

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme de Master
académique

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie Mécanique

Spécialité: Fabrication mécanique et Productique

Présenté par: Ouled Abdallah Radouane & Akila kerouchi

Thème

Sélection Optimisée des paramètres Opératoires de procédé de moulage par injection

Soutenu publiquement le:

Devant le jury:

| | | | |
|------------------------|------------|--------------------|-------------------|
| BENTALEB Fayçal | MCB | UKM Ouargla | Président |
| HECINI Adel | MAA | UKM Ouargla | Examineur |
| AMEUR Toufik | MCA | UKM Ouargla | Rapporteur |

Année Universitaire:2022/2023

Remerciements

Je remercie tout d'abord et avant tout mon Dieu qui m'a donnée le courage et la détermination ainsi que la patience pour pouvoir franchir tous les épreuves afin d'arriver à ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire **Dr. AMEUR Toufik**, pour son patience, son disponibilité, et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, surtout les enseignants de Génie mécanique.

Un grand merci à **Dr. BENTALEB Fayçal** président de jury et l'examineur **Mr. HECINI Adel**, pour tous les conseils et l'encouragement.

Dédicaces

*À mes parents ; Ma très chère mère
qui est toujours à mes côtés ; Mes
très chers frères et mes très chères
sœurs, Toute ma famille(kerouchi)*

*À toutes nos cher(e)s ami(e)s À toute la promotion Master
Mécanique2022-2023*

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force

Je termine ce travail

Je voudrais témoigner ma gratitude à ceux qui, de loin

Ou proche de celui qui m'a soutenu financièrement et

Moralement. Je dédie donc ce travail

A mes chers parents, que Dieu les protège et les protège

Pour moi

A la famille des fils Ouled Abde Abdullah et à la famille laMabkhout

Et à mes chers amis

يتمثل تحسين عملية القولبة بالحقن في ضمان الاختيار الصحيح لظروف التشغيل من أجل التحكم في الجودة التقنية والاقتصادية للأجزاء. يتم ذلك عن طريق تقليل خطأ الوزن واستهلاك الطاقة من خلال احترام القيود المتعلقة بالمتطلبات المادية لعملية الحقن. باستخدام طريقة **Min-Max**، يتم الحصول على حل وسط بالإضافة إلى حلين حديين؛ الأول يعتمد على تقليل خطأ الوزن والثاني استهلاك الطاقة. يتم تحقيق ذلك من خلال حل المشاكل ذات الهدف الواحد. أتاح تحليل الحلول التي تم الحصول عليها فهم عملية القولبة بالحقن.

الكلمات المفتاحية: القولبة بالحقن؛ التحسين متعدد الأهداف؛ معايير التشغيل.

SUMMARY:

The optimization of the injection molding process consists in ensuring the correct choice of operating conditions in order to control the technical and economic quality of the parts. This is done by reducing, at the same time, the weight error and the energy consumption by respecting the constraints related to the physical requirements of the injection process. Using the Min-Max method, a compromise is obtained in addition to two limiting solutions; the first minimizing the weight error and the second the energy consumption. These are achieved by solving single-objective problems. The analysis of the obtained solutions has made it possible to understand the process of injection molding.

Key words: Injection molding; Multi-objective optimization; Operating parameters.

RESUME:

L'optimisation du procédé de moulage par injection consiste à s'assurer du bon choix des conditions opératoires afin de maîtriser la qualité technique et économique des pièces. Cela se fait en réduisant, à la fois, l'erreur de poids et la consommation d'énergie en respectant les contraintes liées aux exigences physiques du processus d'injection. A l'aide de la méthode Min-Max, un compromis est obtenu en plus à deux solutions limites; la première minimisant l'erreur en poids et la deuxième la consommation d'énergie. Ces derniers sont abouties à travers la résolution des problèmes mono-objectifs. L'analyse des solutions obtenues a permis de comprendre le processus de moulage par injection.

Mot clés: Moulage par injection; Optimisation multi-objectif; Paramètres opératoires.

Table des matières:

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I: Recherche bibliographique sur le moulage par injection | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Définition | 5 |
| I.2.1 Le procédé de moulage par injection | 5 |
| I.2.2 Presse injecté | 6 |
| I.2.3 Matériaux utilisés | 7 |
| I.3 Matériaux polymère | 7 |
| I.3.1 Structure d'un polymère | 8 |
| I.3.2 Classification des polymères | 9 |
| 1. Polymères amorphes | 9 |
| 2. Polymères semi-cristallins | 10 |
| 3. Polymères cristallins | 10 |
| I.4 Machine d'injection | 10 |
| I.4.1 Composition d'une machine d'injection | 11 |
| 1. La vis de plastification | 13 |
| 2. L'unité de fermeture et verrouillage | 14 |
| I.4.2 Conception des moules | 15 |
| I.5. Cycle de moulage par injection | 19 |
| I.6. Conclusion | 21 |

Chapitre II: initiations sur l'optimisation

| | |
|---------------------------------------|----|
| II.1 Introduction | 23 |
| II.2 Définitions | 24 |
| II.2.1 L'espace d'état | 24 |
| II.2.2 Variables d'optimisation | 24 |
| II.2.3 Fonction objectif | 25 |
| II.2.4 Ensemble des contraintes | 25 |
| II.2.5 Méthode d'optimisation | 25 |

| | |
|--|----|
| II.3 Classification des problèmes d'optimisations | 26 |
| II.3.1 Problème d'optimisation mono-objectif ou multi-objectif | 26 |
| II.3.2 Problèmes d'optimisation avec ou sans contrainte..... | 26 |
| II.3.3 Problème d'optimisation linéaire ou non-linéaire..... | 26 |
| II.3.4 Problèmes d'optimisation continue ou discrète..... | 27 |
| II.4 Méthodes d'optimisations | 27 |
| II.4.1 Méthodes déterministes..... | 27 |
| 1)Méthode L'algorithme du simplexe:..... | 28 |
| 2)Méthode de gradient | 29 |
| 3)Méthode des gradients conjugués | 29 |
| 4)Méthode de Newton | 29 |
| 5)Programmation quadratique séquentielle..... | 30 |
| II.4.2 Méthodes non-déterministes (Stochastiques) | 30 |
| 1.Méthode Monte-Carlo | 31 |
| 2.Recuit simulé | 31 |
| 3.Les méthodes évolutionnistes | 32 |
| 4.Méthode des essaims de particules | 33 |
| 5.Méthode de colonies de fourmis :..... | 33 |
| II.5 Optimisation multi-objectif..... | 34 |
| II.5.1 Les méthodes d'agrégation des objectifs | 34 |
| II.5.2 L'approche Min-Max..... | 35 |
| II.5.3 Le but à atteindre..... | 35 |
| II.5.4 L'approche par ϵ -contraintes..... | 36 |
| II.6 Conclusion | 36 |

Chapitre III: Optimisation de procédé de moulage par injection

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction..... | 38 |
| III.2 Modélisation de procédé de moulage par injection..... | 38 |
| 1. La phase de remplissage..... | 39 |
| 2.La phase de compactage..... | 39 |
| 3.La phase de refroidissement..... | 40 |
| III.3 Modélisation du problème d'optimisation..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| III.3.1 Variables d'optimisation..... | 42 |
| 1.Vitesse d'injection..... | 42 |
| 2.Température de la buse d'injection..... | 42 |
| 3.La pression d'injection..... | 42 |
| 4.Température du moule..... | 43 |
| III.3.2 critères d'optimisation..... | 43 |
| 1.Qualité technologique de la pièces..... | 43 |
| 2.Consommation en énergies..... | 43 |
| III.3.3 Contraintes..... | 44 |
| 1/Limitation sur L'erreur de poids..... | 44 |
| 2/Limitation sur la consommation d'énergie..... | 44 |
| III.4 Application..... | 44 |
| III.4.1 Donnes expérimentaux..... | 44 |
| III.4.2 Optimisation..... | 46 |
| III.4.3 Discussion..... | 47 |
| III.5 Conclusion..... | 49 |
| | |
| Conclusion générale | 50 |
| | |
| Références | 51 |

Liste des figures:

| | |
|--|----|
| Figure I.1: Pièce produite en moulage par injection..... | 4 |
| Figure I.2: Machine d'injection plastique moderne..... | 5 |
| Figure I.3: Groupes d'une presse à injecter..... | 6 |
| Figure I.4 : Procède de polymérisation..... | 8 |
| Figure I.5: Structures polymères..... | 9 |
| Figure I.6 : Structure d'un polymère amorphe..... | 9 |
| Figure I.7 : Polymère semi-cristallin..... | 10 |
| Figure I.8 : Cylindre de plastification et moule..... | 11 |
| Figure I.9 : Schéma d'une presse à injecter..... | 12 |
| Figure I.10 : Schéma d'une mono-vis..... | 13 |
| Figure I.11: Fermeture hydraulique..... | 14 |
| Figure I.12 : Unité de fermeture mixte..... | 15 |
| Figure I.13 : Moule vu eu coupe..... | 16 |
| Figure I.14 : Mole à tiroir..... | 17 |
| Figure I.15 : Moule simple à deux plaques..... | 18 |
| Figure I.16 : Moule à trois plaques..... | 18 |
| Figure I.17 : moule à canaux chauffants..... | 19 |
| Figure I.18: La phase de dosage..... | 19 |
| Figure I.19 : La phase d'injection..... | 20 |
| Figure I.20 : La phase de compactage..... | 20 |
| Figure I.21 : La phase d'éjection | 21 |
| Figure II.1: Classification des méthodes d'optimisation déterministes..... | 28 |
| Figure II.2: Classification Méthodes d'optimisation stochastiques..... | 31 |
| Figure II.3: Principe d'une méthode évolutionniste..... | 32 |
| Figure II.4: Interprétation graphique de l'approche but à atteindre..... | 36 |
| Figure III .1: comparaison des résultats..... | 48 |

Liste des tableaux:

| | |
|---|----|
| Tableaux III.1 : limitation sur les paramètres d'entré..... | 45 |
| Tableaux III.2: niveaux d'expérience..... | 45 |
| Tableaux III.3: Résultats d'expérimentales..... | 45 |
| Tableaux III.4: résultats des problèmes d'optimisation..... | 47 |

Nomenclature:

div : Opérateur divergence

ECC: Consommation en énergie

$F(x)$: Fonction-objectif

F_i : Fonction coût de la i-ème discipline

IV : Vitesse de remplissage [mm/s]

grad : Gradient

k : Conductivité [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

MT :température du moule [$^{\circ}\text{C}$]

P : Pression [Pa]

PP : pression de compactage [bar]

PT: Temps de remplissage [s]

PW : Poids [g]

S : Surface latérale du moule [m^2]

T_g : Température de transition vitreuse [$^{\circ}\text{C}$]

T_f : Point de fusion [$^{\circ}\text{C}$]

v : Volume spécifique [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

W: Champs de vitesse [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

λ : Temps de relaxation [s]

ρ : Masse volumique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

μ : Vecteur vitesse.

ε : Vecteur de dimension

σ : Tenseur des contraintes[Pa]

Δ : Opérateur laplacien

*Introduction
générale*

Introduction générale

La technique d'injection de matières plastiques est une méthode privilégiée par rapport à d'autres techniques de mise en forme, car elle permet la transformation d'un quart des produits en plastique et tire parti de toutes les ressources disponibles. Pour produire une pièce par injection, diverses ressources sont utilisées, telles que le personnel qualifié pour les opérations de réglage, de contrôle et de suivi, les presses d'injection plastique (horizontales, verticales, bi-vis ou spéciales) et le moule, qui est l'élément clé permettant de donner à la matière la forme souhaitée.

Bien que les produits en matières plastiques puissent être fabriqués par enlèvement de matière, par pliage et par soudage, ces techniques de transformation restent marginales. En général, les pièces de forme bien déterminée sont obtenues par des procédés de mise en forme permettant de réaliser des séries importantes ou de produire en continu. Dans ce sens, et parmi les procédés de mise en forme les plus efficaces, on trouve le moulage par injection. Ce dernier permet aux opérateurs de contrôler les qualités technologiques des pièces fabriquées à tout moment durant le processus de production. Pour les matières thermoplastiques, il est possible même de modifier de nombreux paramètres lors de l'injection tels que la pression, la température, la vitesse de refroidissement, le matériau utilisé, le temps de compactage et de refroidissement.

D'une manière générale, la planification des opérations d'injection est basée sur la sélection judicieuse des conditions opératoires. Elle permet de contrôler la qualité techno-économique des pièces et d'assurer le bon déroulement du processus de production.

Dans cette étude, nous proposons une méthodologie de planification des opérations de moulage par injection basée sur la sélection optimale des paramètres opérationnels de fabrication. Cette démarche combine les connaissances acquises dans la modélisation de ce procédé de fabrication et celle du domaine de l'optimisation. Elle représente la démarche rationnelle pour la justification techno-économique de ce procédé.

Introduction générale

Le présent mémoire est organisé, après une introduction générale, dans trois chapitres:

Chapitre I: Consacré à l'investigation bibliographique sur le procédé de moulage par injection. Il permet aux lecteurs une bonne compréhension du sujet.

Chapitre II: Celui-là constitue une généralité sur l'optimisation. Dans ce même chapitre, on a introduit toutes les connaissances nécessaires pour la pratique de l'optimisation multi-objectif.

Chapitre III: Ce dernier est destiné à l'application, l'analyse et la synthèse. Il est articulé sur deux parties; la modélisation du problème d'optimisation des paramètres de moulage par injection et la résolution de ce problème pour un cas d'application concret.

Le document se termine par une conclusion générale et une listes des références bibliographiques.

***Chapitre I: Recherche
bibliographique sur le
moulage par injection***

I.1 Introduction

Le moulage par injection plastique devient un domaine de recherche très actif, surtout ces dernières années. Ce procédé de fabrication permet de produire des pièces de formes très complexes avec une excellente qualité dimensionnelle et de bonnes propriétés mécaniques.

Le moulage par injection plastique se développe rapidement et apporte plus de dynamisme au domaine des affaires en peu de temps. Ce procédé apporte de nombreux avantages; il est très rentable et durable. De plus, il fournit un produit de haut gamme qui ne nécessite pas de finition supplémentaire. Il est souvent utilisé pour produire de très grandes séries de pièces de voitures ou d'appareils électroménagers, ou de petites séries pour l'aviation. Le procédé d'injection permet d'atteindre une productivité élevée et une très bonne reproductibilité des pièces.

Le matériau est introduit dans des fûts chauffés, mélangé, puis pressé dans une cavité de moule où il refroidit et se solidifie dans la configuration de la cavité. Après la conception d'un produit, généralement par un designer industriel ou un ingénieur, un mouliste crée un moule en métal, généralement en acier ou en aluminium, et l'usine avec précision pour créer les caractéristiques de la pièce souhaitée [1].

Le moulage par injection est, aujourd'hui, l'un des procédés de moulage de polymères les plus utilisés (30 % du polymère transformé), avec l'extrusion et le soufflage. La mise en forme des thermoplastiques par injection est l'un des processus les plus importants de transformation des polymères : en termes de volume, il occupe la deuxième place juste derrière le processus d'extrusion, mais il est en tête en matière de chiffre d'affaires. Dans un contexte économique de plus en plus concurrentiel, les transformateurs doivent améliorer à la fois la qualité de leurs pièces et la productivité du processus. Le moulage par injection plastique est utilisée dans de nombreuses industries, telles que l'automobile, les appareils électroniques, la médecine, l'impression, les outils en plastique, la défense et l'électronique. La figure I.1 illustre un exemple d'une pièce de forme géométrique très complexe qu'on peut pas la produire que par le moulage par injection.

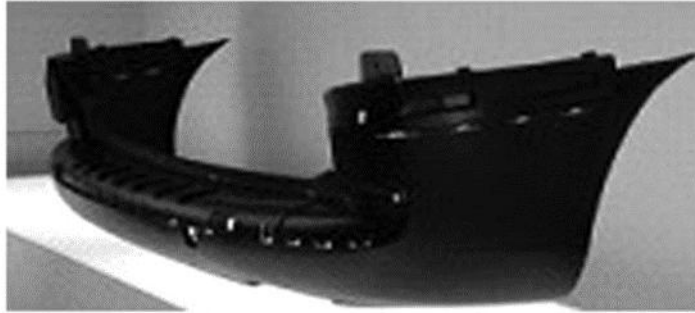


Figure I.1 : Pièce produite en moulage par injection.[9]

Le moulage par injection a connu une croissance régulière depuis ses débuts à la fin des années 1800. La technique a évolué de la production de poils et de boutons aux principaux produits de consommation, industriels, médicaux et aérospatiaux. John Wesley Hyatt a inventé un moyen de fabriquer des billards en injectant du celluloïd dans un moule. En 1872, John et son frère isaiah hyatt breveté la machine de moulage par injection. Cette machine était primitive, mais il était tout à fait approprié à leurs fins. Il contenait un plongeur de base pour injecter le plastique dans un moule à travers un cylindre chauffé. En 1919, Arthur Eichengrün a développé la première presse de moulage par injection, qui peut être considérée comme la première machine d'injection moderne. Quelques années plus tard, en 1926, Eckert et Ziegler ont breveté la première presse à injection ayant des caractéristiques commerciales. L'industrie s'est développée rapidement dans les années 1940, à la suite d'une demande énorme pour des produits bon marché, produits en série. En 1946, l'inventeur américain James Watson Hendry construit la première machine à vis à injection, permettant un contrôle beaucoup plus précis sur la vitesse d'injection et la qualité des articles produits. Cette machine permettait d'ajouter du plastique coloré ou recyclé à la matière vierge avant d'être injecté. Aujourd'hui, les machines à vis à injection représentent la grande majorité de toutes les machines d'injection [1].

La figure I.2 présente un exemple de ce type de machine d'injection plastique.



Figure I.2: Machine d'injection plastique moderne. [1]

I.2 Définitions

Le moulage est le procédé de formation le plus répandu des polymères plastiques. Les techniques utilisées pour ce procédé sont la compression, le transfert, l'injection, l'extrusion et le soufflage. Dans tous les cas, un plastique aggloméré ou granulaire est contraint, à haute température et sous pression, de s'écouler dans la cavité d'un moule, de le remplir et de prendre sa forme. La qualité d'un objet injecté dépend de trois critères:

1. La conception des formes de la pièce,
2. La conception et la qualité de réalisation de l'outillage (le moule),
3. Les conditions et les paramètres de moulage (injection).

I.2.1 Procédé de moulage par injection

Dans le domaine de la plasturgie, le procédé de moulage par injection est très répandu car il permet la fabrication de pièces techniques de manière maîtrisée et à des cadences élevées. Le principe consiste à injecter un polymère fondu (très liquide dans une chambre thermostatique équipée d'un circuit de refroidissement) à haute pression (centaines nombre de bars). L'injection des thermoplastiques est l'un des procédés de transformation des polymères les plus importants : en volume, il se classe deuxième après l'extrusion et en tête en termes d'enchères. Le principe du procédé de moulage par injection consiste à injecter une résine polymère thermoplastique préchauffée dans un moule à température réglable. La température plus basse du moule commencera alors le cycle de durcissement de la résine. Le polymère solidifié dans le moule formera un solide qui correspond à la forme et à la taille de la cavité du moule [2].

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

Il existe plusieurs façons d'effectuer le moulage par injection de polymère, mais dans ce projet, nous allons examiner uniquement les deux méthodes les plus courantes [3]. La première méthode consiste à chauffer le moule plutôt que le polymère à modéliser. Cette méthode est principalement utilisée pour les matériaux thermodurcissables car ceux-ci ne supportent pas les cycles de chauffage et de refroidissement comme les thermoplastiques. La deuxième méthode de moulage par injection est utilisée pour les thermoplastiques et est la plus courante dans la littérature. Il s'agit de faire fondre le polymère et de l'injecter sous pression dans un moule non chauffé, puis de le refroidir grâce à des conduites de refroidissement placés à certains endroits stratégiques. Ce procédé est principalement utilisé dans les matériaux thermoplastiques en raison de leur capacité à subir de multiples cycles de chauffage et de refroidissement sans affecter leurs propriétés.

I.2.2 Presse à injecter

La presse d'injection est une machine qui permet d'obtenir des pièces en plastique injecté sous pression dans un moule (monté sur la presse). L'injection du plastique se fait généralement à haute pression et à une température supérieure à la température de transition vitrée, la température s'adoucit. Dans cet état, la matière n'est plus solide mais pas aussi liquide. Elle se situe entre les deux états liquide et solide. Le matériau plastique injecté prend la forme de l'empreinte du moule. Après refroidissement, la pièce est expulsée du moule. Le refroidissement s'effectue par circulation d'eau froide dans un circuit adapté au moule [4]. Une presse à injecter est composée en générale de deux groupes fonctionnels (figure I.3) : le groupe d'injection et le groupe de fermeture.

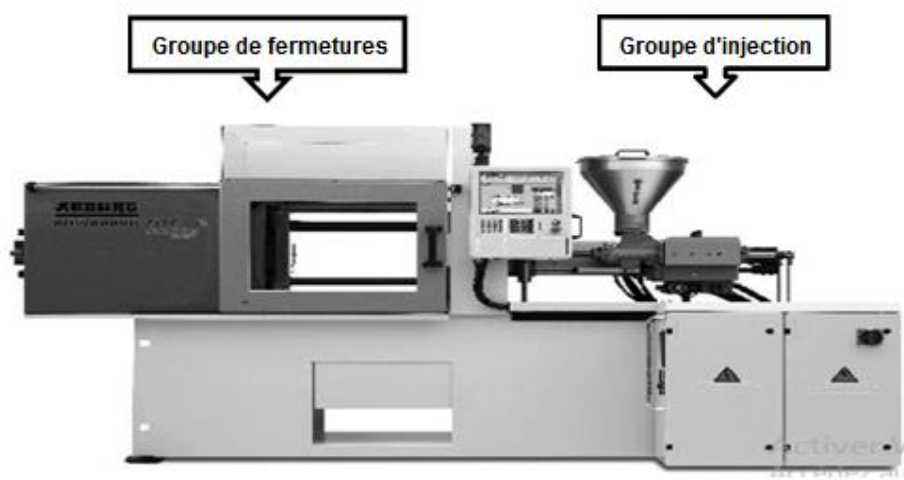


Figure I.3: Groupes d'une presse à injecter. [9]

I.2.3 Matériaux utilisés

Les polymères sont les matériaux les plus couramment utilisés dans le moulage par injection. Les fructifications multiples, ou atomes répétitifs ou groupes d'atomes, sont les éléments constitutifs des polymères, qui sont des macromolécules. Trois classes de polymère peuvent être rencontrés: les polymères thermoplastiques, les polymères réticulés (appelés aussi thermodurcissables) et les élastomères [3].

Un matériau polymère, également appelé plastique, est une substance organique composée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Sa principale caractéristique, outre sa faible densité, est que sa résistance et sa rigidité sont inférieures à celles de l'acier. Ces produits ont été développés à la suite de recherches scientifiques approfondies menées au XXe siècle [1].

I.3 Matériaux polymère

La désignation polymère vient du grec "polus" qui veut dire plusieurs et "meros" qui signifie partie. Les macromolécules organiques ou inorganiques appelées polymères sont constituées de motifs répétés d'unités identiques (monomères), qui sont liées les unes aux autres par des liaisons covalentes [5]. Parce qu'ils combinent des liaisons chimiques fortes entre les atomes d'une même chaîne avec des liaisons inter-chaînes plus faibles, les matériaux polymères présentent des caractéristiques physico-chimiques particulières. Les structures en plastique doivent être constituées de matériaux extensibles et flexibles, qui peuvent changer en fonction de facteurs environnementaux tels que la température. Les objets en plastique fondu qui contiennent de fins brins de filament sont une illustration typique. Ces brins rétrécissent et se transforment en fibres microscopiques lorsqu'ils sont tirés. Ces fibres tendues sont constituées de nombreuses molécules entrelacées et indétectables à leur plus

petite échelle. Lorsqu'elles sont séparées les unes des autres, ces molécules mères (ou monomères) sont appelées polymères. Bien avant que les plastiques synthétiques ne soient développés, le terme a été utilisé pour la première fois en 1833 par le chimiste suédois Jöns Jacob Berzelius pour décrire des molécules ayant la même formule. Le terme "polymère" désigne désormais un enchaînement de monomères liés bout à bout et strictement identiques. Étant donné que la jonction de deux petites molécules entraîne toujours la formation d'une grosse molécule, les termes macromolécule et polymère peuvent être utilisés de manière interchangeable. Ces deux idées jouent un rôle crucial dans la fabrication des plastiques.

La polymérisation ou le processus par lequel les monomères sont réunis en une chaîne, est déclenchée par une substance chimique particulière connue sous le nom de starter. Ce démarreur peut déclencher une réaction en chaîne qui relie des dizaines de milliers, voire des centaines de milliers de monomères (Figure I.4).

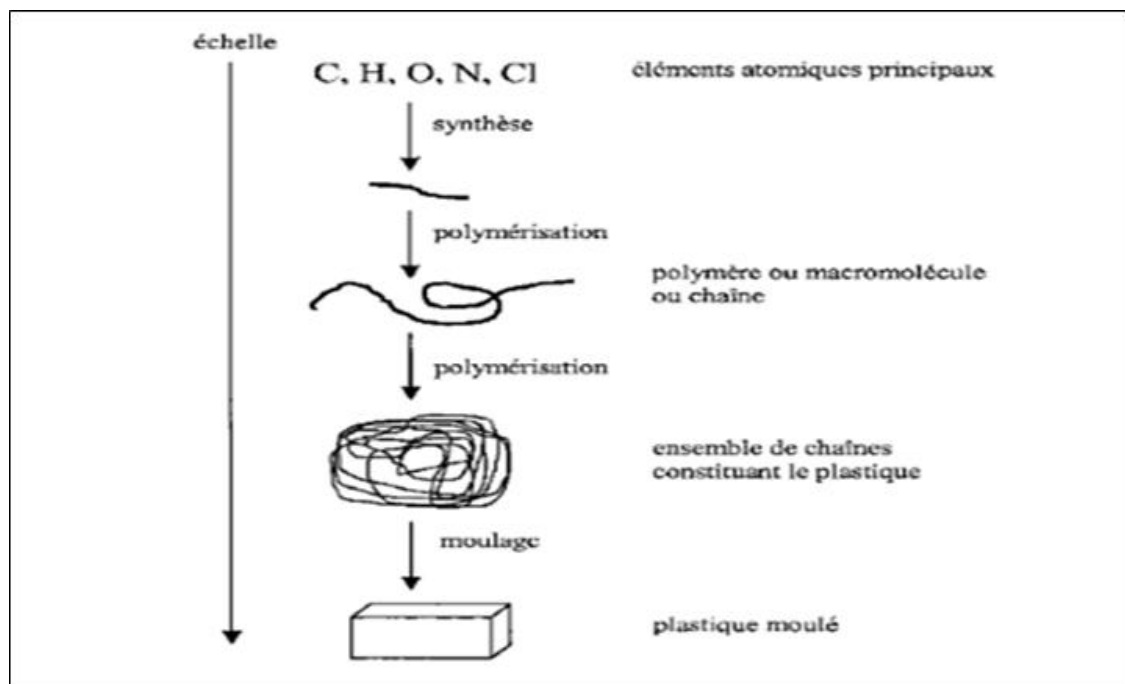


Figure I.4: Procède de polymérisation. [9]

I.3.1 Structure d'un polymère

La structure d'un polymère montre comment de longues chaînes de molécules simples sont connectées pour créer un matériau. Les propriétés macroscopiques du polymère seront significativement altérées par leur alignement les uns avec les autres et la densité des sites de liaison [2].

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

Un polymère peut adopter trois structures moléculaires de base, présentées dans la figure I.5:

1. Linéaire : la macromolécule se présente sous la forme d'une longue chaîne,
2. Branchée : une longue chaîne sur laquelle viennent s'embrancher des chaînes de longueur variable, en générale plus petites. Les ramifications latérales amoindrissent le potentiel de compaction d'une chaîne et, par conséquent, la masse volumique du polymère,
3. En réseau : Les chaînes sont reliées entre elles en plusieurs points formant un réseau tridimensionnel.

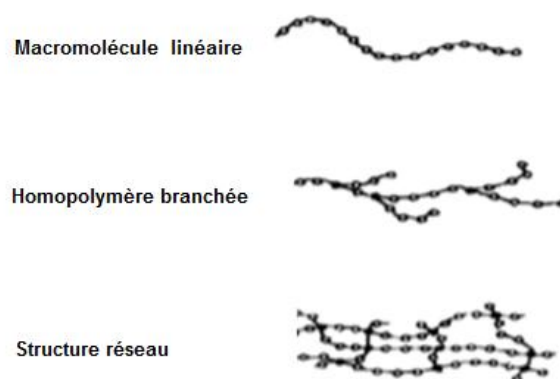


Figure I.5: Structures polymères. [2]

Ces différentes structures vont permettre de classer les polymères en deux grandes catégories: les thermoplastiques et les thermodurcissables.

I.3.2 Classification des polymères

1. Polymères amorphes

Les polymères amorphes ont des chaînes qui ressemblent à des boules aléatoires où il n'y a pas de structure organisée et les chaînes sont enchevêtrées (Figure I. 6). Il n'y a pas de point de fusion pour les polymères amorphes car ils se transforment lentement du solide au liquide lorsqu'ils sont chauffés.

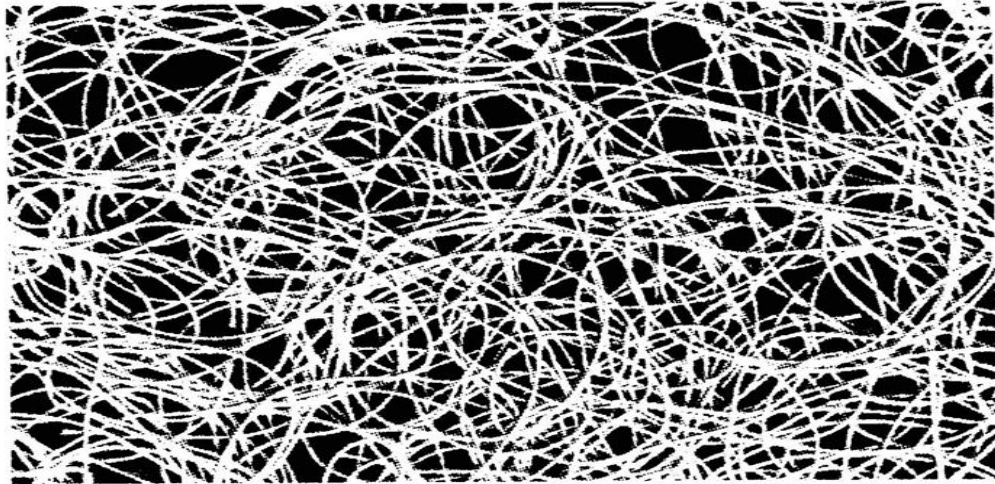


Figure I.6: Structure d'un polymère amorphe. [6]

En fait, la structure de la chaîne macromoléculaire dans la sphère désordonnée compacte empêche les transitions brusques entre les états solide et liquide. Cependant, un changement brutal de mobilité moléculaire est observé à une température appelée température de transition vitreuse, notée T_g [2].

2. Polymères semi-cristallins

Les polymères semi-cristallins sont constitués de cristaux biphasiques dispersés dans une matrice amorphe et présentent des zones cristallines, typiquement sous forme de sphéricités (Figure I. 7). La morphologie cristalline du matériau, ou la taille et la forme des domaines de chaque phase, est une autre caractéristique cruciale à prendre en compte [6].



Figure I.7: Polymère semi-cristallin. [6]

Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont;

- Rigidité supérieure à celle de la phase amorphe,
- Densité supérieure à celle de la zone amorphe,
- Existence d'un point de fusion T_f (absence de transition vitreuse),
- Indice de réfraction supérieur à celui de la phase amorphe ($n_c > n_a$),
- Imperméabilité totale à la plupart des gaz, vapeurs ou liquides.

3. Polymères cristallins

C'est une structure polymères où il existe des chaînes ordonnées. Les matériaux cristallins ont un point de fusion contrairement aux matériaux amorphes. Un polymère entièrement cristallin n'est qu'une idée théorique car il y a toujours des défauts ou des terminaisons de chaîne qui ne suivent pas un motif cristallin [7].

I.4 Machine d'injection

Deux pièces principales constituent une machine de moulage par injection; une unité de plastification ou d'injection et une unité de moulage avec un système de moule et de Fermeture (comme le montre la figure I.8). L'unité de plastification est généralement là où les différences entre les types de machines peuvent être vues. Bien que des presses verticales soient disponibles, les presses horizontales continuent d'être les plus courantes.

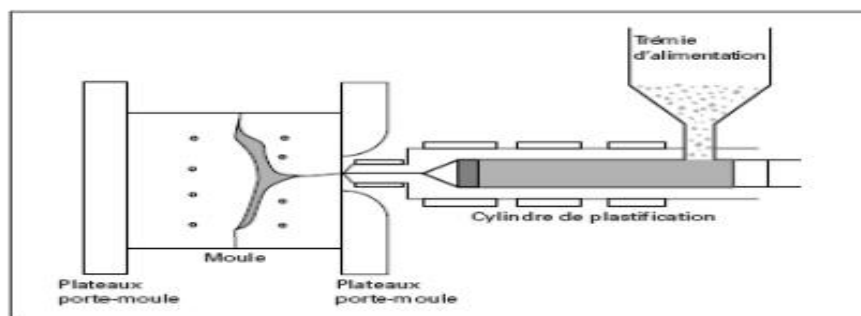


Figure I.8: Cylindre de plastification et moule. [8]

Les types les plus importants de ces machines sont les presses hydrauliques et électriques, chacun a des qualités distinctives qui le distinguent et sont adaptés à des types de production particuliers.

La force de serrage et la capacité d'injection maximale d'une machine de moulage par injection sont généralement utilisées pour identifier la machine. Le premier peut être mesuré en masse ou en volume (cm³) de polystyrène ordinaire. Le volume d'injection réel est compris entre 30 et 70 % de cette capacité maximale, selon le comportement de la matière à transformer pendant la phase de fusion et les limites de sécurité de la machine (phase de compactage). La force de fermeture est généralement exprimée en tonnes et fait référence à la force de fermeture maximale que le moule peut maintenir avant, pendant et après avoir été rempli de matériau fondu. Pour définir au mieux une machine de moulage par injection, de nombreux critères supplémentaires peuvent être spécifiés. Ils sont d'autant plus cruciaux qu'ils sont amenés à sélectionner une machine parfaitement adaptée à une variété d'objets à fabriquer. Par exemple, l'espacement entre les plaques et les colonnes doit correspondre aux dimensions du moule [8].

I.4.1 Composition d'une machine d'injection

Afin d'être utilisée pour injecter du plastique fondu dans un moule pour produire des pièces en plastique, une machine d'injection est constituée des composantes principales suivantes:

- 1) La trémie: le plastique est chargé dans l'appareil à ce stade. Typiquement, un système de chauffage est installé dans la trémie pour faire fondre le plastique
- 2) Le cylindre: avant d'être injecté dans le moule, le plastique fondu y est stocké. Le plastique fondu est poussé vers l'avant par la tarière dans le cylindre.
- 3) La buse: ici, le plastique fond et entre dans le moule après avoir quitté le cylindre. Pour réguler le débit de plastique, la buse comporte généralement une valve.
- 4) Le moule: c'est le composant qui établit la forme du composant en plastique. Une plaque de serrage fixe le moule après son insertion dans la machine de moulage par injection.
- 5) La presse: c'est la partie de l'appareil qui applique la pression nécessaire pour injecter le plastique dans le moule. Des vérins hydrauliques ou électriques sont fréquemment inclus dans les presses.
- 6) Le système de refroidissement: une fois le plastique fondu injecté dans le moule, un système de circuits de refroidissement lui permet de durcir rapidement.

7) Le système de commande: le système électronique est ce qui gère le fonctionnement de la machine d'injection. Les paramètres de fonctionnement de la machine, y compris la température, la pression et le débit plastique, sont tous modifiés par le système de contrôle.

La figure I.9 illustre cette composition standard. D'autres pièces supplémentaires peuvent être existées selon des utilisations spécifiques des machines.

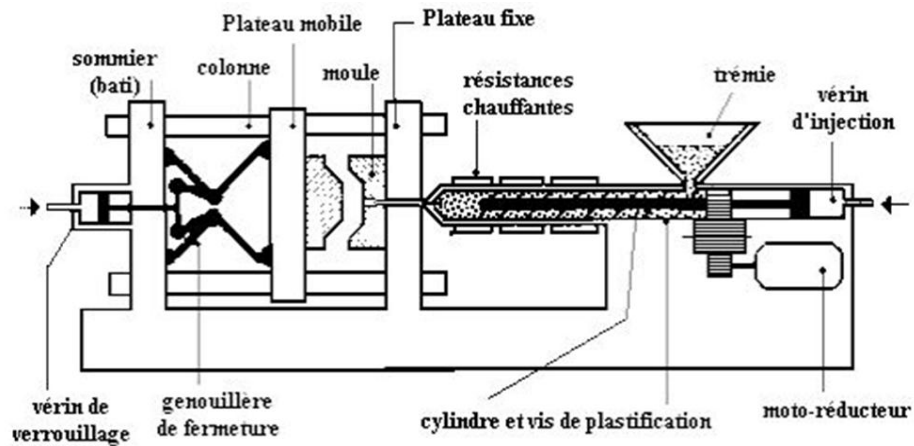


Figure I.9: Schéma d'une presse à injecter. [6]

1. Vis de plastification

Les machines d'injection plastique doivent avoir la vis de plastification comme composant de base. C'est un composant du système de plastification, qui fond et homogénéise la matière plastique avant l'injection dans le moule.

Un cylindre chauffé abrite la vis de plastification, une vis sans fin qui tourne. L'acier qui a été traité pour résister aux températures élevées et aux contraintes mécaniques est généralement utilisé dans sa construction. Elle assure deux fonctions essentielles: le transport et plastification de la matière, et l'injection sous pression de la masse fondue dans le moule.

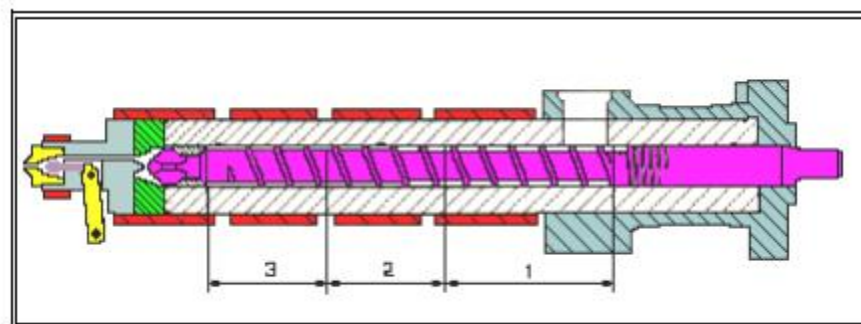


Figure I.10: Schéma d'une mono-vis.

La vis est composée de trois zones distinctes (figure I.10), chacune ayant une fonction spécifique dans le processus de plastification [4].

1) Zone d'alimentation: Reçoit la matière plastique sous forme de granulés ou de poudre et se situe en bout de vis. La pression et la température du matériau sont élevées au fur et à mesure de son déplacement le long de la vis dans la zone de compression, qui vient après la zone d'alimentation.

2) Zone de fusion: est le centre de la vis, où la matière plastique fond en raison de la chaleur produite par le frottement entre la vis et le cylindre. Pour faciliter le mélange et l'homogénéisation des matériaux, cette zone est fréquemment équipée d'ailettes spécialisées.

3) Zone de dosage: est chargé de diriger le flux de plastique fondu qui sera injecté dans le moule. La quantité de matière fondue qui sort de la vis peut généralement être contrôlée par une vanne ou une vis à section conique dans cette zone.

En assurant une fusion homogène de la matière et en gérant son écoulement, la vis de plastification joue un rôle crucial dans le processus d'injection plastique. Sa conception et ses caractéristiques peuvent varier en fonction du type de matière plastique utilisée et des spécificités de la machine d'injection.

2. L'unité de fermeture et de verrouillage

L'ensemble assurant la fermeture et le verrouillage de la partie fixe peut contribuer à sécuriser la mobilité du moule. Avec des options pour les modes de fonctionnement mécanique, hydraulique ou hybride, sa conception robuste peut résister à la pression d'injection [1]. On trouve, ainsi, trois types d'unité de fermeture:

a. Unité de fermeture mécanique

Les interrupteurs à bascule sont utilisés pour un mouvement rapide du composant mobile. En profitant de la force de traction de la colonne de la machine, le moule est serré. Bien qu'il soit simple, ce système a une force de fermeture inégale et est difficile à calibrer [4]. Même si un voile assure les mouvements, l'effort de blocage est assuré par les genoux (cambrure), c'est pourquoi il est qualifié de mécanique [7].

b. Unité de fermeture hydraulique

Une unité d'arrêt hydraulique est un outil utilisé dans les systèmes hydrauliques pour réguler le débit de fluide hydraulique. En règle générale, il se compose d'une vanne de fermeture, d'un actionneur hydraulique et d'un contrôleur (Figure I.11).

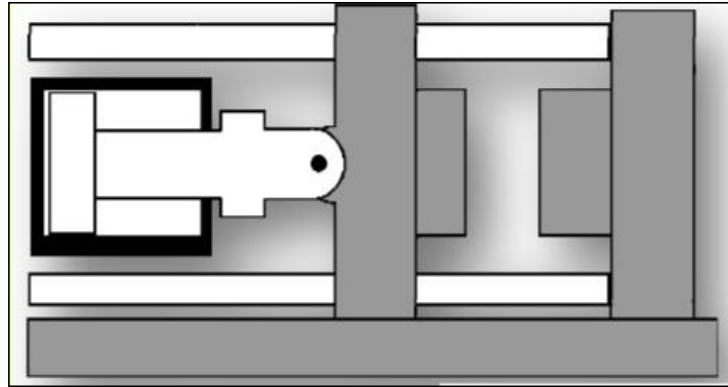


Figure I.11: Fermeture hydraulique. [4]

c. Unité de fermeture mixte

Ce mode de fabrication de la fermeture et de verrouillage représente un compromis entre les procédés mécaniques et hydrauliques. Les mouvements d'ouverture et de fermeture se font uniquement avec les genoux, tandis qu'un ou plusieurs voiliers hydrauliques assurent le verrouillage.

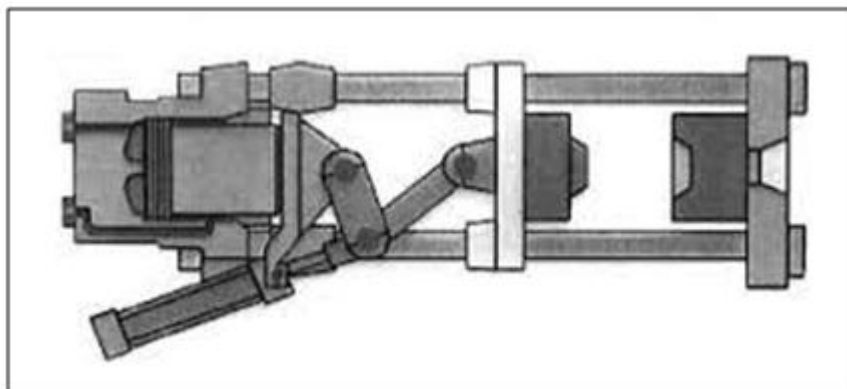


Figure I.12: Unité de fermeture mixte [4]

I.4.2 Conception des moules

La production par injection doit commencer par la conception du moule. Les moules sont des outils qui permettent de produire des pièces en grande quantité et avec une grande précision ; par conséquent, une planification minutieuse doit entrer dans leur conception pour assurer une production de haute qualité et économique [9]. Voici les étapes de base de la conception des moules:

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

1st. Définition des spécifications: La définition du cahier des charges du moule, qui comprend les dimensions de la pièce à mouler, sa matière, la quantité à produire, la durée de vie prévue du moule, les niveaux de précision requis, etc., est la première étape du processus de conception.

2nd. Conception préliminaire: Une fois les spécifications établies, une conception de moule grossier est créée. Cette conception préliminaire tient compte des paramètres du moule, du nombre de cavités, du système d'éjection, du type de refroidissement, etc.

3rd. Conception détaillée: Une conception approfondie du moule est créée après l'esquisse initiale. Cette étape comprend l'élaboration des plans de fabrication, la spécification des matériaux à utiliser, le choix des composants standards (comme les noyaux et les inserts), la conception du système d'injection, la conception des canaux de refroidissement, etc.

4th. Fabrication du moule: Le moule est construit après l'achèvement de la conception détaillée. Les différents composants du moule sont usinés et assemblés lors de cette étape à l'aide de machines-outils.

5th. Tests et ajustements: Des tests sont effectués pour garantir la qualité de la pièce produite après la création du moule. Pour améliorer la qualité de la pièce produite, le moule peut devoir être modifié.

6th. Maintenance et réparation: Les moules doivent être régulièrement entretenus pour garantir leur robustesse et leur efficacité. Pour restaurer les performances optimales du moule en cas de dommage, des réparations peuvent être effectuées.

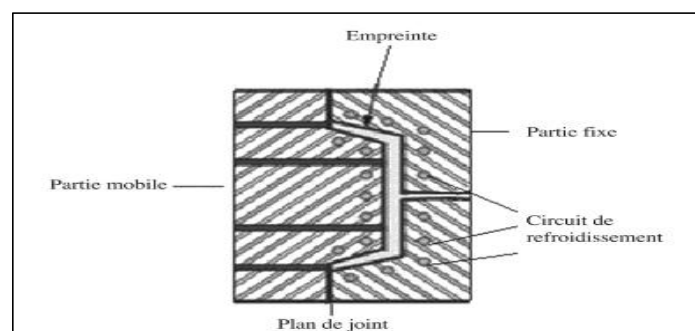


Figure I.13: Moule vu eu coupe. [9]

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

Il faut des connaissances et de l'expérience pour concevoir avec succès un moule car il s'agit d'un processus compliqué. Pour garantir la qualité et l'économie de la production de fonderie, les moules doivent être soigneusement conçus.

On trouve, ainsi, plusieurs types de moules.

1) Moule à tiroir

Suite au fait qu'il contient une ou plusieurs plaques qui peuvent être retirées pour faciliter le retrait des pièces moulées, ce type de moule est appelé « à tiroir » (figure I.14). Ces moules sont fréquemment utilisés pour les pièces présentant des caractéristiques géométriques complexes qui ne peuvent pas être produites avec un moule monobloc typique, comme des trous, des coins ou des bords arrondis [9].

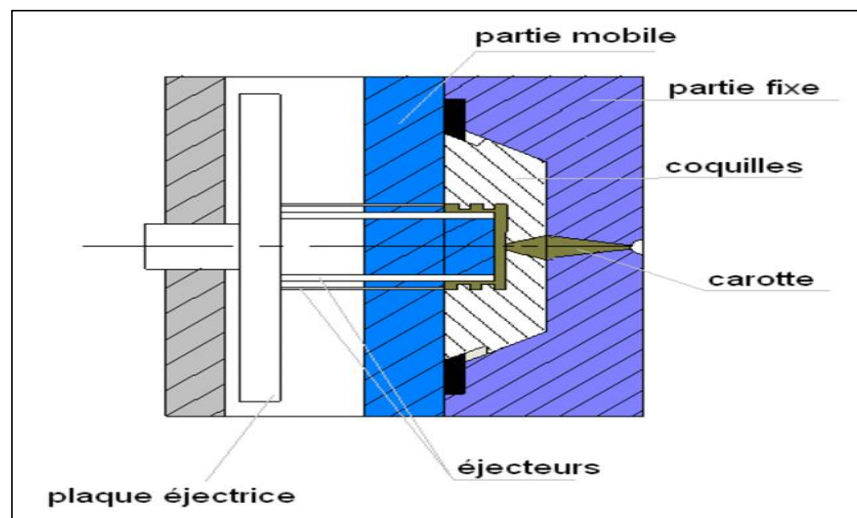


Figure I.14: Mole à tiroir. [6]

2) Moule à deux plaques

Les pièces en plastique moulées par injection peuvent être produites à l'aide d'un moule à deux plaques (figure I.15). Il est composé de deux plaques, une plaque fixe et une plaque mobile, qui s'ouvrent et se ferment pour permettre l'injection de matière plastique dans la cavité du moule.

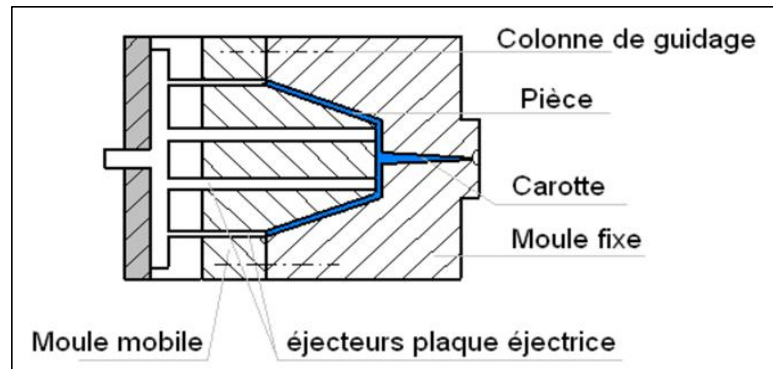


Figure I.15: Moule simple à deux plaques. [6]

3) Moule à trois plaques

Un moule à trois plaques de moulage par injection est un type particulier de moule utilisé dans la procédure de moulage par injection pour créer des composants en plastique ou en métal. La figure I.16 illustre un moule typique à trois plaques. Trois plateaux mobiles composent ce type de moule: un plateau fixe (pièce 3), un plateau mobile (pièce 1) et un plateau intermédiaires (pièce 2). Les cavités du moule sont situées sur la plaque intermédiaire, qui est fixée à la plaque mobile. De la matière peut être injectée dans les cavités lorsque la plaque mobile se déplace en direction de la plaque fixe tandis que la plaque intermédiaire reste fixe. Suite au refroidissement du matériau, la plaque mobile se retire, laissant la plaque intermédiaire et la plaque fixe ensemble. Après cela, la plaque intermédiaire peut être retirée pour libérer la coulée.

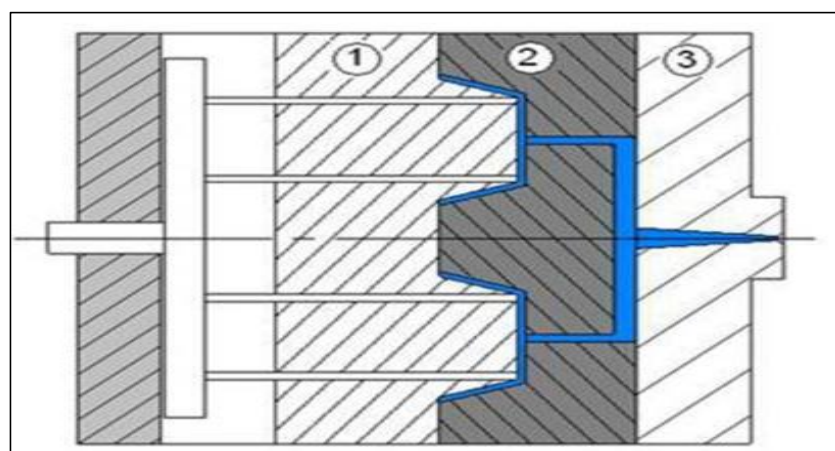


Figure I.16: Moule à trois plaques. [6]

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

Contrairement aux moules à deux plaques, le moule à trois plaques offre une plus grande flexibilité de conception et permet la création de canaux d'éjection plus efficaces pour un retrait plus simple des pièces pendant le moulage. Cela permet la production de pièces plus complexes et de plus grandes tailles. Cependant, par rapport aux moules à deux plaques, il est également plus difficile et coûteux à fabriquer [9].

4) Moule à canaux chauffants

Un moule à canaux chauds est un type spécifique de moule utilisé dans le processus de moulage par injection qui permet d'injecter du plastique fondu dans des canaux chauds intégrés au moule. Ces canaux chauds aident à préserver la température constante du plastique fondu, ce qui peut améliorer la précision et le calibre du produit final.

Les composants en plastique de haute qualité, comme ceux des automobiles ou des appareils électroniques, sont souvent produits à l'aide de moules à canaux chauds. De plus, ils peuvent être employés à des applications médicales qui nécessitent des composants précis et stériles. Cependant, par rapport aux moules standard, les moules à canaux chauds sont plus complexes, coûteux et nécessitent un entretien régulier [9].

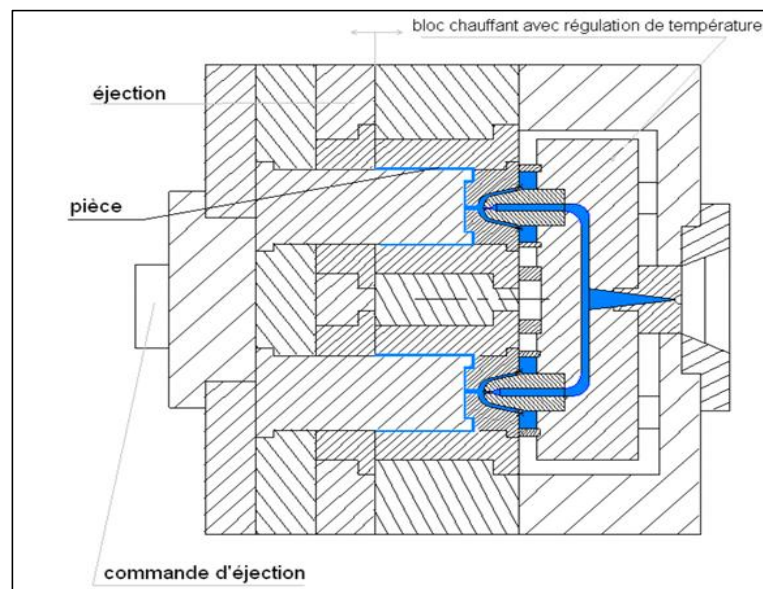


Figure I.17 : Moule à canaux chauffants. [6]

I.5 Cycle de moulage par injection

Le cycle d'injection se décompose en cinq (05) phases essentielles:

I.5.1 Phase de dosage

Les particules de polymère tombent de la trémie dans l'ensemble de vis cylindrique. Ils sont ensuite progressivement fondus par l'action combinée du collier chauffant la gaine, du cisaillement de la matière et du frottement entre les particules (tant entre elles que contre l'outil) provoqué par la rotation de la vis. La matière fondue est ensuite acheminée devant la vis (via un clapet anti-retour), dans l'espace créé par le recul progressif lors de la rotation de la vis (figure I.18).

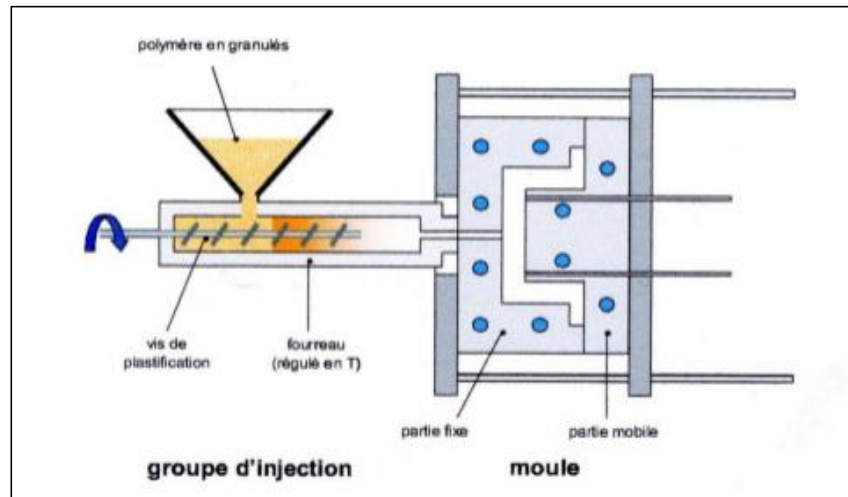


Figure I.18: La phase de dosage. [7]

I.5.2 Phase d'injection

Le mouvement de translation de la vis activé par vérin est responsable du déplacement du polymère fondu à travers les canaux du réservoir au moule. la matière ne peut pas revenir grâce au clapet anti-retour.

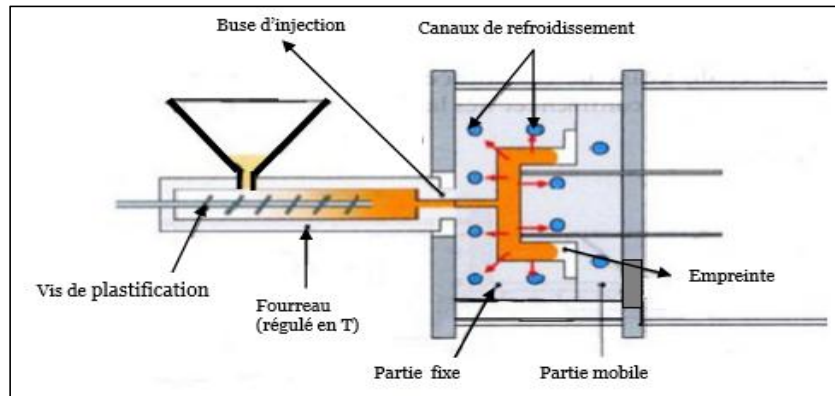


Figure I.19: La phase d'injection. [7]

I.5.3 Phase de compactage

Le moule est maintenu fermé à ce moment par pression tandis que la vis comprime le matériau. Pour compenser le rétrécissement du matériau lors de son refroidissement, le polymère fondu doit continuer à être injecté dans la cavité du moule jusqu'à ce qu'une pression uniforme soit atteinte. La figure I.20 schématise cette phase.

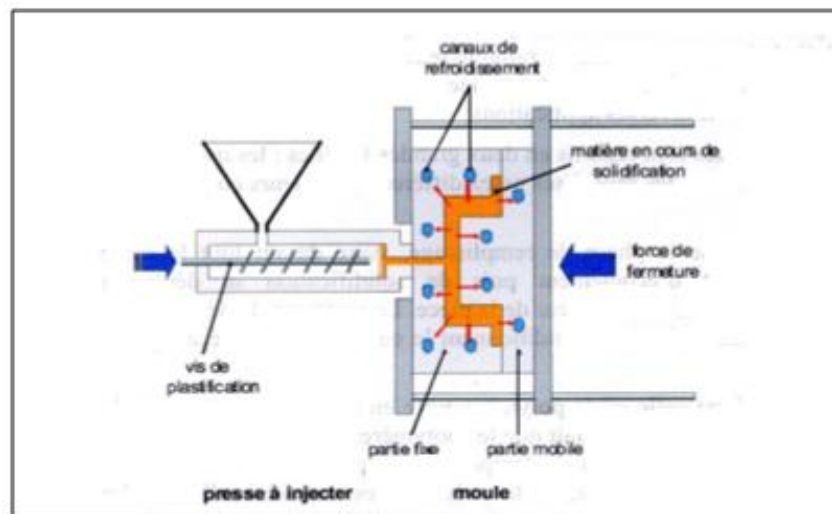


Figure I.20: La phase de compactage. [7]

I.5.4 Phase de refroidissement

Le matériau plastique (polymère) fondu à l'intérieur du moule est refroidi et durcit. Cela peut être fait naturellement ou à l'aide de systèmes de refroidissement, tels que des canaux de refroidissement intégrés dans le moule.

I.5.5 Phase d'éjection

Un système d'éjection, qui peut être un système mécanique, pneumatique ou à griffes, est utilisé pour retirer la pièce en plastique du moule.

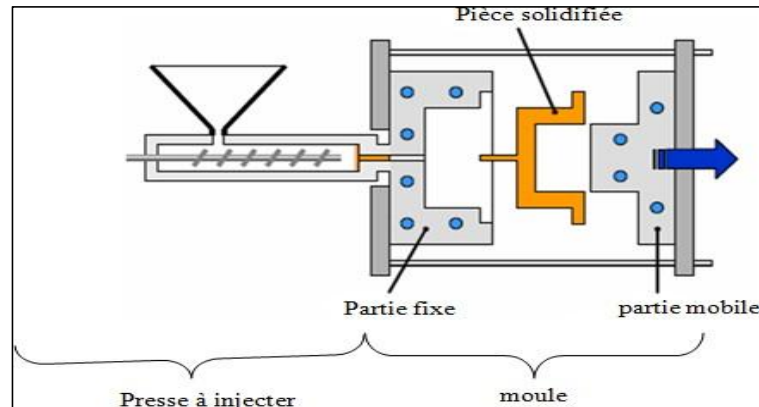


Figure I.21: La phase d'éjection. [7]

La durée nécessaire pour chaque étape peut varier en fonction de la taille et de la complexité de la pièce, du type de plastique utilisé et des exigences du processus [8].

I.6 Conclusion

L'injection plastique est l'un des procédés les plus efficaces pour produire en série des pièces microtechniques. Nous étudions des pièces injectées, concevons des outillages d'injection et les mettons en œuvre du fait de l'importance accordée à ce procédé dans le domaine d'industrie moderne.

Le principe de fonctionnement de ce procédé permet d'obtenir des pièces dont l'épaisseur est comprise entre 0.4 et 6 mm avec des spécificités géométriques complexes.

L'analyse de ce procédé de fabrication permet de préserver les avantages suivants:

- Un processus entièrement simulable.

En fait, les logiciels actuels simulent avec précision les flux. De ce fait, il est possible d'identifier les défauts potentiels dès le départ et de modifier la conception du moule ou de la pièce pour les réduire ou les éliminer.

- Respect de l'aspect de la surface et précision des dimensions.

La maîtrise des épaisseurs rendue possible par ce procédé facilite l'assemblage des pièces. De plus, selon la finition appliquée, la surface des composants peut être travaillée très précisément pour obtenir le toucher et l'apparence souhaités.

Chapitre I : Recherche bibliographique sur le moulage par injection

➤ Souple et adaptable.

En raison de la variété de couleurs et de matériaux qui peuvent être utilisés, l'injection est un processus flexible. Par exemple;

- Pour injecter beaucoup de matières à la fois.
- Utilisez différents tons sur une seule pièce.
- Combinant des étiquettes directement imprimées sur des composants ou des emballages.

Ces précieux avantages sont accompagnés de plusieurs inconvénients les plus important sont:

➤ Un outil coûteux.

Les coûts associés à la conception et à la fabrication des moules doivent également être pris en compte lors de la fabrication des moules d'injection plastique.

- Conception et usinage du moule,
- Propriétés dimensionnelles validée,
- Optimisation du moule pour le processus d'injection,
- Pour les pièces creuses, l'injection plastique est inappropriée.

L'injection plastique peut créer des pièces creuses, mais elle est plus coûteuse et difficile à réaliser. Le roto-moulage et le moulage par injection-soufflage sont préférés dans ce opération. On peut dire, d'une manière générale, que ce procédé de fabrication permet de produire très rapidement (en une seule opération) des articles de grande qualité, même lorsque les formes sont complexes, et dans des gammes de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes. Ainsi, il est utilisé dans de nombreuses industries différentes.

***Chapitre II: Initiations sur
l'optimisation***

II.1 Introduction

Les chercheurs sont longtemps éteints capables de déterminer l'unique solution permettant de répondre aux contraintes grâce à la compétition qui est constamment développé entre les divers acteurs sur le marché, Cela conduit au développement de modèles théoriques et de techniques pour traiter les problèmes d'optimisation. Cette évolution s'est accélérée de manière spectaculaire. A cette époque, les ingénieurs se trouvaient confrontés à des difficultés de taille et de Complexité croissantes, La résolution d'un problème d'optimisation consiste en la recherche de la meilleure solution pour la vérification d'un ensemble de contraintes et d'objectifs définis par les utilisateurs. Pour déterminer si une solution vaut mieux que l'autre, il faut qu'un critère de comparaison soit introduit dans le problème. C'est ainsi que la solution la plus performante, aussi connue sous le nom de solution optimale est la solution qui a obtenu le meilleur résultat par rapport au critère défini [10].

Le premier problème d'optimisation aurait été formulé par l'Euclide mathématicien au troisième siècle. Après trois siècles, Héron d'Alexandrie a énoncé les principes de la voie la plus courte de l'optique. Au 17ème siècle, l'apparition de calculs différentiels sous le patronage de Neverton et le Leibnitz, ainsi que la théorie nevertonienne des mécanismes, ont conduit à l'invention de première technique d'optimisation y compris le moyen itératif de Neverton de rechercher des extrêmes locaux de fonction. Au 18ème siècle, Euler et Lagrange ont développé un calcul variable, une branche d'analyses fonctionnelles dont l'objectif était d'obtenir une demande répondant le mieux aux critères. Ces derniers inventent une méthode d'optimisation fondamentale, appelée aujourd'hui multiplicateur de Lagrange. Au 19ème siècle, l'industrialisation de l'Europe s'intéressait de plus en plus aux mathématiques, et développait des modèles économiques qui devaient alors être optimisés [11].

L'optimisation est basée sur la transformation d'idées de problèmes de la conception optimale à des problèmes de minimisation. La construction d'un modèle approprié est le premier travail à faire, souvent c'est l'étape la plus importante dans le processus d'optimisation. La connaissance et l'intuition du modélisateur sont importantes aussi bien dans la formulation d'un modèle avec un degré approprié de complexité que dans l'interprétation des résultats du processus d'optimisation. Une fois le modèle formulé, un algorithme d'optimisation peut être utilisé pour résoudre le problème. Il n'existe pas d'algorithme d'optimisation universel. Il existe plutôt de nombreux algorithmes adaptés à des types spécifiques de problèmes d'optimisation. [12].

II.2 Définitions

Les problèmes peuvent s'exprimer en définissant une fonction-objectif qui vise à optimiser les variables impliquées dans un espace limité et souvent en cas de contraintes [13].

$$\begin{cases} \text{Min} & f(x); \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Sous} & g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m_e \\ & h_j(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_n \\ & \text{avec } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

- $f(x)$ est le critère à minimiser et s'appelle fonction objectif ;
- x est le vecteur décision de n composants qui représentent les paramètres du problème à optimiser ;
- $g_i(x)$ et $h_i(x)$ représentent, respectivement, les contraintes d'inégalité et d'égalité ;
- x_{\min} et x_{\max} désignent les limites de domaine de décision ;

Le problème d'optimisation se pose alors par l'intermédiaire d'un ensemble des paramètres x^* lesquels a un minimum de valeur.

II.2.1 L'espace d'état

C'est le domaine des intervalles de définition également appelé espace de recherche, est l'ensemble de toutes les solutions possibles à un problème d'optimisation donné. Il s'agit d'un espace multidimensionnel qui peut être décrit par un ensemble de variables de décision et de contraintes qui définissent les limites et les exigences du problème, L'espace d'état d'optimisation peut être continu, discret ou une combinaison des deux. Il peut également être infini ou fini en fonction des limites et des contraintes définies dans le problème. La connaissance de l'espace d'état d'optimisation est importante pour la conception de l'algorithme d'optimisation et pour l'évaluation des performances de l'algorithme [12].

II.2.2 Variables d'optimisation

Ils sont des paramètres qui sont choisis pour minimiser (ou maximiser) une fonction-objectif donnée. Ces variables peuvent être des paramètres d'un modèle mathématique ou d'un algorithme d'optimisation, et leur sélection est cruciale pour atteindre un résultat optimal. Les variables utilisées dans un problème peuvent présenter une variété de caractéristiques, telles que des valeurs réelles, entières, booléennes, etc. Elles peuvent également représenter des données qualitatives [14].

II.2.3 Fonction-objectif

Les algorithmes d'optimisation ont généralement besoin de définir un critère pour rendre en fonction de la quantité à optimiser, réfléchissez à la pertinence des solutions envisageables. C'est la fonction-objectif que l'algorithme doit converger vers sa valeur minimale ou maximale. La solution dépendra donc de la pertinence du "problème". Par conséquent, cette fonction doit exprimer les souhaits de l'utilisateur sous forme d'une analytique à variables multiples x_1, \dots, x_n . Sa définition peut être simplement analysée, ou il peut invoquer un modèle numérique [13].

II.2.4 Ensemble des contraintes

L'ensemble des contraintes définissent des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des équations d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche. La séparation entre les fonction-objectifs et les contraintes peuvent paraître artificielles car nous pourrions considérer qu'une contrainte est un objectif à atteindre mais elle se justifie de deux manières différentes. D'une part, les contraintes sont appliquées sur l'espace des solutions et d'autre part, et dans de nombreuses méthodes d'optimisation, les contraintes et les fonction-objectifs sont traités par des procédures différentes [12].

II.2.5 Méthodes d'optimisation

Il s'agit d'une recherche du point ou de l'ensemble de points dans l'espace des états possibles qui répondent le mieux à un ou certains nombre de critères. Ce dernier est nommé optimum ou meilleure valeur [12].

Le choix de la méthode d'optimisation à utiliser est souvent fait en fonction de la nature des variables, des domaines de définition et des critères d'optimisation [12].

La méthode essai/erreur est le moyen le plus traditionnel et instinctif utilisé pour résoudre le problème d'optimisation. Il corrige ses actes en fonction des résultats, jusqu'à ce qu'il parvienne à une solution acceptable. Cette méthode, apparemment simpliste, constitue la base de très nombreuses méthodes d'optimisation [12].

II.3 Classification des problèmes d'optimisations

Les divers problèmes d'optimisation rencontrés dans le quotidienne peuvent être classés de plusieurs manières ainsi les classifications les plus importantes sont :

II.3.1 Problèmes d'optimisation mono-objectif ou multi-objectif

Les problèmes mono-objectifs, sont définis par une unique fonction-objectif, tandis que les problèmes multi-objectifs impliquent la recherche d'un compromis entre plusieurs objectifs contradictoires. Dans certains cas, il est possible de reformuler un problème multi-objectif en une seule fonction-objectif qui combine les différents critères ou de les transformer en contraintes. Cependant, cette approche ne garantit pas toujours une efficacité optimale car la solution trouvée ne représente qu'un seul compromis [15].

II.3.2 Problèmes d'optimisation avec ou sans contraintes

Il est crucial de distinguer clairement les problèmes impliquant des contraintes sur les variables de décision. Ces contraintes peuvent varier de simples limites à des ensembles d'équations, qu'elles soient des égalités ou des inégalités. Parfois, il est possible de substituer une contrainte d'égalité dans la fonction-objectif pour s'en débarrasser. Il est important de noter que les problèmes avec contraintes sont plus complexes à résoudre et nécessitent l'utilisation d'algorithmes spécifiques [15].

II.3.3 Problèmes d'optimisation linéaire ou non linéaire

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés en deux catégories : linéaires et non linéaires. Dans un problème d'optimisation linéaire, la fonction-objectif et les contraintes sont linéaires, ce qui signifie que les variables de décision sont combinées linéairement. En revanche, dans un problème d'optimisation non linéaire, la fonction-objectif et/ou les contraintes présentent une relation non linéaire entre les variables de décision. Dans ce cas, les variables de décision sont impliquées de manière non linéaire dans la fonction-objectif et/ou les contraintes.

II.3.4 Problèmes d'optimisation continu ou discret

Les problèmes d'optimisation se divisent en deux catégories principales : les problèmes continus et les problèmes discrets. Les problèmes continus impliquent des variables réelles sur des intervalles continus, tandis que les problèmes discrets impliquent des variables discrètes ou entières. Pour résoudre les problèmes continus, on utilise des techniques comme

les méthodes de gradient, tandis que pour les problèmes discrets, on utilise des approches telles que la recherche exhaustive et la programmation linéaire entière [15].

II.4 Méthodes d'optimisations

Toutefois, il convient de marquer que de nombreuses méthodes d'optimisation ne sont valables que dans certains types de problèmes. Il est donc obligatoire de comprendre les caractéristiques du problème à résoudre afin de sélectionner les méthodes appropriées. Les problèmes d'optimisation peuvent être catégorisés en fonction des propriétés mathématiques de la fonction-objectif, des contraintes et des variables d'optimisation. Il existe également différentes manières de classifications possibles pour les méthodes d'optimisation.

- Méthode d'optimisation avec ou sans contrainte ;
- Méthode d'optimisation locale ou globale ;
- Méthode d'optimisation stochastique ou déterministe ;
- Méthode d'optimisation continue ou discrète.

Lorsqu'on aborde l'optimisation numérique multidirectionnelle, la distinction la plus significative se réside entre les problèmes qui comportent des contraintes et ceux qui n'en ont pas. Nous allons d'abord nous concentrer sur les méthodes déterministes qui commandent la connaissance de la fonction-objectif et de ses dérivées. Ces méthodes sont également communes sous le nom d'algorithmes classiques de minimisation sans contrainte et certaines d'entre elles servent de base aux algorithmes de minimisation pour les problèmes généraux avec contraintes. Nous passerons ensuite en revue les méthodes stochastiques pour lesquelles aucun calcul de dérivée n'est nécessaire, ainsi que les Méthodes probabilistes [13].

II.4.1 Méthodes déterministes

Elles sont des approches d'optimisation qui cherchent à minimiser une fonction en suivant une direction de recherche déterministe, souvent basée sur le gradient de cette fonction. Les Méthodes déterministes s'arrêtent généralement dès qu'un minimum local est atteint, ce qui peut conduire à une solution sous-optimale si la fonction a plusieurs minimums locaux.

La classification de ces méthodes peut être décomposée en plusieurs sous-catégories, telles que les méthodes heuristiques, les méthodes statistiques, les méthodes Branch&Bound, les méthodes mathématiques et les méthodes d'apprentissage automatique. Cette classification est présentée dans la figure II.1 [16].

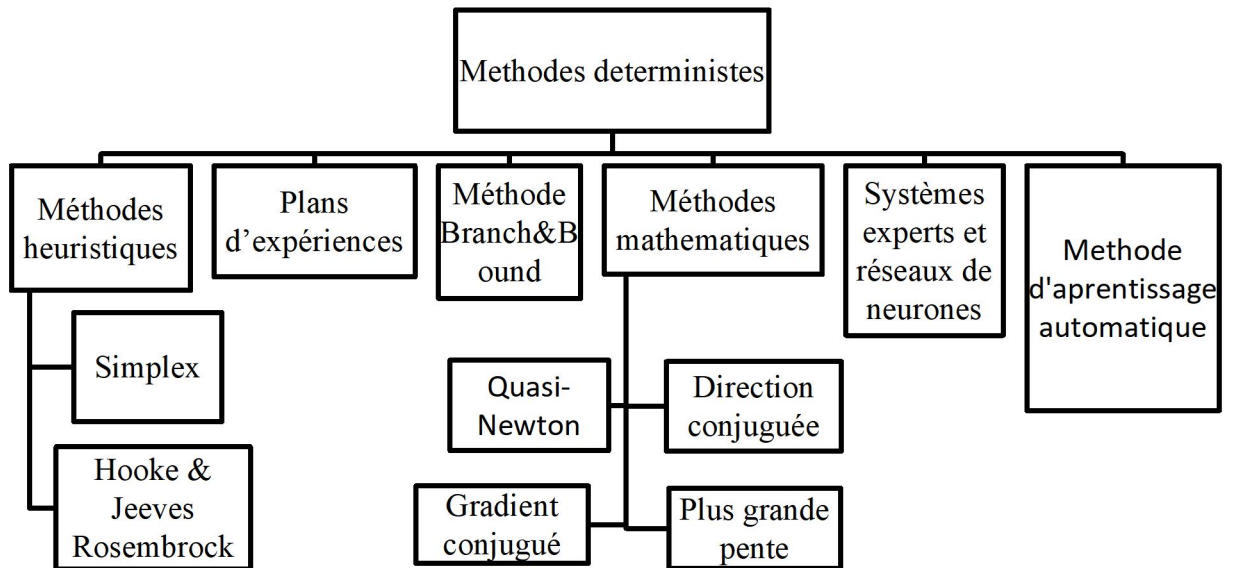


Figure II.1: Classification des méthodes d'optimisation déterministes. [16]

On peut trouver aussi d'autres classifications. En effet, nous présentons, dans ce paragraphe, les méthodes déterministes les plus utilisées.

1) Méthode du simplexe

L'algorithme du simplexe consiste à générer, à chaque étape, un ensemble de points en supprimant le point qui donne la plus grande valeur de f , et en calculant un nouveau point par une opération de réflexion. La position de ce point est ensuite ajustée par contraction ou expansion selon la valeur de la fonction-objectif en ce point. Quand on se rapproche de la valeur optimale et qu'aucune des opérations précédentes n'est efficace, les points sont contractés dans toutes les directions, en diminuant la zone de recherche [13].

2) Méthode de gradient

Les méthodes de gradient exploitent les dérivées premières d'une fonction-objectif continue et ses dérivées premières continues. Leur but est de trouver de manière itérative un point stationnaire, noté (x^*) , où le gradient est nul ($\nabla f(x^*) = 0$). La direction normalisée qui représente la plus forte décroissance de la fonction-objectif autour d'un point x est donnée par [16]:

$$d = - \frac{\nabla f(x)}{\|\nabla f(x)\|} \quad (\text{II.2})$$

3) Méthode des gradients conjugués

La méthode du gradient conjugué représente une amélioration de la méthode de la plus fort pente, qui consiste à suivre la direction opposée au gradient. Toutefois, cette méthode peut créer des directions de recherche orthogonales, ce qui a pour effet de ralentir la convergence de l'algorithme. La méthode de Fletcher et Reeves a été développée pour résoudre ce problème en déterminant la nouvelle direction de recherche à partir du gradient aux pas courant et précédent, ce qui permet de surmonter cette limitation et d'accélérer la convergence de l'algorithme [16].

Après avoir sélectionné un point de départ x_0 , nous calculons le gradient $\nabla f(x_0)$ en ce point. Étant donné que le gradient indique la direction de la plus grande augmentation de f , nous nous déplaçons d'une quantité λ_0 dans la direction opposée au gradient et définissons ainsi le point x_1 .

Cette procédure est répétée itérativement, générant les points x_0, x_1, \dots, x_k . De cette manière, à chaque étape, la distance entre le point d'indice k et l'optimum se réduit progressivement [12].

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - \lambda_0 \cdot \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|} \\ x_{k+1} = x_k - \lambda_k \cdot \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \quad \text{où } \forall k, \lambda_k \geq 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

λ_k est le pas de déplacement à chaque itération.

4) Méthode de Newton

La méthode de Newton fait partie des méthodes de descente. Ces derniers sont des méthodes qui cherchent à reproduire la méthode de Newton pour l'optimisation d'une fonction, en utilisant des minimisations successives de son approximation au second ordre. Elles ne nécessitent pas le calcul du Hessien, mais utilisent plutôt une approximation définie positive de celui-ci, qui peut être obtenue soit par la formule proposée par Davidon-Fletcher-Powell, soit par l'utilisation de dérivées secondes. En se basant sur cette approximation, on peut approcher la fonction-objectif par une fonction quadratique au voisinage d'un point en utilisant la formule de Taylor d'ordre 2 [16].

Chapitre II: Initiations sur l'optimisation

Soit f continue et dérivable, on cherche toujours à résoudre $f(x)=0$. Il est évident que si $h(x)$ est une fonction non nulle. Alors x est une solution de $f(x)=0$ si et seulement si x est un point fixe de : $g(x) = x + h(x)f(x)$ la méthode de Newton consiste alors à choisir la fonction $h(x)$ de telle sorte que la méthode des approximations successives appliquée à la fonction $g(x)$ soit d'ordre deux. C'est à dire tel que $g'(x^*)=0$. Ceci serait le cas si on choisit par exemple $h(x) = -\frac{1}{f(x)}$ on a alors l'algorithme de Newton suivant x_0 donné par [12]:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.4})$$

5) Programmation quadratique séquentielle

Cette méthode PQS a été créée par Schittkowski en 1983, comme une programmation quadratique séquentielle. Cette technique de programmation non-linéaire résout le problème en utilisant une séquence de problèmes de programmation quadratique, où une approximation quadratique de la fonction-objectif et des approximations linéaires des contraintes sont utilisées à chaque itération. Le Hessien est construit à l'aide de la méthode BFGS. Pour trouver le minimum de la fonction Lagrangienne, une analyse canonique est effectuée et un déplacement est effectué vers ce point [16].

II.4.2 Méthodes non déterministes (Stochastiques)

Ces méthodes d'optimisation ne requièrent pas le calcul du gradient de la fonction-objectif. La figure II.2 illustre une classification comportant les méthodes les plus connues dans cette catégorie. La plupart de ces algorithmes sont des méthodes d'optimisation globales. Ils reposent sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires, leur permettant ainsi de rechercher l'optimum global du problème. Bien qu'elles soient d'ordre zéro, ces méthodes nécessitent un grand nombre d'évaluations de la fonction-objectif pour parvenir à leurs résultats [13].

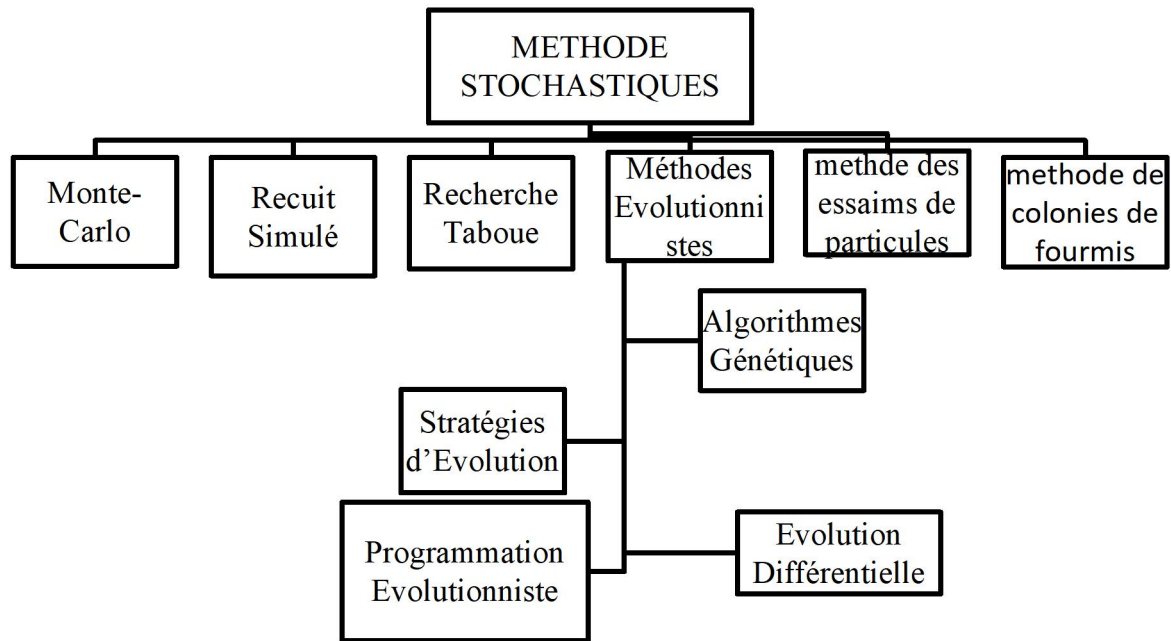


Figure II.2: Classification Méthodes d'optimisation stochastiques.[16]

1. Méthode Monte-Carlo

La méthode stochastique la plus simple est la méthode Monte-Carlo. Elle consiste à sélectionner une solution aléatoire à chaque itération, puis à évaluer la fonction-objectif en ce point. Si cette valeur est meilleure que l'optimum courant, elle est enregistrée avec la solution correspondante, et le processus d'exploration se poursuit jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient satisfaites. Les méthodes Monte-Carlo peuvent être utiles pour obtenir des informations initiales sur la forme de la fonction, et ainsi choisir un point de départ plus approprié pour un algorithme de recherche locale. Cependant, cette approche ne garantit pas la localisation de l'optimum global [16].

2. Recuit simulé

La méthode du recuit simulé est basée sur l'analogie avec le processus de recuit des matériaux cristallins. Qui consiste à chauffer un matériau puis le refroidir progressivement. À haute température, les particules peuvent se déplacer aléatoirement sur de grandes distances, mais à mesure que la température diminue, leur énergie et leur capacité de déplacement diminuent également. Ce processus de refroidissement permet d'obtenir des matériaux de

Chapitre II: Initiations sur l'optimisation

haute qualité et homogènes. En utilisant cette analogie dans une méthode d'optimisation, les déplacements des points sont déterminés par une probabilité qui dépend de la température du système. En acceptant une solution qui améliore la fonction-objectif, nous avons tendance à rechercher l'optimum dans le voisinage de la solution initiale, tandis que l'acceptation d'une solution moins favorable, nous permet d'explorer une plus grande partie de l'espace de solutions et d'éviter de nous enfermer trop rapidement dans la recherche d'un optimum local [12].

3. Les méthodes évolutionnistes

Cette catégorie de méthodes stochastiques s'inspirent de la théorie de l'évolution de Darwin, où les individus les mieux adaptés à leur environnement survivent et transmettent leurs caractéristiques génétiques à leur descendance. Contrairement aux techniques d'optimisation classiques qui explorent l'espace de recherche à partir d'un point unique, les méthodes évolutionnistes utilisent une population d'individus et les font évoluer à l'aide d'opérateurs de sélection, de mutation et de croisement aléatoires, conformément au schéma de la figure II.3 [16].

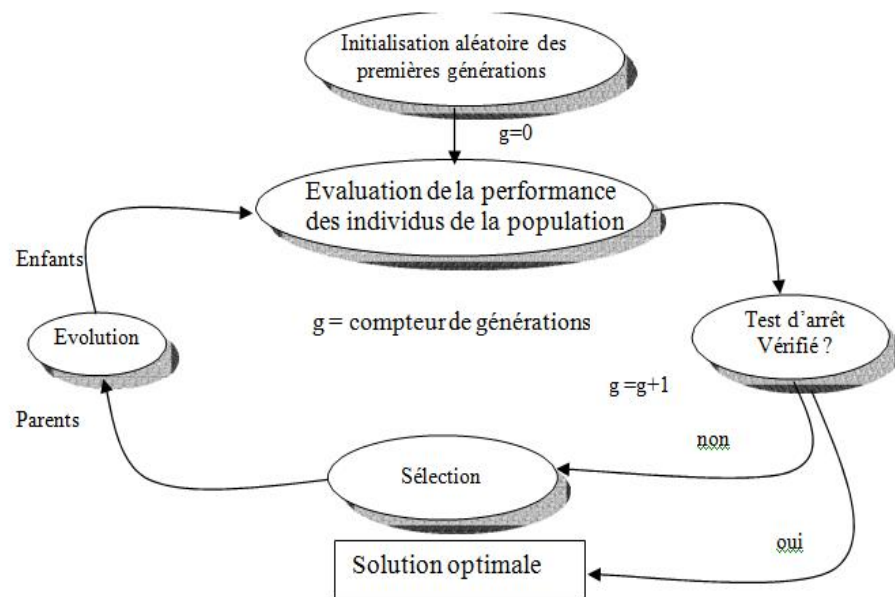


Figure II.3: Principe d'une méthode évolutionniste.[16]

4. Méthode des essaims de particules

L'optimisation par essaim de particules utilise un ensemble de individus initialement disposées de manière aléatoire et homogène, appelées particules, qui se déplacent dans l'hyper-espace de recherche et créent chacune une solution potentielle.

Chaque particule a la capacité de communiquer avec les particules de son entourage la mémoire de sa meilleure solution visitée. La particule va suivre une tendance faite par sa volonté de retourner vers sa solution optimale et son mimétisme par rapport aux solutions trouvées dans son voisinage à partir de ces informations.

L'ensemble des particules va généralement converger vers la solution optimale globale du problème traité à partir d'optimums locaux et empiriques [13].

5. Méthode de colonies de fourmis

La méthode des colonies de fourmis, également appelée optimisation des colonies de fourmis, est une méthode d'optimisation basée sur le comportement des colonies de fourmis dans leur recherche de nourriture. Elle repose sur la communication indirecte par phéromones entre les fourmis. Une fourmi retourne à la colonie en laissant une trace de phéromones lorsqu'elle trouve une source de nourriture. Ces phéromones guident les autres fourmis dans la même direction. Au fil du temps, les fourmis favorisent les chemins avec des phéromones plus élevées, ce qui amplifie le signal.

Dans le domaine de l'optimisation, la méthode des colonies de fourmis est employée pour résoudre des problèmes complexes de combinaisons, tels que le voyageur de commerce ou l'ordonnancement de tâches. Le principe consiste à représenter le problème sous forme d'un graphe, où les solutions envisageables sont les nœuds et les transitions entre les solutions sont les arêtes. Les fourmis sont ensuite simulées pour explorer le graphe et trouver la meilleure solution possible.

- a) Initialisation: Les fourmis sont placées au départ du graphe et les phéromones sont initialisées à une valeur faible sur toutes les arêtes.
- b) Construire des solutions: En utilisant des règles probabilistes basées sur la concentration de phéromones et les informations heuristiques sur le problème, les fourmis se déplacent d'un nœud à l'autre. En conséquence, elles créent des solutions partielles.

- c) Mise à jour des phéromones : Une fois que toutes les fourmis ont terminé leur parcours, les phéromones sont mises à jour en fonction de la qualité de la solution trouvée. Les concentrations de phéromones augmentent sur les chemins où les fourmis trouvent une bonne solution, mais diminuent sur les chemins où elles n'en trouvent pas.
- d) Évaporation des phéromones : Pour éviter une convergence prématurée vers des solutions sous-optimales, la concentration de phéromones est progressivement diminuée sur tous les bords du graphique.
- e) Critères d'arrêt : Le processus de création et de mise à jour de la solution se répète jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait, par exemple après un certain nombre d'itérations ou lorsque la meilleure solution cesse de s'améliorer [14].

II.5 Optimisation multi-objectif

Un grand nombre d'approches existent pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs. Certaines utilisent des connaissances du problème pour fixer des préférences sur les critères et ainsi contourner l'aspect multicritère du problème. Ces approches *non Pareto* ne traitent pas le problème comme un véritable problème multi-objectif. Elles cherchent à ramener le problème initial à un ou plusieurs problèmes mono-objectifs. Par opposition aux méthodes *non Pareto*, les approches *Pareto* ne transforment pas les objectifs du problème.

Parmi les méthodes *non Pareto* nous citons [18]:

II.5.1 Méthode d'agrégation des objectifs

La méthode initiale dont nous allons discuter est également la plus simple. Elle implique de transformer un problème multi-objectif en un problème à un seul objectif en agrégeant les différents critères d'optimisation sous la forme d'une somme pondérée. Soit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } \sum_{i=1}^m w_i \cdot f_i(x) \quad \text{où } w_i \in [0,1] \quad \text{et } \sum_{i=1}^m w_i = 1 \\ \text{Avec: } \vec{x} \in X, \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

X : représente le domaine réalisable.

Les w_i : appelés poids, peuvent être normalisés sans perte de généralité.

Il est clair que la résolution d'un problème pour un vecteur de poids fixe ne permet de calculer que quelques solutions Pareto optimales. Pour obtenir un ensemble contenant un grand

Chapitre II: Initiations sur l'optimisation

nombre de solutions compromis, il faut résoudre plusieurs fois le problème en changeant à chaque fois les valeurs du vecteur de poids.

L'inconvénient de cette méthode est dû au fait que pour avoir un compromis diversifié, les différents vecteurs de poids doivent être choisis judicieusement. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance du problème [18].

II.5.2. L'approche Min-Max

Cette méthode implique de convertir le problème multi-objectif en un problème à objectif unique dans lequel l'objectif est de minimiser l'écart relatif par rapport à un point de référence appelé but. Ce point de référence est déterminé par la méthode ou le décideur. Il y a différentes façons de mesurer la distance entre le point de référence (but) et un autre point, notamment en utilisant des normes. Une norme est définie comme suit:

$$L_r(\vec{f}(\vec{x})) = \left[\sum_{i=1}^m \| B_i - f_i(\vec{x}) \|^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad (\text{II.6})$$

Dans cette méthode, le point de repère a une importance cruciale. S'il est mal sélectionné, la recherche peut devenir extrêmement ardue [18].

II.5.3 L'approche but à atteindre

Cette méthode, similaire à l'approche du min-max, se sert d'un point de référence pour guider la recherche. En introduire une direction de recherche. Bien déterminé Contrairement au min-max qui utilise des normes pour quantifier la distance par rapport au point de référence, cette approche se base sur des contraintes pour définir l'objectif à atteindre. Cette approche peut être présentée par le système mathématique suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser : } \lambda \\ \text{tel que } f_1(\vec{x}) - w_1 \cdot \lambda \leq B_1 \\ \quad \cdot \\ \quad \cdot \\ f_m(\vec{x}) - w_m \cdot \lambda \leq B_m \\ \text{et que } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ \text{avec } \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^n, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^q \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

En réduisant λ au minimum et en respectant toutes les contraintes, la recherche sera dirigée vers l'objectif B et se terminera au point A, qui se situe dans la zone de compromis [18].

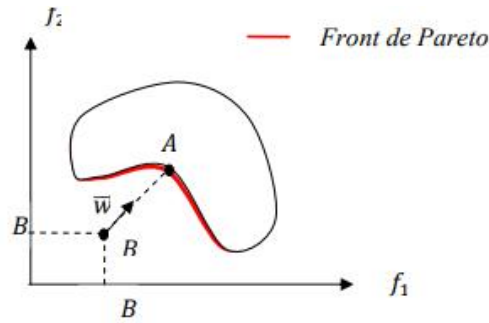


Figure II.4: Interprétation graphique de l'approche but à atteindre. [18]

II.5.4 L'approche par ϵ _contrainte

Dite méthode du compromis cette approche transforme un problème d'optimisation multi-objectif en un problème simple objectif consiste à convertir $m-1$ des m objectifs en contraintes et à optimiser l'objectif restant de manière séparée. Le problème peut être réécrit de la manière suivante:

$$\begin{cases} \text{Minimiser } f_1(x) \\ \text{Telque : } f_2(x) \leq \epsilon_2 \dots f_m(x) \leq \epsilon_m \\ x \in X \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Cette méthode présente des avantages par rapport à l'approche précédente lorsqu'il s'agit de problèmes non convexes. Cependant, elle présente plusieurs désavantages, notamment la complexité de la formulation des préférences de l'utilisateur, qui requiert une compréhension approfondie du problème initial [18].

II.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire les diverses méthodes numériques. Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation, chacune adaptée à différents types de problèmes et conditions. Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes d'optimisation linéaire et les méthodes d'optimisation non linéaire. Les problèmes d'optimisation linéaire se définissent par une fonction-objectif linéaire et des contraintes qui sont également linéaires. L'objectif des méthodes d'optimisation linéaire est de déterminer la meilleure valeur possible pour un ensemble de variables de décision. Les problèmes d'optimisation non linéaire se caractérisent par l'utilisation d'une fonction-objectif qui n'est pas linéaire. Les méthodes d'optimisation non linéaire sont employées pour rechercher les solutions optimales dans de telles situations.

Les approches non Pareto sont les dernières méthodes de résolution présentées dans ce chapitre. Un problème d'optimisation multi-objectif est transformé en un ou plusieurs

Chapitre II: Initiations sur l'optimisation

problèmes avec un seul objectif. Que ce soit sous forme d'une somme pondérée ou sous une distance an un objectif spécifique. Cependant, ces méthodes présentent également des désavantages. Certaines d'entre elles ne sont pas en mesure de traiter de manière exhaustive des problèmes non convexes et sont donc très sensibles à la forme du front de *Pareto*.

***Chapitre III: Optimisation
du procédé moulage par
injection***

III.1 Introduction

L'optimisation du processus de moulage par injection est une méthode visant à améliorer l'efficacité, la qualité et la rentabilité de la fabrication. Une conception optimisée du moule peut réduire les défauts et les problèmes lors de la phase de moulage. Certains polymères nécessitent des paramètres de moulage spécifiques pour obtenir des résultats optimaux. Ces paramètres peuvent varier en fonction du matériau utilisé et de la géométrie du produit.

L'utilisation de logiciels de simulation de moulage par injection peut être bénéfique pour déterminer les meilleurs paramètres. L'inspection visuelle, les tests de résistance et d'autres méthodes d'essai peuvent être utilisés pour évaluer la qualité du produit fini. Un entretien régulier du moule permet d'améliorer sa durée de vie et la qualité du produit. Des opérateurs qualifiés sont également importants pour optimiser le processus de moulage.

En optimisant ces différentes étapes du processus de moulage par injection, il est possible d'accroître la productivité, de réduire les coûts de production et d'obtenir des produits finis de meilleure qualité. Différents phénomènes physiques se produisent à différentes étapes du processus de moulage par injection. Lors du remplissage, et dans des conditions extrêmes telles qu'un taux de cisaillement élevé, une vitesse élevée et une augmentation de la pression, la rhéologie des polymères à l'état fondu joue un rôle essentiel. La présence de la pression de compactage pendant le cycle nécessite la prise en compte de la compressibilité dans les phénomènes physiques impliqués.

III.2 Modélisation de procédé de moulage par injection

Comme mentionné précédemment, l'optimisation de certaine étape du processus est cruciale pour garantir que le cycle d'injection se déroule correctement. Cependant, toute erreur commise dans l'une de ces étapes peut affecter l'ensemble du cycle, mettant en péril son bon fonctionnement global. Les paramètres d'entrée de la modélisation du processus de moulage par injection incluent la configuration géométrique du moule et du produit, les conditions d'injection telles que la température, le temps de remplissage et le débit, ainsi que les propriétés spécifiques du matériau utilisé. En ce qui concerne les paramètres de sortie de la modélisation, ils comprennent la pression interne du moule, la vitesse d'injection du matériau, le taux de cisaillement qui évalue la déformation du matériau, la position du front de remplissage à un instant donné et la température du matériau tout au long du processus de moulage. Pour assurer le bon fonctionnement du processus d'injection, il est essentiel d'optimiser chaque étape du cycle.

III.2.1 La phase de remplissage

Au cours de cette étape, les contraintes exercées sont peu élevées car il s'agit simplement de surmonter les pertes de charge. En revanche, les vitesses dans le matériau sont élevées par rapport aux débits d'injection généralement utilisés dans ce procédé et pour les polymères. La modélisation du remplissage de la cavité par le polymère fondu repose sur les principes de la thermodynamique des milieux continus

La simulation du remplissage est basée sur trois principes fondamentaux de la mécanique des milieux continus :

- 1/ La conservation de la masse, exprimée par l'équation de continuité.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

- 2/ L'équation de l'équilibre dynamique est une manifestation de la conservation de la quantité de mouvement.

$$\text{div}[\sigma] + \rho(\vec{f} - \vec{g}) = 0 \quad (\text{III.2})$$

- 3/ La conservation de l'énergie qui se traduit par l'équation de la chaleur :

$$\rho \cdot c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \text{grad}T \right) = K \Delta T + W \quad (\text{III.3})$$

III.2.2 La phase de compactage

Les matériaux composites à base de polymères nécessitent une étape de compression et de consolidation pour obtenir les propriétés mécaniques requises. Cette phase a pour objectifs d'éliminer les espaces vides et d'augmenter la densité du matériau afin d'atteindre les propriétés mécaniques désirées.

Les modèles utilisés pour cette phase sont typiquement des modèles de type « couches minces » qui reposent sur les hypothèses de Hèle-Shaw. L'analyse mathématique de cette étape du processus de fabrication est facilitée par ces présomptions qui traitent le matériau moulé comme une structure mince et plane. Cette loi est donnée par :

$$\frac{\partial P}{\partial t} \int_{-h}^h \rho x \, dx - \int_{-h}^h \rho \alpha \frac{\partial T}{\partial t} dz - \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{III.4})$$

Avec:
$$S = \int_{-h}^h \rho \left(\int_0^z \frac{z}{\mu} dz \right) dz \quad (\text{III.5})$$

Un terme qui tient compte de la compressibilité du matériau est également inclus dans ces modèles. Le terme "compressibilité" décrit la capacité d'un matériau à se contracter ou à se déformer en présence d'une force extérieure. À l'aide de cette phrase, il est possible de tenir compte des changements de volume ainsi que de l'impact de la compression sur la répartition des charges dans un matériau.

Il est important de noter que les modèles utilisés dans la phase de compactage/maintenance peuvent changer en fonction des propriétés uniques du matériau, des circonstances de fabrication et des résultats souhaités. Il est possible de simuler et d'améliorer cette étape de la production en utilisant une variété de méthodes mathématiques et de techniques de modélisation.

III.2.3 La phase de refroidissement

Comprendre et optimiser le comportement thermique du matériau lors de la production nécessite de modéliser la phase de refroidissement du processus d'injection plastique. Cela permet l'analyse et la prévision des phénomènes liés au refroidissement comme la solidification, la contraction, les contraintes résiduelles et la déformation ainsi que l'optimisation des paramètres de refroidissement pour produire des pièces de haute qualité.

La modélisation de cette phase de refroidissement en injection plastique peut se faire de différentes manières :

a) Modèles analytiques

Ces modèles simplifiés sont basés sur des équations qui décrivent le transfert de chaleur pendant le refroidissement. Ils prennent en compte des éléments tels que la température du moule, la géométrie de la pièce et la conductivité thermique du matériau. Bien qu'ils soient généralement limités à des géométries et des conditions de refroidissement simples, les modèles analytiques offrent des résultats rapides.

b) La modélisation par éléments finis

Elle est une méthode plus sophistiquée qui répartit la pièce en éléments discrets, permettant de prendre en compte des géométries complexes et des conditions de refroidissement inégales. Pour déterminer les distributions de température dans la pièce pendant le refroidissement, des solutions numériques des équations de transfert de chaleur sont utilisées. Bien qu'elles nécessitent plus de ressources de calcul, les méthodes par éléments finis offrent une plus grande précision.

c) Modèles de simulation d'injection plastique

Certains programmes de simulation d'injection plastique intègrent des modules de modélisation thermique qui permettent de prévoir le comportement du matériau lors du processus de refroidissement. Ces modèles combinent des méthodes analytiques ou par éléments finis avec des informations spécifiques au procédé d'injection matière et plastique. Ils peuvent fournir des détails complets sur les vitesses de refroidissement, les contraintes thermiques, les contraintes, etc.

Il est important de noter que la modélisation de la phase de refroidissement est une tâche difficile nécessitant une connaissance précise des propriétés thermiques du matériau, des conditions de refroidissement du moule et des paramètres du processus d'injection plastique. Pour garantir l'exactitude des modèles, ceux-ci doivent faire l'objet d'une validation expérimentale.

En conclusion, des modèles analytiques, des techniques d'éléments finis ou des logiciels de simulation spécialisés peuvent tous être utilisés pour modéliser la phase de refroidissement en injection plastique. Le choix dépendra de la complexité de la géométrie de la pièce, des conditions de refroidissement et des objectifs de modélisation. Chaque approche a des avantages et des limites.

III.3 Modélisation du problème d'optimisation

Optimiser le procédé de moulage par injection est crucial pour assurer une production efficace et de qualité supérieure. Cela implique d'améliorer la qualité économique et technique, en se concentrant sur une analyse approfondie des différents critères. Divers paramètres ont une incidence sur le poids de la pièce moulée, notamment le temps de remplissage (PT), la vitesse de remplissage (IV), la pression de compactage (PP) et la température du moule (MT). Aussi, la qualité des pièces moulées par injection est influencée par divers éléments, notamment la conception de la pièce, la sélection des matériaux, le processus de fabrication et les paramètres de moulage. Plusieurs facteurs jouent un rôle clé dans la qualité finale des pièces moulées par injection.

En plus de ces paramètres, nous trouvons la consommation d'énergie qui fait référence à la quantité d'énergie requise pendant la fabrication des pièces en plastique par injection. C'est un élément crucial à considérer pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les coûts de production. Plusieurs facteurs peuvent influencer la consommation d'énergie dans ce processus tels que la puissance de la machine d'injection, l'efficacité énergétique de la machine, le processus de chauffage et de refroidissement.

III.3.1 Variables d'optimisation

Pour obtenir des résultats de moulage optimaux, tels que des pièces de qualité supérieure, des temps de cycle efficaces et une productivité maximale, les variables de cycle de moulage par injection sont ajustées et optimisées. Voici quelques unes des variables les plus fréquemment contrôlées dans ce processus :

1. Vitesse D'injection

La vitesse à laquelle le matériau plastique est injecté dans le moule pendant le processus de moulage par injection est appelée vitesse d'injection. Elle affecte la qualité de la pièce, la distribution du matériau et la formation de défauts, ainsi que le résultat final du moulage.

Il est crucial de régler correctement la vitesse d'injection en fonction de divers facteurs, notamment le type de matériau plastique, la géométrie de la pièce, la viscosité du matériau et la complexité du moule. Une vitesse d'injection trop élevée peut entraîner des problèmes tels que des lignes de soudure, les marques de flux et une mauvaise distribution du matériau. Une vitesse d'injection trop faible, d'autre part, peut entraîner un remplissage incomplet du moule, des défauts de surface et des temps de cycle prolongés.

2. Température de la buse d'injection

La température de la buse d'injection est ajustée pour atteindre la bonne température de fusion de la matière plastique. Cela peut également affecter la viscosité du matériau et l'écoulement du matériau à l'intérieur du moule. Pour assurer un fonctionnement optimal, il est recommandé de réguler la température indépendamment du cylindre en plaçant le thermocouple près de l'orifice.

3. La pression d'injection

La pression d'injection contrôle à la fois la vitesse et la force utilisées pour injecter le matériau plastique dans le moule. Son ajustement dépend de la viscosité du matériau et de la complexité de la pièce à mouler. Assurer un remplissage total du moule et compenser la contraction du matériau plastique lorsqu'il se solidifie. Il est conseillé de régler la pression de maintien de la même manière que la pression d'injection pour les types de plastique rigides. Cependant, il est recommandé de réduire progressivement la pression de maintien pour les grades de plastique souples. Une pression de maintien ou d'injection excessive peut entraîner un bourrage du moule et une adhérence du matériau sur l'empreinte, en particulier dans les grades souples. Bien que 'une pression élevée réduise le retrait visible lors du moulage, elle augmente également le risque de bavures.

4. Température du moule

La température du moule est ajustée pour assurer un bon refroidissement et une bonne solidification de la matière plastique injectée. Cela dépend du type de plastique utilisé et de la forme de la pièce. Son impact sur les propriétés mécaniques est toutefois limité.

III.3.2 Critères d'optimisation

Les critères d'optimisation considérés en moulage par injection peuvent varier suivant la nature du projet. Les critères les plus importants sont liés à la qualité globale du processus. Ainsi, on peut considérer les critères suivants :

1. Qualité technologique de la pièce

Le critère de qualité des pièces comprend l'apparence esthétique, la précision dimensionnelle, l'absence de défauts visuels tels que les marques de flux, les lignes de soudure, les bulles d'air ou les déformations. Cela peut également être exprimé par l'erreur de poids de la pièce, c'est la différence entre le poids réel et le poids théorique.

2. Consommation en énergie

Pour promouvoir une production durable et économiquement fiable, le critère de consommation d'énergie dans le processus de moulage par injection est essentiel. La quantité d'énergie utilisée par unité de matière plastique transformée est appelée consommation d'énergie spécifique. Une consommation d'énergie spécifique réduite indique un usage d'énergie plus efficace. L'efficacité énergétique des équipements varie selon les machines de moulage par injection. L'utilisation de machines plus éco-énergétiques peut réduire la consommation d'énergie du processus dans son ensemble.

III.3.3 Contraintes

Les contraintes en matière de moulage par injection représentent les limites et les difficultés rencontrées lors de la réalisation de ce processus.

1) Limitation sur l'erreur de poids

Dans le cadre du moulage par injection se réfère à la disparité entre le poids réel d'une pièce moulée et le poids attendu ou requis. Cette différence de poids peut être causée par plusieurs facteurs tels que les variations dans le matériau plastique, les changements de température, les paramètres de processus incorrects, ou encore les différences dans la conception du moule. Le rejet d'une pièce est généralement lié à une erreur de poids excessif. Il est alors important d'imposer une valeur limite pour cette erreur soit :

$$|PW - \overline{PW}| \leq \varepsilon \quad (\text{III. 6})$$

Où PW et \overline{PW} sont, respectivement, le poids réel et théorique de la pièce.

2) Limitation sur la consommation d'énergie

La consommation d'énergie est un aspect crucial à prendre en compte lors du processus de moulage par injection, car elle peut avoir un impact significatif sur les coûts de production et l'impact environnemental. Cette contrainte est formulée par l'inégalité:

$$ECC \leq \overline{ECC} \quad (\text{III. 7})$$

Où ECC et \overline{ECC} sont, respectivement, la consommation du processus et la consommation limite.

III.4 Application

III.4.1 Données expérimentaux

En utilisant l'étude expérimentale de Lu et al. [19], qui affirme que toutes les expériences ont été réalisées sur une machine de moulage par injection à mouvement alternatif de marque *Chen Hesong*, à l'Université des sciences et technologies de Hong Kong (HKUST). Le matériau utilisé était du polyéthylène haute densité (HDPE), et le moule utilisé était un moule personnalisé avec une cavité plate. La qualité de réponse choisie était la mesure de la puissance de sortie (PW), qui a été mesurée à l'aide d'un dispositif de précision électronique à grande échelle appelé *Dertork*. La consommation d'énergie électrique (ECC) a été considérée comme le critère d'évaluation de la consommation d'énergie [19].

1/ Les paramètres d'entrée

PT [s]: Temps de remplissage.

IV [mm/s]: Vitesse de remplissage.

PP [bar]: Pression de compactage.

MT [°C]: Température du moule.

Les valeurs limites de ces paramètres sont données dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Limitation sur les paramètres d'entrée [19].

| paramètres | PT [s] | IV [mm/s] | PP [bar] | MT [°C] |
|-------------|--------|-----------|----------|---------|
| Valeur maxi | 6 | 40 | 40 | 220 |
| Valeur mimi | 4 | 30 | 28 | 190 |

Les expériences ont été établies suivant des niveaux liés à l'intervalle de variation de chaque variable. Les niveaux considérés sont présentés dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Niveaux d'expérience [19].

| Variables | PT [s] | IV [mm/s] | PP [bar] | MT [°C] |
|-----------|--------|-----------|----------|---------|
| 1 | 4 | 30 | 25 | 190 |
| 2 | 5 | 35 | 30 | 200 |
| 3 | 6 | 40 | 35 | 210 |
| 4 | | | 40 | 220 |

2/ Paramètres de sortie

Les résultats obtenus durant ces expériences sont présentés dans le tableau III.3. Cette base de données sera utilisée pour la prédiction des paramètres de sortie du processus de moulage par injection.

Tableau III.3: Résultats d'expérimentales [19].

| N° | PT(s) | IV [mm/s] | PP [bar] | MT [°C] | PW [g] | ECC [kJ] |
|----|-------|-----------|----------|---------|--------|----------|
| 1 | 4 | 30 | 25 | 190 | 20.973 | 64.35 |
| 2 | 4 | 30 | 40 | 220 | 20.858 | 67.86 |
| 3 | 4 | 35 | 30 | 200 | 20.869 | 63.18 |
| 4 | 4 | 40 | 35 | 210 | 20.872 | 64.35 |
| 5 | 5 | 30 | 40 | 190 | 21.151 | 65.61 |
| 6 | 5 | 35 | 30 | 210 | 20.974 | 69.26 |
| 7 | 5 | 35 | 35 | 200 | 20.990 | 66.34 |
| 8 | 5 | 40 | 30 | 220 | 21.031 | 68.04 |
| 9 | 6 | 30 | 25 | 200 | 21.090 | 68.04 |
| 10 | 6 | 30 | 40 | 210 | 20.068 | 65.52 |
| 11 | 6 | 40 | 25 | 220 | 21.143 | 69.55 |
| 12 | 6 | 40 | 35 | 190 | 21.201 | 68.04 |

3/ Approximation des paramètres de sortie

En utilisant la fonction "regstats" du **Matlab** et en employant le modèle quadratique donné par:

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{i<j}^n \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 \quad (\text{III.8})$$

Nous avons pu obtenir les modèles mathématiques des paramètres de sortie (PW et ECC).

Posons : $x_1 = \text{PT}$, $x_2 = \text{IV}$, $x_3 = \text{PP}$, $x_4 = \text{MT}$

Le poids réel de la pièce injectée (PW) est donné par :

$$\begin{aligned} \text{PW} = & -0.19748x_1^2 + 0.014666x_2^2 + 0.0011374x_3^2 - 0.00061468x_4^2 - 0.1931x_3 \\ & + 0.24218x_4 - 0.02491x_1x_2 + 0.017018x_1x_3 + 0.011911x_1x_4 - 0.0079836x_2x_3 \\ & - 0.0030552x_2x_4 + 0.0014448x_3x_4 \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Ainsi, la consommation en énergie (ECC) est donnée par :

$$\begin{aligned} \text{ECC} = & -1.4278x_1^2 - 0.003561x_2^2 + 0.036385x_3^2 - 0.57109x_4 + 0.43436x_1x_2 \\ & - 0.1049x_1x_3 + 0.0063586x_1x_4 + 0.22529x_2x_3 - 0.03672x_2x_4 \\ & - 0.075612x_3x_4 \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

III.4.2 Optimisation

En utilisant les modèles mathématiques obtenus dans la partie précédente, notre problèmes d'optimisation sont formule comme suit:

Problème A (minimisation de l'erreur de poids): l'objectif dans ce problème est de réduire la différence entre les poids en valeur absolue, tout en respectant les contraintes prises. Soit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } |PW - \overline{PW}| \\ \text{sous les contraintes} \\ PTmin \leq x_1 \leq PTmax \\ IVmin \leq x_2 \leq IVmax \\ PPmin \leq x_3 \leq PPmax \\ MTmin \leq x_4 \leq MTmax \\ \text{et } ECC \leq \overline{ECC} \\ |PW - \overline{PW}| \leq \varepsilon \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

Problème B (minimisation de la consommation en énergie): notre but dans ce problème est de réduire de la consommation d'énergie, tout en respectant les contraintes considérées:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } ECC \\ \text{sous les contraintes} \\ PTmin \leq x_1 \leq PTmax \\ IVmin \leq x_2 \leq IVmax \\ PPmin \leq x_3 \leq PPmax \\ MTmin \leq x_4 \leq MTmax \\ \text{et } ECC \leq \overline{ECC} \\ |PW - \overline{PW}| \leq \varepsilon \end{array} \right. \quad (III.12)$$

Problème C (minimisation simultanée de l'erreur en poids et la consommation en énergie):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } |PW - \overline{PW}| \text{ et } ECC \\ \text{sous les contraintes} \\ PTmin \leq x_1 \leq PTmax \\ IVmin \leq x_2 \leq IVmax \\ PPmin \leq x_3 \leq PPmax \\ MTmin \leq x_4 \leq MTmax \\ \text{et } ECC \leq \overline{ECC} \\ |PW - \overline{PW}| \leq \varepsilon \end{array} \right. \quad (III.13)$$

Où $\overline{PW} = 21 \text{ g}$, $\overline{ECC} = 65 \text{ kj}$ et $\varepsilon = 10^{-2}$

Pour la résolution des problèmes d'optimisation mono-objectif (problèmes A et B), nous avons utilisé les algorithmes génétiques à travers l'emploi de la fonction "ga" du **Matlab**. La résolution du problème C (optimisation multi-objectif) est faite à l'aide de l'approche Min-Max en utilisons la fonction "min-max" du **Matlab**.

Les résultats obtenus sont présentées dans le tableau III.4.

Tableaux III.4: Résultats des problèmes d'optimisation.

| Problème | PT [s] | IV [mm/s] | PP [bar] | MT [c°] | PW - \overline{PW} [g] | ECC [kj] |
|----------|--------|-----------|----------|---------|-------------------------------|----------|
| A | 5.784 | 34.935 | 34.004 | 204.76 | 4.42×10^{-5} | 64.657 |
| B | 6.000 | 34.860 | 25.003 | 190.00 | 0.011 | 53.928 |
| C | 4.000 | 33.909 | 28.157 | 190.00 | 0.006 | 59.258 |

III.4.3 Discussion

Cependant nous voyons clairement que la solution de problème de minimisation simultanée de l'erreur de poids et la consommation en énergie (problème C) représente un compromis

entre la solution de problème de minimisant l'erreur en poids (problème A) et celui qui minimise la consommation en énergie (problème B) (figure III.1).

Dans ce sens, on trouve que la minimisation de l'erreur en poids qui améliore la qualité technique des pièces moulées conduit à la maximisation de la consommation en énergie et qui détériore la qualité économique et environnementale du processus de moulage par injection. Ainsi, la minimisation de la consommation en énergie afin d'augmenter l'apport économique du procédé de moulage par injection et de contribuer à la conservation de l'environnement conduit à la production des pièces de mauvaise qualité en matière ou en tolérances géométriques. En effet, l'obtention d'un compromis qui augmente l'apport économique en minimisant la consommation en énergie et qui assure un niveau de qualité acceptable pour les pièces produites par la minimisation de l'erreur en poids constitue un appui solide pour la planification des opérations de moulage par injection.

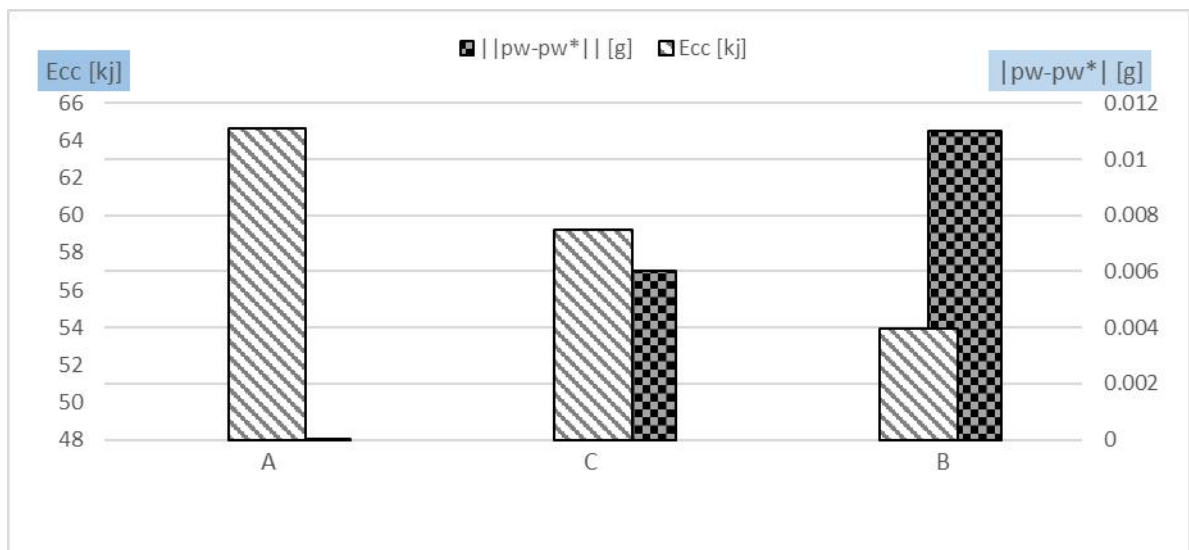


Figure III.1: Comparaison des résultats.

III.5 Conclusion

Les variations des paramètres, considérés dans ce travail, peuvent entraîner des variations de la quantité de matière plastique injectée. Des facteurs tels que le système d'alimentation en plastique, la conception des canaux d'injection et la répartition de la chaleur peuvent influencer la quantité de matière plastique qui atteint le produit final. Pour minimiser l'erreur en poids en injection plastique, il est essentiel de maintenir des paramètres de processus

stables pour chaque lot de production. Des analyses régulières du matériau plastique et des ajustements de conception du moule peuvent également aider à réduire cette erreur.

La consommation d'énergie dans le processus d'injection plastique peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la taille de la machine d'injection, le type de plastique utilisé, la complexité de la pièce, la température de fusion requise et les paramètres de fonctionnement spécifiques. Pour réduire la consommation d'énergie lors de l'injection plastique, vous pouvez réduire la consommation d'énergie. Des températures excessives augmentent la consommation d'énergie. Les fuites d'énergie, les composants usés ou mal réglés peuvent entraîner une surconsommation d'énergie. La réduction des pièces complexes et la conception de canaux de refroidissement adéquats peuvent contribuer à une meilleure qualité et à une production plus efficace.

L'utilisation de simulations de moulage par injection peut vous aider à identifier les paramètres optimaux. Une distribution uniforme de la température peut éviter les défauts de moulage tels que les lignes de soudure, la déformation et les contraintes internes. Une ventilation adéquate peut prévenir les pièces creuses, les brûlures de gaz et les défauts de taille.

Conclusion générale:

Ce mémoire avait pour ambition d'optimiser les paramètres opératoires de procédé de moulage par injection. Cela concernant le traitement technique et économique de ce procédé de fabrication. Il a fallu, dans un premier temps, de modéliser le problème en se basant sur les lois de la mécanique liée aux phénomènes inclus dans le processus de formage appliqué par ce procédé. Dans un deuxième temps, Le problème d'optimisation, traité dans ce travail, est basé sur l'amélioration de deux critères contradictoires. Le premier est la qualité technologique des pièce fabriquée, présentée par l'erreur en poids qui détermine le respect des tolérances mécaniques et géométriques requises. Le deuxième est présenté par la trace économique et environnementale c'est la consommation d'énergie du processus de moulage. l'ensemble des paramètres opératoires de ce procédé en tenant en compte les limites liées aux exigences technologiques impliquées dans le processus de fabrication. Afin de démontrer l'intérêt de l'optimisation multi-objectif abordée, dans ce mémoire, on a traité les problèmes d'optimisation liés à chacun des critères considérés.

Les solutions obtenues, dans ce mémoire, démontrent . Ainsi, la solution du problème multi-objectif présente, d'une manière très claire, l'importance de l'obtention d'un compromis car il permet d'améliorer, à la fois, les deux critères considérés.

En conclusion, on peut dire que la méthodologie suivi dans ce mémoire présente un outil mathématique performant pour la planification des procédés de fabrication. en prenant en compte l'aspect techno-économique des procédés de production.

Références

- [1] Sahel Mohamed Amine, Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de moulage par injection plastique, mémoire master, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, 2019.
- [2] Djaballah Abdelmalek, Contribution à l'étude de la phase post-remplissage du moulage par injection, mémoire magister, Université Mohamed Khider– Biskra, 2012.
- [3] Pauline Riviere, Simulation de la Réplication de Microstructures en Polymère par Moulage à Injection, mémoire, Université du Québec à Chicoutimi, 2020.
- [4] Bennouna Mohammed Salah, Cours moulage et injection plastique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2020
- [5] Gassou Mostafa, Rahmani Ahmed, Etude de la qualité des pièces fabriquées en moulage par injection, mémoire master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2013.
- [6] Etude et conception d'un moule d'injection plastique d'une roue en ABS, mémoire master, 2014.
- [7] Belaribi Abdelkrim, Saàdaoui Oussama, Etude du procédé de production des Pièces par injection des thermoplastiques, mémoire master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [8] Chabane Fouad, Contribution à la modélisation de transfert de chaleur lors du remplissage d'un moule, mémoire magister, Université de Batna, 2009.
- [9] Conception des pi (no date) Google Livres. Available at: <https://books.google.dz/books?id=fSL2AQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=conception%2Bdes%2Bpi%C3%A8ces%2Bplastiques%2Binject%C3%A9es%2Bpdf&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwjdrNC7jMH9AhUkQaQEHZsVCe8QuwV6BAgGEAc#v=onepage&q&f=false>, 2013.
- [10] Thierno Diallo, (section d'informatique), Etude et illustration de Méthodes itératives d'optimisation non linéaire, Projet de master 2005-2006, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Faculté Sciences de Base Chaire de Recherche Opérationnelle Sud Est.
- [11] http://elearning.univbiskra.dz/moodle/pluginfile.php/327648/mod_resource/content/1/CHAPITRE%20I.pdf

Références

- [12] Alain Berro, Optimisation multi-objectif et stratégies d'évolution En environnement dynamique, Thèse présentée à l'Université des Sciences Sociales Toulouse I en vue de l'obtention du doctorat spécialité : Informatique.
- [13] Nadir Lebaal. Optimisation de la tête d'extrusion pour la fabrication de pièces thermoplastiques. Mécanique [physics.med-ph]. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2007. Français. NNT : tel-00343764
- [14] Gassou Mostafa, Rahmani Ahmed, Etude de la qualité des pièces fabriquées en Moulage par injection, Mémoire master Université Kasdi Merbah- Ouargla.
- [15] Jean-Luc charvolin, Conception des pièces plastique injectées, 2013.
- [16] Omessaad, Hajji, contribution au développement de méthode d'optimisation stochastiques, application à la conception des dispositifs el ectrotechnique, école centrale de Lille université des sciences et technologies de Lille, Soutenu le 03/12/2003.
- [17] Mèche Abdelkrim, Manuel de Cours_ Optimisation, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohammed Boudiaf USTO-MB, Faculté de Génie Electrique Département d'Automatique, Année universitaire 2021-2022
- [18] Vincent Barichard, Approches hybrides pour les problèmes multi objectifs, Thèse de doctorat Spécialité : Informatique École Doctorale d'Angers.24 Novembre 2003A Angers.
- [19] N. Lu, G. Gong, Y. Yang, J. LU, Multi-objective process parameter optimization for energy saving in injection molding, Jornal of Zhejiang University –Science A (Applied physique & Engineering) ,2012.