

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

Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliqués

Département de Génie

Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : construction mécanique

Thème

**Etude de l'influence du taux de bentonite
sur les propriétés mécanique d'un sable
de moulage**

Préparé par

HASSI BENCHOHRA

ZOUBIDA MAAROUF

Soutenu publiquement le : .. / 07 / 2021, devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| M. BOUZOUINI Mohammed | MAA (Univ. Ibn Khaldoun-Tiaret) | Président |
| M. ATHEMANI Houari | MAA (Univ. Ibn Khaldoun-Tiaret) | Examineur |
| M. MAKHFI Souad | MCB (Univ. Ibn Khaldoun-Tiaret) | Examineur |
| M. SASSI Ahmed | MCA (Univ. Ibn Khaldoun-Tiaret) | Encadrent |

Année universitaire : 2020 – 2021

Remercîments

Tous d'abord, nous voudrions remercier Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous remercions notre encadreur

Mr. SASSI Ahmed pour ses efforts son soutien et son bon encadrement, et ce fut un honneur de travailler avec lui.

Nous remercions également M. CHOUALHI Khaldia Ingénieur et le chef de laboratoire Mr. BENHENNI Rabeh et l'équipe de travail dans l'entreprise ALFET-

Tiaret pour son soutien

Nous remercions également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer et de juger notre travail, que nous espérons sera à la mesure de leur attente.

Enfin nous remercions tous les professeurs de l'université Ibn-Khaldoun, et tous ceux qui nous ont aidé

Sommaire

| | |
|---|----|
| Liste des figures..... | |
| Liste des tableaux..... | |
| Introduction générale..... | 3 |
| Chapitre I : Généralités sur les sables de moulages | 2 |
| I-1. Introduction | 3 |
| I-2. Description composition | 3 |
| I-2-1. Définition du sable..... | 3 |
| I-2-2. Composition du sable..... | 4 |
| I-2-3. Différentes origines des sables et nature des sables de moulage | 4 |
| I-2-4. Caractéristique et spécifications..... | 5 |
| I-2-5. Différents types d'addition..... | 6 |
| I-2-6. Préparation des sables de moulage..... | 7 |
| I-2-6-1. Sables argileux..... | 7 |
| I-3. Notations élémentaires du procédé de moulage en sable | 8 |
| I-3-1. Mise en situation | 8 |
| I-3-2. Procédé de moulage | 8 |
| I-3-2-1. Moules Non Permanents..... | 8 |
| I-3-2-2. Moules permanents :..... | 9 |
| I-4. Réutilisation des sables de moulage et impacts sur l'environnement | 14 |
| I-4-1. Suivi environnemental | 16 |
| I-4-2. Aspects sanitaires | 16 |
| Chapitre. II : Propriétés des sables de moulage..... | 15 |
| II-1. Introduction | 16 |
| II-2. Définition des sables de moulage..... | 17 |
| II-2-1. Sables de fonderie en Algérie | 17 |
| II-2-1-1. Sable à vert ou à l'argile | 17 |
| II-2-1-2. Sable au silicate de soude | 17 |
| II-2-1-3. Sable au silicate de soude avec bentonite..... | 17 |
| II-2-1-4. Sable à la résine furanique..... | 18 |
| II-2-1-5. Sables au ciment | 18 |
| II-2-2. Propriétés mécaniques du sable de moulage..... | 18 |
| II-2-2-1. Plasticité ou corps du sable..... | 18 |
| II-2-2-2. Perméabilité | 19 |

| | | |
|---|--|----|
| II-2-2-3. | Réfractairite (infusibilité) | 21 |
| II-2-2-4. | Cohésion | 22 |
| II-2-2-5. | Longévité | 22 |
| II-2-2-6. | Compressibilité ou Aptitude au Serrage (A.S.) | 22 |
| II-2-2-7. | Caractéristiques du sable de moulage (sable à vert)..... | 24 |
| II-2-3. | Granulométrie et forme des grains..... | 24 |
| II-2-3-1. | Contrôle réception des sables | 24 |
| II-2-3-2. | Examen visuel..... | 24 |
| II-2-3-3. | Granulométrie | 24 |
| II-2-3-4. | Détermination de la morphologie des grains | 26 |
| II-2-3-5. | Indice de finesse | 27 |
| II-3. | Différents types d'addition..... | 27 |
| II-3-1. | Bentonites | 27 |
| II-3-1-1. | Eau d'addition ou d'imbibition..... | 29 |
| II-3-1-2. | Origine de bentonite | 29 |
| II-3-1-3. | Structure de la Bentonite | 30 |
| II-3-1-4. | Propriétés de la bentonite..... | 31 |
| II-3-2. | Noir minéral | 32 |
| II-3-2-1. | Définition..... | 32 |
| II-3-2-2. | Comment agit le noir ? | 32 |
| II-3-2-3. | Propriétés de noir minéral :..... | 33 |
| II-4. | Réalisation des modèles de moule en sable | 35 |
| II-4-1. | Modèle : | 35 |
| II-4-1-1. | L'usinage : | 36 |
| II-4-1-2. | Le retrait : | 37 |
| II-4-1-3. | La dépouille :..... | 37 |
| II-4-2. | Noyau et boîte à noyau..... | 38 |
| II-5. | Recyclage des matériaux de moulage | 39 |
| II-5-1. | Régénération des sables argileux | 39 |
| Chapitre III : Influence du taux de bentonite | | 41 |
| III-1. | Introduction | 42 |
| III-2. | Composition du sable | 42 |
| III-2-1. | Sable à vert ou à l'argile..... | 42 |
| III-2-2. | Sable au silicate de soude..... | 42 |
| III-2-3. | Sable au silicate de soude avec bentonite..... | 42 |
| III-2-4. | Sable à la résine furanique..... | 42 |

| | | |
|------------|--|----|
| III-3. | Partie expérimentale | 43 |
| III-3-1. | Caractérisation des sables usés..... | 43 |
| III-3-1-1. | Analyses chimiques des sables | 43 |
| III-3-1-2. | Analyses granulométriques..... | 43 |
| III-3-1-3. | Réfractarité..... | 44 |
| III-3-2. | Caractérisation de la bentonite | 45 |
| III-3-2-1. | Bentonite utilisée : | 45 |
| III-3-2-2. | Composition chimique de bentonite | 45 |
| III-3-2-3. | Analyse physique de bentonite | 45 |
| III-3-3. | Caractérisation des mélanges sable-bentonite..... | 46 |
| III-3-3-1. | Caractérisation physico-chimique..... | 46 |
| III-3-3-2. | Caractéristiques physiques et mécaniques de mélange..... | 46 |
| III-3-3-3. | Mesure de compressibilité avec l'humidité | 46 |
| III-3-3-4. | Mesure de compressibilité avec la perméabilité :..... | 49 |
| III-3-3-5. | Mesure de la compressibilité du sable de moulage en fonction de l'humidité | 50 |
| | Conclusion générale | 53 |
| | Références bibliographiques..... | |

Liste des figures

CHAPITRE I

| | |
|---|----|
| Figure I. 1 Moulage en sable | 9 |
| Figure I. 2 Moulage en coquille | 11 |
| Figure I. 3 Moulage sous pression | 14 |

CHAPITRE II

| | |
|---|----|
| Figure II. 1 Perméabilité des gaz..... | 19 |
| Figure II. 2 Influence de la grosseur des grains sur la perméabilité..... | 20 |
| Figure II. 3 Influence de la qualité d'argile sur la perméabilité | 21 |
| Figure II. 4 Aptitude au serrage..... | 23 |
| Figure II. 5 Ressource aptitude au serrage | 23 |
| Figure II. 6 structure de la montmorillonite d'après Hoffmann. | 28 |
| Figure II. 7 Process de traitement de la bentonite | 30 |
| Figure II. 8 structure en feuillets de la Montmorillonite | 30 |
| Figure II. 9 structure de la bentonite | 31 |
| Figure II. 10 la dépouille du modèle | 37 |
| Figure II. 11 boîte à noyau | 38 |
| Figure II. 12 Exemple de recyclage d'un sable argileux..... | 41 |

CHAPITRE III

| | |
|---|----|
| Figure III. 1 Distribution granulométrique du sable..... | 44 |
| Figure III. 2: compressibilité à vert en fonction de l'humidité | 47 |
| Figure III. 3: Compressibilité-durcie en fonction de l'humidité | 48 |
| Figure III. 4 Compression à vert en fonction de la perméabilité aux gaz | 49 |
| Figure III. 5 Compression-durcie en fonction de la perméabilité aux gaz | 50 |
| Figure III. 6 . Compressibilité d'un sable de moulage en fonction de la quantité d'eau..... | 51 |

Liste des tableaux

CHAPITRE I

| | |
|--|---|
| Tableau I. 1: Caractéristiques des sables de fonderie (silice, chromite...) | 5 |
| Tableau I. 2 Impact de la morphologie des grains sur les caractéristiques d'usage (consommation de liant et perméabilité du moule) | 6 |

CHAPITRE II

| | |
|---|----|
| Tableau II. 1 duromètre de le degré de serrage | 21 |
| Tableau II. 2 Réfractairite par rapport au pourcentage d'argile | 22 |
| Tableau II. 3 Cas d'exemple : Analyse granulométrique du sable de Chlef | 25 |
| Tableau II. 4 Détermination du groupe de sable | 26 |
| Tableau II. 5 Analyse typique de Noir minéral | 32 |

CHAPITRE III

| | |
|--|----|
| Tableau III. 1 Analyse chimique de silicate de soude | 43 |
| Tableau III. 2 Distribution granulométrique du sable | 43 |
| Tableau III. 3 Mesure réfractarité en argile | 44 |
| Tableau III. 4 Composition chimique de bentonite de Maghnia | 45 |
| Tableau III. 5 analyse de H ₂ O + gonflement | 45 |
| Tableau III. 6 Instructions technologique pour sable de contact (quartz)silicate de soude et bentonite | 46 |
| Tableau III. 7 Caractéristiques physiques et mécaniques | 46 |
| Tableau III. 8 Mesure de compressibilité/Humidité | 46 |
| Tableau III. 9 Mesure de résistance à la compression et la perméabilité | 49 |
| Tableau III. 10 7% BENTONITE | 50 |
| Tableau III. 11 9% BENTONITE | 51 |
| Tableau III. 12 11% BENTONITE | 51 |

Introduction générale

Le moulage est un procédé qui consiste à réaliser des pièces par coulée et solidification d'un matériau dans un moule présentant l'empreinte de la pièce à obtenir. Cette technique est [1] souvent la plus économique pour l'obtention de produits finis ou semi-finis et pour des pièces de formes complexes, des séries de pièces identiques ou pour des pièces massives.

Un moule est l'ensemble des éléments appropriés, délimitant l'empreinte, et recevant le métal liquide qui après solidification donnera la pièce. Un moule comprend une ou plusieurs parties qui peuvent être séparées l'une de l'autre (châssis, chapes, coquilles). La surface commune aux deux demi moules porte le nom de plan de joint même si cette surface ne forme pas un plan. On distingue deux types de moules, à savoir les moules non permanents et les moules permanents.

Il existe différents procédés de moulage en sable des pièces en acier (ou en fonte) ; le moulage en sable à vert, le moulage à prise chimique à froid et le moulage à prise chimique à chaud. Ces différents procédés de moulage en sable ont chacun leurs avantages et limitations respectifs. Le moulage en sable silico-argileux est l'un des procédés les plus courants. Il reste le plus économique du fait de la simplicité de la régénération du sable. De nos jours, le liant minéral utilisé le plus souvent pour la confection du moule est une argile, de type bentonite. Cette argile, ajoutée avec de l'eau au sable siliceux, confère au moule une plasticité suffisante pour conserver l'empreinte de la pièce après l'extraction du modèle (opération de démoulage). La teneur en argile d'un sable silico-argileux pour pièces mécaniques en acier est assez variable et est fonction de leur massivité. On peut toutefois retenir à titre indicatif des taux de l'ordre de 5 à 10 % d'argile active. Les sables de fonderie sont caractérisés par un indice de finesse AFS (American Foundry Society). Ceux utilisés en fonderie d'acier ont un indice compris entre 40 et 80 AFS environ. Lors de la fabrication des pièces par le procédé de moulage, de nombreux défauts peuvent être imputables plus spécifiquement au sable de fonderie ou aux noyaux. On peut citer (sans être exhaustif) l'abreuvage et les gerces, les dégagements gazeux (réaction noyaux/métal, noyaux humides, ...), les problèmes dimensionnels (recul ou casse de noyau, mauvais remoulage des noyaux ou déplacement des noyaux lors de la coulée, ...), les inclusions de sables (ou d'enduit), des surfaces défectueuses (rugosité trop importante) ou encore des morceaux de noyaux non débourrés dans les zones internes complexes (conduits étroits et profonds)

En effet, tout au long du processus de fonderie, des phénomènes physiques et chimiques à l'ambiante ou à chaud – souvent complexes – agissent en permanence sur le sable, sur les noyaux et les enduits de protection (polymérisation, condensation, échauffement, refroidissement, pollution du sable par une matière intégrée involontairement, ...) et peuvent modifier et dégrader leur comportement d'usage. Dans les cas extrêmes, cela favorise le dysfonctionnement des moyens de production utilisés (grille de décochage, bande de transport, élévateur, over-band, poulie magnétique, crible, refroidisseur, ...). Ceci constitue une problématique incontournable et c'est dans cette optique que nous avons bien voulu contribuer de notre part dans ce travail.

Notre mémoire se compose de trois chapitres relatifs au procédé de moulage en sable et plus particulièrement aux éléments d'addition.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les généralités des sables de moulage du point de vue, nature, constitution, les caractéristiques spécifiques et les différentes additions.

Dans le second chapitre, nous avons évoqué les propriétés essentielles d'un sable de moulage à savoir, les propriétés mécaniques telles que la compressibilité, la perméabilité aux gaz qui revêt une importance capitale pour cette étude.

Dans le dernier chapitre, nous avons traité l'influence d'un liant minéral qui est la bentonite sur les caractéristiques du moulage en sable.

Chapitre I : Généralités sur les sables de moulages

I-1. Introduction

Les sables de fonderie sont utilisés pour confectionner ces moules nécessaires à la réalisation des pièces métalliques. Ce sont des sables naturels constitués de grains de silice pure (quartz ou plus rarement d'autres minéraux tels que chromite, zircon, olivine). Ils sont le plus souvent traités soit à base de liants (argile, silicate de soude, ciment) soit à base de liants organique (résine thermodurcissable ou siccatives) afin qu'ils présentent les caractéristiques nécessaires à leur fonction (plasticité, perméabilité aux gaz, réfractarité,...). [2]

I-2. Description composition

Un sable de fonderie doit satisfaire à deux exigences fondamentales qui sont :

- La mise en forme au contact d'un modèle mère en épousant tous ses détails [3]. Le serrage du sable est effectué par un effort manuel ou mécanique (pression, secousse, vibration, projection mécanique ou pneumatique),
- La conservation de cette forme jusqu'à la solidification complète du métal ; cela sous-entend des caractéristiques mécaniques suffisantes pour résister à la pression statique du métal liquide ainsi qu'à la pression dynamique (afin d'éviter les phénomènes d'érosion) sans pour autant faire obstacle au retrait du métal en cours de solidification.

D'autres propriétés sont également nécessaires :

- La réfractarité, car le sable doit présenter une température de fusion supérieure à la température de coulée de l'alliage considéré,
- La perméabilité, qui permet l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés lors de la coulée,
- L'absence des réactions moule-métal susceptibles de créer des défauts d'inclusions solides ou gazeuses dans le métal constituant la pièce.
- La facilité de décochage, afin de pouvoir séparer facilement la pièce obtenue de son moule.

I-2-1. Définition du sable

Le sable de fonderie est un élément essentiel de la préparation des moules qui concerne deux secteurs de la fonderie :

1. Le secteur sablerie qui stocke, prépare les mélanges, achemine la matière vers l'atelier de moulage en sable, puis récupère le sable usé pour, soit le régénérer, soit le transporter en décharge.

2. Le secteur noyautage qui possède, dans les grandes fonderies, sa propre préparation de mélange sable + résine + catalyseur, au plus près des machines de moulage des noyaux.[3]

I-2-2. Composition du sable

Satisfaction de l'ensemble des exigences ci-dessus fait qu'un sable de fonderie est très généralement composé de trois catégories de matériaux qui sont :

- Un matériau granuleux ou sable de base qui en constitue la masse principale, en quelque sorte son squelette réfractaire,
- Un liant organique ou minéral destiné à agglomérer les grains entre eux et qui doit obligatoirement pouvoir évoluer de l'état liquide ou plastique à l'état solide, c'est le phénomène de durcissement,
- Un certain nombre d'adjuvants, sans pouvoir liant mais néanmoins nécessaires à la réussite d'un moulage, destinés à conférer des propriétés secondaires comme l'état de surface ou bien les propriétés de démoulage (du modèle).[3]

Généralement la composition des sables de fonderie contient :

- 70 à 80 % de silice '' support ''
- 5 à 15% d'argile '' agglutinant ''
- 7 à 10% d'eau
- 3 à 5% d'impuretés ''oxyde de fer, matière organique. etc.''

I-2-3. Différentes origines des sables et nature des sables de moulage

Sables de fonderie en Algérie

L'industrie Algérienne des fonderies utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. Le plus souvent en sable siliceux (sable d'origine) complété par des liants selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage étudiés et utilisés sont répertoriés comme suite :

- Sable à vert ou à l'argile
- Sable au silicate de soude
- Sable au silicate de soude avec bentonite
- Sable à la résine furanique
- Sables au ciment

I-2-4. Caractéristique et spécifications

Les propriétés fondamentales des sables de moulage sont très variées : plasticité, consistance, perméabilité aux gaz, réfractibilité, etc... Ces propriétés sont le résultat de l'opération appelée préparation du sable, laquelle a lieu dans des machines adéquates produisant son parfait mélange, son malaxage ou pétrissage et son aération par centrifugation. Le mélange doit être spongieux et homogène, libre de matières étrangères, notamment du calcium.

- Pour le moulage en sable naturel, dit sable à vert (par opposition au sable à prise chimique), il existe différentes nuances de sable ; la chromite, l'olivine, le zircon, la silice ou encore la kerphalite. Ces sables possèdent chacun des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques différentes leur permettant une utilisation
- Spécifique dans différentes métallurgie (fonte, acier, aluminium, cuivreux).

Tableau I. 1: Caractéristiques des sables de fonderie (silice, chromite...)

| | Chromite | Kerphalite | Olivine | Silice | Zircon |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------|------------------|
| Disponibilité | Faible | Grande | Moyenne | Grande | Faible |
| Prix | Élevé | Élevé | Moyenne | Faible | Élevé |
| Formulation | $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{FeO}$ | $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ | $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ | SiO_2 | ZrSiO_4 |
| Densité | 4.3-4.6 | 3.1 | 3.2-3.5 | 2.6 | 4.4-4.6 |
| Réaction Moule/métal | Réduite | Réduite | Réduite | Élevée | Réduite |
| Grains | Anguleux | Anguleux | Anguleux | Ronds | Ronds |
| Compatibilité | ++ | ++ | + | +++ | +++ |
| T fusion | 2100 | 1850 | 1850 | 1725 | 2300 |
| Dilatation Thermique | Faible | Moyenne | Moyenne | Importante | Faible |

Les critères pour le choix d'un sable sont :

- **Economique** (coût et disponibilité). De ce point de vue, la silice est de loin la moins chère et la plus disponible. C'est aussi le sable qui est le plus largement utilisé en moulage sable à vert. Le zircon est par exemple d'un coût environ 20 fois supérieur à la silice et est faiblement disponible.

- **Techniques.** Les caractéristiques physiques et en particulier la température de fusion et la dilatation thermique qui vont impacter la tenue à chaud et la résistance à l'agression du métal liquide lors de la coulée. La silice à, de ce point de vue, les moins bonnes propriétés intrinsèques alors que la chromite et le zircon présentent, quant à eux, les meilleures caractéristiques, ce qui réservent leur utilisation aux métaux ferreux à haut point de fusion. D'autres critères de choix peuvent intervenir comme la compatibilité avec les résines utilisées, la facilité de mise en décharge ou de recyclage. (Compatibilité avec d'autres types de sable).

Tableau I. 2 Impact de la morphologie des grains sur les caractéristiques d'usage (consommation de liant et perméabilité du moule)

| Impacts de la morphologie des grains | Ronds | Anguleux |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| Surface spécifique | Réduite | Élevée |
| Besoin en liant | Faible | Important |
| Perméabilité du moule | Important | Réduite |

I-2-5. Différents types d'addition

Il existe trois types de sable[3] :

- **Sable naturel**

Il est directement extrait de carrière et se compose de silice, d'argile en forte proportion et de poussières. C'est la version "naturelle" du sable silico-argileux.

- **Silico-argileux**

Les sables silico-argileux, dits aussi synthétiques par opposition aux sables naturels, sont constitués d'un réfractaire (Silice) aggloméré par de l'argile activée par de l'eau. Des additifs sont ajoutés à ce sable afin d'en améliorer son comportement à la coulée

Les constituants du sable sont :

- Le sable siliceux.
- L'argile, souvent du type bentonite.
- Les additifs carbonés.

- L'eau.
- D'autres éléments éventuellement.

- **Sable à prise chimique**

Il est composé de silice (pour l'aluminium et les fontes) ou de chromite (pour les aciers), de résines (environ 1 % à 2 % de la masse du sable) et d'un catalyseur (5 à 60 % de la masse de résine). La polymérisation des résines, déclenchée par le catalyseur permet d'assurer la cohésion entre les grains de sables. L'ajout des résines et du catalyseur se fait juste avant le moulage, généralement à l'aide d'un malaxeur à vis rapide, muni de pompes doseuses qui délivre la quantité de sable préparé nécessaire à la réalisation d'un moule. La "durée de vie" de ce sable préparé (temps pendant lequel il peut être travaillé avant durcissement) est ajustable en fonction de la taille des moules à réaliser. Généralement de l'ordre de 5 minutes, elle peut être allongée jusqu'à 15 min pour le moulage de grosses pièces. L'ajustage de ce temps se fait en jouant sur le dosage du catalyseur. Le sable est stocké « à sec », généralement dans un silo situé au-dessus ou à proximité du malaxeur. Il existe plusieurs types de résines, comme la « Furanique » ou le « PEP-SET » (Polyuréthane) .

I-2-6. Préparation des sables de moulage

La préparation des sables de fonderie consiste à répartir uniformément les liants et les adjuvants à la surface des grains du sable de base. Elle est sous la dépendance de plusieurs facteurs, dont les principaux sont :

- La surface spécifique du sable de base ;
- L'aptitude du sable de base à être mouillé par le liant ;
- La viscosité des liants.

Elle suppose un travail mécanique intensif car le film de liant constitué uniformément est très mince et ne dépasse pas 1 micromètre pour 1 % de liant ajouté. Par ailleurs, une répartition non uniforme peut être source de nombreux défauts [4].

I-2-6-1. Sables argileux

Dans ce cas, le liant est constitué par une pâte argileuse très rigide, le rapport de la masse d'eau à la masse d'argile étant de l'ordre de 30 à 50 %.

Les sables argileux sont ceux qui demandent le travail mécanique le plus intensif, car il faut, par un travail de frottement et de cisaillement, d'abord constituer une pâte argileuse homogène et,

ensuite, répartir cette pâte uniformément autour des grains. Cela nécessite un temps très long et, en pratique, la répartition idéale n'est jamais complètement atteinte.

L'appareil de préparation type est le broyeur-frotteur à meules. Les meules, montées sur un axe articulé, sont réglées de manière à ne pas reposer sur la sole pour provoquer un effet de frottage et de cisaillement. Un système de raclettes ramène le sable sous les meules. Ces dernières peuvent être, suivant les appareils, verticales, horizontales ou inclinées.

Plus récemment a été mis au point un instrument de travail constitué par une turbine ou *tourbillon*, arbre vertical à palettes tournant à grande vitesse, qui travaille uniquement en cisaillement et est incontestablement plus rapide que la meule.

Les appareils industriels proposés sont très nombreux. Qu'ils soient à meules ou à turbines, on distingue des appareils continus ou discontinus, à sole tournante ou à sole fixe.[4]

I-3. Notations élémentaires du procédé de moulage en sable

I-3-1. Mise en situation

La fonderie est l'un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

I-3-2. Procédé de moulage

Les procédés de moulage sont classés en deux grandes catégories. On distingue principalement la fonderie effectuée avec [5]:

- Des moules non permanents, ou "moules perdus", généralement en sable.
- Des moules permanents en métal, qu'on appelle aussi "coquilles".

I-3-2-1. Moules Non Permanents

Moulage au sable

- Principe de moulage au sable

Un moule non permanent est un moule réalisé en "sable" qui ne sert qu'une seule fois pour réaliser une pièce. Le moule est détruit pour extraire la pièce brute[5].

- Types des sables

Plusieurs types de sables de moulage

- Sable silico-argileux (traditionnellement utilisé en fonderie)
- Sable siliceux agglomérés

- Application

Convient pour tous les métaux de fonderie, notamment ceux à point de fusion élevé (Fontes et aciers)

- Valable pour les pièces unitaires, petite et moyenne série.
- Seul procédé utilisé pour les très grandes pièces.

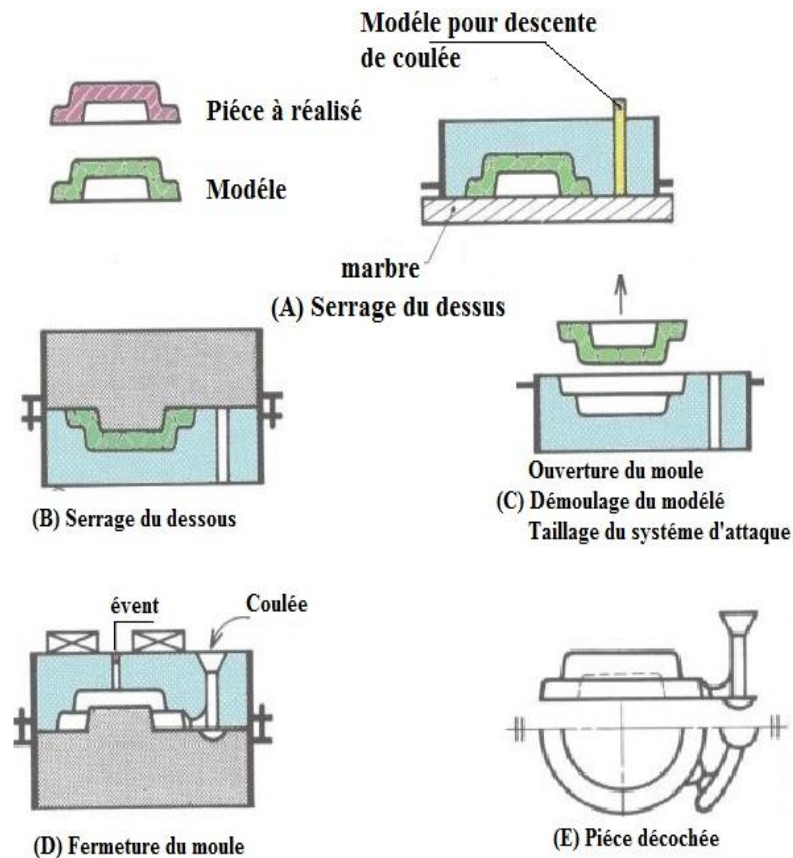


Figure I. 1 Moulage en sable

I-3-2-2. Moules permanents :

Les moules sont métalliques (en fonte ou en aciers spéciaux réfractaires), permettent de couler un grand nombre de pièces. On distingue les procédés suivants :

- Moulage en coquille par gravité moulage.
- Moulage sous pression.

- Moulage par centrifugation
- Coulée en continue.

Moulage en coquille par gravité :

➤ **Principe moulage en coquille par gravité :**

La pièce est obtenue à partir d'un moule métallique appelé coquille. L'introduction de l'alliage dans la coquille est assurée par la seule action de la pesanteur, ce qui lui fait donner le nom de moulage en coquille par gravité à ce procédé.

➤ **Outillages**

• **Moule comprend :**

- L'empreinte, les noyaux et les broches qui permettent d'évider la pièce.
- Le système d'alimentation, coulée, masse lottes, évents.
- Les organes de manutention, de fermeture, d'éjection.

▪ **Poteyage des empreintes de coquilles :**

L'intérieur des moules métallique est revêtu d'enduits qui forme un dépôt protecteur permet :

- Un meilleur contrôle de la chaleur
- De mieux diriger la solidification de la pièce

▪ **Mode opératoire**

Chaque élément doit permettre l'enchaînement logique des opérations qui constituent un cycle de fabrication :

- Mise en place des noyaux des tructibles
- Fermeture du moule
- Avancés des broches et des tiroirs
- Remplissage
- Refroidissement
- Extraction des broches et des tiroirs
- Ouverture du moule
- Éjection de la pièce

➤ Application

Convient pour la fonte et tous les alliages la grès Alliage d'aluminium, de magnésium et pour le laiton...

- Valable pour les pièces produites en moyennes ou grandes séries et en petites séries répétitives.
- Bon état de surface
- Meilleure précision dimensionnelles et géométriques.

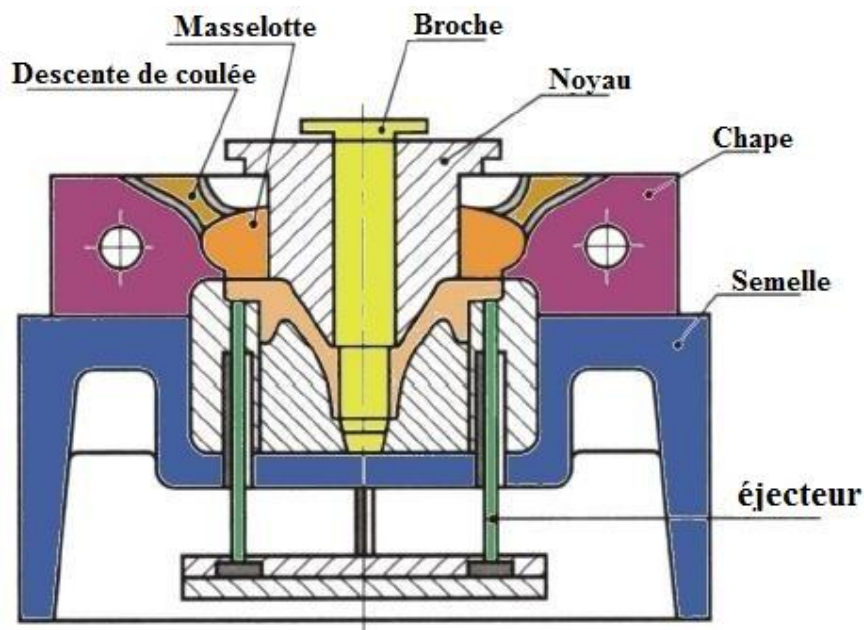


Figure I. 2 Moulage en coquille

Moulage sous pression

➤ Principe

Le métal liquide est injecté sous forte pression (Al Si9Cu3Fe) peut aller jusqu'à 1200bar et à grande vitesse d'injection dans un moule(jusqu'à50m/s) fixé sur les plateaux de la machine.

➤ **Machines**

Elles sont de deux types :

- **Machine à chambre froide**

L'alliage liquide est maintenu liquide dans un four indépendant de la machine à chaque injection, l'alliage est versé dans le conteneur au moyen d'une louche ou d'un dispositif mécanisé. Une presse d'injection sous pression à chambre froide :

- Sa force de fermeture varie 500 à 40000 KN soit 50 à 4000 tonnes.
- Ces machines permettent de couler :
 - Les alliages légers,
 - Les alliages cuivreux à base de magnésium

- **Machine à chambre chaude**

Dans ce type de machine la chambre de pression est immergée dans l'alliage liquide du creuset (d'où le nom de chambre chaude). Une presse d'injection sous pression à chambre chaude :

- Sa force de fermeture varie 50 à 3000KN soit 5 à 30tonnes.
- Ces machines sont réservées aux alliages à point de fusion bas.
 - Les alliages d'aluminium.
 - Les alliages de plomb.
 - Les alliages de zinc.

➤ **Outillages**

Le moule comprend :

- L'empreinte souvent rapportée, ce qui facilite le remplacement et la remise à l'état.
- Les noyaux sont métalliques et les broches permettent d'obtenir des formes intérieures.
- Le système d'alimentation, coulée, masse lottes, évents.
- Un système de circulation d'eau placé dans le moule permet de réguler la température.

➤ **Poteyage des empreintes de coquilles**

Consiste à pulvériser à chaque cycle sur le moule un mélange d'eau (98%) et de

produit démoulant (2%). Cette opération sert à refroidir le moule, à le protéger et en fin à démouler correctement la pièce.[5]

➤ **Mode opératoire**

- Fermeture du moule.
- Injection du liquide (Remplissage).
- Refroidissement.
- Ouverture du moule.
- Éjection de la pièce.

➤ **Application**

- Convient pour les alliages légers :
 - Les alliages d'aluminium.
 - Les alliages de magnésium.
 - Et pour le laiton.
- Valable pour les pièces produites grandes séries à cause du prix de revient levé des outillages.
- Excellents états de surface ($R_a=2\mu\text{m}$).
- Meilleure précision dimensionnelles et géométriques.

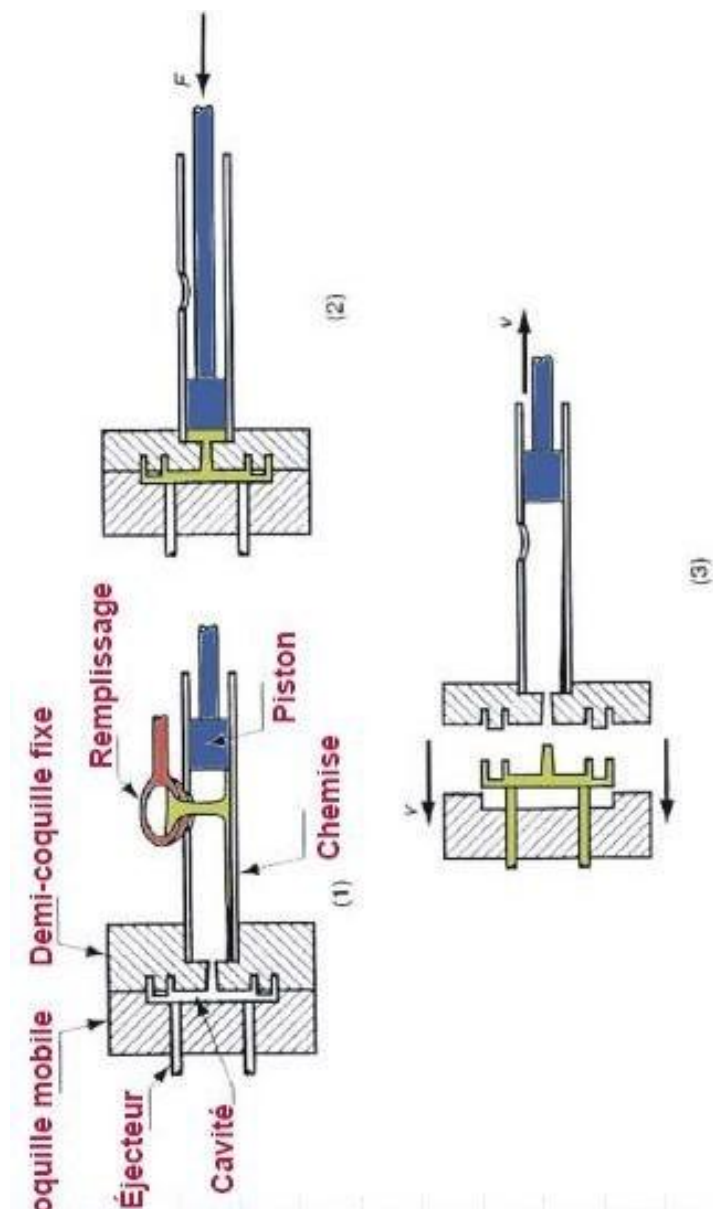


Figure I. 3 Moulage sous pression

I-4. Réutilisation des sables de moulage et impacts sur l'environnement

Le sable de fonderie usé (SFU) est un matériau mis au rebut issu de l'industrie des moulages de métaux ferreux et non ferreux. C'est un mélange de sable de silice spécifique à la taille de haute qualité, peu d'impureté des sous-produits ferreux et non ferreux du procédé de coulée métallique lui-même et d'une variété de liants. Le sable de silice est utilisé comme matériau de moulage, pour les moulages métalliques ferreux (fer et acier) et non ferreux (cuivre, aluminium, laiton), principalement en raison de sa conductivité thermique.

Le sable brut est normalement d'une qualité supérieure à celle du banc typique ou des sables naturels utilisés dans les sites déconstruction de remplissage. Dans le procédé de coulée, les murs de moulage sont recyclés et réutilisés à plusieurs reprises, de petits résidus de sous-

produits ferreux et non ferreux proviennent souvent du processus de recyclage. Avant d'être réutilisés, le sable de silice doit être nettoyé au moyen de systèmes de filtrage et de séparateurs magnétiques pour séparer le sable réutilisable des autres déchets et pour séparer des particules de différentes tailles [6].

Bien que le sable de fonderie usé soit partiellement un matériau recyclé lui-même, qu'il soit recyclé et réutilisé avec succès à travers de nombreux cycles de production, il perd souvent ses caractéristiques, en particulier la propreté et l'uniformité. Ne devenant pas adapté au processus de fabrication, il est éliminé comme un gaspillage. En outre, conformément à la réglementation en vigueur, le sable de fonderie usé est classé comme déchets non dangereux et, par conséquent, il a une valeur économique intrinsèque importante, en particulier en termes de fer et d'acier. Récemment, un certain nombre de travaux de recherches appliquées [7]

y compris le brevet, visant à étudier la faisabilité de réutiliser des sables de fonderie usés dans d'autres secteurs industriels que ferreux. Le produit le plus adapté semble être l'industrie des matériaux de construction, en raison de l'emploi de sable de fonderie usé dans plusieurs matériaux de construction, comme :

- Ajout au clinker pour la production ciment Portland.
- Le béton structurel, les briques, les conglomerats de bâtiments.
- La base de la route, le remplissage structurel, le remplissage écoulé.
- L'amendement du sol ou l'amende Portion agrégée de béton ou d'asphalte à chaud.
- Utilisé comme additif haut de gamme pour les matériaux industriels, tels que les plastiques, pour fournir des textures et des couleurs spécifiques [8].

Les données quantitatives détaillées sur les diverses applications bénéfiques du sable de fonderie n'ont pas été bien citées dans la littérature. Récemment, une recherche préliminaire a été menée par des auteurs soulignant qu'une petite quantité de sable de fonderie usé est encore utilisée dans le clinker pour produire le ciment Portland composé. Cela semble dû aux coûts de transport pour regrouper l'usine de destination finale, en particulier compte tenu de la production journalière élevée de la fonderie. Cependant, selon l'association américaine du Ciment Portland au sable de fonderie, qu'on utilise de nombreux fours à ciment nord-américains. En ce qui concerne l'Europe, les données indiquent un intérêt croissant pour les propriétés techniques de sable de fonderie dans la production et les performances des conglomerats.[9]

I-4-1. Suivi environnemental

Lors de la valorisation d'un sable de fonderie utilisé en technique routière, l'analyse des émissions peut être réalisée en premier temps dans un laboratoire via des essais de lixiviation et percolation du matériau routier (sable de fonderie utilisé traité ou non mis en œuvre dans le corps de chaussée). Dans un second temps, l'émission de substances peut être suivie in-situ, dans le cadre d'un chantier expérimental (ou plot). Les eaux collectées dans la cuve de stockage sont suivies régulièrement dans le temps par des mesures des volumes collectés et par des analyses physico-chimiques. [10]

I-4-2. Aspects sanitaires

Compte tenu de leur composition minéralogique et chimique, les travailleurs utilisant des sables de fonderie utilisés pourraient risquer, en premier lieu, d'être exposés à de la poussière de silice. La poussière de silice est en effet depuis longtemps reconnue comme un risque professionnel majeur, entraînant des invalidités et des décès (par Silicose) parmi les travailleurs dans plusieurs secteurs tels que les domaines des mines Et carrières, les industries des matériaux réfractaires, des poteries et des fonderies. Si de nombreuses études sanitaires ont été menées pour les travaux de sablage, de concassage et de minage de roches massives, s'agissant des sables de fonderie, aucun travail significatif n'est accessible à ce jour. Une seule étude expérimentale ponctuelle a été menée dans l'Etat nord-américain de l'Indiana lors de la mise en œuvre d'un remblai routier fabriqué à partir de sable de fonderie utilisée mélangé avec des poussières de filtres à air [Afzal W. et al. 2002]. Les ouvriers avaient alerté les Chercheurs sur la façon dont les nuages de poussière se formaient en phase chantier. [10]

Chapitre. II : Propriétés des sables de moulage

II-1. Introduction

Dans la plupart des pays industrialisés, le but des entreprises est de livrer un produit qui donne satisfaction au client, ce produit par exemple une pièce de fonderie, voir ses qualités se détériorer à cause de certaines imperfections liées principalement au sable de moulage. Le problème du sable de moulage en fonderie est d'une importance capitale du fait des quantités préparées, et surtout du fait de son influence sur la qualité des pièces. On estime à plus de 50% de rebuts imputables aux sables de moulage, c'est-à-dire sur 90 défauts de fonderie, 31 cas citent le sable comme cause probable des défauts. Ces rebuts qui influent considérablement sur le bon fonctionnement de l'entreprise et risqueraient même de mettre l'avenir de celle-ci en péril, sont dus d'une part aux défauts se rapportant à la granulométrie, à la perméabilité, à la cohésion, à l'humidité, à la plasticité etc., et, d'autre part, à une mauvaise mise en œuvre lors de la préparation (malaxage, frottage, composition, etc.) et lors du serrage (excessif ou insuffisant)

Alors, un sable de fonderie doit satisfaire à deux exigences fondamentales qui sont :

- La mise en forme au contact d'un modèle mère en épousant tous les détails c'est pour cela qu'il doit être plastique ; le compactage est effectué soit par simple gravité, soit par un effort mécanique de serrage (pression, secousse, vibration, projection mécanique ou pneumatique).
- La conservation de cette forme jusqu'à la solidification complète du métal, cela sous-entend l'acquisition d'une résistance mécanique importante pour résister à la pression statique du métal liquide ainsi qu'à la pression dynamique sans pour autant faire obstacle au retrait du métal en cours de solidification.

D'autres propriétés sont également nécessaires :

- La perméabilité, qui permet l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés à la coulée.
- L'absence de réactions moule-métal susceptible de créer des défauts d'inclusion solides ou gazeuses dans le métal.
- La facilité de décochage, afin de pouvoir séparer facilement le métal de son moule, tout en prenant en compte les considérations de coût et de disponibilité.

Plus récemment se sont ajoutées des exigences concernant l'environnement interne et externe :

- L'absence d'émissions toxiques (solide ou vapeurs) lors de la mise œuvre.
- La possibilité de recyclage des matériaux.

- La possibilité de mise en décharge des matériaux non recyclables sans risque de pollution des nappes phréatiques.

II-2. Définition des sables de moulage

Le sable de moulage lie avec des matériaux naturels (bentonite, sable à verts) ou des résines chimiques (sables à prise chimique), Il est utilisé pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion. Ce procédé de moulage au sable est utilisé pour la totalité des productions de fonderie de fonte et d'acier. Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduaux nommés également sables rejetés ou vieux sables doivent être éliminés. [6]

II-2-1. Sables de fonderie en Algérie

L'industrie Algérienne des fonderies utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. Le plus souvent en sable siliceux (sable d'origine) complété par des liants selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage étudiés et utilisés sont répertoriés comme suite :

II-2-1-1. Sable à vert ou à l'argile

Le sable de base est constitué principalement de grains de silice pure (quartz), mélangés avec de la bentonite (5 % à 10 %), avec du noir minéral et de l'eau. Le sable à vert est très utilisé pour la confection des moules, appelé « moulage à vert ». Ce procédé est employé pour la fabrication des pièces en fonte.

II-2-1-2. Sable au silicate de soude

Le sable au silicate de soude dénommé sable de remplissage (3% à 4 %) est utilisé pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux. Ces mélanges sont durcis, par injection de gaz carbonique. Ce type de sable est utilisé pour le moulage de pièces en acier.

II-2-1-3. Sable au silicate de soude avec bentonite

Appelé aussi sable de contact. Sa composition est la même que celle du sable au silicate de soude (S2) mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5%) pour améliorer l'état de surface des pièces.

II-2-1-4. Sable à la résine furanique

D'une manière générale, les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2 %, comme liant organique. La résine furanique est un mélange d'alcool furfurylique et d'alcool formaldéhyde. Cette résine thermodurcissable durcie en présence d'un catalyseur acide composé de l'acide xylène-sulfonique, de l'acide benzène-sulfonique et de l'acide sulfurique. Le sable à la résine furanique sert à la fabrication de pièces massives en fonte.[6]

II-2-1-5. Sables au ciment

L'incorporation de 8% à 10% de ciment (généralement du ciment Portland) est utilisée pour la confection de moules de grande dimension. La vitesse de la prise peut être accélérée par des adjuvants appropriés.

II-2.2. Propriétés mécaniques du sable de moulage

II-2-2-1. Plasticité ou corps du sable

On dit qu'un sable a du corps lorsqu'il peut se serrer sous l'effet d'une pression. On peut apprécier cette propriété en prenant une poignée de sable que l'on serre entre les doigts. On obtient une motte ferme, se tenant bien. La plasticité permet au sable serré de conserver l'empreinte du modèle et de former un moule. Cette qualité du sable dépend de nombreux facteurs :

I-2-2-1-1. Finesse du sable

On constate que plus un sable est plus la pellicule d'argile autour des grains de silice est mince et plus le collage des grains les uns contre les autres est faible.

I-2-2-1-2. Quantité et qualité de l'argile

Pour un même degré de finesse des grains de silice, la quantité d'argile joue un rôle capital sur le corps du sable. Si celui-ci est maigre et contient peu d'argile, ses grains seront peu enrobés et il aura moins de corps qu'un sable gras chargé d'argile. Qualité de l'argile = son pouvoir de gonflement par l'eau.

I-2-2-1-3. Humidité de l'argile

La plasticité augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour une teneur en humidité qui varie avec la qualité de l'argile et la finesse du sable. Au-delà de cette teneur, l'argile se transforme en boue.

I-2-2-1-4. Enrobage autour des grains de silice

Si l'argile est bien répartie autour des grains de silice, chacun de ceux-ci trouvera sur son voisin la quantité d'adhésif nécessaire. Le sable, alors uniforme, possèdera un corps convenable.

I-2-2-1-5. Caractérisation de la plasticité

La plasticité est caractérisée par :

- La résistance au cisaillement : 0,19 à 0,26 Kg/cm².

- La résistance à la compression : 0,8 à 1,2 Kg/cm².

Le sable destiné au moulage mécanique doit avoir une plasticité de 0,2 à 0,25.

Plasticité = Résistance au cisaillement / Résistance à la compression. [11]

II-2-2-2. Perméabilité

Aptitude du sable de faire passer l'air et gaz formé au cours de la coulée. C'est, pour un sable, le pouvoir de se laisser traverser par les gaz. L'argile pure, plastique, est imperméable. Grains de silice enrobés d'argile plastique possède une perméabilité variable qui dépend de nombreux facteurs :

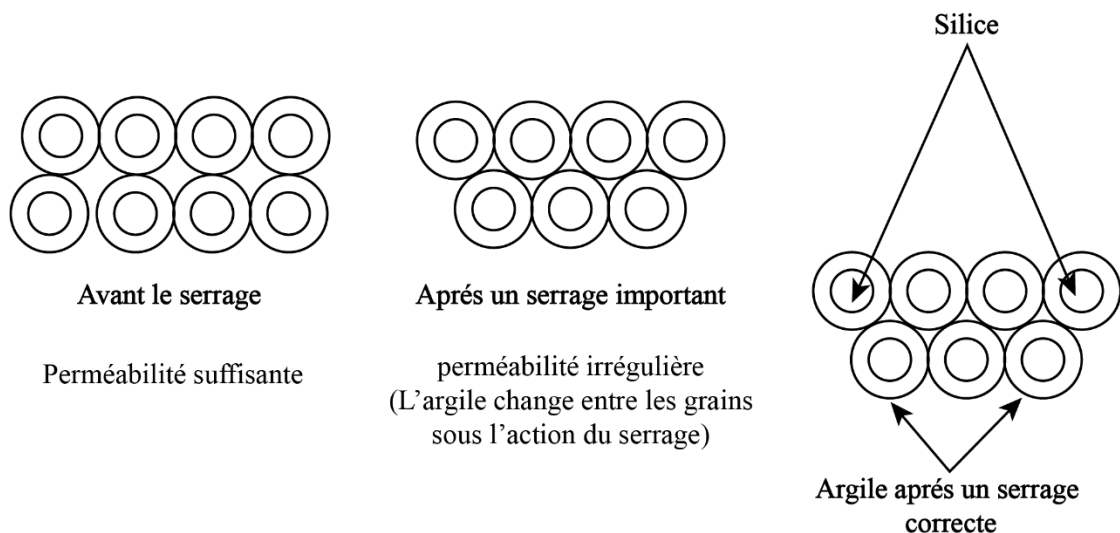


Figure II. 1 Perméabilité des gaz.

II-2-2-2-1. Grosseur et régularité des grains de silice

La perméabilité provient de de l'intervalle qui demeure libre entre les grains. Plus ceux-ci sont gros, plus l'espace entre eux est grand, plus la perméabilité est élevée. Mais, si le sable se compose de grains de grosseur irrégulière, les petits grains se glissent dans les intervalles laissés par les gros et bouchent presque totalement les vides.

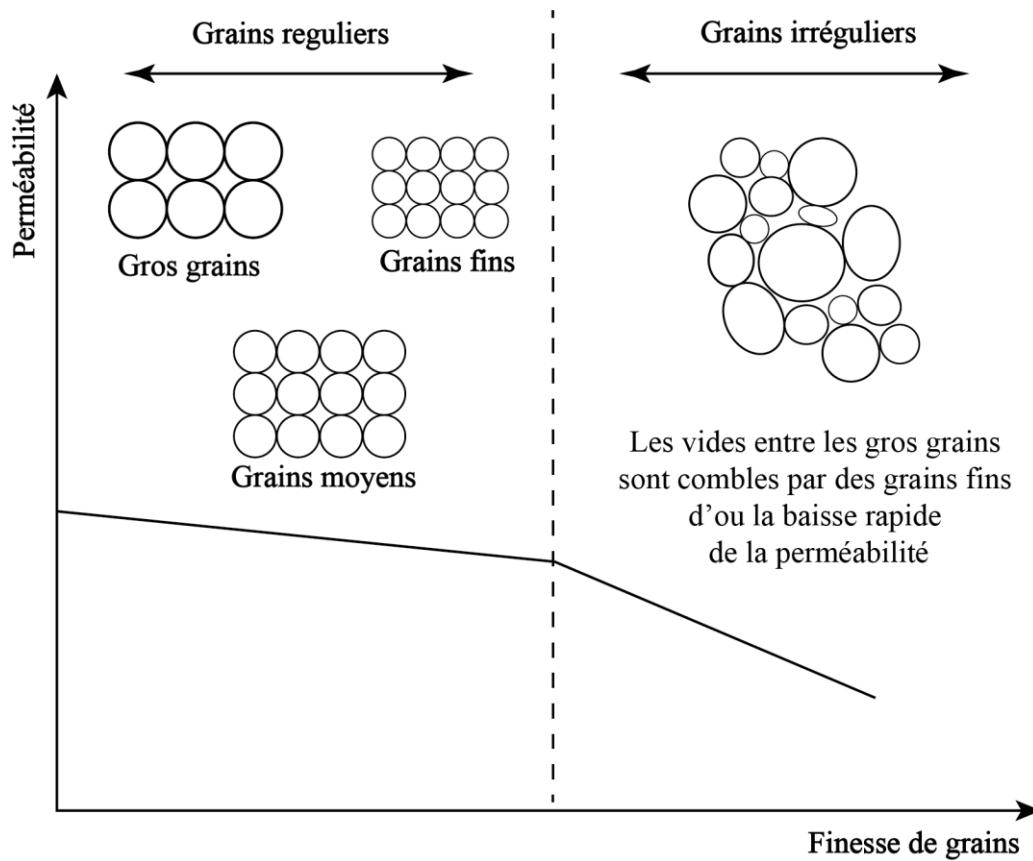


Figure II. 2 Influence de la grosseur des grains sur la perméabilité.

II-2-2-2-2. Quantité, qualité, humidité de l'argile

La perméabilité du sable sera d'autant plus grande que la couche de l'argile sera plus faible. Sous l'effet du serrage, les granules de silice s'enfonceront moins dans l'argile et les vides restants seront plus importants.

Au contraire, une grosse épaisseur de matières adhésive autour des grains de silice permet à l'argile par un serrage de sable, d'obturer tous les passages de gaz.

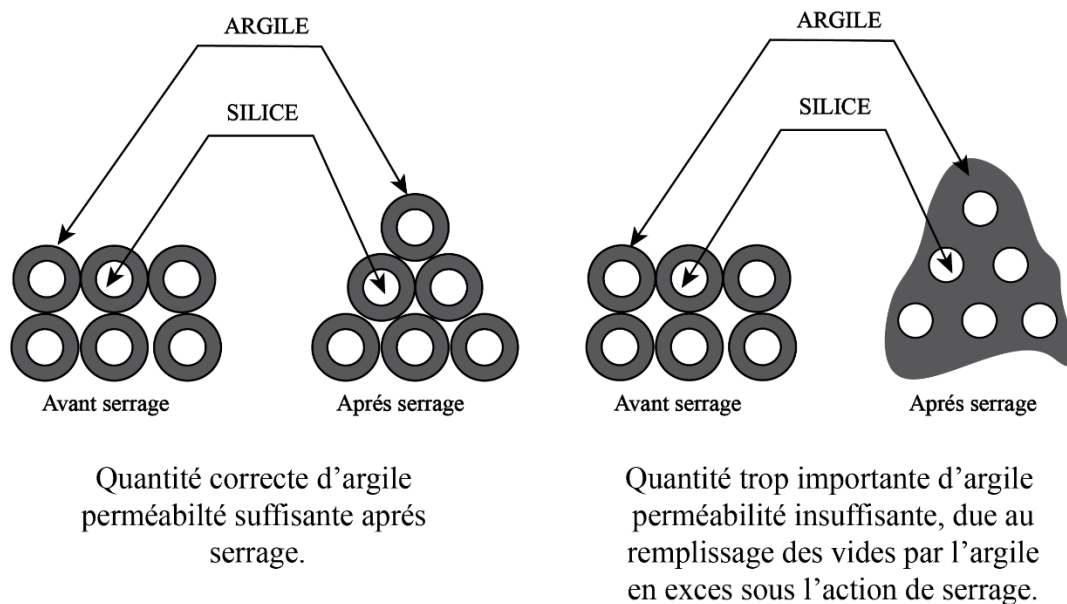


Figure II. 3 Influence de la qualité d'argile sur la perméabilité

II-2-2-3. Intensité de serrage

Sous l'effet du serrage, les grains de silice tendent à se rapprocher et à faire refouler l'argile dans les intervalles entre les grains. Dans le cas d'un serrage trop énergétique, d'une argile trop abondante ou trop humide pour le serrage effectué, les grains refoulent l'argile qui obture les vides et réduit la perméabilité.

On peut apprécier le degré de serrage par le duromètre :

Tableau II. 1 duromètre de le degré de serrage

| Degré de serrage | Dureté |
|------------------|--------|
| Très faible | 20 |
| Faible | 40 |
| Moyen | 50 |
| Fort | 70 |
| Très fort | 85 |

II-2-2-3. Réfractairite (infusibilité)

C'est la qualité qui permet au sable de résister plus au moins bien aux températures élevées des métaux coulées. Plus la teneur en argile augmente plus la réfractairité du sable diminue

Tableau II. 2 Réfractairite par rapport au pourcentage d'argile

| Argile % | Refractairite |
|-----------------|----------------------|
| 5 | 1500 |
| 10 | 1420 |
| 15 | 1320 |
| 20 | 1230 |
| 25 | 1150 |
| 30 | 1050 |

Pour augmenter la réfractairité en utilise les enduits.

II-2-2-4. Cohésion

C'est l'aptitude à la conservation des formes, elle s'obtient. Elle s'obtient en incorporant au sable de 8 à 12 % d'argile et environ 4 % d'eau.

II-2-2-5. Longévité

Environ 15% du sable perd ses propriétés après la coulée.

II-2-2-6. Compressibilité ou Aptitude au Serrage (A.S.)

Le contrôle effectué sur le sable en atelier est l'Aptitude au Serrage (A.S.). Il permet, pour une composition donnée, de relier une caractéristique mécanique du sable à son taux d'humidité. Celui-ci consiste à prélever un échantillon représentatif du sable contenu dans le malaxeur et à le soumettre à l'action d'un damoir. Principe simplifié du test :

L'ordre des opérations nécessaires pour déterminer l'A.S. :

1. Prélever du sable dans le malaxeur.
2. Tamiser le sable.
3. Remplir le cylindre (hauteur = 100 mm).
4. Serrer le sable à l'aide du damoir.
5. Lire la hauteur de l'échantillon de sable.
6. Calculer l'A.S.

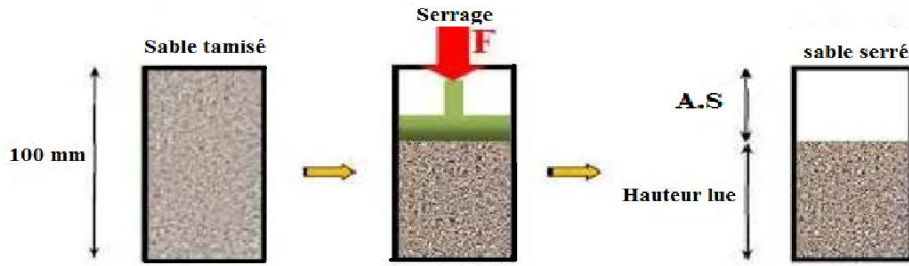


Figure II. 4 Aptitude au serrage

On effectue le calcul suivant : $A.S. = 100 - \text{hauteur lue}$.

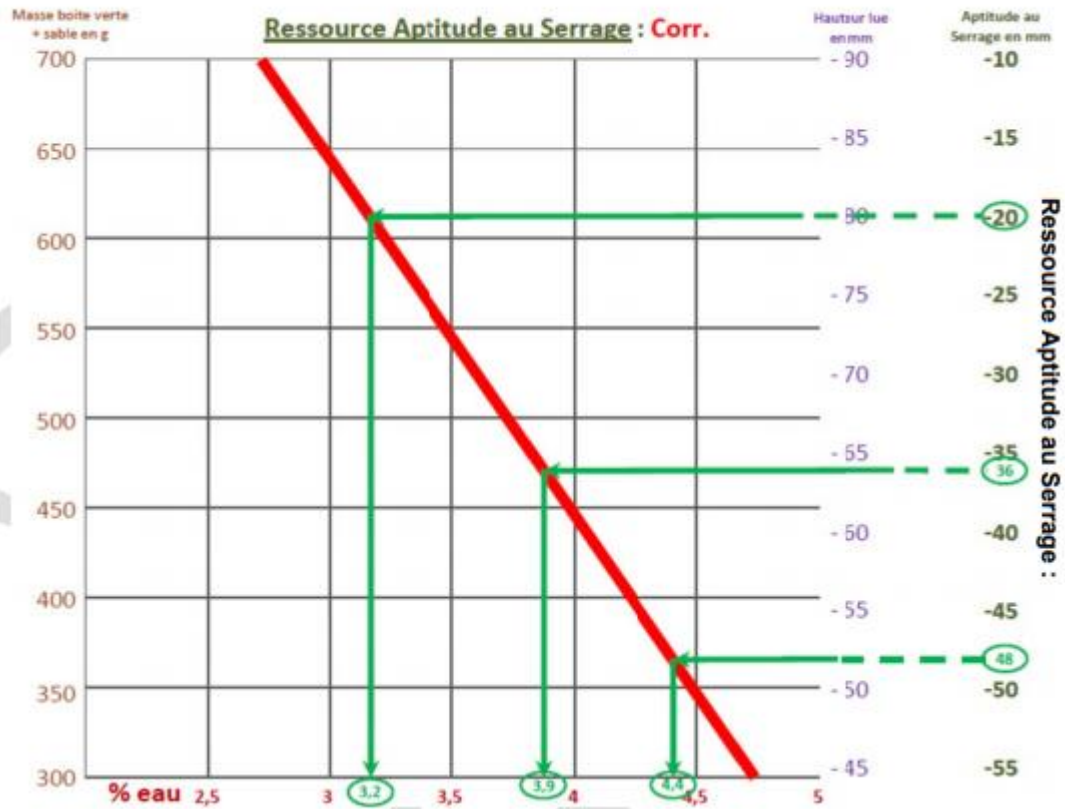


Figure II. 5 Ressource aptitude au serrage

- A.S.préconisée = $32 \leq AS \leq 40$. Pour machine à mouler Air-Impact.
- A.S.moyenne = $(40+32) / 2 = 36$

II-2-2-7. Caractéristiques du sable de moulage (sable à vert)

- Humidité : 2,9 à 3,5%.
- Compressibilité : 34 à 38%.
- Perméabilité : 155 à 185.
- Résistance à la compression : 1,7 à 2 Kgf/cm².
- Résistance au cisaillement : 0,35 à 0,55 Kgf/cm².
- Plasticité : 0,2 à 0,27.
- Perte au feu : 5 à 7%.
- Bentonite active au bleu de méthylène : 6 à 8%.
- Bentonite (argile) : 9 à 11%.
- Carbone : 5 à 6%.
- Matière en suspension (MS) : 12,5 à 13,5%.
- Indice de finesse : 52 à 60.

La teneur en argile active (Bentonite active) est équivalent à capable de se gonfler, représente la teneur efficace en liant. Dans l'expression matières en suspension sont comprises aussi la poussière quartzeuse, l'argile surcuits, les cendres de la poussière de charbon. [11]

II-2-3. Granulométrie et forme des grains

On peut Déterminer la Granulométrie et forme des grains par

II-2-3-1. Contrôle réception des sables

Il ne faut pas oublier que le contrôle réception des sables sera différent selon que le sable est utilisé uniquement en moulage ou également en noyautage. Etant donné que la plupart du temps il est utilisé pour les deux, les contrôles seront donc orientés vers un sable de noyautage car les caractéristiques demandées sont beaucoup plus sévères. Nous examinons donc les contrôles par ordre d'importance.

II-2-3-2. Examen visuel

A la réception du sable, la première chose à faire est de vérifier si le sable est humide. Ceci peut se produire lors du transport du sable. La présence d'eau n'est pas gênante si le sable est uniquement utilisé pour le sable démoulage à vert. On peut également vérifier visuellement la présence d'impuretés. En dernier point, la température doit être vérifiée. Un sable trop chaud peut avoir des conséquences sur la prise des résines de noyautage s'il est rapidement.[11]

II-2-3-3. Granulométrie

La méthode généralement employée en fonderie est la méthode **AFS (American Foundry men's Society)**. Cette méthode consiste à faire passer 100g de sable séché préalablement lavé afin d'éliminer les grains dont le diamètre est inférieur à **0,020mm < 20µm**,

par vibration dans une série de 11 tamis superposés d'ouverture de mailles définies dont les dimensions des ouvertures de mailles sont décroissantes. Après le tamisage, on obtient le résidu du sable dans chaque tamis et dans la cuve. On pèse ces résidus et puis on détermine les caractéristiques granulométriques du sable.[11]

Tableau II. 3 Cas d'exemple : Analyse granulométrique du sable de Chlef

| Tamis en ordre | Ouverture de maille mm | Refuse de criblage en% | Coefficient multiplicateur | Produit |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------|
| 1 | 1,4 | - | 3 | - |
| 2 | 1 | - | 6 | - |
| 3 | 0,71 | - | 9 | - |
| 4 | 0,5 | 0,750 | 20 | 15 |
| 5 | 0,355 | 10,3 | 30 | 309 |
| 6 | 0,250 | 49,1 | 40 | 1964 |
| 7 | 0,2 | 26,1 | 53 | 1383,3 |
| 8 | 0,180 | 7,5 | 65 | 487,5 |
| 9 | 0,125 | 4,9 | 105 | 514,5 |
| 10 | 0,09 | 0,7 | 165 | 115,5 |
| 11 | 0,063 | 0,5 | 210 | 105 |
| 12 | Fond | 0,15 | 300 | 45 |
| Total | | 100 | - | 4938,8 |

II-2-3-3-1.Détermination de la fraction basique

La fraction basique du sable est la somme maximale des résidus dans trois tamis voisins.

10,300(a)

49,100

26,100(b)

FB = 85,5%

II-2-3-3-2.Détermination de la catégorie

Le sable est de la catégorie b, le résidu du sable dans le tamis inférieur extrême de la fraction basique est plus grand par rapport au résidu du sable dans le tamis supérieur extrême.

II-2-3-3-3. Détermination du groupe de sable

Le groupe du sable est déterminé d'après le numéro du tamis moyen de la fraction basique. En fonction de la grosseur des grains de la fraction basique, les sables sont divisés en 08 groupes universels représentés dans le tableau II. 3.

Tableau II. 4 Détermination du groupe de sable

| Numéro des tamis de la fraction basique | Indication du groupe | Dénomination du groupe du sable |
|--|-----------------------------|--|
| 0,710 – 0,5 – 0,355 | 0,5 | Gros |
| 0,5 – 0,355 – 0,250 | 0,355 | Très grand |
| 0,355 – 0,250 – 0,2 | 0,250 | Grand |
| 0,250 – 0,2 – 0,180 | 0,2 | Moyen |
| 0,2 – 0,180 – 0,125 | 0,180 | Fin |
| 0,180 – 0,125 – 0,09 | 0,125 | Très fin |
| 0,125 – 0,09 – 0,063 | 0,09 | Mince |
| 0,09 – 0,063 - fond | 0,063 | Poussiéreux |

Donc d'après le tableau, il s'agit du sable de groupe **grand**.

II-2-3-3-4. Détermination de la structure granulaire

Si la quantité du sable se trouvant dans les 03 tamis voisins est supérieure à 70%, on dit quel sable à une structure granulaire concentrée, si cette quantité est entre 60 à 70%, on dit que la structure est étalée. Si cette quantité est inférieure à 60%, on dit que le sable à une structure très étalée et dispersée.

II-2-3-4. Détermination de la morphologie des grains

La forme des grains rencontrée dans les carrières est généralement entre **ronde** et **angulaire**. La forme des grains a une grande importance sur le comportement du sable lors de la coulée (dilatation plus importante des grains angulaires). La surface des grains doit être entre lisse, vitreuse, et rugueuse. Des surfaces fortement crevassées ont pour conséquence une surconsommation du liant, en réduisant, en même temps les propriétés du sable.

II-2-3-4-1. Impuretés (matière de suspension MS%)

On peut déterminer d'abord la teneur en éléments inférieurs à 20µm. Par définition, on parle d'argile pour cette fraction. En fait, la présence d'argile est peu importante et il s'agit généralement de poussières de silice ou d'oxydes métalliques (dans le cas de sables lavés et séchés).

II-2-3-5. Indice de finesse

C'est un chiffre conventionnel qui a cependant l'avantage d'indiquer numériquement la prédominance des grains les plus nombreux d'un sable étudié. L'indice de finesse est calculé selon la formule suivante :

$$\text{AFS} = \frac{\sum a_i \times r_i}{\sum r_i}$$

ri : le résidu du sable dans chaque tamis (voir tableau II. 4).

ai : le coefficient multiplicateur pour chaque tamis (voir tableau II. 4)

$$\text{Donc AFS} = 4938,8 / 100 = 49,388 \text{ [11]}$$

II-3. Différents types d'addition

L'argile est un matériau naturel, abondant et moins coûteux, largement utilisé dans divers domaines qui sont l'ingénierie, la construction, la pharmacie, l'industrie de procédés et les applications environnementales.

Argile composée principalement de minéraux à grains fins, qui montre généralement un comportement plastique à la teneur en eau et à la durée appropriée lors du séchage. Les argiles sont étudiées et utilisées dans de nombreuses disciplines pour la recherche fondamentale et la recherche appliquée.

Le terme de bentonite, qui est très fréquent, est utilisé pour désigner tous les argiles plastiques, colloïdales et gonflants dominées par l'un des plus grands groupes de minéraux d'argile appelés smectites.

Comme idée de départ nous nous sommes fixés comme objectif le point suivant. Étudiée d'une bentonite et le noir minéral.

II-3-1. Bentonites



Figure II.3 Bentonites

Le terme bentonite a été proposé en 1898 pour désigner une argile au toucher savonneux appartenant à la formation « *Benton shale* » et affleurant dans la région de Rock River (Wyoming, Etats Unies) ou la première exploitation de bentonite aurait été découverte en 1890, cette formation tire son nom de Fort-Benton situé à 650 Km environ au nord de Rock River.[12]

La bentonite s'agit d'une argile dont le constituant principal est **la Montmorillonite**. Qui est formée par le vieillissement de cendres volcanique, le terme peut englober de matériaux de composition différentes. Ainsi, il existe des bentonites qui sont riches en sodium, d'autres en calcium, potassium ou magnésium. Dans l'eau, la bentonite gonfle de 10 à 15 fois de son volume original et absorbe 6,5 fois son poids en eau. Il s'agit donc d'une argile à grande surface interne avec une capacité d'échange cationique de 80 à 150 meq/100g. et une capacité d'échange anionitique d'environ 25meq/100g. La Montmorillonite est constituée principalement de silicate d'alumine hydratée ou de Magnésie hydratée.

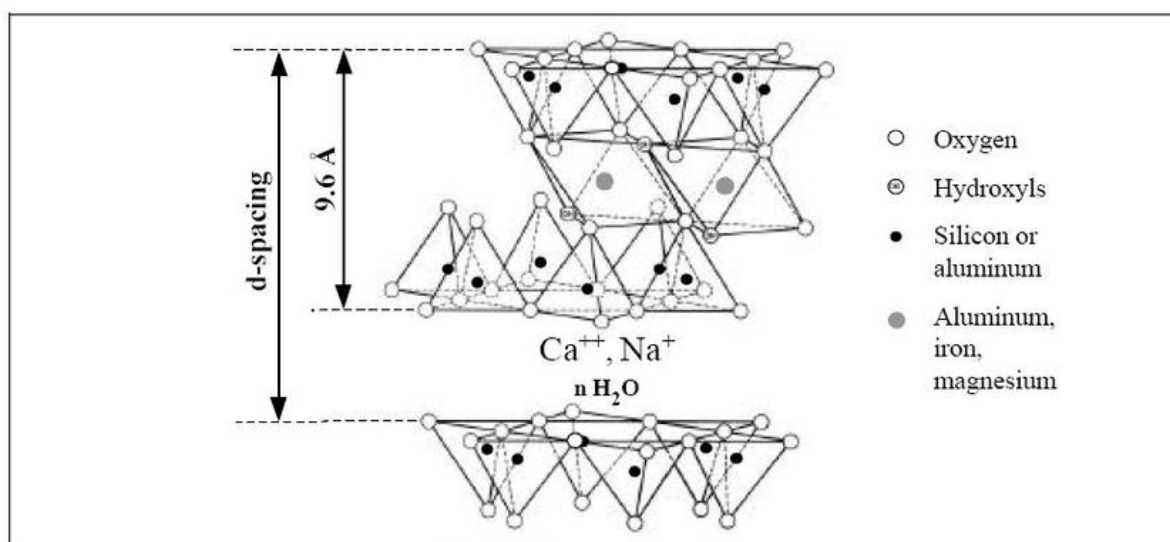


Figure II. 6 structure de la montmorillonite d'après Hoffmann. [13]

La formule chimique des argiles ordinaires : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. [13] L'alumine hydratée combinée à la silice donne de l'argile de couleur blanche, douce au toucher, très réfractaires. Suffisamment mouillée, elle forme une pate liante facile à façonner

Eau de constitution : qui donne la vie à l'argile et ne disparaît qu'à plus de 300°C. Au-delà de cette température, elle perd toutes ses qualités utiles de moulage, devient morte, le sable est dit brûlé. Il conviendra de ne pas dépasser la température critique au cours de l'étuvage des moules. Au cours de la coulée, l'argile qui est au contact du métal se déshydrate et perd son pouvoir liant. C'est cette partie inutile qu'il faut éliminer par dépoussiérage et remplacer par une addition de bentonite.

II-3-1-1. Eau d'addition ou d'imbibition

Qui conditionne l'humidité. Une plus au moins grande humidité donnera une plus au moins grande plasticité au sable. En augmentant l'humidité, l'argile se dilue, et le sable devient boue et perd ses qualités. Les sables de moulage seront donc préparés avec le minimum d'humidité compatible avec une plasticité convenable. A l'humidification les bentonites se gonflent, à l'étuvage les bentonites se contractent. C'est pourquoi les bentonites sont utilisées que pour les moules à vert. On n'utilise jamais la bentonite pour les moules étuvés.[11]

II-3-1-2. Origine de bentonite

Les bentonites se forment généralement dans un environnement sédimentaire marin à basse énergie, à partir de cendres volcaniques qui se sont accumulées dans l'eau et ont formé des couches argileuses.

Les bentonites connues les plus anciennes ont longtemps daté de seulement 1,5 milliard d'années, mais en 2008 des bentonites de 2,1 Ga ont été trouvées parmi les sédiments du bassin de Franceville (Gabon). [14]

Le traitement des bentonites est le suivant :

- Alimentation.
- Concassage.
- Une activation au carbonate de soude (Na_2CO_3) et à la magnésie (MgO).
- Séchage.
- Broyage et ensachage.

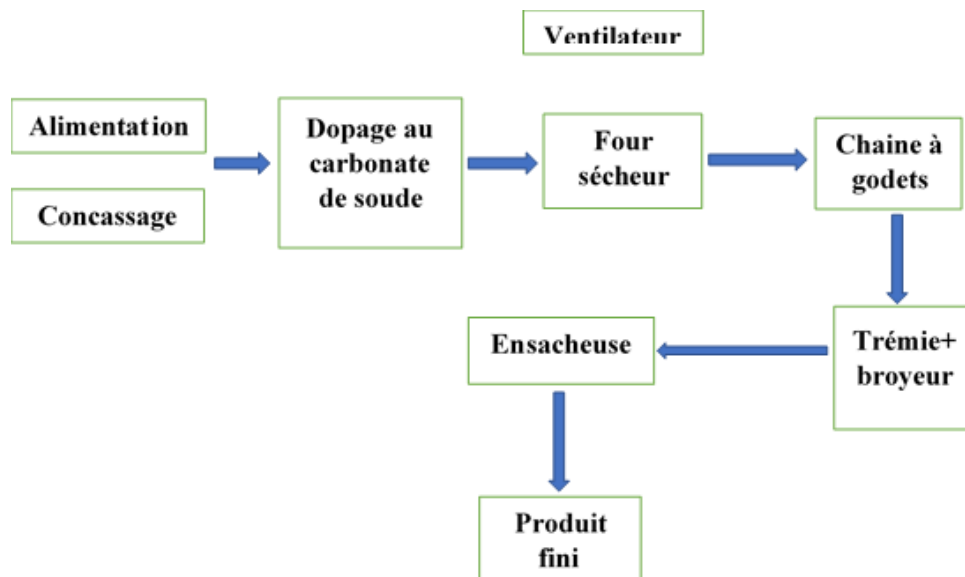


Figure II. 7 Process de traitement de la bentonite

II-3-1-3. Structure de la Bentonite

Structure de la Bentonite en feuillets

Le feuillet élémentaire est composé de deux couches tétraédriques de SiO_2 au milieu desquelles existe une couche octaédrique constituée de Al_2O_3 . Et la présence d'eau de constitution entre chaque feuillet élémentaire. Cette structure en feuillets confère à la Montmorillonite un pouvoir d'adsorption d'eau et de gonflement très importants.

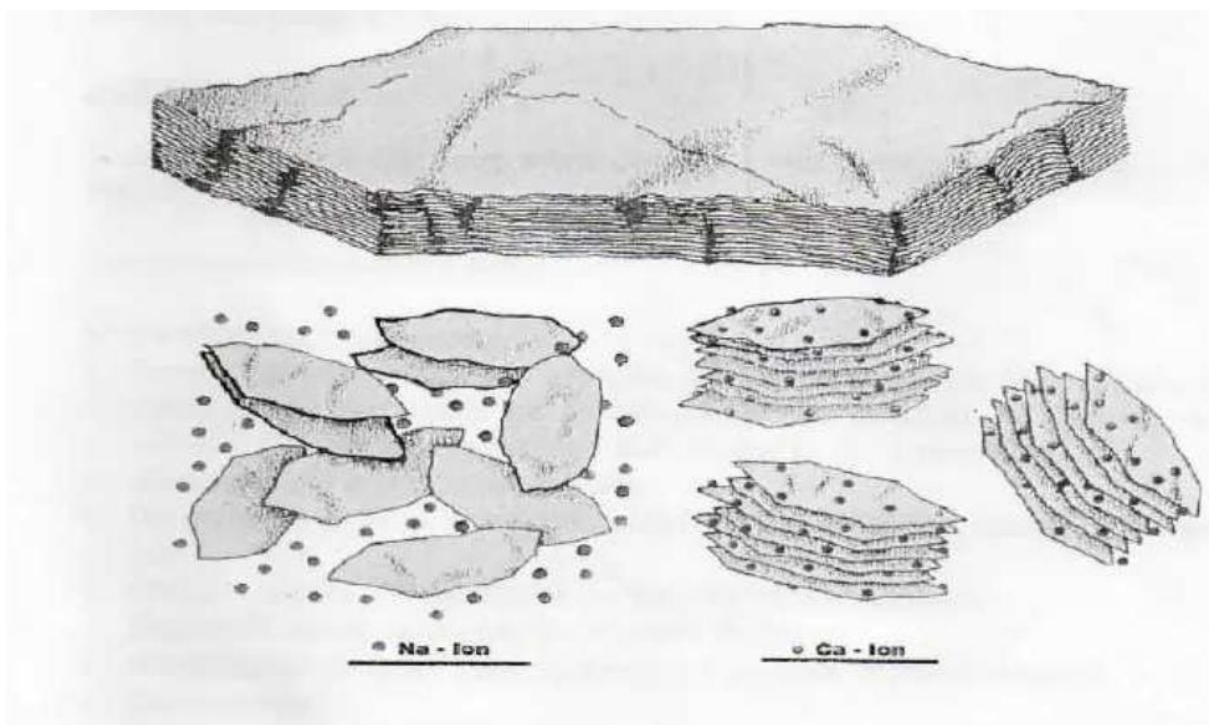


Figure II. 8 structure en feuillets de la Montmorillonite

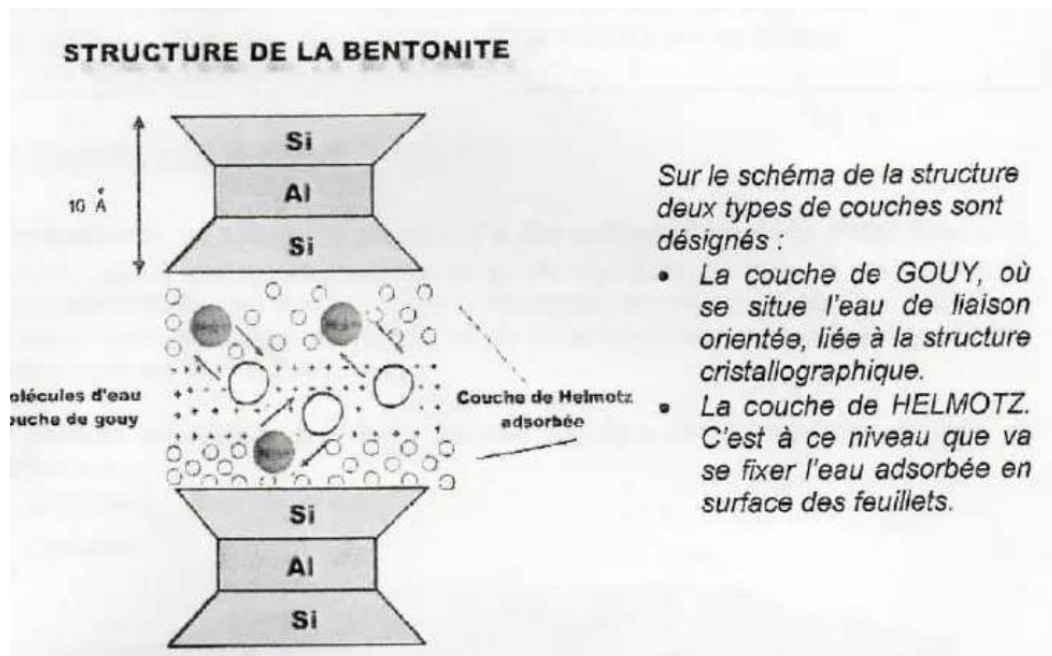


Figure II. 9 structure de la bentonite

II-3-1-4. Propriétés de la bentonite

- Les bentonites sont caractérisées par plusieurs propriétés dont la composition minéralogique, la granulométrie, la teneur en eau, la capacité d'hydratation, le gonflement libre et sous pression, la capacité d'absorption d'eau et la perméabilité à l'eau. Certains fournisseurs de bentonite ajoutent à la bentonite sodique du carbonate de sodium pour augmenter la performance de gonflement et les propriétés d'absorption. De plus, des fournisseurs de bentonite calcique ajoutent couramment du carbonate de sodium à leur produit pour augmenter la concentration en sodium.
- La bentonite sodique est l'argile présentant la perméabilité la plus faible. La bentonite utilisée comme matériaux dans les géo-composites bentonitiques contient de 65 à 95 % en poids de montmorillonite sodique naturelle ou calcique activée (substitution du Ca par du Na).
- Les bentonites calciques ont une capacité moindre que les bentonites sodiques d'absorber de l'eau, que les bentonites absorbent plus aisément de l'eau déminéralisée que de l'eau contenant des sels en solution, des lixiviats ou des hydrocarbures.

Cette absorption d'eau se traduit par un gonflement qui peut se mesurer à l'aide de l'essai normalisé ASTM D-5890 effectué à pression atmosphérique. [11]

Perméabilité : la perméabilité d'une bentonite est fonction de la nature de la bentonite et de la quantité d'eau absorbée, elle-même fonction de la contrainte normale appliquée.

II-3-2. Noir minéral

II-3-2-1. Définition

Le noir minéral est typiquement un charbon pulvérisé, utilisé comme inhibiteur d'oxydation du métal en fonderie de fonte sous forme d'addition au sable à Vertou d'enduit.[11]

II-3-2-2. Comment agit le noir ?

Un moule en sable constitué de sable siliceux, d'argile et d'eau est une masse poreuse humide.

-la finesse du noir contribue à l'étalement granulométrique du sable et donc s'oppose mécaniquement à la pénétration du métal entre les grains du sable compacté.

- a la coulée, l'atmosphère du moule est très chargée en vapeur d'eau et pourrait oxyder le métal. Les oxydes formés peuvent des défauts, mais aussi réagir avec la silice accentuant l'altération de l'état de surface de la pièce.

Le noir ajouté, se combinant à l'oxygène, permet un dégagement gazeux sous forme de CO-CO₂, créant un milieu réducteur dans le moule.

- le dégagement des **matières volatiles** crée une protection à l'**interface MOULE/ METAL**.

-Analyse typique de Noir minéral

Tableau II. 5 Analyse typique de Noir minéral

| Produit | Etat Physique | Carbone brillant % | Matières volatiles % | Cokes résiduels % | Cendres % | Soufres % | Azote % | Eau % |
|--------------|---------------|--------------------|----------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|-------|
| Noir minéral | Pulvérisé | 10 | 36 | 64 | 5.5 | 1 | 0.8 | 2 |

MV = 100 – cokes résiduels.

Cokes = résidu de calcination non oxydante à 900°C.

Cendres = résidu de calcination oxydante.

CB = résidu de calcination dans un appareillage particulier.

II-3-2-3. Propriétés de noir minéral :

Tout minéral possède des propriétés physiques et chimiques qui permettent de le distinguer des autres. Ces propriétés sont utiles dans la reconnaissance et identification des minéraux. Parmi les propriétés les plus importantes sont la morphologie, la dureté, la cassure, le clivage, la couleur, la trace, la transparence, l'éclat, la densité, la solubilité, l'effervescence, le magnétisme, la conductivité électrique et la radioactivité.

1. La Ténacité

Un minéral est tenace s'il résiste bien au choc ; s'il casse facilement, il est fragile ou friable.

2. La Dureté

La dureté d'un minéral correspond à sa résistance à se laisser rayer. Cette propriété est variable d'un minéral à l'autre. Le diamant est très dur mais le talc est mou.

Les minéralogistes ont une échelle relative de dureté, l'échelle de Mohs, qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur. L'échelle de Mohs comporte dix degrés, 1 à 10, dans l'ordre de dureté croissante : Talc, Gypse, Calcite, Fluorine, Apatite, Orthose, Quartz, Topaze, Corindon, Diamant. Pour classer les minéraux simplement, on utilise une échelle comparative composée d'outils facilement disponibles que l'on peut rayer en fonction de la dureté (d): ongle $d > 2$, cuivre $d > 3$, couteau $d > 5$, plaque de verre $d > 6$.

3. La Densité

La densité des minéraux est une propriété mesurable qui caractérise un minéral donné. La densité d'un minéral, est une constante physique, c'est le rapport qui existe entre le poids d'un minéral et celui de son volume d'eau, à une température déterminée. Pour calculer la densité d'un minéral, on mesure son poids dans l'air (Mair); On mesure son poids lorsqu'il est immergé dans une colonne d'eau distillée (Meau). $D = M_{air} / (M_{air} - M_{eau})$

La densité varie de 1 à 20 selon une échelle de densité : Minéraux légers (1 - 2); Moyennements lourds (2 - 4); Lourds (4 - 6); Très lourds (6 - 20).

4. Le Clivage

Le clivage est la propriété que possèdent de nombreux minéraux de se laisser diviser en produisant des surfaces planes appelées « plan de clivage ». Le clivage correspond à des plans de faiblesse dans la structure cristalline des minéraux qui vont se défaire, se briser facilement le long des plans parallèles de moindre résistance. Par exemple, les micas se débitent en feuilles grâce à leur clivage selon un plan unique.

5. La Cassure

On parle de cassure lorsqu'un minéral se brise en donnant des surfaces irrégulières. Certains minéraux qui ne se clivent pas facilement présentent une cassure caractéristique. Sous l'effet d'un choc, un minéral cristallin a tendance à se casser et on obtiendra des fragments. Si on

frappe (un bon coup de marteau) un cristal de quartz qui est un minéral sans clivage, on obtient des fragments à surface onduleuse (comme si on brisait un tesson de bouteille). Cet type de cassure qui rappelle l'intérieur d'une coquille, est qualifié de conchoïdale.

6. La Morphologie ou Forme Cristalline

Les formes géométriques qui présentent les cristaux sont définies par leur structure cristalline. Certains minéraux se présentent souvent dans la nature sous forme de polyèdres (cubique, en prisme, en pyramide) qui permettent de retrouver la maille cristalline. Les minéraux ont une géométrie mal définie (à l'extérieur) malgré une organisation atomique bien présente (à l'intérieur).

7. La Couleur

Ce n'est pas un critère de détermination fiable car on observe des variations, des changements de couleur. Certaines espèces minérales ont une couleur typique et d'autres ont une coloration empruntée. La coloration est liée à l'incorporation d'impuretés, ou de défauts de la structure cristalline.

8. La couleur de Trait, le Trait ou Trace

Il s'agit en fait de la couleur de la poudre des minéraux. Cette propriété se détermine sur la trace laissée par le minéral lorsqu'on frotte ce dernier sur une plaque de porcelaine non émaillée. La rayure donne une poudre qui peut être caractéristique. La trace, obtenue en rayant le minéral sur une plaque de porcelaine, est un moyen simple pour séparer les minéraux à couleur empruntée des minéraux colorés.

9. La transparence

C'est la propriété des minéraux de laisser passer la lumière. Il existe cinq degrés de transparence :

- Transparent : on peut lire à travers une couche épaisse.
- Semi-transparent : lecture non nette.
- Translucide : la lumière traverse le minéral.
- Non transparent : le minéral ne laisse pas passer la lumière sauf en couche très mince.
- Opaque : le minéral ne laisse jamais traverser la lumière.

10. L'Éclat

L'éclat des minéraux, c'est l'aspect qu'offre leur surface lorsqu'elle réfléchit la lumière. Il dépend de la lumière, la rugosité de la surface, etc. On distingue deux grandes catégories et différents types d'éclat :

- a) l'éclat métallique, l'aspect métallisé des surfaces cristallines, brillant comme celui des métaux.
- b) l'éclat non métallique que l'on décrit par des termes comme vitreux (comme le verre, caractéristique des minéraux transparents); gras (comme si la surface était enduite d'huile ou de

graisse, lié à l'inégalité de surface); adamantin (qui réfléchit la lumière comme le diamant); résineux (comme la résine); soyeux (comme la soie, relatif aux minéraux fibreux); mat (minéraux d'apparence terreuse); nacré (caractéristique des minéraux semi-transparents).

11. L'effervescence

Peu de minéraux possèdent cette caractéristique qui s'obtient en déposant une goutte d'acide chlorhydrique dilué à 10 % sur le minéral. Cette réaction chimique dégage des bulles de gaz carbonique, un phénomène qu'on qualifie d'effervescence. Si on note un bouillonnement, c'est que le minéral est effervescent. L'effervescence est une réaction chimique qui se produit entre les carbonates, sur la masse minérale même ou sur la poussière, et l'acide chlorhydrique pour donner du gaz carbonique.

12. La solubilité

C'est la propriété d'un minéral à se dissoudre dans l'eau ou dans un acide.

13. Le magnétisme

C'est la capacité de certains minéraux riches en fer à réagir en présence d'un aimant.

14. La radioactivité

Quelques minéraux émettent un rayonnement invisible, « alpha », « bêta » ou « gamma ». On mesure la radioactivité à l'aide d'un compteur Geiger-Muller.

15. La conductivité électrique

On peut classer les minéraux en deux groupes, les conducteurs et les non-conducteurs d'électricité.[11]

II-4. Réalisation des modèles de moule en sable

La technologie liée au procédé de moulage en sable de pièces en alliage d'aluminium. La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant autant que faire se peut les travaux de finition après refroidissement. Ce procédé de formage des métaux est utilisé dans de nombreux secteurs, les techniques utilisées dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, et des quantités à produire. Cependant quel que soit le procédé employé, les pièces issues de moulage suivent les mêmes règles de tracé

II-4-1. Modèle :

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable. Il est exécuté en bois ou en métal d'après le dessin de fabrication, c'est à dire, le matériau utilisé pour la confection du modèle dépend essentiellement du procédé de moulage (manuel ou mécanique).

Un modèle doit posséder :

- Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques.
- Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant du sable, gaz etc.).
- Une bonne résistance contre les contraintes thermiques (échauffement du modèle dans les différents procédés de moulage).
- Une précision de la forme et des dimensions.
- Bas prix de revient.

Le bois reste depuis longtemps, la matière essentielle pour la confection des modèles. Pour chaque type de bois, on trouve des propriétés différentes. On utilise surtout des bois traités, sans fissures et secs (moins de 10 % d'humidité) pour prévenir leur déformation au cours du séchage.

La surface de travail doit être lisse et résistante à l'usure. Pour exécuter des pièces en grande série, les modèles sont métalliques, ils sont usinés, polis et montés sur plaques modèles métalliques. Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que :

- Alliage d'aluminium.
- Alliage de magnésium.
- Alliage de zinc.
- Alliage de cuivre.
- Fontes et aciers.

Sur les surfaces des modèles, sont appliqués des enduits destinés à améliorer leurs propriétés de surface. La couche mince d'enduit ne doit pas avoir une influence sur la forme et les dimensions du modèle. Les enduits métalliques sont obtenus par galvanisation ou chromisation et non métalliques par peinture.[15]

Lors de la réalisation du modèle on doit tenir compte de :

II-4-1-1. L'usinage :

S'il y a lieu. Dans ce cas, la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisie suivant un tableau spécial. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.

II-4-1-2. Le retrait :

Car lors du refroidissement, le métal se contracte, le retrait est la valeur de cette contraction. Donc on majore les dimensions du modèle de 1 % pour la fonte et de 2% pour l'acier.

II-4-1-3. La dépouille :

Les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle, c'est la dépouille (pente de 3 à 10%), comme le montre la (figure II.10). La dépouille est absolument nécessaire.

La dépouille peut se faire en augmentation à égalité de la pièce ou encore en diminuant les dimensions de la pièce, si le rôle de celle-ci n'est pas important. En général, le modèle est souvent en plusieurs parties démontables pour faciliter le démoulage et permettre la sortie des parties en contre dépouille.

Lorsqu'une partie du modèle fait saillie sur le modèle et à une direction autre que celle générale du moulage, il est bien évident que l'on ne peut démouler cette partie au même temps que le modèle sans arracher une portion du sable du moule. Pour éviter cet inconvénient on fait cette partie du moule démontable, au moment du démoulage, le corps C (figure II.10) est démoulé dans la direction générale du démoulage D, alors que la partie démontable P, reste dans le moule, et elle est ensuite démoulée suivant la direction S dans la cavité du moule laissé par le corps C démoulé.

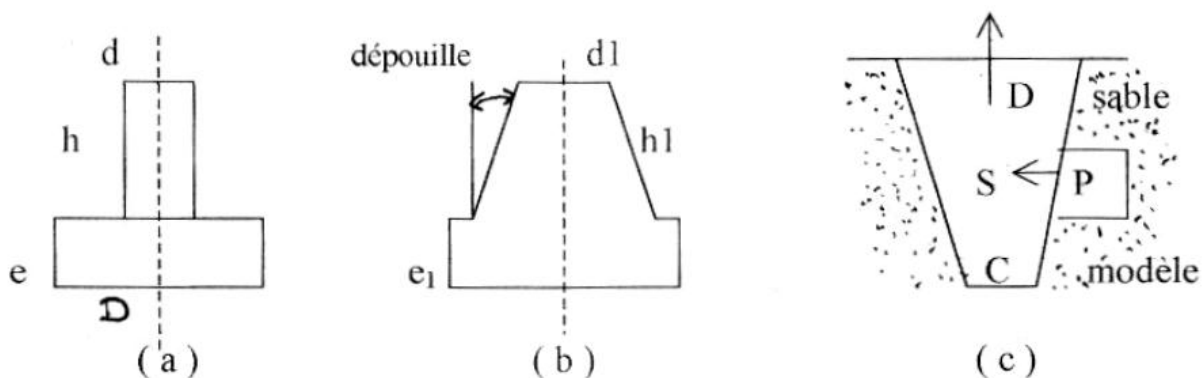


Figure II. 10 la dépouille du modèle

Les modèles peuvent être aussi creux ou pleins. Les modèles de petites dimensions sont massifs et au contraire ceux de grandes dimensions sont creux afin de diminuer le prix de revient, ainsi que leur poids.

II-4-2. Noyau et boîte à noyau

Pour obtenir le contour intérieur de la pièce, on emploie les noyaux, qui sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel.

Le noyau est confectionné en sable auto-siccant, dans un moule appelé boîte à noyau.

La boîte en bois ou métallique (fig.II.11) et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage.

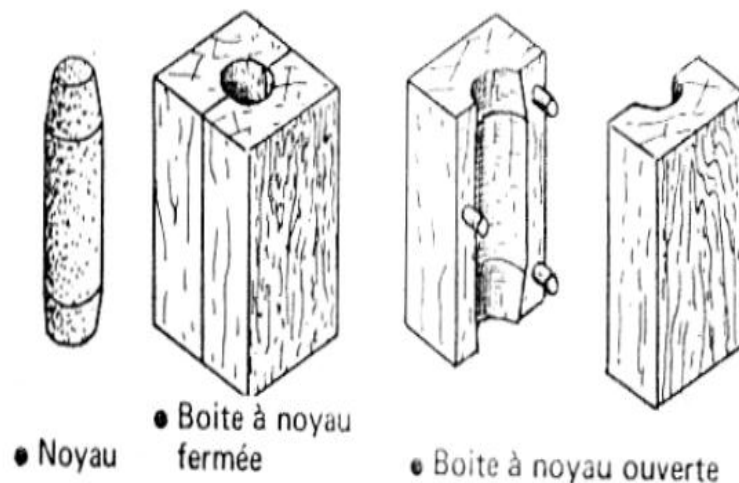


Figure II. 11 boîte à noyau

Lorsque le sable est serré ce dernier prend la forme du moule. Le noyau est sorti de la boîte sans détérioration, ensuite il est séché (cuit) à l'étuve pour lui donner une solidité lui permettant de résister à l'érosion du métal en fusion et aux efforts de compression qu'il subit lors du refroidissement de la pièce.

L'incorporation de certaines résines synthétiques au sable du noyau permet soit :

- -Un moulage du noyau dans une boîte métallique chauffée modérément et dans laquelle le sable est injecté. Le durcissement dure alors moins d'une minute. Un dispositif pneumatique porté par la machine assure l'ouverture et la fermeture de la boîte.
- -Un moulage à la main et un durcissement à froid moins rapide, mais qui dispense de l'étuvage habituel (séchage thermique ou durcissement chimique).

Les dimensions du noyau sont établies comme celles du modèle, en tenant compte des surépaisseurs d'usinage, du retrait et de la dépouille éventuellement.

Pour la fabrication des pièces en petites séries, on utilise les noyaux perdus, qui sont confectionnés à partir du sable siliceux et liant. Ces noyaux sont détruits lors de l'extraction de la pièce coulée.

Pour la fabrication de pièces en grande série, on utilise le plus souvent les noyaux en acier ou en fonte, afin d'éviter leur collage avec la pièce, ils sont peints avant la coulée avec un noir résistant à la chaleur. Lors de l'extraction de la pièce, ils ne sont pas détruits et peuvent être réutilisés.[15]

II-5. Recyclage des matériaux de moulage

La conjugaison des coûts d'achats des sables neufs, de leur transport et du tonnage considérable de sable nécessaire à la confection des moules et des noyaux (estimé globalement de 5 à 10 fois le volume des pièces produites) a incité l'industrie de la fonderie à recycler préférentiellement les sables usés dans leur procédé de moulage des pièces métalliques. 90 % du sable brûlé est recyclé à la confection de nouveaux moules par ajout de sable neuf et moyennant une préparation spécifique (régénération). Le sable restant (10 %) est rejeté du procédé de fabrication. [16]

A ce stade, le « sable usé » est considéré comme un déchet de fonderie et peut éventuellement suivre une autre voie de recyclage. Ces matériaux sont principalement constitués de sable d'origine naturelle mélangé à des liants de nature très variée (argile, silicate de soude, résine furanique) et à des résidus de métaux fondus. Le premier type de procédé à base de liants minéraux d'origine naturelle (argile) (de la bentonite pour les sables à vert) génère des sables dont l'élimination n'implique pas de risque de pollution de l'environnement. Les procédés à base de liants organiques d'origine synthétique utilisent dans la grande majorité des cas, des résines phénoliques ou furaniques qui sont présentes dans les sables en quantités diverses. Ces sables peuvent être, soit stockés dans des installations dûment autorisées à cet effet, soit valorisés en les introduisant dans des procédés aptes à détruire ces liants. Les sables usés peuvent être utilisés en agriculture, en construction routière, dans le domaine du bâtiment, pour la fabrication de tuiles, de briques et de ciment. [16]

II-5-1. Régénération des sables argileux

Les argiles sont des matériaux durables qui conservent leurs propriétés liantes tant que leur eau de constitution demeure présente. Peuvent donc être recyclés le sable de base proprement dit, ainsi que l'argile qui n'a pas été désactivée.

Il suffit donc théoriquement de compenser les pertes résultant de la coulée précédente, par apport de sable de base neuf et d'argile. En réalité, le problème est plus complexe car les pertes sont difficilement contrôlables.

De nombreux facteurs interviennent, tels que :

- La nature du métal et le rapport de la masse de sable à la masse de liquide.
- La durée de refroidissement du moule.
- La durabilité de l'argile.
- La quantité et l'aptitude au débouillage des noyaux.
- La quantité de sable restant adhérente aux pièces.

Avant de recevoir les additions de régénération, le sable provenant du décochage très hétérogène en morphologie en température, en composition et en humidité, doit être reconditionné pour être transformé en matière première homogène. Les étapes du reconditionnement sont les suivantes :

- Le passage dans un brise-mottes suivi d'un criblage pour éliminer les éléments les plus grossiers,
- Le passage dans un refroidisseur afin de ramener la température à 10°C maximum au dessus de la température ambiante, faute de quoi le réglage ultérieur de l'humidité devient aléatoire. Le dispositif le plus efficace consiste à souffler de l'air dans le sable préalablement humide, en pratique l'évaporation de 1% d'eau provoque une diminution de température de 20 à 25°C.
- La démétalisation c'est une opération qui peut être effectuée par un triage magnétique pour la plupart des métaux ferreux ; dans le cas des alliages non magnétiques un criblage fin du sable s'avère plus ou moins efficace.

Intervient ensuite l'opération de régénération proprement dite, effectuée dans un malaxeur.

Le sable reconditionné reçoit les éléments de régénération suivants :

- -le sable de base neuf, éventuellement,
- -l'argile, en quantité correspondant aux pertes subies par le sable reconditionné et à l'agglomération intégrale du sable de base neuf ou sable à noyaux provenant du décochage de la pièce précédent.
- -divers compléments additifs.
- -l'eau, qui doit être dosée pour ramener le sable à l'état d'humidification propre au moulage ; le dosage de l'eau doit être effectué à 0.1% près.

Selon la nature du sable de moulage, le potentiel de recyclage des sables usés peut également varier :

- Sable argileux à vert ≈98%
- Sable au silicate de soude 25%à100%
- Sable au ciment ≈50%
- Sable à la résine ≈70%

Les taux de recyclage peuvent évoluer sensiblement en fonction de la situation géographique de la fonderie, de la technique de moulage et du volume de production des pièces.

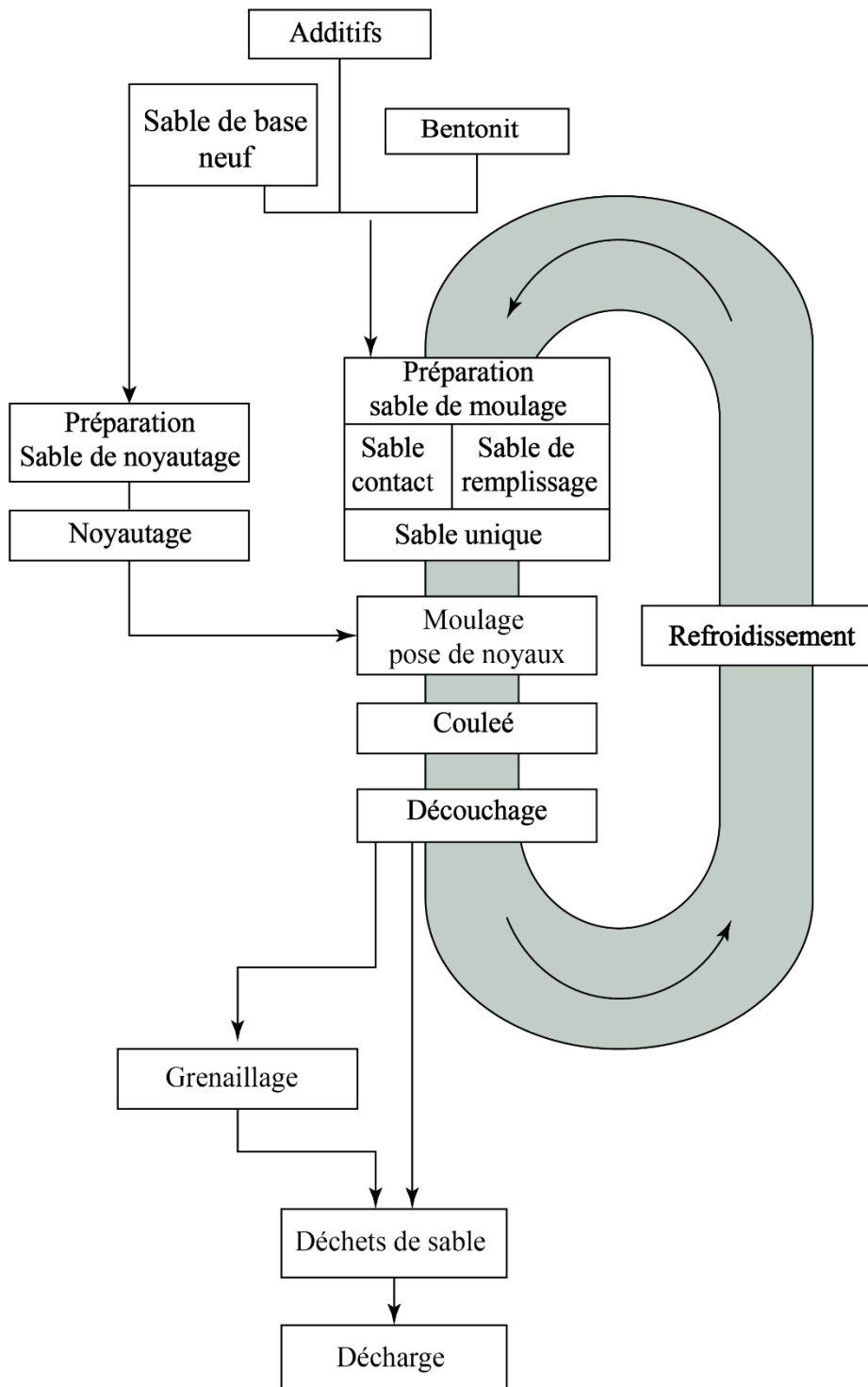


Figure II. 12 Exemple de recyclage d'un sable argileux [17]

Chapitre III : Influence du taux de bentonite

III-1. Introduction

Le chapitre trois est consacré à l'interprétation des résultats des essais réalisés au laboratoire de fonderie de Tiaret (ALFET) pour la caractérisation des sables usés dans la fonderie de Tiaret.

Vu le très grand nombre de domaines d'utilisation des sables usés de fonderie nous avons focalisé nos essais de caractérisation de ces sables dans le domaine de génie mécanique, en vue de leur valorisation dans ce domaine.

De notre cote nous avons effectué une visite de terrain à l'entreprise algérienne de fonderie de Tiaret(ALFET), nous avons étudié les types de sables utilisés dans le domaine de moulage et leur caractérisation.

III-2. Composition du sable

L'Algérienne des fonderies de Tiaret (ALFET) utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. Le plus souvent en sable siliceux (sable d'origine) complété par des liants selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage étudiés et utilisés par ALFET sont répertoriés comme suite :

III-2-1. Sable à vert ou à l'argile

Le sable de base est constitué principalement de grains de silice pure (quartz), mélangés avec de la bentonite (5 % à 10 %), avec du noir minéral et de l'eau. Le sable à vert est très utilisé pour la confection des moules, appelé « moulage à vert ». Ce procédé est employé pour la fabrication des pièces en fonte.

III-2-2. Sable au silicate de soude

Le sable au silicate de soude dénommé sable de remplissage (3 % à 4 %) est utilisé pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux. Ces mélanges sont durcis, par injection de gaz carbonique. Ce type de sable est utilisé pour le moulage de pièces en acier.

III-2-3. Sable au silicate de soude avec bentonite

Appelé aussi sable de contact. Sa composition est la même que celle du sable au silicate de soude (S2) mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5 %) pour améliorer l'état de surface des pièces.

III-2-4. Sable à la résine furanique

D'une manière générale, les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2%, comme liant organique. La résine furanique employée par ALFET est un mélange d'alcool furfurylique et d'alcool formaldéhyde. Cette résine thermodurcissable durcie en

présence d'un catalyseur acide composé de l'acide xylène sulfonique, de l'acide benzène-sulfonique et de l'acide sulfurique. Le sable à la résine furanique sert à la fabrication de pièces massives en fonte.

III-3. Partie expérimentale

Dans l'ensemble des expériences que nous avons menées en laboratoire, nous avons utilisé du sable silicate de soude et nous avons obtenu les résultats suivants concernant caractérisation de ce sable.

III-3-1. Caractérisation des sables usés

III-3-1-1. Analyses chimiques des sables

On fait l'analyse chimique de sable de silicate de soude dans laboratoire et on obtient les résultats (voir **Tableau III. 1**)

Tableau III. 2 : Analyse chimique de silicate de soude

| Échantillon | T | T eau | Na ₂ O | SiO ₂ | M | M séché |
|-------------|----|-------|-------------------|------------------|------|---------|
| | 21 | 17.35 | 14,94 | 34,34 | 2,30 | 49 ,28 |

III-3-1-2. Analyses granulométriques

On fait l'analyse granulométrique de sable de silicate de soude dans laboratoire par l'essai de tamissage et on obtient les résultats (voir **Tableau III. 3**)

Tableau III. 4 Distribution granulométrique du sable

| N Tamis | Ouverture de mailles | Refus en g | Refus en % | Coefficient | Produit(P) |
|---------|----------------------|------------|------------|-------------|------------|
| 42 | 400 | 1.62 | 3.24 | 32 | 103.68 |
| 48 | 315 | 6.50 | 13.01 | 39 | 507.39 |
| 61 | 250 | 16.67 | 33.36 | 46 | 1534.56 |
| 77 | 200 | 15.20 | 30.42 | 54 | 1642.68 |
| 95 | 160 | 8.90 | 17.81 | 67 | 1193.27 |
| 123 | 125 | 0.57 | 1.14 | 87 | 99.18 |
| 166 | 90 | 0.40 | 0.80 | 112 | 89.60 |
| 171 | 80 | 0.06 | 0.12 | 120 | 14.40 |
| 195 | 71 | | | 145 | |
| | | 0.05 | 0.10 | 300 | 30.00 |
| Total | | 49.97 | 99.99 | | 5214.76 |

Indice de finesse = $P/R = 52$

$$AFS = \frac{\sum a_i \times r_i}{\sum r_i}$$

r_i : le résidu du sable dans chaque tamis.

a_i : le coefficient multiplicateur pour chaque tamis.

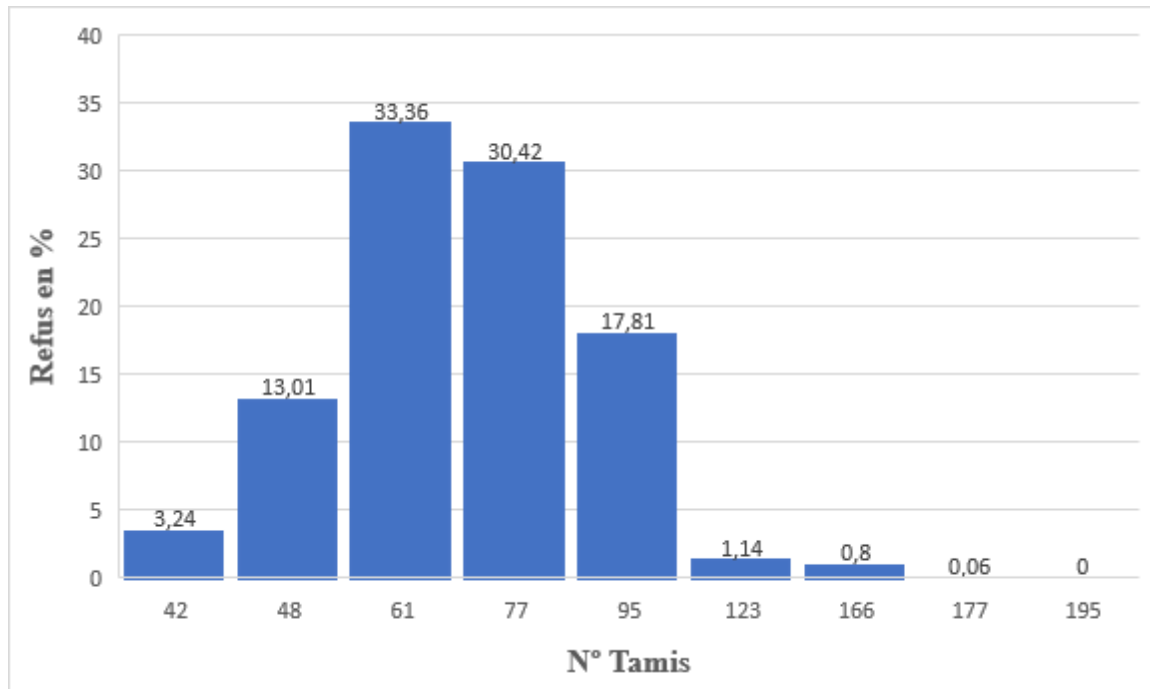


Figure III. 1 Distribution granulométrique du sable

III-3-1-3. Réfractarité

Tableau III. 5 Mesure réfractarité en argile

| Argile % | Réfractarité |
|----------|--------------|
| 5 | 1500 |
| 10 | 1420 |
| 15 | 1320 |
| 20 | 1230 |
| 25 | 1150 |
| 30 | 1050 |

On remarque que plus la teneur en argile augmente plus la réfractarité du sable diminue

III-3-2. Caractérisation de la bentonite

III-3-2-1. Bentonite utilisée :

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) et de celle de Mostaganem (M'zila).

L'Algérienne des fonderies de Tiaret (ALFET) utilise la bentonite de Maghnia.

La bentonite de Maghnia est utilisée notamment comme boue de forage et dans de nombreuses autres applications industrielles.

III-3-2-2. Composition chimique de bentonite

Tableau III. 6 Composition chimique de bentonite de Maghnia

| Composés | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | Na ₂ O | As | PAF |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------|------------------|-------------------|------|-----|
| %massique | 62,4 | 17,33 | 1,2 | 3,56 | 0,8 | 0,81 | 02 | 0,33 | 0,05 | 13 |

III-3-2-3. Analyse physique de bentonite

Tableau III. 7 analyse de H₂O + gonflement

| Échantillon | 1 | 2 | 3 |
|------------------|-------|-------|-------|
| H ₂ O | 11.24 | 11.41 | 11.17 |
| Gonflement | 24.79 | 22.58 | 20.26 |

III-3-3. Caractérisation des mélanges sable-bentonite

III-3-3-1. Caractérisation physico-chimique

Tableau III. 8 Instructions technologique pour sable de contact (quartz)silicate de soude et bentonite

| Composant de la matière à mouler | Masse % | Poids (Kg) | Temps de préparation (Min) |
|----------------------------------|-------------|------------------|----------------------------|
| Sable quartzeux (neuf) | 90.50-92.00 | 1100-1000 | 7 Min |
| Bentonite | 4.0-4.5 | 40-45 | |
| Silicate de soude | 4.5-5.0 | 45(29L) -55(36L) | |
| Total | 100 | / | |

III-3-3-2. Caractéristiques physiques et mécaniques de mélange

Tableau III. 9 Caractéristiques physiques et mécaniques

| Caractéristiques | A vert | Durci au CO ₂ | Fréquence de contrôle |
|--|-----------------------|----------------------------|---|
| Perméabilité aux Gas (unités) | $100 \leq P \leq 280$ | $150 \leq P \leq 380$ | Prélèvement de 2 échantillons minimum à renforcer au besoin |
| Résistance à la compression (N/mm ²) | ≥ 0.030 | $\geq 0.30 \text{ N/mm}^2$ | |
| Humidité % | / | 0.60-2.50 | |

III-3-3-3. Mesure de compressibilité avec l'humidité

Tableau III. 10 Mesure de compressibilité/Humidité

| Taux d'humidité | Résistance à la compression vert | Résistance à la compression-durcis |
|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | | |

| A vert | Durci | | |
|--------|-------|-------|------|
| / | 0.86 | 0.030 | 0.12 |
| / | 1.40 | 0.043 | 0.37 |
| / | 1.70 | 0.044 | 0.21 |
| / | 2.31 | 0.044 | 0.53 |
| / | 2.60 | 0.037 | 0.55 |
| / | 2.90 | 0.033 | 0.65 |

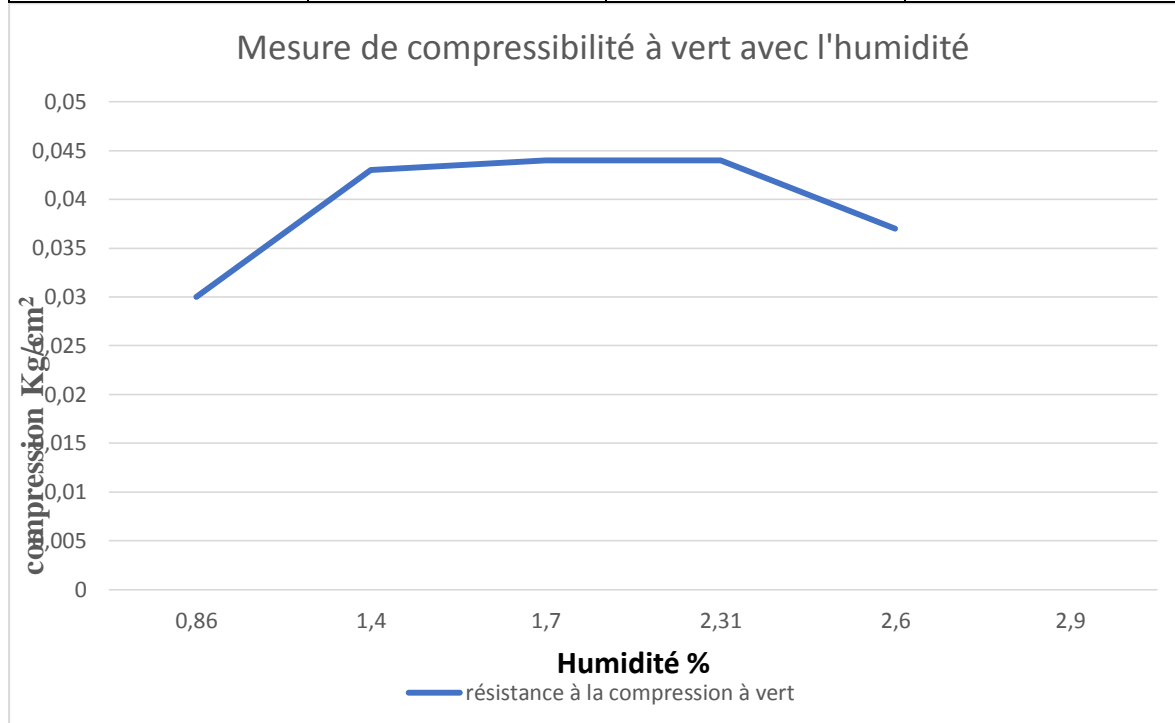


Figure III. 2: compressibilité à vert en fonction de l'humidité

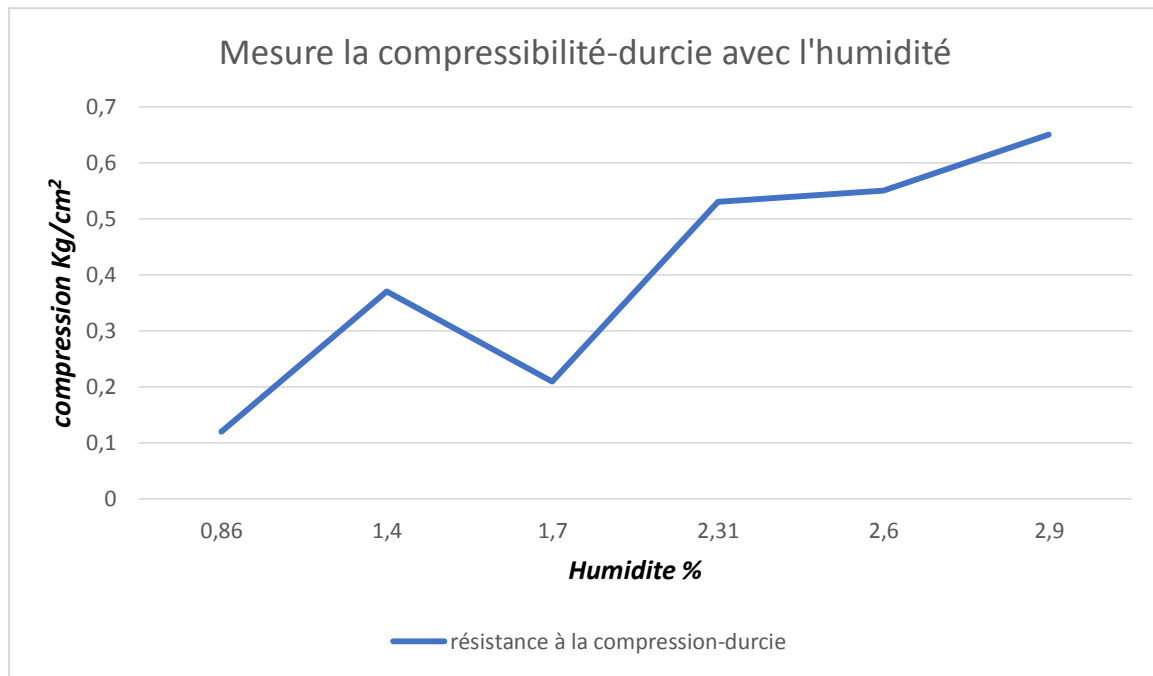


Figure III. 3: Compressibilité-durcie en fonction de l'humidité

III-3-3-4. Mesure de compressibilité avec la perméabilité :

Tableau III. 11 Mesure de résistance à la compression et la perméabilité

| Échantillon | Résistance à la compression | | Perméabilité aux gaz | |
|-------------|-----------------------------|--------|----------------------|--------|
| | À vert | Durcie | À vert | Durcie |
| 1 | 0.033 | 0.65 | 190 | 220 |
| 2 | 0.037 | 0.37 | 205 | 250 |
| 3 | 0.044 | 0.53 | 230 | 290 |
| 4 | 0.043 | 0.12 | 260 | 320 |
| 5 | 0.044 | 0.43 | 270 | 320 |
| 6 | 0.044 | 0.21 | 260 | 340 |

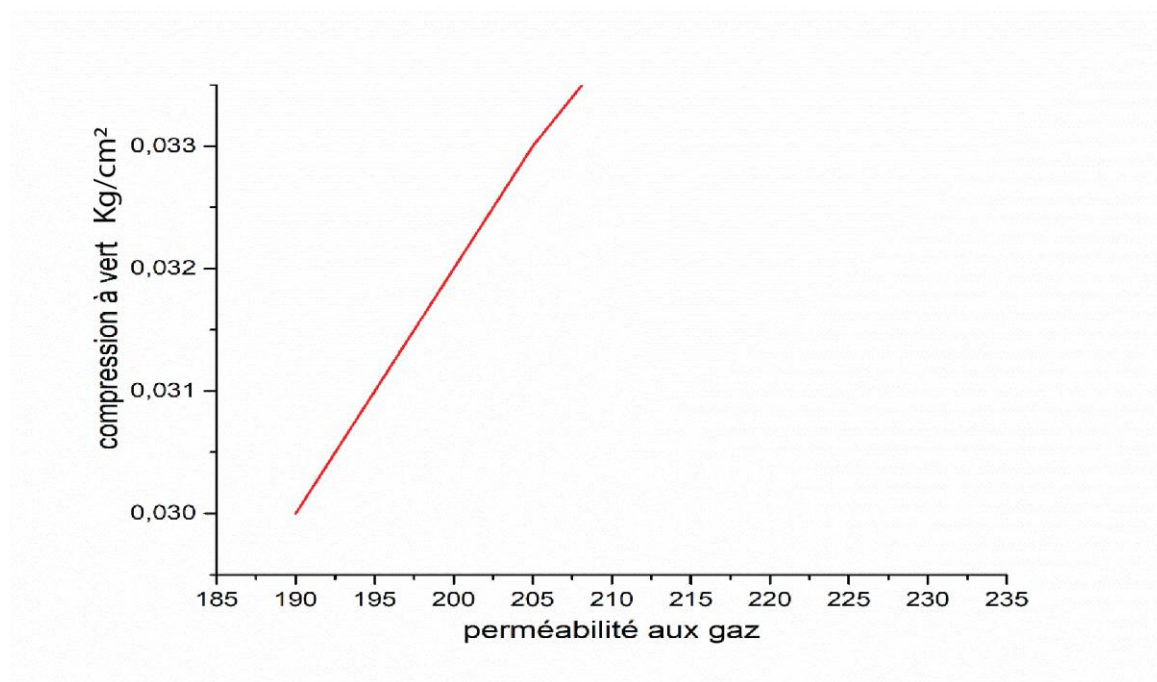


Figure III. 4 Compression à vert en fonction de la perméabilité aux gaz

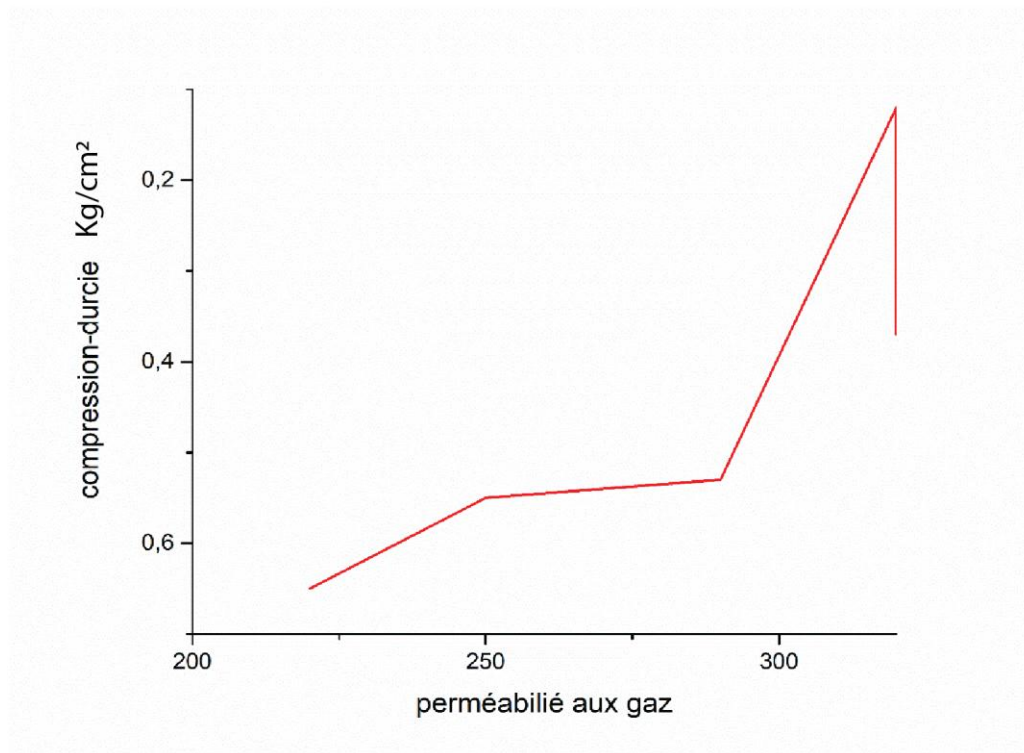


Figure III. 5 Compression-durcie en fonction de la perméabilité aux gaz

Résultats de l'analyse

Dans les figure ci-dessus on remarque que la compressibilité augmente avec la augmentation du taux d'humidité et la perméabilité aux gaz; le taux de compressibilité optimum est à l'alentour de 4% de bentonite dans le sable de silicate de soude elle croît avec le pourcentage d'eau ; la bentonite est une argile gonflante, elle retient une quantité d'eau qui peut aussi intervenir sur la compressibilité ; l'argile recouvre le grain de sable et lui confère une certaine plasticité

III-3-3-5. Mesure de la compressibilité du sable de moulage en fonction de l'humidité

La fonderie de Tiaret utilise d'autre mélange qui est le sable a vert avec bentonite on prendre 3 échantillons qui contiens différents % de bentonite (voir les tab suivants)

Tableau III. 12 7% BENTONITE

| | | | | | | |
|-----------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| Compr. % | 20 | 29 | 34 | 41 | 52 | 63 |
| Hum. % | 1.5 | 2 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.9 |

Tableau III. 13 9%BENTONITE

| | | | | | | |
|-----------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| Compr. % | 14 | 21 | 28 | 32 | 41 | 52 |
| Hum. % | 1.5 | 2 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.9 |

Tableau III. 14 11%BENTONITE

| | | | | | | |
|-----------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| Compr. % | 12 | 14 | 17 | 19 | 25 | 32 |
| Hum. % | 1.5 | 2 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.9 |

On représente les résultats des tableaux sur un histogramme pour les différents taux de bentonite

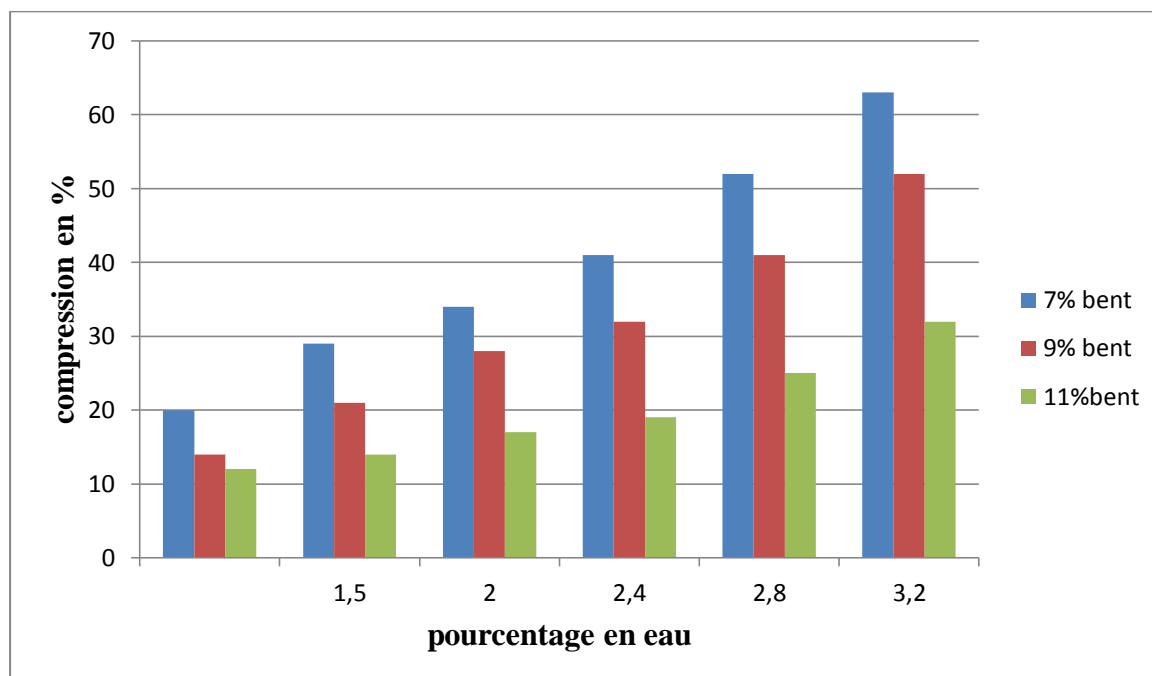


Figure III. 6 . Compressibilité d'un sable de moulage en fonction de la quantité d'eau Pour différents taux de bentonite [18]

Résultats de l'analyse

On remarque que la compressibilité augmente avec la diminution du taux de bentonite dans le sable vert, elle croît avec le pourcentage d'eau ; la bentonite est une argile gonflante, elle retient une quantité d'eau qui peut aussi intervenir sur la compressibilité ; le taux de compressibilité optimum est à l'alentour de 7% de bentonite ; l'argile recouvre le grain de sable et lui confère une certaine plasticité

Conclusion

Le sable est souvent utilisé dans les procédés de moulage, il doit posséder certaines caractéristiques pour permettre et faciliter la réalisation des pièces de fonderie ; il doit posséder une bonne cohésion et garder la forme et les dimensions de l'empreinte après extraction ; avoir une bonne réfractairité et une perméabilité suffisante pour l'évacuation des gaz lors du contact métal en fusion avec le moule.

Les propriétés des sables de moulage sont réglées par certains éléments d'addition (argile, noir minéral, eau) et influent sur les caractéristiques du sable

On remarque que la compressibilité augmente avec la diminution du taux de bentonite, elle croît avec le pourcentage d'eau ; la bentonite est une argile gonflante, elle retient une quantité d'eau qui peut aussi intervenir sur la compressibilité ; le taux de compressibilité optimum est à l'alentour de 7% de bentonite ; l'argile recouvre le grain de sable et lui confère une certaine plasticité

Conclusion générale

Les bentonites sont des matériaux neutres facilement exploitables et peu coûteuses ; elles ont été introduites dans un protocole expérimental pour garantir la plasticité et le gonflement lors du moulage en sable ; ces matériaux n'ont aucun impact sur l'environnement bien au contraire car à partir de leurs propriétés de surfaces, elles peuvent retenir les différentes impuretés et gaz environnants.

Nous avons utilisé dans cette étude une bentonite (argile gonflante) qui agit d'une manière efficace sur la perméabilité aux gaz et la compressibilité. Le taux de bentonite retenu est de l'ordre de 7%.

Entre autre, nous pouvons remarqué que le sable de moulage sous l'action de contraintes thermiques, est plus ou moins dégradé d'une manière intense ce qui influe , sans aucun doute, sur la variabilité de la production ainsi certaines mesures doivent être effectuées pour atteindre les valeurs optimales ; parmi les facteurs d'influence, on peut citer les facteurs physico-chimiques, les durées de vie du sable, les caractéristiques mécaniques sur des éprouvettes normalisées doivent être prises en compte, les paramètres de fabrication tes que (la pression, la température, l'humidité, le temps...) doivent être surveillés.

Il est aussi nécessaire de contrôler régulièrement la qualité des matières utilisées (en fonction des livraisons de sable neuf, d'argile, d'additif carboné, ...).

Références
Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] www.technologuepro.com/cours-moulage/10-generalites-moulage.pdf juin 2021
- [2] KACIMI Amine Etudes caractérisation des sable usés de la fonderie de Tiaret, en vue de leur valorisation,(2009)
- [3] [https://fr.wikioedia.org/wiki/Sable_\(fonderie\)](https://fr.wikioedia.org/wiki/Sable_(fonderie)) juin 2021
- [4]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/techniques-de-moulage-des-metaux> juin 2021
- [5] CHAIRI. A , Sciences Industrielles pour l'ingénieur
- [6] AFGC, "Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants" Association française de génie civil, (2008)
- [7] YAHIA A., TANIMURA M., SHIMOYAMA Y., "Rheological properties of highly flow able mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, Cement and concrete Research, 35(3), pp 532-539, (2005)
- [8] PETERSSON, O., Billberg, P., Van, B.K. A model for self compacting concrete. Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, Paisley, June (1996)
- [9] KHAYAT K.H., "Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials - An overview", Cement and Concrete Composites, 20, pp. 171-188, (1998)
- [10] TURCRY P., "Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation" Thèse de doctorat de l'Université de Nantes-France, (2004)
- [11] KORICHI KARIM Module-ichnologie de moulage.pdf. (web site SCRIBD) Decembre18.2019
- [12] BOUGDAH N. Etude de l'adsorption de micropolluant organique sur la bentonite. Mém. Mag. Univ. Skikda. 2007
- [13] EDDELMANN G. FAVEJEE J C? On the Cristal structure of montmorillonite and hallosite, Ed.Kriste, 1940,102,417
- [14]2.1.Ga.Francevillian. Basin, Gabon, American Jurnal ofScience,vol.318, avril2018,p409-434(DOI10.2475/04.2018.02.
- [15] pdf-module-iechnologie-de-moulagepdf_compress. Pdf. Juin 2021
- [16] AFGC, "Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants" Association française de génie civil, (2008)
- [17]P.JASSON " Sables et matériaux de moulage de fonderie", Technique de l'Ingénieur, M 754-21.

[18]SASSI A. et al. "journées d'études sur les fonderie pour différents taux de bentonite" sidi
Fredj.alger oct.1995

