

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
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

Recherche des facteurs influençant la
perméabilité aux gaz des sables de
moulage à vert

Préparé par : Benseigaa Saad

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

Mme. Makhfi Souad	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr. Sassi Ahmed	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. Aboshighiba Hicham	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. Aissat Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à adresser toute ma gratitude à mon Encadreur le
professeur,*

*Mr "Aissat Sahraoui "Pour avoir orienté et enrichi mon travail. Je le remercie
pour sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son souci du détail, qui ont
abouti à la réalisation de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également aux, Membres du jury pour avoir accepté
d'examiner mon travail.*

*Je souhaite aussi adresser mes remerciements au Corps professoral et
administratif de l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret qui a contribué à la réussite de
mes études universitaires.*

*Je remercie profondément, Ma famille, mes amis ainsi que les personnes qui
m'ont soutenu de près ou de loin au cours de la réalisation de ce mémoire.*

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur les sables de moulage

I.1. Introduction.....	5
I.2. Sable de fonderie	5
I.3. Particularités des sables usés	5
I.3.1. Sable à vert ou à l'argile	6
I.3.2. Sable au silicate de soude	6
I.3.3. Sable au silicate de soude avec bentonite	6
I.3.4. Sable à la résine furanique	6
I.3.5. Sables au ciment	6
I.4. Les sables de fonderie en Algérie	6
I.5. Le moulage au sable	7
I.6. Moulage au sable.....	8
I.6.1. Moulage en sable silico-argileux à vert	8
I.6.2. Moulage et noyautage à prise chimique à froid	9
I.6.3. Le procédé (boite chaude)	9
I.7. Les pièces pour le moulage au sable	10
I.7.1. La fabrication des moules.....	10
I.7.2. Le serrage	10
I.7.3. La coulée	11
I.7.4. Le refroidissement	11
I.7.5. Le démoulage	11
I.7.6. La finition	11
I.8. Les étapes du moulage au sable pour choisir les meilleurs matériaux	12

Chapitre II : Caractéristiques d'un moule en sable

II.1. Introduction	14
II.2. Constituants de base du sable de moulage	14
II.2.1. Silice (sable de base)	14
II.2.2. Argile	15
II.2.3. Produits d'addition (adjuvants)	16

II.2.3.1. Noir minéral	16
II.2.3.2. Farine de bois	16
II.2.3.3. Liants amylicés (du maïs ou de la pomme de terre)	16
II.2.3.4. Huiles minérales et Pétroles	16
II.2.4. Eau (Humidité)	17
II.3. Caractéristiques d'un moule en sable	17
II.3.1. Réfractarité ou Infusibilité (Résistance à la chaleur)	17
II.3.2. Plasticité (Flowability)	17
II.3.3. Cohésion	17
II.3.4. Conductivité thermique	17
II.3.5. Rigidité	18
II.3.6. Perméabilité	18
II.3.7. Autres propriétés	18
II.4. Méthodes de contrôle et d'inspection des sables de moulage	18
II.4.1. Analyse granulométrique	19
II.4.2. Dosage de l'humidité	19
II.4.3. Essai de Perméabilité	18
II.4.4. Essai de compression et de cisaillement (Cohésion à vert)	20
II.4.5. Flowability (aptitude de serrage)	21
II.4.6. Densité en vrac ou Masse volumique	21
II.4.7. Réfractarité	22
II.4.8. Essai de traction	22
II.4.9. Essai de dureté	22
II.4.10. Autres essais	22

Chapitre III : Modélisation de la perméabilité aux gaz du sable de moulage à vert

III.1. Préparation du sable de moulage	24
III.2. Composition des mélanges	25
III.3. Préparation des mélanges	25
III.4. Essai de perméabilité	26
III.4.1. Confection des éprouvettes pour l'essai de perméabilité	26
III.4.2. Réalisation de l'essai de perméabilité	28
III.4.3. Résultats de l'essai de perméabilité	28
III.5. Analyse statistique des résultats	29

III.5.1. Plan d'expériences (DOE) adopté	29
III.5.2. Valeurs de réponse (résultats expérimentaux de la perméabilité)	30
III.5.3. Tableau des résultats expérimentaux	30
III.5.4. Analyse de la variance	31
III.5.5. Equation de régression (modèle de perméabilité)	32
III.6. Diagrammes factoriels pour la perméabilité	34
III.7. Prédiction de la réponse (perméabilité)	35
III.8. Comparaison entre divers plans d'expériences	36
III.9. Conclusion	36
Conclusion générale.....	39
Bibliographie.....	41
Résumé	

Abréviations

DOE : Desing of experience.

R² : Coefficient de détermination

R : Coefficient de corrélation

DL : Le nombre total de degrés de liberté (DL)

Som Car ajust : Les sommes des carrés ajustées des prédictors dans le modèle n'a aucun effet sur le calcul des sommes des carrés.

CM ajust : Les carrés moyens ajustés

Valeur F : Valeur F du test d'inadéquation de l'ajustement.

Valeur de P : La valeur de P est la probabilité qui mesure le degré de certitude avec lequel il est possible d'invalider l'hypothèse nulle.

Valeur S : Le degré de liberté des statistiques.

H : Humidité.

B : Bentonite.

Liste des tableaux

- **Tableau I.1** : Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie.
- **Tableau. III.1** : Facteurs et niveaux (réels et codés) considérés.
- **Tableau. III.2** : Résultats des essais de perméabilité.
- **Tableau. III.3** : Ordres essais de perméabilité.
- **Tableau. III.4** : Analyse de la variance (ANOVA) des résultats expérimentaux.
- **Tableau. III.5** : Récapitulatif du modèle.
- **Tableau. III.6** : Valeurs expérimentales, prédites et résidus de la perméabilité.
- **Tableau. III.7** : Valeurs prédites de la perméabilité.
- **Tableau. III.8** : Valeurs prédites de la perméabilité.

Liste des figures

- **Figure. I.1** : Moule au sable.
- **Figure. I.2** : les pièces pour moulage au fer et acier.
- **Figure.I.3** : les moules au sable.
- **Figure.III.1** : Eprouvette normalisée.
- **Figure.III.2** : Résultats expérimentaux de la perméabilité
- **Figure.III.3** : Valeurs résiduelles de la perméabilité
- **Figure. III.4** : Effets principaux pour la perméabilité moyenne
- **Figure. III.5** : Interactions entre les facteurs pour la perméabilité moyenne
- **Photo II.1** : Tamiseur pour l'analyse granulométrique.
- **Photo II.2** : Perméamétrie pour mesurer la perméabilité.
- **Photo II.3.** Appareil utilisé pour mesurer la résistance à la compression, au cisaillement et à la traction.
- **Photo II.4.** Duromètre utilisé pour mesurer la dureté d'un moule.
- **Photo III.1** : Four d'étuvage utilisé pour le séchage du sable.
- **Photo III.2** : Broyeur - frotteur utilisé pour le travail des mélanges.
- **Photo III.3** : Tubes d'éprouvettes.
- **Photo III.4** : Damoir utilisé pour la confection des éprouvettes.
- **Photo III.5** : Perméamètre pour mesurer la perméabilité.

Introduction Générale

Le moulage en sable utilise un matériau réfractaire qui se présente sous la forme de petits grains, on peut donc, lui donner la forme que l'on veut, et figer cette forme avec un additif. Cela se fait un matériau de choix pour la conception de moules ; cependant, c'est un moule à usage unique, mais que l'on peut fabriquer facilement de manière répétée.

Il y a plusieurs types de sable de moulage tels que : le sable à vert, le sable au silicate de soude et le sable furanique.

Le sable de moulage à vert est constitué de sable de silice, de bentonite, de noir minérale et d'eau. Ces additifs influent considérablement sur les propriétés mécaniques de ce dernier telles que la résistance à la compression, la résistance au cisaillement et la perméabilité aux gaz du moule.

Au cours des dernières années, de nombreuses études ont été menées pour identifier les valeurs optimales de ces influents à l'aide de diverses techniques. Chacun de ces facteurs joue un rôle important respectivement pour réduire et contrôler les défauts dans les pièces moulées, où des défauts peuvent apparaître lorsque l'un quelconque des composants est hors de la valeur optimale. Les paramètres optimaux peuvent être déterminés comme la meilleure composition des paramètres de processus qui produisent la réponse souhaitée, qui est la bonne qualité des pièces moulées en utilisant la conception par les plans d'expériences.

La méthode de Taguchi, l'approche de la méthodologie de surface de réponse (RSM) et la conception composite centrale sont des exemples de plans d'expériences qui ont été appliquées pour déterminer l'effet des facteurs de prédominance tels que la bentonite, l'eau et le temps de malaxage sur les propriétés d'utilisation du sable.

Le présent travail porte sur l'application de la méthode des plans d'expériences et en particulier les plans factoriels complets à l'étude et à l'optimisation de la perméabilité aux gaz.

Nous présentons tout d'abord les résultats de la perméabilité en fonction de la teneur en bentonite et le taux d'humidité. Nous déterminons, ensuite les facteurs les plus influents sur la réponse (perméabilité) en exploitant les courbes de la perméabilité obtenues.

Dans cette étude nous considérons un plan factoriel complet de 2 facteurs à trois niveaux. Les facteurs retenus pour cette étude sont le taux d'humidité et de bentonite.

Un modèle mathématique reliant la réponse (perméabilité) aux effets principaux et aux interactions est obtenu dans ce travail en utilisant le logiciel Minitab 19.

Le travail mené pour la mise en œuvre de ce mémoire sera subdivisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les sables de moulage, nous évoquons les caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie, les procédés de moulage en sable, les étapes pour la réalisation d'un moule en sable et nous terminons ce chapitre par des exemples de pièces obtenues par moulage.

Le deuxième chapitre traite les constituants de base du sable de moulage, les caractéristiques que doit avoir un moule fabriqué en sable et les méthodes utilisées pour le contrôle et l'inspection des sables de moulage.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les étapes de réalisation des essais de perméabilité, les résultats expérimentaux de ces essais et une analyse statistique de ces résultats est menée à la fin de ce chapitre en utilisant un plan factoriel complet de 2 facteurs à trois niveaux.

Enfin ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

***Chapitre I : Généralités sur les
sables de moulage***

I.1. Introduction

Des tonnages considérables de sable sont utilisés par l'industrie de la fonderie pour la confection des moules et des noyaux. Ces tonnages sont estimés globalement de 5 à 10 fois le volume des pièces produites. 90 % du sable brûlé après la coulée du métal liquide 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.

Les sables de moulage (ou de fonderie) 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.

Différents procédés de moulage en sable sont utilisés pour la fabrication 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.

Ce chapitre sera consacré à l'étude des sables de fonderie et ceux utilisés en Algérie, ainsi qu'à l'étude de leurs caractéristiques. Les procédés du moulage en sable, ces étapes et les pièces obtenues par ce procédé sont évoqués dans la suite de ce chapitre.

I.2. Sable de fonderie

Le sable de fonderie lié avec des matériaux naturels (bentonite, sable à verts) ou des résines chimiques (sables à prise chimique), est utilisé pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion. Ce procédé de moulage en 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 résiduels nommés également sables rejetés ou vieux sable doivent être éliminés [1].

Le sable de fonderie est un sable propre, de granulométrie uniforme, ayant une haute qualité qui est lié par un liant pour former des moules afin de couler des pièces en métal ferreux ou non ferreux [1].

I.3. Les sables de fonderie en Algérie [2]

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 :

1.3.1. 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.

1.3.2. 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.

1.3.3. 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 mais on ajoute de la bentonite (4 % à 4.5 %) pour améliorer l'état de surface des pièces.

1.3.4. 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 durcit 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.

1.3.5. 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.

I.4. Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie [3]

Pour le moulage en sable, il existe plusieurs types de sables: si la silice est le plus répandu de par son faible coût, on trouve également d'autres sables aux caractéristiques variées et adaptées au type de pièces (matériau, forme et résistance), ainsi il est fréquent de trouver des sables complexes types chromite, zircon ou kerphalite.

Les caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie, peuvent être résumées dans le tableau I.1.

	Chromite	Kerphalite	Olivine	Silice	Zircon
Prix	élevé	élevé	moyen	faible	élevé
Densité	4.5	3.1	3.5	2.6	4.5
T°C Fusion	2100 °C	1850°C	1850°C	1725°C	2300°C
Compatibilité résine	haute	haute	moyenne	très haute	très haute

Tableau. I.1 : Caractéristiques des différents sables utilisés en fonderie

➤ **Le choix d'un sable est déterminé par** [3]

- Son coût: la silice a le meilleur taux de rentabilité,
- Son rapport technique: on peut par exemple conclure que la silice a une température de fusion assez faible par rapport aux autres sables, on ne l'utilisera pas pour des applications nécessitant de très bonnes caractéristiques mécaniques.

Le "sable" comporte également des liants qui lui donnent sa plasticité (caractéristique du sable à épouser les formes du modèle et à les conserver après la solidification du métal). Ces liants doivent réduire au maximum les réactions entre le métal et le moule qui sont les facteurs de risque les plus sensibles. Les liants sont soit minéraux (argile, plâtre, ciment, ...) soit organiques (résines synthétiques, huiles siccatives, ...). D'autres produits entrent dans la composition du sable comme les agents de démoulage ou les enduits destinés à faciliter d'extraire les pièces de leurs moules.

I.5. Le moulage en sable [4]

Le moulage en sable est un processus par lequel un matériau réfractaire est façonné dans un moule qui forme une cavité d'une forme spécifique de telle sorte que le métal fondu peut alors être versé dans la cavité. La cavité du moule doit conserver sa forme jusqu'à ce que le métal soit solidifié et que la pièce soit retirée. Il convient pour des matériaux de fonderie dont le point de fusion est élevé type fonte et acier.

Les caractéristiques du moule varient en complexité en fonction du type de métal utilisé. Le prototypage rapide est souvent utilisé avec le moulage en sable pour produire une pièce moulée pour tester la forme, l'ajustement et le fonctionnement. Cette pièce ou prototype coulé permet de déterminer les propriétés finales approximatives des pièces réelles moulées. Dans le moulage en sable, des pièces générées par prototypage rapide peuvent être utilisées comme modèles pour fabriquer un moule en sable. Les procédés de prototypage rapide qui utilisent un matériau similaire à du bois tel que le polystyrène sont communs. Les moules de coulée en sable sont créés en une fraction du temps et fixés sur le panneau de modèle par le fabricant du moulage de sable avant que du sable soit pressé autour de la moitié pour créer un moule en creux.

Le moule comporte les châssis qui contiennent le sable, le sable plus ses additifs, l'empreinte créée à partir du modèle ou de plaque modèle et de noyaux (Fig. I.1). Le moulage en sable présente les avantages suivants :

- Faibles coûts d'outillage et faible investissement en capital.
- Les cœurs permettent une grande variété de formes à mouler.
- Approprié pour les pièces de grande taille.
- Des économies substantielles pour les moulages à usage unique utilisant du polystyrène.



Fig. I.1 : Moule au sable

I.6. Procédés de moulage en sable

I.6.1. Moulage en sable silico-argileux à vert

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, l'agglomérant utilisé pour la confection du moule est une argile, de type bentonite le plus souvent. 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.

Le procédé de moulage en sable silico-argileux à vert ne peut pas s'appliquer aux pièces massives et de grandes dimensions. En effet, quelles que soient les pressions de serrage, la résistance de ce matériau à la pression ferrostatique et aux efforts dynamiques de l'acier lors de la coulée est limitée [5].

1.6.2. Moulage et noyautage à prise chimique à froid

Dans ces procédés de moulage et de noyautage par prise chimique à froid, plus récents que le moulage en sable à vert, le moule (le plus souvent en sable siliceux) est aggloméré par des liants organiques ou minéraux qui durcissent à la température ambiante, en présence d'agents de prise (catalyseur, durcisseur liquide, accélérateur de prise...) préalablement additionnés au sable. La confection de leurs mélanges s'effectue, selon les quantités de sable nécessaires, dans des malaxeurs continus ou discontinus. Le sable ainsi préparé n'a aucune cohésion au moment de sa mise en œuvre.

Dans certains cas particuliers (aciers au manganèse par exemple) et le plus souvent en application locale seulement (sable au contact du modèle ou des boîtes à noyaux), le sable siliceux est remplacé par un sable présentant des caractéristiques physiques mieux appropriées (réfractarité, conductivité thermique...). Parmi les sables de contact les plus employés, on trouve les sables de chromite, de zircon, de chamotte, à l'olivine. De nombreux procédés autodurcissants existent : les résines phénoliques, les résines polyuréthanes (PepSet, Pentex,...), les phénolates alcalin-ester (Alphaset ...), les résines furaniques, les résines alkydes ou le silicate de soude-ester [5].

1.6.3. Le procédé (boîte chaude) [5]

Le procédé « boîte chaude » ne s'applique qu'à la fabrication de noyaux. Ces derniers sont tirés ou soufflés sur des machines à noyauter, dans un outillage métallique chauffé à une température inférieure à celle du procédé Croningou (carapace-sable «shellmoulding» en anglais) est un procédé à prise thermique. La prise thermique du sable s'effectue au contact de la boîte, dont la température se situe entre 220 et 280°C. Il existe de nombreuses combinaisons de résines de base, constituant le liant. Mais seules les résines phénoliques (aciers à bas carbone) et les résines phénol-formol-alcool furfurylique, qui ne contiennent pas d'azote, conviennent aux aciers. La nature du catalyseur utilisé (à base d'acide borique, sulfonique ou sulfurique...) dépend du système liant retenu. Certains adjuvants, comme l'oxyde de fer (amagnétique rouge « hématite » Fe_2O_3 ou magnétique noir « magnétite » Fe_3O_4) peuvent être incorporés au sable pour en améliorer les propriétés, et notamment éviter l'apparition de piqûres et de défauts d'abreuvement sur les pièces. La nécessité d'utiliser dans ce procédé un outillage métallique implique la fabrication de pièces de série. En conséquence, les noyaux sont le plus souvent remmoulés dans des moules en sable silico-argileux à vert, serrés sur des machines à mouler, et destinés à la production de pièces dont le poids varie de quelques kilogrammes à plus de 100 kg. Globalement c'est un procédé fiable, de mise en œuvre facile, donnant des pièces de haut niveau de qualité.

I.7. Etapes du moulage en sable

Le moulage en sable est l'un des plus anciens processus métallurgiques et reste l'un des plus populaires à ce jour. Lorsque le processus de moulage en sable est utilisé, il est important de choisir les bons matériaux. Les matériaux que vous choisirez dépendront en grande partie de la taille de la pièce, de l'usage auquel celle-ci est destinée et des coûts associés aux matériaux disponibles. Lorsque vous choisissez votre matériel, il est utile de comprendre le processus. Nous décrivons brièvement les six principales étapes du processus de moulage en sable ci-dessous :

I.7.1. La fabrication des moules [4]

La première partie consiste à concevoir et préparer les moules. Les moules sont faits de sable compacté à l'intérieur d'un châssis (Fig. I.2) selon un modèle (qui suit la forme extérieure de votre pièce). La conception d'un moule de sable peut être très simple ou très complexe, selon les spécifications du projet. Il y a souvent des composantes conçues pour prendre place à l'intérieur d'une pièce ou des noyaux uniques caractéristiques à la coulée. Le temps requis pour concevoir et préparer les moules dépend de la complexité de la pièce. Les moules sont souvent chauffés ou cuits au four avant l'ajout des métaux en fusion.



Fig. I.2 : Les moules en sable

I.7.2. Le serrage

Une fois que le moule en sable est fait et préparé, il est temps d'ajouter le métal fondu. À ce stade, un lubrifiant est ajouté afin de faciliter le retrait de la coulée finale. Une fois lubrifié, des carottes sont ajoutées au moule, mises en place et fixées. Le moule est mis en serres très étroitement pour s'assurer qu'aucune matière ne puisse s'en échapper.

1.7.3. La coulée

La coulée est assez simple ; le métal fondu est coulé dans le moule de sable. Le métal fondu doit être maintenu à une température constante et versé adéquatement pour remplir le moule et tous ses coins et recoins. La durée du remplissage est généralement assez rapide, car la température peut chuter rapidement, causant ainsi la solidification d'une ou plusieurs parties du moule avant les autres.

1.7.4. Le refroidissement

Le refroidissement est une étape importante pour la qualité de la finition de la coulée. Selon l'épaisseur de la pièce et la température de la matière, le temps de refroidissement peut varier. Il est important d'assurer un refroidissement complet et adéquat, puisque celui-ci affectera la qualité du produit fini. Un refroidissement trop rapide peut entraîner un rétrécissement des pièces, des fissures ou des pièces incomplètes; il est donc essentiel d'avoir un environnement de refroidissement contrôlé.

1.7.5. Le démoulage

Retirer la pièce coulée du moule se fait généralement en brisant le moule. Ce processus s'appelle « shakeout » et est habituellement fait à l'aide d'une machine spéciale qui vibre et enlève le sable et les systèmes de coulée du moule. Une fois enlevé, la pièce est souvent grenillée pour enlever toute oxydation ou sable sur la surface externe.

1.7.6. La finition

Parce qu'il existe des canaux à l'intérieur du moule, il y aura du matériel excédentaire rattaché à la pièce finie qu'il faut enlever. À l'aide d'une presse de parage, d'une scie ou d'autres méthodes de coupe, tout matériel supplémentaire pourra être enlevé. Selon le type de coulée, cela peut être très rapide ou prendre plus de temps.

I.8. Pièces fabriquées par moulage en sable

Le moulage en sable convient pour des pièces plus grandes avec des formes complexes. Ces composants se rencontrent dans une grande variété d'industries parmi lesquelles la production de ciment, l'exploitation minière, la transformation des métaux ou la production d'énergie. Les pièces moulées sont d'une qualité supérieure et comprenant (Fig.I.3) :

- Des grilles de refroidissement, doublures de moulin, manèges et rouleaux de poussée (industrie du ciment).
- Des bagues en bronze (la plupart des industries).
- Des têtes, tourillons et engrenages (industrie minière).
- Des rotors, boîtiers de roulement et têtes de sècheuse (Industrie du papier et pâte à papier).
- Des boîtes d'engrenage, accouplements et pignons (Production d'énergie).
- Des wagonnets complets de granulés (Industrie de la granule).
- Des tambours enrouleurs (industrie sidérurgique).
- Des turbines et soupapes (Industrie hydraulique) [4].



Fig.I. 3 : Pièces obtenues par moulage en sable

***Chapitre II : Caractéristiques
d'un moule en sable***

II.1. Introduction

Le moulage en sable est un processus de fabrication polyvalent et couramment utilisé dans l'industrie du moulage des métaux. Les constituants essentiels du procédé de moulage en sable sont le sable de silice, la poudre de charbon et la poudre d'argile (bentonite), tandis que l'eau joue un rôle important dans la réduction et le contrôle des défauts dans les pièces moulées [6]. Cependant, le sable de silice ne convient pas pour être utilisé seul à des fins de moulage car il n'a pas de propriétés liantes. Par conséquent, le sable de silice doit être composé de bentonite et d'autres constituants pour obtenir la propriété de liaison. La bentonite agit comme un liant dans le sable à vert et confère cohésion et résistance au sable pour maintenir la forme de la cavité du moule après le retrait du motif. En mélangeant à la fois des bentonites de calcium et de sodium, une résistance favorable du sable à vert dans toutes les phases du processus de coulée peut être obtenue et le mélange est maintenu pour être compatible avec d'autres composants du sable à vert. La poussière de charbon est un élément clé du sable à vert pour améliorer la finition de surface [6].

Donc, quatre paramètres sont impliqués dans la confection des moules en sable à vert, qui sont la bentonite, la poussière de charbon, le sable de silice et l'eau. Chacun d'eux joue un rôle important respectivement pour réduire et contrôler les défauts dans les pièces moulées, où des défauts peuvent apparaître lorsque l'un quelconque des composants est hors de la valeur optimale.

II.2. Constituants de base du sable de moulage

Un sable de fonderie est composé de nombreux matériaux et produits dont les plus importants sont cités ci-après :

II.2.1. Silice (sable de base)

Chimiquement, c'est un bioxyde de silicium (SiO_2), elle est très répandue dans la nature et plus spécialement sa variété allotropique, le quartz α , très réfractaire, très dure raye le verre et très abrasive.

Les "fines" de silice ; particules très fines de 0.001mm à 0.02mm, n'ont aucun pouvoir liant, il y a intérêt à ce que leur pourcentage dans les sables soit toujours inférieur à 1% (diminution de la perméabilité).

La silice se dilate lentement, jusqu'à 200°C, et fortement à 575°C, ce qui entraîne des ruptures de moules. Elle possède une faible conductivité thermique.

II.2.2. Argile

Elle constitue le liant qui réunit les grains de silice entre eux. C'est un oxyde d'aluminium hydraté (Al_2O_3), très abondante dans la nature, se présente sous forme de paillettes très fines (0.001mm), blanchâtres, colorée par des oxydes métalliques ; très réfractaire.

L'argile contient de l'eau de constitution qui entre dans la formule chimique et qu'il ne faut pas confondre avec l'eau d'apport.

A mesure que l'on ajoute de l'eau, l'argile se transforme en une pâte qui présente des caractéristiques notoires de plasticité, et confère au sable sa cohésion à vert.

Avec des additions d'eau supplémentaires, la plasticité diminue jusqu'à la limite de liquidité.

Enfin, en présence de quantités d'eau très importantes, certaines argiles sont susceptibles de gonfler et de former des gels.

A plus haute température, vers 900-1000°C, l'argile subit un réarrangement structural, elle se cristallise en un réseau tridimensionnel et se transforme en chamotte.

Les argiles utilisées en fonderie appartiennent à deux espèces minéralogiques distinctes :

- **Les argiles réfractaires (les Kaolinites)**

De formule générale $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$, leur particule élémentaire à une structure en feuillet composée d'une couche de silice et d'une couche d'alumine.

Ces argiles ont un pouvoir liant moins élevé, un gonflement nul et confèrent aux sables une cohésion à vert faible, mais, en revanche, elles supportent mieux l'étuvage et présentent une cohésion à haute température plus élevée.

- **Les argiles colloïdales (les bentonites)**

De formule générale $4\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$, leur particule élémentaire est composée d'une couche d'alumine interposée entre deux couches de silice

Ces argiles sont constituées d'éléments très fins, elles ont un très grand pouvoir agglutinant, mais elles sont très sensibles aux variations d'humidité, qui entraîne des variations très rapides de la cohésion. Elles présentent une très bonne résistance à chaud, mais le maximum se situe à des températures inférieures à 900°C, au-delà la cohésion chute rapidement.

On distingue :

- **Les bentonites sodiques** : présentent des caractéristiques de plasticité et de gonflement élevées ; ainsi qu'une meilleure résistance thermique ; si leur cohésion à vert est moyenne, leur cohésion à sec et à chaud est élevée, au prix toutefois d'une réfractarité faible. En outre les bentonites sodiques peuvent admettre un taux d'humidité plus élevé ; la vaporisation de l'eau est plus importante au moment de la coulée, que pour les bentonites calciques.

– **Les bentonites calciques** : elles présentent un gonflement moyen, elles confèrent aux sables une cohésion à vert élevée, mais une cohésion à sec moyenne et une cohésion à chaud faible ; leur réfractairité est moyenne.

II.2.3. Produits d'addition (adjuvants)

Ces produits sont sans pouvoir liant, ils sont ajoutés volontairement pour améliorer l'aspect des pièces et éviter certains défauts.

II.2.3.1. Noir minéral

C'est un charbon gras finement pulvérisé, à haute teneur en matières volatiles (supérieure à 30%), il présente des teneurs en cendres inférieures à 10% et en soufre inférieur à 1%. Il augmente les besoins en eau du sable, par conséquent augmente l'effet endothermique de la vaporisation.

La distillation des constituants volatiles à une température supérieure à celle de la vaporisation de l'eau, augmente et prolonge l'effet endothermique. Le ramollissement du noir minéral dans le domaine des hautes températures amorti la dilatation du quartz de la silice.

Le noir minéral améliore l'aspect des pièces, il est présent dans le sable aux taux de 2 à 7%.

II.2.3.2. Farine de bois

Elle est additionnée au sable à des taux de 0.5 à 1%, sa combustion laisse des vides qui facilitent la dilatation des grains de silice et augmente ainsi la perméabilité, par contre elle rend le sable moins compact et diminue son aptitude au serrage (flowability).

II.2.3.3. Liants amylacés (du maïs ou de la pomme de terre)

Leur addition est souvent nécessaire pour faciliter la destruction des moules et des noyaux après la coulée, ils limitent le dessèchement rapide du sable de moulage et accroissent sa flowability. Ils sont admis à des taux de 1 à 2%.

II.2.3.4. Huiles minérales et Pétroles

L'incorporation de ces produits, permet de lutter contre la tendance de certains sables à adhérer aux modèles.

II.2.4. Eau(Humidité)

L'eau d'apport ou l'humidité provoque un gonflement de l'argile au tour du grain de silice qui s'accompagne d'une augmentation de la cohésion. Ca qualité n'est pas en général contrôlée.

II.3. Caractéristiques d'un moule en sable [7]

L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, contenant l'empreinte en négatif de la pièce. Cette empreinte est obtenue à partir d'un modèle reproduisant la pièce à fabriquer. Pour la fabrication de ce moule, la fonderie utilise du sable de moulage qui doit satisfaire les exigences fondamentales suivantes :

II.3.1. Réfractarité ou Infusibilité (Résistance à la chaleur)

C'est une propriété des sables à ne pas se dégrader sous l'action brutale du métal liquide, c'est à dire de ne pas fondre, de pouvoir encaisser la dilatation de ses constituants et d'avoir une bonne cohésion à chaud.

II.3.2. Plasticité (Flowability)

C'est l'aptitude du sable au serrage sous une pression déterminée, qui permet à ce dernier de prendre correctement la forme du modèle.

II.3.3. Cohésion

Propriété d'un sable à présenter après serrage, une résistance suffisante pour conserver l'empreinte du modèle après enlèvement de ce dernier sous une pression statique ainsi que sous une pression dynamique du métal en fusion pendant la coulée jusqu'à la solidification.

La valeur de la cohésion est donnée par la résistance à la compression et la résistance au cisaillement du sable.

II.3.4. Conductivité thermique

Cette propriété influe considérablement sur la vitesse de refroidissement du métal coulé dans le moule et donc sur sa structure ; c'est ainsi qu'un métal refroidi rapidement a tendance à favoriser la formation de la cémentite dans la fonte blanche dont les propriétés d'usinage sont médiocres. C'est pourquoi pour réduire la conductibilité thermique lors de la fabrication de grosses pièces de fonte et d'acier, on est obligé souvent de sécher le moule par l'addition d'huile concentrée assurant ainsi une certaine diminution de la conductibilité thermique. Pour les petites pièces, on utilise plutôt le noir minéral dans la composition du sable de moulage.

Cependant il est nécessaire de tenir compte des réactions liées au contact moule-métal engendrant des défauts tels que bavures, flocons et gales, etc.

II.3.5. Rigidité

Lors du coulage d'une pièce moulée, le sable adjacent au métal chaud perd rapidement son eau sous forme de vapeur. Le sable sec doit avoir une résistance à l'érosion, ainsi qu'à la pression métallo-statique du métal fondu, sinon le moule peut s'agrandir.

II.3.6. Perméabilité

Qui est l'aptitude du sable à se laisser traverser par les gaz au moment de la coulée.

II.3.7. Autres propriétés

- ***Absence de réactions moule - métal***, susceptibles de créer des défauts d'inclusion solides ou gazeuses dans le métal (de types piqûres ou soufflures) ;
- ***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 ;
- ***Absence d'émissions toxiques***, (solides ou vapeurs) lors de la mise en œuvre ;
- ***Possibilité de recyclage des matériaux***;
- ***Possibilité de mise en décharge des matériaux non recyclables***, sans risque de pollution des nappes phréatiques.

II.4. Méthodes de contrôle et d'inspection des sables de moulage

Certains contrôles simples et faciles peuvent être réalisés au niveau de la préparation permettant de donner des indications chiffrées, sur l'évolution de la qualité du sable de moulage. Ces indications permettent immédiatement de corriger les ajouts eau et bentonite pour assurer au sable une aptitude au moulage correcte.

II.4.1. Analyse granulométrique

La granulométrie d'un sable exprime la répartition en pourcentage des grains de différentes grosseurs. La répartition granulométrique est effectuée par un tamisage sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres et dont le diamètre d'ouverture de mailles va en décroissant du haut vers le bas. Ces tamis sont montés sur un appareil vibrant (vibreux) [photo II.1].



Photo II.1 : Tamiseur pour l'analyse granulométrique

Après tamisage, on pèse le résidu trouvé sur chaque tamis et sur la coupelle du fond. La répartition granulométrique, ainsi déterminée, peut alors être mise sous la forme d'histogrammes représentant le résidu (le refus) recueilli sur chaque tamis en fonction de l'ouverture des mailles.

II.4.2. Dosage de l'humidité

Le dosage de l'eau est important pour certains procédés d'agglomération qui exigent des sables de siccité complète. Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer le taux d'humidité.

- par étuvage, qui consiste à mesurer la perte de poids par séchage de l'échantillon de sable à l'étuve à basse température (105-110°C), pendant deux heures.
- par séchage, par air chaud, par infrarouge ou par micro-ondes, qui sont des procédés plus rapides, mais moins précis.
- bombe Speedy ; l'opération consiste à mettre dans une bombe hermétique, le sable humide, préalablement pesé, avec une dose surabondante de carbure de calcium. Ce carbure agit sur l'eau du sable pour former de l'acétylène dont la quantité produite est proportionnelle à la teneur en humidité. Il suffit de mesurer la pression de l'acétylène au moyen d'un manomètre qui est directement gradué en pourcentage d'humidité.

II.4.3. Essai de Perméabilité

La chaleur dégagée par la pièce moulée provoque le développement d'une grande quantité de vapeur et d'autres gaz dans un moule en sable à vert. Le moule doit être perméable, c'est-à-dire poreux, pour permettre aux gaz de passer, ou le moulage contiendra des trous de gaz (soufflures ou piqûres) [8].

Le nombre de perméabilité P peut être trouvé mathématiquement, par la formule donnée ci-dessous:

$$P = \frac{v \cdot h}{p \cdot a \cdot t}$$

P = numéro de perméabilité à déterminer.

v = volume d'air traversant l'échantillon en cm^3 .

h = hauteur de l'échantillon en cm (5,08 cm).

p = pression de l'air en g / cm^2 (10 g / cm^2).

a = surface de la section transversale de l'échantillon en cm^2 . (Une valeur standard de 20,26 cm^2 est généralement adoptée).

t = temps de passage de l'air en minutes.

La détermination de la perméabilité aux gaz du sable de moulage préparé est effectuée à l'aide d'un perméamétrie du type L.P.I.R-1 représenté sur la (Photo II.2) afin de déterminer la capacité de ce sable à l'évacuation des gaz du moule.

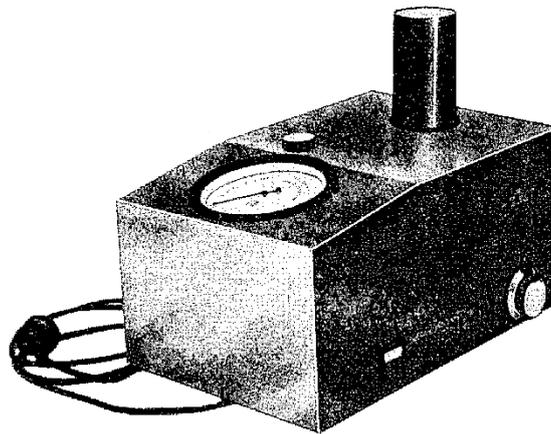


Photo II.2 : Perméamètre pour mesurer la perméabilité.

II.4.4. Essai de compression et de cisaillement (Cohésion à vert)

Ces essais se pratiquent avec des appareils spéciaux (Photo III.3), sur des éprouvettes normalisées utilisées pour l'essai de perméabilité (diamètre 50 mm, hauteur 50 mm).

La valeur de la cohésion est appréciée par la résistance à la compression et la résistance au cisaillement. Le rapport de la résistance à la compression à la résistance au cisaillement varie de 4 à 3. Les cohésions sont exprimées en Kg/cm^2 ou en N/cm^2 .

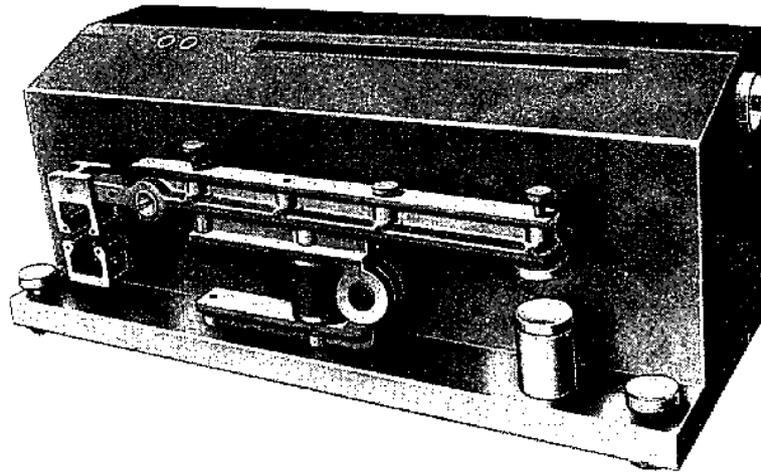


Photo II.3.Appareil utilisé pour mesurer la résistance à la compression, au cisaillement et à la traction

II.4.5. Flowability (aptitude de serrage)

Elle correspond à la diminution de hauteur exprimée en millième de pouce (0.0254mm) de l'éprouvette normalisée (obtenue par trois coups de fouloir) entre le quatrième et le cinquième coup de fouloir.

Si la diminution de la hauteur est n millièmes de pouce ($n / 1000$), l'indice de Flowability est : $100 - n$. On utilise un comparateur gradué en millièmes de pouce, que l'on règle à 100 après le quatrième coup de fouloir.

Il est évident que si le sable à une bonne aptitude au serrage, les quatre premiers coups de fouloir auront assurés un serrage efficace, l'affaissement produit par le cinquième coup sera faible (5/1000 de pouce par exemple) et la Flowability s'exprimera par un nombre proche de 100 (qui est par exemple $100 - 5$ soit 95). Au contraire, si le sable possède une mauvaise aptitude au serrage, ce sable aura été mal serré par les quatre premiers coups de fouloir, le cinquième produira un serrage encore appréciable qui se traduit par un affaissement notable de l'éprouvette (35/100 de pouce par exemple) ; la (Flowability) s'exprimera alors par un nombre plus faible (par exemple $100 - 35$ soit 65).

II.4.6. Densité en vrac ou Masse volumique

Le sable à tester est introduit dans un récipient d'une capacité de 1 litre (ou plus), raclé et en suite pesé. La densité en vrac est alors exprimée en gr/cm^3 ou en gr/l .

Elle est influencée par de nombreux facteurs, dont la teneur en argile, en noir minéral, en particules fines (taux d'empoussièrement) et par l'intensité de malaxage.

II.4.7. Réfractairité

Cette propriété s'apprécie en portant une éprouvette normalisée de sable à des températures de plus en plus élevées, jusqu'à constater un début d'agglomération des grains entre eux due à un commencement de fusion superficielle.

Cet essai peut être complété par un essai de choc thermique qui peut mettre en évidence la sensibilité des sables (à base de silice notamment) aux phénomènes de dilatation.

II.4.8. Essai de traction

La résistance à la traction peut être déterminée à l'aide d'un test de rupture d'éprouvette, utilisant le même équipement que pour l'essai de compression. Cependant, la véritable résistance à la traction se situera entre 50 et 70% de la résistance à la rupture par traction.

II.4.9. Essai de dureté

Le moule doit avoir une bonne aptitude à supporter la pression du métalliquide. La dureté du moule est mesurée par le duromètre de la photo II.4.



Photo II.4.Duromètre utilisé pour mesurer la dureté d'un moule

II.4.10. Autres essais

Les essais qui viennent d'être décrits sont les essais de contrôles courants habituels du sable de moulage à vert. D'autres essais moins fréquents peuvent être effectués, tels que ;

- Indice de moulabilité ;
- Shatter index ;
- Perte au feu. Teneur en matières volatiles et en carbone ;
- Résistance pyroscopique ;
- Point de grésage ;
- Cohésion à chaud ;
- Aptitude au débouillage.

Chapitre III

Modélisation de la perméabilité

aux gaz du sable

de moulage à vert

III.1- Préparation du sable de moulage [7]

Après la coulée d'un métal liquide dans un moule en sable, le sable récupéré après décochage est très différent du sable prêt à l'emploi car il a subi une détérioration plus ou moins poussée dont les effets se caractérisent par :

- une perte d'eau ;
- une déshydratation de l'argile qui enrobe les grains de silice ;
- une élévation de température.

La régénération et le réemploi du sable brûlé permet une économie importante. Cette opération assez délicate à maîtriser en fonderie a pour but de redonner à ce sable toutes ses caractéristiques de cohésion, d'aptitude au serrage et de perméabilité, en le rendant apte aux opérations de moulage.

La préparation du sable de moulage permet d'assurer un mélange homogène des matériaux utilisés (vieux sable, bentonite, noir minéral, eau).

Cette opération a pour but de remplacer l'argile dégradée, l'eau évaporée, les matières combustibles brûlées et la remise en condition du vieux sable.

La remise en condition du vieux sable comprend les opérations suivantes :

- élimination des déchets métalliques et non métalliques (séparateur magnétique pour les déchets ferreux et tamisage pour les déchets non ferreux et non métalliques) ;
- broyage de mottes ;
- refroidissement ;
- dépoussiérage ;
- vérification des caractéristiques (pourcentage d'argile, granulométrie, teneur en matières combustibles, ...).

Cette opération est suivie du dosage pondéral des différents constituants qui est généralement utilisé et beaucoup plus précis que le dosage volumétrique car l'erreur relative due aux variations du taux d'humidité est très faible.

Enfin les différents constituants sont mis en présence après dosage pour être mélangés avec une précision plus ou moins grande et de donner ainsi au matériau final l'homogénéisation convenable.

III.2 - Composition des mélanges [9]

Les différents constituants sont préalablement préparés avant leur incorporation dans le mélangeur.

Cette opération est effectuée pour l'ensemble des essais que nous avons pratiqué, elle Comprend :

- **Le tamisage** : il procure une meilleure fluidité au mélange et permet d'éliminer différents déchets, il est réalisé pour les divers éléments utilisés au tamis de 1.6 mm (ouverture des mailles).
- **Le séchage** : Nous sommes partis pour nos essais des constituants dépourvus de leur eau libre. Le séchage est effectué dans un four d'étuvage du type W.S.983 (Photo III.1).

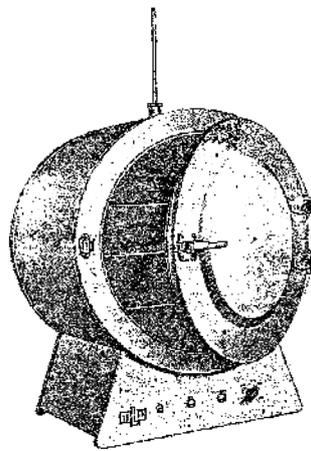


Photo III.1 : Four d'étuvage utilisé pour le séchage du sable.

- **Le dosage** : Le dosage des constituants est effectué par pesée car ce type de dosage donne de meilleures précisions.

Les produits utilisés pour la réalisation de nos essais sont donnés en pourcentage comme suit :

- vieux sable : 95 %
- sable neuf (silice) : 5 %
- noir minéral : 30 % du taux de bentonite
- bentonite : 4 %, 7 %, et 11 %.
- humidité : 3 %, 5 % et 7 %.

III.3. Préparation des mélanges

Le mélange doit être convenablement travaillé pour que la pâte argileuse formée par la bentonite et l'eau soit bien homogène et enrobe parfaitement les grains de sable.

Les constituants sont introduits dans un même mélangeur appelé aussi broyeur - frotteur ou broyeur - malaxeur du type LM [30] formé d'une cuve fixe et d'un dispositif composé de meules et de racleurs chargés d'assurer la répartition régulière du sable, de la bentonite, du noir minéral et de l'eau (Photo III.2).

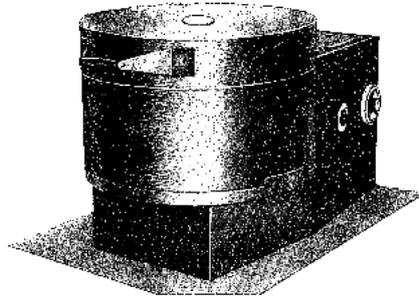


Photo III.2 : Broyeur - frotteur utilisé pour le travail des mélanges.

Le temps de malaxage est un facteur important qu'il faut choisir d'une manière aussi intime que possible car s'il est prolongé on assiste à un dessèchement du sable. Le temps choisi pour l'ensemble de nos essais est de 10 minutes.

L'ordre d'incorporation des constituants dans le broyeur pour les différents essais est pratiqué d'après les étapes suivantes :

- **Première étape :**

50 % du vieux sable + 5 % de silice → malaxage pendant une minute.

- **Deuxième étape :**

Le reste du vieux sable + le % de bentonite + le % du noir minéral → malaxage pendant une minute.

- **Troisième étape :**

50 % de l'eau → malaxage pendant 4 minutes.

- **Quatrième étape :**

Le reste de l'eau → malaxage pendant 4 minutes.

III.4 - Essai de perméabilité

III.4.1 - Confection des éprouvettes pour l'essai de perméabilité :

Les mélanges préparés et prêt à l'emploi sont confectionnés sous forme d'éprouvettes cylindriques normalisées (diamètre $\phi = 50$ mm, hauteur $h = 50$ mm) (figure III.1).

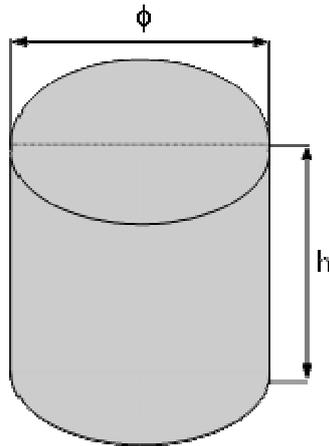


Fig.III.1 : Eprouvette normalisée

Ces éprouvettes sont obtenues en mettant une quantité suffisante de sable préparé dans le tube d'éprouvette (Photo III.3) de diamètre $\Phi = 50$ mm et de hauteur $h = 120$ mm.

Le sable est serré par trois coups de fouloir du damoir type L.U [28] (Photo III.4). En inversant le tube avec l'éprouvette serrée, on peut mesurer la perméabilité du sable.

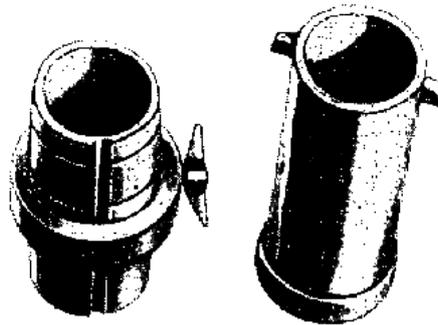


Photo III.3 : Tubes d'éprouvettes.

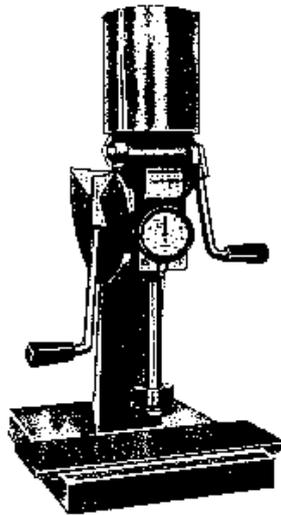


Photo III.4 : Damoir utilisé pour la confection des éprouvettes.

III.4.2. Réalisation de l'essai de perméabilité

La détermination de la perméabilité est effectuée sur l'éprouvette normalisée (Voir figure III.1) qui reste lors des essais à l'intérieur du tube de serrage. Ce tube est placé sur le perméamètre du type L.P.I.R-1 représenté sur la photo III.5 afin de déterminer la capacité du sable à l'évacuation des gaz du moule.

Les essais sont faits sur au moins trois éprouvettes et à partir des résultats individuels on calcule la moyenne arithmétique.

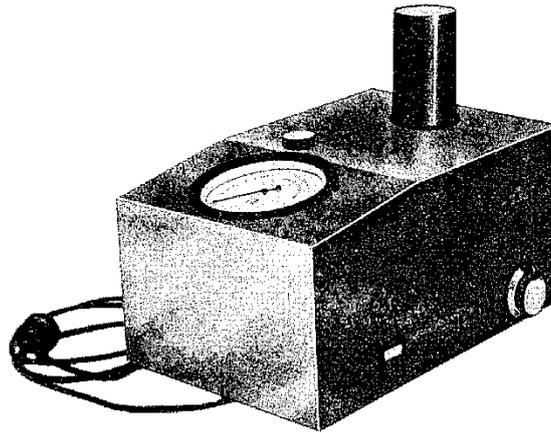


Photo III.5 : Perméamètre pour mesurer la perméabilité

III.4.3. Résultats de l'essai de perméabilité

Les résultats des essais de perméabilité sont représentés sur la figure III.2 pour différents taux de bentonite (4 %, 7 % et 11 %) et différents taux d'humidification (3 %, 5% et 7%).

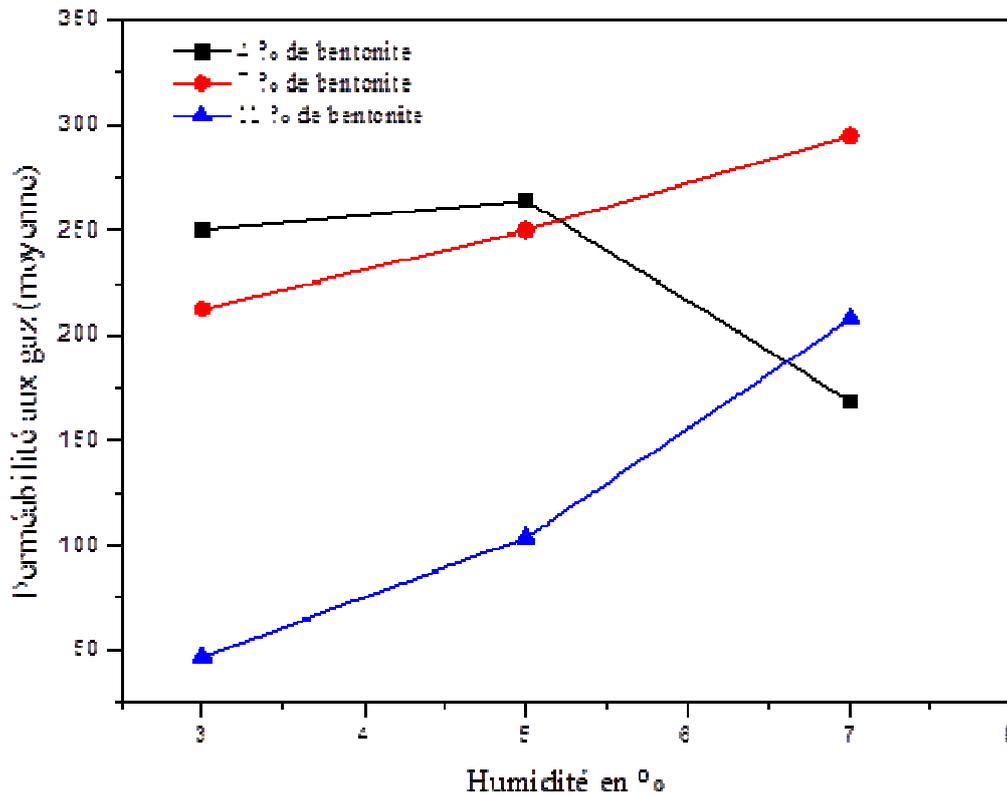


Fig.III.2 : Résultats expérimentaux de la perméabilité

Les mélanges préparés donnent une perméabilité moyenne qui augmente avec l'augmentation du taux d'humidité entre 3% et 5%. Pour des taux humidification dépassant les 5%, la perméabilité continue à augmenter pour 7 et 11% de bentonite et chute brusquement pour un taux de bentonite de 4%.

La perméabilité maximale est plus importante pour les mélanges préparés avec 4 %, et 7 % de bentonite que pour les mélanges préparés avec 11 %.

Le maximum de la perméabilité pour 4 % de bentonite est atteint pour une humidité de 5 % et il est atteint pour un taux d'humidité de 7 % pour un mélange de 7 % de bentonite. Ce maximum pour 11 % de bentonite est atteint pour une plus grande humidité qui est de 7%.

III.5. Analyse statistique des résultats

III.5.1. Plan d'expériences (DOE) adopté

Les facteurs considérés dans ce travail et qui peuvent influencer la perméabilité (réponse) sont présentés dans le tableau III.1. Le plan considéré sera un plan factoriel complet de deux facteurs H et B (Tableau.III.1) à 3 niveaux et 3 répliques (essai 1, essai 2 et l'essai 3) (Tableau.III.2), c'est-à-dire on aura $9 \times 3 = 27$ essais au total.

Facteur	Symbole	Type de Facteur	Niveaux codés	Niveaux réels
% d'humidité	H	Numérique	1	3 %
			2	5 %
			3	7 %
% de bentonite	B	Numérique	1	4 %
			2	7 %
			3	11 %
Réponse (y): Perméabilité aux gaz				

Tableau. III.1 : Facteurs et niveaux (réels et codés) considérés

III.5.2. Valeurs de réponse (résultats expérimentaux de la perméabilité)

Les résultats expérimentaux exprimant la perméabilité aux gaz sont présentés dans le tableau III.2. Nous considérons trois essais de perméabilité (3 répliques : essai1, essai2 et l'essai3) réalisés sur les échantillons de sable préparés.

Expérience	(% d'humidité) H	(% de bentonite) B	Résultats expérimentaux de la perméabilité		
			Essai 1	Essai 2	Essai 3
1	3	4	250	250	250
2	3	7	205	220	220
3	3	11	44	48	48
4	5	4	250	255	270
5	5	7	265	250	245
6	5	11	200	210	190
7	7	4	250	245	240
8	7	7	290	285	300
9	7	11	200	205	210

Tableau. III.2 : Résultats des essais de perméabilité

III.5.3. Tableau des résultats expérimentaux

L'ordre des 27 essais (9 essais x 3 répliques) des deux facteurs considérés est obtenu par randomisation en utilisant le logiciel Minitab19 comme indiqué dans le tableau III.3. Les résultats de la perméabilité aux gaz sont représentés à la dernière colonne du tableau ci-dessous.

Numéro d'essai	Facteur 1 (taux d'humidité)	Facteur 2 (taux de bentonite)	Réponse
	H	B	Perméabilité
1	5	4	250
2	5	11	200
3	3	7	205
4	3	4	250
5	7	11	200
6	7	11	205
7	3	11	44
8	7	7	290
9	3	4	250
10	3	7	220
11	5	7	265
12	7	4	250
13	3	11	48
14	7	7	285
15	3	4	250
16	5	7	250
17	7	11	210
18	7	4	245
19	5	4	255
20	5	7	245
21	5	11	210
22	3	11	48
23	5	11	190
24	7	4	240
25	3	7	220
26	5	4	270
27	7	7	300

Tableau. III.3: Ordres essais de perméabilité

III.5.4. Analyse de la variance

Une analyse de la variabilité totale des données expérimentales a été effectuée et les résultats sont présentés dans le tableau III.4. Nous prenons en considération les effets principaux (H et B) et les interactions d'ordre 2 entre ces deux facteurs.

Source	DL	SomCarajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	% contribution
Modèle	8	119733	14966,7	266,56	0,000	99,16
Linéaires	4	93306	23326,4	415,44	0,000	77,27
Facteur 1 : H	2	31267	15633,3	278,43	0,000	25,89
Facteur 2 : B	2	62039	31019,4	552,46	0,000	51,38
Interactions à 2 facteur(s)	4	26428	6606,9	117,67	0,000	21,88
Interaction : H*B	4	26428	6606,9	117,67	0,000	21,88
Erreur	18	1011	56,1			0,83
Total	26	120744				100

Tableau. III.4 : Analyse de la variance (ANOVA) des résultats expérimentaux

Les résultats du tableau III.4 révèlent que les effets statistiquement significatifs sont ceux des deux facteurs considérés (humidité et bentonite) et l'interaction entre ces deux facteurs.

III.5.5. Equation de régression (modèle de perméabilité)

Une analyse de régression est utilisée pour trouver la relation entre les facteurs significatifs et leur interaction (Tableau III.4). Cette relation est donnée ci-dessous :

$$\text{Perméabilité} = 218,33 - 47,78 H3 + 18,89 H5 + 28,89 H7 + 32,78 B4 + 35,00 B7 - 67,78 B11 + 46,67 H3*B4 + 9,44 H3*B7 - 56,11 H3*B11 - 11,67 H5*B4 - 18,89 H5*B7 + 30,56 H5*B11 - 35,00 H7*B4 + 9,44 H7*B7 + 25,56 H7*B11 \quad (1)$$

Les valeurs de l'écart type (S), R^2 (coefficient de détermination), R^2 ajusté et R^2 prédit pour la variable de réponse (perméabilité) à partir de l'équation de régression obtenue sont résumées ci-dessous dans le tableau III.5.

S	R^2	R^2 ajusté	R^2 prédit
7,49321	99,16%	98,79%	98,12%

Tableau. III.5 : Récapitulatif du modèle

Les valeurs expérimentales, les valeurs prédites (à partir de l'équation de régression) et les résidus de la perméabilité sont représentés dans le tableau III.6.

Numéro d'essai	Valeurs expérimentales	Valeurs prédites	Résidus
1	250,00	258,33	-8,33
2	200,00	200,00	0,00
3	205,00	215,00	-10,00
4	250,00	250,00	0,00
5	200,00	205,00	-5,00
6	205,00	205,00	0,00
7	44,00	46,67	-2,67
8	290,00	291,67	-1,67
9	250,00	250,00	0,00
10	220,00	215,00	5,00
11	265,00	253,33	11,67
12	250,00	245,00	5,00
13	48,00	46,67	1,33
14	285,00	291,67	-6,67
15	250,00	250,00	0,00

16	250,00	253,33	-3,33
17	210,00	205,00	5,00
18	245,00	245,00	0,00
19	255,00	258,33	-3,33
20	245,00	253,33	-8,33
21	210,00	200,00	10,00
22	48,00	46,67	1,33
23	190,00	200,00	-10,00
24	240,00	245,00	-5,00
25	220,00	215,00	5,00
26	270,00	258,33	11,67
27	300,00	291,67	8,33

Tableau. III.6 : Valeurs expérimentales, prédites et résidus de la perméabilité

La figure III.3 montre le graphique des valeurs résiduelles de la perméabilité du modèle retenu, représentées sur le tableau III.6.

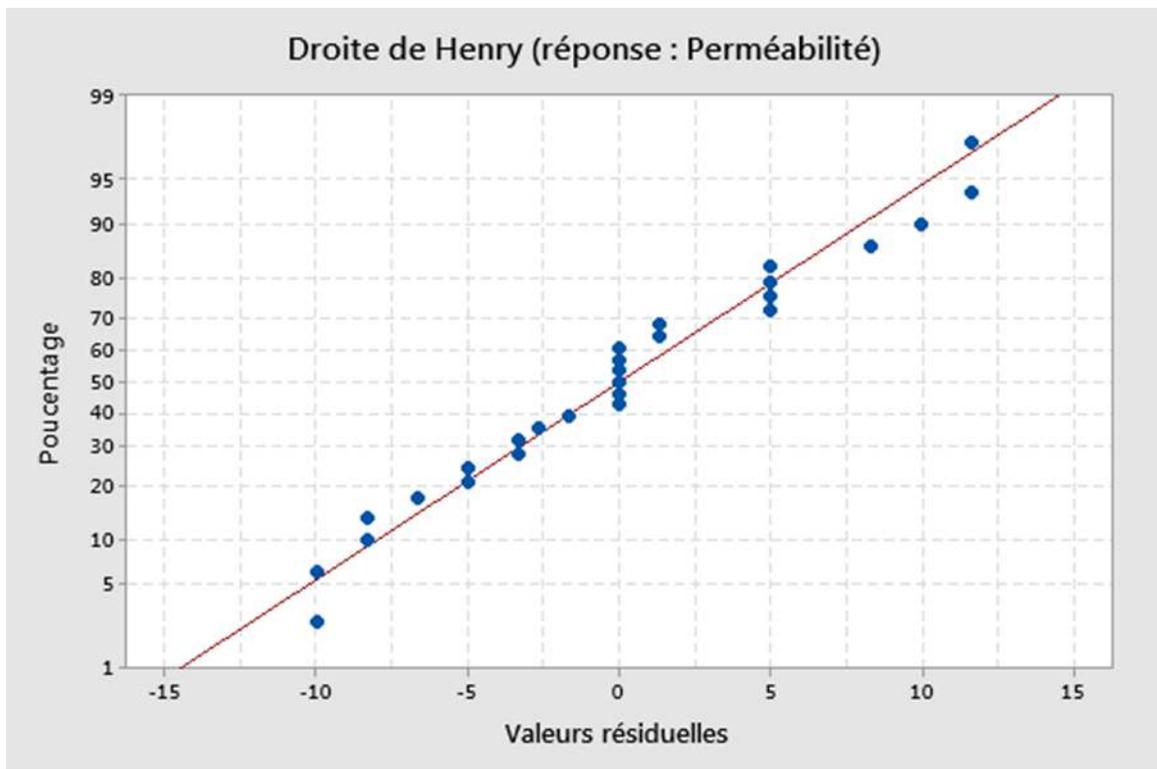


Fig. III.3 : Valeurs résiduelles de la perméabilité

D'après ce graphique (Fig. III.3) et la valeur de R^2 ajusté (Tableau III.5), on peut dire que le modèle sélectionné est satisfaisant et que les valeurs prédites sont en très bon accord avec les valeurs mesurées. Seuls 0,84 % de la variation totale ne peuvent être expliqués à l'aide de ce modèle. La valeur R^2 ajustée (R^2 ajusté = 98,79%) montre également que le modèle prédit correspond bien aux données de l'expérience et qu'il est hautement significatif.

III.6. Diagrammes factoriels pour la perméabilité

Le graphique des effets principaux est utilisé pour représenter le niveau optimal des caractéristiques d'entrée pour cette étude. Les effets principaux des facteurs et l'interaction entre les facteurs pour la perméabilité moyenne sont illustrés aux figures III.4 et III.5.

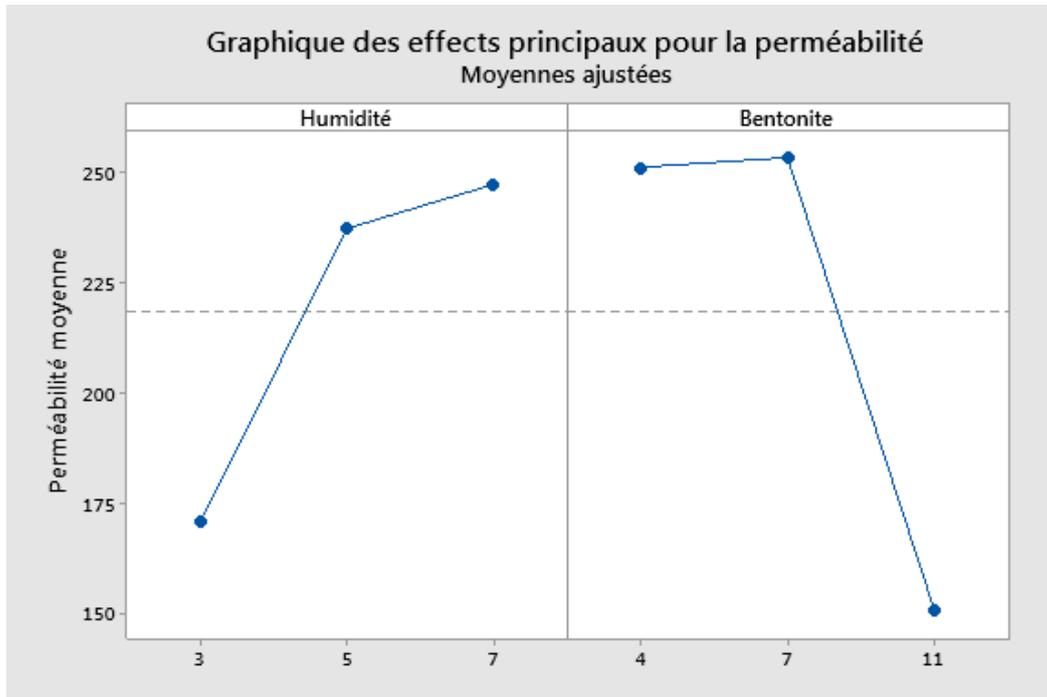


Fig. III.4 : Effets principaux pour la perméabilité moyenne

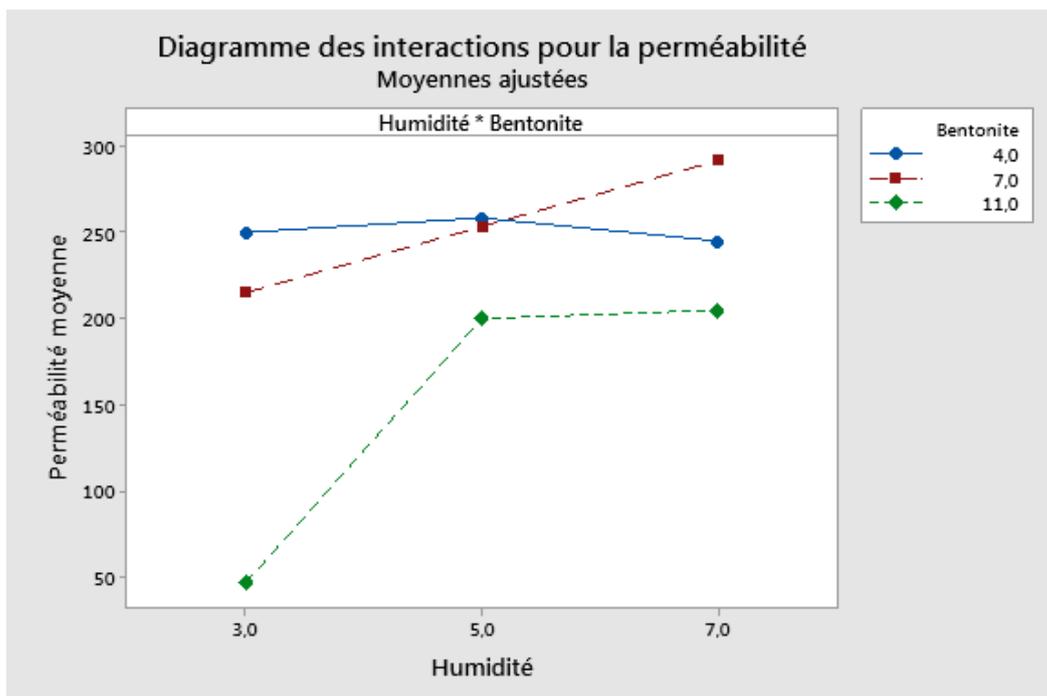


Fig. III.5 : Interactions entre les facteurs pour la perméabilité moyenne

Un effet principal existe lorsque les 3 niveaux d'un facteur affectent la caractéristique différemment. D'après la figure III.4, nous remarquons que les deux facteurs ont un effet significatif sur la perméabilité moyenne. Les essais expérimentaux réalisés avec des taux d'humidité croissants augmentent la perméabilité, tandis qu'une augmentation aberrante du taux de bentonite diminue celle-ci. Cette différence montre que ces facteurs sont des effets principaux.

Le niveau optimal réduisant la perméabilité est une humidification de 3% et un taux de bentonite de 11%. Cette combinaison paramétrique appartient à la série expérimentale no. 7, 13 et 22 du tableau III.3.

Une perméabilité maximale est obtenue pour un niveau de 7% d'humidité et 7% de bentonite. Cette combinaison paramétrique appartient à la série expérimentale no. 8, 14 et 27 du tableau III.3, où la perméabilité est de 290, 285 et 300. Ces essais représentent les valeurs les plus grandes de la perméabilité.

Pour une optimisation efficace, un graphique d'interaction est utilisé pour démontrer l'interaction entre les niveaux et les paramètres d'entrée. Le résultat est illustré à la figure III.5.

La variation du taux d'humidité à effet plus significatif sur la perméabilité moyenne pour les mélanges préparés avec 11% de bentonite. Cette perméabilité reste inférieure à 210.

L'effet de la variation du taux d'humidité sur la perméabilité moyenne est plus limité pour les mélanges préparés avec 4% et 7% de bentonite. Pour 4% de bentonite, la valeur moyenne de la perméabilité est aux environs de 250. Pour 7% de bentonite, la valeur moyenne de la perméabilité augmente sans cesse avec l'humidité pour atteindre une valeur de 300 pour 7% d'humidité.

Une valeur optimale de 250 de la perméabilité est atteinte pour 7% de bentonite et 5% d'eau et une valeur de 4% de bentonite et un teneur en eau comprise entre 3 et 7%.

III.7. Prédiction de la réponse (perméabilité)

En utilisant le modèle de l'équation (1) nous avons prédit les valeurs de la perméabilité pour les deux facteurs considérés et à différents niveaux. Ces résultats sont illustrés dans le tableau III.7 avec leur intervalle de confiance à 95% respectif.

	Facteur 1 (Humidité)	Facteur 2 (Bentonite)	Réponse (perméabilité)	Intervalle de confiance à 95 %
Niveaux	3	4	250	240,911 ÷ 259,089
	3	7	215	205,911 ÷ 224,089
	3	11	46,6667	37,5776 ÷ 55,7557
	5	4	258,333	249,244 ÷ 267,422
	5	7	253,333	244,244 ÷ 262,422
	5	11	200	190,911 ÷ 209,089
	7	4	245	235,911 ÷ 254,089
	7	7	291,667	282,578 ÷ 300,756
	7	11	205	195,911 ÷ 214,089

Tableau. III.7: Valeurs prédites de la perméabilité

III.8. Comparaison entre divers plans d'expériences

Une étude comparative entre le plan factoriel utilisé dans ce travail et d'autres plans en fonction de leur coefficient de détermination ajusté est présentée dans le tableau III.8. Avec plus de répliques et en prenant en considération des interactions du deuxième ordre, nous avons obtenu un modèle mathématique de la perméabilité avec un coefficient de détermination très satisfaisant R^2 ajusté = 98,79 %.

Plan d'expériences (facteurs + niveaux)	Ordre des Interactions	Nombre de répliques	R^2 ajusté
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 2 niveaux	2	2	98,98 %
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 2 niveaux	Sans	2	91,06 %
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	2	3	98,79%
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	Sans	3	73,14 %
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	2	2	99,35 %
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	Sans	2	70,70
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	2	1	Non dét.
Plan factoriel complet : 2 facteurs à 3 niveaux	Sans	1	31,41 %
Plan Taguchi : L9 (3^2)	2	1	Non dét.
Plan Taguchi : L9 (3^2)	Sans	1	32,90 %
Plan Taguchi : L27 (3^2)	2	1	Non dét.
Plan Taguchi : L27 (3^2)	Sans	1	56,29 %

Tableau. III.8: Valeurs prédites de la perméabilité

III.9. Conclusion

Le plan d'expériences factoriel complet est utilisé efficacement dans la modélisation et l'optimisation de la perméabilité aux gaz des sables de moulage à vert.

Le taux d'humidité et de bentonite ainsi que l'interaction entre ces deux facteurs influent sur cette propriété.

L'analyse des résultats de perméabilité, montre que cette caractéristique doit faire l'objet d'un compromis. Une perméabilité trop faible risque d'empêcher les gaz de s'échapper du moule et donner ainsi, des défauts du type soufflures ou piqûres. Une très grande perméabilité laissera traverser les gaz et le métal liquide au moment de la coulée et conférer ainsi, aux pièces fabriquées des défauts du type rugosité et les abreuvements.

Une faible perméabilité est obtenue pour des taux d'humidité très faibles (3%) et des taux de bentonite très importants (11%). La perméabilité atteint des valeurs maximales pour un taux d'humidité et de bentonite de 7%.

Un modèle mathématique est établi dans ce travail. Il prend en considération les deux facteurs considérés (taux d'humidité et bentonite) et l'interaction entre ces deux facteurs.

Les valeurs prédites par ce modèle sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, ce qui nous permis de juger de la qualité suffisante de ce modèle et de le considéré comme le modèle susceptible d'expliquer l'évolution de la perméabilité aux gaz des sables de moulage à vert.

Enfin, les paramètres optimaux effectifs pour cette étude expérimentale et prédits par le modèle mathématique, sont résumés dans le tableau III.7.

Conclusion Générale

Les pièces moulées se rencontrent dans une grande variété d'industries, elles sont d'une qualité supérieure et elles sont confectionnées généralement dans des moules en sables constitués principalement de sable d'origine naturelle mélangé à des liants de nature très variée (argile, silicate de soude, résine furanique).

Les défauts dans ces pièces, imputables aux sables de moulage peuvent apparaître et les caractéristiques d'utilisation de ces sables peuvent être modestes lorsque l'un quelconque des composants impliqués dans la confection des moules en sable à vert est hors de la valeur optimale. Ces paramètres sont, la bentonite, la poussière de charbon, le sable de silice et l'eau.

L'aptitude d'un sable à se laisser traverser par les gaz au moment de la coulée, définit sa perméabilité. Elle est mesurée par des essais normalisés sur des éprouvettes de diamètres 50mm et de hauteur 50mm et elle est grandement influencée par la variation de la teneur en eau et en bentonite du sable de moulage.

Le but visé par cette étude est la recherche des facteurs les plus influents sur la perméabilité en exploitant des résultats expérimentaux obtenus sur différents mélanges.

Le plan d'expériences factoriel complet est utilisé pour la modélisation et l'optimisation de la perméabilité aux gaz des sables de moulage à vert, en considérant 2 facteurs (humidité et bentonite) à 3 niveaux (3, 5 et 7% d'humidité et 4, 7 et 11% de bentonite).

Un modèle mathématique est établi dans ce travail en considérant ces deux facteurs et l'interaction entre eux.

Les résultats obtenus à travers cette étude, nous permis d'affirmer que :

- La perméabilité reste inférieure à 210 pour les mélanges préparés avec 11% de bentonite et différents taux d'humidité (3, 5 et 7%).
- Elle est supérieure à 210 pour les mélanges préparés avec 4% et 7% de bentonite et les trois pourcentages d'humidité (3, 5 et 7%) considérés dans cette étude.

Bibliographie

- [1] TURCRY P., "Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation" Thèse de doctorat de l'Université de Nantes-France, (2004)
- [2] OKAMURA H., OZAWA K. "Self-compactable high performance concrete", International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, 1994.
- [3] KHAYAT, K.H. Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, 96, 346–353, (1999).
- [4] ACI, „Processes, Self-Compacting Concrete““, Advanced Concrete Technology III, 203.9/3, (2003)
- [5] <https://metalblog.ctif.com/2019/12/16/les-differents-procedes-de-moulage-en-sable/>
Consulté le 04/04/2021 à 23h30
- [6] Version français 3982-Article Text-11009-1-10-20180531]
- [7] S.Aissat, « Amélioration des propriétés mécaniques des boulets de broyage », mémoire de magister Université de Chlef 2000.
- [8] MOLD SAND, SAND ADDITIVES & SAND PROPERTIES SAND PROPERTIES
Collection and Selection by Dr. Mehdi Divandari IUST Cast g in g 1

Résumé

Le problème du sable de moulage en fonderie est d'une gravité capitale du fait des quantités préparées et surtout du fait de son influence sur la qualité des pièces moulées.

La perméabilité aux gaz des sables de moulage est très sensible aux variations d'humidité et de bentonite qui constitue le liant qui réunit les grains du sable de base entre eux.

Nous avons contribué dans ce travail à modéliser et optimiser la perméabilité avec différents taux d'humidification et de bentonite en utilisant la méthode des plans d'expériences.

L'analyse des résultats de perméabilité, montre que cette caractéristique doit faire l'objet d'un compromis pour éviter tous défauts de fonderie causés par des valeurs extravagantes de ce paramètre.

Mots clés : Sable de moulage, bentonite, humidité, perméabilité, modélisation, plans d'expériences.

Abstract

The problem of casting sand is of capital importance because of the quantities prepared and especially because of its influence on the quality of castings.

The gas permeability of the moulding sands is very sensitive to variations in moisture and bentonite, which is the binder that binds the grains of the base sand together.

In this work, we helped to model and optimize permeability with different humidification and bentonite rates using the experimental design method.

The analysis of the permeability results shows that this characteristic must be compromised to avoid any foundry defects caused by extravagant values of this parameter.

Keywords: Moulding sand, bentonite, moisture, permeability, modeling, experiment plans.

الخلاصة

أهم مشاكل القوالب بالرمل في شركة السباكة الفولاذ و الحديد هو كيفية تحضير كمية الرمل وتأثيرها على نوعية القطعة المصمومة بالقوالب.

هناك تأثير نسبة الماء و الطين على نفوذ أو خروج الغازات من قالب الرمل .

في هذا العمل لقد ساهمنا على وضع نموذج لي تحسين نفوذ الغازات من القالب مع نسب مختلفة من الماء و الطين باستعمال طريقة (la méthode des plans d'expériences).

بعد تحليل النتائج لي نفوذ الغازات يجب علينا ان تكون قيمتها في مجال متوسط لكي نتفادي بوجود عيوب القوالب بالرمل ، النسب المفرطة لها تؤدي الى خسارة في استهلاك كمية كبيرة من المواد الأولية الذي يؤدي الى تراجع نقص في فائدة الشركة.

مفاتيح الكلمات : قالب الصب، بنتونيت، الرطوبة، النفاذية، النموذج، خطط التجربة.