

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par

Chang Qing Zheng

Étude et évaluation des procédés de fabrication des pièces de
suspension d'automobile en alliage d'aluminium

Décembre 2009



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Celui qui déplace la montagne, c'est celui qui commence à enlever les petites pierres.

千里之行，始于足下！

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce projet, une étude d'évaluation et d'optimisation des procédés de fabrication de pièces d'automobile en alliage d'aluminium est réalisée. L'objectif de cette étude est d'identifier un procédé approprié pour la fabrication des pièces de structures en aluminium et aussi optimiser les paramètres opératoires du procédé pour satisfaire les propriétés mécaniques nécessaires lors de la conception des pièces. Dans cette étude, une pièce de suspension en l'occurrence, le bras de contrôle a été choisi comme objet de recherche. C'est une pièce typique du système de suspension qui existe dans la plupart des véhicules. Elle a une géométrie relativement complexe. Après l'évaluation des différents procédés de fabrication, celui du moulage sous pression à l'état semi-solide semble le plus prometteur à être utilisé pour la fabrication de cette pièce de structure en aluminium. Une étude d'optimisation du procédé est réalisée à l'aide d'une nouvelle méthode de plan d'expérience : E.M.Optimisation, mise en œuvre par un logiciel portant le même nom. Les résultats de cette étude nous confirment la capacité de ce procédé, c'est-à-dire de savoir s'il est approprié de l'utiliser dans la fabrication de pièces de structure. Les critères d'évaluation sont basés sur les propriétés mécaniques. La méthode E.M.Optimisation nous guide dans la formulation du problème, la réalisation des essais expérimentaux à multi-variable ainsi que la recherche d'une solution optimale. Des modèles mathématiques sont calculés après l'analyse des résultats des essais expérimentaux. Ces modèles

représentent les relations quantitatives entre les paramètres opératoires du procédé et la qualité des pièces telles que les propriétés mécaniques. Ils vont aussi nous indiquer les effets de ces paramètres sur chaque propriété mécanique. En se basant sur ces modèles mathématiques et empiriques, une ou des optimisations à multi-variable et multi-objectif vont être réalisées pour trouver des paramètres opératoires optimaux du procédé. Ces derniers doivent satisfaire les propriétés mécaniques nécessaires déterminées lors de la conception de la pièce.

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, Monsieur Mohamed Bouazara, directeur de cette recherche, pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier également les professeurs monsieur R. Younsi professeur à l'école Polytechnique de Montréal et monsieur M. Bournane professeur à l'université du Québec à Chicoutimi d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à toutes les personnes rencontrées lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches, mes collègues et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1: INTRODUCTION	2
1.1 UTILISATION DE PIÈCES D'ALUMINIUM DANS L'AUTOMOBILE.....	2
1.2 EXIGENCES POUR LES PIÈCES DE STRUCTURE	4
1.3 PROBLÉMATIQUES	5
1.4 OBJECTIFS DE CETTE RECHERCHE	7
1.5 UTILISATION DE LA MÉTHODE E.M.OPTIMISATION	8
CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE	10
2.1 FABRICATION DES PIÈCES EN ALUMINIUM.....	10
2.1.1 Amélioration de la performance des pièces	10
2.1.2 Choix d'un alliage d'aluminium	15
2.1.2.1 Alliages d'aluminium de corroyage	16
2.1.2.2 Alliages d'aluminium de fonderie	18
2.1.3 Procédés de fabrication des pièces en alliages d'aluminium.....	19
2.1.3.1 Usinage	19
2.1.3.2 Soudage	20
2.1.3.3 Forgeage	20
2.1.3.4 Fonderie générale	21
2.1.3.5 Moulage sous pression conventionnel.....	23
2.2 MÉTHODES D'OPTIMISATION	25
2.2.1 Optimisation par descente du gradient.....	27
2.2.2 Optimisation combinatoire et sous contraintes.....	30
2.2.3 Plan d'expérience et méthodologie de Taguchi	33
2.2.4 Méthode E.M.Optimisation	36
2.2.5 Comparaison de la méthode Taguchi et la méthode E.M.Optimisation	38
CHAPITRE 3: CHOIX D'UN PROCÉDÉ ET L'OPTIMISATION AVEC UNE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE	43
3.1 PROCÉDÉS DE FABRICATION DES PIÈCES EN ALUMINIUM.....	43
3.1.1 Mise en forme par moulage semi-solide.....	45
3.2 DÉVELOPPEMENT ET OPTIMISATION DES PROCÉDÉS AVEC LA MÉTHODE E.M.OPTIMISATION ..	48
3.2.1 Détermination des paramètres et création d'un espace multidimensionnel.....	49
3.2.2 Détermination de spécifications.....	50

3.2.3	Expérimentation : Choix d'un nouvel essai	50
3.2.4	Construction d'un domaine opératoire.....	51
3.2.5	Modélisation du comportement d'un procédé	51
3.2.6	Optimisation avec des critères conflictuels.....	53
3.2.7	Établissement de la fenêtre opératoire.....	53
3.3	EXEMPLE D'OPTIMISATION AVEC E.M.OPTIMISATION.....	54
3.3.1	Paramètres du procédé de chauffage	56
3.3.2	Objectifs.....	57
3.3.3	Paramètres d'entrée et variables réponses.....	59
3.3.4	Liste des essais expérimentaux	60
3.3.5	Modèle mathématique et optimisation.....	61
CHAPITRE 4: FABRICATION D'UN BRAS DE SUSPENSION.....	64	
4.1	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES NÉCESSAIRES	64
4.2	FABRICATION DU BRAS DE CONTRÔLE PAR MOULAGE SEMI-SOLIDE.....	65
4.3	PROCÉDURE	66
4.4	PARAMÈTRES À ÉTUDIER	67
CHAPITRE 5: MODÉLISATION ET OPTIMISATION	75	
5.1	PARAMÈTRES DE MOULAGE (FACTEURS) ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES (QUALITÉ)	76
5.2	DOMAINE OPÉRATOIRE (RÉALISABLE)	78
5.3	MODÈLES DE RÉGRESSION	79
5.3.1	Résistance maximale à la rupture sans traitement thermique	79
5.3.2	Résistance maximale à la rupture après traitement thermique	84
5.3.3	Limite d'élasticité sans traitement thermique	89
5.3.4	Limite d'élasticité après traitement thermique	93
5.3.5	Allongement à la rupture sans traitement thermique.....	97
5.3.6	Allongement à la rupture après traitement thermique	102
5.4	OPTIMISATION.....	107
5.4.1	Optimisation basée sur la maximisation de la robustesse	107
5.4.2	Optimisation basée sur la maximisation des propriétés mécaniques	108
5.5	DISCUSSION.....	109
CHAPITRE 6: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	112	
6.1	CONCLUSION	112
6.2	RECOMMANDATIONS	113

LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Bras de contrôle fabriqué en acier (a) et en alliage d'aluminium (b).	3
Figure 2 : Exemple des pièces de suspension.	4
Figure 3 : Fabrication des pièces automobiles.	5
Figure 4 : Schéma des bras de contrôle.	6
Figure 5 : Bras de contrôle en aluminium.	7
Figure 6 : Cycle d'optimisation dans la conception et la fabrication des pièces automobile.	11
Figure 7 : Principe d'un système de suspension automobile.	11
Figure 8 : Facteurs et critères d'évaluation.	13
Figure 9 : Schéma du moulage conventionnel.	25
Figure 10 : Méthode du gradient.	29
Figure 11 : Limite de la méthode du gradient	30
Figure 12 : Détermination des essais à réaliser.	36
Figure 13 : Construction d'un domaine et choix des essais :	40
Figure 14 : Deux stratégies dans la construction du domaine réalisable [38].	41
Figure 15 : Exemples des bras de contrôle fabriqué par différents procédés :	43
Figure 16 : Comparaison schématique des procédés de fabrication.	44
Figure 17 : Comparaison schématique des procédés de fabrication.	44
Figure 18 : Moulage semi-solide.	46
Figure 19 : Diagramme de phases : Al – Si.	47
Figure 20 : Moulage semi-solide :	47
Figure 21 : Détermination de paramètres facteurs (Paramètres contrôlables).	49
Figure 22 : Détermination de spécifications.	50
Figure 23 : Réalisation d'essais expérimentaux.	51
Figure 24 : Construction d'un domaine opératoire.	52
Figure 25 : Calcul de modèles.	52
Figure 26 : Optimisation de paramètres.	53
Figure 27 : Calcul d'une fenêtre d'opération.	54
Figure 28 : Effet de peau lors du chauffage par induction.	56
Figure 29 : Paramètre de l'étude.	57
Figure 30 : Schéma de l'évolution de température lors d'un chauffage d'une billette.	58
Figure 31 : Analyse et calcul du modèle mathématique sur surchauffe.	61
Figure 32 : Relation entre le taux de chauffage 3 et la masse du métal perdue.	62
Figure 33 : Conception du bras de contrôle et propriétés mécaniques nécessaires.	64
Figure 34 : Exemples de défauts de moulage dans des pièces moulées.	66
Figure 35 : Utilisation d'une éprouvette de traction.	67

Figure 36 : Schéma sur l'écoulement du métal dans une cavité cylindrique du moule.	69
Figure 37 : Exemples de défauts de qualité dans des pièces moulées.	69
Figure 38 : Courbes de vitesse et de pression.	71
Figure 39 : Schéma des causes et effets.	71
Figure 40 : Domaine opératoire.	78
Figure 41 : Distribution des valeurs sur chaque paramètre.	79
Figure 42 : Facteurs influents sur RM_ST et leurs tendances.	80
Figure 43 : Courbes de niveau sur RM_ST.	81
Figure 44 : RM_ST en fonction de la vitesse d'injection VS_INJC(VS).	82
Figure 45 : RM_ST en fonction du délai DL_1.	82
Figure 46 : RM_ST en fonction du délai DL_2.	83
Figure 47 : RM_ST en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.	83
Figure 48 : RM_ST en fonction de la course de remplissage L_FIN.	84
Figure 49 : RM_ST en fonction du temps d'injection TS_INJC.	84
Figure 50 : Facteurs influents sur RM_AT et leurs tendances.	85
Figure 51 : Courbe de niveau sur RM_AT.	86
Figure 52 : RM_AT en fonction de la pression PRE_1.	87
Figure 53 : RM_AT en fonction du délai DL_2.	87
Figure 54 : RM_AT en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.	88
Figure 55 : RM_AT en fonction de DENSIT_AT.	88
Figure 56 : Effet interactif entre DL_2 RM_AT et VS_FREIN sur RM_AT.	89
Figure 57 : Facteurs influents sur RE_ST et leurs tendances.	90
Figure 58 : Courbe de niveau sur RE_ST.	90
Figure 59 : RE_ST en fonction de la pression PRE_1.	91
Figure 60 : RE_ST en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.	92
Figure 61 : RE_ST en fonction du temps de remplissage TS_REMP.	92
Figure 62 : Facteurs influents sur RE_AT et leurs tendances.	93
Figure 63 : Courbe de niveau sur RE_AT.	94
Figure 64 : RE_AT en fonction du délai DL_1.	94
Figure 65 : RE_AT en fonction de la position de freinage L_FREIN.	95
Figure 66 : RE_AT en fonction de la masse de masselotte MS_TALON.	95
Figure 67 : RE_AT en fonction de la course d'injection L_FIN.	96
Figure 68 : RE_AT en fonction du temps d'injection TS_INJC.	97
Figure 69 : Effet interactif entre MS_TALON et TS_INJC sur RE_AT.	97
Figure 70 : Facteurs influents sur ALLONG_ST et leurs tendances.	98
Figure 71 : Courbes de niveau sur ALLONG_ST.	98
Figure 72 : ALLONG_ST en fonction de la vitesse d'injection VS.	99
Figure 73 : ALLONG_ST en fonction de DENSIT_ST.	100
Figure 74 : ALLONG_ST en fonction de DENSIT_AT.	100

Figure 75 : ALLONG_ST en fonction de la pression maximale PRE_MAX.....	101
Figure 76 : ALLONG_ST en fonction de la course de remplissage L_FIN.....	101
Figure 77 : ALLONG_ST en fonction du temps d'injection TS_INJC.....	102
Figure 78 : Facteurs influents sur ALLONG_AT et leurs tendances.....	103
Figure 79 : Courbe de niveau sur ALLONG_AT.....	103
Figure 80 : ALLONG_AT en fonction de la pression PRE_1.....	104
Figure 81 : ALLONG_AT en fonction de la DENSIT_AT.....	104
Figure 82 : ALLONG_AT en fonction de la masse de masselotte MS_TALON.....	105
Figure 83 : ALLONG_AT (MPa) en fonction de la pression PRE_MAX.....	105
Figure 84 : ALLONG_AT en fonction de la course de remplissage L_FIN.....	106
Figure 85 : ALLONG_AT en fonction du temps d'injection TS_INJC.....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Effets d'éléments chimiques dans des alliages d'aluminium et leurs effets [25].....	16
Tableau 2 : Alliages d'aluminium de corroyage [25].....	17
Tableau 3 : Alliages d'aluminium de fonderie [21].....	18
Tableau 4 : Exemples de propriétés mécaniques et de procédé de fabrication utilisé [25].....	19
Tableau 5 : Comparaison de la méthode Taguchi et la méthode E.M.Optimisation.	39
Tableau 6 : Paramètres de base de l'étude.....	58
Tableau 7 : Gammes de valeurs des variables.....	59
Tableau 8 : Liste des essais.....	60
Tableau 9 : Liste des paramètres et leur type.	72
Tableau 10 : Liste des paramètres et leur abréviation.....	77
Tableau 11 : Optimisation basée sur la maximisation de la robustesse.....	107
Tableau 12 : Optimisation basée sur la maximisation des propriétés mécaniques.....	108
Tableau 13 : Effets des paramètres signifiants sur les propriétés mécaniques.	110

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1 *Utilisation de pièces d'aluminium dans l'automobile*

Dans la construction automobile, différents matériaux métalliques sont utilisés pour la fabrication des pièces de structure supportant des charges importantes comme des pièces de suspension, des châssis, des blocs-moteurs et les systèmes de freinage, etc. Aujourd'hui, ces pièces sont fabriquées en grande partie en acier avec un faible pourcentage en aluminium et en magnésium. L'acier occupe encore un rôle dominant dans la fabrication de pièces automobiles [1].

Le choix des matériaux utilisés dans les automobiles affecte directement la masse d'un véhicule. Plus la masse d'un véhicule est importante, plus la consommation d'essence est élevée par ce véhicule et plus il produit de gaz carbonique qui amène la pollution de l'environnement. L'acier a une masse volumique 3 ou 4 fois plus élevée que celle de l'aluminium et du magnésium.

D'autre part, pour avoir plus de confort, de plus en plus d'équipements vont être ajoutés dans les automobiles ce qui augmente la masse des véhicules. Ces dernières années, les automobiles ont vu leur poids augmenter sous l'effet de l'intégration d'équipements électroniques ou de sécurité. Aujourd'hui, contrôler ou diminuer la masse d'un véhicule est un grand défi. L'allégement des

véhicules est une composante essentielle pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de transport [2].

Remplacer des pièces en acier par des pièces en métaux légers comme l'aluminium est une solution très prometteuse. La masse volumique de l'aluminium est presque 3 fois plus faible que celle de l'acier. Des alliages d'aluminium ont aussi des propriétés mécaniques très intéressantes. En utilisant l'aluminium, il est possible de diminuer jusqu'à 35 % du poids d'un véhicule. Ainsi, 100 kg de moins permettent d'économiser 0,35 litres de carburant aux 100 kilomètres pour une voiture de taille moyenne. La Figure 1 présente l'exemple d'une pièce fabriquée en acier et en aluminium. Deux procédés de fabrication ont été utilisés : soudage et formage [3].

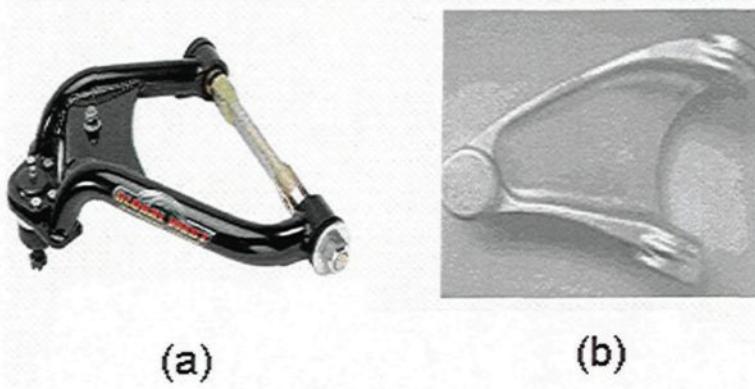


Figure 1 : Bras de contrôle fabriqué en acier (a) et en alliage d'aluminium (b).

Les pièces faites en aluminium pourraient être regroupées en deux catégories : celles ordinaires supportant une faible charge telles que les couvercles, les boîtiers, la tuyauterie et les autres supportant une charge plus importante, telles que les pièces de structures, comme les bras de suspensions,

les blocs-moteurs, les châssis, etc. La Figure 2 présente des pièces de suspension et leurs composantes tels que les bras de contrôle, le berceau à moteur et les amortisseurs [4].

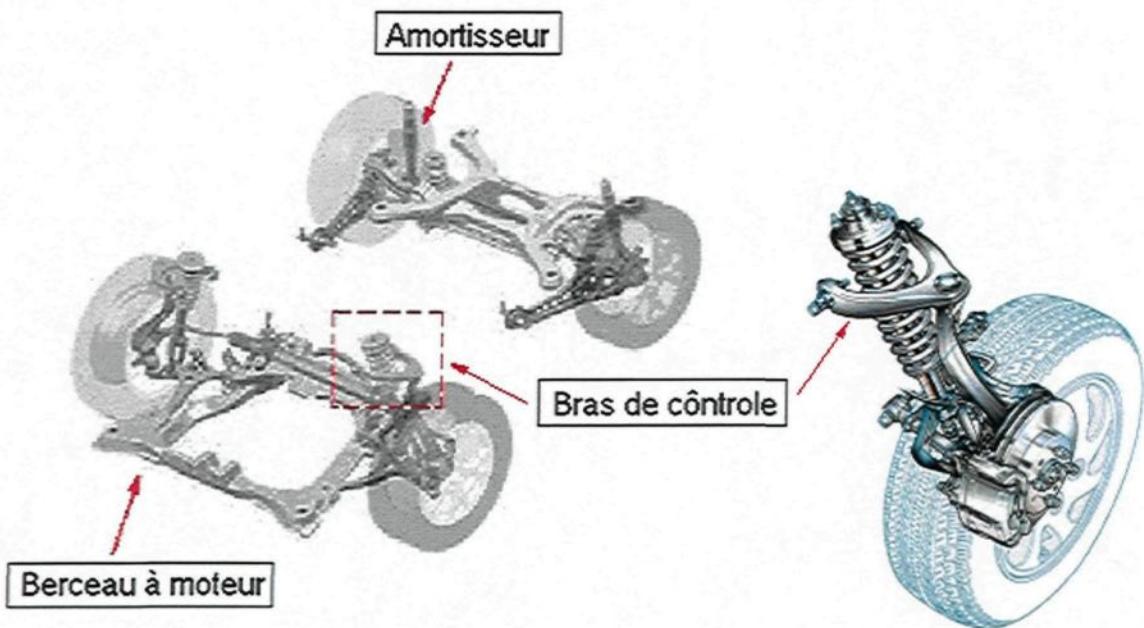


Figure 2 : Exemple des pièces de suspension.

1.2 *Exigences pour les pièces de structure*

La fabrication des pièces de structure est exigeante. Les propriétés mécaniques sont des caractéristiques primordiales déterminant la résistance et la fiabilité d'une pièce de structure [5]. Ces exigences sont déterminées par des analyses de contraintes et des simulations numériques ou le prototypage lors de la conception géométrique des pièces [6]. D'autres exigences, dues à la production en série et à la forte concurrence dans la fabrication automobile, sont la productivité élevée et le coût de production faible. Pour répondre à ces exigences et trouver la meilleure solution globale, la fabrication d'une pièce de structure doit

passer par plusieurs étapes importantes comme la conception géométrique, le choix de matériaux, le choix du procédé de fabrication, le prototypage et le contrôle de la qualité [7]. La Figure 3 présente un exemple des étapes pour la fabrication d'une pièce automobile.

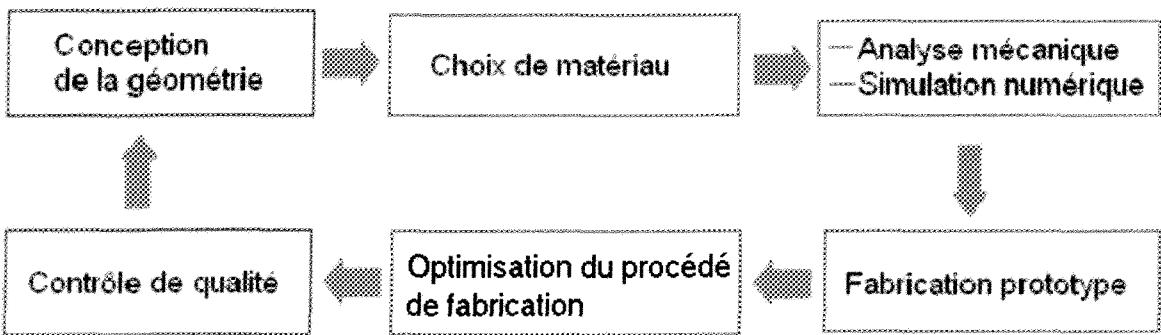


Figure 3 : Fabrication des pièces automobiles.

1.3 Problématiques

La problématique de cette étude est d'évaluer la possibilité de fabriquer un bras de contrôle de suspension d'automobile par un nouveau procédé de mise en forme : moulage semi-solide d'un alliage d'aluminium de série A356 [8]. Les conditions opératoires du procédé de moulage doivent être optimisées pour obtenir les propriétés mécaniques nécessaires et répondre aux exigences établies par des calculs de contraintes et des simulations numériques réalisées précédemment [9].

La Figure 4 représente un schéma de la géométrie d'un bras de contrôle [10].

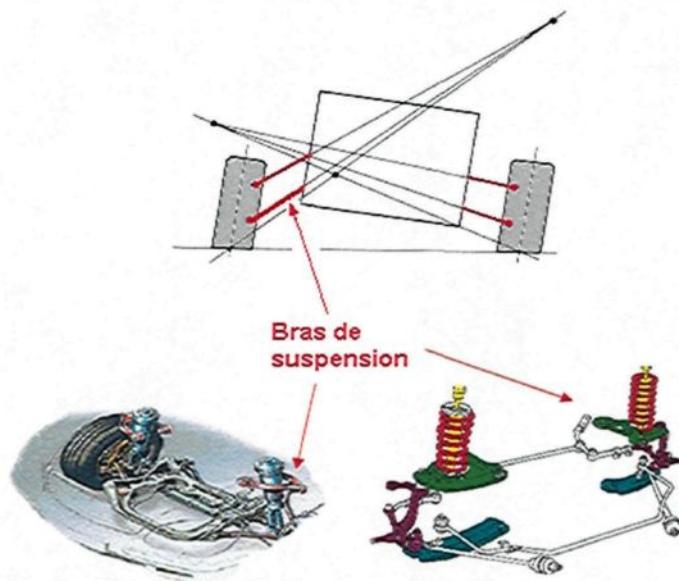


Figure 4 : Schéma des bras de contrôle.

La fabrication des pièces de structure peut être divisée en trois étapes principales : la conception de la géométrie incluant les analyses de contraintes, le choix de matériau et le prototypage avec la mise au point du procédé de fabrication. La Figure 5 présente la géométrie d'un nouveau bras de contrôle de suspension fabriqué en aluminium. Ce bras est conçu par notre équipe de recherche en l'occurrence le LM2SA (Laboratoire de modélisation en mécanique de solides appliquée) [11].

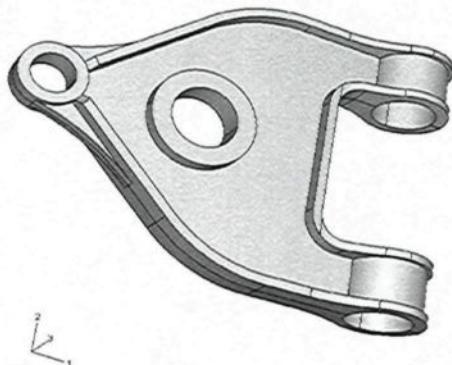


Figure 5 : Bras de contrôle en aluminium.

1.4 Objectifs de cette recherche

Cette recherche est basée sur les trois objectifs suivants :

- Évaluer le procédé de moulage semi-solide pour la fabrication d'un bras de contrôle ;
- Identifier les facteurs qui causent les faiblesses au niveau des propriétés mécaniques ; établir la relation entre les paramètres opératoires du procédé et la qualité des pièces moulées ainsi que leurs propriétés mécaniques basées sur des modèles mathématiques ;
- Trouver des solutions optimales ou de compromis, c'est à dire optimiser les paramètres opératoires du procédé pour obtenir les propriétés mécaniques nécessaires :
 - Résistance mécanique : $R_m = 280 \text{ MPa}$;
 - Limite d'élasticité : $R_{p0.2} = 230 \text{ MPa}$;
 - Allongement : $e = 5\%$.

1.5 Utilisation de la méthode E.M.Optimisation

L'évaluation et l'optimisation du procédé de mise en forme dans cette recherche se réalisent à l'aide d'une nouvelle méthode d'expérimentation appelée E.M.Optimisation. Cette méthodologie est employée pour la modélisation et le développement des procédés industriels ainsi que la conception de nouveaux produits [12]. E.M.Optimisation est également utilisée pour l'optimisation de paramètres des procédés et repose sur une nouvelle technique de plan d'expérience séquentielle et interactive. La méthode E.M.Optimisation utilise un ellipsoïde multidimensionnel pour représenter le domaine de contraintes : Domaine opératoire. Des modèles de régression sont créés basés sur les résultats d'essais expérimentaux. L'optimisation se fait en multi-variables et multi-objectifs [13,14].

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 *Fabrication des pièces en aluminium*

2.1.1 Amélioration de la performance des pièces

L'allégement des véhicules impose non seulement des modifications sur les conceptions de la géométrie et les alliages utilisés, mais également sur les procédés de fabrication de ses composants. Les outils de CAO et de simulation permettent de dimensionner les structures au plus juste, sans engager de coûts rédhibitoires. Ces techniques permettent notamment de diminuer les épaisseurs de matériaux aux endroits les moins critiques ou de réduire la concentration des contraintes. De plus, les procédés doivent permettre de gagner en productivité et coût ainsi que les pièces fabriquées en aluminium doivent être aussi résistantes et fiables que celui en acier [15].

Pour améliorer la performance de pièces et assurer leur fiabilité, par exemple : leurs propriétés mécaniques, différentes méthodes de contrôle de qualité et d'optimisation de procédés peuvent être utilisées. Parmi ces méthodes on trouve, l'ingénierie conventionnelle, calculs mathématiques, expérimentation avec la méthode de plan d'expérience, le prototypage, la modélisation et la simulation numérique [16]. D'une façon générale, dans le monde moderne, l'optimisation de la fabrication d'une pièce automobile passe typiquement par un cycle d'optimisation illustré par la Figure 6.

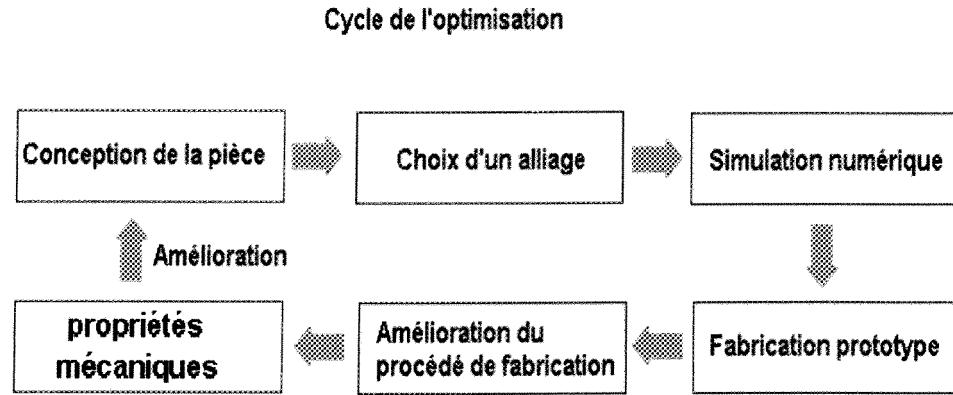


Figure 6 : Cycle d'optimisation dans la conception et la fabrication des pièces automobile.

Les pièces de suspension sont des pièces de structure importantes dans l'automobile. Le système de suspension sert à supporter le corps d'un véhicule tel qu'illustré par la Figure 7 [17].

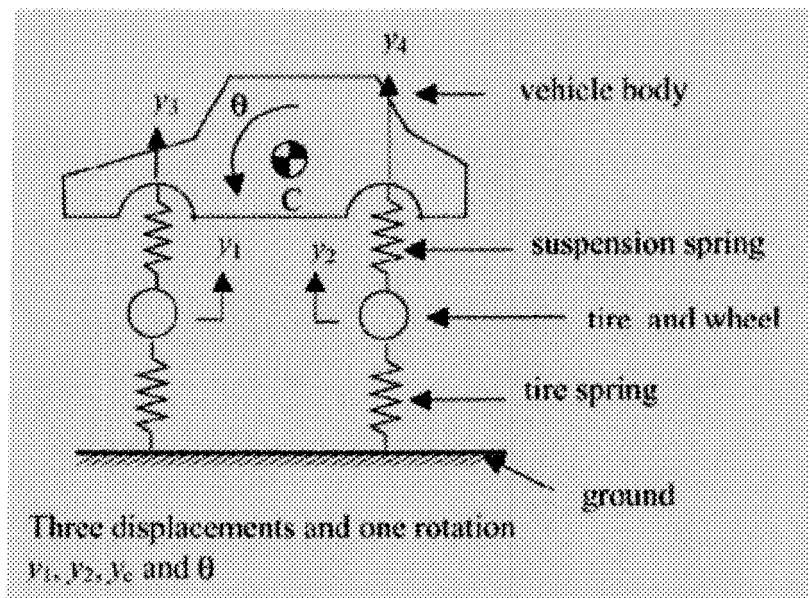


Figure 7 : Principe d'un système de suspension automobile.

Les propriétés mécaniques de ces pièces de suspension sont primordiales pour la sécurité et la durée de vie d'une automobile. Les propriétés mécaniques d'une pièce sont grandement affectées par les facteurs suivants : la géométrie de la pièce, le choix d'alliage et le procédé de fabrication. Le choix d'un alliage est important pour obtenir les propriétés mécaniques voulues, mais la conception de la géométrie et les procédés de fabrication influencent aussi les propriétés mécaniques. Le schéma représenté par la Figure 8 illustre les étapes de la fabrication des pièces d'automobile. De plus, nous avons aussi des contraintes à respecter, comme le coût de fabrication et la productivité. Pour avoir les meilleures solutions, des méthodes d'optimisation sont souvent utilisées lors de ces étapes, soit pour la conception d'une géométrie, le choix d'un alliage ou le développement de procédés.

Les alliages d'aluminium utilisés pour les pièces automobiles sont variés : par exemple : 6061, 356, 357 et 380. Les procédés de la fabrication de ces pièces les plus utilisés sont les suivants : l'usinage, le soudage, le forgeage, le moulage par gravité, le moulage sous pression et le moulage semi-solide [18,19]. L'usinage est un procédé de fabrication très flexible pour des petites séries. Mais le cycle de fabrication par usinage est long et Le coût de production est élevé. Il ne convient pas donc à des productions en grande série. Le soudage est aussi un procédé flexible avec un cycle de production relativement long et avec un coût de production moyen. Les pièces forgées ont généralement les meilleures propriétés mécaniques, comme la résistance, l'allongement et la résistance à la fatigue, mais

les inconvénients du procédé de forgeage sont le coût de production élevé et la productivité relativement faible pour des pièces ayant des formes complexes. Le procédé de forgeage est souvent limité à fabriquer des pièces d'une forme simple, sinon il faut ajouter une étape supplémentaire : l'usinage après le forgeage pour des pièces plus complexes. Cela augmente considérablement le coût de la fabrication et diminue beaucoup la productivité [20]. Le moulage est un procédé qui permet de produire des pièces en grande quantité avec des formes complexes à faible coût. Surtout pour le moulage sous pression, il peut produire plus de 1500 pièces par jour par machine à très faible coût. Mais le moulage sous pression conventionnelle (moulage liquide) a des très grandes faiblesses : les propriétés mécaniques de pièces sont souvent très faibles [21].

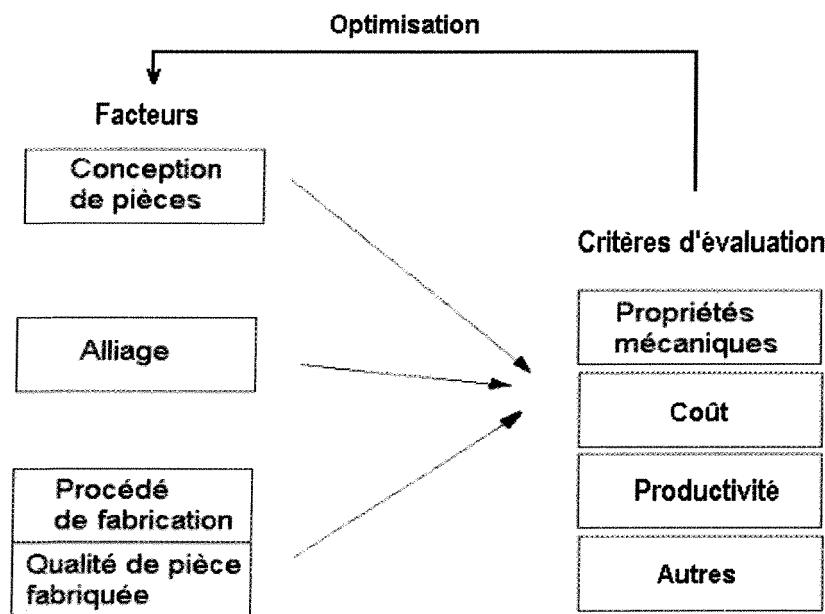


Figure 8 : Facteurs et critères d'évaluation.

Pour pallier ces lacunes, des nouveaux procédés de fabrication sont en développement. Le moulage semi-solide fait partie de ces nouvelles technologies. Le procédé de moulage semi-solide permet de produire des pièces de qualité en aluminium avec un coût très faible, une productivité élevée et des bonnes propriétés mécaniques [22].

D'une façon générale, les pièces d'aluminium moulées à l'état semi-solide ont des propriétés mécaniques légèrement inférieures aux pièces forgées (10 à 30% de moins), mais le coût de production diminue de 40 à 70%. Pour compenser la diminution des propriétés mécaniques, nous pouvons modifier et améliorer la conception des pièces pour qu'elles répondent à nos besoins en termes de propriétés mécaniques [23].

Un autre point à mentionner est que les pièces moulées sous pression pourraient avoir différents types de défauts de fabrication, comme les porosités, les inclusions des impuretés, etc. Il est toujours possible d'éliminer totalement ces défauts, mais cela coûterait trop cher. Il vaut mieux évaluer les impacts de ces défauts sur les propriétés mécaniques afin de savoir jusqu'à quel point ils sont acceptables, comme les porosités (leur quantité, leur distribution, leur taille et leur position.) [24].

Finalement, pour atteindre les propriétés mécaniques nécessaires, la fabrication des pièces dépend non seulement de la conception de pièces mais elle est reliée aussi étroitement avec le choix des alliages et le procédé de la fabrication.

2.1.2 Choix d'un alliage d'aluminium

Les alliages d'aluminium utilisés pour les pièces de suspension sont variés : 6061, A356, A357, A380 et d'autres alliages. Le choix d'alliage d'aluminium à utiliser pour fabriquer une pièce dépend principalement de trois facteurs : le coût, les propriétés et la fabricabilité. Les deux dernières caractéristiques sont affectées directement par la composition chimique d'un alliage et le traitement subi. Il existe deux groupes d'alliage d'aluminium, soit les alliages de corroyage et de fonderie [25]. Dans le cas de procédé de mise en forme à l'état semi-solide, la distinction entre ces deux groupes est moins évidente. Parce que même le moulage semi-solide est un procédé de fonderie, mais il est possible de fabriquer des pièces avec des alliages de corroyage par moulage semi-solide. Le moulage à l'état semi-solide pourrait être considéré comme un procédé intermédiaire entre le procédé de déformation solide (corroyage) et celui de fonderie traditionnelle (formation liquide). Les alliages d'aluminium utilisés pour la fabrication de pièce de structure pour automobile doivent avoir de très bonnes propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent directement de leurs compositions chimiques [26].

Le Tableau 1 présente des éléments chimiques dans des alliages d'aluminium et leurs effets sur des propriétés des pièces fabriquées.

Tableau 1 : Effets d'éléments chimiques dans des alliages d'aluminium et leurs effets [25].

Propriétés	Éléments favorables pour propriétés mécaniques	Éléments défavorables pour propriétés mécaniques
Allongement		Co, Cu
Coulabilité	Be, Ce, Mn, Si	Mg, Zn
Ductilité	Fe, Mn	Ni
Fissuration à chaud	Ca, Pb, Sn, Zn	Bi, Fe, Mn, Sb, Si, Ti
Porosités	H	
Affinement grains	B, Cd, Cr, Fe, Mn, Mn, Mo, Ti, V, Zr	
Résistance à la corrosion	Ag, Cr, Sb, Si, Sn	C, Cd, H, Hg, Mg, Ni, Zn
Résistance mécanique	Ag, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Mg, Mn, Ni, Sn, Zn	
Retrait		Mn
Usinabilité	Bi, Cd, Cu, P, Pb	

2.1.2.1 Alliages d'aluminium de corroyage

Les alliages d'aluminium de corroyage sont des alliages destinés à être transformés par des techniques, entre autres, de forgeage : déformation à l'état solide (laminage, filage, matriçage, etc.) Le Tableau 2 illustre des exemples de ces alliages et de leurs applications.

Tableau 2 : Alliages d'aluminium de corroyage [25].

Désignation numérique	Élément d'addition principal	Exemple	Exemples des propriétés	Exemples d'application
1XXX (série 1000)	> 99% Al	1050, 1350,1145, 1100	Faibles propriétés mécaniques	Câbles électriques, papier d'aluminium
2XXX (série 2000)	Cu	2024, 2048,2618, 2218	Bonne tenue à chaud ; bonnes propriétés mécaniques	Aéronautiques, pistons
3XXX (série 3000)	Mn	3003, 3105	Bonne résistance à la corrosion	Bouchon de bouteilles, assiettes, ustensiles
4XXX (série 4000)	Si	4006, 4032, 4043	Faible point de fusion ; Faible expansion thermique	Fils à souder, pistons
5XXX (série 5000)	Mg	5053, 5054,5083,	Mise en forme à chaud et à froid facile, bonne soudabilité ; Bonne résistance à la corrosion	Tubes d'essence ; canettes, réservoirs sous pression
6XXX (série 6000)	Mg, Si	6009, 6060, 6201	Bonne soudabilité ; propriétés mécaniques moyennes, excellente résistance à la corrosion	Automobiles, Pipelines, câbles de haute résistance
7XXX (série 7000)	Zn	7020	Les meilleures propriétés mécaniques, faible résistance à chaud	Container cargos ; structures d'avion, ailettes de radiateurs
8XXX (série des 8000)	Autres éléments.			

2.1.2.2 Alliages d'aluminium de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie sont des alliages destinés à être transformés par des techniques de fonderie : mise en forme à l'état liquide.

Le Tableau 3 donne certains types de ces alliages et leurs applications [25].

Tableau 3 : Alliages d'aluminium de fonderie [21].

Désignation numérique	Élément d'addition principal	Exemples	Certaines propriétés	Exemples d'application conventionnelle
1xx (série 100)	> 99% Al	A170		Moteurs électriques ;
2xx (série 200)	Cu	A201, A206, A242	Résistance mécanique élevée	Pistons, moteurs d'avion ; Pompes, boîtiers
3xx (série 300)	Si, Cu, Mg	308, A356, 319	Bonne coulabilité, Bonne soudabilité ;	automobiles
4xx (série 400)	Si	413, 443, 444	Bonne coulabilité, Bonne soudabilité ;	Boîtiers d'instrument, Ustensiles cuisinier,
5xx (série 500)	Mg	511, 512, 520, 535	ductilité élevée, Bonne usinabilité	Attaches mécaniques
7xx (série 700)	Zn	710, 711, 713, 771	Bonne résistance mécanique, bonne ductilité,	Automobiles, pompes
8xx (série 800)	Sn (Étain)	850, 852	Bonne usinabilité ; bonne résistance à la corrosion	douille à expansion

Le Tableau 4 fournit des exemples de propriétés mécaniques et le procédé de fabrication utilisé pour certains alliages d'aluminium.

Tableau 4 : Exemples de propriétés mécaniques et de procédé de fabrication utilisé [25].

	Propriétés mécaniques			Procédé de transformation typique			
	Rm (MPa)	Re (Mpa)	e (%)	Usinage	Soudage	Moulage	Forgeage
A319	250	164	2	oui		oui	
A356	283	207	10			oui	
A390	310	300	0.5	oui		oui	
3003-O	160	120	6	oui	oui		oui
6060	150 (T5)	110(T5)	14(T5)	oui	oui		oui
7020	320 (T5)	210 (T5)	14(T5)	oui	oui		oui

2.1.3 Procédés de fabrication des pièces en alliages d'aluminium

Les procédés de fabrication des pièces les plus utilisés sont les suivants : l'usinage, le soudage, le forgeage, le moulage par gravité, le moulage sous pression et le moulage semi-solide.

2.1.3.1 Usinage

L'usinage est un procédé flexible. Par contre, son cycle de fabrication est long. L'usinage est utilisé pour des fabrications en petite série. C'est un procédé généralement coûteux. L'usinage représente une famille de techniques de fabrication pour des pièces mécaniques en alliage d'aluminium. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le

mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui donne la surface finale. De nos jours, des machines à commandes numériques, c'est-à-dire asservies par un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure [20].

2.1.3.2 *Soudage*

Le soudage est aussi un procédé flexible. Le cycle de fabrication est aussi long. Il demande souvent des préparations ou des montages complexes. Le soudage est une opération consistante à réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, par chauffage ou par pression, entraînant la fusion des matériaux. Cette fusion s'effectue avec ou sans emploi d'un matériau d'apport, dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. Le soudage permet d'obtenir une continuité métallique de l'assemblage [27].

2.1.3.3 *Forgeage*

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force mécanique sur une pièce de métal, à froid ou à chaud, afin de déformer la pièce pour obtenir la forme voulue. Le forgeage est

utilisé pour la fabrication de pièces de propriétés mécaniques élevées. Le forgeage peut être utilisé pour la fabrication en grande série. Les pièces forgées ne sont pas souvent des produits finis. Des usinages sont nécessaires pour des pièces complexes et précises. Le forgeage ne permet pas tout à fait d'obtenir les mêmes marges de tolérance que l'usinage, ce qui la rend inutilisable pour obtenir directement les pièces mécaniques ayant besoin d'un maximum de précision dimensionnelle [28]. En revanche, les pièces obtenues sont plus résistantes aux contraintes mécaniques, car la déformation des métaux engendre un grand nombre de phénomènes métallurgiques, autant au niveau microscopique que macroscopique. Parmi ces phénomènes, on trouve notamment le corroyage, qui lui-même est à l'origine du fibrage du métal. Le terme fibrage est utilisé par analogie avec des matériaux qui présentent réellement cette caractéristique tels que le bois ou encore certains composites. Dans le cas des métaux, il fait référence à l'orientation globale que prend la structure métallurgique en fonction du sens d'écoulement du matériau durant sa déformation [29].

2.1.3.4 Fonderie générale

La fonderie consiste à couler de l'aluminium en fusion dans un moule pour obtenir, après solidification, une pièce dont les formes reproduisent celles du moule. Du fait qu'elles mettent en forme le métal liquide, les industries de la fonderie doivent maîtriser deux technologies essentielles : la fusion des métaux et leurs alliages ainsi que le moulage.

La mise en œuvre du métal sous forme liquide implique l'existence de moyens de fusion adaptés et la connaissance de la métallurgie associée. L'énergie utilisée est, selon les cas, l'électricité, le gaz ou l'huile. Les températures nécessaires pour couler sont très variées. Le remplissage des moules par un métal permet d'obtenir les formes les plus complexes (pleines ou creuses) dès lors que l'on peut concevoir et réaliser les moules correspondant aux pièces. On obtient alors, sans joints mécaniques ni soudures, des pièces de tailles très variées, allant de moins de quelques grammes jusqu'à plusieurs kilos. Les fonderies se spécialisent selon : la méthode de mis en œuvre ; la taille des pièces, qui détermine le volume de métal liquide à préparer, les moyens de manutention et les dimensions des moules et le nombre de pièces par série qui conduit à des procédés de moulage parfois mécanisés et automatisés. Enfin, la précision dimensionnelle et le niveau de qualité souhaité peuvent conduire à des procédés de moulage spéciaux (en plâtre, en cire perdue, etc.) et à des équipements de contrôle adaptés.

Les alliages d'aluminium se répartissent en cinq grandes classes : les alliages aluminium-silicium, aluminium-silicium-cuivre souvent issu du recyclage, aluminium-cuivre, aluminium-magnésium et aluminium-zinc. Leur emploi est lié à leur légèreté, leur conductibilité et leur résistance à la corrosion [30].

Le moulage sous pression ou par gravité, réalisé à partir d'un moule au sable ou en acier est un type très souvent utilisé pour des pièces automobiles.

Le moulage en sable utilise des moules en sable à usage unique. Ce type de fabrication est principalement utilisé pour petites séries. Sa productivité est relativement faible et son coût de production relativement élevée.

2.1.3.5 Moulage sous pression conventionnel

Le moulage sous pression est une technique de fabrication de pièces en grande ou très grande série. Le métal liquide est injecté dans un moule métallique sous haute pression (par exemple : 20 000 psi) pour former une pièce. Il peut produire des pièces de forme complexe et de haute précision. Sa productivité est élevée, soit jusqu'à 1500 pièces par jour, mais son coût de fabrication est très faible. Par contre, les pièces moulées ont de faibles propriétés mécaniques [24]. La Figure 9 présente le principe du moulage sous pression conventionnel. On rencontre des composantes moulées par injection dans de très nombreux produits: automobiles, électroménagers, matériels informatiques, mobiliers, etc. Pour des pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées Les moules sont constitués le plus souvent de deux coquilles qui sont fortement pressées l'une contre l'autre au moment du moulage puis écartées pour permettre l'extraction de la pièce moulée. Outre ces coquilles, le moule peut comporter un ou plusieurs noyaux destinés à former les parties creuses de la pièce. Il arrive fréquemment que l'on place dans le moule des « inserts » qui se retrouveront par la suite inclus dans la pièce. Les dispositifs d'injection du matériau fondu sont très différents selon qu'il s'agit de mouler un métal ou un matériau organique. Contrairement à d'autres procédés où le moule est perdu (moulage en sable, à la cire perdue, etc.),

il faut impérativement veiller à ce que les pièces injectées ne restent pas coincées dans les coquilles et qu'elles puissent au contraire en sortir sans aucune détérioration. C'est pour cela que les surfaces ne sont pas parallèles à la direction d'extraction, mais en diffèrent d'un petit angle appelé «dépouille». Les pièces en forme de seau se contractent lors du refroidissement et enserrent parfois très fortement les noyaux autour desquels elles ont été coulées; Il faut les extraire au moyen de tiges coulissantes appelées éjecteurs. La conception des moules est très délicate. Outre que les pièces doivent se démouler facilement, il faut s'assurer que le moule puisse être complètement rempli avant que le matériau se solidifie. Certaines parties sont réchauffées, d'autres refroidies, afin de donner au moule en production un certain équilibre thermique. Cet équilibre est assuré par les circuits de refroidissement à l'intérieur du moule. Le tracé des pièces est très important aussi pour éviter la formation de défauts tels que déchirures, retassures, criques, porosités... Des logiciels de simulation permettent aujourd'hui de faciliter le travail, hautement spécialisé, des moulistes. Le moulage par injection permet d'obtenir des pièces très précises qui ne nécessitent très souvent aucun usinage ultérieur. Le coût des moules est très élevé et ne peut être amorti que par la production de pièces en grande série [24].

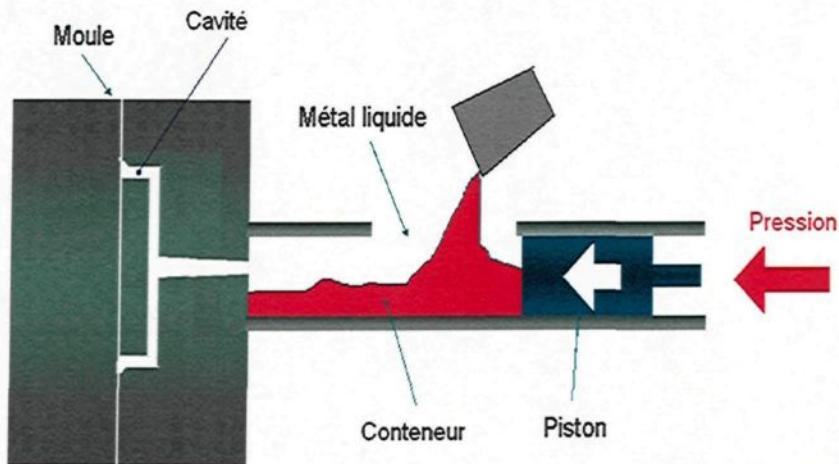


Figure 9 : Schéma du moulage conventionnel.

2.2 Méthodes d'optimisation

L'optimisation est un outil bien courant dans la recherche et développement des procédés de fabrication industrielle : devant un problème donné, en présence de plusieurs solutions possibles, on choisit logiquement une solution qui est qualifiée de "meilleure". Du point de vue mathématique, se donner un problème d'optimisation, c'est se donner un ensemble U et une fonction objective J , définie

sur U et à valeurs dans \mathbb{R} : il s'agit alors de trouver u tel que :
$$\begin{cases} u \in U \\ J(u) \leq J(v), \forall v \in U \end{cases}$$

U représente l'ensemble des solutions possibles pour atteindre une cible ou pour faire fonctionner un système ; au point de vue pratique, l'appartenance à U se traduira souvent par le respect de certaines contraintes. U est souvent appelé le domaine des contraintes (dans lequel l'ensemble des points où les contraintes sont respectées). La fonction objective J représente un critère qui oriente le choix d'une

solution possible : dans la formule $\begin{cases} u \in U \\ J(u) \leq J(v), \forall v \in U \end{cases}$, il s'agit de choisir une solution u qui minimise la valeur de J sur l'ensemble U ; En changeant J en $-J$ le problème serait un problème de maximisation. En pratique J représente une propriété, un coût, un rendement, un bénéfice ou une durée [31].

Notons ceci : il se peut que le problème n'admette pas une solution ; dans ce cas, on cherchera une solution réalisable u telle que $J(u)$ soit assez "voisin" de $\inf. J(v)$.

La description de l'ensemble U se fait généralement à l'aide d'équations et d'inéquations qui lient les différents paramètres d'un système. Lorsque les systèmes sont assez complexes, il peut être difficile de les d'écrire, et même de les utiliser numériquement. On se contente alors de "modèles", qui sont des descriptions simplifiées de la réalité. Cependant, l'avènement d'ordinateurs de plus en plus puissants nous donne la possibilité de travailler sur des modèles complexes de plus en plus fins. En général, il est impossible d'obtenir une expression analytique d'une solution optimale d'un problème d'optimisation. On est donc réduit à chercher une approximation numérique d'une telle solution. Le problème de la recherche des méthodes numériques est intimement lié aux possibilités des ordinateurs.

Dans toutes ces méthodes, l'idée essentielle est la suivante : on remplace un "gros" problème par une suite de "petits" problèmes. Généralement, dans ces derniers, il n'y avait qu'UNE VARIABLE. Une autre direction de recherche est la

suivante : les problèmes avec contraintes sont difficiles à résoudre, on a donc essayé d'éliminer ces dernières et, cela a conduit aux méthodes pénalisation. Notons qu'il s'agit là d'un cas particulier où la nature du problème est changée.

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation pour minimiser la fonction J . La méthode Levenberg Marquardt est fiable et converge généralement après quelques itérations vers une solution précise. Elle nécessite le calcul approché de la matrice hessienne à chaque itération. Elle est plus fiable quand il y a peu de valeurs initiales. Elle fonctionne bien avec des contraintes. La méthode Ridge Stabilized Newton Raphson est fiable et converge généralement après quelques itérations vers une solution précise. Elle nécessite le calcul approché de la matrice hessienne à chaque itération. Elle fonctionne bien avec des contraintes. La méthode Quasi Newton avec plusieurs algorithmes de mise à jour peut être beaucoup plus efficace pour de longs problèmes. La méthode Gradient conjugué avec plusieurs algorithmes de mise à jour est utile si l'on a des problèmes de mémoire mais est généralement plus lent et moins fiable. Dans les paragraphes suivants, nous allons considérer quelques exemples des méthodes d'optimisation [33]

2.2.1 Optimisation par descente du gradient

Le problème consiste donc à trouver un minimum global de la fonction erreur E entre la fonction $J(u)$ et les points "Target" $J(v)$. La méthode du gradient est l'une des principales méthodes pour déterminer cette région d'optimisation.

En effet, afin de minimiser une fonction à partir d'une solution approchée, le plus simple est de suivre la ligne de plus grande pente. D'un point de vue mathématique, la pente d'une fonction correspond à la dérivée de cette dernière. Si l'on se place dans le cadre d'une fonction ayant plusieurs paramètres, la dérivée devient un vecteur : le gradient de la fonction. Chaque élément de ce vecteur correspond alors à la dérivée partielle de la fonction selon l'un de ses paramètres.

Soit $J=f$, une fonction (suffisamment dérivable) dont on recherche un minimum. La méthode du gradient consiste à construire une suite x_n , ($x_n=u$), qui doit en principe s'approcher du minimum. Pour cela, on part d'une valeur quelconque et l'on construit la suite $x_{n+1} = x_n - \rho f'(x_n)$ où ρ est une valeur ``bien'' choisie réelle non nulle [34]. (1) X_n avec $X_0=u$; (2) $X_{n+1}=X_n$...

On obtient $f(x_{n+1}) = f(x_n - \rho f'(x_n)) \approx f(x_n) - \rho(f'(x_n))^2$ d'après le théorème des approximations finies si $f'(x_n)$ est "suffisamment" petit.

On remarque que, sous réserve de la correction de l'approximation, $f(x_{n+1})$ est inférieur à $f(x_n)$ (Figure 10).



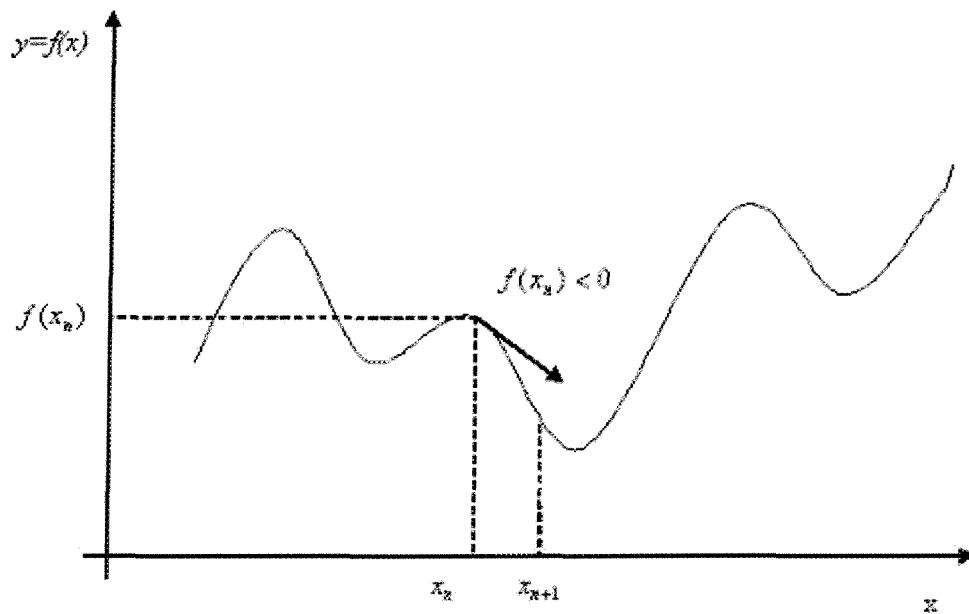


Figure 10 : Méthode du gradient.

On remarque que x_{n+1} est d'autant plus éloigné de x_n et que la pente de la courbe en x_n est grande. On peut décider d'arrêter l'itération lorsque cette pente est suffisamment faible. Cependant, cette méthode possède des inconvénients bien connus :

1. le choix de ρ est empirique,
2. si ρ est trop petit, le nombre d'itérations peut être très élevé,
3. si ρ est trop grand, les valeurs de la suite risquent d'osciller autour du minimum sans converger,
4. rien ne garantit que le minimum trouvé soit un minimum global.

Ce dernier point est la limite la plus importante de cette méthode d'optimisation. En effet, si on considère un cas simple, comme celui de la Figure 11, le minimum global est souvent masqué par un maximum local. Ici, dans cet

exemple, en partant du point marqué d'une croix, il est impossible avec la méthode du gradient d'aller au-delà du point marqué d'un cercle. En effet, cette méthode va s'arrêter à ce minimum et rien ne peut prouver qu'il n'existe pas un autre minimum qui peut être global au-delà ce minimum. (Figure 11)

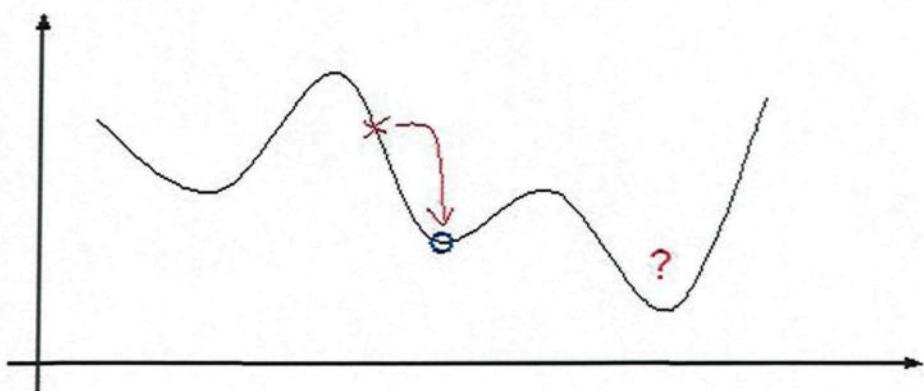


Figure 11 : Limite de la méthode du gradient

La seconde limite de cette méthode tient à la notion de paramètre borné. En effet, il arrive souvent que certains paramètres ne soient valides que dans un certain intervalle. Par exemple, dans le cadre d'un modèle probabiliste, une probabilité ne peut pas être négative et ne doit pas dépasser 100%. Or la descente de gradient peut amener à dépasser ces limites.

2.2.2 Optimisation combinatoire et sous contraintes

L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre

part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre. En effet, la plupart de ces problèmes ne possèdent pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données. Étant donnée l'importance de ces problèmes, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle. Ces méthodes peuvent être classées sommairement en deux grandes catégories : les méthodes exactes (complètes) qui garantissent la complétude de la résolution et les méthodes approchées (incomplètes) qui perdent la complétude pour gagner en efficacité [35]. Le principe essentiel d'une méthode exacte consiste généralement à énumérer, souvent de manière implicite, l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Pour améliorer l'énumération des solutions, une telle méthode dispose de techniques pour détecter le plus tôt possible les échecs (calculs de bornes) et d'heuristiques spécifiques pour orienter les différents choix. Parmi les méthodes exactes, on trouve la plupart des méthodes traditionnelles (développées depuis une trentaine d'années) telles les techniques de séparation et évaluation progressive ou les algorithmes avec retour arrière. Les méthodes exactes ont permis de trouver des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Malgré les progrès réalisés (notamment en matière de la programmation linéaire en nombres entiers), comme le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution risque d'augmenter exponentiellement avec la taille du

problème, les méthodes exactes éprouvent généralement des difficultés face aux applications de taille importante. Les méthodes approchées constituent une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalisé n'est pas primordiale. En effet, ces méthodes sont utilisées depuis longtemps par de nombreux praticiens. On peut citer les méthodes gloutonnes et l'amélioration itérative : par exemple, la méthode de Lin et Kernighan qui resta longtemps le champion des algorithmes pour le problème du voyageur de commerce. Depuis une dizaine d'années, des progrès importants ont été réalisés avec l'apparition d'une nouvelle génération de méthodes approchées puissantes et générales, souvent appelées *méta-heuristiques*. Une méta-heuristique est constituée d'un ensemble de concepts fondamentaux (par exemple, la liste tabou et les mécanismes d'intensification et de diversification pour la méta-heuristique tabou), qui permettent d'aider la conception de méthodes heuristiques pour un problème d'optimisation. Ainsi, les méta-heuristiques sont adaptables et applicables à une large classe de problèmes. Les méta-heuristiques sont représentées essentiellement par les *méthodes de voisinage*, comme le recuit simulé et la recherche tabou, et les *algorithmes évolutifs*, comme les algorithmes génétiques, et les stratégies d'évolution. Grâce à ces méta-heuristiques, on peut proposer aujourd'hui des solutions approchées pour des problèmes d'optimisation classiques de plus grande taille et pour de très nombreuses applications qu'il était impossible de traiter auparavant. On constate, depuis ces dernières années, que

l'intérêt porté aux méta-heuristiques augmente continuellement en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle [31,32].

2.2.3 Plan d'expérience et méthodologie de Taguchi

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale et plus particulièrement depuis les années 1980, la démarche qualité mise en place dans les entreprises industrielles intervient dès la phase de conception d'un produit. Un des outils de cette démarche est la méthode des plans d'expériences. Popularisée par le japonais Taguchi, cette méthode statistique de plus en plus répandue permet de définir un protocole expérimental dont l'objectif est la mesure au moindre coût de l'impact des paramètres mis en cause dans l'élaboration du produit [36].

Il existe de nombreux processus qu'on sait dépendre d'un grand nombre de paramètres externes (on parle de facteurs) mais sans que l'on en ait des modèles *analytiques*.

Lorsque l'on est intéressé de connaître la dépendance d'une variable de sortie F d'un tel processus, on se trouve confronté à plusieurs difficultés :

- Quels sont les facteurs les plus influents ?
- Existe-t-il des interactions entre les facteurs (*corrélations*) ?
- Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment minimiser le nombre de points de mesure du processus pour obtenir le maximum d'informations ?

- Existe-t-il des biais dans les résultats des mesures ?

La méthodologie du plan d'expérience répond à ces questions et peut ainsi être appliquée dans de nombreux processus qui vont par exemple des essais cliniques à l'évaluation de la qualité des processus industriels les plus complexes [37].

Plan d'expérience est un outil des statistiques de la qualité. Les plans d'expériences s'inscrivent dans la démarche qualité au même titre que les autres outils statistiques : indices de capabilité, cartes de contrôle et SPC, etc. Les indices de capabilité déterminent la possibilité que possède l'outil de production de créer des pièces de bonne qualité. Les cartes de contrôle vérifient en temps réel si les paramètres ayant servi au calcul des indices de capabilité restent valables. Le SPC fournit un concept de suivi statistique. Enfin, les plans d'expériences cherchent les causes d'une non-qualité, ou plus positivement les paramètres pouvant améliorer la qualité actuelle.

Les plans permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter à des non-spécialistes et la possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs ainsi que la détection des interactions éventuelles. Il aide à la modélisation aisée des résultats et la détermination des résultats avec une bonne précision.

La méthodologie Taguchi est nommée après M. Taguchi. La méthode a été reconnue pour son efficacité.

Taguchi a découvert que les modèles complexes se sont toujours avérés pour être les mêmes. Ainsi, il a établi la sélection standard des tables possibles ou des modèles faisables pour une expérience. Il a ajouté le concept de Graphes linéaires pour qu'on puisse maîtriser les interactions. Son effort a permis à mettre les outils statistiques complexes dans les mains des ingénieurs. Dû aux plans d'expérimentation statistiques effectifs, les sociétés ont amélioré leurs produits et leurs performances de façon que la production peut-être améliorée considérable.

Donc, la méthode Taguchi est une méthode d'optimisation des procédés utilisée couramment dans l'industrie. Elle nous aide à établir un plan d'expérience basé sur une matrice orthogonale normalisée. Chaque ensemble de la matrice assure que l'espace doit être investigué de telle sorte que l'effet de chaque variable peut être détecté sans les mélanger. Cela devrait être réalisé en variant plusieurs paramètres en même temps selon la bordure orthogonale du domaine orthogonal [38]. Le nombre de facteurs et les niveaux possibles pour chaque facteur déterminent la taille du domaine orthogonal. La Figure 12 présente une matrice de L9 pour 2 facteurs avec 3 niveaux. Dans ce cas, il est équivalent à un plan factoriel traditionnel avec 3^2 essais. Dans une étude, il est possible d'étudier 4 facteurs à trois niveaux et chaque plan a seulement 9 essais en même temps. Si on prend un facteur à la fois, un plan factoriel dans ce cas-ci devra autrement dire prendre 3^4 essais. Dans l'exemple, un plan combiné en deux étapes de L32 et 2 x L9 réduit les 512 essais demandés par un plan factoriel à 50 demandés par un plan Taguchi.

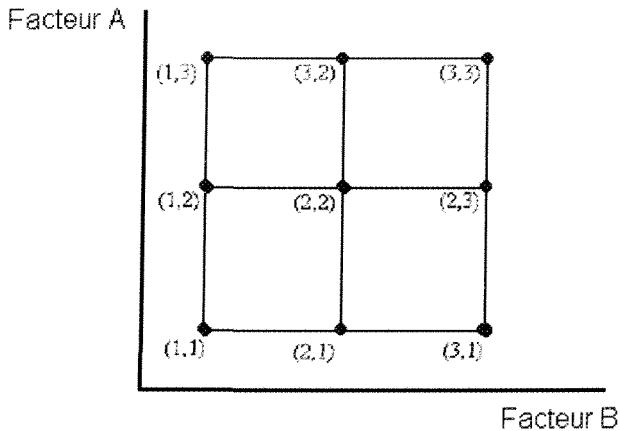


Figure 12 : Détermination des essais à réaliser.

2.2.4 Méthode E.M.Optimisation

Une nouvelle méthode d'expérimentation appelée E.M.Optimisation est employée pour l'amélioration des procédés industriels ainsi que la conception de nouveaux procédés. E.M.Optimisation est également utilisée pour l'optimisation de paramètres du procédé et repose sur la technique de plan d'expérience. La méthode E.M.Optimisation utilise un ellipsoïde multidimensionnel pour représenter le domaine de contraintes : domaine opératoire [39].

La méthode E.M.Optimisation est basée sur l'établissement d'un domaine euclidien. Le domaine est construit de façon interactive. Les essais sont réalisés en variant tous les paramètres en même temps. Le domaine opératoire d'un procédé est défini par un volume multidimensionnel dans un espace continu de facteurs. C'est ce même volume qui discrimine le mieux les essais acceptés à l'intérieur et ceux rejetés à l'extérieur. Le domaine est reconstruit après chaque nouvel essai réalisé. La sélection d'un nouvel essai subséquent est basée sur une

maximisation du gain d'informations. Si l'essai est accepté, basé sur des critères prédéfinis, le domaine va être reconstruit en considérant cette nouvelle zone d'investigation. Par contre, s'il est rejeté, la frontière du domaine dans cette zone sera limitée et les causes de rejet seraient identifiées. Cette méthode utilise une approche interactive et une construction dynamique du domaine opératoire avec les données obtenues [40,41].

Les modèles mathématiques sont établis par l'expérimentation et l'analyse de régression. Cette méthode peut nous aider à faire :

- 1) la formulation du problème à résoudre ;
- 2) la construction dynamique du domaine opératoire et la modélisation de son comportement ;
- 3) l'analyse des résultats pour identifier la fenêtre opératoire optimale.
- 4) l'optimisation de paramètres d'un procédé pour obtenir la meilleure qualité et productivité ainsi que réduire le coût de fabrication.

Les étapes d'optimisation avec la méthode E.M.Optimisation sont les suivantes : déterminer les paramètres à étudier ; définir les spécifications ; effectuer des essais expérimentaux ; construire un domaine opératoire ; calculer les modèles de régression ; optimiser les paramètres et déterminer la fenêtre d'opération [43].

2.2.5 Comparaison de la méthode Taguchi et la méthode E.M.Optimisation

Le tableau 5 présente la comparaison de la méthode Taguchi et la méthode E.M.Optimisation.

La méthode Taguchi permet la production d'un domaine orthogonal. Un plan d'essais préétabli et il est facile à le suivre. Mais, un domaine orthogonal ne représente pas nécessairement le domaine réel. La méthode E.M.Optimisation permet la construction du domaine de façon interactive qui permet de réduire considérablement les essais à réaliser. Mais le plan d'essais n'est pas prédéfini, l'influence des facteurs humains est possible au niveau du choix des essais. La Figure 13 présente la distribution des essais et la construction d'un domaine réalisable avec les deux méthodes [38].

Tableau 5 : Comparaison de la méthode Taguchi et la méthode E.M.Optimisation.

	Méthode Taguchi	Méthode E.M.Optimisation
Avantages	Le design de plan assure la considération de chaque paramètre	Construction du domaine est interactive qui permet de réduire considérablement les essais à réaliser. (Figure 13)
	Établissement d'un plan fixe et facile à suivre	Flexible, possibilité de mélange avec d'autres méthodes de plan d'expérience
	Méthode systématique (plan, essais, analyses)	Optimisation à multicritères
	Optimisation à multicritères	Possibilité d'étudier des domaines réalisables irréguliers
	Explorations les frontières d'un domaine.	Possibilité d'insérer un plan factoriel
Désavantages	Production d'un domaine orthogonal qu'il ne représente pas nécessairement le domaine réel (Figure 13)	Le plan d'expérience n'est pas fixe. L'influence des facteurs humains est possible.
	Il faut bien connaître le procédé à étudier pour éviter le manque des essais ou des essais sans résultats	Une géométrie euclidienne du domaine ne peut pas représenter tous les domaines réalisables.
	S'il manque des essais, il risque de négliger des effets de certains paramètres	
	Le plan ne peut pas être ajusté au cours d'une expérimentation	

Avec la méthode Taguchi, il est possible d'utiliser deux stratégies. Un plan large et un plan modéré avec ajustements des spécifications sur les variables. Il faut bien connaître le procédé à étudier pour éviter le manque des essais ou des essais sans résultats lors d'utilisation de la méthode Taguchi. S'il manque des essais, il risque de négliger des effets de certains paramètres.

La Figure 14 présente les deux stratégies utilisées pour la construction d'un domaine réalisable. La stratégie A présente un plan large ; Tandis que la stratégie B présente un plan modéré.

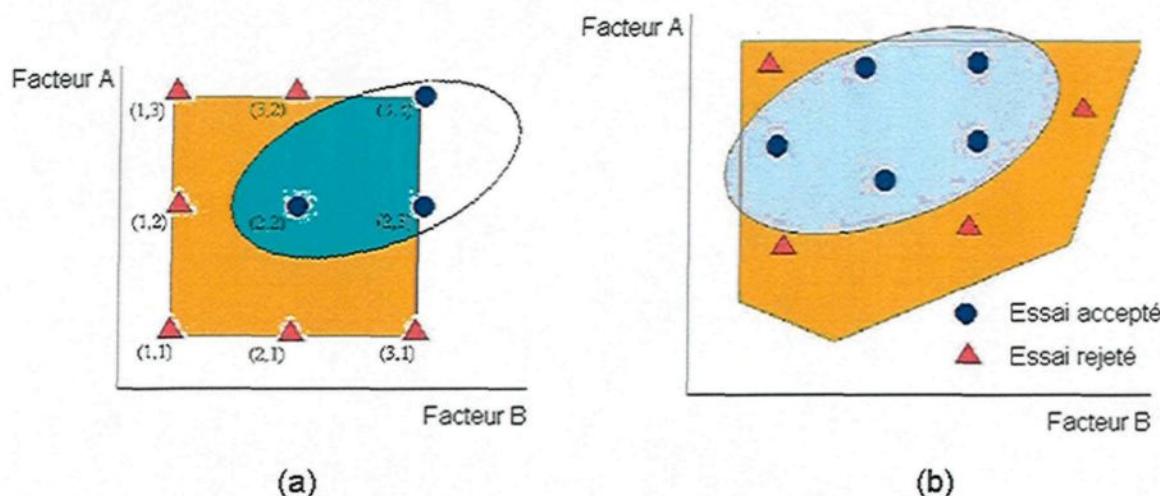


Figure 13 : Construction d'un domaine et choix des essais :
 (a) Taguchi; (b) E.M.Optimisation

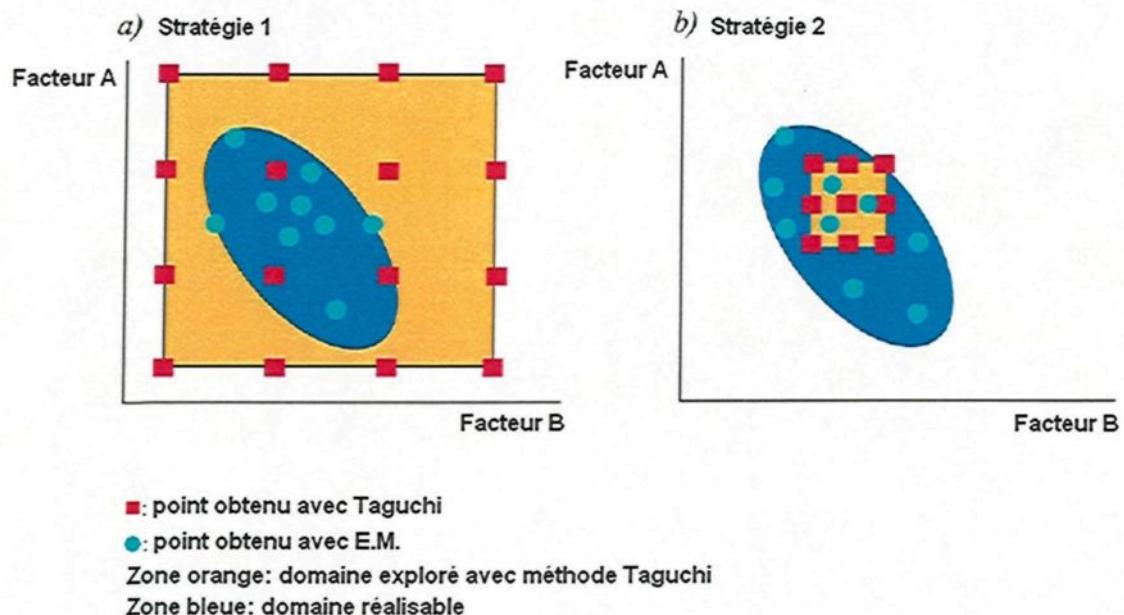


Figure 14 : Deux stratégies dans la construction du domaine réalisable [38].

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3: CHOIX D'UN PROCÉDÉ ET L'OPTIMISATION AVEC UNE NOUVELLE MÉTHODOLOGIE

3.1 Procédés de fabrication des pièces en aluminium

Le choix d'un procédé de fabrication est très important. Un bon procédé de fabrication de pièces automobiles qui est souvent réalisé en grande quantité et en série doit assurer non seulement des propriétés mécaniques satisfaisantes, mais également une productivité élevée et un coût faible.

La Figure 15 présente un exemple des bras de contrôle fabriqués par différents procédés.

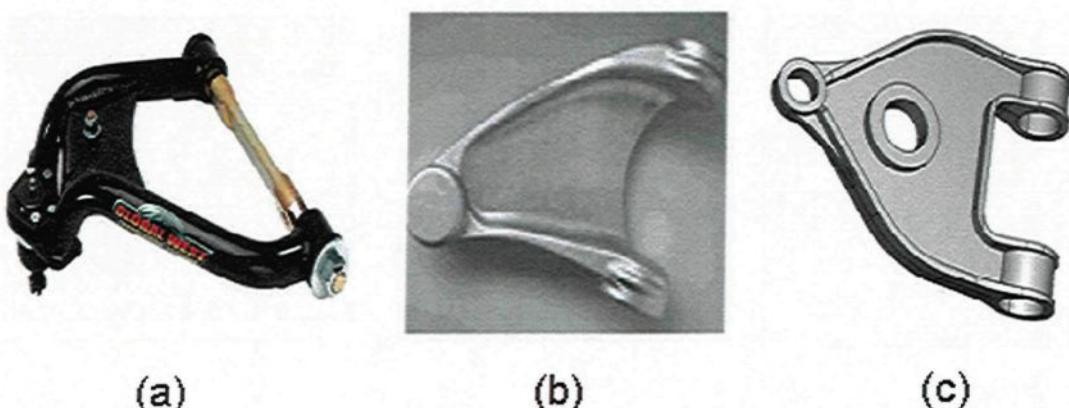


Figure 15 : Exemples des bras de contrôle fabriqué par différents procédés :
(a) soudé; (b) forgé; (c) moulé

La Figure 16 et la Figure 17 illustrent la comparaison de procédés en termes de propriétés mécaniques, de coût de fabrication et de productivité [19].

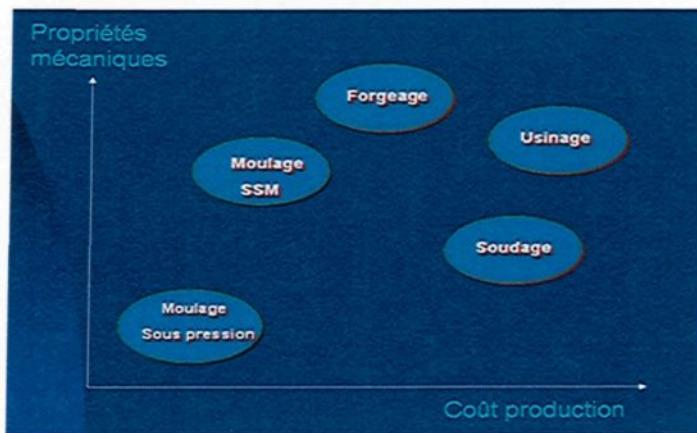


Figure 16 : Comparaison schématique des procédés de fabrication.

Dans Figure 16, on voit que le moulage sous pression conventionnel donne un coût de production très faible. Mais les propriétés mécaniques de ses pièces sont aussi très faibles. Contrairement au moulage sous pression, le forgeage fournit des pièces ayant très bonnes propriétés mécaniques, mais leur coût de production est élevé. Tandis que le moulage semi-solide fait un bon compromis avec un coût de production très faible. Les propriétés mécaniques des pièces fabriquées par ce procédé sont élevées.

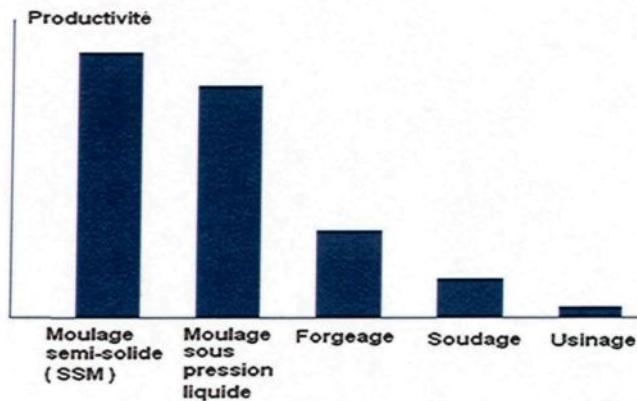


Figure 17 : Comparaison schématique des procédés de fabrication.

D'après la figure 17, le procédé du moulage sous pression semi-solide donne la meilleure productivité parmi ces procédés de fabrication courants.

L'analyse des figures 16 et 17 montre que le procédé de fabrication par moulage semi-solide semble est très prometteur en termes de propriétés mécaniques, coût de fabrication et productivité : Propriétés mécaniques très élevées, faible coût et productivité très élevée.

3.1.1 Mise en forme par moulage semi-solide

Le moulage semi-solide est un nouveau procédé de mise en forme. Il possède des avantages du procédé de forgeage en termes de propriétés mécaniques et aussi du moulage sous pression conventionnel en termes de productivité et de coût de fabrication. Ses propriétés mécaniques sont excellentes, sa productivité est élevée et son coût de fabrication est très faible.

On utilise pour cela un alliage thixotropique, en phase semi-fluide/solide. La thixotropie est la caractéristique de certains métaux à l'état semi-fluide/solide qui réagissent comme corps visqueux sans influence extérieure. Toutefois, il garde une certaine viscosité sous de petites contraintes extérieures. La transformation a donc lieu pendant le court intervalle de la phase Solidus/Liquidus. Au préalable, une structure à grains fins et globulaires est requise [41].

Le moulage semi-solide consiste à injecter du métal semi-solide dans un moule pour former une pièce. Le métal est poussé par un piston hydraulique jusqu'au remplissage complet du moule. Ensuite, une pression élevée est appliquée pour compacter les retraits. Le métal semi-solide a une viscosité élevée

qui peut éviter la turbulence lors du remplissage de l'empreinte [45]. Le remplissage se fait de manière laminaire. Donc, il y a moins de turbulence et de risque d'inclusion. Ceci diminue ou élimine aussi les porosités. Les pièces peuvent ultérieurement subir un traitement thermique et sont soudables. Leur très faible porosité permet la fabrication de pièces de structure ou de pièces étanches. Le retrait de refroidissement est réduit et permet une plus grande précision et des dépourvus faibles. Les valeurs des résistances mécaniques atteintes tant statiques que dynamiques prédestinent ces produits aux pièces de sécurité dans la construction automobile. Les propriétés mécaniques de ces pièces moulées sont de 30 à 80% supérieures que celles produites par moulage sous pression conventionnel [45]. La Figure 18 présente le schéma du moulage semi-solide.

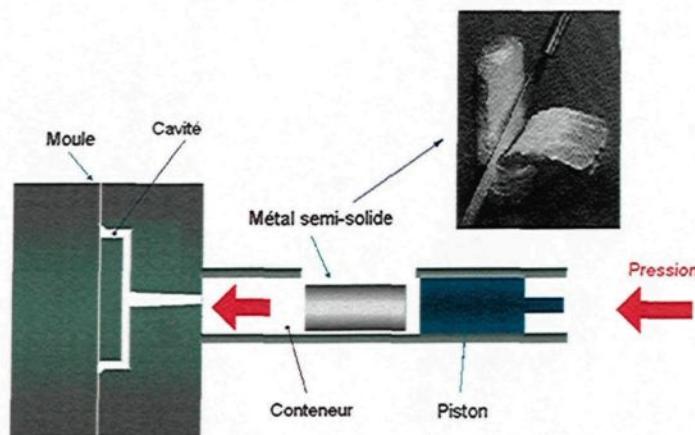
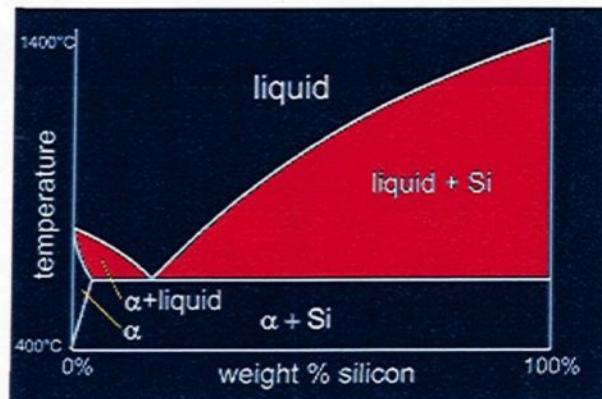


Figure 18 : Moulage semi-solide.

Le diagramme de phase de l'alliage d'aluminium de la série Al-Si est présenté à la Figure 19. La partie rouge est la phase semi-solide [46].



■ Zone semi-solide

Figure 19 : Diagramme de phases : Al – Si.

La Figure 20 résume les étapes importantes du moulage semi-solide.

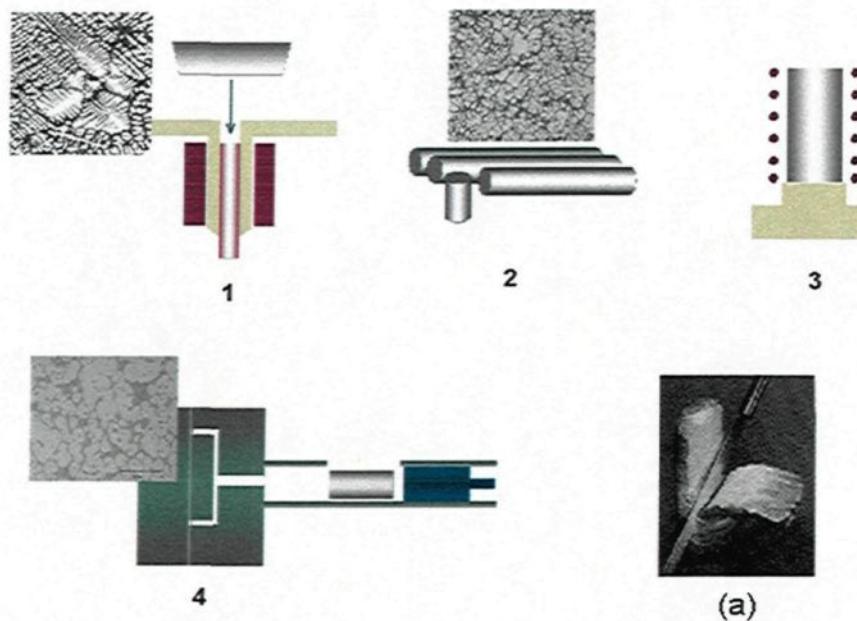


Figure 20 : Moulage semi-solide :

1- fabrication des barres semi-solide; 2- coupage des billettes; 3- réchauffage; 4- injection; (a)- vérification de l'état d'une billette

3.2 Développement et optimisation des procédés avec la méthode E.M. optimisation

La méthode E.M.Optimisation est basée sur l'établissement d'un domaine euclidien. Le domaine est construit de façon interactive. Les essais sont réalisés en variant tous les paramètres en même temps. Le domaine opératoire d'un procédé est défini par un volume multidimensionnel dans un espace continu de facteurs. C'est ce même volume qui discrimine le mieux les essais acceptés à l'intérieur et ceux rejetés à l'extérieur. Le domaine est reconstruit après chaque nouvel essai réalisé. La sélection d'un nouvel essai subséquente est basée sur une maximisation du gain d'informations. Si l'essai est accepté, basé sur des critères prédéfinis, le domaine va être reconstruit en considérant cette nouvelle zone d'investigation. Par contre, s'il est rejeté, la frontière du domaine dans cette zone sera limitée et les causes de rejet seraient identifiées. Cette méthode utilise une approche interactive et une construction dynamique du domaine opératoire avec les données obtenues [47].

Les modèles mathématiques sont établis par l'expérimentation et l'analyse de régression. Cette méthode peut nous aider à faire :

- 1) la formulation du problème à résoudre ;
- 2) la construction dynamique du domaine opératoire et la modélisation de son comportement ;
- 3) l'analyse des résultats pour identifier la fenêtre opératoire optimale.

4) l'optimisation de paramètres d'un procédé pour obtenir la meilleure qualité et productivité ainsi que réduire le coût de fabrication.

Les étapes d'optimisation avec la méthode E.M.Optimisation sont les suivantes : Déterminer les paramètres à étudier ; Définir les spécifications ; Effectuer des essais expérimentaux ; Construire un domaine opératoire ; Calculer les modèles de régression ; Optimiser les paramètres et déterminer la fenêtre d'opération.

3.2.1 Détermination des paramètres et création d'un espace multidimensionnel

Chaque paramètre de type facteur est représenté par un axe dans un espace multidimensionnel. La Figure 21 présente un schéma de ces paramètres créant cet espace.

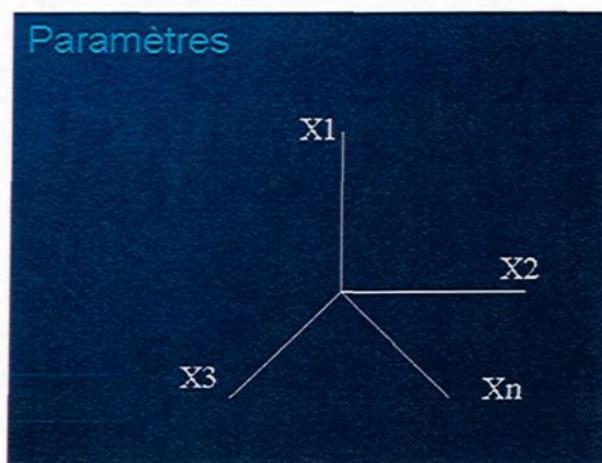


Figure 21 : Détermination de paramètres facteurs (Paramètres contrôlables).

3.2.2 Détermination de spécifications

Les spécifications représentent des limites physiques d'un procédé. La Figure 22 montre un schéma de ces spécifications dans l'espace multidimensionnel.

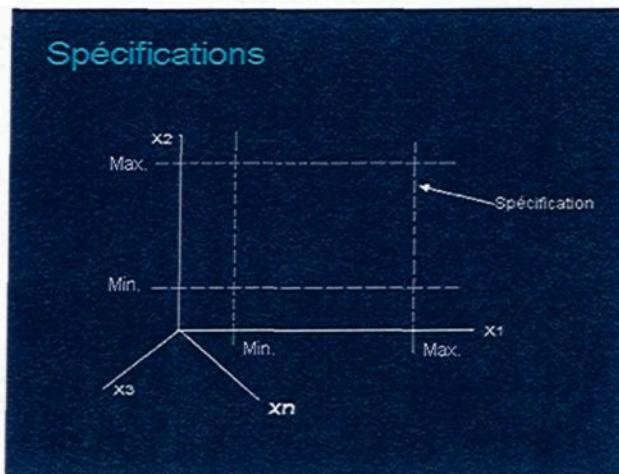


Figure 22 : Détermination de spécifications.

3.2.3 Expérimentation : Choix d'un nouvel essai

Lors de l'expérmentation, le choix d'un nouvel essai est crucial. Le domaine est construit pas à pas. Chaque nouvel essai est choisi pour maximiser le gain d'informations. Le nouvel essai est choisi de façon à mieux connaître le procédé, quels que soient les résultats obtenus. La Figure 23 présente un schéma de ces essais expérimentaux.

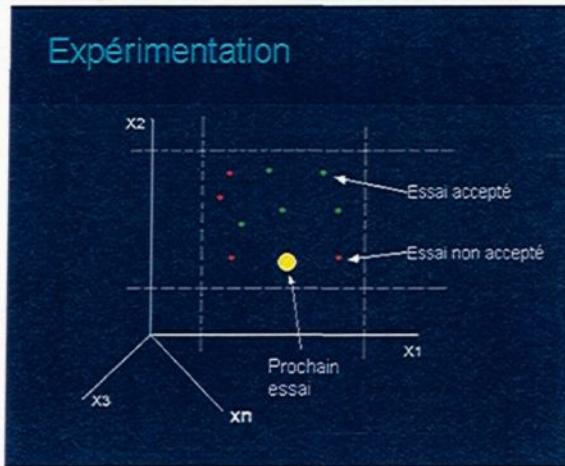


Figure 23 : Réalisation d'essais expérimentaux.

3.2.4 Construction d'un domaine opératoire

Le domaine opératoire est défini comme un volume multidimensionnel. Ce volume est défini de façon à discriminer le mieux possible les essais acceptés à l'intérieur du volume et les essais rejetés à l'extérieur. Ce volume est modélisé par un ellipsoïde multidimensionnel sculpté. La Figure 24 présente un schéma de la construction d'un domaine opératoire.

3.2.5 Modélisation du comportement d'un procédé

Les réponses continues sont modélisées à l'aide d'équations de régression polynomiales qui incluent des termes des premiers et seconds degrés ainsi que des termes d'interaction. Les modèles de régression permettent d'identifier les facteurs qui influent sur la valeur moyenne de chacune des réponses et sur leur dispersion. La

Figure 25 montre un schéma d'un modèle de régression dans le domaine opératoire.

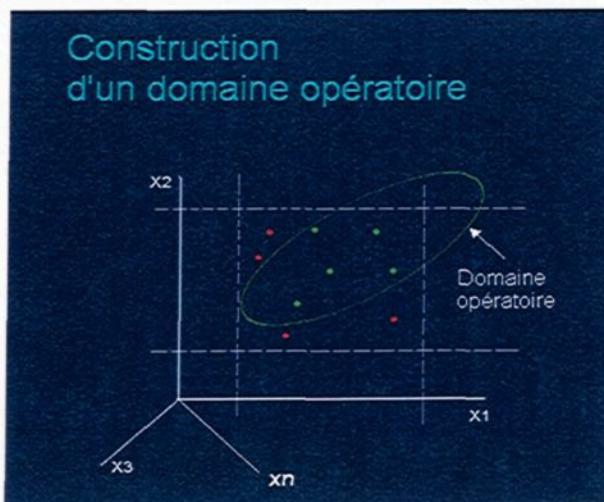


Figure 24 : Construction d'un domaine opératoire.

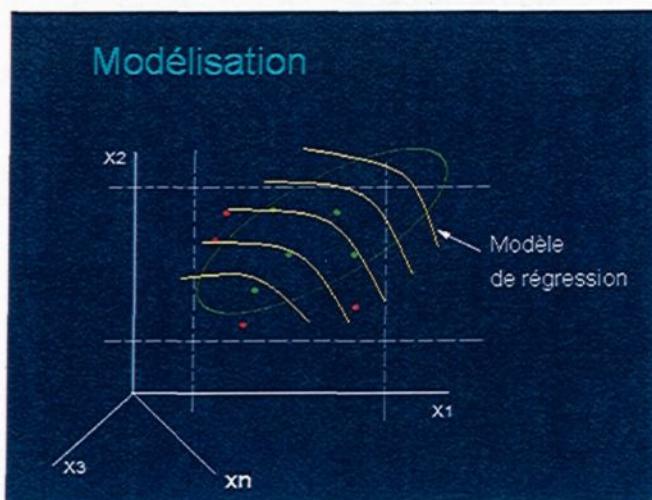


Figure 25 : Calcul de modèles.

3.2.6 Optimisation avec des critères conflictuels

Une fois la confiance dans les résultats établie à la suite d'une exploration d'un domaine opératoire, il est intéressant de chercher des conditions opératoires en tenant compte de plusieurs critères potentiellement conflictuels. La méthode E.M.Optimisation constitue alors un outil souple d'aide à la prise de décisions avec lequel on peut remettre en cause certains critères choisis ou en ajouter de nouveau, permettant ainsi de réduire les coûts. La Figure 26 présente un schéma de processus d'une optimisation [49].

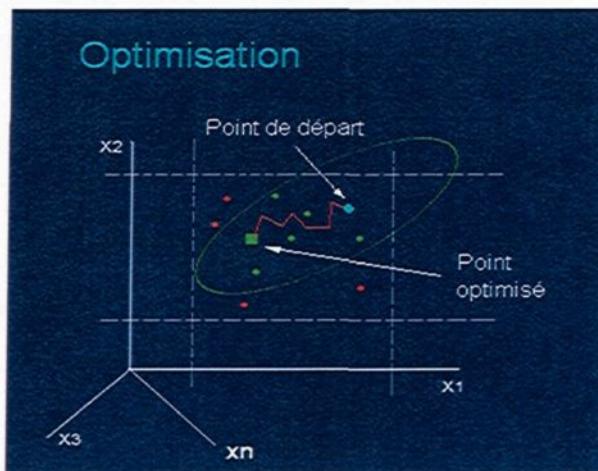


Figure 26 : Optimisation de paramètres.

3.2.7 Établissement de la fenêtre opératoire

La fenêtre opératoire est bâtie autour d'un point optimal. Sa taille à l'intérieur du domaine est définie avec un seul paramètre, les unités sur chaque axe étant déterminées par la tolérance estimée sur chacun des facteurs. La Figure 27 présente le schéma d'une fenêtre d'opération.

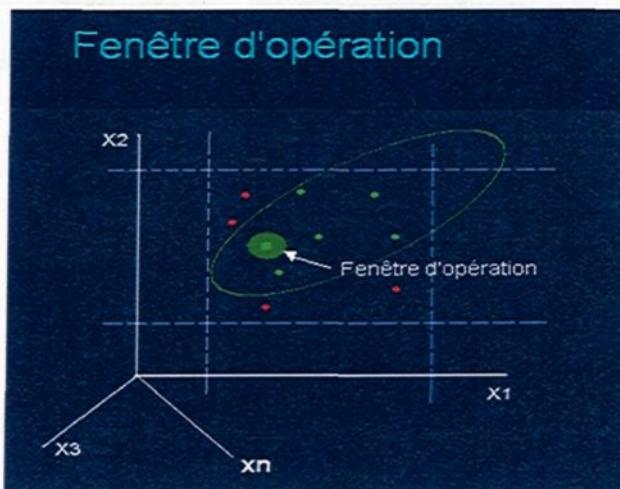


Figure 27 : Calcul d'une fenêtre d'opération.

3.3 Exemple d'optimisation avec E.M.Optimisation

Le moulage des alliages d'aluminium à l'état semi-solide est un domaine de recherche relativement récent. La méthode la plus répandue est de chauffer une billette cylindrique dans un four à induction jusqu'à l'état semi-solide et d'injecter la billette dans le moule quand la température désirée de la billette est atteinte et jugée uniforme. Le contrôle du chauffage de la billette est donc une étape critique dans la fabrication des pièces de haute qualité [50].

Plusieurs difficultés sont éprouvées dans l'optimisation du chauffage. D'abord, le chauffage se faisant par effet Joule grâce au champ électromagnétique créé par la bobine entourant la billette, des gradients de température radiaux et axiaux dans la billette (effet de peau et effet de bout respectivement) seront présents. Une attention particulière doit donc être portée sur l'uniformisation de la température [51]. Plusieurs paramètres du système de chauffage ont une influence

considérable sur le profil de température dans la billette tel que les caractéristiques électriques du système (source d'alimentation, fréquence), la géométrie de la bobine, la puissance en fonction du temps, la position de la billette et le contrôleur de température ou de puissance (type PID dans le cas présent. Un régulateur PID (pour « proportionnel intégral dérivé ») est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés.) [51,52].

L'uniformisation de la température se fait à la fin du chauffage par conduction thermique, lorsque la température désirée est atteinte à l'endroit le plus chaud de la billette. On effectue alors un maintien à température constante. Pour obtenir une température suffisamment homogène, un temps de maintien (uniformisation) minimum est nécessaire. Par contre, pour avoir une productivité élevée et limiter les modifications microstructures (croissance et agglomération des globules de phase primaire) et les ségrégations (écoulement et perte de métal), il faut avoir un temps de chauffage minimum. Le compromis suivant doit alors être fait : chercher à maximiser l'uniformité tout en limitant le temps de chauffage [53].

La Figure 28 présente l'effet de peau lors du chauffage par induction.

Une série d'essais a été effectuée en variant tous les paramètres de chauffage à chaque essai. Les résultats de chauffage ont été évalués sur plusieurs aspects comme la perte de métal, l'uniformité de la billette et la surchauffe. L'étude

a duré 4 jours et les résultats de cette étude nous ont permis d'établir une procédure de chauffage optimale.

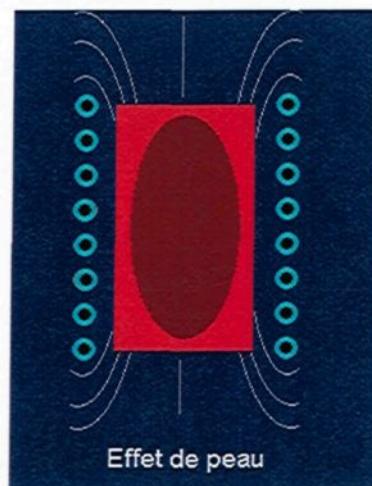


Figure 28 : Effet de peau lors du chauffage par induction

3.3.1 Paramètres du procédé de chauffage

Les neuf facteurs ou paramètres jugés importants pour cette étude sont les suivants :

- Température finale
- Constantes P, I et D du contrôleur ('P' pour proportionnelle, consigne proportionnelle à l'erreur ; 'I' comme intégrale, consigne évitant l'accumulation de l'erreur; 'D' pour dérivée, consigne permet d'anticiper et d'amortir le mouvement, en prenant en compte la variation de l'erreur au cours du temps.)
- Taux de chauffage en deuxième et en troisième étape
- Températures transitoires (consignes SP1 et SP2) entre la première et la deuxième étape et entre la deuxième et la troisième
- Position verticale de la billette dans la bobine.

La Figure 29 présente la courbe de chauffage et les paramètres utilisés dans cette étude.

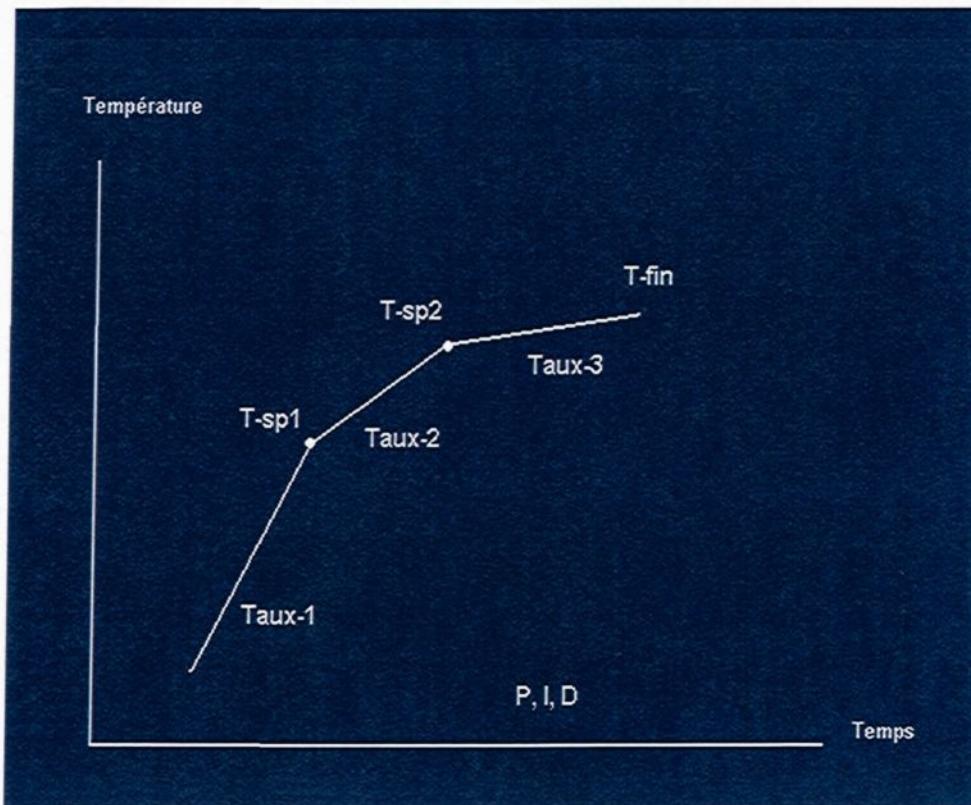


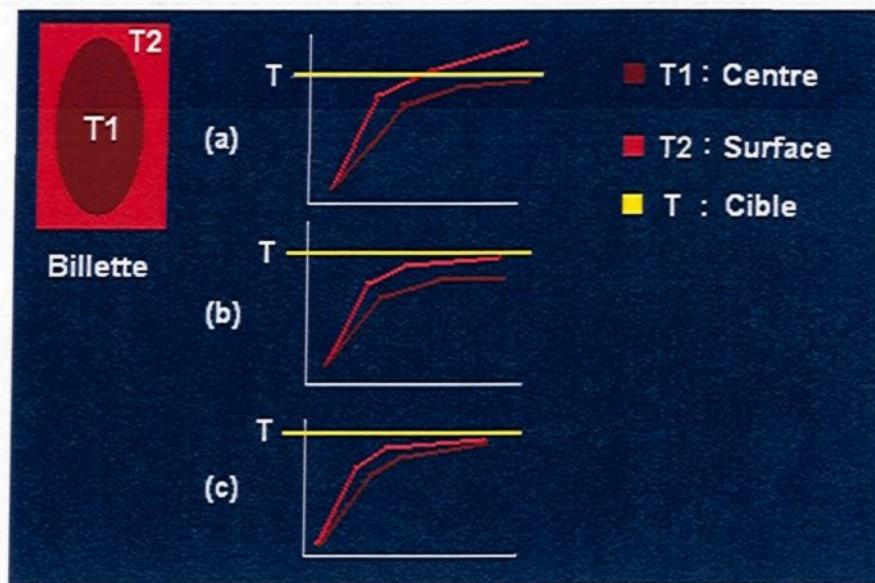
Figure 29 : Paramètre de l'étude.

3.3.2 Objectifs

Les critères et les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Uniformité de la température ou de la viscosité (à maximiser)
- Perte de métal due à la surchauffe de la billette (à minimiser)
- Surchauffe (à minimiser)
- Il existe 3 possibilités par rapport à la distribution de la température dans une billette.

La Figure 30 montre ces possibilités:⁸⁰



Le Tableau 6 présente les paramètres de base de l'étude.

Tableau 6 : Paramètres de base de l'étude.

Alliage d'aluminium	A356
Fréquence du courant	10 kHz
Dimension de la bobine	5 po ID – 8 po. L
Thermocouple	Type K, 12 po. L

3.3.3 Paramètres d'entrée et variables réponses

Les gammes de valeurs des variables sont présentées au Tableau 7.

Tableau 7 : Gammes de valeurs des variables.

<u>Paramètres : Variables</u>	<u>Contraintes</u>
A : Température finale	$575 < T_f < 590 \text{ } ^\circ\text{C}$
B : Constant P pour contrôleur PID	$1 < P < 100$
C : Constant I pour contrôleur PID	$1 < I < 200$
D : Constant D pour contrôleur PID	$1 < D < 200$
E : Taux de chauffage de la 2 ^e phase	$2 < T_2 < 15$
F : Taux de chauffage de la 3 ^e phase	$1 < T_3 < 4 \text{ } ^\circ\text{C/min.}$
G : Température de départ de la 2 ^e phase	$550 < SP_1 < 580 \text{ } ^\circ\text{C}$
H : Température de départ de la 3 ^e phase	$570 < SP_2 < 587 \text{ } ^\circ\text{C}$
I : Position de la billette	$-2.5 < P_o < 0 \text{ mm}$

<u>Paramètres : Réponses</u>	<u>Spécifications</u>
Temps de chauffage	$5 < T_{ch} < 15 \text{ min.}$
Perte du métal	$0 < \text{Perte} < 20\%$
Uniformité	$2.5 < U < 4$
Surchauffe	$0 < S < 3^\circ\text{C}$

3.3.4 Liste des essais expérimentaux

Le Tableau 8 fournit la liste des essais.

Tableau 8 : Liste des essais.

	T_SP	P_CTRL	I_CTRL	D_CTRL	RATE_2	RATE_3	SLOPE_1	SLOPE_2	OFFSET
1	580	3	10	1	7	2.0	565	575	-2.5
2	585	2	5	2	10	3.0	565	575	-2.5
3	587	1	1	5	9	4.0	572	578	-2.5
4	582	5	12	8	11	1.0	568	573	-2.5
5	590	10	20	10	2	4.0	550	577	-2.5
6	584	14	25	13	13	2.0	567	574	-2.5
7	583	2	13	14	14	3.0	559	573	-2.5
8	578	7	28	12	4	1.0	555	571	-2.5
9	585	9	15	10	10	1.0	560	580	-2.5
10	579	1	1	1	15	2.0	570	576	-2.5
11	589	53	77	92	8	3.0	561	579	-2.5
12	586	10	117	60	11	4.0	551	578	-2.5
13	584	18	23	6	9	1.0	561	575	-2.5
14	586	5	8	29	13	2.0	559	577	-2.5
15	584	6	12	9	8	1.0	559	575	-2.5
16	584	6	12	9	8	1.0	559	575	0.0
17	580	3	8	54	13	2.0	555	573	0.0
18	587	25	38	22	13	2.0	562	578	0.0
19	581	3	9	28	12	2.0	564	570	-2.5
20	582	4	16	34	13	1.0	562	575	-2.5
21	582	5	26	26	13	2.0	557	573	-2.5
22	583	18	28	2	12	1.0	571	573	-2.5
23	582	12	32	29	14	3.0	563	571	-2.1
24	582	7	17	13	12	1.0	565	577	-2.5
25	584	16	32	27	10	1.0	562	577	-1.9
26	584	7	22	27	12	3.0	558	575	-2.1
27	583	4	8	8	9	2.0	567	573	-1.9
28	590	10	15	8	10	2.0	568	582	-2.5
29	589	1	8	1	8	1.0	576	586	-2.5
30	583	13	23	9	11	1.0	565	576	-2.5

3.3.5 Modèle mathématique et optimisation

La Figure 32 montre le modèle mathématique du procédé. Les barres rouges représentent l'importance des prédicteurs sur la réponse surchauffe d'une billette. Le facteur D a un effet linéaire très significatif tandis que le facteur C (prédicteur CC) a un effet quadratique sur la réponse surchauffe. Nous pouvons aussi constater les erreurs de prédiction et les coefficients de chaque prédicteur.

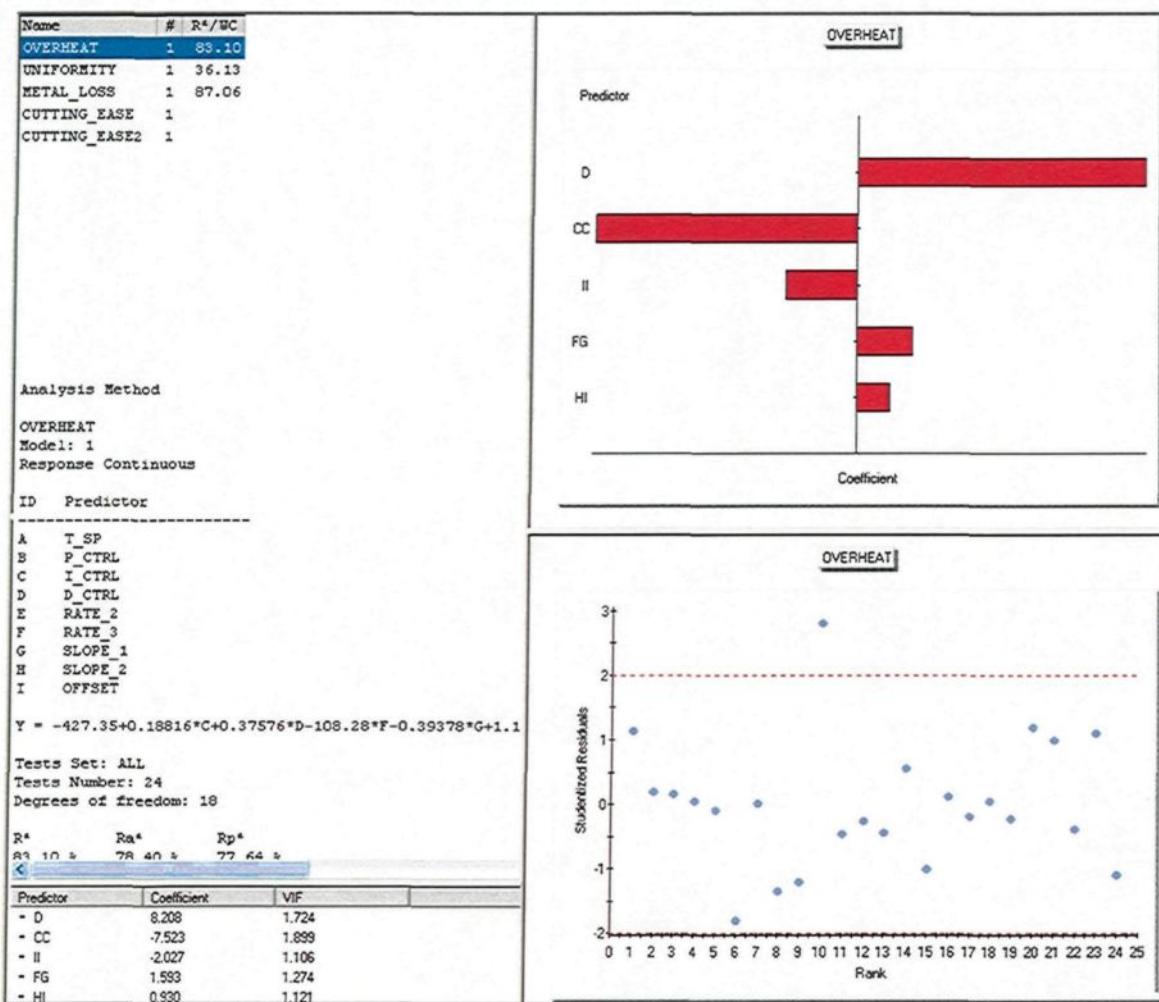


Figure 31 : Analyse et calcul du modèle mathématique dans le cas de surchauffe.

La Figure 32 présente la relation entre la masse du métal perdue et le taux de chauffage 3. La courbe a été obtenue au centre du domaine opératoire (domaine réalisable) où il donne les paramètres du procédé les plus robustes. Finalement, nous remarquons que plus le taux de chauffage est élevé, plus la masse perdue est faible. Cela signifie que le temps de chauffage est plus critique que la surchauffe de la billette sur la masse perdue. Plus le temps de chauffage est long, plus la masse perdue est élevée.

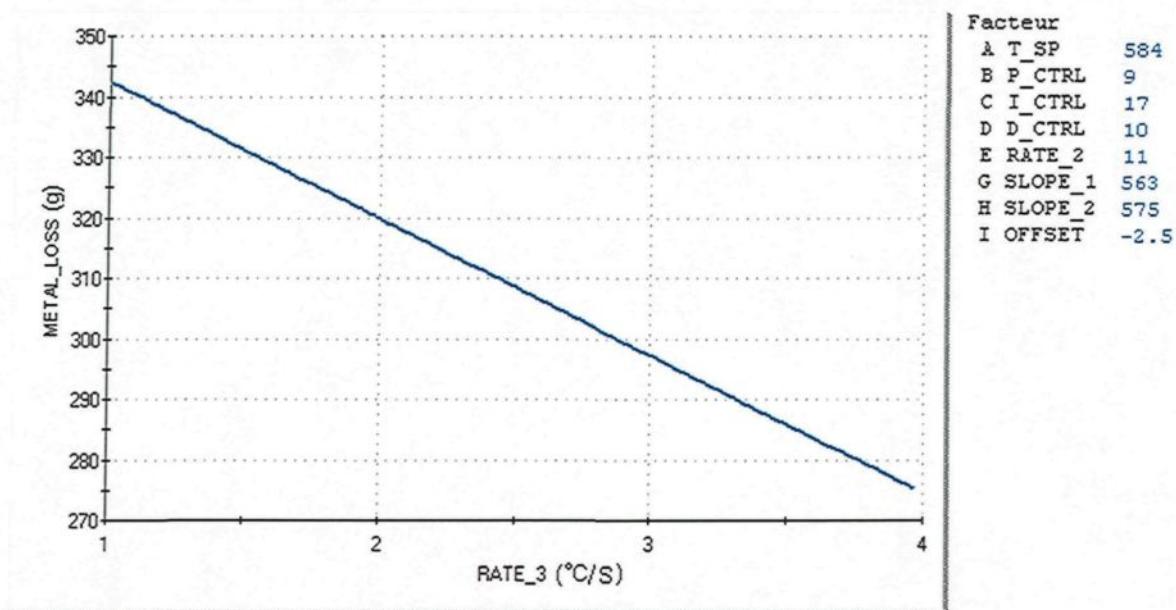


Figure 32 : Relation entre le taux de chauffage 3 et la masse du métal perdue.

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4: FABRICATION D'UN BRAS DE SUSPENSION

4.1 Propriétés mécaniques nécessaires

La Figure 33 illustre le processus de la conception du bras de contrôle de suspension basé sur l'analyse mécanique et la simulation numérique réalisée dans notre équipe de recherche. Les valeurs des propriétés mécaniques demandées selon les analyses mécaniques et la simulation numérique faites antérieurement sont les suivantes :

Résistance mécanique maximale : $R_m = 280 \text{ MPa}$;

Limite d'élasticité : $R_{p0.2} = 230 \text{ MPa}$;

Allongement : $e = 5\%$.

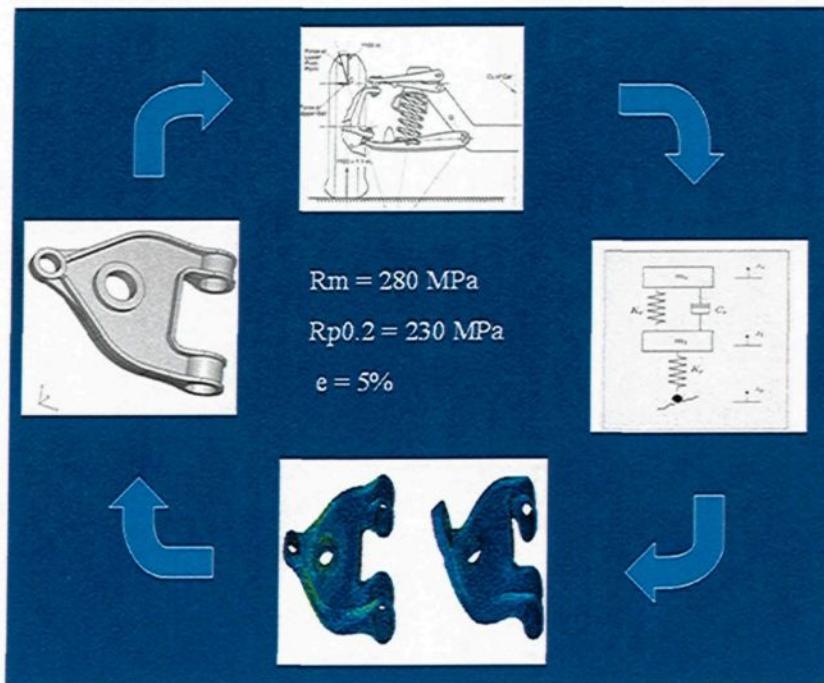


Figure 33 : Conception du bras de contrôle et propriétés mécaniques nécessaires.

4.2 Fabrication du bras de contrôle par moulage semi-solide

Nous allons étudier la fabrication du bras de contrôle de suspension par moulage semi-solide en utilisant l'alliage d'aluminium A356. L'alliage A356 est un alliage couramment utilisé dans le moulage des pièces d'aluminium pour de différents types d'applications. Il possède une très bonne moulabilité et des bonnes propriétés mécaniques. Nous cherchons à comprendre ce nouveau procédé ainsi qu'à évaluer sa performance. Les conditions opératoires du procédé doivent être optimisées pour obtenir la meilleure qualité de la pièce. Les paramètres obtenus devraient satisfaire les propriétés mécaniques exigées lors de la conception du bras [54].

Des défauts de moulage peuvent toujours apparaître dans le procédé de moulage semi-solide dus à plusieurs facteurs, dont ceux de paramètres opératoires du procédé. Ces défauts peuvent affaiblir considérablement les propriétés mécaniques des pièces [55]. Nous devons comprendre et maîtriser le procédé, identifier les causes et les défauts et trouver des solutions. Pour cela, nous pouvons faire appel à des méthodes d'ingénierie ou à l'analyse statistique. La méthode de plan d'expérience est un de ces outils couramment utilisés dans l'industrie ou dans des recherches. La méthode de plan d'expérience peut nous aider à évaluer la performance d'un procédé et à optimiser les paramètres opératoires. Elle peut aussi être utilisée pour augmenter la productivité et réduire le coût de fabrication. La Figure 34 illustre des photos microscopiques des défauts de

qualité dans des pièces moulées comme des porosités, des fissures et des inclusions.

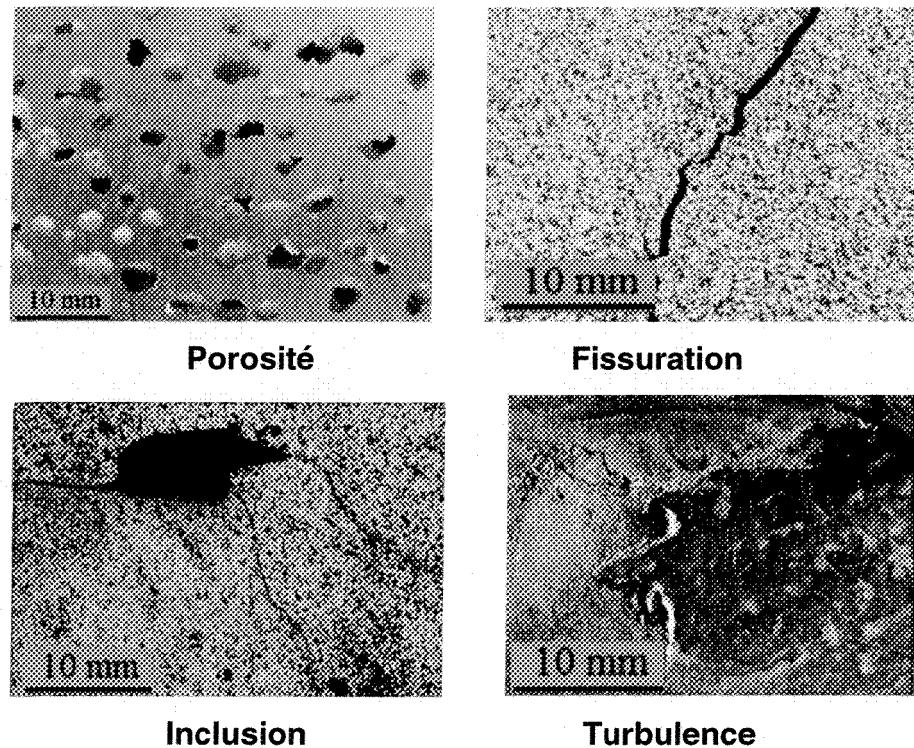


Figure 34 : Exemples de défauts de moulage dans des pièces moulées.

4.3 Procédure

Pour évaluer les propriétés mécaniques, des éprouvettes de traction sont utilisées (Figure 35). Le choix d'essais est réalisé à l'aide du logiciel E.M.Optimisation. Une fois le procédé optimisé, les propriétés mécaniques des éprouvettes moulées doivent atteindre ou dépasser les valeurs demandées lors de la conception de pièces. De plus, les valeurs réelles obtenues vont être comparées

avec les valeurs prédites à partir des modèles de régression établis par le logiciel E.M.Optimisation.

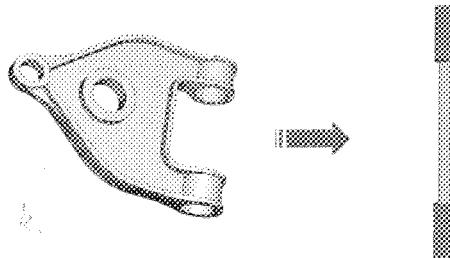


Figure 35 : Utilisation d'une éprouvette de traction.

4.4 Paramètres à étudier

Les paramètres de moulage tels que la vitesse de remplissage, la pression d'intensification, etc. influençant le mode du remplissage du moule, peuvent avoir des effets plus ou moins significatifs sur les propriétés mécaniques. De bons paramètres favorisent un remplissage régulier du métal afin d'éviter la turbulence et de diminuer ou d'éliminer des porosités et des inclusions dans les pièces.

Il existe aussi une interaction parmi les paramètres opératoires. Par exemple, lorsque la viscosité du métal est faible, la vitesse d'injection doit être réduite pour éviter la turbulence. En moulage semi-solide, les paramètres impliqués dans le procédé sont nombreux et les analyses d'échantillons sont coûteuses et longues. Donc, nous avons un grand intérêt à étudier ces effets interactifs et de réduire le nombre d'essais à réaliser. L'optimisation à l'aide d'une méthode de plan d'expérience est un outil efficace pour répondre à ces exigences.

La Figure 36 fournit un schéma montrant la formation de certains défauts de moulage, dus à la turbulence du métal lors des injections dans une cavité cylindrique qui représente la partie efficace d'une éprouvette.

Le mode d'écoulement du métal est très important pour éviter la turbulence. Le schéma présente 4 modes typiques d'écoulement dans un moule. Ces modes sont affectés par des paramètres de moulage, tels que la vitesse, la viscosité et le temps d'injection, etc. Avec une vitesse d'injection trop rapide ou une viscosité trop faible du métal semi-solide, des agitations auront lieu qui feront des emprisonnements de gaz et de contaminant dans les pièces moulées. La pression de pré-compactage et de compactage doivent être appliquée avant la solidification totale du métal. À cet égard, un compromis entre la vitesse et le temps d'injection doit être fait. Une vitesse d'injection faible diminue la turbulence, mais cela prolonge le temps d'injection et ainsi, réduit significativement l'efficacité de la pression de compactage. La Figure 37 illustre le schéma de 4 modes d'écoulement de métal semi-solide dans une cavité cylindrique et la formation de certains défauts de qualité.

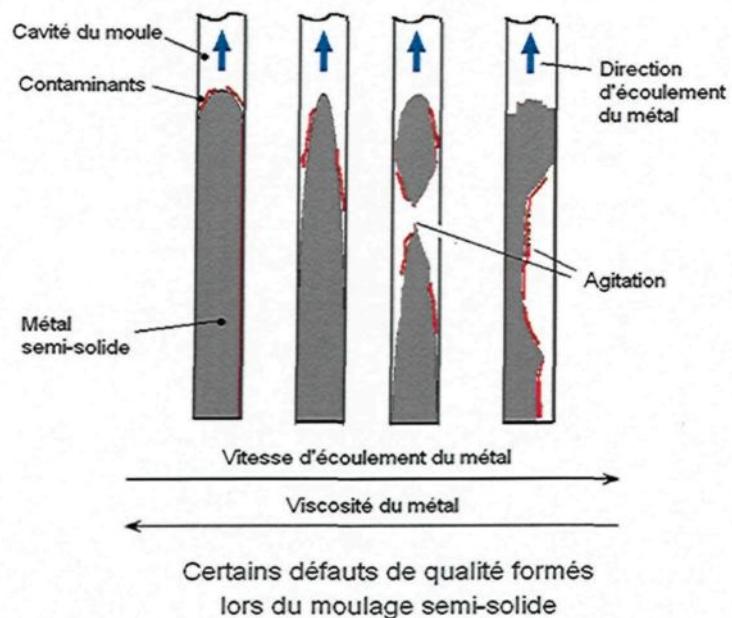


Figure 36 : Schéma sur l'écoulement du métal dans une cavité cylindrique du moule.

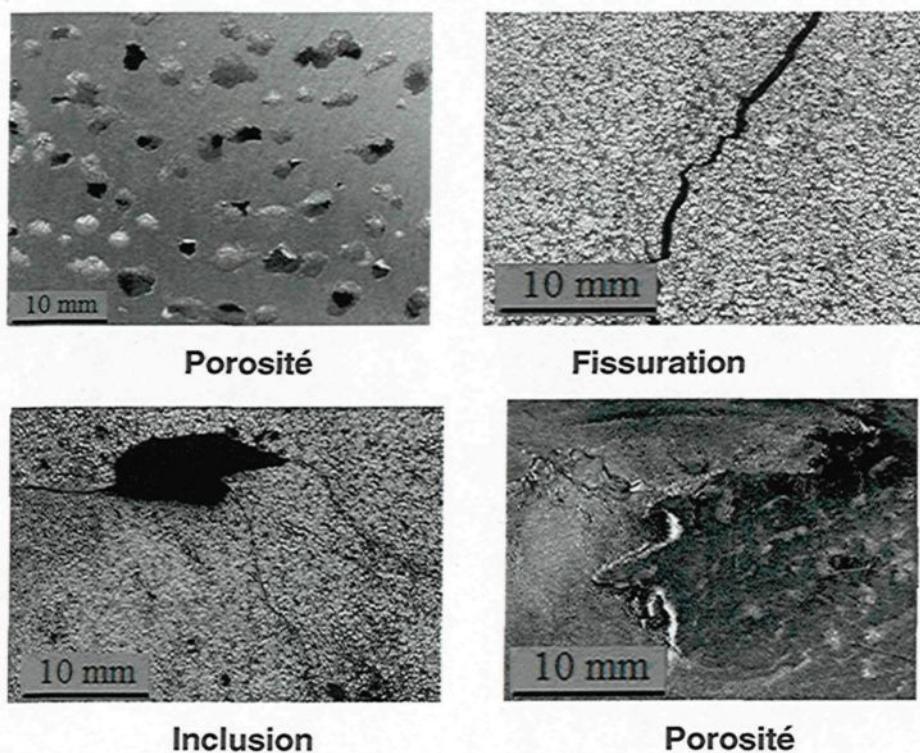


Figure 37 : Exemples de défauts de qualité dans des pièces moulées.

Dans le procédé de moulage semi-solide, les facteurs les plus importants sont les suivants : profil de vitesse et de pression d'injection. La Figure 38 représente les courbes de vitesse et de pression ainsi que des paramètres contrôlables (facteurs) [57].

La procédure de moulage semi-solide se réalise en deux phases (voir la Figure 38) : injection et compactage. Lors d'une injection, le métal semi-solide est injecté dans le moule de l'éprouvette avec une vitesse prédéfinie VS_INJC. Lorsque la cavité est presque remplie, la vitesse diminue à la vitesse ralentie VS_FREIN à partir d'un point de transition P_FREIN : point de freinage. Une fois la cavité remplie en entier, la pression de pré-compactage PRE_1 est appliquée jusqu'à la formation d'une couche de solidification autour d'une pièce moulée. Ensuite, la pression finale PRE_2 est appliquée pour compacter les porosités. La durée de la pression de pré compactage est le délai 1 DL_1. Le temps nécessaire pour la pression passe de la pression de pré-compactage à celle de compactage est le délai 2 DL_2. Dans la Figure 38, les courbes de vitesse et de pression sont présentées.

La formulation du problème est présentée à la figure 39. Le côté droit présente les paramètres contrôlables de moulage : les facteurs, et le côté gauche, en rouge, les réponses-mesures représentant la qualité des éprouvettes moulées, telles que les propriétés mécaniques obtenues. Les réponses sont influencées par les paramètres contrôlables.

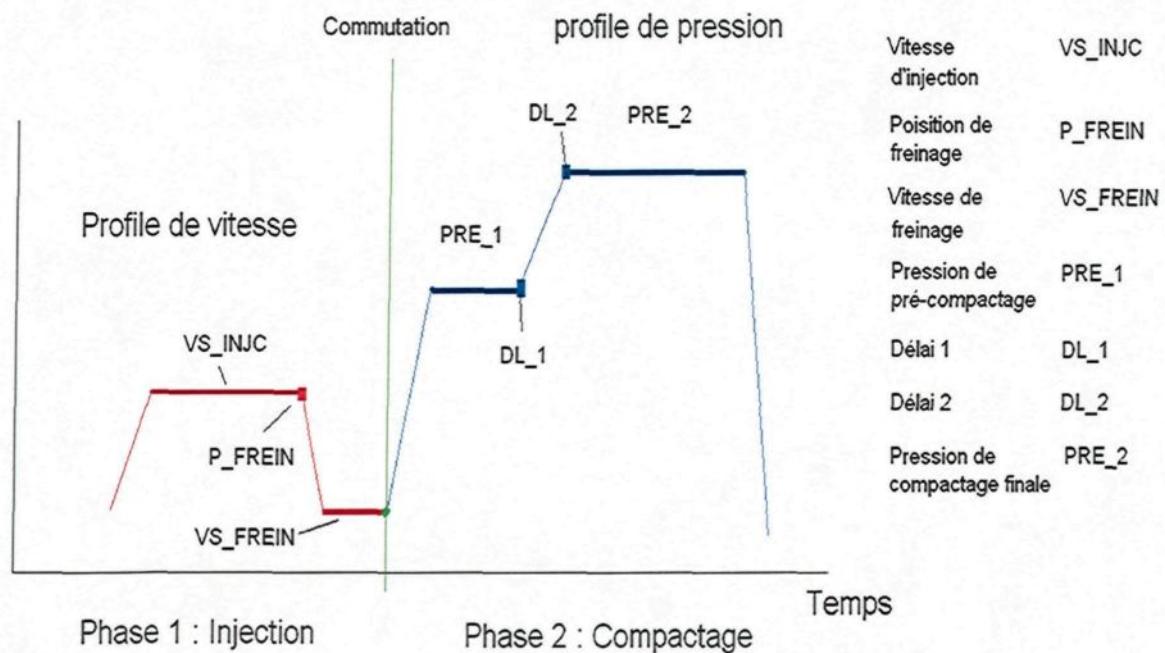


Figure 38 : Courbes de vitesse et de pression.

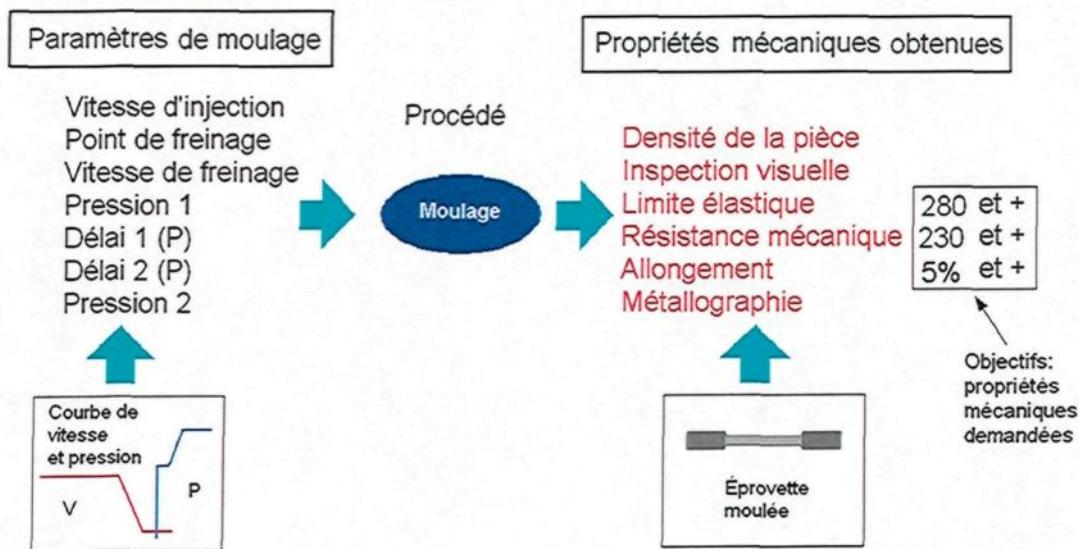


Figure 39 : Schéma des causes et effets.

Dans cette présente étude, 17 paramètres sont étudiés. Le Tableau 9 fournit la liste de ces paramètres.

Tableau 9 : Liste des paramètres et leur type.

- Vitesse d'injection : facteur, contrôlable
- Point de freinage : facteur, contrôlable
- Vitesse de freinage : facteur, contrôlable
- Pression 1 : facteur, contrôlable
- Délai 1 : facteur, contrôlable
- Délai 2 : facteur, contrôlable
- Pression finale : facteur, contrôlable
- Résistance mécanique : réponse, mesurable
- Limite d'élasticité : réponse, mesurable
- Allongement : réponse, mesurable
- Masse du métal injecté : secondaire, mesurable
- Course d'injection : secondaire, mesurable
- Temps total d'injection : secondaire, mesurable
- Temps de phase 1 : secondaire, mesurable
- Masse de masselotte : secondaire, mesurable
- Surpression : secondaire, mesurable
- Densité : secondaire, mesurable

Le traitement thermique est un élément important pour augmenter certaines propriétés mécaniques d'une pièce métallique. Cela est indispensable pour des pièces de structure en alliage d'aluminium. Les éprouvettes sont séparées en deux groupes : le premier groupe va subir un traitement thermique et l'autre sans traitement thermique. Les pièces sans traitement thermique se servent comme référence de base.

CHAPITRE 5

CHAPITRE 5: MODÉLISATION ET OPTIMISATION

Les réponses continues du procédé sont modélisées à l'aide d'équations de régression polynomiales qui incluent des termes des premiers et seconds degrés ainsi que de termes d'interaction. Les modèles de régression permettent d'identifier les facteurs qui influent sur la valeur moyenne de chacune des réponses et sur leur dispersion. La modélisation du procédé permet de transformer les données en information pertinente sur le procédé. Des modèles de régression sont calculés basés sur les essais réalisés. Les modèles ont été créés pour établir la relation entre les paramètres contrôlables, secondaires et les réponses. Ils ont aussi été créés pour déterminer les paramètres les plus influents et quantifier leurs effets sur les propriétés mécaniques.

Une fois la confiance dans les résultats établie à la suite d'une exploration d'un domaine opératoire, il est intéressant de chercher des conditions opératoires en tenant compte de plusieurs critères potentiellement conflictuels. La méthode E.M.Optimisation constitue alors un outil souple d'aide à la prise de décisions avec lequel on peut remettre en cause certains critères choisis ou en ajouter de nouveau, permettant ainsi de réduire les coûts. L'optimisation du procédé permet d'ajuster le procédé d'après l'indicateur de « désirabilité » qui tient compte de critères techniques, économiques et de qualité. Il est possible d'examiner les

différents scénarios d'optimisation, de rechercher les meilleures conditions opératoires ou la meilleure recette ainsi qu'élaborer une fenêtre opératoire pour une variation acceptable.

5.1 Paramètres de moulage (facteurs) et propriétés mécaniques (qualité)

Il y a au total 17 paramètres dans l'étude, dont 7 paramètres contrôlables (facteurs), 3 réponses sur les propriétés mécaniques et 7 paramètres secondaires. Les paramètres secondaires sont incontrôlables qui donnent une influence ou un indice indirect sur les propriétés mécaniques. Le Tableau 10 présente la liste de ces paramètres et leurs abréviations.

Tableau 10 : Liste des paramètres et leur abréviation.

	Paramètres	Type	Abréviation
A	Vitesse d'injection	facteur, contrôlable	VS_INJC (VS)
B	Point de freinage	facteur, contrôlable	P_FREIN
C	Vitesse de freinage	facteur, contrôlable	VS_FREIN
D	Pression 1	facteur, contrôlable	PRE_1
E	Délai 1	facteur, contrôlable	DL_1
F	Délai 2	facteur, contrôlable	DL_2
G	Pression finale	facteur, contrôlable	PRE_2
1	Résistance mécanique	réponse, mesurable	RM
2	Limite d'élasticité	réponse, mesurable	RE
3	Allongement	réponse, mesurable	ALLONG (A%)
4	Masse du métal injecté	secondaire, mesurable	MS_PIECE
5	Course d'injection	secondaire, mesurable	L_FIN
6	Temps total d'injection	secondaire, mesurable	TS_INJC
7	Temps de phase 1	secondaire, mesurable	TS_REMP
8	Masse de masselette	secondaire, mesurable	MS_TALON
9	Surpression	secondaire, mesurable	PRE_MAX
10	Densité	secondaire, mesurable	DENSIT

5.2 Domaine opératoire (réalisable)

La Figure 40 représente le domaine opératoire du procédé dans le plan des axes 2 et 3 du domaine. D'après les spécifications, les points d'essais sont distribués de façon uniforme dans le domaine, dont 14 ont été jugés bons (en bleu de forme carré) et 16 mauvais (en rouge de forme triangulaire).

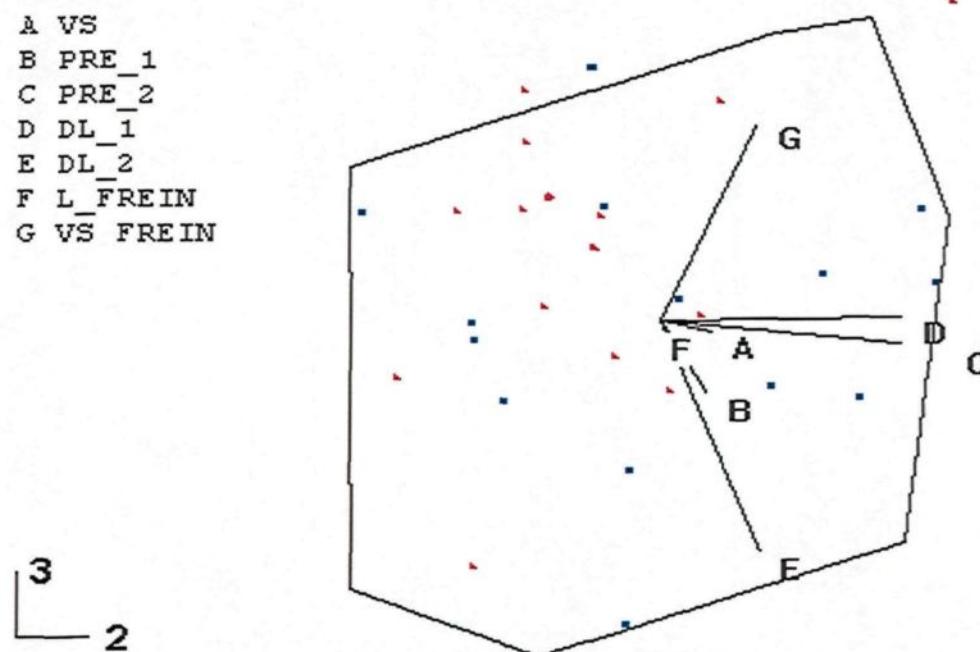


Figure 40 : Domaine opératoire.

La Figure 41 montre la distribution des valeurs d'essais sur chaque paramètre entre les valeurs minimales et maximales des spécifications. Elles sont uniformes. Ceci assure une robustesse des modèles de régression établis à partir de ces essais.

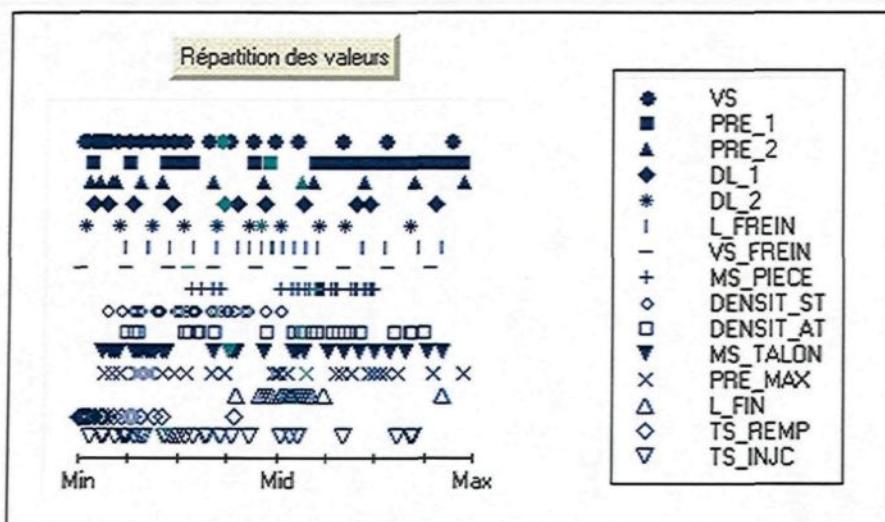


Figure 41 : Distribution des valeurs sur chaque paramètre.

5.3 Modèles de régression

Les paragraphes suivants présentent les modèles de régression calculés basés sur les essais réalisés. Les modèles ont été créés pour établir la relation entre les paramètres contrôlables, secondaires et les réponses. Ils ont aussi été créés pour déterminer les paramètres les plus influents et quantifier leurs effets sur les propriétés mécaniques. Dans les figures suivantes, les barres bleues représentent le niveau d'influence de chaque prédicteur sur les propriétés mécaniques.

5.3.1 Résistance maximale à la rupture sans traitement thermique

L'équation pour calculer la résistance mécanique RM_ST d'après le modèle de régression est la suivante :

$$RM_ST = -3978 + 24A + 459D - 2567E - 297G + 19M - 41O - 0.021M^2M + 6796EG + 928EO$$

La Figure 42 présente les paramètres plus influents sur la résistance mécanique RM_ST. Nous constatons que la vitesse et la course d'injection VS_INJC et le délai DL_1 ont une influence plus importante sur RM_ST. Lorsque la vitesse d'injection VS_INJC et le délai DL_1 augmentent, la résistance mécanique RM_ST augmente aussi. En plus, il y a une interaction entre le délai 2 DL_2 et la vitesse de freinage VS_FREIN ainsi qu'entre le délai DL_2 et le temps d'injection TS_INJC.

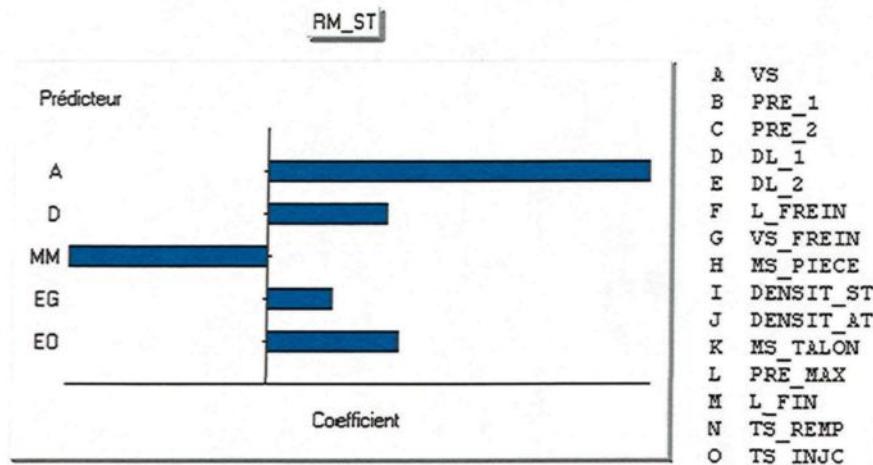


Figure 42 : Facteurs influents sur RM_ST et leurs tendances.

La Figure 43 donne les courbes de niveau de la résistance mécanique RM_ST dans le domaine opératoire. Les axes 1 et 2 sont les deux axes principaux de l'ellipsoïde qui représente le domaine opératoire. De gauche à droite, la valeur de RM_ST passe de 210 à 250 MPa.

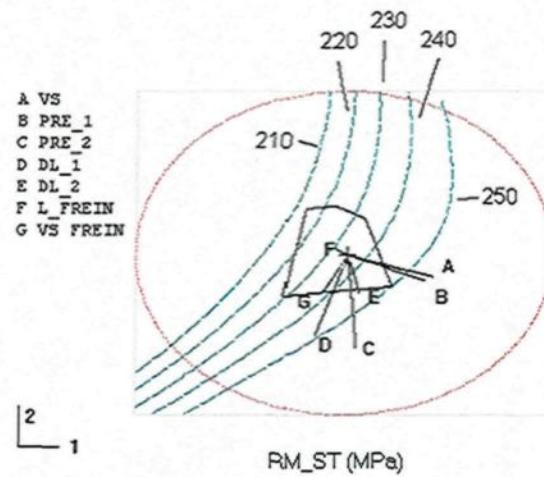


Figure 43 : Courbes de niveau sur RM_ST.

Les figures suivantes présentent la relation entre les paramètres de moulage et la résistance mécanique RM_ST sans traitement thermique. Les paramètres non signifiants sur RM_ST ne sont pas présentés.

La Figure 44 présente la relation entre la résistance mécanique RM_ST et la vitesse d'injection VS_INJC. L'effet suivant est observé : lorsque VS_INJC augmente, RM_ST augmente aussi. L'augmentation de la vitesse d'injection VS_INJC diminue le temps de remplissage. Cela signifie qu'à la fin du remplissage, le métal injecté conserve une fraction du liquide plus élevée qui favorise la compensation des retassures lors de l'intensification. La diminution des retassures augmente la résistance mécanique RM_ST.

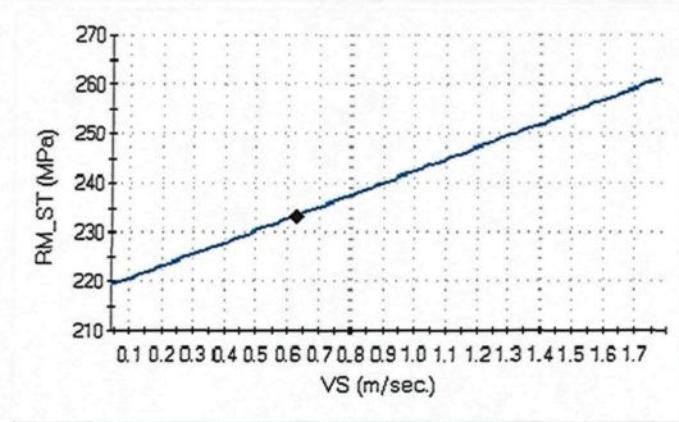


Figure 44 : RM_ST en fonction de la vitesse d'injection VS_INJC(VS).

La Figure 45 montre la relation entre RM_ST et le délai DL_1. L'effet suivant est observé : lorsque DL_1 augmente, RM_ST augmente aussi. Le délai 1 sur la pression DL_1 aide à stabiliser le processus d'intensification qui rend l'intensification plus efficace. Cela favorise l'augmentation de la résistance RM_ST.

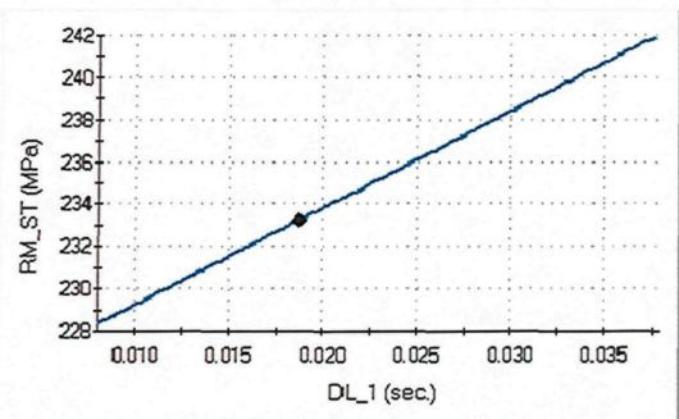


Figure 45 : RM_ST en fonction du délai DL_1.

La Figure 46 montre la relation entre RM_ST et le délai DL_2. L'effet suivant est observé : lorsque le délai DL_2 augmente, la résistance mécanique RM_ST diminue.

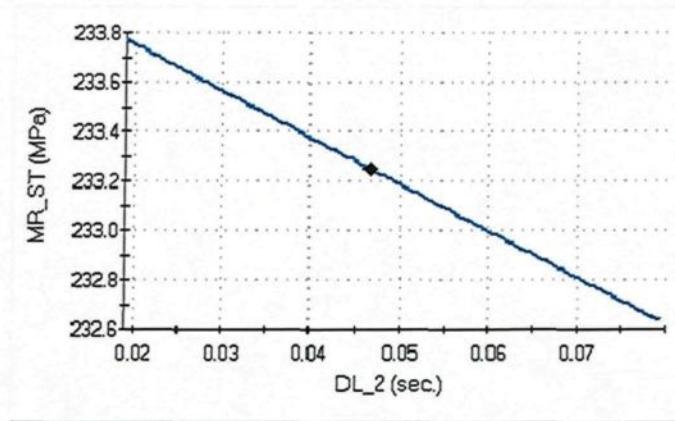


Figure 46 : RM_ST en fonction du délai DL_2.

La Figure 47 présente la relation entre RM_ST (MPa) et la vitesse de freinage VS_FREIN. Lorsque la vitesse de freinage VS_FREIN augmente, la résistance mécanique RM_ST augmente aussi.

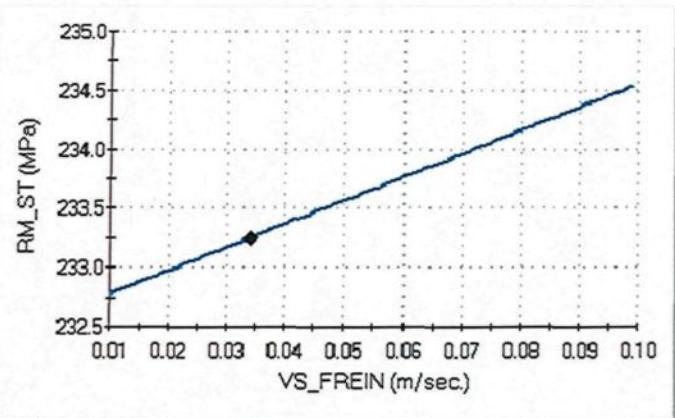


Figure 47 : RM_ST en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.

La Figure 48 montre la relation entre RM_ST et la course d'injection L_FIN. L'effet suivant est observé : lorsque la course d'injection L_FIN augmente, la résistance mécanique RM_ST augmente et elle diminue par la suite. À 455 mm de la course, la valeur de la résistance mécanique RM_ST est la plus élevée.

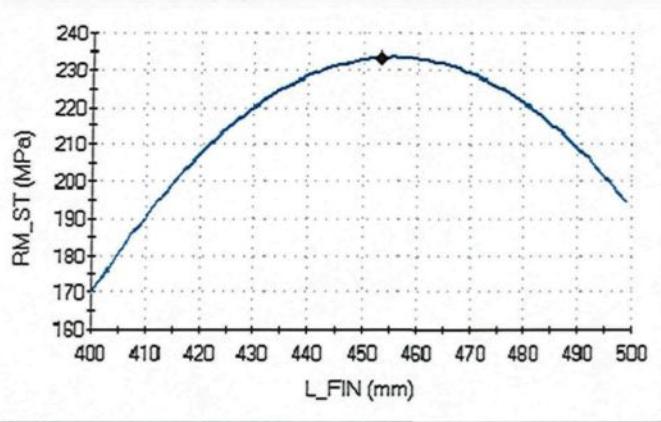


Figure 48 : RM_ST en fonction de la course de remplissage L_FIN.

La relation entre RM_ST (MPa) et le temps d'injection TS_INJC est présentée à la Figure 49. L'effet suivant est observé : lorsque le temps d'injection TS_INJC augmente, la résistance mécanique RM_ST augmente aussi.

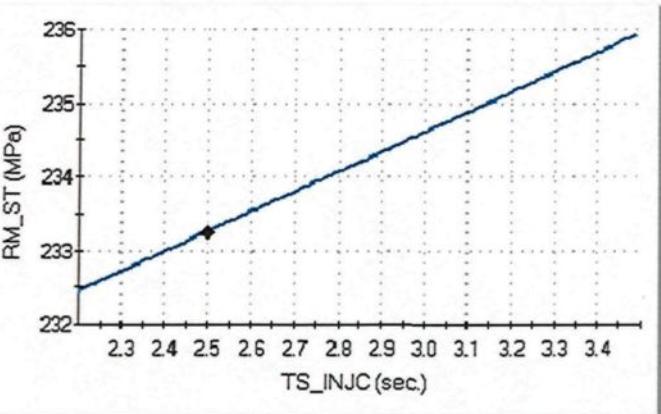


Figure 49 : RM_ST en fonction du temps d'injection TS_INJC.

5.3.2 Résistance maximale à la rupture après traitement thermique

L'équation pour calculer RM_AT d'après le modèle établi est la suivante :

$$RM_{AT} = 75 - 0.784B + 1144E + 944G + 148J + 0.000658B^2 - 22072EG$$

La Figure 50 donne les paramètres les plus influents sur RM_AT. Nous pouvons voir que la densité après le traitement thermique DENSIT_AT, le délai DL_2 et la pression PRE_1 ont une influence importante sur la résistance mécanique après le traitement thermique RM_AT. De plus, il y a une forte interaction entre le délai DL_2 et la vitesse de freinage VS_FREIN.

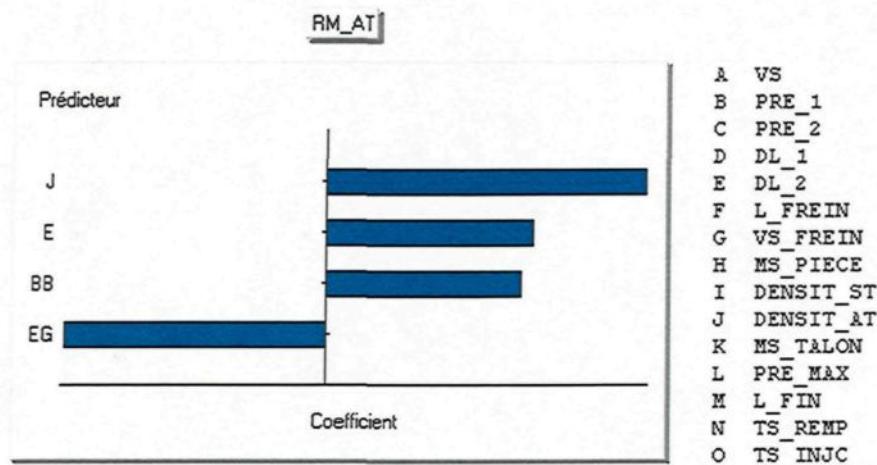


Figure 50 : Facteurs influents sur RM_AT et leurs tendances.

La Figure 51 illustre les courbes de niveau (iso réponse) du RM_AT dans le domaine opératoire. De l'extérieur vers le centre, la valeur de RM_AT passe de 315 à 285 MPa.

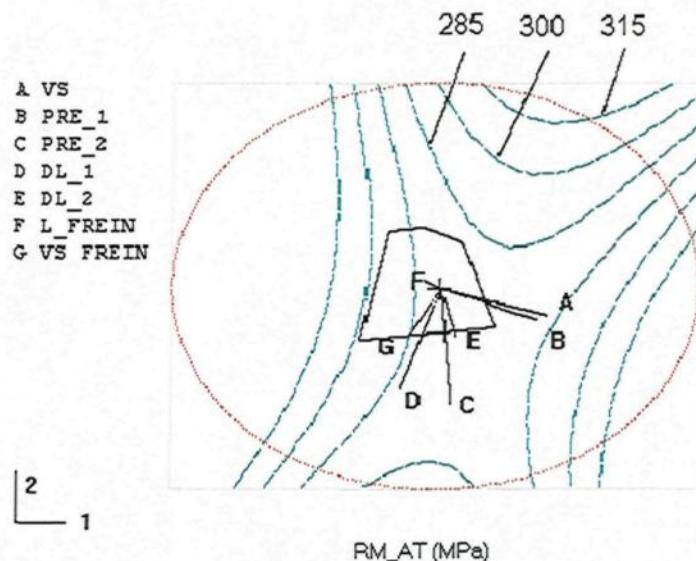


Figure 51 : Courbe de niveau sur RM_AT.

Les figures suivantes présentent la relation entre les paramètres de moulage et la résistance mécanique RM_AT avec le traitement thermique. Les paramètres non significants sur RM_AT ne sont pas présentés.

La Figure 52 montre la relation entre la résistance mécanique après le traitement thermique RM_AT et la pression PRE_1. L'effet suivant est observé : lorsque PRE_1 augmente, RM_AT diminue d'abord et augmente par la suite. À 595 bars de la pression PRE_1, la valeur de la résistance mécanique RM_AT est la plus faible.

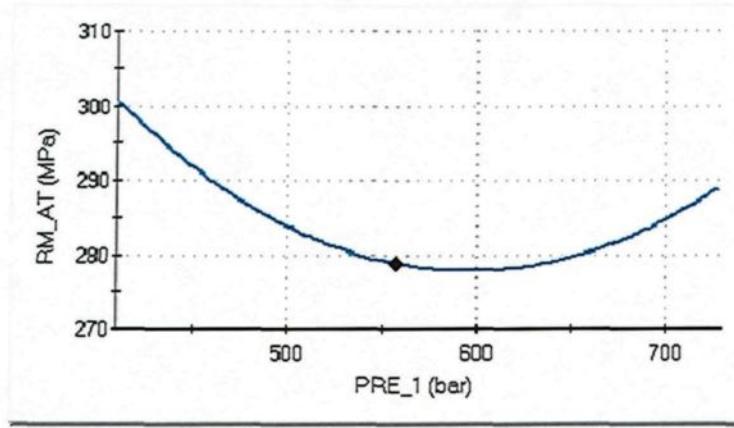


Figure 52 : RM_AT en fonction de la pression PRE_1.

La relation entre la résistance mécanique après le traitement thermique RM_AT (MPa) et le délai DL_2 est montrée à la Figure 53. L'effet suivant est observé : lorsque DL_2 augmente, RM_AT augmente aussi.

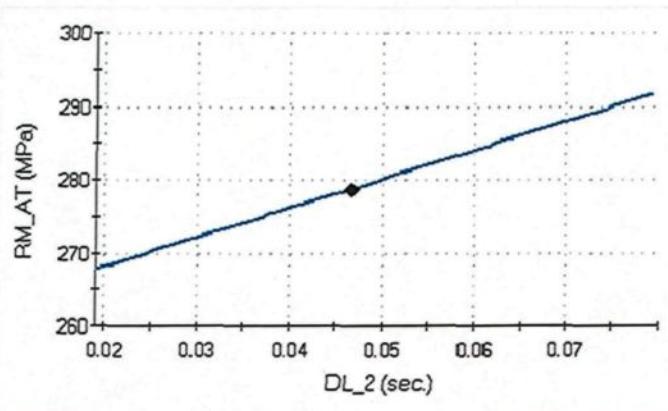


Figure 53 : RM_AT en fonction du délai DL_2.

La Figure 54 présente la relation entre RM_AT (MPa) et la vitesse de freinage VS_FREIN. L'effet suivant est observé : lorsque la vitesse de freinage VS_FREIN augmente, la résistance mécanique RM_AT diminue.

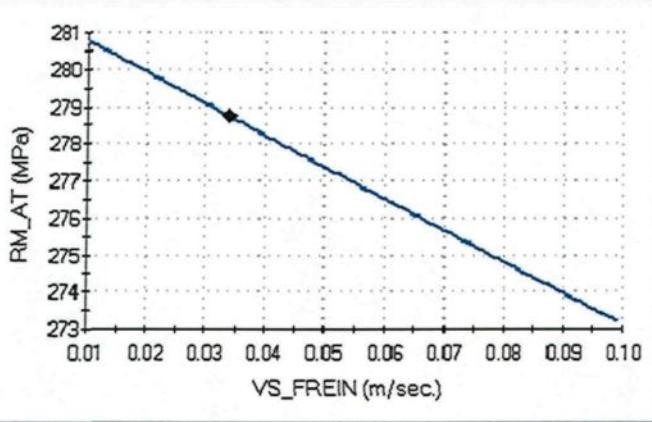


Figure 54 : RM_AT en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.

La Figure 55 illustre la relation entre RM_AT (MPa) et la DENSIT_AT. La Figure 56 présente l'effet interactif entre DL_2 RM_AT et VS_FREIN sur RM_AT. L'effet suivant est observé : lorsque la densité DENSIT_AT augmente, la résistance mécanique après le traitement thermique RM_AT augmente aussi.

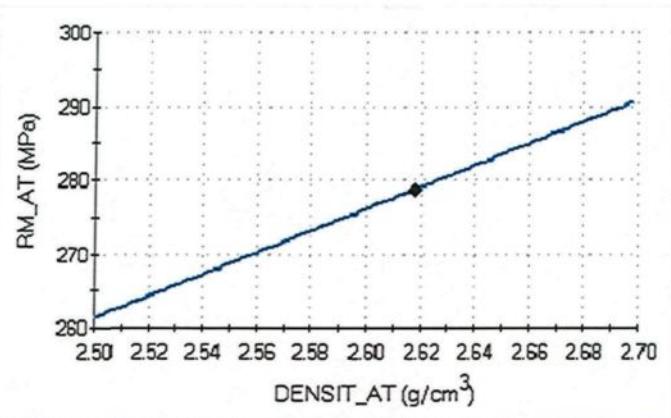


Figure 55 : RM_AT en fonction de DENSIT_AT.

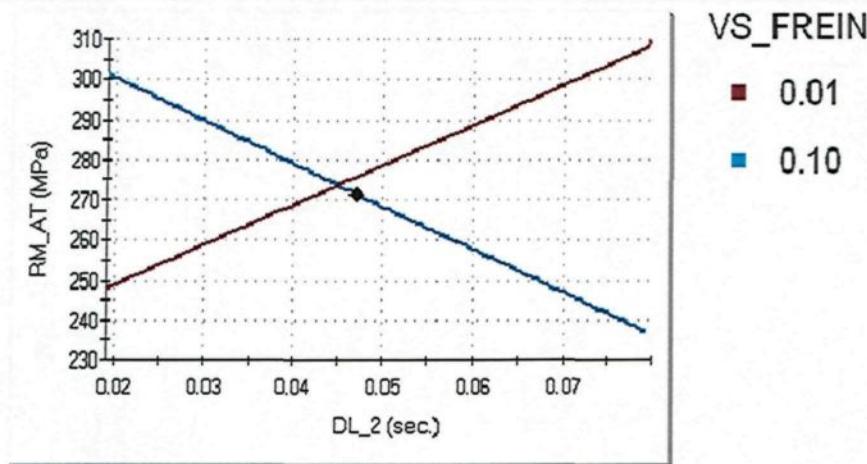


Figure 56 : Effet interactif entre DL_2 RM_AT et VS_FREIN sur RM_AT.

5.3.3 Limite d'élasticité sans traitement thermique

L'équation pour calculer RE_ST d'après le modèle établi est la suivante :

$$RE_{ST} = 342 + 0.013B - 176G - 0.38L - 37.48N + 0.00017LL$$

La Figure 57 présente les paramètres les plus influents sur RE_ST. Nous constatons que le temps de remplissage et la vitesse de freinage ont une influence plus importante sur la limite d'élasticité RE_ST.

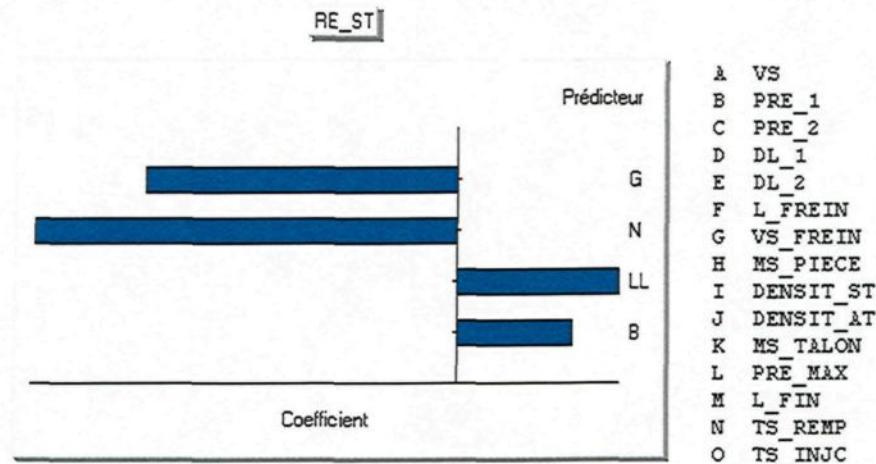


Figure 57 : Facteurs influents sur RE_ST et leurs tendances.

La Figure 58 présente les courbes de niveau du RE_ST dans le domaine opératoire. De gauche à droite, la valeur de RE_ST passe de 110 à 130 MPa.

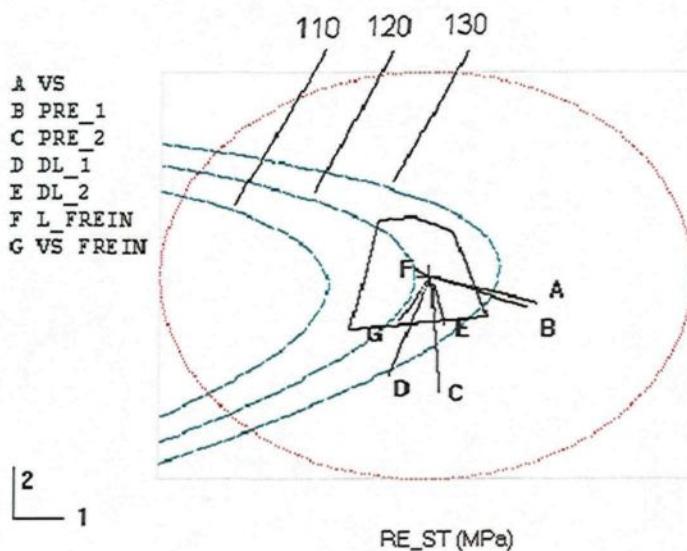


Figure 58 : Courbe de niveau sur RE_ST.

Les figures suivantes présentent la relation entre des paramètres de moulage et la résistance mécanique sans traitement thermique RE_ST. Les paramètres non signifiants sur RE_ST ne sont pas présentés.

La Figure 59 présente la relation entre RE_ST (MPa) et la pression PRE_1. L'effet suivant est observé : lorsque la pression PRE_1 augmente, la limite d'élasticité RE_ST augmente aussi.

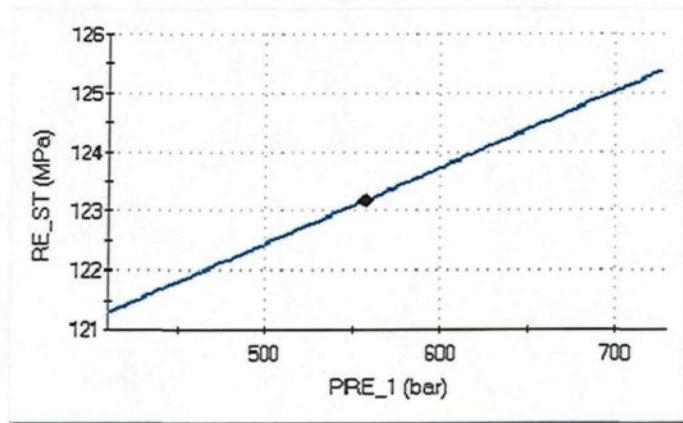


Figure 59 : RE_ST en fonction de la pression PRE_1.

La Figure 60 présente la relation entre RE_ST (MPa) et la vitesse de freinage VS_FREIN. L'effet suivant est observé : lorsque la vitesse de freinage VS_FREIN augmente, la limite d'élasticité RE_ST diminue.

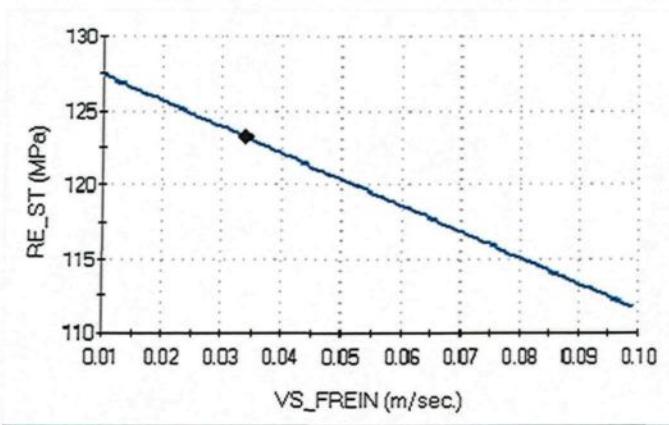


Figure 60 : RE_ST en fonction de la vitesse de freinage VS_FREIN.

La Figure 61 montre la relation entre RE_ST et le temps de remplissage TS_REMP. L'effet suivant est observé : lorsque le temps de remplissage TS_REMP augmente, la limite d'élasticité RE_ST diminue. Cela signifie qu'à la fin du remplissage, le métal injecté conserve une fraction du liquide plus élevée qui favorise la compensation des retassures lors de l'intensification. La diminution des retassures augmente la limite d'élasticité RE_ST.

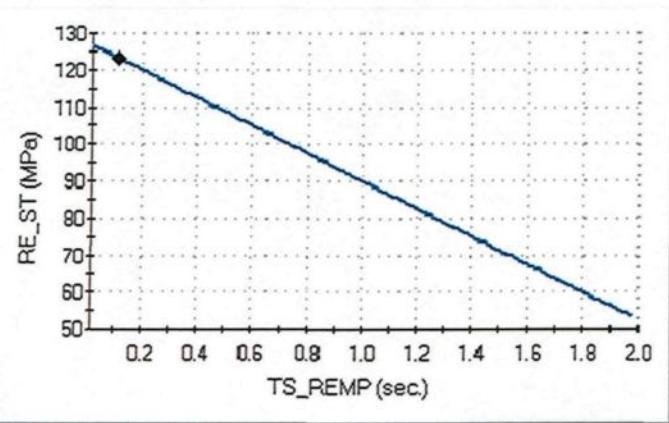


Figure 61 : RE_ST en fonction du temps de remplissage TS_REMP.

5.3.4 Limite d'élasticité après traitement thermique

L'équation pour calculer RE_AT d'après le modèle établi est la suivante :

$$RE_AT = 845 + 7639D + 0.41F + 1.09K - 1.57M - 59.9O - 1.7e+005D^2 + 1.52KO - 35.4DK - 0.01FK$$

La Figure 62 illustre les paramètres les plus influents sur RE_AT. Nous constatons que la course d'injection L_FIN et le délai DL_1 ont une influence plus importante sur la limite d'élasticité après le traitement thermique. En plus, il y a une forte interaction entre le poids de masselotte MS_TALON et le temps d'injection TS_INJC.

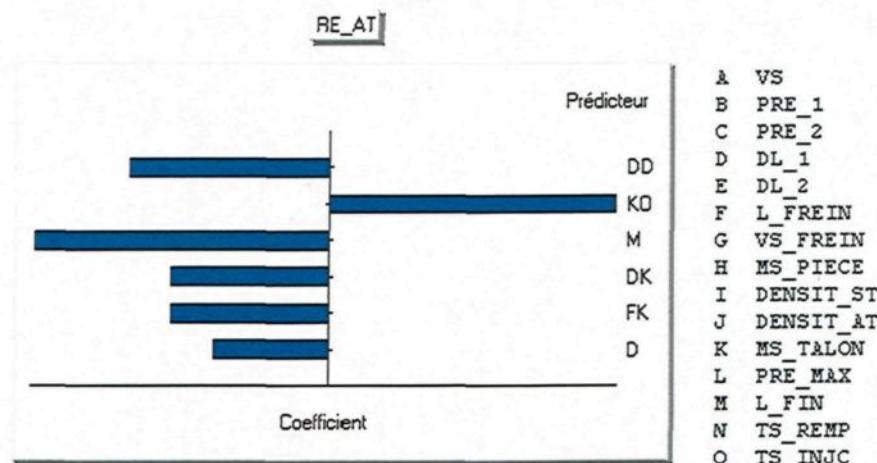


Figure 62 : Facteurs influents sur RE_AT et leurs tendances.

La Figure 63 illustre les courbes de niveau (iso réponse) du RE_AT dans le domaine opératoire. De gauche à droite, la valeur de RE_AT passe de 240 à 180MPa.

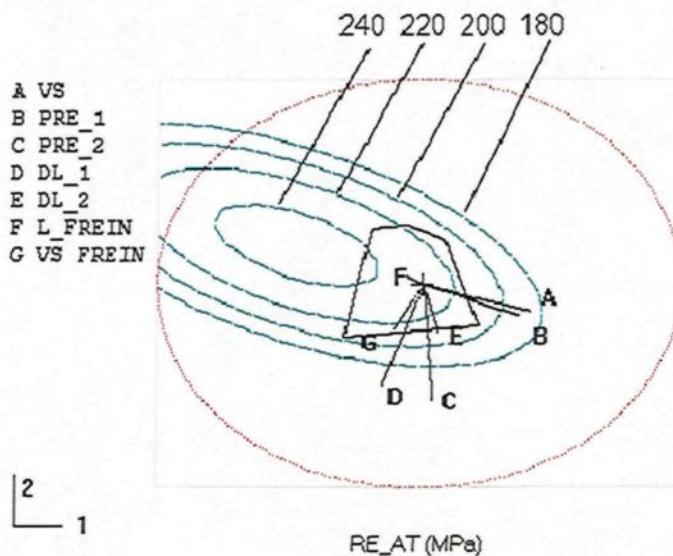


Figure 63 : Courbe de niveau sur RE_AT.

Les figures suivantes présentent la relation entre des paramètres de moulage et la résistance mécanique RE_AT avec le traitement thermique. Les paramètres non signifiants sur RE_AT ne sont pas présentés.

La relation entre RE_AT (MPa) et le délai DL_1 est illustrée à la Figure 64. L'effet suivant est observé : lorsque le délai DL_1 augmente, la limite d'élasticité après le traitement thermique RE_AT diminue

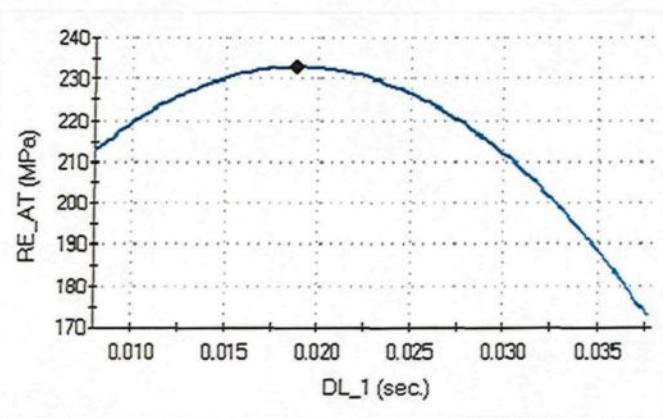


Figure 64 : RE_AT en fonction du délai DL_1.

La Figure 65 présente la relation entre RE_AT (MPa) et la position de freinage L_FREIN. L'effet suivant est observé : lorsque la course de freinage L_FREIN augmente, la limite d'élasticité après le traitement thermique RE_AT augmente aussi.

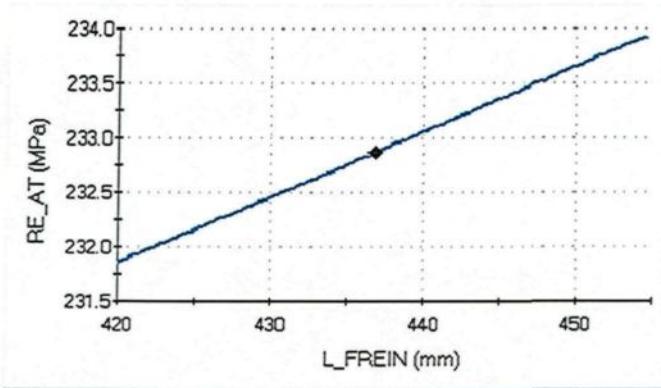


Figure 65 : RE_AT en fonction de la position de freinage L_FREIN.

La Figure 66 montre la relation entre RE_AT (MPa) et la masse de masselotte MS_TALON. L'effet suivant est observé : lorsque le poids de masselottes MS_TALON augmente, la limite d'élasticité après le traitement thermique RE_AT diminue.

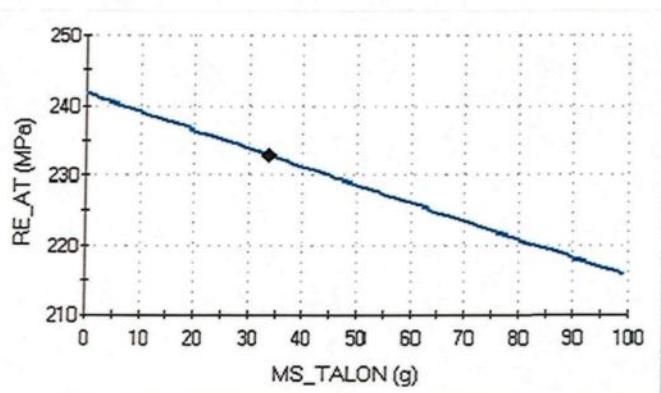


Figure 66 : RE_AT en fonction de la masse de masselotte MS_TALON.

La Figure 67 présente la relation entre RE_AT et la course d'injection L_FIN. L'effet suivant est observé : lorsque la course d'injection L_FIN augmente, la limite d'élasticité après le traitement thermique RE_AT diminue.

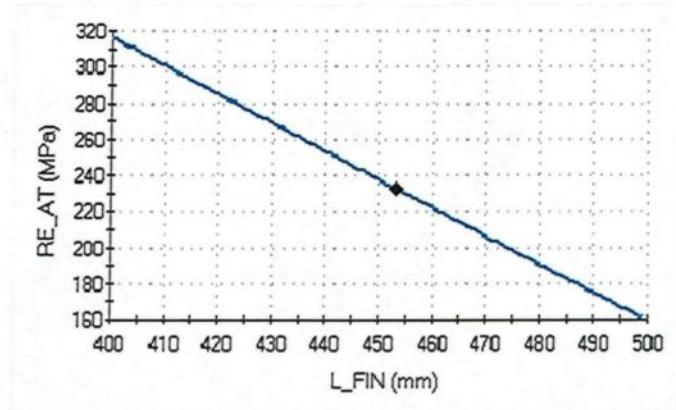


Figure 67 : RE_AT en fonction de la course d'injection L_FIN.

La Figure 68 donne la relation entre RE_AT et le temps d'injection TS_INJC. L'effet suivant est observé sur cette figure : lorsque le temps d'injection TS_INJC augmente, la limite d'élasticité après le traitement thermique RE_AT diminue. La Figure 69 présente l'effet interactif entre MS_TALON et TS_INJC sur RE_AT. Le temps d'injection plus court favorise le remplissage des talons de lavage. Mais le temps de remplissage trop court signifie une vitesse d'injection trop rapide qui cause des agitations de l'écoulement du métal. Cela diminue la limite d'élasticité.

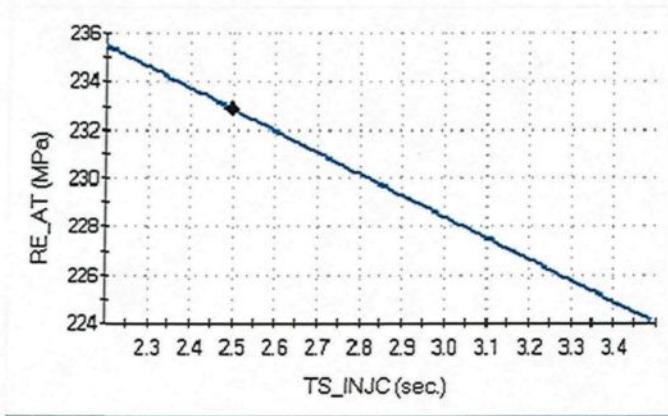


Figure 68 : RE_AT en fonction du temps d'injection TS_INJC.

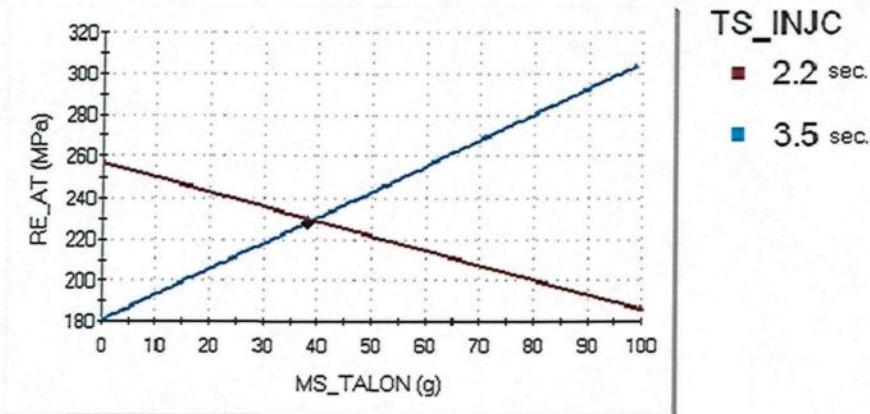


Figure 69 : Effet interactif entre MS_TALON et TS_INJC sur RE_AT.

5.3.5 Allongement à la rupture sans traitement thermique

L'équation pour calculer ALLONG_ST d'après le modèle établi est la suivante :

$$\text{ALLONG_ST} = -6.81 + 0.028A - 1.31 + 8.53J + 9.32e-005L - 0.0017M - 0.019*O - 1.64JJ$$

La Figure 70 présente les paramètres les plus influents sur RM_ST. Nous constatons que la course et la vitesse d'injection ainsi que la pression maximale ont une influence plus importante sur l'allongement ALLONG_ST.

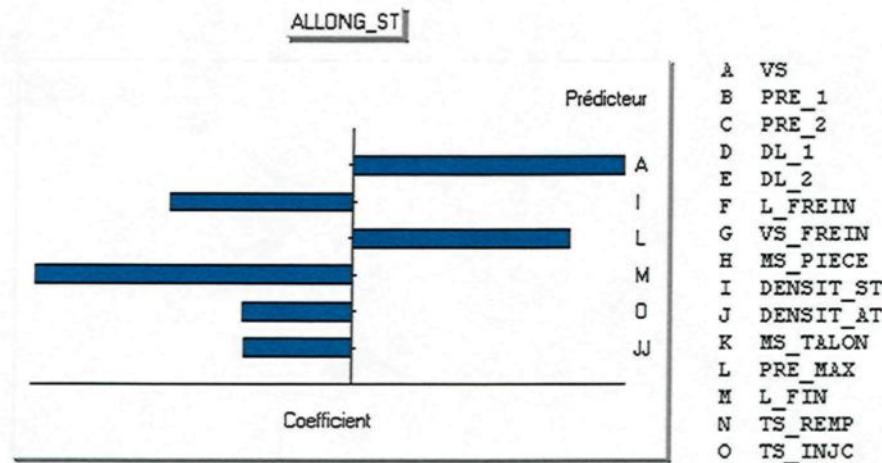


Figure 70 : Facteurs influents sur ALLONG_ST et leurs tendances.

La Figure 71 montre les courbes de niveau de ALLONG_ST dans le domaine opératoire. De haut en bas, la valeur de RM_ST passe de 3.5 à 9.5%.

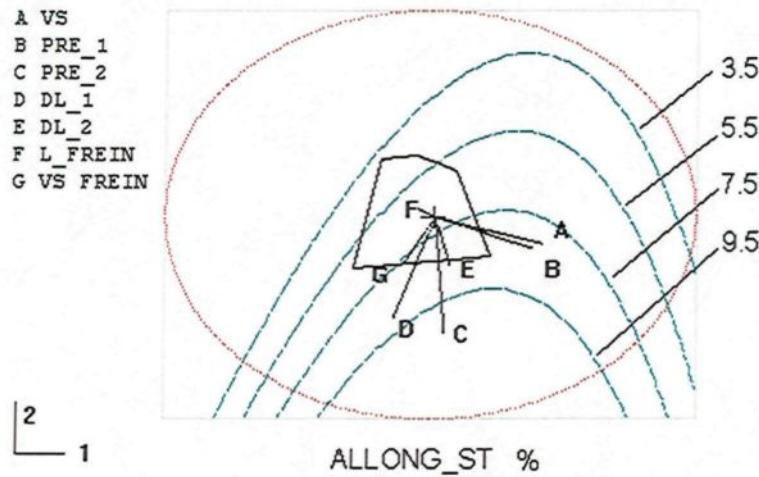


Figure 71 : Courbes de niveau sur ALLONG_ST.

Les figures suivantes présentent la relation entre des paramètres de moulage et la résistance mécanique ALLONG_ST sans traitement thermique. Les paramètres non significants sur ALLONG_ST ne sont pas présentés.

La Figure 72 affiche la relation entre ALLONG_ST et la vitesse d'injection VS_INJC(VS). L'effet suivant est observé : lorsque la vitesse d'injection VS_INJC augmente, l'allongement ALLONG_ST augmente aussi.

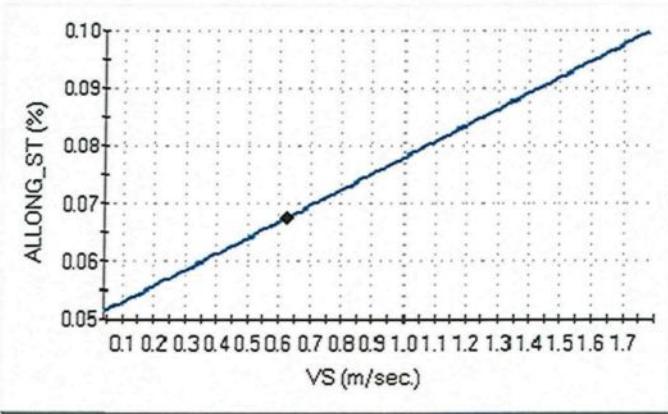


Figure 72 : ALLONG_ST en fonction de la vitesse d'injection VS.

La Figure 73 présente la relation entre ALLONG_ST et la densité DENSIT_ST. L'effet suivant est observé : lorsque la densité DENSIT_ST augmente, l'allongement ALLONG_ST diminue.

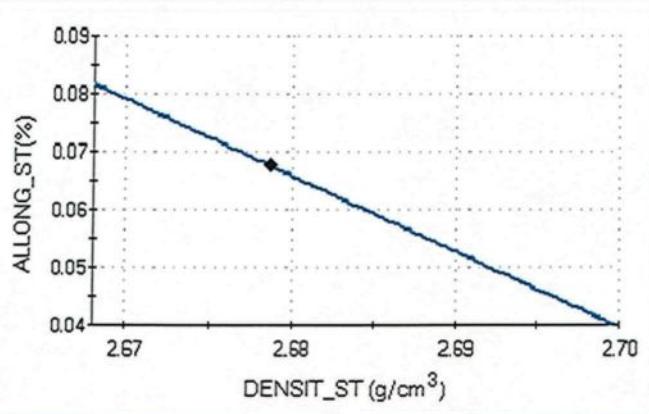


Figure 73 : ALLONG_ST en fonction de DENSIT_ST.

La Figure 74 présente la relation entre ALLONG_ST et la densité DENSIT_AT. L'effet suivant est observé : lorsque la densité DENSIT_AT augmente, l'allongement ALLONG_ST augmente d'abord et diminue par la suite. À la valeur 2.5867 de densité, l'allongement est le plus élevé.

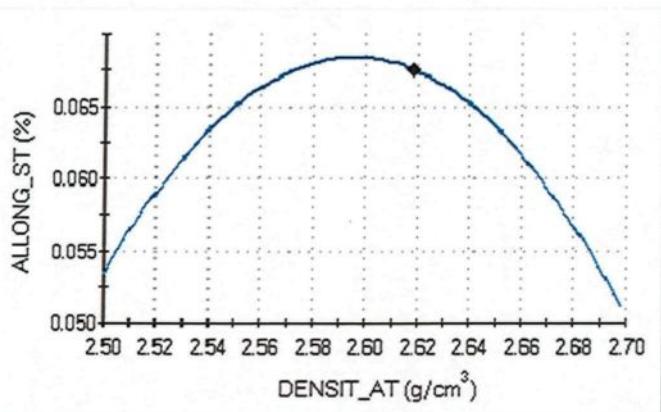


Figure 74 : ALLONG_ST en fonction de DENSIT_AT.

La Figure 75 montre la relation entre ALLONG_ST et la pression maximale PRE_MAX. L'effet suivant est observé : lorsque la pression maximale PRE_MAX augmente, l'allongement ALLONG_ST augmente aussi.

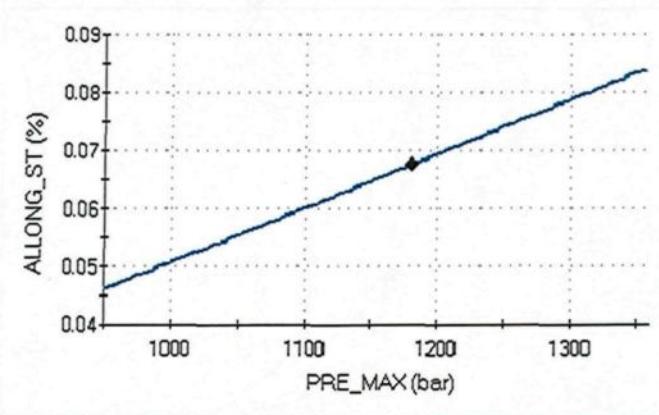


Figure 75 : ALLONG_ST en fonction de la pression maximale PRE_MAX.

La relation entre ALLONG_ST et la course de remplissage L_FIN est illustrée à la Figure 76. L'effet suivant est observé : lorsque la course d'injection L_FIN augmente, l'allongement ALLONG_ST diminue.

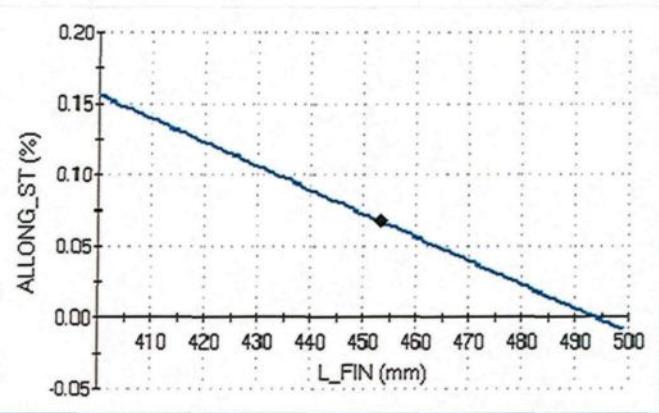


Figure 76 : ALLONG_ST en fonction de la course de remplissage L_FIN.

La Figure 77 présente la relation entre ALLONG_ST et temps d'injection TS_INJC. L'effet suivant est observé : lorsque le temps d'injection TS_INJC augmente, l'allongement ALLONG_ST diminue.

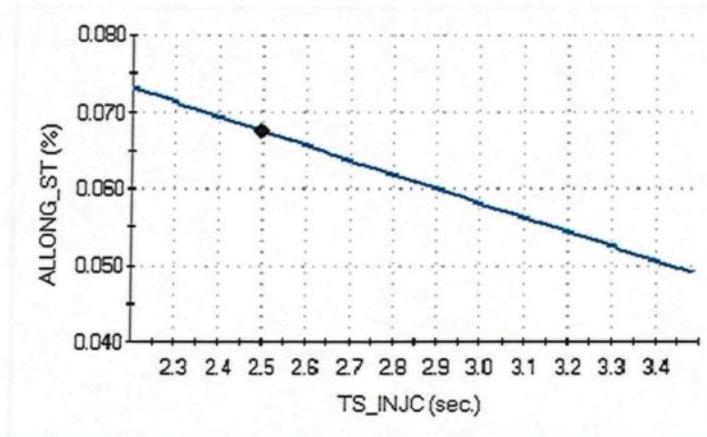


Figure 77 : ALLONG_ST en fonction du temps d'injection TS_INJC.

5.3.6 Allongement à la rupture après traitement thermique

L'équation pour calculer ALLONG_AT d'après le modèle établi est la suivante :

$$\text{ALLONG_AT} = -0.36 - 0.001B - 7.5945e-005F + 0.147J - 0.00083K + 7.8e-005L + 0.00017M + 0.13O + 8.033e-007B*B - 0.025O*O + 1.98e-006FK$$

La Figure 78 présente les paramètres plus influents sur RM_ST. Nous constatons que la pression maximale, la densité après le traitement thermique et la pression 1 ont une influence plus importante sur l'allongement.

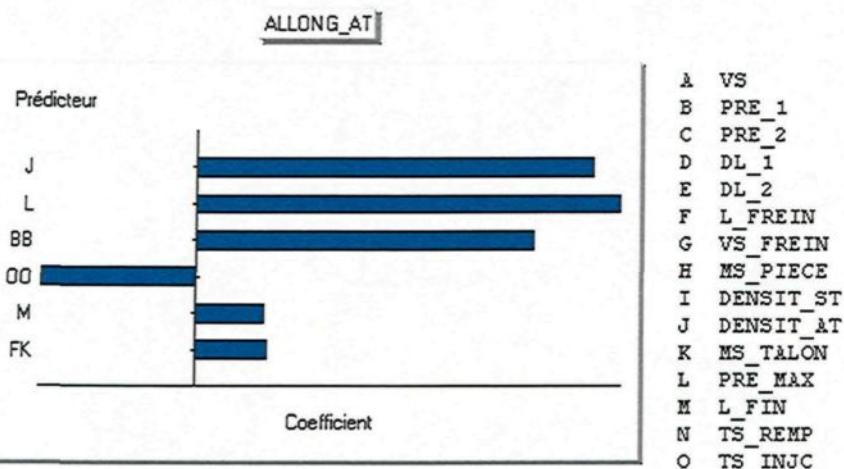


Figure 78 : Facteurs influents sur ALLONG_AT et leurs tendances.

La Figure 79 montre les courbes de niveau de ALLONG_AT dans le domaine opératoire. De haut en bas, la valeur de ALLONG_AT passe de 3 à 9%.

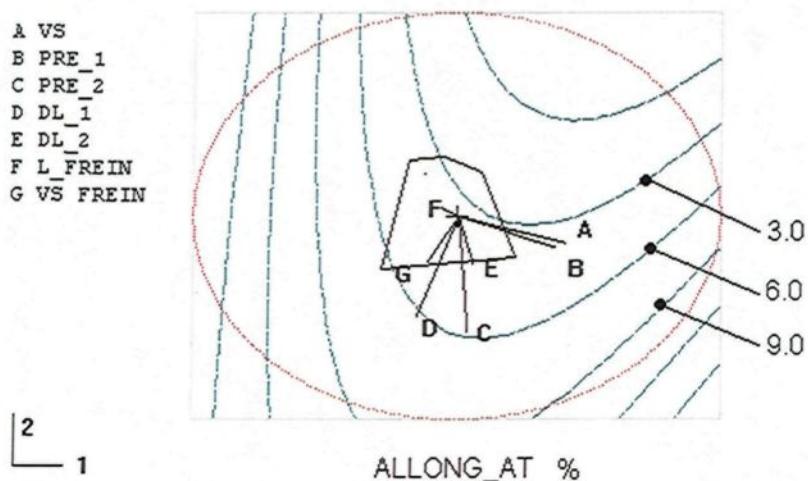


Figure 79 : Courbe de niveau sur ALLONG_AT.

Les figures suivantes présentent la relation entre des paramètres de moulage et la résistance mécanique ALLONG_AT avec le traitement thermique. Les paramètres non significants sur ALLONG_AT ne sont pas présentés.

La Figure 80 présente la relation entre ALLONG_AT et la pression PRE_1. L'effet suivant est observé : lorsque la pression PRE_1 augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT diminue.

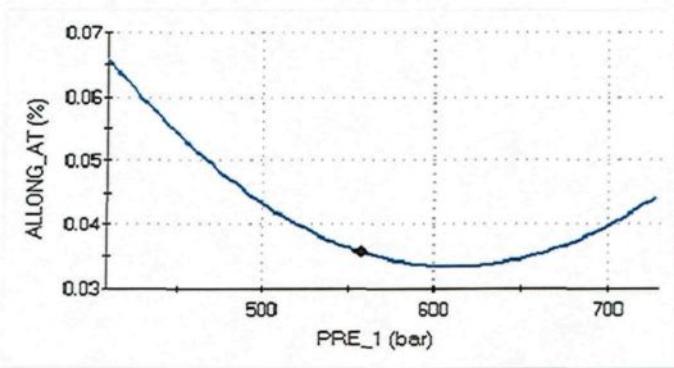


Figure 80 : ALLONG_AT en fonction de la pression PRE_1.

La Figure 81 montre la relation entre ALLONG_AT et la DENSIT_AT. L'effet suivant est observé : lorsque la densité DENSIT_AT augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT augmente aussi.

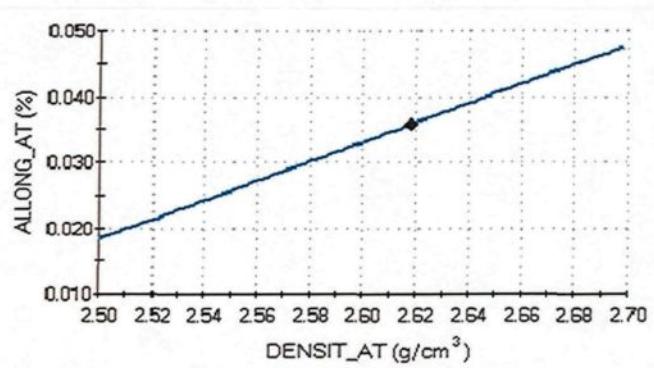


Figure 81 : ALLONG_AT en fonction de la DENSIT_AT.

La Figure 82 présente la relation entre ALLONG_AT et la masse de masselotte MS_TALON. L'effet suivant est observé : lorsque le poids de masselottes MS_TALON augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT augmente légèrement.

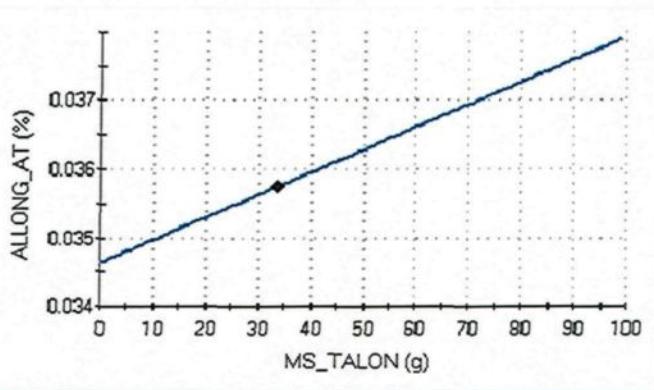


Figure 82 : ALLONG_AT en fonction de la masse de masselotte MS_TALON.

La Figure 83 présente la relation entre ALLONG_AT et la pression PRE_MAX. L'effet suivant est observé : lorsque la pression maximale PRE_MAX augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT augmente aussi.

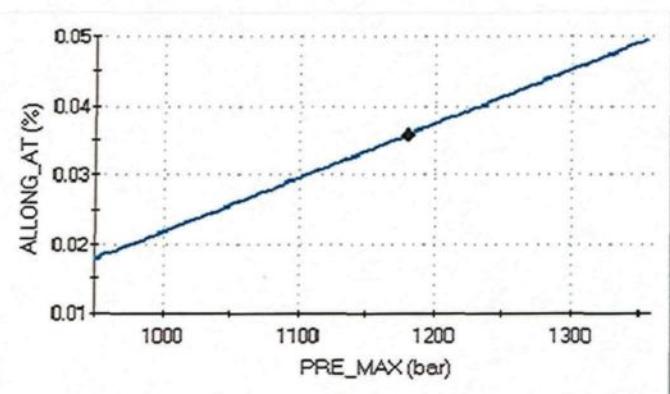


Figure 83 : ALLONG_AT (MPa) en fonction de la pression PRE_MAX.

La Figure 84 affiche la relation entre ALLONG_AT et la course de remplissage L_FIN. L'effet suivant est observé : lorsque la course d'injection L_FIN augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT augmente aussi.

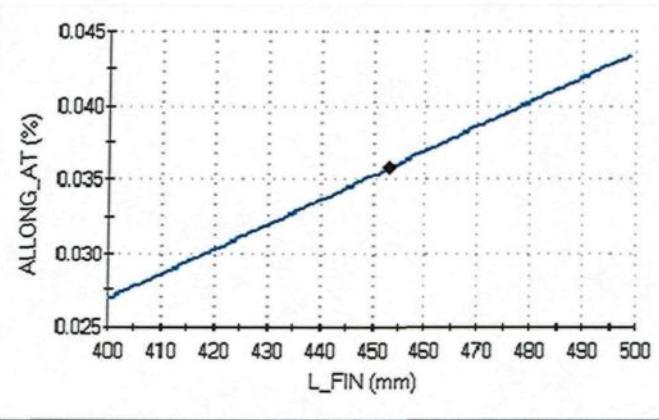


Figure 84 : ALLONG_AT en fonction de la course de remplissage L_FIN.

La Figure 85 présente la relation entre ALLONG_AT et le temps d'injection TS_INJC. L'effet suivant est observé : lorsque le temps d'injection TS_INJC augmente, l'allongement après le traitement thermique ALLONG_AT diminue.

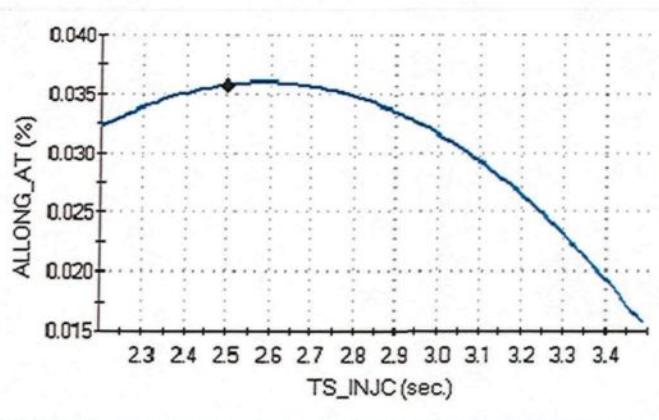


Figure 85 : ALLONG_AT en fonction du temps d'injection TS_INJC.

5.4 Optimisation

5.4.1 Optimisation basée sur la maximisation de la robustesse

Le Tableau 11 présente la valeur des paramètres optimisés dans le but d'obtenir la meilleure robustesse du procédé : le point au centre du domaine opératoire : Profondeur = 0

Tableau 11 : Optimisation basée sur la maximisation de la robustesse.

	Paramètres de moulage (facteur)	Valeur obtenue
A	VS_INJC(VS)	0.66
B	PRE_1	562
C	PRE_2	1088
D	DL_1	0.019
E	DL_2	0.047
F	L_FREIN	437
G	VS_FREIN	0.03
H	MS_PIECE	1779
I	DENSIT_ST	2.6789
J	DENSIT_AT	2.6118
K	MS_TALON	38
L	PRE_MAX	1187
M	L_FIN	454
N	TS_REMP	0.109
O	TS_INJC	2.482
	Réponse (propriété mécanique)	
	* RM_ST	234.3
	* RM_AT	278
	* RE_ST	123
	* RE_AT	231
	* ALLONG_ST	0.069
	* ALLONG_AT	0.035
	Profondeur	0

Quoique ce point donne la meilleure robustesse en terme de la stabilité du procédé, mais les propriétés mécaniques obtenues n'atteignent pas celles exigées lors de la conception de la pièce.

5.4.2 Optimisation basée sur la maximisation des propriétés mécaniques

Le Tableau 12 présente la valeur des paramètres optimisés dans le but d'obtenir les propriétés mécaniques demandées : RM=280, RE=230, A%=5

Tableau 12 : Optimisation basée sur la maximisation des propriétés mécaniques.

	Facteur	Valeur obtenue
A	VS_INJC(VS)	0.65
B	PRE_1	522
C	PRE_2	1155
D	DL_1	0.022
E	DL_2	0.046
F	L_FREIN	423
G	VS_FREIN	0.04
H	MS_PIECE	1870
I	DENSIT_ST	2.6801
J	DENSIT_AT	2.6744
K	MS_TALON	39
L	PRE_MAX	1285
M	L_FIN	449
N	TS_REMP	0.135
O	TS_INJC	2.645
	Réponse	
	* RM_ST	235.3
Objectif : 280 MPa	* RM_AT	289
	* RE_ST	125
Objectif : 230 MPa	* RE_AT	235
	* ALLONG_ST	0.071
Objectif : 6%	* ALLONG_AT	0.056
	Profondeur	100

Ce point donne des propriétés mécaniques satisfaisantes exigées lors de la conception de la pièce. Mais avec une profondeur de zéro, il se trouve en

périmétrie du domaine réalisable. Alors, un contrôle de procédé plus sévère sera nécessaire lors de la production en série.

5.5 Discussion

La valeur des propriétés mécaniques des pièces sans traitement thermique est beaucoup plus faible que celles avec le traitement thermique. Les pièces sans traitement thermique ne répondent pas aux exigences à la fabrication des pièces de structure. Les modèles de régression établis démontrent les effets des paramètres de type facteur sur les propriétés mécaniques après le traitement thermique. Les paramètres les plus significatifs pour chacune des propriétés mécaniques après le traitement thermique sont les suivants : la résistance mécanique est affectée surtout par la pression de pré compactage, le délai 2 et la vitesse de freinage tandis que la limite d'élasticité, quant à elle, est affectée en grande partie par le délai 2 et la position de freinage. Finalement, l'allongement est affecté par la pression de pré compactage, la pression maximale, la course et le temps d'injection. Le Tableau 13 résume tous ces effets.

Tableau 13 : Effets des paramètres significants sur les propriétés mécaniques.

	VS_INIC	PRE_1	PRE_2	DL_1	DL_2	L_FREIN	VS_FREIN	MS_PIECE	DENSIT_ST	DENSIT_AT	MS_TALON	PRE_MAX	L_FIN	TS_REMP	TS_NUC
RM_ST	/		/	\								\			/
RM_AT		V			/	\						\			
Max	301			292		281			291						
Min	278			268		273			262						
Delta	23			24		8			29						
RE_ST						\							\		
RE_AT				\	233					\	242	\	318	\	236
Max					173						216		160		224
Min					60						26		158		12
ALLONG_ST	/						\	\	\	/	\	/	\		\
ALLONG_AT		V							/	/		/	/	\	
Max	6.6								4.8		5.0	4.7			3.7
Min	3.4								1.8		1.8	2.7			1.6
Delta	2.2								3.0		3.2	2.0			2.1

Note : / : Effet positif ; \ : Effet négatif ; V et \ : Effet combiné

CHAPITRE 6

CHAPITRE 6: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent clairement qu'un domaine opératoire a été créé. Ceci a permis de noter l'étendue du procédé de moulage semi-solide. Des modèles de régression pour chacune des réponses par rapport à la qualité ont été établis. Ces modèles déterminent les effets des paramètres de moulage sur les propriétés mécaniques. Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de trouver des conditions optimales permettant de satisfaire les propriétés mécaniques nécessaires lors de la conception du bras de contrôle de suspension. Les propriétés mécaniques obtenues après le traitement thermique dans cette étude sont les suivantes : résistance mécanique à la traction : 289 MPa ; Limite d'élasticité : 235 MPa ; et un allongement à la traction de 5.6%.

Le moulage semi-solide est un procédé très prometteur pour la fabrication de pièces de structure dans l'automobile. Cependant, les pièces sans traitement thermique ne peuvent pas être utilisées pour la fabrication de ces pièces dues à leurs propriétés mécaniques faibles.

6.2 Recommandations

Finalement, des essais de fatigue doivent être réalisés pour vérifier la fiabilité de cette pièce par rapport à la résistance à la fatigue.

Pour des pièces de structure plus exigeantes, l'utilisation d'autres types d'alliage d'aluminium pourrait être nécessaire.

RÉFÉRENCES

1. The Aluminum Association Inc. «Automotive news' show daily», (2004).
2. SAE world congress papers confirm; «Aluminum technologies offer SUVS safety and fuel economy», March 5, 2003.
3. The Aluminum Association Inc.; «Automotive aluminum the performance advantage » (2004), Webpage <http://www.autoaluminum.org>.
4. Christopher J Longhurst; «The Suspension Bible», (1998-2005), Webpage: http://www.carbibles.com/suspension_bible.html.
5. George W. Housner and Thad Vreeland, JR. «The analysis of stress and deformation», (1966).
6. Juan Pablo Trejo; «Simulation D'une suspension automobile», (2005), Page 41-46.
7. J. E. Shigley, C. R. Mischke, McGrawHill; «Mechanical Engineering Design», 6 edition, (2000).
8. K.P. Young and R. Fitze, «Semi-Solid Metal Cast Aluminum Automotive Components» 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 1994.
9. G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Wituski and M. Zillgen, Proc. «SSM Forming of Usually Wrought Aluminum Alloys» 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 1994.
10. Paul Haney; «Basic Vehicle Dynamics», (1999).
11. F.-L. Cai: «conception et analyse mécanique des pièces en aluminium pour application automobile» mémoire de maîtrise, université du Québec à Chicoutimi, 2006.
12. Galopin, M., DAO, T.-M., ZHENG, C.Q., HANSQUINE, S., «A Problem Solving Tool for Optimization of Welding Processes», 5th International Conference on Computerization of welding information, Golden, Colorado, 9-12 août 1994.
13. GALOPIN M., BERGERON S., CHARBONNEAU Y., «Micro-shrinkage control in magnesium and castings», 2002, Fonderie Fondateur d'aujourd'hui.

14. GALOPIN M., BOUR L., «Optimizing processes in the wire and cable industry», Wire & Cable Technical Symposium, May 2003, Atlanta, Georgia, USA.
15. Sheng Mhau Industray Co., Ltd.; «Specialist in steering & suspension system», (1998) <http://www.baw-auto.com.tw/index.html>.
16. Pironneau O., «Optimal shape design for elliptic systes», Springer-Verlag, New, York (1984).
17. GILLESPIE, Thomas D.; (1992) «Fundamentals of Vehicle Dynamics», Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
18. CIFM «L'aluminium, bien le connaitre pour mieux l'utiliser !» 2006, CÉGEP Trois-Rivières, Canada.
19. K. Young and P. Eisen, «SSM (Semi-Solid Metal) Technological Alternatives For Different Applications» 6th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 2000.
20. Gérald Hémon, « Initiation aux techniques industrielles», 1982 , Édition McGraw-Hill, Montréal, Canada.
21. Joan L. Jorstad, « Aluminum Casting Technology», 1997, American Foundry-men's Society, Inc. Des Plaines, IL, USA.
22. C.A. Loong, C.Q. Zheng, M.T. Shehata, and E. Essadiqi, «Semi-Solid Casting and Forging of A357 Aluminum Alloy Components», 7th S2P on Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, September 25-27, 2002, pp 213-220, Tsukuba, Japan.
23. The University of Sheffield; «Weight Reductions Achievable by Thixoforming, (2004), Webpage: <http://www.shef.ac.uk/materials/SSM/commappl.html>.
24. Arthur C Street, «The die casting book», 1977, portcullis press LTD, Surrey, England.
25. Bethesda, Md.; «Aluminum and its alloys», (2004).
26. J.-M. Dorlot, J.-P. Baïlon, J. Masounave, «Des matériaux», 1986, École polytechnique de Montréal, Canada.
27. Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch, «Modern welding», The Goodheart-Willcox Company, Inc, Illinois, USA, 1997.

28. Daniel Vieilledent, «Optimisation des outils en forgeage à chaud par simulation éléments finis et méthode inverse : application à des problèmes industriels», 1999, L'école nationale supérieure des mines de Paris, France.
29. Edited by T. Altan, G. Ngaile and G. Shen, «Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications», 2005, ASM international, USA.
30. Alan P. Druschitz, Thomas E. Prucha, Adam E. Kopper and Thomas A. Chadwick, INTERMET Corp. «Mechanical Properties of High Performance Aluminum Castings», Automotive Casting Processes and Materials, SAE 2001 World Congress, Detroit, USA.
31. Yves Cherrault, «Optimisation : Méthodes locales et globales», Presses Universitaires de France - PUF (1 avril 1999).
32. Grégoire ALLAIRE, François JOUVE, Anca-Maria Toader; «Une méthode de lignes de niveaux pour l'optimisation de formes»; (Jun. 8, 2005).
33. Murat F., Simon S., «Études de problèmes d'optimal design», Lecture Notes in Computer science page 41, 54-62, Springer Verlag, Berlin (1976).
34. Grabitech Solutions; «Optimization methods», (2004), Webpage: <http://www.grabitech.com/methods.htm>.
35. Simon J., «Differentiation with respect to the domain in boundary value problems», Num. Funct. Anal. Optimz. 649-687 (1980).
36. Constant, C. (1989), « La méthodologie Taguchi», *Revue de Statistique Appliquée*.
37. Cohen, V. (1989), « Introduction aux plans d'expérience», *Revue de Statistique Appliquée*.
38. L. Dubourg, B. Des Roches, A. Couture, D. Bouchard, H. R. Shakeri, «Optimization of aluminum laser welding using Taguchi and EM methods», Proc. ICALEO 2004, 4-7 Oct, San Francisco CA, USA;
39. GALOPIN, M., Hansquine, S., Dao, T.M., Zheng, C.Q., « Optimization and Variation Reduction in Welding - The EM Method », ICAWT'97, The International Conference on Advances in Welding Technology, September 17-19, 1997, Columbus, Ohio, USA.
40. MIDSON, S. P., HOMISTON, B. J., GABIS, O., and YOUNG, K. P «The influence of key parameters on the uniformity of slug re-heating during semisolid metal forming» 1999, Die Casting Engineer, 43(6), 62-63.

- 41.Chee-Ang Loong, Chang-Qing Zheng «Optimal Filling of Test Dies For Evaluating Properties of Semi-Solid Alloys», The 9th International Conference S2P, September 11~13, 2006, Busan, Korea.
- 42.M. Galopin, «Optimisation et réduction de la dispersion en ingénierie de la qualité», 2003, EM optimisation Inc., Montréal, Canada.
- 43.Boivin S., Allard C., Galopin M. «Application of the E.M. Method to mastication and mixing optimisation for rubber processing », CSCHE 2000, September, 2000, Montreal, Quebec, Canada.
- 44.M.C. Flemings, «Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State», Metallurgical Transaction, Volume A22, 952-981, May 1991.
- 45.Chee-Ang Loong, C.Q. Zheng, M.Pruneau, E. Hsu, J. D. Hwang, «Semi-Solid Casting of AZ91D Magnesium Alloy from Extruded Billets», September 21- 23, 2004, Paper 10-02, 8th S2P on Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limassol, Cyprus.
- 46.MIDSON, S. P., RUDNEV, V., and GALLIK, R. «Semisolid processing of aluminum alloys» 1999, Industrial Heating, (January), 37-41.
- 47.M., Galopin, M.-A. Gouin, C.-Q. Zheng, F.-L. Cai, 1996, «Développement rapide des procédures de soudage», LAOP, ETS, Montréal, Canada.
- 48.GRÄF, T., JURGENS, R., and GIES, J. J. «Controlled inductive heating for thixotropic materials into the semisolid state» 6th International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites, Torino, Italy.
- 49.M., Galopin, DAO, T.M., ZHENG, C.Q., HANSQUINE , S., «A New Approach to Machinability Testing», Seminar and Applications Forum on a Systems Approach to Machining, Institute of Advanced Manufacturing Sciences Inc. (IAMS), Cincinnati, Ohio, É.U., 4-5 mai 1993.
- 50.Shuming Xing, Jianbo Tan, Lizhong Zhang, Wen Liu, Haiying Zhang, Zhongsheng Jiao, Shuhua He, Jinxiang Liu, «Study on Key Problems on Industrializations of Semisolid Rheologic Forming Processes», The 8 th S2P International Conferences.
- 51.Y. Ono, C.-Q. Zheng, F. G. Hamel, R. Charron, and C. A. Loong, «Experimental investigations on monitoring and control of induction heating process for semi-solid alloys using heating coil as sensor, » Measurement Science and Technology, Vol. 13, pp. 1359-1365, 2002.
- 52.H. Shahani and M. Shahani, «Resonance Switching Power Supply» US Patent 5715155, 1998.

- 53.J-W. Liaw, T-F. Chen, C.A. Loong, C-Q. Zheng, P. Raducanu, K.T. Nguyen and C.K. Jen, «Theoretical Modeling and Experimental Verification of Induction Heating of Semi-Solid Billets» 6th Int'l Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 2000.
54. Tim Basner; «Rheocasting of Semi-Solid A357 Aluminum», SAE Technical Paper Series, (2000).
- 55.C. MILLIERE ET. AL.: «Structure, propriété et mise en forme des alliages brassés à l'état semi-solide» 1983, Vol. 80, No. 7/8, Mémoires et études scientifiques de la revue de métallurgie, Paris, France.
- 56.Sokołowski J., Zolesio J.P., «Introduction to shape optimization: shape sensitivity analysis», Springer Series in Computational Mathematics, Vol. 10, Springer, Berlin, (1992).
- 57.Stephen P. Midson, Kurt Brissing, «Semi-solid casting of aluminum alloys: A status report», 1997, February, Modern Casting, USA.