



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF

Faculté de Chimie
Département de Génie Chimique

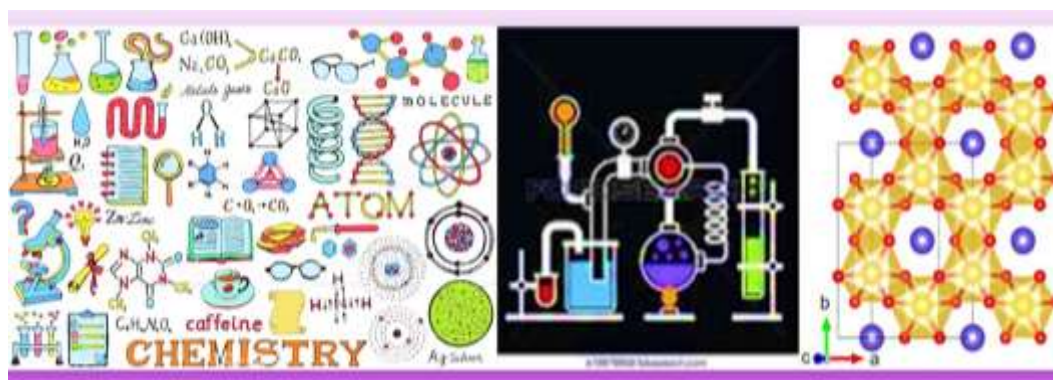
POLYCOPE

Procédés de transformation et mise en forme des matériaux

(Ce polycope est destiné aux étudiants de Master I, LMD , Génie des Procédés des Matériaux)

Présenté par :

Dr. Mohamed Karmaoui



Année Universitaire : 2019-2020

REMERCIEMENS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom de Dieu le Clément,

le Miséricordieux

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mesdames : Mme Fatiha Hamidi (Prof. US70-MB) qui fait l'honneur d'accepter d'être l'expert de ce polycopié au niveau de notre Faculté de Chimie, ainsi que Mme Fatima EL Berrichi (Prof. Université 8 Mai 1945-Guelma) pour avoir accepté de juger ce travail en dépit de leurs nombreuses occupations.

Ainsi donc, nous tenons à remercier vivement mes collègues : Mohammed Hennous, Kamel Bentaib, Ahmed Bekka, Adel Othmane, Lamia Amaruoche, Karima Abed, Fatima Belkhadem, Chakib Alloui, Wassila Touati, Imene Kadi, pour leurs conseils précieux et pour toutes les commodités qu'ils nous ont apporté durant mon étude et réalisation de ce travail.





DEDICACE



Ce mémoire, je le dédie à mes superbes parents mon adorable maman et mon fantastique papa « décidé ; Que Dieu ait son Ame ».

Je dédie aussi ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement:

-  *A mes chers sœurs et mes frères*
-  *A toutes mes chers amis*

Objectifs

Le cours est scindé en cinq chapitres, chaque chapitre est traité à travers des séquences pédagogiques permettant l'assimilation des concepts prévus, cette assimilation est consolidée par des activités d'apprentissages où ces notions sont mises en œuvre. Les notions les plus modernes dans le domaine de la science des matériaux ont été plus détaillées dans ce cours.

Connaître les principes fondamentaux des procédés de mise en forme (granulation, broyage, séchage,) et de mise en œuvre (formulation, mélange, dosage, manutention, ...). Cette matière associe étroitement la compréhension de la structure et des propriétés des matériaux, l'élaboration et la mise en œuvre des matériaux à des fins industrielles. Elle permettrait pareillement à l'étudiant de suivre les différentes étapes de transformations et mises en forme d'un matériau qu'il soit organique (polymères et composites) ou inorganique (verres céramiques, métal, liants,.....) avant de le mettre entre les mains d'un ingénieur. Elle permet également à l'étudiant d'établir un lien entre les causes et effets de la dégradation des matériaux afin d'en optimiser les usages.

Préface

Le cours du génie des matériaux vise à former des Masters, Ingénieurs, techniciennes et des techniciens aptes à travailler dans les entreprises dont les activités sont directement liées à la fabrication ou à la transformation des matériaux. Ce cours prépare les étudiants de différentes classes à développer des compétences liées à l'élaboration ou la mise en œuvre de procédures, au contrôle de la qualité, à la résolution de problèmes techniques et à la réalisation d'activités d'assistance technique.

L'enseignement de la « **Procédés de transformation et mise en forme des matériaux** » dans la formation supérieure et en particulier dans les spécialités de chimie physique, génie des matériaux, génie chimique, etc...doit être fondé sur des bases théoriques solides. Pour cette raison, on fait précéder ce cours par :

L'étudiant doit avoir des connaissances en chimie des matériaux, chimie minérale, chimie organique, chimie des polymères, chimie des silicates, Chimie physique et Génie chimique (thermodynamique, chimie de surfaces, cinétique chimique, lois de transfert, ...).

La fonctionnalité d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à satisfaire un cahier des charges donné (allègement, propriété de structure, isolation phonique, isolation thermique, conduction électrique, santé, éclairage, efficacité énergétique, confort, design fonctionnel...) est un des éléments clés du développement technologique.

Les nouvelles contraintes liées à la raréfaction de certaines matières premières (pétrole et minéraux), la mutation énergétique en cours et la nécessité de prendre en compte avec vigueur l'impact environnemental ont rendu indispensable une génération de nouveaux matériaux répondant à ces défis. De même la durabilité des matériaux est une des principales performances à améliorer pour répondre aux exigences accrues de sécurité. La résistance au vieillissement ou à l'endommagement est critique dans de nombreux secteurs d'activité industrielle. La fonctionnarisation s'exerce au travers de propriétés intrinsèques et extrinsèques liées à la composition du matériau, à sa mise en œuvre et à sa mise en forme.

Le but escompté à travers ce polycopié consiste principalement à l'enseignement des bases théoriques et expérimentalement de la « **Procédés de transformation et mise en forme des matériaux** ». Les personnes diplômées devraient, entre autres, analyser des matériaux, résoudre des problèmes de procédés ou améliorer ces derniers, effectuer des activités de formation, participer à l'élaboration et à l'implantation de méthodes de travail, effectuer des activités relatives à la recherche et au développement de même que des activités de soutien technique.

En conclusion, ce polycopié est une synthèse tirée de différents ouvrages, internet, articles, revue, etc.... en relation avec le thème. Il présente conformément au programme officiel, des définitions et des rappels sur les procédés de mise en forme (granulation, broyage, séchage, ...) et de mise en œuvre (formulation, mélange, dosage, manutention, ...) et ses applications en chimie des matériaux. Il s'intéresse par la suite aux classifications des procédés de mise en forme, commençant par leurs classements, en traitant leurs types et leurs usages pour des variétés d'applications (en se limitant à l'essentiel). Et terminant par des références appropriées.

En cinq chapitres, j'ai essayé l'élaboration de ce document, de développer les aspects en relation avec le profil des étudiants de master **Génie des Procédés des Matériaux**. Ce cours est le fruit d'une grande partie des travaux de recherche proposé dans la littérature d'une part et aussi une partie de mes travaux de recherches que j'entame depuis des années d'une autre part. Aussi, ce cours sera amélioré chaque année et poursuivi prochainement par la version Travaux pratiques et dirigés, dans laquelle des exercices, des TP, des méthodes explicatives et complémentaires à ce cours seront proposés. Enfin, mes hommages à tous ceux qui ont contribué indirectement à la réalisation de ce cours (différents auteurs des différents ouvrages, internet, articles, revue, etc...) sans oublier ceux qui me feront le plaisir de consulter ce document et de l'enrichir. A la fin, nous souhaitons que le lecteur profite largement de ce présent polycopié, en espérant qu'il sera bien satisfait.

Table des matières

Remerciements	I
Objectifs	IV
Préface	V
Liste des abréviations	VIII
Liste des figures	IX
Objectifs	
Introduction	1
Carte Mentale du cours : programme à enseigner et son organisation	2
Chapitre 1 : Notions sur les procédés technologiques de fabrication des matériaux	
1.1. Introduction	5
1.2. Définition d'un procédé industriel	6
1.3. Notions sur l'optimisation des procédés	6
1.4. Paramètres d'influence du procédé	7
1.5. Passage de la méthode à la technique vers le procédé	9
1.6. Comparaison entre procédé à l'échelle du Laboratoire et à l'échelle Industriel	10
1.7. Mise en place du procédé industriel	11
1.8. Etapes du processus de fabrication des matériaux	12
1. 8. 1. <i>Généralités sur les matériaux</i>	12
1. 8. 2. <i>Les grandes classes des matériaux</i>	13
1. 8. 3. <i>Définition des céramiques parmi les matériaux</i>	13
1. 8. 4. <i>Applications des céramiques</i>	22
Chapitre 2 : Typologie des procédés	
2.1. Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit	25
2.2. Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle	29
2.3. Tertiaire : Amélioration de la qualité pièce (polissage)	30
Chapitre 3 : Classification des procédés de mise en forme	
3.1. Par enlèvement de matière	34
3.2. Par ajout de matière	35
3.3. Par transformation (muilage)	36
3.4. Par déformation	38
3.5. Les procédés d'assemblage	41
Chapitre 4 : Procédés de mise en forme des matériaux métalliques	
4.1. Préparation des matières premières	45
4.2. Processus de fusion des composés métalliques	47
4.3. Processus de: La transformation et le travail des métaux	49
4.4. Conclusion	53
Chapitre 5 : Procédés de mise en forme des polymères et des composites	
5.1. Rhéologie des polymères	54
5.2. Procédés industriels de transformation et fabrication des polymère	54
5.3. Solidification et mise en forme des polymères	55
5.4. Procédés de moulage	57
5.5. Technologie du moulage	59
Évaluation Final	
A. Exercice	60
B. Exercice	60
C. Exercice	60
D. Exercice	61
E. Exercice	61
Solution des exercices	62
Glossaire	64
Références Bibliographique	66

Liste des abréviations

Liste des Figures

PEHD	Polyéthylène haute densité
PEBD	Polyéthylène basse densité
PP	Polypropylène
PET	Polyéthylène téréphtalate
PVC	Polychlorure de vinyle
MF	Mélamine-formaldéhyde
UF	Urée-formaldéhyde
PF	Phénol-formaldéhyde
UP	Polyester insaturés
PUR	Polyuréthane
HP	Hot Pressing
HIP	Hot Isostatic Pressing
SPS	Spark Plasma Sintering
Vc	Vitesse de coupe
Vf	Vitesse d'avance
UGV	Procédés précédents mais à grande vitesse
RTM	Moulage par injection base pression de résine liquide
S-RIM	Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues

Liste des figures

- Figure 1.1** Un outillage (outil + matrice)
- Figure 1.2** Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux
- Figure 1.3** Du produit au procédé : du problème à la solution
- Figure 1.4** Grande variété des applications des céramiques techniques et des matériaux qui les constituent
- Figure 4.1** Les différents procédés de mise en forme et de fabrication des matériaux
- Figure 5.1** Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques
- Figure 5.2** Mise-en-forme des composites et des plastiques



Introduction Générale

1.1 Introduction:

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.). Pour les thermoplastiques (polyéthylène haute densité (PEHD), polyéthylène basse densité (PEBD), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET), polychlorure de vinyle (PVC)), on part de poudres, de granulés ou de produits semi-finis sous forme de plaques ou de films. En chauffant la matière on la fait passer d'un état solide à un état plastique. Elle peut alors être mise en forme dans un moule ou par un autre procédé. Pour les thermodurcissables (mélamine-formaldéhyde (MF), urée-formaldéhyde (UF), phénol-formaldéhyde (PF), exemples : colles époxydes, polyester insaturés (UP), polyuréthane (PUR)), les produits de base sont livrés à l'état de polymérisation partielle. Cette dernière va s'achever dans le moule sous l'action de catalyseurs, d'accélérateurs voire de chaleur. Le démoulage arrive quand la polymérisation est déjà assez avancée pour que l'objet conserve les propriétés souhaitées. Le but de la transformation est, dans des conditions techniques, économiques et écologiques satisfaisantes, de :

- donner la forme et l'aspect voulus au polymère pour obtenir la pièce ou le demi-produit à fabriquer ;
- conserver formes et aspects jusqu'à la mise en service (et après) ;
- amener les propriétés physiques, mécaniques, sensorielles au stade voulu.

Les polymères de départ peuvent avoir :

des formes physiques très variées, depuis des liquides fluides jusqu'à des solides de grandes dimensions.

- des états chimiques différents : monomères, oligomères, polymères thermoplastiques ou thermodurcissables.
- Dans ce dernier cas le durcissement ou la réticulation constitue une étape supplémentaire intervenant obligatoirement lorsque la mise en forme est effective. Certains polymères utilisés couramment à l'état thermoplastique peuvent être éventuellement réticulés, comme le polyéthylène, ce qui améliore ses propriétés mécaniques et chimiques.

Donc, la mise en forme des matériaux (métaux et alliages) est et a toujours été une technique importante dans l'art de leur transformation. Comprendre les procédés de mise en forme des matériaux métalliques est une nécessité pour innover et optimiser.

La mise en forme est l'aptitude que possède un matériau à se déformer de façon permanente sans détérioration de ce dernier.

Carte Mentale du cours : programme à enseigner et son organisation

Afin d'initier les étudiants à la technique des cartes, il leur a été proposé de transformer un le modules/chapitres du canevas propose a leurs parcours. L'organisation de la carte mentale rompt avec les hiérarchies linéaires et est donc censée suivre de plus près la façon dont notre cerveau fonctionne. Cela permet de "sortir" la pensée de l'esprit pour la déployer physiquement devant les yeux, l'analyser — voire l'enrichir !.

Outil de creativite hautement structure, la carte mentale permet d'organiser intuitivementles informations et de les partager.

A) **Une carte mentale** est un schéma arborescent qui :

- Se veut libérateur de l'hémisphère droit, peu utilisé dans nos civilisations, le «cerveau de la créativité»,
- Offre une représentation visuelle personnelle,
- Donne une vue synthétique d'un sujet complexe.

B) **Une carte mentale** est un outil qui permet :

- De créer,
- De s'organiser et de mémoriser,
- De penser et se concentrer,
- D'identifier les points importants,
- De découvrir des relations entre des éléments distants

Pourquoi utiliser les cartes mentales en cours?

Un peu à la manière d'une carte routière, une carte mentale offre les avantages suivants :

- Une vision globale du champ d'application,
- Une carte, ce sont des axes, donc des choix à effectuer,
- Une somme de données compilées et organisées,
- La clarté est de mise, car ce document est aussi destiné, le cas échéant, à être communiqué, partagé, affiché. Une approche toujours plus créative au fur et à mesure des cartographies,
- Un objet esthétiquement agréable et faisant du sens,
- Un stimulateur cérébral : il s'agit de trouver les mots clés, de mettre en relations les idées à retenir, à mettre en forme sa pensée.

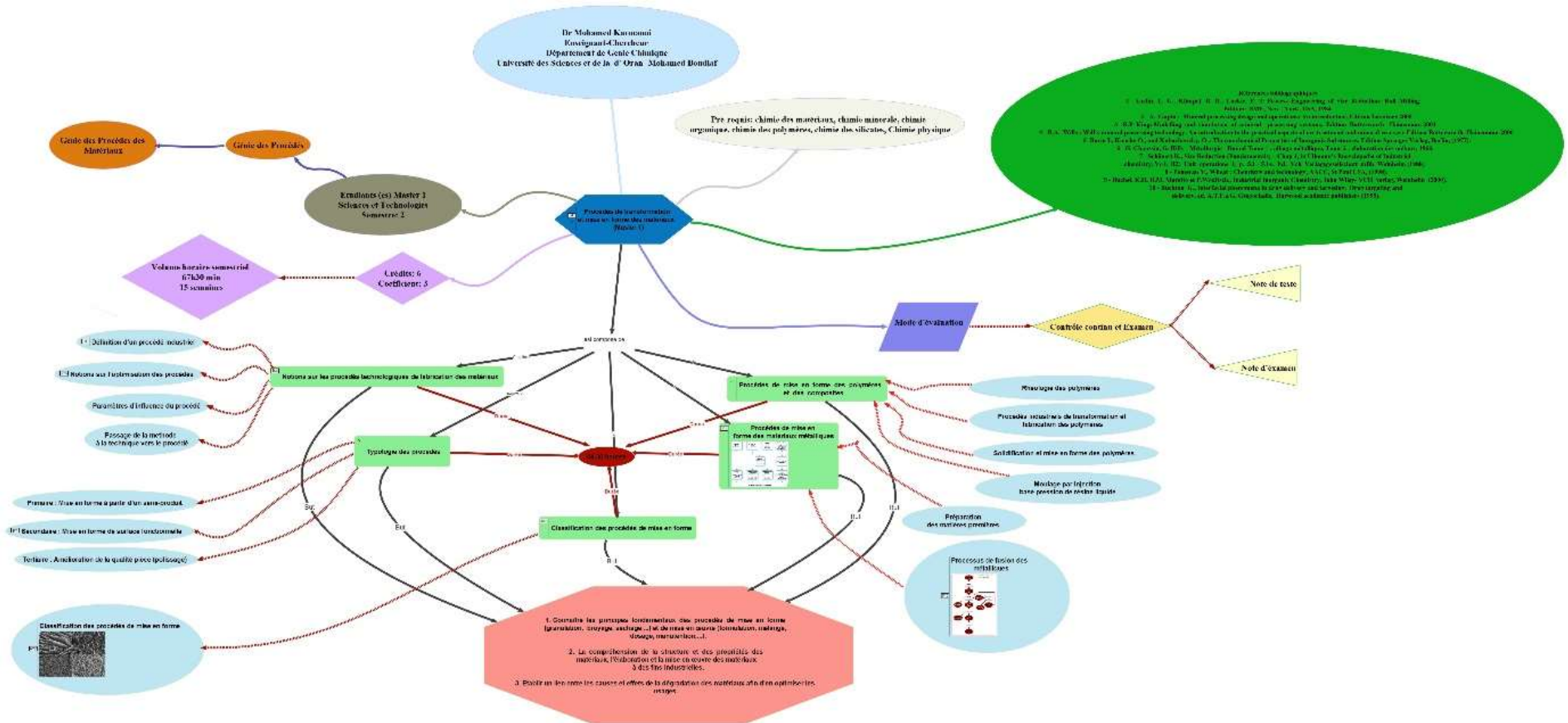


Figure 1. Carte Mentale du cours

Chapitre 1 : Notions sur
les procédés de
technologiques fabrication
des matériaux

1.1 Introduction:

On recherchera en général un couplage de propriétés, pour répondre à la demande établie par un intégrateur final, en vue d'obtenir une ou plusieurs fonctions, chacune avec un niveau donné de performance. Tous les types de matériaux sont concernés, y compris les matériaux adaptatifs et leur combinaison. On visera en particulier **[1-2]** :

- Des matériaux allégés, entraînant une diminution significative du poids capable d'induire des gains énergétiques importants dans l'automobile, l'aéronautique, le naval, l'éolien..., qu'ils soient utilisés pour produire des pièces de structure ou des pièces mobiles,
- Des matériaux pour des constructions économiques et écologiques (visant à terme la maison à énergie positive) : matériaux pour l'isolation thermique plus écologiques et moins encombrants, conduisant à une diminution du coût énergétique d'usage (chauffage ou climatisation), matériaux pour l'isolation phonique, efficaces et de mise en œuvre facile, matériaux moins consommateurs d'énergie pour leur réalisation industrielle,
- Des matériaux pour l'éclairage ou la visualisation, à faible consommation : dispositifs électroluminescents organiques ou polymères, pour l'affichage souple ou les diodes organiques, céramiques transparentes, matériaux électro-optiques.
- Des matériaux pour le stockage ou le transport de l'énergie : conducteurs électroniques ou ioniques, inorganiques ou organiques, pour électrodes et électrolytes de batteries ou de piles à combustible, matériaux conducteurs de l'électricité, nouveaux thermoélectriques...

1.2 Définition d'un procédé industriel

Génie des procédés, désigne l'application de la chimie à l'échelle industrielle. Elle a pour but la transformation de la matière dans un cadre industriel et consiste en la conception, le dimensionnement et le fonctionnement d'un procédé comportant une ou plusieurs transformations chimiques et/ou physiques. Les méthodes utilisées dans un laboratoire ne sont souvent pas adaptées à la production industrielle d'un point de vue économique et technique. Le génie chimique permet ainsi le passage d'une synthèse de laboratoire à un procédé industriel de même que son fonctionnement dans le respect des contraintes économiques, techniques, environnementales et de sécurité. Le génie chimique se situe à la convergence de plusieurs disciplines et étudie les transformations, les transports et les transferts de la matière, de l'énergie et de la quantité de mouvement pour établir des lois et des corrélations utilisables lors de la transposition ou de l'extrapolation à l'échelle industrielle [3].

1.3 Notions sur l'optimisation des procédés

Un procédé de mise en forme consiste à conférer à une pièce, une géométrie donnée, décrite par une forme et des directions spécifiées par le bureau d'étude. On met en œuvre généralement un outillage (outil + matrice), permettant de transformer la matière en pièce finale.

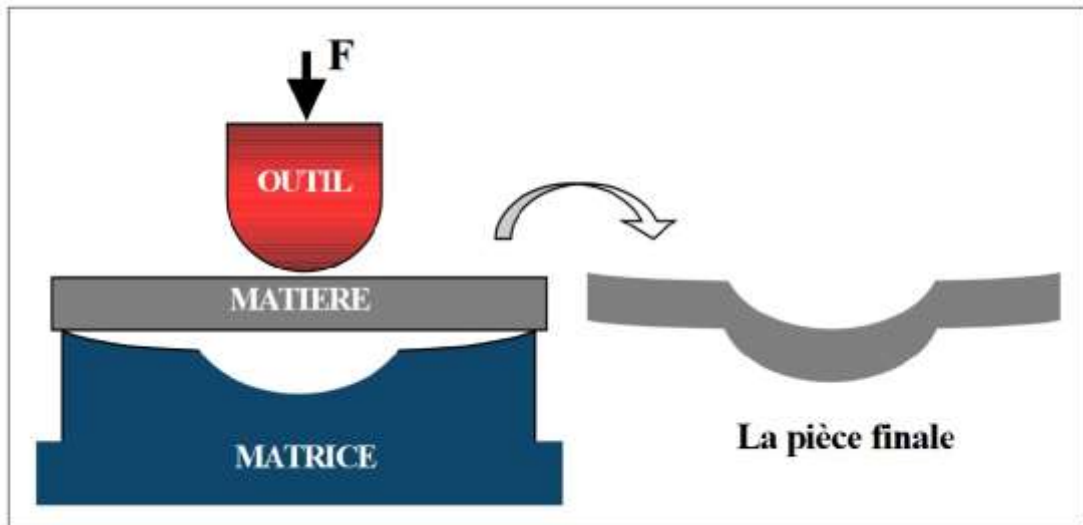


Figure 1.1 un outillage (outil + matrice)

L'optimisation des procédés de mise en forme est une tâche quotidienne pour les ingénieurs compte tenu de l'évolution rapide du marché qui entraîne une concurrence de plus en plus forte. Pour donner suite à cette évolution, les méthodes d'optimisation des procédés de formage ont, elles aussi évoluées au fil du temps. Parmi les fonctions objectives recensées lors du processus d'optimisation on peut citer d'abord la forme de l'outil de formage qui a été abordée par différents auteurs dans la littérature qui ont proposé différentes méthodes d'optimisation telles que : analyse de sensibilité, algorithmes de Simplex, quasi-Newton, méthode du gradient, algorithmes génétiques, réseaux de neurones ou autres [1-2].

1.4 Paramètres d'influence du procédé

Le formage des métaux est la production de pièces par modification plastique de la forme d'un corps solide. Pendant ce processus, la masse et la cohésion du matériau (pas de rupture) sont maintenues.

- Pour la mise en forme à chaud de structure massives (filage, laminage, estampage ou forgeage libre) les principaux paramètres influents sont :

1. Température
2. Matériaux et ses caractéristiques
3. Géométrie des outils
4. Vitesse et pression de frappe

Par exemple, les gradients de température entre la pièce chaude et l'outil plus froid induisent un refroidissement superficiel de la pièce, des écarts de contrainte d'écoulement qui tendent à modifier l'écoulement plastique avec des conséquences parfois néfastes :

- Géométriques (dimensions, écarts de forme) ;
- Mécaniques (contraintes résiduelles) ;
- Métallurgiques (structure, taille des grains, fissures).

- Pour la mise en forme des structures minces (emboutissage, poinçonnage, hydroformage, aqua formage) la réussite de la mise en forme des tôles dépend des paramètres suivants :

1. Caractéristiques mécaniques de la tôle ;
2. Forme des outils ;
3. Vitesse de mise en forme ;
4. Lubrification des pièces et des outils.

- Pour les procédés d'enlèvement de matière (perçage, fraisage, tournage), les principaux paramètres sont :

1. Conditions de coupe (angle de coupe, pas, vitesse, ductilité matériau) ;
2. Efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
3. Fractionnement du copeau ;

1.5 Passage de la méthode à la technique vers le procédé

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine géométrie, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. Les techniques de mise en forme diffèrent selon les matériaux.

Schématisation du processus

Le processus est décrit dans un « schéma de Tuyauteries et Instrumentation du processus » ou schéma TI. Ce schéma TI utilise des symboles normalisés représentant sans ambiguïté les différents composants du processus [4] :

- ❖ Les équipements propres au processus lui-même :
 - Les **équipements statiques** pour les opérations de transport et de stockage (tuyauteries, bacs),
 - Les **équipements dynamiques** pour les opérations de transformation (fours, tours distillation, séparateurs, échangeurs, etc.).
- ❖ Les équipements nécessaires au contrôle du processus et constituant **l'instrumentation** :
 - Des prises de mesure (essentiellement de **pression, débit, niveau, température**) disposées sur les équipements,
 - Des instruments de mesure (**indicateurs locaux, transmetteurs**),
 - Des organes de sécurité (**alarmes, systèmes des commandes automatiques**),
 - Des organes de commande permettant de moduler ou de sectionner les flux de matières (**vannes motorisées de sectionnement, vannes régulatrices, pompes, ventilateurs, etc.**),
 - Des organes de protection (**soupapes**).

1.6 Comparaison entre procédé à l'échelle du Laboratoire et à l'échelle Industrielle

Le technicien : Son travail consiste à mettre en œuvre les opérations qui permettront l'extrapolation du processus issu de la R&D pour obtenir un processus industrialisable soit pour les aspects purement chimiques, soit en ce qui concerne les caractéristiques technologiques de la future installation [7].

Pour ce qui concerne la chimie, le technicien en génie des procédés ou en génie chimique peut être amené soit à optimiser les données transmises par la R&D, soit à retravailler partiellement ou totalement sur les voies d'accès au produit attendu. Ce produit doit répondre à des critères de qualité précis dont le technicien assurera le suivi tout au long du processus.

Développement à l'échelle du laboratoire :

L'ingénieur de recherche : concevoir de nouveaux produits et matériaux pour de nouvelles applications.

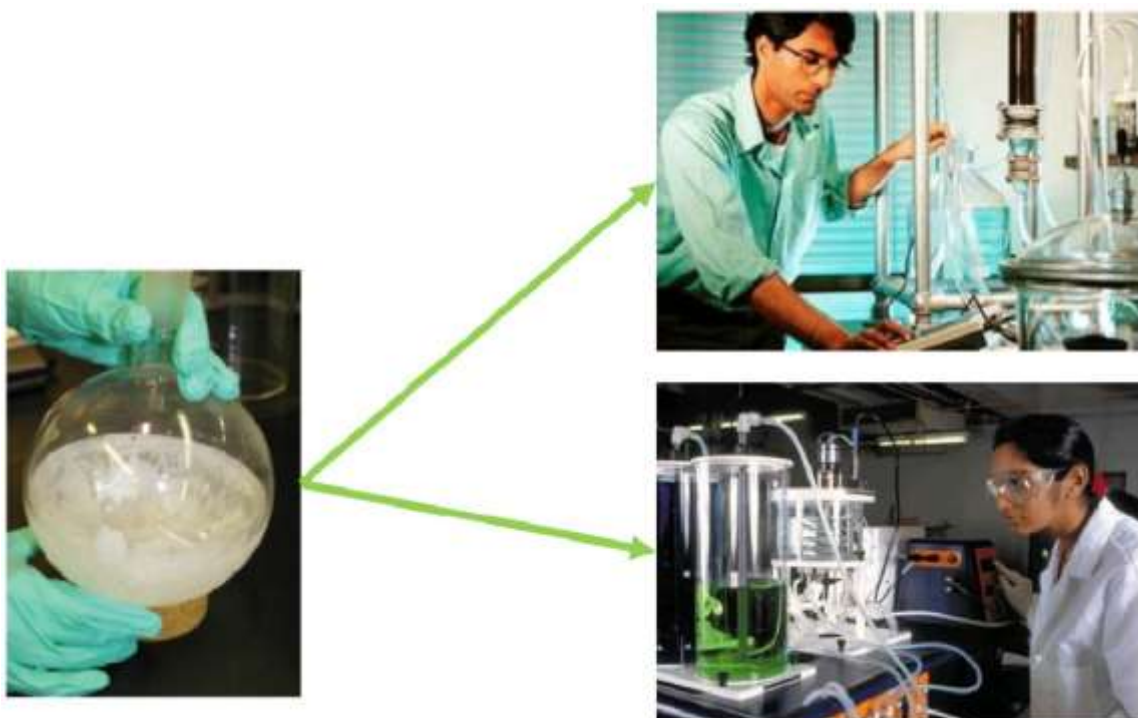


Figure 1.3 Du produit au procédé : du problème à la solution

Production à l'échelle du micro-pilote :

L'ingénieur R&D :

- Développer un procédé de synthèse du produit ou matériau à l'échelle du laboratoire mais envisageable à plus grande échelle.
- Maîtriser la qualité et la reproductibilité du produit.

1.7 Mise en place du procédé industriel

1. Activités dans une entreprise

Une entreprise industrielle assure une production de biens (produits) selon certaines exigences (réglementations, cahier des charges) susceptibles d'évoluer

[12]. Ainsi, l'entreprise doit :

- ❖ Produire : c'est à dire transformer des matières premières et de l'énergie en biens de consommation.
- ❖ Maintenir : elle doit assurer la meilleure disponibilité de l'outil de production (maintenance).
- ❖ Gérer : aussi bien techniquement que financièrement les ressources disponibles.

2. Procédé industriel

C'est la méthode à suivre pour obtenir un produit (comme une recette de cuisine...). Le procédé est immatériel et se présente sous la forme d'un texte accompagné de schémas explicatifs formant le « livre du procédé ». On y décrit les ingrédients à utiliser, les moyens matériels à prévoir, les opérations à exécuter et les conditions (pression, débit, température, etc.) à respecter pour obtenir le produit à fabriquer, en quantité (capacité de production) et en qualité. Le procédé doit être matérialisé par une unité de production ou processus.

3. Processus industriel

Le terme processus désigne deux aspects d'une installation de production, l'un descriptif, l'autre matériel :

- ❖ Aspect descriptif : c'est l'ensemble des opérations détaillées d'élaboration d'un produit fini devant posséder des caractéristiques imposées dans les limites de tolérances fixées, selon un procédé déterminé.
- ❖ Aspect matériel : c'est l'installation proprement dite, comprenant tous les appareils nécessaires à la transformation des matières premières.

1.8 Etapes du processus de fabrication des matériaux

1.8.1. Généralités sur les matériaux

Les utilisateurs de matériaux doivent en connaître les propriétés et les performances majeures. Celles-ci couvrent aussi bien le domaine économique et environnemental que scientifique. La physique et la chimie décrivent les grands principes qui assurent la très forte cohésion de l'état le plus condensé de la matière. D'où vient cette aptitude qu'ont les atomes à se rassembler, et quelles propriétés pouvons-nous d'emblée prédire ?

Les différentes sollicitations que supportent les matériaux

- Les sollicitations subies par une pièce, selon les différentes étapes de sa vie, ont comme effet de la déformer, de modifier la structure et éventuellement de détruire le matériau qui la constitue.
- Les sollicitations mécaniques qui sont prises en compte sont les contraintes extérieures, la pression, les vibrations et les chocs.
- Les sollicitations thermiques concernent la dilatation, la conduction de chaleur, les changements de phases et parfois la fusion ou l'évaporation.

- Les sollicitations physiques sont liées surtout au comportement électromagnétique (comportement magnétique, conduction électrique), mais aussi à l'effet des rayonnements.
- Les sollicitations chimiques concernent le comportement à la corrosion, la réactivité chimique, sans oublier le devenir du matériau abandonné dans l'environnement.

1.8.2. Les grandes classes des matériaux

Il existe trois grandes classes de matériaux :

- ✚ Les métaux et leurs alliages ;
- ✚ Les polymères organiques ;
- ✚ Les céramiques.

À ces trois classes, il convient d'en ajouter une quatrième et une cinquième :

- ✚ Les matériaux composites, qui sont des « mélanges hétérogènes » de matériaux des trois classes précédentes.
- ✚ Les matériaux organiques comme le coton ou le cuir, produits par le vivant.

1.8.3. Définition des céramiques parmi les matériaux

Celles-ci sont composées d'éléments métalliques et non métalliques. Elles sont généralement des *oxydes*, des *nitrures*, ou des *carbures*. Le groupe des céramiques englobe une vaste gamme de matériaux, comme les *ciments*, les verres, les céramiques traditionnelles faites d'*argile*, etc.

Céramique vient du grec « keramikos » qui signifie terre cuite ou terre à potier. Depuis des millénaires, les potiers ont choisi des matières premières argileuses qui ont la propriété de donner avec l'eau une pâte plastique qui se modèle aisément et qui devient dure, solide et inaltérable après cuisson [5-6].

Ainsi le terme « céramique », après avoir signifié les poteries, s'est étendu à toute une gamme de produits, les céramiques traditionnelles, telle la porcelaine, la poterie, les appareils sanitaires, les briques, les tuiles et tous les produits constitués essentiellement de silicates.

Les céramiques silicatées sont élaborées essentiellement à partir d'alumino-silicates naturels plus ou moins complexes que sont les argiles et qui présentent cette particularité, après mélange avec de l'eau, de devenir une pâte plastique permettant une mise en forme facile d'objets.

3.1. Définition mieux adaptée des céramiques

L'analyse précédente montre à l'évidence que la définition du Larousse, pour le terme céramique, n'est pas satisfaisante et qu'il est nécessaire, aujourd'hui, de mieux définir ce terme. De nombreuses définitions en ont été proposées et ont été revues récemment. D'une manière générale, nous considérerons qu'un matériau céramique est un solide inorganique non métallique. C'est la définition de la céramique au sens large du terme. Ainsi, les céramiques ne sont pas définies par rapport à une technologie (dont l'étape majeure serait le frittage) mais par référence à une nature chimique. Les matériaux inorganiques non métalliques obtenus par fusion, comme les verres et les réfractaires électro fondus, et les liants hydrauliques, (ciments, bétons, plâtre) obtenus par prise à partir d'un milieu aqueux, font donc partie de la classe des matériaux céramiques. D'après cette définition, le graphite et le diamant ainsi que la glace font également partie des céramiques [7].

On peut donc définir la céramique comme étant le domaine scientifique, technique et industriel qui s'occupe de la fabrication et des propriétés des solides inorganiques non métalliques.

3.2. Propriétés générales des céramiques

Les principales propriétés physiques, thermiques et chimiques des céramiques sont dominées par la nature des liaisons interatomiques et leur structure cristalline.

Les liaisons interatomiques des céramiques sont essentiellement des liaisons fortes, iono-covalentes. Dans certains matériaux (silicates, graphite), il existe cependant des liaisons faibles de type van der Waals. Toutefois, une autre caractéristique, leur microstructure, joue également un rôle très important sur les propriétés des céramiques, en particulier les propriétés mécaniques.

Les liaisons ioniques et covalentes impliquent tous les électrons de valence des atomes en présence. Il n'y a donc pas d'électrons libres et les céramiques sont, en général, de mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Elles sont fréquemment utilisées comme diélectriques et isolants thermiques.

Quand la bande d'énergie interdite (entre la bande de valence et la bande de conduction) est faible (de l'ordre de 1 eV), les céramiques peuvent être semi-conductrices (ex : SiC...) ; toutefois, des dopages peuvent grandement modifier cette bande d'énergie et être à l'origine de nouvelles propriétés électriques. Certains matériaux céramiques, de par leur structure cristalline, présentent des propriétés ferroélectriques (BaTiO_3), piézoélectriques (PZT), ferrimagnétiques.

Les liaisons ioniques et covalentes étant des liaisons fortes et stables, les températures de fusion des céramiques sont donc généralement très élevées [8]. C'est pour cette raison que certaines sont utilisées comme matériaux réfractaires ou comme conteneurs à hautes températures. Du fait également de la stabilité des liaisons chimiques, les céramiques possèdent une grande inertie chimique et sont donc peu sujettes à la dégradation par corrosion.

3.3. Élaboration des céramiques

L'élaboration est spécifique à chacune des familles de matériaux céramiques, celles-ci se distinguant précisément par leur mode d'élaboration. Celle-ci se fait soit par frittage soit par fusion, à relativement haute température, ou soit par prise, à la température ambiante, pour les liants minéraux [9].

- Quand l'un des composants reste à l'état solide lors de la cuisson, le procédé est appelé frittage : il a lieu avec ou sans formation de phases vitreuses selon qu'il y a fusion ou non d'un ou plusieurs composants. C'est ce qui se produit au cours de l'élaboration des céramiques traditionnelles et des céramiques techniques.
- En revanche, quand il y a fusion de tous les composants, le procédé est appelé fusion ; c'est le cas des verres, des vitrocéramiques et des réfractaires électro-fondus. En ce qui concerne les liants hydrauliques, les matériaux n'acquièrent pas leur cohésion par cuisson mais grâce à des réactions d'hydratation des composés présents qui conduisent à l'établissement de liaisons de forte intensité entre les particules constituant le liant ; on parle de prise du liant. Le durcissement des liants hydrauliques n'est donc dû qu'à l'effet de l'eau qui, par formation de composés hydratés stables et cristallisés, va « cimenter » les particules entre elles

Tableau 1.1

Famille de céramique	1^{-ème} étape	2^{-ème} étape	3^{-ème} étape
Céram traditionn	Poudre	Mise en forme	Traitement thermique
Verres	Poudre	Traitement thermique	Mise en forme
Liants minéraux	Trait. thermique	Poudre	Mise en forme

En se rappelant que les matériaux céramiques ont en commun d'être inorganiques et non-métalliques, il est intéressant de remarquer, comme l'avait montré P. Boch, que les trois modes d'élaboration mettent en œuvre quasiment les mêmes opérations mais intervenant dans un ordre différent (**tableau 1.1**).

- **Élaboration des céramiques par frittage**

La céramique traditionnelle est une industrie dont les savoirs faire sont très anciens, comme nous l'avons indiqué au début de notre introduction, alors que la céramique technique qui remplace d'autres matériaux grâce à de meilleures performances, se retrouve dans des savoirs faire industriels très récents, très variés et en perpétuelle évolution.

Toutefois et bien que les deux types d'industrie soient très différents, ils ont en commun le fait de mettre en œuvre le même schéma de fabrication [6] :

Poudres → prétraitement → mise en forme → séchage → traitement thermique (frittage) → produit fini

Ce schéma est le même pour les carreaux de salles de bain que pour les supraconducteurs ou les piézoélectriques les plus innovants.

Tout commence par la poudre qui se doit d'être sélectionnée suivant des critères précis et de subir des prétraitements facilitant sa mise en forme, avec adjonction d'adjuvants, souvent organiques.

Différents processus de mise en forme peuvent être utilisés pour obtenir des pièces : pressage uniaxial ou isostatique, coulage, extrusion, moulage par injection, usinage à cru... Après compactage, les poudres doivent subir un déliantage (élimination des adjuvants qui peuvent, tout simplement, être l'eau, dans le cas des poteries par exemple). Puis ensuite, il faut procéder à une « cuisson », terme populaire qui correspond au frittage.

C'est au cours de cette opération que l'on réalise le passage de la pièce crue, constituée de grains disjoints, à la pièce massive densifiée, constituée de grains plus ou moins bien soudés, avec une porosité résiduelle plus ou moins importante.

Les pièces doivent ensuite, en général, être usinées (usinage) et contrôlées. Des chapitres entiers de l'ouvrage Science et technologies céramiques sont consacrés à chacune des phases de l'élaboration ; nous renvoyons le lecteur à cet ouvrage Fantozzi et al. [10]. Attardons-nous simplement à l'étape de « cuisson », le frittage.

Le frittage est un traitement thermique qui permet de passer d'un système de particules individuelles vers un état solide de compacité plus ou moins aboutie.

La conversion de la poudre en un solide dense a lieu par changement de la forme des grains de poudre, par le remplacement des interfaces solide-gaz par des interfaces solide-solide et par la disparition de la porosité. D'une manière générale, au cours du frittage, deux phénomènes sont en compétition : la densification et la croissance des grains. On peut ainsi avoir :

- ❖ Consolidation sans densification ;
- ❖ Densification seule (recherchée pour l'obtention des microstructures très fines) ;
- ❖ Densification associée à de la croissance (situation la plus fréquente).

Si aucune phase liquide n'apparaît, le frittage est dit « en phase solide » avec deux cas : le frittage non réactif (un constituant chimique au départ ; une pièce composée du même constituant à la fin) ; le frittage réactif (la densification est accompagnée d'une ou de plusieurs réactions chimiques entre les constituants).

Selon qu'une contrainte mécanique externe est appliquée ou non, on distingue le frittage naturel et le frittage sous charge. La contrainte peut être appliquée de manière uniaxiale, machines HP (Hot Pressing) ou de manière isostatique, machines HIP (Hot Isostatic Pressing).

Enfin, des machines récentes permettent d'associer l'application d'une contrainte uniaxiale et le passage de pulses de courant au travers de l'échantillon ou, du moins si celui-ci n'est pas conducteur, dans la matrice contenant l'échantillon ; ce sont les machines dites SPS (Spark Plasma Sintering) qui autorisent, entre autres, des frittages très rapides permettant de conserver des microstructures très fines. La densification lors du frittage peut être étudiée par dilatométrie, ce qui permet de suivre l'évolution de la densité de la céramique. Des mesures de densité et de porosité permettent d'évaluer le taux de porosité ouverte ou fermée obtenue lors du frittage.

Les paramètres importants qui contrôlent le processus du frittage sont :

- La température et la vitesse de chauffage ;
- Le temps ;
- La taille des particules de poudre ;
- La composition des poudres ;
- Éventuellement, la pression appliquée.



Figure 1.2 Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux

▪ Élaboration des céramiques par :

○ Les réfractaires électro-fondus

Pour les fours de fusion du verre, on a besoin de réfractaires denses qui ont une bonne résistance à la corrosion. Ces réfractaires sont obtenus par électro-fusion. Les réfractaires électro-fondus sont en général constitués de mélanges de phases vitreuses et, ou, cristallines, elles-mêmes constituées de cristaux enchevêtrés de haute réfractaire et compacts [10-13].

- Les verres

Le verre a produit en chauffant les matières premières à une température au-dessus de laquelle il y a fusion. Les principaux procédés de mise en forme des verres sont les suivants : pressage, laminage, flottation, soufflage et étirage.

- Élaboration via une « prise » : liants hydrauliques

Les ciments, les bétons et les plâtres sont utilisés comme des matériaux de construction à une échelle gigantesque. Contrairement aux matériaux précédemment cités, ces matériaux n'acquièrent pas leur résistance mécanique par traitement thermique mais par des réactions chimiques qui permettent d'établir entre les particules constitutives des liaisons de forte intensité.

- Le ciment est un liant hydraulique : il fait prise et durcit lorsqu'on le mélange à l'eau. Le durcissement est dû au seul effet de l'eau, par la formation de composés stables entre l'eau et les produits de base. Les constituants du ciment sont des composés anhydres, instables en présence d'eau. Ces composés sont essentiellement des silicates de calcium cristallisés. Mélangés à l'eau (2/3 ciment, 1/3 eau), ils forment des composés hydratés, stables et cristallisés. Les réactions d'hydratation sont des réactions exothermiques et complexes.

Le ciment pur ayant subi la prise, sans fissuration, a une résistance mécanique plus importante que le béton ou le mortier.

- Le plâtre quant à lui, est constitué d'une poudre de cristaux de sulfate de calcium hémihydraté obtenu, par traitement thermique, à partir de gypse qui est le sulfate de calcium dihydraté. Lors de la prise du plâtre, il y a réhydratation de l'hémihydrate en dihydrate mais sous forme d'aiguilles enchevêtrées qui vont conférer au plâtre sa tenue mécanique.

Le plâtre a une faible résistance et de faibles propriétés d'adhésion mais il est commode à manipuler et permet l'obtention de surface lissée en raison de la finesse et de la forme des grains.

▪ Revêtements céramiques

On est amené, pour diverses raisons, à réaliser des revêtements céramiques sur un substrat (métallique, céramique, polymère) en utilisant différentes techniques de dépôt. Ces revêtements permettent d'obtenir des propriétés de surface différentes de celles du support. On peut réaliser des couches minces (quelques couches atomiques) par dépôt sous vide ou des couches épaisses (quelques mm) par projection plasma. Les revêtements céramiques sont également utilisés pour les céramiques traditionnelles pour améliorer l'aspect de surface ou pour réaliser des décors.

1.8.4. Applications des céramiques

4.1. Les principaux domaines d'application des céramiques

Les céramiques peuvent remplir de nombreuses fonctions qui déterminent leurs applications et, donc, les développements industriels. Les principales applications des céramiques techniques sont rappelées dans la figure 1.4.



Figure 1.4 Grande variété des applications des céramiques techniques et des matériaux qui les constituent

4.2. Les principales fonctions assurées par des céramiques

Nous ne faisons que citer les principales fonctions assurées par des céramiques et indiquer la partie de l'ouvrage qui en traite :

- Fonctions électriques et magnétiques ;
- Fonctions optiques ;
- Fonctions chimiques et électrochimiques ;
- Fonctions thermiques ;

Chapitre 1

- Fonctions thermomécaniques ;
- Fonctions nucléaires ;
- Fonctions militaires ;
- Fonctions biomédicales.

Chapitre 2 : Typologie des procédés

On peut classer les procédés en trois catégories suivant le degré de finition de la pièce :

- ❖ Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit ;
- ❖ Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle ;
- ❖ Tertiaire : Augmente la qualité pièce (polissage).

Rappel sur la classification des métaux et alliage industriels

1.1. Familles des matériaux de construction

Dans l'industrie de la transformation ou de la production des matières premières, l'utilisation des différentes nuances de matériaux trouve un grand intérêt industriel. En effet, les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini.

2.1 Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit

Généralités :

Nous allons commencer par décrire les procédés primaires où la matière est mise en forme dans un moule à partir d'un état liquide (fluide ou pâteux) ou à partir de granulés.

Parmi ces procédés primaires, l'un des plus anciens est la fonderie [6]. La fonderie des métaux est un procédé industriel qui consiste à couler un alliage en fusion dans un moule (empreinte) constitué de deux châssis ou coquilles.

On peut aussi distinguer, en première approche, deux procédés très largement répandus au niveau industriel (fonderie sous pression, moulage coquille) par rapport à tous les autres (centrifugation, basse pression, squeeze casting, rhéocasting...). Ces procédés concernent majoritairement les alliages non ferreux à l'exception notable de la centrifugation.

	Fonderie sous pression	Moulage coquille et BP	Cobapress	Centrifug	Squeeze casting	Semi-Solid
Al	+++	+++	+		+	+
Zn	++					
Cu	+	+		+		
Mg	+	+				+
Pb	+	+				
Fonte		+		+++		
Acier				+		

La fonderie sous pression

La fonderie sous pression (High Pressure Die Casting) consiste à injecter le métal liquide à grande vitesse (50 m/s aux attaques) et à lui appliquer une très forte pression (80 à 100 MPa) pendant la solidification. Ce procédé est utilisé majoritairement pour réaliser des pièces en aluminium de deuxième fusion (AlSi9Cu3, AlSi12, AlSi10Mg...), mais également des alliages de zinc (zamak3, zamak5), des alliages de cuivre (laiton 60/40), des alliages de magnésium (AZ91) ou (plus rarement) des alliages de plomb.

La fonderie sous pression présente de nombreux avantages : une forte productivité (temps de cycle court, forte automatisation), des pièces à forte précision dimensionnelle (near-net-shape) et à faible épaisseur.

C'est le process de fonderie le plus économique pour des grandes séries. En revanche, il présente un certain nombre de limitations : des porosités piégées pendant le remplissage, des caractéristiques mécaniques (statique et dynamique) en dessous de celles obtenues avec les autres procédés et l'impossibilité de réaliser des zones creuses non démoulables.

Le moulage en coquille

Le moulage en coquille (Gravity Die Casting) consiste à remplir par gravité un moule en acier (mono ou multi-empreintes). Ce procédé peut se pratiquer sur un chantier statique (ou basculant) ou sur un carrousel (grande série automobile) possédant 5 à 6 outillages identiques. Le moulage en coquille permet de mouler majoritairement des alliages d'aluminium de première fusion à faible teneur en fer (AlSi7Mg0.2, AlSi13...), mais également des cuivreux, des alliages divers (étain, plomb, magnésium) et de manière plus exceptionnel des alliages ferreux (fonte chez NDC foundry). Le moulage en coquille permet de réaliser des pièces creuses en positionnant un noyau sable qui sera éliminé a posteriori (débouillage thermique ou mécanique), ce que n'autorise pas la fonderie sous pression.

La bonne qualité des pièces (faible quantité de porosité inclus) permet de réaliser des traitements thermiques et d'augmenter ainsi les caractéristiques mécaniques (R_m , $R_{p0.2}$, allongement). Le moulage coquille, deuxième procédé de fonderie en moule métallique (après la fonderie sous pression) est fortement utilisé dans le secteur automobile (pièce sollicitées ou nécessitant des noyaux) mais est utilisé également pour des pièces mécaniques sollicitées (mécanique, hydraulique, ...).

Il existe deux types de moules :

- ✚ Les moules non permanents, qui sont détruits après chaque coulée, c'est-à-dire, il consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.
- ✚ Les moules permanents, dont les coquilles sont en acier allié comprenant 0,35 % de carbone, ainsi que du chrome, du silicium et du vanadium (ils permettent le moulage d'un grand nombre de pièces ; de 100 000 à 150 000). Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille. Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, bronzes (10-13% Zinc), Al-Si possédant de bonnes propriétés de fonderie, Al-Si-Cu et Al-Cu (4-12 %Cu). Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou de coulée et les événements, les chapes sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation.

Pour les moules non permanents, il est nécessaire d'utiliser un modèle de la pièce qui va laisser son empreinte dans le moule. Celui-ci peut être :

- ✚ Permanent (en bois, plâtre, aluminium ou résine),
- ✚ Ou non permanent (en polystyrène ou en cire).

Dans le cas d'une grande série, pour le moulage sable à modèle permanent, on pourra utiliser une plaque modèle qui permet une automatisation du procédé.

2.2. Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle

2.2.1 Procédés d'usinage par enlèvement de matière

L'ensemble de ces procédés est caractérisé par deux mouvements : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance.

Mouvement de coupe (M_c)

C'est le mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de la machine dite course de travail.

Mouvement d'avance (M_f)

C'est le mouvement dont la direction est perpendiculaire à mouvement de coupe (M_c) et qui intervient lorsque l'outil ne travaille pas c'est-à-dire pendant la course-retour. Ce mouvement a pour but de décaler la pièce latéralement d'une quantité dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course-travail détacher d'autres copeaux

A ces mouvements sont associés :

- ✚ La vitesse de coupe (V_c) définie comme la vitesse tangentielle de la matière par rapport à l'arête tranchante de l'outil,
- ✚ La vitesse d'avance (V_f) définie comme vitesse de déplacement de l'outil pendant l'opération d'usinage.

Les paramètres qui influencent l'usinage sont :

- La vitesse de coupe,
- La vitesse d'avance,
- La profondeur de passe.

Les conditions d'usinage influent également sur la qualité du résultat (respect des dimensions de la pièce, états de surface satisfaisant, etc.). Ces conditions sont liées à :

- La lubrification,
- La nature de l'outil,
- Sa géométrie,
- Le type d'opération d'usinage réalisée.

Les principales techniques d'usinage sont :

- Le tournage,
- Le fraisage,
- Le perçage,
- La rectification,
- L'UGV (procédés précédents mais à grande vitesse).

2.3. Tertiaire : Amélioration de la qualité pièce (polissage)

I – GENERALITES SUR LE POLISSAGE1)

1) Définitions :

Dans la chaîne des opérations de préparation de surface, le polissage est essentiellement une opération de finition, qui a pour but de :

- diminuer la rugosité,
- diminuer la topologie de surface en éliminant les défauts superficiels mis en évidence par l'opération de décapage tels :

- les microfissures
- les porosités
- les inclusion

2) Domaines concernés :

la plasturgie

la production d'énergie

l'agroalimentaire

la décoration

le biomédical

3) Différents types de polissage

polissage mécanique

polissage électrolytique

polissage chimique

Tous les procédés tertiaires interviennent après qu'un ou plusieurs procédés primaires et éventuellement secondaires aient donné la forme générale de la pièce.

Ils sont destinés à modifier les propriétés d'emploi des objets. Parmi les procédés tertiaires, on peut distinguer les traitements qui modifient les propriétés uniquement en surface :

- Dépôt d'un revêtement ou d'une peinture,
- Galvanisation,
- Grenailage ou sablage.

De ceux qui modifient à la fois les propriétés de la surface et celles du volume, comme la plupart des traitements thermiques.

Chapitre 2

On peut s'interroger à cette occasion sur ce qu'on appelle surface : à partir de quelle profondeur est-on dans le volume ?

Chapitre

Classification

3

procédés

de

mise

des

forme

en

On entend par procédé de mise en forme tout moyen permettant de passer du virtuel au réel. On peut classier les procédés dans quatre familles suivant la méthode de mise en forme.

3.1. Par enlèvement de matière

Généralement la mise en forme de la matière pour produire des pièces de différents types de machines et d'appareils fait appel à des techniques très diverses et suivant l'état de la matière (liquide, solide ou pulvérulent).

Donc deux types de solutions se présentent :

a) La mise en forme par enlèvement de la matière qui est l'usinage ou coupe de matière et qui occupe une place de première importance en construction mécanique et dont les moyens sont sans cesse perfectionnés pour diminuer le coût de fabrication et améliorer la qualité du travail réalisé.

b) La mise en forme sans enlèvement de la matière et parmi lesquelles on peut citer :

- Le Formage à chaud et à froid
- La Fonderie
- Et le Frittage

Ce qui nous intéresse dans cette partie est la coupe des métaux qui consiste à l'usinage des surfaces fonctionnelles des pièces mécaniques par enlèvement de la matière (copeaux) au moyen d'outils de coupe.

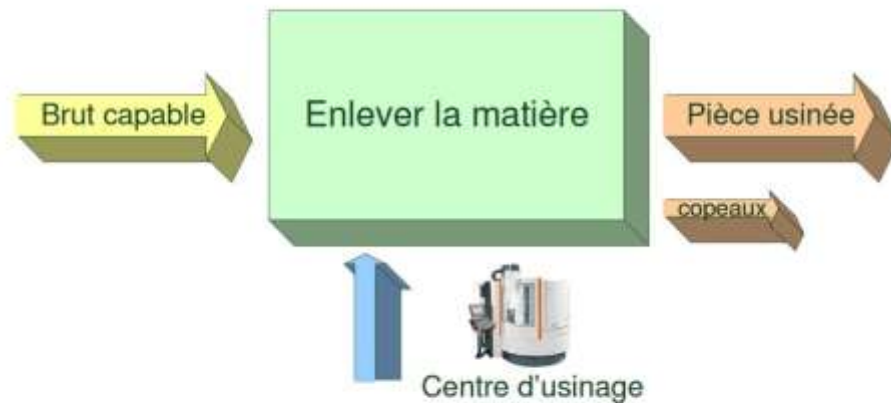
Donc l'outil de coupe est un organe de machine-outil qu'en cours d'opération agit directement sur l'ébauche par enlèvement de matière pour produire une surface conforme à celle spécifiée sur le dessin de définition. Dans l'usinage le matériau de base est à l'état solide appelé ébauche (état initial), après enlèvement du métal par coupe (transformation) on obtient la pièce mécanique à l'état final conforme aux spécifications du dessin de définition.

Dans l'usinage le matériau de base est à l'état solide appelé ébauche (état initial), après enlèvement du métal par coupe (transformation), on obtient la pièce mécanique à l'état final conforme aux spécifications du dessin de définition.

Exemple : usinage

On part d'un bloc, et on crée les formes de la pièce en enlevant la matière à l'aide d'un outil

Étape 1



3.2. Par ajout de matière

La fabrication additive (FA) où ajout de matière est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, à l'opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage). La fabrication additive était à l'origine réservée au prototypage et donc à la partie pré-production du cycle de vie d'un produit.

La fabrication additive s'insère également dans la phase post-production du cycle de vie d'un produit. En effet, elle peut être utilisée pour réparer des pièces endommagées ou bien pour remplacer des pièces anciennes dont la production en série est terminée et qui n'existe plus en stock.

La FA présente de nombreux avantages, elle permet notamment de fabriquer des formes très complexes, certaines irréalisables avec les procédés conventionnels, et avec une grande diversité de matériaux. Cela permet également de réaliser des pièces monoblocs, c'est-à-dire des pièces sans assemblage.

La fabrication additive trouve également beaucoup d'applications dans des domaines tels que l'aéronautique, la médecine ou encore l'automobile.

La FA est donc un procédé de fabrication relativement original qui, utilisé correctement, présente de nombreux avantages : celui de produire différemment mais aussi, ce qui représente un potentiel de rupture important en ingénierie, celui de concevoir des systèmes basés sur de nouvelles géométries et de nouvelles combinaisons de matériaux.

On part d'un plateau vide, et on ajoute de la matière pour créer la pièce.

Exemple : dépôt de fil abs

Étape 2



3.3. Par transformation (moulage)

Le moulage par injection est un procédé de transformation de matières thermoformables, comme les matières plastiques, les élastomères (caoutchoucs), et les métaux et alliages à point de fusion relativement bas comme l'aluminium, le zinc ou le laiton. Le moulage par injection permet la fabrication de pièces en grande ou très grande série.

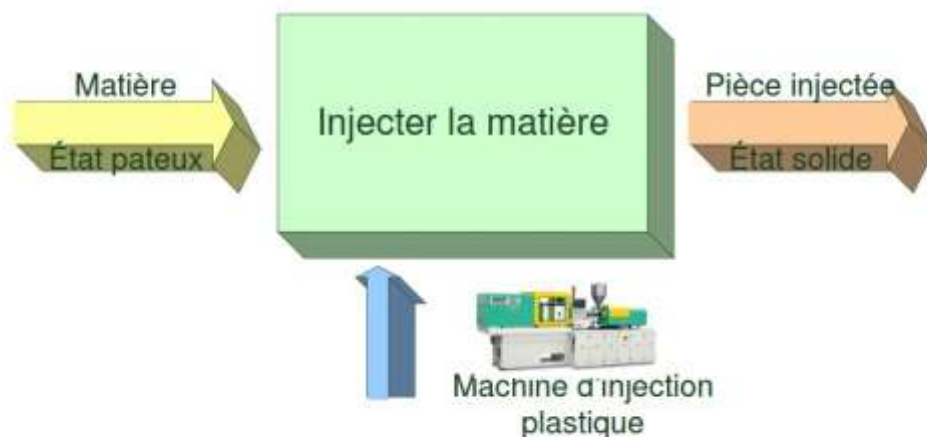
La matière est ramollie, puis injectée dans des moules installés sur une machine spéciale (presse), et composés de deux coquilles (partie fixe et partie mobile). La matière est ensuite refroidie puis la pièce est éjectée du moule. On rencontre des composants moulés par injection dans de très nombreux produits manufacturés : automobile, électroménager, matériel informatique, mobilier, etc.

Pour les pièces métalliques, les dimensions sont relativement limitées, mais pour les plastiques, elles vont de quelques millimètres à plusieurs mètres (éléments de carrosseries automobiles, tables de jardin, par exemple).

On coule la matière à l'état liquide ou pâteux dans un moule, et on obtient la pièce après solidification.

Exemple : Injection plastique

Étape 3



Les grandes étapes du moulage par injection

1. Réaliser un moule. Ce dernier est composé de deux parties, une partie fixe et une partie mobile. La conception du moule doit permettre une éjection facile des pièces.

2. Installer le moule sur une machine spécifique : la presse à injection. Les deux parties du moule sont pressées fortement l'une contre l'autre. Le matériau (sous forme de granulés) est versé dans une vis de plastification (ou vis sans fin) qui est chauffée. La rotation de la vis alliée à la température va ramollir les granulés, qui se transforment en matière plastique fondue. La matière fondue et déformable est stockée à l'avant de la vis, avant l'injection.
3. Injecter sous haute pression les matières plastiques ramollies sous l'effet de la chaleur dans le moule. Dans cette phase, il faut s'assurer que le moule soit complètement rempli avant que le matériau ne se solidifie. Voilà pourquoi on continue à envoyer de la matière sous-pression, afin de pallier au retrait qui s'exerce lorsque la matière refroidit.
4. Refroidir le tout, par le biais de circuits de refroidissement à l'intérieur du moule. Suite à cette opération l'objet est éjecté du moule.
5. Ejecter la pièce.
6. Recommencer avec la prochaine pièce.

3.4. Par déformation

3.4.1. Le découpage :

1.1. Le poinçonnage et l'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme très utilisé dans l'industrie, permettant d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince, montées sur presse. La tôle appelée « flan », est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. L'opération peut être réalisée avec ou sans serre flan pour maintenir le flan contre la matrice pendant que le poinçon déforme la feuille. Le poinçonnage n'est pas un procédé de découpe thermique. Il s'agit d'un procédé par cisailage des tôles.

La tôle est coincée entre un poinçon et une matrice. La descente du poinçon dans la matrice découpe le matériau comme le ferait une paire de ciseaux. En principe il n'y a pas de limite au poinçonnage, seule la puissance de la machine limite l'épaisseur des matériaux à découper en fonction des caractéristiques mécaniques du matériau.

1.2. L'Oxycoupage

C'est un procédé de découpage par fusion du matériau par combustion localisée et continu d'un jeu d'oxygène pur. Pour amorcer l'opération, il faut au préalable chauffer un point de la pièce appelé point d'amorçage au moyen d'une flamme de chauffe. Puis un jet d'oxygène est envoyé à grande vitesse pour commencer la combustion. Le jet d'oxygène expulse le matériel en fusion provoquant une saignée de coupe. Le mélange d'oxydes et de métal en fusion est appelé scories d'oxycoupage.

Le jet de coupe est concentré dans une buse calibrée montée sur un chalumeau coupeur. Pour obtenir la chauffe de la pièce, on utilise deux gaz : un comburant et un carburant. Le carburant est de l'acétylène ou du propane, le comburant est l'oxygène. L'oxygène est donc utilisé en deux temps : un fil pour chauffer, on dit qu'il s'agit de l'oxygène de chauffe, puis il est utilisé pour la découpe, on dit qu'il s'agit de l'oxygène de coupe. L'oxycoupage est utilisé pour découper l'acier au carbone dans de fortes épaisseurs. On peut facilement découper des pièces de plus de 200 mm.

1.3. La découpe jet d'eau

Le principe de cette technologie qui puise son origine dans les années 1960, initié par un certain Docteur Norman Franz, consiste à projeter un filet d'eau à une vitesse très élevée, comprise entre 600 et 900 mètres par seconde à travers une buse de faible diamètre, entre 0,05 et 0,5 mm.

Le diamètre du jet d'eau qui sera mis en contact avec le matériau à découper correspond au diamètre de la buse. Pour pouvoir découper le matériau, la pression du jet doit pouvoir atteindre jusqu'à 4000 bars. Le matériau est découpé par arrachement de matière. Pour des matériaux plus difficiles ou plus durs, on ajoute au jet d'eau un abrasif.

Utilisation de cette technique

- Découpe de métaux
- Découpe de minéraux, verres, céramiques
- Découpe de produits alimentaires
- Découpe de plastiques, caoutchoucs, composites
- Découpe de textiles, papiers, cartons, cuirs
- Décalaminage, nettoyage de turbines
- Décapages de coques de navires
- Décontamination nucléaire
- Démolition, piquage et perçage en bâtiment

1.4. La découpe Laser

Le laser tout comme l'oxycoupage est un procédé thermique de découpe. La source laser émet un faisceau lumineux qui est focalisé (concentré) dans un système optique (focale) selon le principe adopté dans un appareil photo.

La forte puissance thermique conduit à une fusion rapide puis à l'évaporation partielle ou totale du matériau. Un flux de gaz enveloppe le faisceau lumineux, expulse le matériau en fusion de la fente de coupe (saignée). La découpe au laser peut se diviser en deux sous procédés :

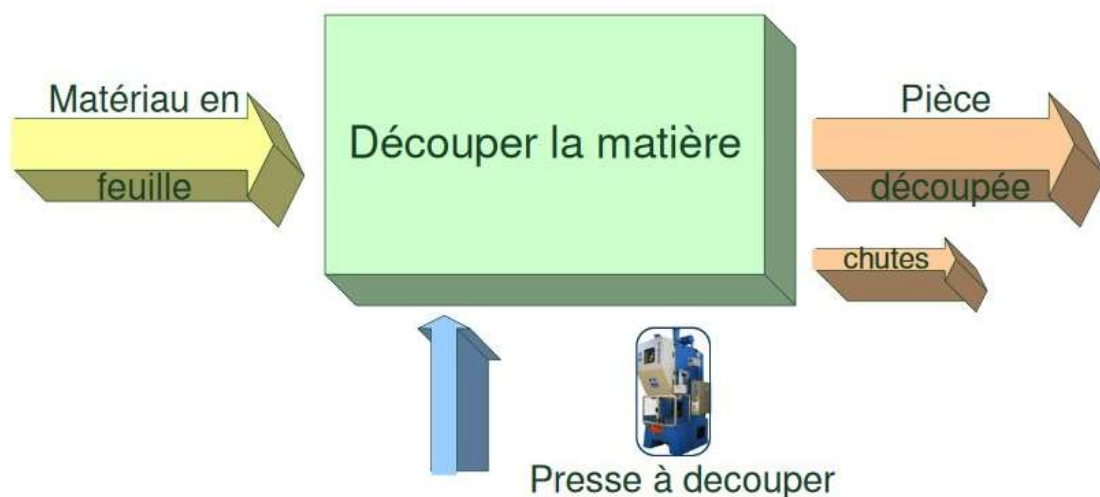
- La découpe par sublimation : le matériau s'évapore sous l'effet de la chaleur. Ce procédé s'emploie aussi bien pour les métaux que d'autres matériaux tels que le bois, la céramique ou les matières plastiques.
- La découpe par fusion : le matériau entre en fusion sous l'effet de la chaleur et il est expulsé à l'aide d'un jet de gaz. Ce procédé s'emploie pour les aciers inox ou les métaux non ferreux. Ce procédé permet des vitesses de coupes plus élevées qu'avec une découpe par sublimation.

La découpe laser présente de nombreux avantages, la vitesse de découpe élevée, la forte puissance limite à une zone affectée thermiquement, une faible déformation, une précision importante de l'ordre du 1/10 -ème de mm.

On part d'un matériau en feuille que l'on déforme à l'aide d'un outillage spécifique.

Exemple : Découpage

Étape 4



3.5. Les procédés d'assemblage

Les procédés d'assemblages permettent d'associer deux (ou plus) pièces ensemble. Certains nécessitent un apport de matière supplémentaire d'autres non. En fonction du procédé, après avoir été assemblées, les pièces *peuvent être ou non dissociées*.

3.5.1. Types d'assemblages

On distingue ensuite différents types d'assemblage, un assemblage peut être permanent ou démontable, direct ou indirect.

3.5.1.1. Assemblage permanent

Assemblage non démontable : pour supprimer cette liaison, il est nécessaire de déformer ou de détruire au moins une des pièces formant l'assemblage.

- Soudure-Clinchage (emboutissage)
- Emmanchement à force
- Certains frettages, certaines colles et adhésifs
- Sertissage...

3.5.1.2. Assemblage démontable

La liaison est conçue de manière à être démontée sans détérioration importante des pièces qui peuvent être généralement réutilisées pour recréer un assemblage. L'élément assurant la liaison peut ne pas être réutilisable.

- Vissage (Vis-écrou)
- Boulonnage-Goujons
- Clavette (transversale/Longitudinale/ tangentielle)
- Arc-boutement, Serre-joints-Goupille

- Coincement de formes coniques
- Certains frettages
- Certaines colles et adhésives

3.5.1.3. Assemblage direct

L'assemblage ne nécessite aucune pièce intermédiaire, la forme des pièces en contact suffit pour la réalisation de celui-ci, parmi ces techniques on trouve : Le soudage, le Frettage, le Clinchage, Le Sertissage, l'Emboîtement élastique, ..

3.5.1.4. Assemblage indirect

Une ou plusieurs pièces intermédiaires sont utilisées.

- Visserie : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage
- Rivet
- Clavette
- Collage
- Goupille
- Embrèvement (avec tenon, mortaise et cheville)
- Bague de tolérance
- Anneau élastique
- Agrafage

On peut aussi distinguer le type d'assemblage par domaine d'activité :

- Menuiserie (bois, aluminium,)
- Systèmes de fixation, Transmission (mécanique).
- Plomberie : Robinetterie, Emboîture...
- Charpenterie

Exemples d'assemblages

Soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage qui assure la liaison permanente de divers éléments métalliques. Il désigne deux techniques :

- Le soudage hétérogène.
- Le soudage autogène.

Le soudage hétérogène contient :

- Le soudage hétérogène (le Brasage) : Le soudage autogène, Soudage Oxyacétylénique (combustion gazeuse).
- Le soudage à l'arc électrique
- Rivetage
- Emmanchement à force
- Arc-boutement
- Assemblage conique
- Vissage et Boulonnage
- Goujons
- Le clavetage
- Le Clinchage
- Le frettage
- L'emboîtement élastique
- Un embrèvement
- Le sertissage

Chapitre 4 : Procédés
de mise en forme des
matériaux métalliques

4.1. Préparation des matières premières

Le produit de l'industrie provient de toute une variété de matières premières primaires et secondaires. Les matières premières primaires proviennent de minerais qui sont extraits de mines, subissent ensuite une transformation avant d'être soumis aux processus métallurgiques pour produire un métal brut. La transformation des minerais est réalisée à proximité de la mine, ainsi que, progressivement, la production de métaux. Les matières premières secondaires sont des déchets et des résidus locaux.

Le produit élaboré par l'industrie est soit du métal affiné, soit ce que l'on appelle des demi-produits, c'est-à-dire des métaux et des alliages obtenus sous forme de lingots coulés ou de formes travaillées, sous la forme de profil extrudé, de feuille, feuillard, de barre, etc. Un très large choix de matières premières est à la disposition des différentes installations et les procédés de production métallurgique mis en œuvre sont donc très divers. Très souvent en effet, ce sont les matières premières qui déterminent le choix du procédé. Aussi, les variations dans les caractéristiques des matières premières influent sur le spectre des constituants libérés ou sur l'état physique de certains constituants, par exemple la grosseur et les propriétés physiques des poussières produites. Le choix des matières premières dont peuvent disposer les différentes usines de non-ferreux est étendu et signifie qu'il a fallu inclure une grande variété de procédés d'élaboration métallurgique dans la section « Meilleures techniques disponibles », pour la majorité des groupes de métaux. Très souvent, le choix du procédé est dicté par les matières premières, de sorte que le type de four n'entre que pour une part mineure dans la détermination de la meilleure technique disponible, à condition que le four ait été conçu pour les matières premières utilisées et qu'il comporte une récupération d'énergie lorsque les conditions le permettent.

La hiérarchie dans le choix d'un procédé nouveau ou modifié a été identifiée comme suit :

- Le prétraitement thermique ou mécanique des matières secondaires afin de minimiser la contamination organique de la charge.
- L'utilisation de fours ou autres postes de traitement étanches, qui permettent d'éviter les émissions fugitives, de récupérer les chaleurs perdues et de recueillir les gaz de procédé pour valorisation (par ex. utilisation du CO comme combustible et du SO₂ pour l'acide sulfurique) ou pour dépollution.
- L'utilisation de fours semi-étanches lorsque des fours étanches ne sont pas disponibles.
- La minimisation des transferts de métal entre procédés.
- Lorsque ces transferts sont inévitables, l'utilisation de goulottes de coulée de préférence aux poches de transfert de métal liquide.
- Dans certains cas, la restriction des techniques à celles qui évitent les transferts de métal en fusion peut empêcher la récupération de certaines matières secondaires qui entreront alors dans le circuit des déchets. Dans ces cas, l'utilisation d'étages de captage secondaires ou tertiaires des fumées s'impose pour pouvoir récupérer ces matières.
- L'installation de hottes et de gaines prévues pour capter les fumées qui émanent des transferts et des coulées de métal, de mattes ou de scories à haute température.
- Des enceintes autour des fours ou des réacteurs seront parfois indispensables pour éviter les rejets de fumées perdues dans l'atmosphère.
- L'utilisation maximale du contenu énergétique des concentrés sulfurés.

4.2. Processus de fusion des composés métalliques

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine géométrie, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. Les techniques de mise en forme diffèrent selon les matériaux.

4.2.1. Questions préliminaires pour la mise en œuvre d'un procédé de mise en forme

Les performances mécaniques des pièces de structures dépendent fortement du **matériau** utilisé et de son **procédé de transformation**. La « Mise en forme des alliages métalliques » s'intéresse aux matériaux lors de la transformation par **déformation plastique** (état solide), **solidification** (état liquide) ou **compactage** (poudres) dans tous les grands secteurs industriels : industrie du transport (ferroviaire, automobile aéronautique), de l'emballage, de l'énergie, du nucléaire et de la santé.

Une voie classique en métallurgie consiste à utiliser des produits issus du laminage ou du filage. Par la suite, ces produits seront découpés ou usinés pour obtenir des produits finis.

On peut aussi, à partir de lopins ou de flans découpés dans des semi-produits, utiliser toutes les ressources du formage à chaud (forgeage, estampage) ou à froid (emboutissage, hydroformage) produire des pièces de qualité industrielle (voir image ci-dessous) [22-23].



Quel que soit la technique utilisée, il est primordial de se poser les questions suivantes :

- ✚ Quel est le matériau envisagé et le degré de complexité des pièces fabriquées ?
- ✚ Quel est le type de machine envisagée et quelle est sa puissance ?
- ✚ Quelle est la température de fabrication des pièces ?
- ✚ Quel est le coût optimal de fabrication ?
- ✚ Quelle est la cadence de fabrication des pièces ?

L'emboutissage des métaux dans l'industrie : L'emboutissage de produits plats est un procédé de fabrication par lequel des déformations permanentes sont imposées à une tôle par l'intermédiaire d'un poinçon dont la forme est dictée par le résultat final recherché.

Durant la course du poinçon, la tôle est supportée par une matrice présentant une ouverture centrale permettant le passage du poinçon et de la tôle emboutie.

Suivant que la partie de la tôle reposant sur la matrice est bloquée ou libre de s'écouler, on parlera respectivement d'étirage (stretch forming) ou d'emboutissage profond (deep drawing).

4.2.2. Les phénomènes physiques en mise en forme

Les procédés de mise en forme impliquent divers phénomènes physiques complexes couplés :

1. Grandes déformations irréversibles plastiques
2. Chargements complexes irréversibles
3. Lois de comportement complexes élasto-visco-plastique
4. Effets thermiques
5. Contact avec frottement évolutif
6. Contraintes initiales et induites
7. Effets cycliques (fatigue)
8. Endommagement et rupture.

Ces phénomènes étant complexes, on utilise de plus en plus la **Simulation Numérique** pour **Analyser**, **Optimiser** et **Maîtriser** les procédés de mise en forme. La mise au point d'une simulation complète est une opération longue et du ressort de spécialistes chevronnés avec des compétences variées :

1. Théorie de la mécanique des matériaux continus déformables.
2. Méthodes numériques de résolution des équations non linéaires.
3. Logiciels de simulation numérique.
4. Outils de XAO, de remaillage et d'optimisation-fiabilité.

4.3. Processus de : La transformation et le travail des métaux :

Les différentes branches de la métallurgie travaillent ces métaux pour fabriquer les pièces de machine, les mécanismes, les instruments et les outils dont ont besoin les autres industries et les différents secteurs de l'économie.

Sous leurs diverses formes, qu'il s'agisse de produits laminés (barres, bandes, profilés, tôles ou tubes) ou de produits étirés (barres, profilés, tubes ou fils), métaux et alliages servent de matière de départ pour cette fabrication. On peut citer, par exemple, les principaux procédés métallurgiques comme suis **[22-23]** :

❖ **Forgeage** : consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage. Aussi, par définition, le forgeage est un procédé de mise en forme des métaux par déformations plastiques à chaud ou à froid. On chauffe le métal (fours) à une température convenable afin que le métal devient malléable et forgeable. Le métal est appelé « Lopin » de volume calculé.

Le forgeage manuel :

C'est le forgeage traditionnel à l'enclume et l'outillage de frappé à main.

Le matriçage et l'estampage :

Le matriçage et l'estampage sont deux termes synonymes. C'est un procédé de fabrication mécanique exécuté par les presses sur lesquelles sont fixées des « matrices ». Il permet de produire des grandes séries de pièces.

❖ **Fonderie** :

Cette technique consiste à fondre et à couler le métal dans un moule. Son principe est de couler un alliage dans un moule. En détaillant, le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal, le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.

Utilisées dans des secteurs variés (aéronautique, automobile, robinetterie, appareils ménagers, ...) les techniques dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, mais également, des quantités à produire.

❖ **Frittage** : permet de consolider la poudre sous l'action de la chaleur et la rend ainsi compacte. La métallurgie des poudres fait appel à un mélange de fines poudres métalliques sélectionnées en fonction de leur granulométrie et de leur forme. Le mélange des poudres et un lubrifiant sont comprimés à haute pression dans une matrice. Sous l'effet de la pression, chaque particule au sein de la matrice se retrouve mécaniquement verrouillée l'une contre l'autre. Bien qu'elle manque encore de résistance, la pièce présente désormais suffisamment de solidité pour être transportée à la prochaine étape de production, c'est à dire le frittage, qui vise à la solidification complète. Dans le four de frittage, lorsqu'une température critique est atteinte, de solides liaisons intermétalliques se forment. Des opérations complémentaires peuvent alors être envisagées : calibrage, forgeage, usinage, traitements thermiques, ...La métallurgie des poudres présente des avantages économiques car le nombre d'opérations nécessaires à l'obtention de la pièce finie est moindre, mais aussi environnementaux grâce au gain en énergie et à la faible émission de particules gazeuses (le point de fusion n'est pas atteint).

❖ **Emboutissage** : permet d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle mince, un objet dont la forme est non développable. L'emboutissage est un procédé de mise en forme des matériaux métalliques en feuilles minces.

Cela consiste à donner une dimension spatiale à une feuille métallique initialement plane. Elle peut se présenter sous la forme de bande ou d'un flan.

Ce procédé permet d'obtenir des pièces de formes complexes, le plus souvent non développables, ce qui est à opposer au procédé tel que le pliage ou le roulage. L'emboutissage permet de fabriquer, entre autres, des pièces pour l'automobile, pour les appareils électroménagers, etc.

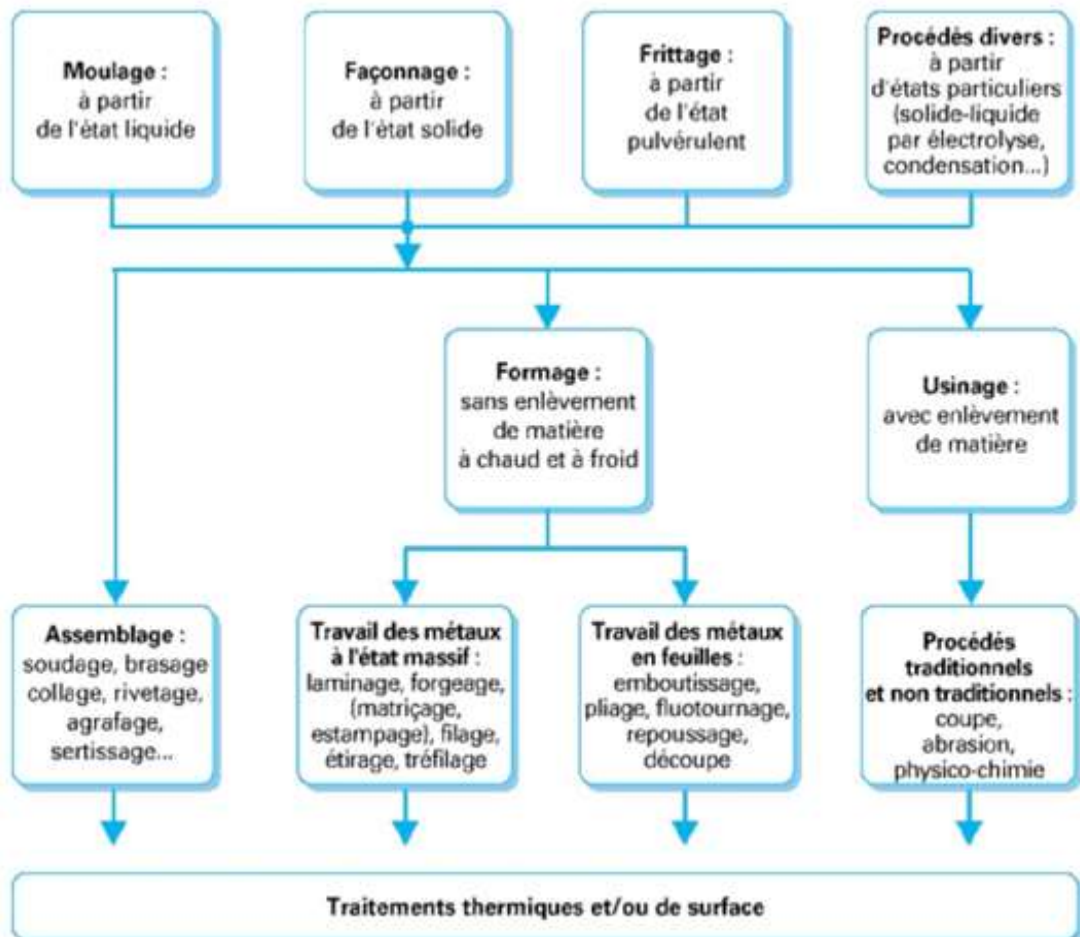


Figure 4.1. : Les différents procédés de mise en forme et de fabrication des matériaux

L'emboutissage peut se diviser en deux : est un procédé de formage par déformation plastique à chaud (emboutissage à chaud pour lequel la tôle est portée à la température de forgeage, (800 à 850 °C pour L'acier doux) ou à froid (pratiqué à la température ambiante) des métaux.

Il est largement employé dans plusieurs domaines industriels : l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, ou les appareillages électriques...etc.

Il permet de fabriquer à partir d'une feuille de métal initialement plane, appelée "flan", des pièces de forme complexe non développables.

Conclusion

Le progrès a permis, par la sophistication des procédés de mise en forme, de réaliser des objets techniques de plus en plus complexes performants et durables

Chapitre
de mise 5 : Procédés
polymères en forme des
composites et des
forme des (Mise en
matrice des composites à
thermodurcissable)

5.1. Rhéologie des polymères

Les études rhéologiques nous permettent de faire de la modélisation de l'injection, de l'extrusion et de la vulcanisation **[18]** :

- Détermination expérimentale des paramètres matières nécessaire à la modélisation.
- Modélisation de l'injection des thermoplastiques et des caoutchoucs (comparaison de différents lots).
- Prévion de l'avancement de la réticulation des caoutchoucs et des thermodurcissables.

5.2. Procédés industriels de transformation et fabrication des polymères (en masse, en solution, en émulsion, en suspension) **Rappel sur les polymères**

Avant de nous pencher sur leur processus de fabrication à proprement parler, attachons-nous à décrire plus précisément les polymères (encore récemment appelés « hauts polymères »), ces matériaux constitués de longues chaînes de molécules élémentaires assemblées (les monomères), elles-mêmes constituées d'atomes de carbone sur lesquelles des opérations chimiques permettent de fixer d'autres éléments, comme de l'hydrogène, du chlore, de l'azote, du fluor ou de l'oxygène. Aussi, sans établir dès maintenant une classification exhaustive des matières plastiques, attardons-nous tout de même sur les diverses caractéristiques de ces trois familles fondamentales **[19]** :

5.2.1. Les thermoplastiques

Si les polymères industriels thermoplastiques, composés de chaînes linéaires, ont pour caractéristique principale, une fois chauffés au-delà d'un certain seuil de température, de présenter une certaine malléabilité facilitant leur mise en forme, ces matériaux uniques retrouvent leur rigidité initiale après refroidissement, sans pour autant que la matière soit thermiquement dégradée.

Une qualité non-négligeable dont profitent directement les sociétés de recyclage du plastique, qui pourront les traiter de nouveau sans affecter leur structure moléculaire. C'est dans cette catégorie de polymères linéaires/plastiques que l'on trouve notamment des polyamides, comme le nylon.

5.2.2. Les thermodurcissables

Fondamentalement différents des thermoplastiques, ces polymères organiques réticulés se rigidifient de façon irréversible sous l'effet de la chaleur, et ne sauraient être transformés de nouveau sans impliquer une dégradation de leur structure. En effet, la matière thermodurcissable préserve sa forme en raison des nombreuses et solides liaisons chimiques qui lient ses chaînes. Les silicones et les phénoplastes, comme la bakélite, font partie de cette famille de matériaux.

5.2.3. Les élastomères

La réticulation est une opération chimique qui consiste à former un ou plusieurs réseaux au cœur des polymères tridimensionnels, en liant entre elles les chaînes macromoléculaires.

C'est grâce à cette opération effectuée durant la conformation du polymère que les élastomères (constituant de base des caoutchoucs), particulièrement déformables, peuvent atteindre jusqu'à huit fois leur taille initiale sans approcher le point de rupture.

5.3. Solidification et mise en forme des polymères

5.3.1. Introduction

Les polymères peuvent être mis en œuvre à partir de poudres (revêtements), de solutions ou d'émulsions (peintures, colles et adhésifs, fibres Kevlar), de l'état fondu ou caoutchoutique, et de l'état solide (usinage de pièces mécaniques ou de prothèses articulaires) [18-19].

Compte tenu de l'importance économique des thermoplastiques de grande diffusion (PE, PP, PS, PVC), auxquels on peut ajouter les thermoplastiques techniques (polyamides, par exemple), c'est la mise en œuvre à partir de l'état fondu qui joue un rôle prépondérant. Un certain nombre d'objets (bouteilles, pots de yaourt) sont également produits à partir de l'état caoutchoutique, la philosophie générale n'étant pas sensiblement différente (Procédé d'extrusion monovis et bivis : extrusion de profilés, extrusion soufflage, extrusion gonflage, Soufflage de corps creux, Filage textile, Calandrage, Thermoformage) [21].

5.3.2. Caractéristiques de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général de la **Figure 1**. Le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges, etc.) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés [20].

Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi-cristallins) ou plastifiée (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière liquide très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit : tube, jonc, film, pièce injectée, etc.

Cette matière thermoplastique mise en forme est alors refroidie, dans certains cas étirée et biétirée, pour obtenir le produit final.

De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement, vont dépendre la microstructure du polymère, et donc ses propriétés.

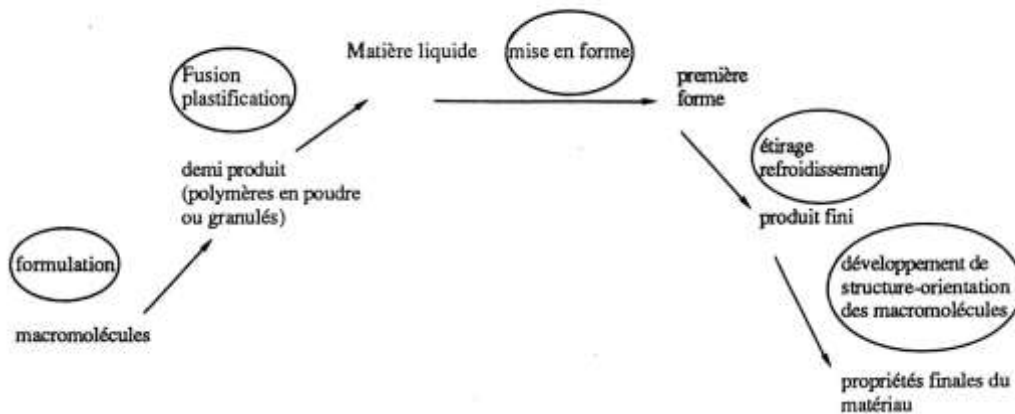


Figure 5.1 Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques

L'originalité de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques tient à un certain nombre de caractéristiques résultant de leur composition chimique et de leur structure moléculaire en longues chaînes linéaires (ou ramifiées) et enchevêtrées : forte viscosité, comportement pseudo plastique et viscoélastique, faible conductivité thermique. En outre, si les chaînes sont régulières, elles ont la possibilité de contribuer à la formation de cristaux.

5.4. Procédés de moulage

Les procédés de mise en forme des polymères thermoplastiques et des composites correspondants sont directement dépendants des matériaux et des procédés de transformation existants dans l'industrie selon la production en petite, moyenne et grande série.

Les différents procédés de mise en forme des composites à matrice thermodurcissable :

a. Moulage par injection base pression de résine liquide (RTM)

La résine thermodurcissable est injectée sous basse pression (1 à 10 bars) entre le moule et le contre-moule. En fonction des cadences de production la polymérisation se fait à température ambiante ou par chauffage.

b. Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S-RIM)

Moulage du renfort sous forme de mats ou de tissus préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C). Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

c. Moulage au contact

Réalisé manuellement, l'imprégnation de la résine se fait à l'aide d'un rouleau adapté sur le drapage d'un renfort fibreux déposé sur un moule. La polymérisation est effectuée à froid.

d. Moulage par injection – réaction (R-RIM)

Les produits réactifs mélangent d'un polyol et de fibres de verre (fibres coupées ou broyées) d'une part et d'un isocyanate d'autre part incorporée dans un mélangeur et injectés (250 bars) aussitôt dans le moule de cuisson, chauffé à température de 65 °C.

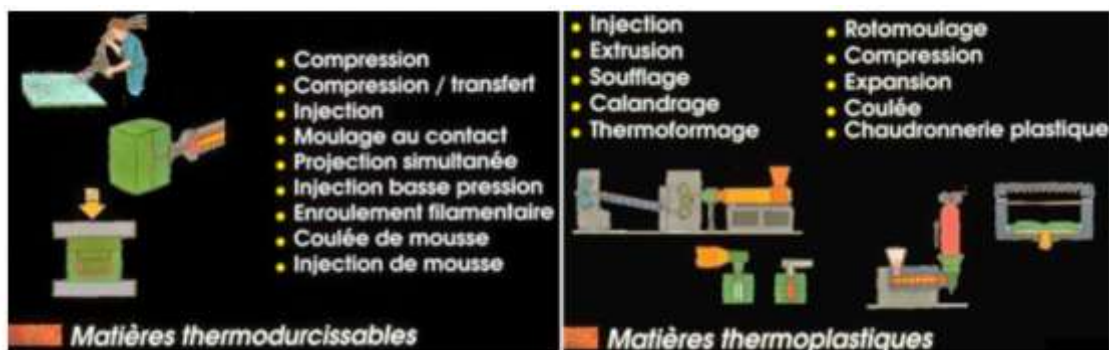


Figure 5.2 Mise-en-forme des composites et des plastiques

5.5. Technologie du moulage

Le moulage consiste à verser un métal liquide qui s'écoule par gravité ou sous pression dans un moule dans lequel il se solidifie en prenant la forme de l'empreinte réalisée dans la cavité du moule.

Les étapes du moulage semblent simples :

- Fondre le métal
- Le verser dans le moule
- Le laisser refroidir

5.5.1. Possibilités et avantages du moulage

Permet de réaliser des pièces de formes complexes

- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieure.
- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie.
- On peut réaliser des pièces de très grande dimension.
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries.

5.5.2. Inconvénients du moulage

Les inconvénients dépendent des procédés de moulage :

- Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)

- Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés (ex : moulage en sable).
- Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion.
- Problèmes environnementaux (fumées).



Évaluation
Finale
Exercices &
solutions


Exercices


A. Exercice

Quel est le matériau envisagé et le degré de complexité des pièces fabriquées ?

Quel est le type de machine envisagée et quelle est sa puissance ?

 Quelle est la température de fabrication des pièces ?

 Quel est le coût optimal de fabrication ?

 Quelle est la cadence de fabrication des pièces ?

Question

Questions préliminaires pour la mise en œuvre d'un procédé de mise en forme ? ? ? ?

B. Exercice

Un « verre » métallique ??

Les métaux et alliages métalliques sont-ils généralement amorphes ou cristallins ??

Question

Les « verres » métalliques (alliages métalliques amorphes) sont-ils rares ou bien au contraire sont-ils le cas général ?

C. Exercice

Quelles sont les nanomatériaux ? ? ? ?

D. Exercice

Un procédé primaire :

<input type="checkbox"/>	donne la forme à la pièce ou au produit fini.
<input type="checkbox"/>	permet de modifier la forme de la pièce ou du produit semi-fini.
<input type="checkbox"/>	améliore les propriétés d'emploi (en surface et/ou dans le volume).
<input type="checkbox"/>	permet de réunir des éléments ou sous-ensemble pour constituer l'objet final.

E. Exercice

Lors du moulage d'un métal liquide, le choix entre un moule permanent et un moule non permanent se fera en fonction :

<input type="radio"/>	du nombre de pièces à produire.
<input type="radio"/>	de la température du métal en fusion.
<input type="radio"/>	de la taille de la pièce à mouler.
<input type="radio"/>	des tolérance dimensionnelles à obtenir sur la pièce.

Solution des exercices

Solution N° 1

Les performances mécaniques des pièces de structures dépendent fortement du matériau utilisé et de son procédé de transformation. La « Mise en forme des alliages métalliques » s'intéresse aux matériaux lors de la transformation par déformation plastique (état solide), solidification (état liquide) ou compactage (poudres) dans tous les grands secteurs industriels : industrie du transport (ferroviaire, automobile aéronautique), de l'emballage, de l'énergie, du nucléaire et de la santé.

Une voie classique en métallurgie consiste à utiliser des produits issus du laminage ou du filage. Par la suite, ces produits seront découpés ou usinés pour obtenir des produits finis.

Solution N° 2

Les métaux et alliages métalliques sont quasiment toujours cristallins. La structure cristalline des métaux purs est donnée dans la classification périodique présentée dans le chapitre d'introduction. Les verres métalliques constituent donc une « exception » car les métaux et alliages métalliques cristallisent très facilement. Les métaux purs ne sont pas « amorphisables » : on ne peut pas éviter leur cristallisation lors d'un refroidissement.

Solution N° 3

Se sont des petits objets or matériaux de taille nanométrique.

Solution N °4

<input checked="" type="checkbox"/>	donne la forme à la pièce ou au produit fini.
<input checked="" type="checkbox"/>	permet de modifier la forme de la pièce ou du produit semi-fini.
<input checked="" type="checkbox"/>	améliore les propriétés d'emploi (en surface et/ou dans le volume).
<input checked="" type="checkbox"/>	permet de réunir des éléments ou sous-ensemble pour constituer l'objet final.

Solution N °5

<input type="radio"/>	du nombre de pièces à produire.
<input type="radio"/>	de la température du métal en fusion.
<input checked="" type="radio"/>	de la taille de la pièce à mouler.
<input type="radio"/>	des tolérance dimensionnelles à obtenir sur la pièce.



Glossaire

Le ciment

Le ciment est une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

Silicate tricalcique, ou C3S ($3 \text{ CaO}, \text{SiO}_2$),

Silicate bicalcique, ou C2S ($2 \text{ CaO}, \text{SiO}_2$),

Aluminate tricalcique, ou C3A ($3 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$),

aluminoferrite tricalcique, ou C4AF ($4 \text{ CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$).

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile.

Les céramiques

Un verre est un composé minéral fabriqué, à base de silice, qui possède une structure vitreuse, c'est à dire désordonnée. Il est mis en forme à partir d'une poudre agglomérée et consolidé par frittage.

Calandrage :

Le calandrage est une technique de fabrication de feuilles, de plaques ou de films par laminage d'une matière thermoplastique entre plusieurs cylindres parallèles constituant une machine appelée calandre.

Rotomoulage :

Utilisé pour la réalisation en petite et moyenne série de corps creux résines thermoplastiques.

Un volume défini de polymère, en poudre fine ou à l'état liquide (plastisol surtout) est introduit dans un moule fermé mobile en rotation suivant deux axes perpendiculaires, à des vitesses comprises entre 10 et 40 tours minute. La matière se répartit uniformément sur la paroi et se gélifie lorsque le moule est porté à une température comprise entre 200 et 400 °C.

Un refroidissement intense assure la solidification et permet le démoulage (ballons, poupées, bacs, cuves, fosses septiques, planches à voile, réservoirs, carters et capots).

La Compression :

Permet de réaliser de petits et moyens objets en thermodurcissables (isolants thermiques et électriques). La matière à l'état de pré polymère est déposée dans un moule, chauffée puis comprimée. Sous l'action de la chaleur, la polymérisation s'effectue dans le moule.

Variante : compression avec transfert de la matière par une avec chambre de transfert où la matière est chauffée pour la porter à l'état visqueux avant de l'injecter dans l'empreinte du moule puis de la comprimer en chauffant le moule.

L'injection:

Analogie avec les thermoplastiques, mais le moule et le système d'injection sont régulés en température afin d'obtenir la plastification sous l'action de la pression et la température. Le moule est chauffé pour polymériser (durcir) la résine thermodurcissable.

Coulée des polymères:

La plupart des thermodurcissables (et certains thermoplastiques) et de nombreuses résines sont suffisamment fluides avant polymérisation peuvent être mis en forme par coulée, c'est à dire versés dans un moule de forme sans appliquer de pression.



Références
bibliographiques

Références bibliographiques :

- 1- **Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T:** Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, Edition: SME, New-York, USA, 1984.
- 2- **A. Gupta:** Mineral processing design and operations: An introduction, Edition Lavoisier 2008.
- 3- **R.P King:** Modelling and simulation of mineral processing systems, Edition Butterworth-Heinemann 2001.
- 4- **B.A. Wills:** Will's mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery Edition Butterworth-Heinemann 2006
- 5- **Barin I., Knacke O., and Kubachewsky, O.,** Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Edition Springer Verlag, Berlin, (1977).
- 6- **G. Chaussin, G. Hilly** - Métallurgie - Dunod Tome 1 : alliage métallique, Tome 2 : élaboration des métaux, 1966.
- 7- **Schönert K.,** Size Reduction (Fundamentals) – Chap 1, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial chemistry. Vol. B2: Unit operations I, p. 5.1-5.14. Ed: Vch Verlagsgesellschaft mBh Weinheim (1988).
- 8- **Pomeran Y.,** Wheat: Chemistry and technology, AACC, St Paul USA, (1998).
- 9- **Buchel. K.H, H.M. Moretto et P. Woditsch.,** Industrial Inorganic Chemistry, John Wiley- VCH verlag, Weinheim (2000).
- 10- **Paola Palmero, Mariangela Lombardi, Laura Montanaro, Mirella Azar, Jerome Chevalier, Vincent Garnier, Gilbert Fantozzi,** Effect of Heating Rate on Phase and Microstructural Evolution During Pressureless Sintering of a Nanostructured Transition Alumina, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 6 [3] 420–430 (2009).
- 11- **Buckton G.,** Interfacial phenomena in drug delivery and targeting. Drug targeting and delivery, ed. A.T.F.a.G. Gregoriadis, Harwood academic publishers (1995).
- 12- **Godet L.,** Broyage fin du talc par jet d'air opposé, in Génie Chimique-Génie des procédés, Institut National Polytechnique de Lorraine (2001).
- 13- **Henry Le Chatelier,** « Chimie des silicates », Edition « A. Hermann et Fils »,1914.
- 14- **Arnold Lassieur,** « Analyse des silicates », Edition « Dunod »,1951.
- 15- **R. Kern,** « Cours de minéralogie structurale des silicates », Edition « LMC »,1958.
- 16- **Eitel, Wilhelm,** « The Physical Chemistry of the Silicates », Edition « The University of Chicago Press»,1954.

Page | 13

- 17- **Michel-Lévy Albert et Wyart Jean**, « Reproduction Artificielle De Minéraux Silicatés à Haute Pression », Edition « Siège De La société Géologique »,1947.
- 18- **Marc Carrega**, Matériaux industriels - matériaux polymères, Edition Dunod, juin 2000.
- 19- **Jean-Pierre Cohen**, Polymère : La matière plastique, Edition Belin, 2007.
- 20- **Marc Carrega**, Matières plastiques - Aide-mémoire, 2^{ème} édition Dunod, 7 octobre 2009.
- 21- **Jean Pierre Mercier**, chimie des polymères, synthèses, réactions, dégradations, 1^{ère} édition, 1993.
- 22- **Adda Y., Dupouy J.M.**, « Eléments de métallurgie physique », Documentation Française, Paris 1976.
- 23- **Bernard J., Michel A., Philibert J., Talbot J.**, « Métallurgie générale », 2^{ème} édition Masson, Paris 1984.