morphologie	Epaisseur de paroi (mm)
1	Creuse	2
2	Creuse	4
3	Creuse	6
4	Lattice	2
5	Lattice	4
6	Lattice	6
7	Pleine de sable non lié	2
8	Pleine de sable non lié	4
9	Pleine de sable non lié	6

ANNEXE G : Premier plan d'expériences selon un table L9 de Taguchi

Numéro de l'essai	Facteurs contrôlés	
	A	B
	<i>Direction des strates</i>	<i>Température</i>
1	X	450
2	X	700
3	X	950
4	Y	450
5	Y	700
6	Y	950
7	Z	450
8	Z	700
9	Z	950

ANNEXE H : Second plan d'expériences selon un table L9 de Taguchi

Numéro de l'essai	Facteurs contrôlés			
	A	B	C	D
	<i>Structure</i>	<i>Direction des strates</i>	<i>Température de chauffe</i>	<i>Epaisseur de paroi</i>
1	Lattice	X	450°C	2 mm
2	Lattice	Y	700°C	4 mm
3	Lattice	Z	950°C	6 mm
4	SNL	X	700°C	6 mm
5	SNL	Y	950°C	2 mm
6	SNL	Z	450°C	4 mm
7	Creuse	X	950°C	4 mm
8	Creuse	Y	450°C	6 mm
9	Creuse	Z	700°C	2 mm

*SNL : Eprouvette en coque avec du sable non lié

ANNEXE I : Résultats des essais de débouabilité

Campagne d'essais numéro 1/Température de 450 °C				
<i>Creuset</i>	<i>Temps en min</i>	<i>Masse de l'échantillon en g</i>	<i>Retenu sur le tamis de maille 1mm en g</i>	<i>Retenue sur le plateau en g</i>
1	20	11,59	11,42	0,04
2	25	11,55	11,38	0,02
3	30	11,60	11,42	0,05
4	35	11,56	11,33	0,06
5	40	11,54	10,9	0,46
6	45	11,53	11	0,32
7	50	11,52	9,14	2,11
8	55	11,52	8,17	3,09
9	60	11,51	5,79	5,36
Campagne d'essais numéro 2/Température de 450 °C				
<i>Creuset</i>	<i>Temps en min</i>	<i>Masse de l'échantillon en g</i>	<i>Retenu sur le tamis de maille 1mm en g</i>	<i>Retenue sur le plateau en g</i>
1	55	11,43	10,99	0,2
2	60	11,41	11,1	0,13
3	65	11,52	10,36	0,92
4	70	11,48	2,24	3
5	75	11,45	2,06	9,03
6	80	11,48	2,07	9,06
7	85	11,54	2,37	8,88
8	90	11,43	0,99	10,13
9	95	11,46	0	11,16
Campagne d'essais numéro 1/ Température 700°C				
<i>Creuset</i>	<i>Temps en min</i>	<i>Masse de l'échantillon en g</i>	<i>Retenu sur le tamis de maille 1mm en g</i>	<i>Retenue sur le plateau en g</i>
1	20	11,46	8,19	3,02
2	25	11,48	7,2	4,04
3	30	11,44	6,31	4,91
4	35	11,46	3,9	7,3
5	40	11,46	3,45	7,73
6	45	11,47	3,05	8,15
7	50	11,49	2,23	8,91
8	55	11,45	1,4	9,78
9	60	11,52	0,95	10,20
Campagne d'essais numéro 2/Température 700°C				

<i>Creuset</i>	<i>Temps en min</i>	<i>Masse de l'échantillon en g</i>	<i>Retenu sur le tamis de maille 1mm en g</i>	<i>Retenue sur le plateau en g</i>
1	55	11,47	1,7	9,46
2	60	11,4	1,55	9,48
3	65	11,38	0,92	10,17

ANNEXE J : Résultats des essais de débouabilité

Température de 950°C				
<i>Creuset</i>	<i>Temps en min</i>	<i>Masse de l'échantillon en g</i>	<i>Retenu sur le tamis de maille 1mm en g</i>	<i>Retenue sur le plateau en g</i>
1	20	11,53	5,85	5,37
2	25	11,49	1,17	10,04
3	30	11,51	4,04	7,14
4	35	11,5	3,16	8
5	40	11,49	1,87	9,28
6	45	11,45	0,06	11,04

ANNEXE K : Check-list avant lancement d'impression

Eléments	OUI	NON	N/A	Commentaires
Accès aux surfaces moulantes (Nettoyage, poteyage)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Taille de moule compatible avec le volume constructible	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Plots de positionnement et détrompeurs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Optimisation du nombre de morceau de moule et noyau (noyaux assemblés, noyaux solidaires du moule)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence d'éléments de manutention adaptés aux moyens de manutention (poignées, alésage...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Evacuation des gaz (évent, tirage d'air, circuits de circulation...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Aptitude au débouage des noyaux contrôlée (noyaux creux, zone facilitant la casse)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contraintes sur la pièce en refroidissement contrôlées (noyaux creux, noyaux structurés évitant les contraintes...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Accès pour la mise en place de dispositifs. (Manchons, refroidisseur, filtres...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Hauteur de pièce optimisée pour le procédé impression 3D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diamètre et épaisseur de sable suffisante pour résister aux contraintes de remoulage, de chaleur et de pression métallostatique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence d'une rainure en cas de nécessité d'un joint de colle entre deux morceaux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Surface utile suffisants dans le cas d'utilisation de charge pour maintenir le moule fermé.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

ANNEXE L : Check-list du moule de carter à renvoi d'angle

Eléments	OUI	NON	N/A	Commentaires
Accès aux surfaces moulantes (Nettoyage, poteyage)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Taille de moule compatible avec le volume constructible	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	310*310*140 mm 310*310*130 mm
Plots de positionnement et détrompeurs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Optimisation du nombre de morceau de moule et noyau (noyaux assemblés, noyaux solidaires du moule)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence d'éléments de manutention adaptés aux moyens de manutention (poignées, alésage...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<20kg par partie
Evacuation des gaz (évent, tirage d'air, circuits de circulation...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Des tirages d'air peuvent être rajoutés pour faciliter le dégazage de la partie moulage interne
Aptitude au débouillage des noyaux contrôlée (noyaux creux, zone facilitant la casse)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contraintes sur la pièce en refroidissement contrôlées (noyaux creux, noyaux structurés évitant les contraintes...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Accès pour la mise en place de dispositifs. (Manchons, refroidisseur, filtres...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Pas de dispositif.
Hauteur de pièce optimisée pour le procédé impression 3D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diamètre et épaisseur de sable suffisants pour résister aux contraintes de remoulage, de chaleur et de pression métallo-statique	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence d'une rainure en cas de nécessité d'un joint de colle entre deux morceaux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Pas de joint de colle prévu
Surface utile suffisante dans le cas d'utilisation de charge pour maintenir le moule fermé.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

ANNEXE M : Check-list pour l'étude de moulage du chapeau

Eléments	OUI	NON	N/A	Commentaires
Accès aux surfaces (Nettoyage, poteyage)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Taille de moule compatible avec le volume constructible	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2 impressions dont les volumes sont : 683,5x383x475mm 683,5x276x475mm
Plot de positionnement et détrompeurs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Optimisation du nombre de morceau de moule et noyau (noyaux assemblés, noyaux solidaires du moule)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence d'éléments de manutention adaptés aux moyens de manutention (poignées, alésage...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Les poignées sont suffisantes pour les parties inférieures, le moyen de manutention n'étant pas défini des poignées sont modélisées mais elle reste modifiable pour un autre système de levage.
Evacuation des gaz (évent, tirage d'air, circuits de circulation...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Aptitude au débouillage des noyaux contrôlée (noyaux creux, zone facilitant la casse)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contraintes sur la pièce en refroidissement contrôlées (noyaux creux, noyaux structurés évitant les contraintes...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Accès pour la mise en place de dispositifs. (Manchons, refroidisseur, filtres...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Hauteur de pièce optimisée pour le procédé impression 3D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diamètre et épaisseur de sable suffisante pour résister aux contraintes de remoulage, de chaleur et de pression métallo-statique	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Attention particulière sur les « 6 doigts » qui restent des parties fragiles.
Présence d'une rainure en cas de nécessité d'un joint de colle entre deux morceaux	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Pas de joint de colle prévu
Surface utile suffisante dans le cas d'utilisation de charge pour maintenir le moule fermé.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

ANNEXE N : Check-list Moule du mélangeur

Eléments	OUI	NON	N/A	Commentaires
Accès aux surfaces moulantes (Nettoyage, poteyage)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Taille de moule compatible avec le volume constructible	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	438*193,5*120 mm 438*193,5*90 mm
Plots de positionnement et détrompeurs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Optimisation du nombre de morceau de moule et noyau (noyaux assemblés, noyaux solidaires du moule)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Pas d'enduit permettant de fixer les noyaux au moule par les portées.
Présence d'éléments de manutention adaptés aux moyens de manutention (poignées, alésage...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<12 kg par partie
Evacuation des gaz (évent, tirage d'air, circuits de circulation...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Aptitude au débouffrage des noyaux contrôlée (noyaux creux, zone facilitant la casse)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Contraintes sur la pièce en refroidissement contrôlées (noyaux creux, noyaux structurés évitant les contraintes...)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Accès pour la mise en place de dispositifs. (Manchons, refroidisseur, filtres...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Pas de dispositif.
Hauteur de pièce optimisée pour le procédé impression 3D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diamètre et épaisseur de sable suffisante pour résister aux contraintes de remoulage, de chaleur et de pression métallo-statique	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Après reconception d'une deuxième solution.
Présence d'une rainure en cas de nécessité d'un joint de colle entre deux morceaux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Pas de joint de colle prévu
Surface utile suffisants dans le cas d'utilisation de charge pour maintenir le moule fermé.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Moule enserré entre des planches maintenue serrée par des serre-joints

ANNEXE O : Règles de conceptions et défauts dans les pièces de fonderie

Pour obtenir des pièces de qualité optimale en moulage sable, il est nécessaire de respecter les règles de tracés de pièce de fonderie. Ces règles permettent d'obtenir une pièce avec une compacité maximale (minimum de retassure, minimum de porosité), une pièce utilisant le minimum de matière en fonction de ses zones fonctionnelles et de ses contraintes de résistance, une pièce avec un coût optimisé (mise au mille), une pièce minimisant les difficultés de moulage, de parachèvement et d'usinage. En moulage sable les formes complexes sont obtenues par les noyaux (formes intérieures) et les formes simples par le moule (formes extérieures). Certains défauts de fonderie peuvent être limité en améliorant le tracé des pièces à mouler.

Néanmoins, il est impossible de tous les éviter. De ce fait, le cahier des charges client a une importance capitale pour satisfaire le niveau de qualité pièce y étant spécifié.

Les soufflures et piqûres

La soufflure est causée par une bulle de gaz restée emprisonnée dans l'alliage. Ces porosités ont en générale une forme sphérique, elles se distinguent des porosités dues au phénomène de retassure qui ont des formes aléatoires (*Figure 1*).

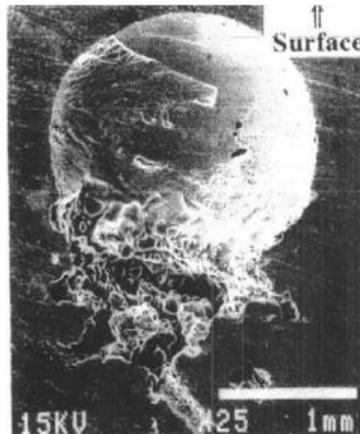


Figure 1: Exemple de porosité dû à l'emprisonnement de gaz [CAMII]

Cette bulle peut être produite à cause d'une réaction moule métal, soit à cause de gaz emprisonnés dans l'alliage pendant la manutention ou l'élaboration de l'alliage, soit un dégagement de vapeur d'eau du sable ou bien encore un mauvais tirage d'air dans le moule. La soufflure est donc une cavité dans l'alliage formée par une bulle de gaz, elle est donc comptée comme une porosité.

Pour éviter les soufflures, il faut éviter les sources de gaz. Par conséquent, la conception du système d'alimentation doit éviter les turbulences, il faut donc respecter les règles de conception des canaux de remplissage. Vérifier que les systèmes d'évents et de tirage d'air sont efficaces. Dégazer le métal liquide avant la coulée. Eviter les traces d'humidité dans le moule en faisant chauffer les éléments à mettre dans le moule pour éviter qu'il y ait de la condensation. Vérifier l'absence de réaction entre le moule et le métal et passer une couche d'enduit si nécessaire.

Les retassures

La contraction de l'alliage pendant la solidification et le retrait à l'état solide cause des endroits déficitaire en matière.

Ces endroits sont appelés retassure. Plusieurs types de retassures existent, les retassures globales : macro retassures externes ou internes et poquette, les retassures intercrystallines : micro retassures (*Figure 2*).

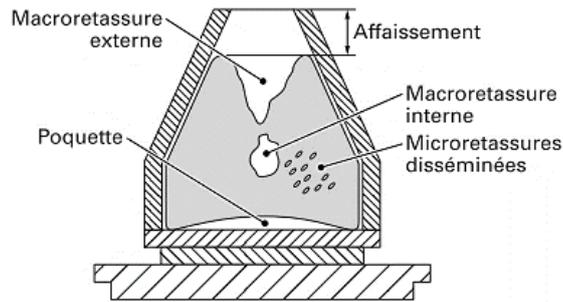


Figure 2: Schéma d'éprouvette en aluminium montrant les retassures possibles [CUE97]

Des facteurs peuvent favoriser ce phénomène de retassures, comme la vitesse de coulée, la surchauffe de l'alliage, la non homogénéité du refroidissement de la pièce coulée, la contraction pendant la solidification, l'intervalle de solidification c'est-à-dire comment va se répartir le liquide dans le moule en se solidifiant.

Les règles de conception pour limiter ce problème sont une direction de solidification de la pièce contrôlée, par l'ajout de masselotte et de manchons près des zones massive ou l'ajout de refroidisseur, si l'épaisseur de la pièce ne peut pas être constante. L'utilisation de logiciel de simulation permet d'identifier les zones où la solidification sera plus longue et ainsi de placer les bons dispositifs pour orienter la solidification avec une meilleure précision. L'orientation de la pièce pendant la coulée peut également jouer un rôle dans la formation des retassures, le fondeur en générale dispose les masselottes sur le dessus du moule et oriente les parties fines de la pièce vers le bas contrôlant ainsi la direction de solidification. Il faut également prendre en compte le retrait de solidification de l'alliage de la pièce. L'ajout d'élément comme le graphite et le silicium permet de limiter ce phénomène puisqu'ils se dilatent à la solidification. Il faut éviter les variations brutales d'épaisseur et privilégier des raccords progressifs. Et enfin alléger les parties massives quand cela est possible permettant une homogénéité d'épaisseur.

La crique

La crique est un défaut de surface qui se présente sous l'aspect d'une fissure, elle se crée pendant la solidification de la pièce à cause du retrait solide des parties de la pièce qui n'a pas pu se faire correctement à cause d'un obstacle (*Figure 3*).

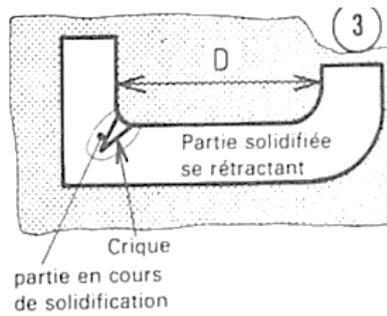


Figure 3: Formation d'une crique [FAC99]

Un indice de criquabilité I permet d'évaluer la sensibilité d'un alliage à la crique, il se quantifie à partir de différentes observations de santé matière sur plusieurs éprouvettes. La figure (Figure 4) ci-après schématise le mécanisme de déchirement à chaud, Etape (a) : situation initiale, état semi-solide ; Etape (b) : Elongation prise en charge par le liquide, état semi-solide ; Etape (c) : Formation de bulles, propagation unidirectionnelle et formation d'une fissure interdendritique, état semi-solide [DOU04].

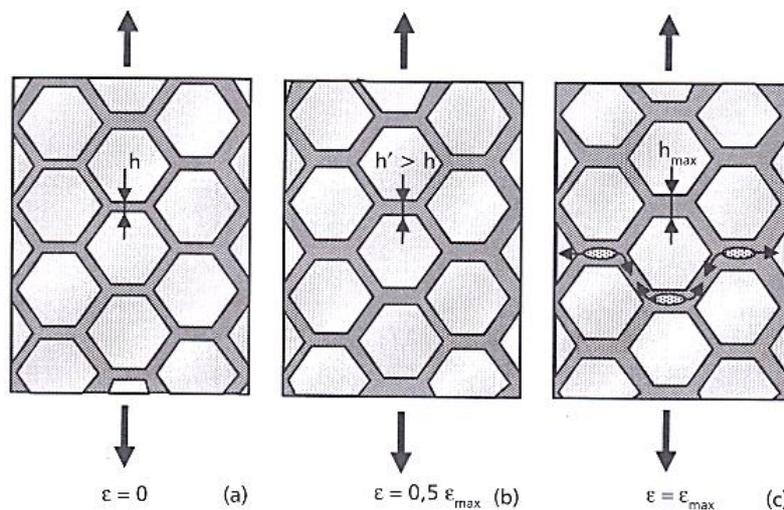


Figure 4 : Schématisation du déchirement à chaud [DOU04]

Pour éviter ce genre de défaut un changement de composition chimique de l'alliage permettant d'augmenter la résistance à chaud de l'alliage peut être fait. Une modification de la conception de la pièce ou du moule peuvent éviter ce problème. Pour ce faire, il faut éviter les variations importantes d'épaisseur, utiliser des congés de raccordements, de la dépouille et éviter que les efforts de retrait du métal se trouvent sur des parties fines. Enfin le matériau de moulage devra être bien choisi.

L'abreuvement et métallisation

L'abreuvement est la pénétration du métal dans le sable entraînant des défauts sur la pièce, les causes peuvent être l'utilisation d'un alliage trop fluide, l'utilisation d'un sable de granulométrie trop importante, le serrage du sable composant le moule pas assez important, la morphologie du moule créant un point chaud ou de l'usure abrasive causant une dégradation du moule et donc une pénétration du métal dans le sable, l'utilisation d'une température de coulée trop élevée peut aussi entraîner le même phénomène. Pour éviter ce problème tous les éléments pouvant le provoquer doivent être contrôlés, l'ajout d'adjuvant dans le sable et d'une couche d'enduit peut limiter ce phénomène.

Reprise et malvenue

La reprise est la rencontre de deux fronts de matière arrivant de direction différente et qui se soudent mal. Ce phénomène crée donc une fragilité à cet endroit entraînant un risque de rupture important. Pour éviter ce défaut, il faut contrôler la température de coulée, vérifier que la coulabilité et le débit dans le moule de l'alliage est suffisant et enfin vérifier la conception de la pièce. La malvenue est un problème de l'alliage coulée ou de la conception du moule entraînant un mauvais remplissage du moule et donc l'obtention de pièce incomplète. La malvenue peut aussi être causée par la mauvaise tenue d'un noyau dans le moule ou le décalage de partie de moule.

Gales et dartres

La dilatation de la silice du sable entraîne une déformation et un soulèvement de la couche superficielle de l'empreinte, l'alliage passe alors en dessous ce qui entraîne des inclusions de sable dans la pièce coulée. Pour éviter ce phénomène il faut contrôler le serrage du sable, vérifier qu'il n'y a pas de problème de surchauffe à l'intérieur du moule et enfin contrôler la plasticité du sable.

Trempe partielle

Ce défaut concerne les alliages ferreux, il se manifeste par l'apparition de partie blanche dans la structure. Pour éviter ce phénomène, il faut avoir un tracé de pièce permettant un refroidissement pas trop rapide et homogène et contrôler la composition chimique de l'alliage.

Ségrégation

La ségrégation se produit durant la solidification, il s'agit d'une hétérogénéité de la composition chimique de la pièce. Ce phénomène est lié à la composition de l'alliage, à la présence d'inclusions, aux conditions de remplissage et d'élaboration de l'alliage.

Inclusions

Les inclusions sont des impuretés qui viennent dans le métal. Celles-ci ne sont pas métalliques. Elles sont des risques potentiels de fissure et donc d'amorçage de rupture. Elles sont de deux types soit exogène, elles sont amenées par une source extérieure (fragments de laitiers, morceaux de réfractaire, couche d'oxyde) soit endogène, elles se forment à l'intérieur du métal à l'état liquide ou solide (oxyde, précipitation d'un intermétallique). Pour les éviter il faut concevoir dans le moule des pièges à crasse, des zones de décantation et si tout cela n'est pas suffisant y inclure des filtres.

Développement d'une méthode de conception de moules et noyaux hybrides en fonderie

Ces travaux de recherche ont pour objectif de définir une méthodologie de conception de moules hybrides en fonderie. Cette méthodologie est définie à partir des limites technico-économiques des procédés traditionnels de moulage et de l'impression 3D sable. Dans un premier temps, ces limites sont évaluées par la caractérisation mécanique et dimensionnelle des moules imprimés. Cette caractérisation mécanique a été réalisée à partir d'essais de flexion 3 points et de compression en fonction de différents paramètres. La capacité dimensionnelle de l'imprimante 3D a été évaluée par la mesure d'éprouvettes imprimées dans différentes directions. Dans un second temps, la méthode de conception des moules traditionnels a été formalisée à partir du recueil de l'expertise des partenaires fondeurs du projet ANR MONARCHIES et testée sur différents cas. Les règles métiers inhérentes à l'imprimante 3D sable ont été établies à partir des travaux du laboratoire ITHEMM et complétées par l'étude de pièces. Le processus de conception des moules imprimés a été élaboré à partir de ces règles métiers et validé sur des études de cas. Le coût de fabrication des moules imprimés a été défini par une méthode analytique et paramétrique. La méthodologie de conception des moules hybrides s'appuie sur l'ensemble des travaux précédents et sur la notion d'indice de complexité. En fonction de la valeur de ces indices de complexité, des contraintes de remoulage et de coût de fabrication, le choix optimal du procédé de fabrication est défini pour les différentes parties du moule. Enfin, cette méthodologie a été testée sur un panel représentatif de pièces de fonderie permettant d'évaluer sa robustesse.

Mots-clés : Fabrication additive, Moule en sable, Procédé hybride, Méthodologie de conception

Development of method to design moulds and cores hybrids in foundry

The aim of this works is to define a design methodology of hybrids casting molds. This methodology is based on technical and economical limits of conventional process and 3D sand printing. Firstly, these limits were evaluated by mechanical and dimensional characterization of 3D sand printing molds. Mechanical characterization was realised by three points bending test and compression testing with different parameters. 3D printer dimensional capability was determined by samples measure printed in different directions. Secondly, the design method of conventional molds was established from smelters know-how which are ANR MONARCHIES project partner from different case study. Inherent design rules of sand 3D printer were defined from the ITHEMM laboratory research works and completed with parts studies. 3D printing molds design process was created by design rules and validated with studies cases. Manufacturing cost of printing molds was defined by analytic and parametric method. The hybrids molds design methodology relies on all previous works and on complexity index. Optimal manufacturing process for different molds parts was selected according to the complexity index value, mould assembly restraint and manufacturability cost. Finally, this methodology was tested on representative sample group of casting parts, allowed to evaluate the robustness.

Keywords: Additive manufacturing, Hybrid process, Sand mold, Design method

Discipline : MÉCANIQUE DES SOLIDES, GÉNIE MÉCANIQUE, PRODUCTIQUE, TRANSPORT ET GÉNIE CIVIL

Spécialité : *Matériaux, Mécanique, Structures*

Université de Reims Champagne-Ardenne

ITHEMM

UFR Sciences Exactes et Naturelles
Campus du Moulin de la Housse - BP 1039
51687 Reims Cedex 2
FRANCE

