République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université YahiaFarés Médéa

Faculté de technologie

Département: Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude présenté Pour l'obtention

Du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : ***Science*** **des Matériaux**

Théme

Possibilité d'utilisation du sable brut de Bougezoule au moulage et noyautage:

Etude Expérimentale.

Présenté par :

M^ell^: Bouaichaoui Meriem

M^ell^: Chabouni Farida

proposé et dirigé par :

Dr: Belhadj Abdelmouneïm

Mr: Hebireche Mohamed

Promotion : 2016/2017

Remerciement:

Nous saisissons cette opportunité pour adresser nos profondes gratitudes et nos sincères prières à notre dieu, le tous puisant.

Nous n'omettrons pas d'exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribués de pris ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, avec une attention particulière à notre promoteur Dr Belhadj, et Mr Hbireche, qui n'a jamais cessé de prodiguer conseils, orientation et encouragements.

Nous n'oublierons pas la participation active de société POVAL Berrouaghia sur tout Mm fouzia.

Et nos professeurs qui nous ont suivis tout au long de notre parcours universitaire au sein du département de génie mécanique.

Merci à vous tous pour votre soutien, votre aide, et votre compréhension.

*Farida Meriem**

SOMMAIRE

Introduction générale ……1

Chapitre I : Généralités sur le sable

I-I Introduction……2

I-2 Historique…….....3

I-3 Origine des sables …….....4

I-4 Sable de base ……4

I-4-1Pricipaux sables de base disponibles……..4

I-4-2 Sable fonderie utilisée……4

I-4-3 Dimension et forme des grains……...5

I-4-4 Propriétés chimique……7

I-4-5 Propriétés physique……7

I-5 Méthodes de contrôles de sable……...12

I-5-1 Analyse granulométrique……12

I-5-2 Contrôle des composites chimique……..14

I-6 Liants……...15

I-6-1 Liants minéraux……15

I-6-2 Silice colloïdale et silicates solubles……21

I-6-3 Liants phosphates…….22

I-6-4 Liants organique……...23

I-7 Adjuvants…….23

I-7-1 Adjuvants générateurs d'atmosphère réductrice…….....23

I-7-2 Agents de débourrage……...24

I-7-3Agents anti pénétration…….24

I-7-4 Agents anti dilatation……...24

I-7-5 Agents mouillants et fluidifiants……..25

I-7-6 Agents anti collage……..25

Chapitre II : Préparation du sable de moulage

II-1 Introduction…….....26

II-2 Qualités souhaités……..26

II-3 Les matières de moulage de fonderie…….26

II-3-1 Sables de fonderie……...26

II-3-2 Sable neuf quartzeux (siliceux)……..27

II-3-3 Compositions chimiques et minéralogiques……...27

II-3-4 Détermination de la granulométrie et forme des grains…….29

II-3-5 Détermination du diamètre moyen des grains et le degré d'uniformité……34

II-3-6 Détermination de la morphologie des grains…….35

II-3-7 Impuretés……35

II-3-8 Perte au feu…….35

II-3-9 PH……...35

II-3-10 Forme des grains…….....35

II-4 L'argile (bentonite)……...36

II-4-1 Qu'est-ce que la bentonite ……36

II-4-2 Classification des argiles er position de la montmorillonite…….39

II-5 Noir minérale…….....39

II-6 Propriétés des sables de moulage (moulage à vert)…….40

II-6-1 plasticité ou corps du sable……..40

II-6-2 perméabilité……..41

II-6-3 Réfractairité (infusibilité)…….42

II-6-4 Cohésion……42

II-6-5 Longévité……....42

II-7 Sable à noyaux……...44

II-7-1 Définition……44

II-7-2 Les différents procédés de noyautage……44

Chapitre III : Moulage- Noyautage

III-1 Généralités……47

III-2 Moulage…….....47

III-3 Classement des procédés de moulage……...…47

III-4 Les procédés de moulage……..48

III-5 Matériaux de moulage……..51

III-5-1 Matériaux pour moules permanent……51

III-5-2 Produits spéciaux……...51

III-6 Moulage au sable restant plastique……...52

III-6-1 Sable de moulage……...52

III-6-2 Caractéristique du sable de moulage…….53

III-6-3 Sablerie……..53

III-6-4 Matériels et appareils de traitements des sables……54

III-6-5 Matériels de manutention et de stockage du sable……57

III-6-6 Contrôle du sable préparé……..58

Chapitre VI : techniques expérimentales

VI-1 Introduction……..63

VI-2 Prélèvement et échantillonnage……....63

VI-2-1 Lieu de l'échantillonnage……..63

VI-2-2 Dénomination du sable et état à échantillonnage…….....63

VI-2-3 Exécution de l'échantillonnage pour l'échantillon de collecte…….64

VI-2-4 Exécution de l'échantillonnage pour l'éprouve final……...64

VI-3 Contrôle réception du sable……..64

VI-4 Examen visuel……..64

VI-5 Détermination de la teneur en humidité……...65

VI-6 Détermination de la réparation granulométrique de sable de Bougezoule……..65

VI-7 La structure granulaire…….69

VI-8 Indice de finesse……..69

VI-9 degré d'uniformité……72

VI-10 Détermination de la teneur en matière en suspension (MS%)…….....72

VI-11 Détermination de la perte au feu…….73

VI-12 Détermination de la morphologie des grains…….....73

VI-13 Détermination de la résistance au cisaillement……...75

VI-14 Détermination da la résistance à la compression……77

VI-15 Détermination de plasticité…….78

VI-16 Détermination de perméabilité……...78

VI-17 Confection d'une éprouvette……..81

Conclusion

Listes des figures

Figure	Titre	Page
I-1	Répartitions granulométriques de deux sables de base.	6
I-2	Formes de grains.	8
I-3	Courbes de dilatation de différents sables.	9
I-4	Courbes de refroidissement du centre d'une sphère d'acier de 15 cm de diamètre.	10
I-5	Viscosité du silicate de soude en fonction du module et de la teneur en matières solides.	21
II-1	Transformation de quartz suivant les gradients de température du moule.	29
II-2	comparaison des granulométries d'un sable de fonderie.	30
II-3	Histogrammes de trois sables différents de 72 AFS avec des répartitions granulométrique totalement différentes.	33
II-4	appareille pour mesure la surface spécifique réelle.	36
II-5	Réseau de la montmorillonite.	37
II-6	structure en feuillets de la bentonite.	38
II-7	structure de la bentonite.	38
II-8	constituants principales de la bentonite.	39
III-1	Schéma de principe d'une sablerie.	57
III-2	Croquis synoptique des systèmes de manutention et de stockage d'une sablerie.	59
III-3	Contrôleur d'aptitude au moulage (*Moldability controler*).	60
III-4	Roto control.	61
III-5	Schémas des différents appareils de traitement du sable.	62
IV-1	Représentation les séries des tamis utilisés selon les normes internationales	67
IV-2	histogramme représente la variation du diamètre relatif aux	70

	groupes de sables.	
IV-3	Photographie du tamiseur utilisé au cours de notre étude.	71
IV-4	histogramme de la répartition granulométrique de sable Bougazeule	74
IV-5	courbe refus cumulés en fonction de diamètre de tamis	76
IV-6	courbe refus ×multiplicateur en fonction de diamètre de tamis.	76
IV-7	Courbe granulométrique cumulative de refus (sable de bougezoule.	72
VI-8	Photographie d'un microscope optique utilisé au cours de la présente étude.	80
VI-9	photographie d'un malaxeur utilisé au cours de la présente étude.	81
VI-10	Machine universelle pour détermination de la résistance à la compression / cisaillement	83
VI-11	appareil d'essai de perméabilité.	87
VI-12	machine de confection des éprouvettes.	90

Liste de tableaux		
Ttableau	Titre	page
I-1	Propriétés des sables de base disponibles	11
I-2	Séries usuelles de tamis	13
I-3	Exemple de calcul d'indice de finesse	13
I-4	Propriétés des sables de fonderie liés avec différents types d'argiles	19
II-1	transformation de la silice en différents forme selon la température.	28
II-2	Cas d'exemple : Analyse granulométrique du sable de Chlef (traité)	31
II-3	les groupes du sable	32
II-4	Relation entre indice de finesse et dimensions moyennes des grains en mm	34
III-1	classification des procédés de moulage	50
III-2	Exemples de composition de sable vert	56
VI-1	Les séries tamis selon les normes internationales.	67
VI-2	les groupes de sables.	69
VI-3	Tamis utilisés en fonderie (ouvertures et multiplicateurs)	71
VI-4	répartition granulométrique de sable bougazeule	73
VI-5	répartition granulométrique de sable de Bougezoul pour tracer le graphe en forme « S »	75
VI-6	caractéristique des éprouvettes.	89
VI-7	La comparaison entre les normes internationale de sable de base et sable de Bougezoul	91

ملخص :

الدراسة التي قمنا بها حول إمكانية استعمال رمل بوغزول في القولبة على مستوى محطة الرمل بمسبك البرواقية.

من خلال دراستنا سنتعرف على العناصر المكونة للرمل ويمر ذلك بعدة مراحل واختبارات وتحاليل متنوعة.

Résumé :

L'étude que nous avons réalisée dans ce travail sur possibilité d'utilisation de sable de Bougezoule au moulage et noyautage dans la fonderie (sablerie) de Berrouaghia.

Grace à notre étude, nous apprendrons sur les éléments constitutifs du sable et se faire par plusieurs étapes de tests et une variété d'analyse.

Abstract :

The study we carried about this work on utilizing sand of Bougezoul in the molding.

Through our study we will learn about the component, and this through serval stage of tests and analyzes are divers.

Introduction générale

Introduction générale:

Le moulage est un procédé d'obtention des pièces brutes. Après avoir coulé le métal à l'état liquide dans le moule, ce dernier se solidifie par refroidissement et prend la forme de l'empreinte qui existe à l'intérieur du moule. Le moule non permanant est un matériau qui, après serrage, constitue une masse réfractaire chargée de :

- Prendre l'empreinte extérieure démoulable d'un modèle,

- soutenir les noyaux donnant les formes non démoulables,

- résister à l'agression mécanique et thermique du métal,

- donner une pièce de qualité définie [13].

Le processus de fabrication dans le secteur de la fonderie est un processus très complexe dans le sens où il est difficile de connaître l'origine de ses défauts. Une bonne proportion de ces défauts (défauts de surface) est rebutée à cause du sable de moulage.

En raison de la demande croissante en matière de sable, l'exploitation de nouvelles carrières est devenue une importance primordiale afin de satisfaire notre besoin en sable brut.

Afin de trouver d'autres sources d'approvisionnement, la fonderie de Berroughia nous a proposé durant la période de stage de faire une étude complète sur le sable brut de Bougezoule pour éventuelle possibilité d'alimenter les chantiers de moulage et noyautage et substituer l'actuel sable (sable de Chlef). L'adaptation de ce sable doit prendre en considération les mesures de qualité appliquées pour le sable quartzeux de fonderie.

Dans notre cas l'étude a été faite en comparaison avec les mesures appliquées dans l'unité fonderie de Berroughia.

Notre travail comprend principalement quatre chapitres, dans les trois premiers chapitres, nous avons présenté une recherche bibliographique qui comporte essentiellement les composants du sable de moulage et noyautage et leur caractéristique.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de la méthode d'analyse d'un sable quartzeux de Bougazeule, ainsi que leur caractéristique, et la préparation d'un mélange pour moulage à vert ou sont présentés les résultats expérimentaux et discussions.

CHAPITRE I

Généralités sur le sable

I-1-Introduction:

Parallèlement aux techniques de moulage en moules métalliques permanents, la fonderie fait toujours une large utilisation de moules et de noyaux à usage unique réalisés en sables agglomérés.

Après avoir décrit les différents constituants (sable de base, liants, adjuvants divers) et leur méthode de contrôle, l'article décrit les procédés de préparation des sables ainsi que les méthodes de contrôle permettant d'évaluer leurs propriétés particulières en fonction de leur mise en œuvre.

Sont également exposées les différentes techniques de recyclage permettant une réutilisation des sables ayant déjà subi la coulée.

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;** cela signifie que son état initial doit être soit pulvérulent, soit liquide ou liquide-plastique, soit plastique ; suivant cet état, 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 (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 réfractairité**, car le sable doit présenter une température de ramollissement supérieure à la température de fusion de l'alliage considéré ;

-La perméabilité, qui permet l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés à la coulée.

- l'absence des réactions moule-métal susceptibles de créer des défauts d'inclusions 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.

I-2-Historique:

Dès l'origine de la métallurgie, l'obtention des pièces de formes diverses à partir du métal liquide s'est effectuée par coulée dans un matériau de moulage préalablement mis en forme sur un modèle.

Jusqu'à un passé récent, ces matériaux de moulage étaient des produits minéraux naturels, en particulier des terres argileuses qui possèdent les propriétés fondamentales d'être plastiques lorsqu'elles sont humides et, par conséquent, susceptibles de prendre en négatif l'empreinte d'un modèle mère et ultérieurement de durcir par simple séchage ou par cuisson, et ainsi de pouvoir supporter le métal liquide jusqu'à sa solidification.

Depuis moins d'un siècle, l'énorme croissance des besoins en Pièces moulées, liée au développement des industries de biens d'équipement et de biens de consommation, a entraîné une évolution profonde de la technologie des matériaux de moulage. De nouvelles techniques faisant appel à toutes les ressources de la chimie minérale et organique ont été élaborées afin de répondre à la diversification des demandes des industries mécaniques clientes, en ce qui concerne :

- la nature des alliages ;
- la complexité des pièces et la précision dimensionnelle exigée ;
- l'importance des séries à réaliser ;
- les coûts.

Mais si, fondamentalement, les principes de base sont demeurés les mêmes, les matériaux modernes sont susceptibles de durcir dans des délais plus ou moins longs au contact du modèle, alors que, précédemment, l'opération de démoulage intervenait toujours à l'état plastique. La première application connue est due à J. Croning, dont le procédé portant le nom Remonte à 1942.

Plus récemment se sont ajoutées des exigences concernant l'environnement interne et externe - l'absence d'émissions toxiques (solides ou vapeurs) lors de la mise en ouvre.

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

La satisfaction de l'ensemble de ces exigences 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 ;

- un liant 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, destinés à conférer des propriétés secondaires, mais néanmoins nécessaires à la réussite d'un moulage ; ils seront examinés par la suite d'après leurs propriétés [1].

Remarque : des procédés récents mettent en œuvre des sables non liés, leur consolidation étant obtenue soit par l'emploi du vide (V Process), soit par congélation.

Les procédés faisant appel à des modèles perdus gazéifiables utilisent également des sables non liés.

I-3-Origines des sables*:*

Les sables sont des produits d'origine naturelle constitué de grains, soit de silice, soit d'autre matière comme le zircon, l'olivine, la chromite, parfois des produits naturels transformés comme la charmotte (argile calcinée).

Les sables naturels sont extraits de carrières exploitées généralement à ciel ouvert. Ils se trouvent sous forme de dépôts, formés de couche superposées plus ou moins régulières. Les qualités varient d'une carrière à l'autre et dans une même carrière, les couches peuvent être très différentes. Il y a un grand de points d'extraction mais en raison des qualités exigées des sables de fonderie.

Un utilisateur a toujours avantages à bien connaitre la carrière d'où provient le sable qu'il utilise. Il devra non seulement s'assurer des qualités du sable, mais aussi vérifier que le gisement est capable de fournir régulièrement cette qualité. C'est pourquoi il est préférable de ne retenir que des couches très épaisses [2].

I-4-Sable de base:

I-4-1-Principaux sables de base disponibles:

De nombreux sables de base sont désormais disponibles. Si la silice, de loin la plus utilisée, est d'origine naturelle, d'autres sont des produits plus ou moins artificiels qui, en raison de leur coût, sont réservés à des emplois spéciaux.

I-4-2-Sable de fonderie utilisée:

- **La silice**, de formule SiO_2, et plus spécialement sa variété allotropique, le quartz α, est extrêmement répandue à travers le monde dans les bassins d'origine sédimentaire.

Les principaux gisements Algérie (Chelef, Mostaganem, Djelfa) utilisée à l'origine à l'état brut, les sables de silice sont désormais la plupart du temps traités par lavage, classification

granulométrique, séchage, afin de répondre à des spécifications précises. Dans ces conditions, la pureté des sables peut atteindre 99.8%.

Cependant la silice, sujette à des transformations allotropiques et à des réactions avec certains alliages, n'est pas d'un emploi général d'autres matériaux lui sont parfois préférés.

- **La chromite** est le mélange d'oxydes de fer et de chromeF_eO_3, Cr_2O_3 contenant au minimum 50 % de Cr_2O_3. Les gisements principaux sont localisés en Afrique du Sud. Les sables de chromite sont obtenus après des traitements complexes de broyage, de lavage et de classification granulométrique.
- **L'olivine** est le mélange de silicates de fer et de magnésium SiO_4M$g_2$et SiO_4F_{e2} . Les principaux gisements sont en Norvège. Ces sables sont également obtenus par des traitements de broyage et de classification.
- **Le zircon** est le silicate de zirconium Zr SiO_4, présent à faible dose (1 à 2 %) dans les sables de plage d'Australie et de Floride. Les besoins mondiaux annuels sont d'environ 600 000 tonnes
- **Les silice-alumineux**, de formule générale n Al_2O_3, m SiO_2, résultent de la calcination à haute température de produits naturels qui sont des argiles réfractaires et du kaolin, ou sont entièrement synthétisés à partir de silice et d'alumine.

Les produits calcinés sont ultérieurement broyés et classés. Suivant la nature des produits de base, on distingue :

- **les charmottes**, issues d'argiles réfractaires plus ou moins pures, dont la teneur en alumine est en général supérieure à 40 % ; une qualité obtenue à partir de kaolin très pur est connue sous la dénomination commerciale de molochite ;
- **les mellites et sillimanites,** obtenues par synthèse, qui contiennent respectivement 72 et 63 % d'alumine.

I-4-3- Dimensions et formes des grains:

Ces deux caractéristiques constituent les données principales d'un sable de base.

- **La répartition granulométrique** est la répartition massique des grains suivant leur dimension, déterminée par les méthodes décrites dans la suite de cet article. Elle peut être représentée la forme de courbes dans un repère où figurent :

- en abscisse, la dimension décroissante des grains suivant une échelle logarithmique ;
- en ordonnée, deux possibilités :
- pour la représentation cumulative, le pourcentage massique de grains de dimension plus grande que celle considérée.

Exemple: sur la (figure I-1) apparaissent clairement, pour deux sables de base différents [3].

- la répartition granulométrique (étalée dans le cas du sable n° 1 et concentrée dans le cas du sable n° 2), le diamètre moyen correspondant à l'ordonnée 50 % (0,3 mm pour le sable n° 1 ; 0,16 mm pour le sable n°2) ; les sables de fonderie ont généralement un grain moyen compris entre 0,1 et 0,5 mm.

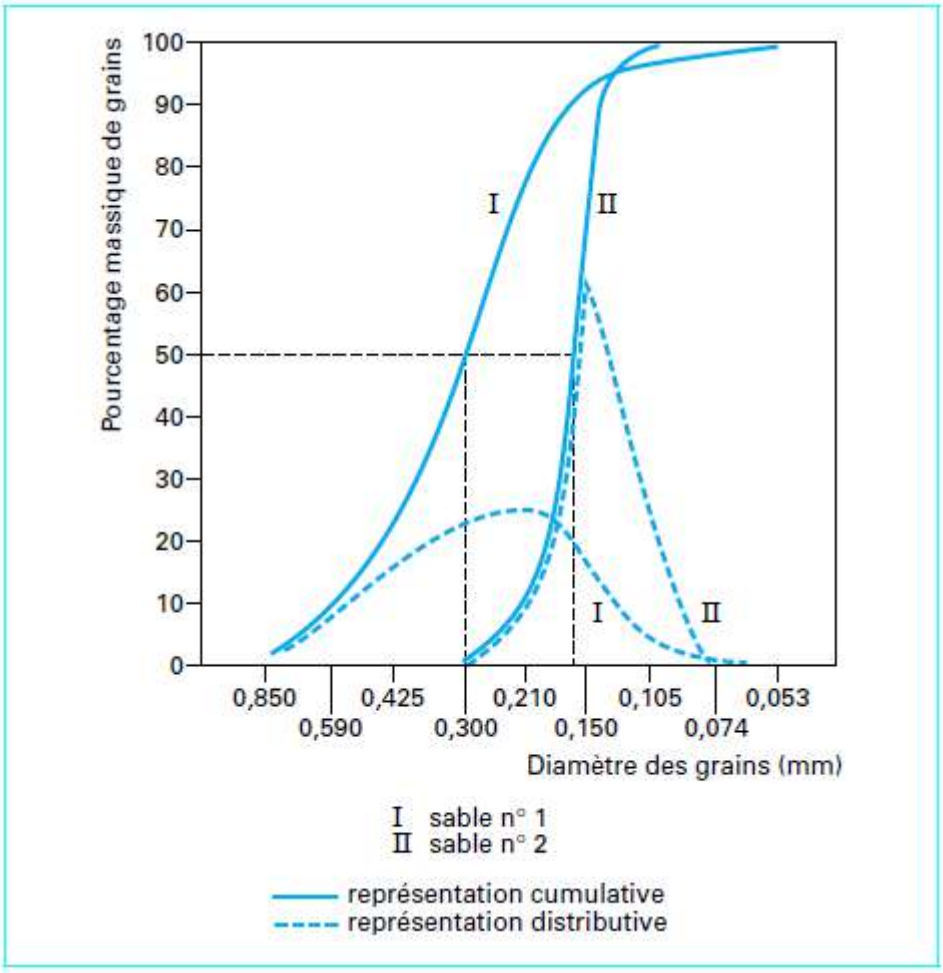


Figure I-1 – Répartitions granulométriques de deux sables de base [3]

- **La forme des grains** : en raison de l'origine naturelle ou de l'obtention par broyage des sables, les grains ne sont jamais parfaitement sphériques. On distingue par examen microscopique des formes arrondies, subangulaires, angulaires ou composées (figure I-3), correspondant à des coefficients d'angularité croissants.

- **La surface spécifique** : la répartition granulométrique et la forme des grains définissent pour un sable donné sa surface spécifique. Exprimée en cm^2/g, elle représente la surface totale développée par un gramme de matériau. Cette donnée est importante, car elle détermine aussi bien la perméabilité du sable de base à l'état serré que le processus d'enrobage par les liants.

I-4-4 Propriétés chimiques*:*

Les propriétés chimiques des sables de base ont une influence, tant vis-à-vis des liants que vis-à-vis des métaux liquides. Vis-à-vis des liants, certains sables de base sont à réaction basique et, par conséquent, incompatibles avec l'emploi de liants acides ; d'autres présentent en surface des matières organiques perturbant l'enrobage. Les sables de base, calcinés à haute température, sont difficilement mouillés par les liants (absence d'ions OH– en surface).

Vis-à-vis des métaux liquides, à haute température, certains sables de base deviennent réactifs. La silice, en particulier, peut se combiner :

- au fer, sous forme d'oxyde pour aboutir à la formation de la fayalite qui fond à 1220°C ;
- au manganèse ;
- au carbone des fontes et des aciers provoquant la décarburation superficielle des moulages.

I-4-5 Propriétés physiques:

Les sables de base aptes à la fonderie sont caractérisés par des propriétés physiques à froid et à chaud.

a-Propriétés physiques à froid:

Les sables de base aptes à la fonderie sont caractérisés par des propriétés physiques à froid et à chaud.

La masse volumique absolue p_a peut varier de 2,5 à 5 g/cm^3 suivant les matériaux disponibles.

Les sables de base ont une masse volumique en vrac $p_v$très inférieure à la masse volumique absolue, du fait que subsistent des espaces vides entre les grains.

On en déduit les deux notions suivantes :

- **La compacité c**, qui est le pourcentage en volume des matières solides dans la masse compactée, exprimée par la formule :

$$c = \frac{\text{pv}}{\text{pa}} \times 100 \qquad (1)$$

- **La porosité p**, qui est le pourcentage de vide dans la masse compactée, soit :

$$p = 100 - c \qquad (2)$$

Exemple: un sable de quartz de masse volumique absolue 2,65g/cm^3et présentant une masse volumique en vrac de1, 6 g/cm^3 une capacité de 60,4% et une porosité de 39,6%.

La compacité et la porosité sont largement sous la dépendance de la répartition granulométrique et de la forme des grains.

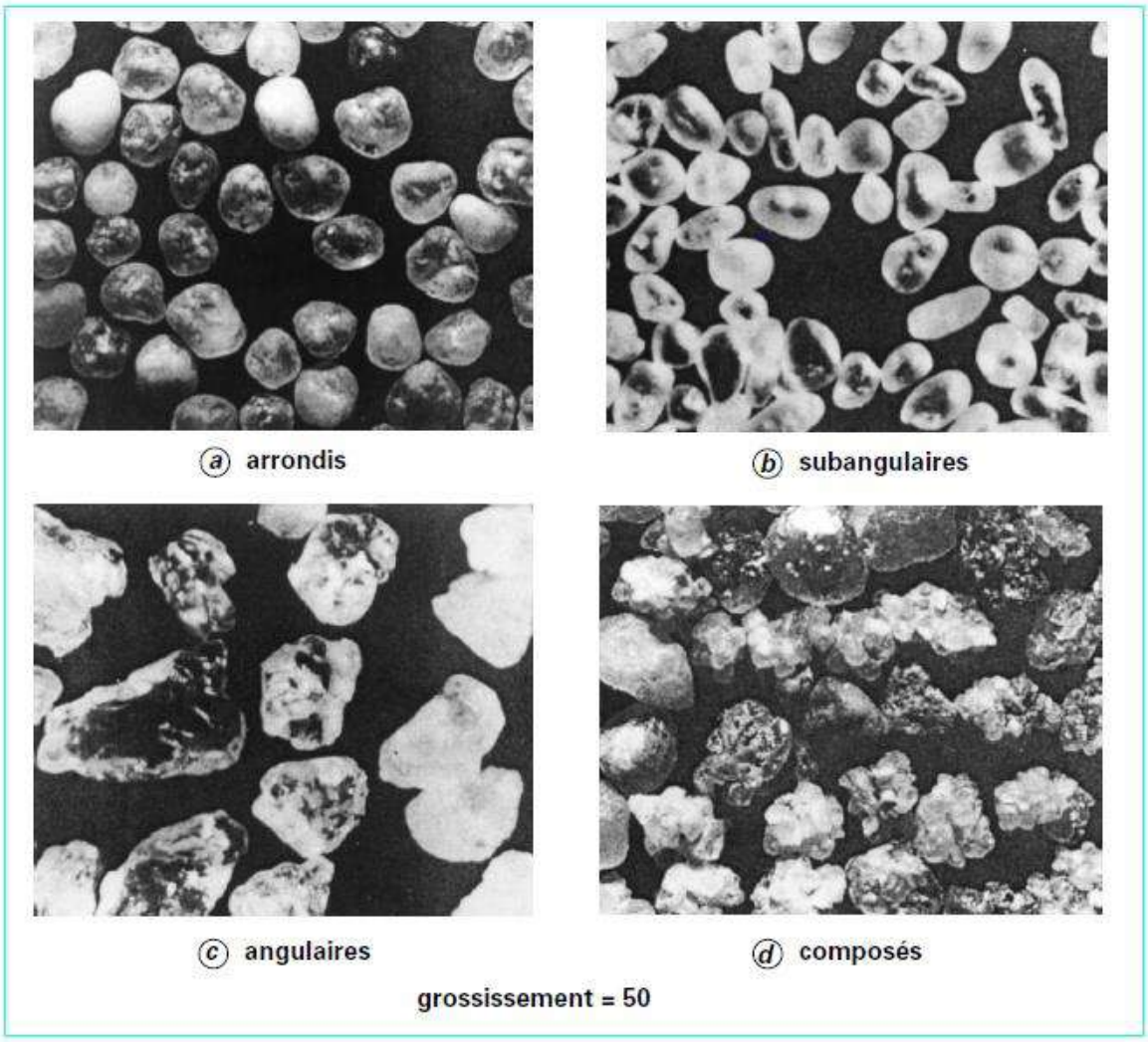


Figure I-2 – Formes de grains [1]

b- Propriétés physiques à chaud:

- **Réfractairité** : la température de fusion, de ramollissement ou de décomposition du sable doit obligatoirement être supérieure à la température de coulée du métal. Certaines impuretés ont une influence très néfaste sur la réfractairité (par exemple, les oxydes de fer, les oxydes alcalins ou les alcalino-terreux).

- **Dilatation** : les différents matériaux disponibles ont des comportements très différents au chauffage, ainsi qu'il apparaît sur les courbes de la (figure I-3). Si le zircon, la chromite, l'olivine et les silico-alumineux ont des courbes de dilatation sensiblement linéaires, le quartz

présente un pic de dilatation très important, lié à la transformation allotropique du quartz α en quartz β à573 °C.

Cette anomalie entraîne des ruptures de moules, ayant pour conséquence de provoquer sur les moulages des défauts du type galle, queue-de-rat, gerce, etc. [4].

De plus, sous l'influence de minéralisateurs (sels de sodium en particulier), le quartz est susceptible de se transformer en cristobalite qui présente une anomalie de dilatation encore plus considérable vers 220 °C.

Une sélection judicieuse des liants et l'apport de divers additifs permettent en partie de pallier cet inconvénient.

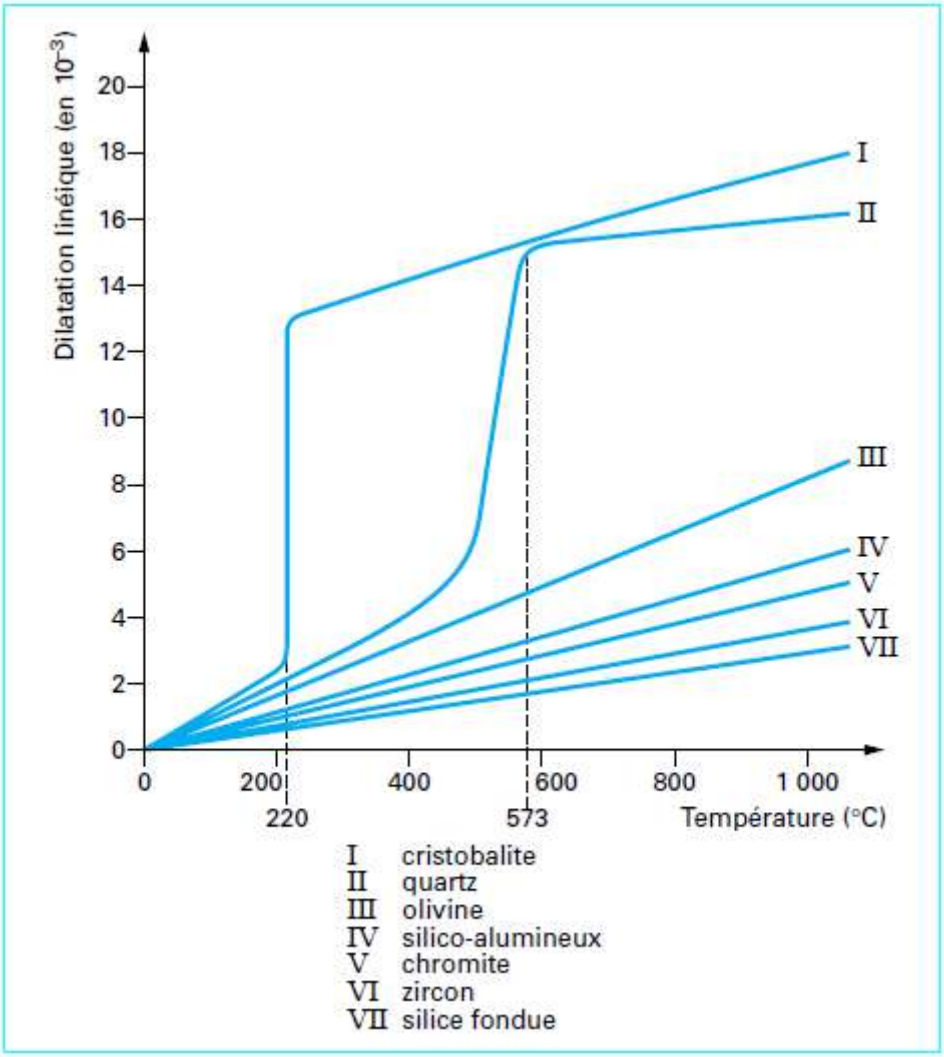


Figure I-3 – Courbes de dilatation de différents sables [3]

- **Capacité thermique et conductivité thermique** : ces propriétés ont une influence directe sur le pouvoir refroidisseur des sables et, par conséquent, sur la structure des moulages.

  En règle générale, les sables les plus denses ont le pouvoir refroidisseur le plus élevé.

  Le zircon et la chromite sont les plus conducteurs. En revanche, les chamottes et la silice sont peu conductrices (figure I- **4**).

- **Mouillage par le métal liquide** : le zircon, la chromite et les silico alumineux sont faiblement mouillés par les métaux liquides, à l'inverse de la silice. Un mouillage aisé entraîne des risques de réactions entre le moule et le métal.

Les principales propriétés des matériaux disponibles sont résumées dans le (tableau I-**1)**

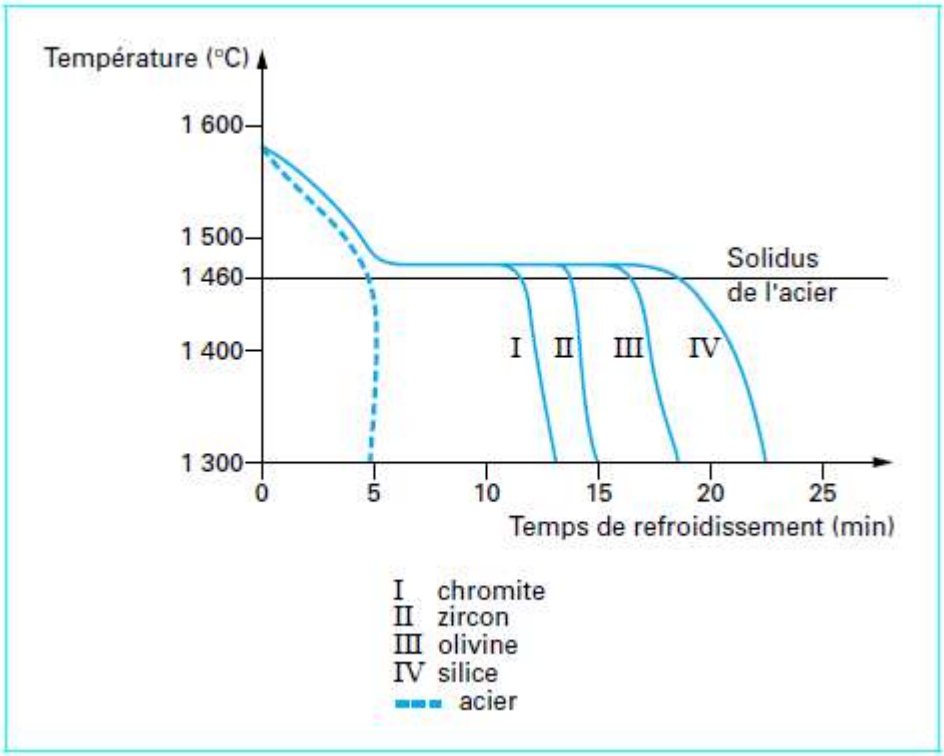


Figure I-4 – Courbes de refroidissement du centre d'une sphère d'acier de 15 cm de diamètre, coulée dans différents sables (D'après C.A. Sanders [5])

Tableau I-1- Propriétés des sables de base disponibles

Propriété	**Silice**	**Chromite (1)**	**Olivine(1)**	**Zircon**	**Chamottes et mullites(2)**
Disponibilités	Très abondante	limitée	limitée	limitée	limitée
Cout	Très bon marché	élevé	moyen	élevé	Moyen à très élevé
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.65	4.3 à 4.5	3.2 à 3.6	4.4 à 4.7	2.5 à 2.7
Température de fusion (°C)	1730	1760 à1980	1540à1760	2000à2200	1300à1800
Stabilité	Bonne	bonne	bonne	excellente	Moyenne à bonne
Dilatation linéique à 1000°C.(en10^{-3})	16	4	8	3	5
Conductivité thermique	Faible	Très faible	moyenne	Très élevée	faible
Mouillage par le métal liquide	Aisé	difficile	possible	difficile	difficile
Acidité-basicité	Acide	Neutre-basique	basique	Acide-neutre	neutre
Masse volumique en vrac (g/cm^3)	1.55à1.60	2.7	1.9	2.8	1.45à1.55

(1) Produit manufacturé.
(2) Produit manufacturé ou synthétisé.

I-5 Méthodes de contrôle de sable:

I-5-1- Analyse granulométrique*:*

L'analyse granulométrique d'un sable comporte deux opérations distinctes :

- le dosage des colloïdes, par convention définis comme toutes particules de diamètre inférieur à 20 µm ;

- la répartition granulométrique, effectuée par le tamisage de la fraction de particules de diamètre supérieur à 20 µm.

- **Dosage des colloïdes** : il s'effectue par sédimentation et application de la loi de Stokes.

D'après cette loi, de diamètre 20 µm et de masse volumique 2650 Kg/m^3présente une vitesse de chute de 2,5 cm/min dans de l'eau à 20°C.

Les colloïdes, préalablement dispersés par un traitement en présence de pyrophosphate de soude, sont éliminés soit par siphonage, soit par lévigation. La différence entre la masse initiale du sable de base et sa masse après la séparation représente la masse des grains de diamètre inférieur à 20 µm.

- **Répartition granulométrique** : elle est effectuée par un tamisage sur une série de tamis de diamètre d'ouverture de mailles décroissant.

La série française (NF X 11-501) n'est pratiquement pas utilisée en fonderie. Seules, les séries américaines (ASTM E 1170) et, dans une certaine mesure, allemande (DIN 1171) sont d'un usage courant.

Les tamis les plus utilisés pris dans ces séries figurent dans le (tableau I-2) La répartition granulométrique, ainsi déterminée, peut alors être mise sous la forme des courbes de la (figure I-1)**.**

L'utilisation de la série ASTM permet, en outre, le calcul de l'indice de finesse. Ce calcul consiste à multiplier le refus sur un tamis par le numéro du tamis précédent, à totaliser les différents produits obtenus et à diviser le total par la masse de l'échantillon tamisé.

Exemple : le (tableau 3**)** donne un exemple de la répartition granulométrique d'un sable de base qui permet le calcul de son indice de finesse F :

$$F = \frac{5.761}{99.7} = 57.8 \qquad (3)$$

Tableau I-2- Séries usuelles de tamis:

Série ASTM (1)		**Série DIN (2)**	
Numéro de tamis N	Diamètre d'ouverture de maille d	Numéro de tamis N	Diamètre d'ouverture de maille d
6	3.360	2	3.000
12	1.680	4	1.500
20	0.840	6	1.000
30	0.590	10	0.600
40	0.420	16	0.400
50	0.297	20	0.300
70	0.210	30	0.200
100	0.149	40	0.150
140	0.105	60	0.100
200	0.074	80	0.075
270	0.053	100	0.060
(1) d'après la norme ASTME1170. (2) d'après la norme DIN1171.			

Tableau I-3-Exemple de calcul d'indice de finesse:

Numéros de tamis N	**Refus %**	**Coefficients multiplicateurs**	**produit**
6	0	3	0
12	0	5	0
20	0.1	10	1
30	0.3	20	6
40	2.9	30	87
50	17.0	40	680
70	39.5	50	1975
100	34.0	70	2380
140	5.4	100	540
200	0.3	140	42
270	0.1	200	20
Fond	0.1	300	30
Total	99.7		5761

Cet indice correspond à un numéro de tamis fictif qui, pris dans la série ASTM, retiendrait 50 % du sable considéré. En outre, l'indice de finesse est représentatif de la surface spécifique théorique d'un sable si l'on suppose les grains parfaitement sphériques. On démontre, en particulier, que pour les sables siliceux, la surface spécifique théorique exprimée en cm^2/g est égale à deux fois l'indice de finesse.

Cependant, l'indice de finesse ne rend pas compte de la répartition granulométrique [6].

En générale, les sables de base ont un indice de finesse compris entre 35 et 140, les plus courants étant situé entre 35 et 75, avec une granulométrie relativement concentrée (90% sur trois tamis).

I-5-2-Contrôles des composites chimiques:

- **Teneur en eau** : le dosage de l'eau est important pour certains procédés d'agglomération qui exigent des sables de siccité complète. Il s'effectue par séchage à l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante. Des méthodes plus rapides, mais moins précises, font appel à des séchages par air chaud, par infrarouge ou par microondes.

Signalons également l'emploi de la bombe Speedy : le sable humide, préalablement pesé, est placé dans une bombe avec un excès de carbure de calcium ; la pression d'acétylène créé est proportionnelle à la quantité d'eau.

- **Masse volumique absolue** [7] elle se mesure par la méthode du pycnomètre.
- **Teneur en colloïdes et en matières organiques** : un échantillon de sable est dispersé dans une solution de pyrophosphate de soude. Après floculation par un acide, les colloïdes se rassemblent en un gel, dont le volume est apprécié. Les matières organiques donnent au liquide surnageant une coloration plus ou moins brune suivant leur teneur.
- **Perméabilité de base** : elle consiste à mesurer le débit d'air susceptible de traverser un échantillon de sable de base compacté, sous une pression différentielle donnée. Elle s'exprime en cm^3 d'air traversant en 1 min, sous une pression différentielle de 1 cm d'eau (soit 100 Pa), un échantillon de sable compacté de 1 cm^3.

La perméabilité est directement sous la dépendance de la surface spécifique réelle du sable et de la masse volumique en vrac. Suivant la finesse du sable et sa répartition granulométrique, elle peut varier de pratiquement 0 à 1 000.

A partir d'une mesure de perméabilité, on peut calculer la surface spécifique réelle et le coefficient d'angularité du sable, égal au rapport de la surface spécifique réelle à la surface

spécifique théorique, la surface spécifique théorique se calculant à partir de l'analyse granulométrique.

Ce coefficient, égal à 1 si le sable est parfaitement sphérique, varie en pratique de 1,10 à 1,60 selon que le sable est arrondi, subangulaire ou angulaire.

- **Acidité-basicité** : cette mesure s'effectue avec un pH-mètre classique. Cependant, pour les sables à réaction basique, il est préférable de déterminer le besoin en acide. Exprimé en millilitres d'une solution aqueuse de 0,1 mol/L de Hcl nécessaires pour ramener 50 g de sable à pH 3, il varie de 0,5 pour le quartz (3 pour la chromite) à 25 pour l'olivine.
- **Analyse chimique complète** : cette analyse est peu pratiquée car difficile à effectuer. Le carbonate de calcium qui constitue une impureté gênante peut être dosé au calcimètre Bernard.
- **Réfractairité** : cette propriété s'apprécie en portant un échantillon 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.

I-6 Liants:

On définit comme liants les produits qui, ajoutés au sable de base, confèrent au matériau de moulage, en premier lieu, une certaines plasticité afin de lui permettre d'épouser la forme du modèle, et, ultérieurement par durcissement, une résistance mécanique assurant la conservation de cette forme jusqu'à l'ultime solidification du métal. Suivant les procédés utilisés, et aussi bien pour la confection de moules ou de noyaux, les liants modernes peuvent être d'origine minérale ou organique.

Nota : on rappelle ici que, en opposition avec l'élasticité, la plasticité est la propriété d'un corps de se déformer lors de l'application d'une contrainte, et de conserver cette déformation lorsque cette contrainte cesse.

I-6-1-Liants minéraux:

I-6-1-1 Argiles et bentonites:

Les argiles sont les liants les plus anciennement utilisés en fonderie. Bien que l'emploi en soit désormais réduit, la fonderie a fait largement usage de sables silico-argileux naturels, mélanges de sables siliceux et d'argiles utilisables à l'état tel quel après humidification. Ces sables sont désormais remplacés par des sables improprement dénommés sable synthétiques, artificiellement composés d'un sable de base et d'une argile pure.

a - Définition et particularités structurales:

Les argiles sont des silicates d'alumine hydratés qui, contrairement aux minéraux classiques cristallisés en réseau tridimensionnel, ne sont cristallisés que selon deux axes ; il en résulte une structure en feuillets, chaque particule élémentaire étant de dimensions mesurables en angströms (soit10^{-10}m), ce qui est caractéristique de l'état colloïdal **[**8].

Autre particularité, les liaisons silice-alumine ne sont pas saturées. La saturation se fait par des cations H^+, Ca^{2+} ou Na^+, qui ont la particularité de pouvoir s'échanger entre eux. Cette capacité d'échange de base (CEB) peut, par exemple, s'expliciter par la réaction :

argile Ca + Na_2CO_3 argile Na_2- Ca CO_3

La CEB est exprimée généralement en milliéquivalents (meq) pour 100 g d'argile.

Nota : rappelons que l'équivalent (e_q) pour un ion donné est le rapport de la masse molaire de cet ion au nombre de liaisons chimiques qu'il engage avec d'autres atomes ou ions dans une combinaison. Par exemple,

1 e_q= 1 g de H^+

1 e_q= 20 g de Ca^{2+}

1 e_q= 23 g de Na^+

La capacité d'échange de base est d'autant plus élevée que l'argile est plus active.

b- Propriétés fondamentales:

Des particularités structurales des argiles découlent des propriétés soulignant leur aptitude à être utilisées comme liants.

- **Comportement en présence d'eau:**

Les argiles sont des matériaux hygroscopiques ; en équilibre avec l'atmosphère, leur teneur en eau varie de 2 à 15 %. 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 (ou à cru).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.

Comportement à la chaleur

- Si l'on soumet une argile à un chauffage progressif, on constate deux plages de départ d'eau :

- entre la température ambiante et 120 °C, correspondant à l'élimination de l'eau hygroscopie ou d'imbibition ;

- entre 450 et 700 °C, correspondant au départ de l'eau de constitution.

En deçà du palier de départ d'eau de constitution, l'argile conserve ses propriétés essentielles d'hygroscopie et de plasticité. Elle peut se réhydrater de façon réversible, mais toutefois de plus en plus difficilement à mesure que l'on se rapproche du palier.

Au-delà du palier, l'argile perd totalement ses propriétés et devient, par conséquent, inactive ou morte.

Enfin, à plus haute température, vers 900-1 000 °C, l'argile subit un réarrangement structural ; elle se cristallise en un réseau tridimensionnel et se transforme en chamotte. Le départ de l'eau de constitution intervient suivant les argiles à des températures plus ou moins élevées, ce qui a une influence sensible sur la durabilité du matériau.

c- Différents types d'argiles:

Les argiles utilisées en fonderie appartiennent à deux espèces minéralogiques distinctes [9]: les kaolinites et les montmorillonites.

- **Les kaolinites** correspondent à la catégorie des argiles dites réfractaires.

De formule générale 2 Sio_2, Al_2O_3, 2 H_2O, soit un rapport molaire équivalent

$$\frac{N_{sio2}}{N_{Al2o3}} = 2 \qquad (4)$$

Avec N_{Al2o3} nombre de moles d'Al_2O_3,

N_{sio2} nombre de moles de Sio_2,

Leur particule élémentaire a une structure en feuillet composée d'une couche de silice et d'une couche d'alumine.

Ces argiles ont une capacité d'échange de base faible (10 meq pour 100 g), un gonflement nul et confèrent aux sables une cohésion à vert faible, mais, en revanche, une cohésion à sec (après durcissement) et à chaud élevée.

Leur durabilité est faible.

A ce type d'argiles peuvent se rattacher les illites et les halloysites, très souvent présentes dans les sables silico-argileux naturels.

- **Les montmorillonites** sont généralement dénommées bentonites. De formule générale 4 Sio_2, Al_2O_3, H_2O, mais en réalité ayant un rapport molaire équivalent $\frac{N_{sio2}}{N_{Al2o3}}$ compris entre 3 et 5, leur particule élémentaire est composée d'une couche d'alumine interposée entre deux couches de silice.

Ces argiles ont une capacité d'échange de base élevée (60 à 100 meq pour 100 g) et sont particulièrement actives. Cependant, leurs propriétés de fonderie diffèrent sensiblement suivant la nature du cation absorbé.

En effet on distingue :

- **les bentonites sodiques naturelles**, originaires essentiellement de l'état de Wyoming aux États-Unis, qui présentent des caractéristiques de plasticité et de gonflement élevées ; si leur cohésion à vert est moyenne, leur cohésion à sec et à chaud est élevée, au prix toutefois d'une réfractairité faible ; leur durabilité est la plus importante de celles des argiles utilisées ;
- **les bentonites calciques naturelles**, très répandues autour du bassin méditerranéen ainsi qu'en Bavière, qui 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 et leur durabilité sont moyennes.

Une pratique répandue aux États-Unis consiste à utiliser un mélange des deux types de bentonites, afin d'optimiser les caractéristiques à vert et à chaud.

Cependant, en Europe, on préfère généralement utiliser des bentonites sodiques activées artificiellement, résultant d'un traitement de bentonite calcique naturelle par du carbonate de soude. Par suite de l'échange de base, on réalise ainsi un produit doté des caractéristiques les plus intéressantes des deux types de bentonites, à savoir:

Tableau I-4 – Propriétés des sables de fonderie liés avec différents types d'argiles

Propriétés	Kaolinites	Illites halloysites	Bentonite sodique naturelle	Bentonite calcique	Bentonite sodique activée
Réfractairité	Elevée	Elevée à moyenne	Faible	moyenne	faible
hygroscopie	Faible	faible	Elevée	moyenne	Elevée à moyenne
Pouvoir gonflant	Faible	faible	Elevée	moyen	Elevée à moyen
Cohésion à vert	Faible	faible	moyenne	élevée	élevée
Cohésion après séchage à l'air	Elevée	élevée	Faible	faible	faible
Cohésion à sec	Modérée	modérée	Elevée	moyenne	Intermédiaire(1)
Cohésion à chaud	Elevée	élevée	Très élevée	faible	Intermédiaire(1)
Aptitude au chaud	Modérée	modérée	mauvaise	bonne	modérée
Aptitude au débourrage(2)	Excellente	bonne	mauvaise	bonne	Intermédiaire(1)

(1) **Intermédiaire**: entre et élevée.

(2) **Débourrage:** décochage.

- un gonflement et une cohésion à vert élevés,
- des cohésions à sec et à chaud intermédiaires. Par ailleurs, le carbonate de soude présent confère à la bentonite une résistance à la désactivation, sous l'influence des ions Ca^{+2} très souvent présents dans l'eau d'imbibition, bien supérieure à celle des bentonites naturelles.

Le (tableau I-4**)** résume les propriétés des différentes catégories d'argile.

I-6-2 Silice colloïdale et silicates solubles:

a-Silice colloïdale:

Mise en œuvre sous forme de sols de silice dans l'eau ou dans l'alcool (après hydrolyse acide du silicate d'éthyle), la silice colloïdale est utilisée essentiellement dans des procédés spéciaux et également comme liant pour des enduits réfractaires.

b-Silicates solubles:

Parmi les silicates solubles, seul le silicate de soude est utilisé en fonderie. De formule générale n SiO_2, p Na_2O, q H_2O, un silicate de soude se présente sous forme d'un liquide plus ou moins visqueux et se définit complètement par sa teneur en matières solides et son module R :

$$R = \frac{m_{sio2}}{m_{Na2o}} \qquad (5)$$

Avec m_{Na2o} masse de Na_2O,

m_{sio2} masse de SiO_2,

La teneur en matières solides des silicates usuels varie de 28 à 51 % et leur module de 1,9 à 3,9.

Outre leur puissant pouvoir adhésif, les silicates de soude présentent deux caractéristiques de base :

-**la viscosité**, qui dépend à la fois de la teneur en matières solides et du module [10] ; à teneur en matières solides constante, la viscosité augmente avec le module, et à module constant avec la teneur en matières solides ;

- **la réfractairité**, qui est faible en raison de la présence de soude, et devient très basse pour les bas modules ; il s'ensuit des difficultés systématiques de débourrage pour les sables liés au silicate de soude, qui peuvent être en partie surmontées par addition d'adjuvants.

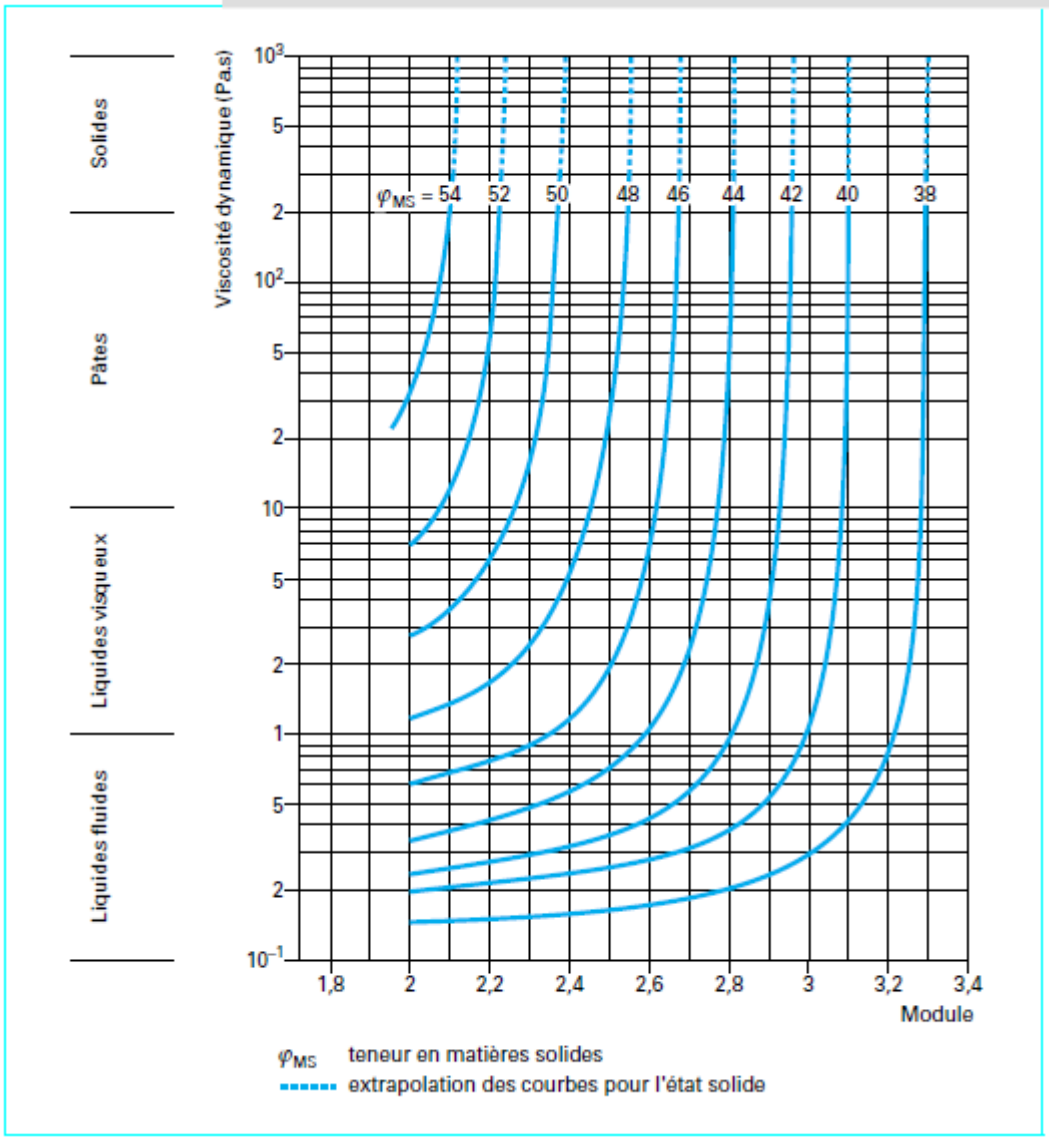


Figure I- 5 Viscosité du silicate de soude en fonction du module et de la teneur en matières solides[3]

Après incorporation de 3 à 5 % de silicate de soude, les sables présentent une plasticité suffisante pour être mis en forme au contact d'un modèle. La phase de durcissement peut être obtenue par les trois voies citées ci-après.

- **Augmentation de la teneur en matières solides** : la perte d'eau peut résulter soit d'un séchage à l'air ou à l'étuve, soit de l'addition d'un corps avide d'eau (argile réfractaire, matière amylacée). Cette dernière pratique conduit à l'obtention d'une cohésion à vert suffisante pour permettre le démoulage.
- **Augmentation du module** : le module peut être modifié en incorporant dans le sable des acides faibles, soit des sels d'acides.

Deux agents sont d'utilisation courante :

a) Le gaz carbonique CO_2[10] dont l'insufflation dans un sable au silicate serré au contact d'un modèle provoque son durcissement. Le CO_2 (en réalité, l'acide carbonique H_2CO_3) neutralise une partie de la soude du silicate et provoque ainsi une augmentation du module ; la réaction est très rapide et la consommation de CO_2 ne dépasse pas 1 % de la masse du sable, si les conditions de gazage sont correctes. Les qualités du silicate requises pour cette application correspondent à des modules compris entre 2,4 et 2,6 avec une teneur en matières solides centrée sur 44 % ; en effet, les modules plus faibles conduisent à des temps de gazage trop importants, alors qu'avec les modules plus élevés on risque des phénomènes de sur gazage, car il importe de ne pas décomposer complètement le silicate (phénomène qui intervient à un module supérieur à 4) sinon la masse perd toute cohésion.

b) Les esters de polyalcools, parmi lesquels les esters de mono, di et triacétates de glycérol sont les plus utilisés; ils sont incorporés au sable en même temps que le silicate, la prise s'opérant selon le processus suivant :

• dans un premier temps, l'ester s'hydrolyse sous l'action de la soude et se scinde en acide acétique et glycérol ;

• dans un deuxième temps, l'acide acétique réagit sur le silicate pour en augmenter le module.

La réaction est relativement lente (de 20 min à 3 h) et laisse le temps de serrer le sable sur le modèle ; l'inconvénient de cette technique est la nette tendance à la reprise d'humidité des sables, due à la présence de glycérol.

- **Augmentation conjuguée du module et de la teneur en matières solides** : ce mécanisme de prise résulte de l'addition, à un sable silicaté, de silicium pur ou de ferro-silicium en poudre [11].

Le silicium, en effet, réagit, d'une part, en s'incorporant au silicate de soude, ce qui a pour effet d'augmenter la teneur en silice, donc le module, d'autre part, en décomposant l'eau du silicate. Cette réaction exothermique a pour effet d'échauffer le sable, et donc d'entraîner une déshydratation. La réaction est lente, mais elle aboutit à l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées et stables.

I-6-3 Liants phosphates:

Deux procédés récents mettent en œuvre des liants à base d'un couple phosphate oxyde :

- CORDIS (BORDEN) utilise un phosphate de soude en solution. Le durcissement est obtenu sans réaction chimique, par simple déshydratation. Le moyen préconisé consiste à faire traverser la masse de sable par un courant d'air chaud (environ 100 °C) [40] ;

-ECOSET (ASHLAND) fait appel pour le durcissement à une réaction chimique entre un acide phosphorique et un oxyde. Une variante du procédé consiste à provoquer un durcissement rapide au contact d'outillages chauds.

I-6-4 Liants organiques:

Longtemps constitués par des produits naturels ou faiblement manufacturés, les liants organiques utilisés en fonderie font désormais appel à toutes les ressources de la chimie moderne. Ils ont cependant tous un caractère commun ; leur aptitude à durcir par réticulation pour aboutir, suite à des réactions de polyaddition ou de polycondensation, à des composés infusibles à structure tridimensionnelle.

Autre caractéristique importante, le stade de durcissement du sable intervient de préférence au contact du modèle, ce qui constitue une garantie de fidélité de prise d'empreinte, donc de précision dimensionnelle [12].

Cependant, il est important de souligner que, de par leur nature, ces liants confèrent des propriétés de résistance mécanique maximales aux sables à froid, avant la coulée, mais que l'effet thermique dû à la coulée des métaux liquides entraîne une dégradation plus ou moins accentuée de leurs caractéristiques.

La mise en œuvre de certains liants a donné lieu à la mise au point de procédés spécifiques qui seront également décrits dans ce paragraphe.

Nota : pour plus de renseignements sur les procédés de moulage, le lecteur consultera utilement les articles spécialisés de la rubrique Fonderie et moulage de ce traité.

I-7 Adjuvants :

Sous la dénomination d'adjuvants, on regroupe tous les produits qui, ajoutés aux sables, confèrent à ces derniers des propriétés autres que la résistance mécanique, mais sont néanmoins indispensables à la réussite des moulages :

- soit au moment de la mise en œuvre des sables ;
- soit en modifiant le comportement des sables vis-à-vis des métaux liquides.

I-7-1 Adjuvants générateurs d'atmosphère réductrice :

Ces produits sont destinés, particulièrement dans le cas de la coulée des métaux ferreux, à prévenir la formation d'oxydes susceptibles de réagir avec les composants de base des sables. Le décapage des pièces se trouve ainsi grandement facilité.

Ce sont très généralement des produits carbonés, dont l'efficacité se définit par leur aptitude à produire du carbone brillant au cours de leur décomposition à haute température.

Le plus couramment utilisé demeure le noir minéral. C'est un charbon gras finement pulvérisé, à haute teneur en matières volatiles (supérieure à 30 %). Présent dans le sable au taux de 2 à 7 %, il laisse, après la coulée, du carbone fixe plus ou moins cokéfié, pouvant jouer un rôle de régulateur d'humidification et d'agent anti dilatation.

Cependant, son emploi étant générateur d'empoussièrement des ateliers, des substituts moins polluants peuvent le remplacer. Il s'agit de produits à haute teneur en matières volatiles et à pouvoir générateur supérieur de carbone brillant tels que :

- les brais de pétrole,
- des huiles minérales,
- du polystyrène en poudre.

Du fait de leur activité, ces produits sont incorporés à des taux de l'ordre de 1 %. Il est toujours remarque qu'à l'inverse, certaines résines fortement génératrices de carbone brillant, telles que les novalaques ou les polyuréthannes doivent, dans le cas de la coulée des aciers, recevoir en complément des agent oxydants, tels que l'oxyde magnétique $F_{e3}\ O_4$ pour combattre le défauts d'absorption de carbone. Pour la coulée d'alliages du magnésium, particulièrement oxydables, on utilise un additif du soufre, de l'acide borique ou des éthylène-glycols.

I-7-2- Agents de débourrage:

Leur addition est souvent nécessaire pour faciliter la destruction des moules et des noyaux après la coulée, certains liants minéraux, tels les silicates alcalins et les ciments, conservant une résistance résiduelle importante.

Dans ce cas, l'incorporation de produits organiques de type sucres (glucose ou saccharose) s'avère efficace.

I-7-3- Agents anti pénétration:

L'incorporation d'un faible pourcentage de particules fines (silice, chamotte, zircon, talc) permet de limiter le phénomène de pénétration de métal liquide dans les pores du sable en formant des composés fusibles et visqueux obturant les pores.

Sont également très utilisés les oxydes de fer, tels que l'oxyde de fer rouge ($F_{e2}O_4$) et le magnétite ($F_{e2}O_4$), qui se décomposent à haute température en formant l'oxyde FeO. Ce dernier se combine avec la silice pour aboutir à la fayalite (Fe SiO_4) qui fond à 1 220 °C.

I-7-4 Agents anti dilatation:

L'anomalie de la dilatation de la silice à 573 °C conduit à la formation sur les pièces de défauts du type galle, dartre, friasse, etc. [6], qui peuvent être combattus par des additifs variés.

I-7-5 Agents mouillants et fluidifiants:

Ces agents sont destinés à faciliter la mise en forme des sables au contact des modèles. Ce sont en général des tensioactifs de type anionique ou cationique qui, incorporés au taux de quelques millièmes, abaissent la tension superficielle du liant et donc les forces de liaison.

A l'extrême, l'addition massive de tensioactif moussant permet de réaliser des sables qui, liés au silicate de soude-laitier de haut fourneau, prennent une consistance crémeuse et sont parfaitement coulables. Leur mise en œuvre est connue sous le nom de procédé liass en Russie et de procédé CTIF-LISA (Centre technique des Industries de la Fonderie-LISA).

I-7-6 Agents anti collage:

L'incorporation d'émulsions de silicone, d'huile minérale, de pétrole ou de stéarates, permet de lutter contre la tendance de certains sables à adhérer aux modèles. Leur action peut être complétée par des agents de démoulage.

CHAPITRE II

Préparation du sable de moulage

II-1 Introduction:

Le sable de moulage qui, après serrage, constitue une masse réfractaire chargée de:

- prendre l'empreinte extérieure démoulable d'un modèle,
- soutenir les noyaux donnant les formes non démoulables,
- résister à l'agression mécanique et thermique du métal
- donner une pièce de qualités définie.

II-2 Qualités souhaitées:

- sable flou se mettant facilement en place au moulage,
- cohésion et plasticité pour démouler sans arrachement,
- serrage homogène et suffisant des empreintes,
- résistances autorisant la manipulation des moules et la poussée du métal,
- réfractairite et absence de réactions néfastes à la coulée,
- séparation aisée de la pièce au décochage,
- état de surface correct après grenaillage (décapage),
- prix de reviens favorables/marché,
- conforme par rapport aux normes environnementales.

II-3-Les matières de moulage de fonderie

Les matières de moulage de fonderie constituent en sable, argile, noir minéral agglomérant.

II-3-1 Sables de fonderie:

Sable: matière naturel constitué de silice, zircon, olivine chromite, magnésite,……

Ce sont des sables siliceux qui sont employés le plus souvent en fonderie.

a-sable à base de silice: La base des sables siliceux est la silice SiO_2 (quartz).

b-sable à base de zircon: composé de 67% ZrO_2 et 33%SiO_2.Sa température de fusion est très grande on l'utilise pour les grandes pièces en acier.

c-sable à base de d'olivine : 23%Mg O;42%F_eO et 35%SiO_2.Sa température de fusion est de 1200-1900°C cela dépend des impuretés et du rapport entre MgO et F_eO.

L'olivine est utilisée aussi comme matière réfractaire de fonderie.

d-Sable à base de chromite:F_eO - $C_{r2}O_3$ 35- 60% $C_{r2}O_3$ T_f:1800°C, matière très réfractaire utilisée pour la fabrication des pièces en acier.

II-3-2 Sable neuf quartzeux (siliceux):

Le sable siliceux est le matériau le plus utilisé. Généralement, à une granulométrie de 50 à 55 AFS est choisie pour la fonderie des matériaux ferreux, tandis que les granulométries fines de 80 à 120 AFS sont réservées à des matériaux non ferreux [12]

La répartition des grains dans la courbe granulométrique du sable a une grosse importance ; un sable dont les grains sont de trois ou quatre dimensions différentes supportent mieux les chocs thermiques, sans se fissurer, qu'un sable de granulométrie concentrée sur un ou deux tamis.

Des grains de forme semi-angulaire et enrobés d'une mince pellicule d'argile donneront une surface de moule régulière tout en assurant une bonne perméabilité au moule.

II-3-3 Composition chimique et minéralogique:

Dans le sable siliceux, le constituant de base et le quartz α.

Le sable neuf quartzeux doit correspondre aux exigences suivantes:

- % SiO_2 % mini98;
- % Cao+% Mg 0.5 à 1% au maxi;
- % $K_2O + \%Na_2o$ 0.1_0.5 au maxi;
- $\%Fe_2O_3$+$\%Al_2O_3$ 0.5% au maxi;

Ces impuretés abaissent la refractairités du sable.

- Grosseur moyenne des grains 0.2-0.3mm;
- Degré d'uniformité des grains 65-85%;
- Matière en suspension (MS%) 0.5-2%au max
- Perte au feu 0.5% au max.

Suivant le (tableau II-1)la silice Sio_2 peut être suivant les conditions de température et de pression ,cristallisée sous forme de quartz α, β, de tridymite, ou cristobalite[13].

Tableau II-1:transformation de la silice en différents forme selon la température.

Température	**Cristallographie de SiO_2**	**Dilatation**
Ambiante	quartz α	-
173°C	quartz β	1.5%
867°C	tridymite	-
1470°C	cristobalite	3- 5%
1730°C	Silice amorphe	-

Il est intéressant d'étudier les transformations de phases, car les températures mises en jeu en fonderie de fonte et d'acier sont telles, qu'il y a transformation suivant les gradients de température de mouler.

En fonction de la température, le quartz α se transforme en quartz β à partir de 573°C (anomalie bien connue de la dilatation de la silice). Cette transformation et réversible.

Dilatation de 1.5%

Le quartz β se transforme en suite en tridymite aux environ de 867°C.

A partir de 1470°C, le tridymite se transforme en cristobalite qui est une forme stable.

Dilatation de 3 à 5 %

Dans tous les cas, il s'agit de silice cristallisé de silice cristallisé et non de silice amorphe, puisque le point de fusion n'a pas été dépassé.

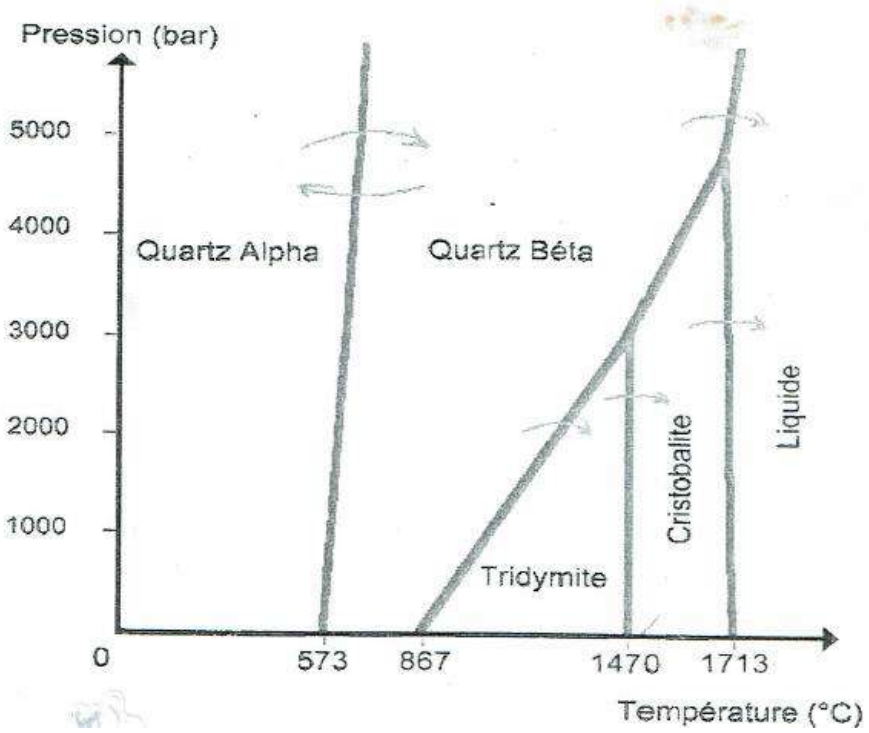


Figure II-1: Transformation de quartz suivant les gradients de température du moule.

II-3-4 Détermination de la granulométrie et forme des grains:

II-3-4-1 Contrôle réception des sables:

Il ne faut pas oublier le contrôle réception de sable serra différents 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.

- **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 de moulage 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 noyautages s'il est rapidement.

- **Granulométrie:**

La méthode généralement employée en fonderie est la méthode AFS (Américain Foundrymen's Sociéty). Cette méthode consiste à faire passer 100g de sable séché préalablement lavé afin d'éliminer les grains dont le diamètre est inferieur à 0,020mm ou < 20 µm, par vibration dans une série de 11 tamis superposé d'ouverture de mailles définies dont les dimensions des ouvertures de mailles sone décroissantes [14].

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.

Les graphes suivants montrent quelques granulométries rencontrées en fonderie française.

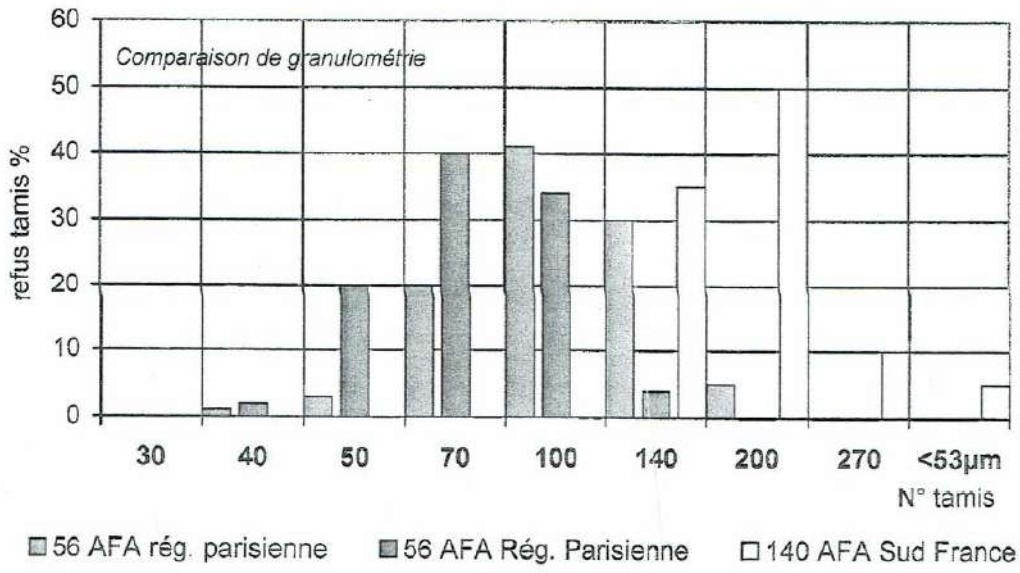


Figure II-2: comparaison des granulométries d'un sable de fonderie[14].

On constate que les sables siliceux les plus utilisés en fonderie d'indice de finesse autour de 55AFS, n'ont pratiquement pas de fraction intérieure à 80µ.

Par contre, dans certaines applications, on utilise des sables très fin d'indice de finesse de l'ordre de 140 AFS.

Dans ces sables, les fractions de finesse sont plus importance.

Tableau II-2: Cas d'exemple : Analyse granulométrique du sable de Chlef (traité)

Tamis on ordre	Ouverture de maille en mm	Refus de criblage en %	Coefficient multiplicateur	produit
1	1,4	-	3	-
2	1	-	6	-
3	0,710	-	9	-
4	0,5	0,750	20	15
5	0,355	10,300	30	309
6	0,250	49,100	40	1964
7	0,2	26,100	53	1383,3
8	0,180	7,500	65	487,5
9	0,125	4,900	105	514,5
10	0,09	0,700	165	111,5
11	0,063	0,500	210	105
12	Fond	0,150	300	45
Total		100		4938,8

- **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%

- **Détermination de la catégorie:**

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

- **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 08groupe universels représentés dans (le tableau II-3) [15].

Tableau II-3: les groupes du 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.

- **Détermination de l'indice de finesse (AFS):**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:

$$\mathbf{AFS} = \sum \boldsymbol{a}\mathbf{i} \times \mathbf{ri} / \sum \boldsymbol{r}\,\boldsymbol{i}$$

$\mathbf{r_i}$: Le résidu de sable dans chaque tamis (tableau II-1).

$\mathbf{a_i}$: Le coefficient multiplicateur pour chaque tamis (tableau II-1).

Donc **AFS = 49388,8 / 100 = 49 AFS**

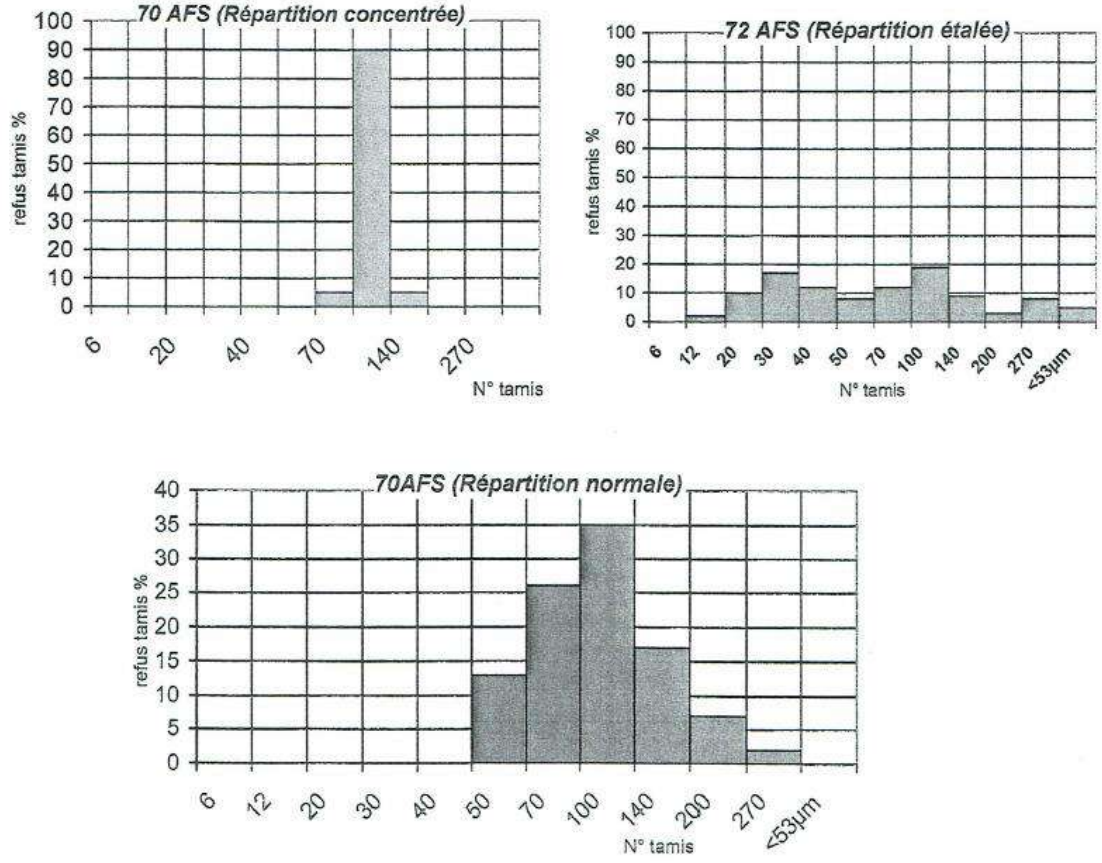


Figure II-3: Histogrammes de trois sables différents de 72 AFS avec des répartitions granulométrique totalement différentes[13].

Tableau II-4: Relation entre indice de finesse et dimensions moyennes des grains en mm **:**

Métal coulé	**Type de pièce**	**Caractéristiques du sable**	
		AFS	Dimension moyenne des grains en mm
Acier	Grosses et moyennes pièces petites pièces	<50 50 à 70	0,225 min 0,255 à 0,180
Fonte grise	Grosses pièces moyennes pièces petites pièces	40 à 70 70 à 100 100 à 200	0,360 à 0,180 0,180 à 0,125 0,125 à 0,060
Alliage cuivreux	Grosses pièces moyennes pièces petites pièces	100 à 140 140 à 200 100 à 200	0,125 à 0,085 0,085 à 0,060 0,085 à 0,060
Alliage légers	Grosses pièces moyennes pièces petites pièces	140 à 200 140 à 200	0,085 à 0,060 0,085 à 0,060

II-3-5 Détermination du diamètre moyen des grains et le degré d'uniformité:

Sont déterminés à l'aide de la courbe des valeurs cumulées de la composition granulométrique du sable. Cette courbe est construite d'après les coordonnées suivantes:

-l'axe des abscisses – le logarithme décimale de la grandeur des mailles des tamis.

-l'axe d'ordonnés la quantité du sable en (%) qui pénètre à travers le tamis envisagé (qui se trouve dans des tamis inferieurs par rapport au tamis envisager) [13].

Nous traçons une horizontale du point 50% jusqu'à la courbe S, ensuite nous abaissons une perpendiculaire sur l'axe des abscisses, ainsi nous déterminons le diamètre moyen égal à 0,26 mm.

Pour la détermination du degré d'uniforme C on calcule d'abord 2/3 dm et 4/3 dm. Puis

On détermine Log 2/3 dm et Log 4/3 et on établit ces points sur l'axe des abscisses, on rétablit deux perpendiculaires jusqu'à la courbe et puis en trace deux ligne horizontales jusqu'à l'axe d'ordonnés, on obtient 2 points A et B (voir figure), et on calcule le degré d'uniformité DU

DU% = A% - B% 4/3 × 0,26 = 0,34 2/3 × 0,17 = 0,17 mm

DU = 83%.

II-3-6 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-3-7 Impuretés (matière de suspension MS%):

On peut déterminer d'abord la teneur en éléments inferieurs à 20 µm.

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-3-8 Perte au feu:

La perte au feu doit être inferieur à 1%?, des pertes au feu plus élevées indiquent la présence des substances nocives, par exemple: des substances organiques.

II-3-9 PH:

A contrôler, surtout pour le sable de noyautage. Un pH basique n'est pas du tout gênant pour le sable de moulage, mais il l'est pour les sables à noyaux.

L'utilisation d'un pH mètre et recommandé. La valeur doit être proche que possible de 7.

Dans même esprit, la demande acide est à effectuer.

II-3-10 Forme des grains:

La forme des grains a une grande importance sur le comportement du sable lors de la coulée (dilatation plus importante des grains angulaires).

L'angulosité est estimée grâce au rapport de la surface spécifique réelle et de la surface spécifique théorique.

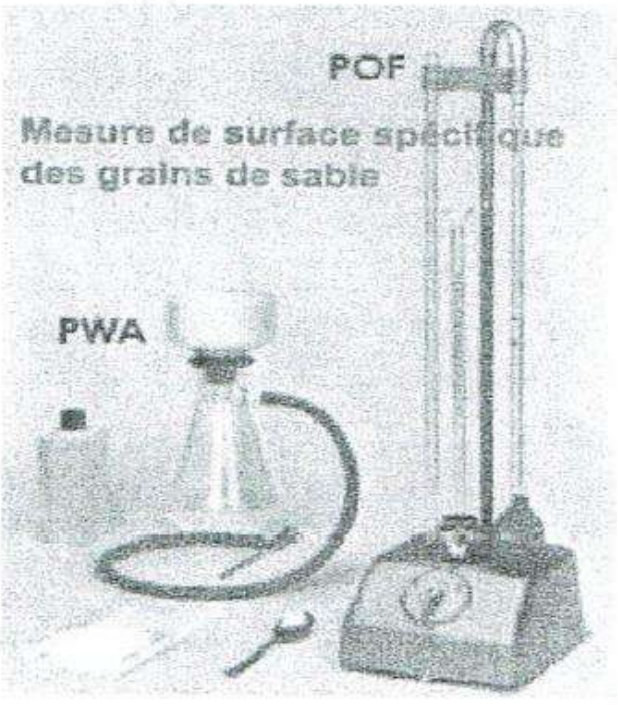


Figure II-4 appareille pour mesure la surface spécifique réelle

II-4 L'argile (la bentonite):

II-4-1-Qu'est-ce que la bentonite? :

Il s'agit d'une argile dont le constituant principal est la montmorillonite.

La montmorillonite : constituant principale : silicate d'alumine hydratée ou de magnésie hydratée.

La formule chimique des argiles ordinaires : Al_2O_3 . 2$Si o_2$. NH_2O.

L'alumine hydratée combinée à la silice donne de l'argile de couleur blanche, douce ou toucher, très réfractaire .Suffisamment mouillée, elle forme une pate liante facile à façonner **[17].**

L'eau contenue dans l'argile se présente sous deus formes:

a-Eau de constitution: donne la vie à l'argile et ne disparait qu'a plus de 300°C au de-de là de cette température, elle perd toutes ses qualités utiles de moulage, devient morte, le sable est dit brulé .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 perde son pouvoir liant .C'est cette partie inutile qu'il faut éliminer par dépoussiérage et remplacer par une addition de bentonite.

b- Eau d'addition ou d'imbibition: qui conditionne l'humidité. Une plus au moins grande humidité donnera une moins au plus 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 étuvée.

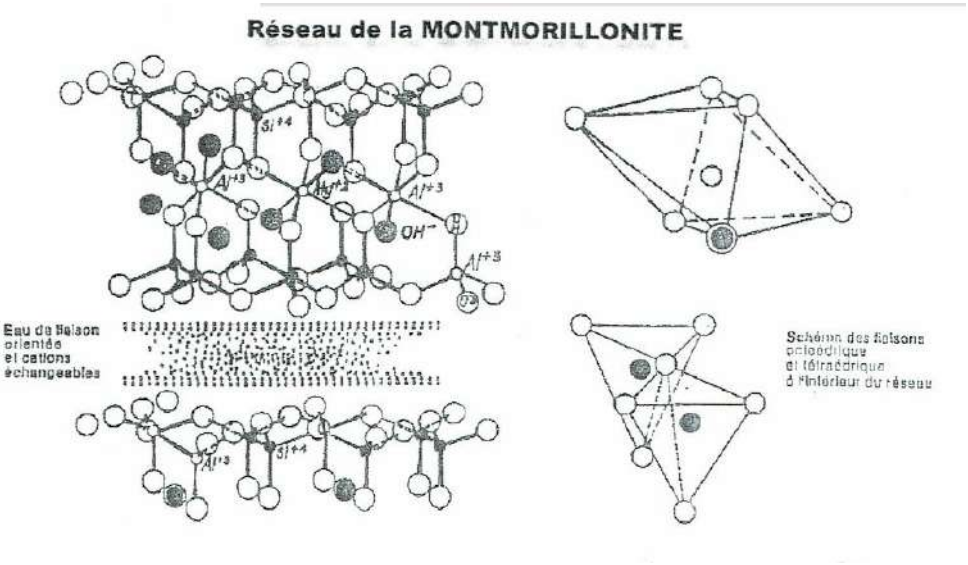
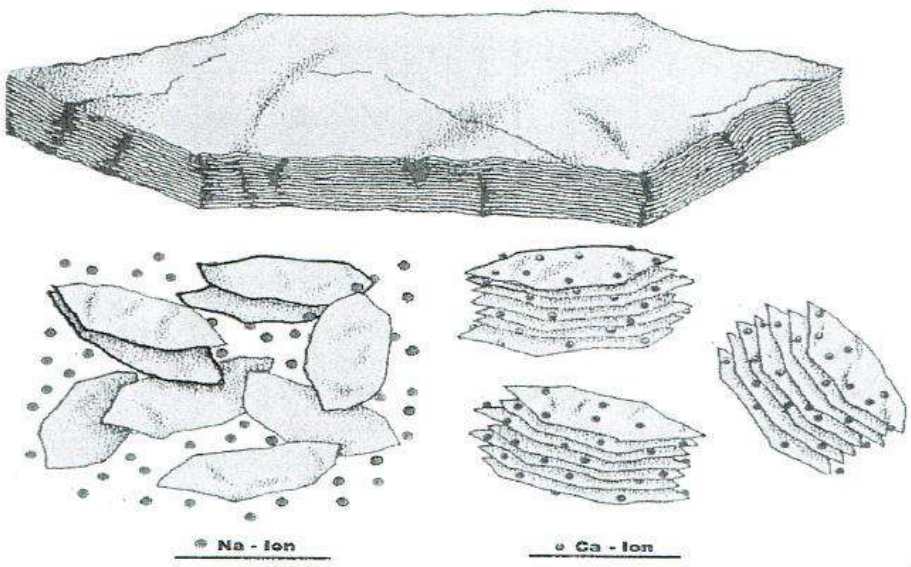


Figure II-5:Réseau de la montmorillonite.

c-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 constitué de Al_2O_3.Et 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.



FigureII-6 :structure en feuillets de la bentonite.

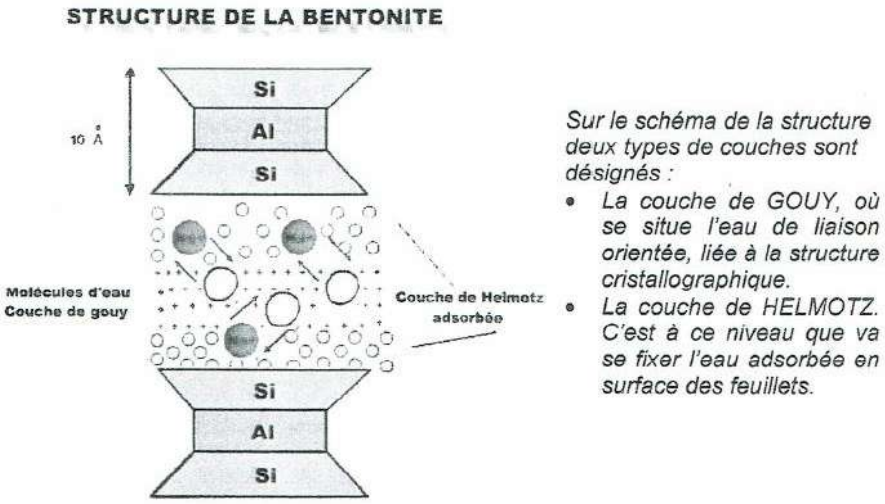


Figure II-7 : structure de la bentonite.

II-2 Classification des argiles et position de la montmorillonite:

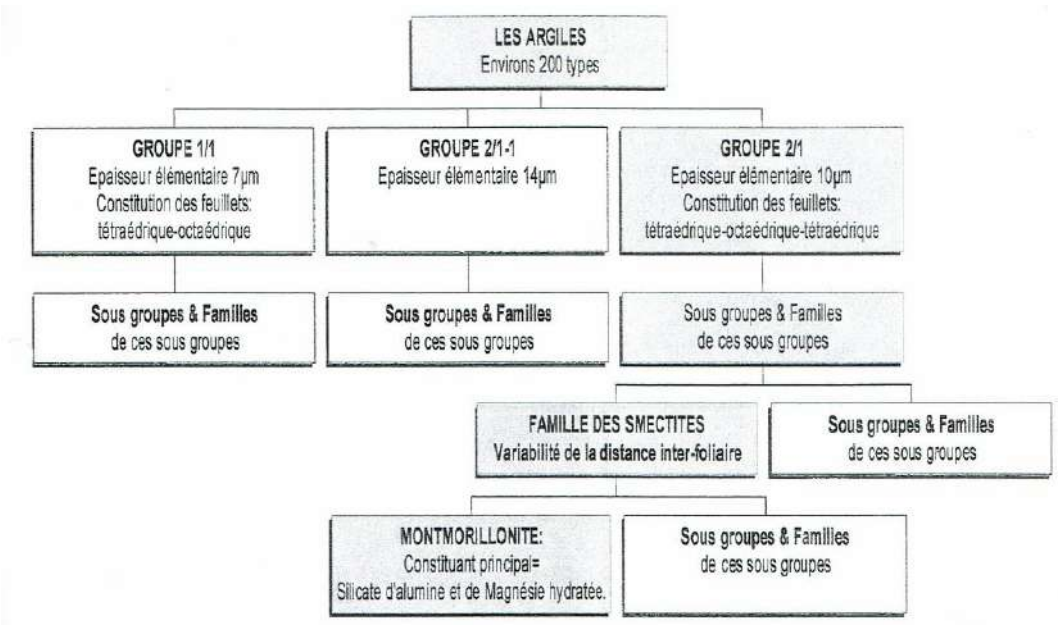


Figure II-8: constituants principales de la bentonite [16].

II-5 Noir minérale:

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 vert ou d'enduit.

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-CO_2, créant un milieu réducteur dans le moule.

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

Analyse typique de noir minérale

produit	Etat physique	Carbone brillant	Matière volatiles	Cokes résiduels	Cendres	Soufre	Azote	Eau
Noir minérale	Pulvérulent	10	36	64	5.5	1	0.8	2

MV = 100-cokes résiduels.

Cokes = résidu de calcination oxydante à 900°C.

Cendres = résidu de calcination oxydante.

CB = résidu de calcination dans un appareillage particulier.

II-6 Propriétés des sables de moulage (moulage à vert):

II-6-1 Plasticité ou corps du sable:

On dit qu'un sable du corps lorsque '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 dépond de nombreux facteurs:

a-Finesse de sable: on constate que 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.

b- quantité et qualités 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.

Qualités d'argile = son pouvoir de gonflement par l'eau.

c-Humidité de l'argile: la plasticité augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour une teneur en humidité qui varié avec la qualité de l'argile et la finesse du sable.

Au- delà de cette teneur, l'argile se transforme en boue.

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

- **Caractérisation de la plasticité:**

Elle est caractérisée par:

-La résistance au cisaillement: 0,19 à 0,26 Kg/cm^2.

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

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

Plasticité = Résistance au cisaillement / Résistance à la compression.

II-6-2 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 ce laissé 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:

a-Grosseur et régularité des grains de silice:

La perméabilité provient 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 compose de grains de grosseur irrégulière, les petits grains se glissent dans les intervalles laissés par les gros et bouchent presque totalement les vides.

b- Quantité, qualités, humidités 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.

c-Intensité de serrage:

Sous l'effet du serrage, les grains de silice tendant à se rapprocher et à faire refouler l'argile dans les intervalles entre les grains.

Dans le cas d'un serrage trop énergique, 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:

Degré de serrage	dureté
Très faible	20
Faible	40
Moyen	50
Fort	70
Très fort	85

II-6-3 Réfractairité (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.

Argile %	Réfractairité °C
5	1500
10	1420
15	1320
20	1230
25	1150
30	1050

Pour augmenter la réfratairité en utilise les enduits.

II-6-4 Cohésion:

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

II-6-5 Longévité:

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

A- Caractéristique du sable de moulage (sable vert):

- Humidité: 2,9 à 3,5 %.
- Compressibilité: 34 à 38 %.
- Perméabilité: 155 à 185.
- Résistance à la compression: 1,7 à 2 Kgf/cm^2.
- Résistance au cisaillement: 0,35 à 0,55 Kgf/cm^2.
- 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…..

B-Différents sables de moulage :

La plus part des moulages industriels sont constituées de deux sable:

-le sable dit de contacte préparer avec soin, ce sable qui est travaillé au broyeur, humidifié avec soin, est appliqué sur le modèle en une couche de quelque centimètres

-le sable de remplissage constituées uniquement de sable récupéré refroidi, dépoussiéré et passé rapidement au broyeur avec addition d'argile .Beaucoup de fonderie travaillent en sable unique ,c'est-à-dire que tout le moule est rempli avec un sable de qualité .

C- Les effets du circuit sur le sable:

Dans le fonderie normale, le sable de moulage argileux circule en boucle (circuit fermé) dans la sablerie avec des entrées et des sorties.

Par convention, nous fixerons son départ au découchage. Il ne s'agit pas pour nous de définir chaque orange de la sablerie, mais de comprendre l'action des états des procès sur les sables à vert.

d-Action de la coulée sur le sable:

A la coulée, le moule extérieur et le noyau sont surtout soumis à une action thermique.

Les liants organique des noyaux sont partiellement décomposés (transformées en gaz, carbonisés).Le sable de noyautage perd alors sa cohésion, il devient meuble et, au décochage, il passe en plus au moins grande quantité au système de sable de moulage.

Dans le sable argileux (sable à vert) du moule extérieur, l'argile liante est cuite à mort jusqu'à une certaine profondeur, c'est-à-dire dans toutes les parties qui sont chauffées à une température de plus de 500°C environ 5 à 10% du sable de moulage atteignent cette température, dans le reste prédominant, l'argile n'est pas décomposée et peut être régénérée avec de l'eau.

La proportion de l'argile cuite à mort doit être remplacée lors de la répartition des mélanges au malaxeur. Une certaine quantité de bentonite doit être ajoutée en sus pour lier le sable de noyautage introduit au décochage.

Dans le cas ou le sable de noyautage introduit dans le circuit du sable de moulage ne suffit pas pour compenser les pertes de décochage, du sable neuf doit être ajouté directement, ainsi qu'une quantité appropriée de bentonite pour lier ce sable. Plus on introduit du sable siliceux dans le circuit, plus il en faut faire sortir, afin que le volume du sable y reste constante.

Des pertes considérables se produisent par le sable adhérant aux pièces coulées: ce sable sort de la fonderie et est éliminé à l'atelier de l'ébarbage.

II-7 Sable à noyaux:

II-7-1 Définition:

Les sables de à noyaux doivent posséder une plus grande réfractairité, ne doivent pas dégager beaucoup de gaz, ils doivent avoir un découchage facile. Dans les sables à noyaux on n'ajoute pas d'argile parce qu'il diminue la réfractairité et la perméabilité, on ajoute souvent des agglomérants (résines, silicates, huiles etc…..).

II-7-2 Les différents procédés de noyautage:

La gamme des procédés est vaste, ils dépassant aujourd'hui la dizaine, parmi lesquels on cite:

- **Procédé à prise à froid:**

a-Durcissement des sables aux résines furanniques:

Les sables à prise à froid sont des sables traités chimiquement à la température ambiante.

Le mélange est constitué d'un sable réfractaire granuleux et d'un liant (résine) prise à la température ambiante à l'aide d'un réactif(ou catalyseur) approprié introduit au moment du malaxage.

Les résines utilisées sont appelées résines furanniques et vendus sous des désignations commerciales variées. Ces résines s'emploient à un taux de 1à 2 %, et le catalyseur acide est employé à un taux de 25 à 50 % du poids de la résine.

Les principaux raisons (avantages) de l'emploi de la résine furannique sont les suivantes:

- il n'est pas toxique pendant les manipulations;
- est plus résistant à chaud;
- est plus stable dans le temps;
- permet des durées de vie plus longue du sable;
- bonne précision dimensionnelle des pièces et qui présentent un bon aspect superficiel;
- comme on peut l'utiliser pour moulage des grosses pièces.

Inconvénients:

- dégagement de gaz;
- prix élevé (produit d'importation);

En hiver, pour faciliter la prise, les boites à noyaux et le sable sont chauffées à environ 40°C.

Ce procédé permet de remplir successivement les boites les plus diverses, quelles soit en bois, en métal ou en plastique, après une heure de prise elles peuvent être remplies de nouveau.

Un excès de catalyseur donne aux noyaux une teinte verte qui est signal de l'apparition de défauts de fonderie tel que les piqures.

b-Durcissement des sables au silicate de soude (verre soluble):

Le mélange est constitué d'un sable réfractaire granuleux (silice) et d'un liant (silicate de soude) prise à la température ambiante par action du gaz carbonique(CO_2). Le silicate de soude se trouve sous la forme d'un liquide incolore, plus au moins visqueux.

Le silicate de soude est composé de 03 éléments (SiO_2, Na_2O, H_2O)

Comme exemple de la composition:

-SiO_2 → 30%

- Na_2O → 10%

-H_2O → 60%

Le silicate de soude est défini par son module ou rapport pondéral SiO_2/ Na_2O.

Et sa concentration ou teneur en extrait secs (MS%): SiO_2% + Na_2O%.

Pour cette exemple il s'agit d'un silicate de module 3, contenant 40% d'extrait secs.

Module:

Le comportement des noyaux est en majeur partie fonction du module.

module	prise	Consommation CO_2	résistance	stockage	débourrage
Elevée(2,8)	rapide	faible	faible	impossible	facile
Moyen(2,4)	Assez rapide	Assez faible	moyenne	moyen	moyen
Bas(2)	Lente	forte	élevée	possible	difficile

On note d'après ces indications que les silicates de module moyen (2,4) donnent dans l'ensemble satisfaction et nous recommandant l'emploi pour la plus part des cas.

c-Concentration:

Cette caractéristique à une influence primordiale sur la qualité des noyaux, il convient donc de la régler. Le problème est assez complexe car le choix de la concentration (MS%) optimale doit être fait en fonction de nombreux facteurs dont:

- Le module;
- Le taux d'incorporation;
- L'indice de finesse AFS du sable;
- Teneur en argile du sable;
-la nature et la qualité des adjuvants incorporés;

D'après les indications la concentration recommandée est de 44%.

Précisons à ce sujet, que pour diminuer la concentration d'un silicate, il suffit de diluer avec un peu d'eau.

Taux d'incorporation:

Le taux d'incorporation se situe généralement entre 3 à 5%.La solidité des noyaux croit avec ce taux, mais malheureusement on a un problème de débourrage.

Il est donc nécessaire d'avoir recours à des adjuvants destinés à faciliter les opérations de débourrage.

Adjuvants de débourrage:

- noir minéral, employé à des taux entre 0,5 et 2%;
- farine de bois;
- sucre 0,3 à 1%;
- dextrine de pomme de terre ou de mains.

Dépasser 0,6 à 1 Kg de gaz pour 100Kg de sable ou sur gazer ferait perdre toute cohésion.

Les avantages de l'utilisation de silicate:

- bas prix;
- pas de dégagement de gaz.

Les inconvénients de l'utilisation de silicate:

- débourrage difficile;
- il n'est pas stable dans le temps (on ne peut pas le stocker plus de 48h);
- mauvaise précision dimensionnel;
- il n'est utilise que pour les noyaux simples.

CHAPITRE III

Moulage-noyautage

III-1 Généralités:

L'expression moulage, dans le sens qui lui est attribué en fonderie, désigne la réalisation d'empreinte aux formes de la pièce à obtenir dans un matériau, bois pierre, sable ou métal destinée à recevoir le métal à l'état liquide.

La réalisation d'une pièce par moulage exige une étude approfondie qui permettra de déterminer la technique à employer. Les principaux facteurs susceptibles d'avoir une influence sur le choix de la méthode la plus économique à retenir sont:

- La complexité des formes de la pièce
- Les dimensions de la pièce et la précision des côtes
- Le nombre de pièce à exécuter
- Les délais de fabrication
- L'état de surface

III-2- Moulage:

L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, généralement en matériaux réfractaires, qui porte l'empreinte en négatif de la pièce, cette empreinte étant obtenue à partir d'un modèle reproduisant la pièce à fabriquer.

III-3-Classement des procédés de moulage:

L'opération de moulage est une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et leur précision, ses états de surface, son refroidissement, et joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur sa qualité. C'est aussi, avec le noyautage, l'opération qui entraîne les coûts les plus élevés dans les différentes opérations de fabrication. À titre d'exemple, dans des productions de grandes séries, les opérations de moulage-noyautage représentent fréquemment 40 % environ des prix de revient hors matière (moulage 30 %, noyautage 10 %).

Il convient donc que le choix d'un procédé de moulage soit fait avec le maximum de précaution pour ne pas pénaliser les productions futures, tant en qualité qu'en prix de revient.

De très nombreux procédés de moulage existent, en châssis, en mottes, en fosse pour les très grosses pièces, au trousseau pour des pièces circulaires par exemple, en modèle perdu (polystyrène), en cire perdue pour des pièces de précision ou des œuvres d'art, en coquille métallique par gravité, sous-pression pour les non ferreux, en coquille centrifugée pour des tuyaux notamment, etc., que nous présenterons dans les paragraphes suivants.

Cette très grande variété des procédés impose de les classifier pour permettre leur présentation. Nous avons choisi de les classer en fonction des modes de moulage et de durcissement des matériaux utilisés au moment de la fabrication du moule ou des noyaux (tableau III-1) et de la nature des modèles qui doivent être compatibles avec les procédés employés :

- modèles permanents (bois, métal, résine, etc.)
- modèles perdus (polystyrène, cire, etc.)
- moules métalliques.

III-4-Les procédés de moulage :

Les procédés de moulage ont chacun des caractéristiques bien précises d'emploi qui les destinent préférentiellement à certain type de production (pièces unitaires, de moyennes ou grandes séries, en métaux ferreux, non ferreux, pièces de plus ou moins grandes précisions, etc.) [18].

Il faut notamment prendre en considération :

- la facilité de préparation et de mise en œuvre des sables et des liants ;
- la durée de vie des sables préparés ;
- la bonne aptitude au stockage ;
- la perméabilité des sables moulés permettant une évacuation facile et rapide des gaz provenant de l'empreinte, du métal, des liants et des additifs éventuels, notamment pour les noyaux ;
- la réfractairité et la bonne tenue à la chaleur au moment du remplissage de l'empreinte par le métal liquide ;
- les bonnes caractéristiques à froid et particulièrement :

• une résistance à la compression suffisante pour les moules,
• des résistances au cisaillement, à la traction assez élevées pour éviter des ruptures du sable au moment du démoulage,
• une bonne résistance à la flexion (pour les noyaux),
• une absence de variations dimensionnelles pendant la prise (retrait ou gonflement),
• des moules rigides, notamment pour les fontes GS afin de s'opposer au gonflement graphitique à la solidification ;

- l'absence de déformation pour les noyaux, l'absence de fluage, expansion ou retrait pendant la coulée et la solidification ;

- l’absence de réaction du matériau de moulage ou de noyautage avec le métal liquide, qui risque de provoquer des défauts sur les pièces, comme par exemple : gerce, abreuvage, piqûres et soufflures par dégagement gazeux (hydrogène, azote, vapeur d’eau...) décarburation ou recarburation superficielle, dégénérescence du graphite sous l’influence de certains composants des liants, etc. ;
- la facilité de débourrage au moment du décochage ;
- les possibilités de récupération (sables chimiques) et de régénération (sables argileux) ;
-la compatibilité entre les systèmes de liants employés (valeurs de PH assez voisines par exemple) ;
- les problèmes d’environnement aux postes de préparation des sables et de confection des noyaux : pas de dégagement de gaz incommodant ni de dégagement de chaleur, qui nécessiteraient des protections et des captages efficaces, pas de dégagement de vapeurs nocives et de poussières au poste de décochage, mise en décharge des sables frais ou brûlés non susceptibles de pollution des nappes phréatiques ;

Tous ces facteurs interviennent au moment du choix d’un procédé de moulage.

C’est une étude complète qui doit être faite pour trouver la meilleure solution en fonction des caractéristiques des pièces demandées par le client, des cadences de production envisagées, des installations et matériels existants, des prix de revient prévisionnels et des investissements à consentir.

Tableau III-1- classification des procédés de moulage [18]

Type de moulage	**liants**	**Principaux types de sables**	**utilisation**		**observation**
			moulage	**noyautage**	
Moulage à modèle permanent 1-sable restant plastique 2-sable durcissement thermique 3-sable durcissement chimique -autodurcessants -par gazage 4-sable durcissement physique -V processus -congélation	Minéraux organique minéraux organique minéraux organique sans liants	silico-argileux Sable à vert -Huiles siccatives -croning -boites chaudes -ciment -plâtre -silicate-argile -silicate d'éthyle -furanique -silicate –CO2 -ashland -hardox -so2 -isocet -betacet Siliceux siliceux	X X X X X X X X X X X X	X X X X X X X X X 	Moulage main Moulage machine Noyautage et moulage en mottes carapace Moulage main Moulage-noyautage Noyautage essentiellement Moulage moulage
II-moulage à modèle perdus 1-Polystyrène expansé 2-Cire perdus 3-Mercure congelé	Sans liants	-siliceux -barbotine réfractaire -barbotine réfractaire	X X X		
III-moulage en moule métallique -coquille gravité -coquille passe pression -moulage sous pression -moulage par forgeage liquide	Alliage coulés Métaux ferreux et non ferreux suivant les procédés				
IV-procédés spéciaux 1-moulage avec refroidisseur 2-moulage avec inserts 3-moulage pièces bi-métal 4-moulage par centrifugation 5-moulage en coulée contenue 6-moulage à empreinte souple	Alliage coulés Métaux ferreux et non ferreux suivant les procédés				

III-5 Matériaux de moulage (Sables siliceux):

Pour la fabrication des moules et des noyaux, la fonderie utilise de nombreux matériaux et produits dont les plus importants sont cités ci-après

Ils sont composés essentiellement de grains de silice SiO2 ; c'est le matériau le plus universellement employé pour la confection des moules et des noyaux. Parmi toutes les variétés on citera :

-les sables silico-argileux naturels, utilisés à l'état brut.

- les sables blancs extra-siliceux de carrière, très souvent traités par lavage, classement granulométrique et séchage avant livraison.

Sables spéciaux (chromite, olivine, zircon, silico-alumineux)

Tous ces produits doivent présenter des caractéristiques bien définies, comme par exemple :

- la répartition granulométrique ou la forme des grains ; des propriétés chimiques en accord avec celles des liants ; des propriétés physiques à froid (perméabilité) et à chaud (réfractairité, dilatation, capacité et conductivité thermiques, mouillage par le métal liquide).

- Les mastics pour réparation des moules.

-Les agents de démoulage pulvérisés sur le modèle avant le moulage, pour éviter le collage du sable (pétrole par exemple).

III-5-1 Matériaux pour moules permanent:

Certains procédés de moulage-noyautage nécessitent l'exécution de moules permanents pour lesquels on utilise des matériaux métalliques comme les fontes, fonte GS, aciers, aciers spéciaux revêtus d'enduits réfractaires (graphite, lait de silice) destinés à protéger leur surface de l'érosion du métal liquide et des chocs thermiques trop brutaux. C'est le cas principalement :

- en fonderie de fonte, de la centrifugation et de la coulée en coquille ;

- et en fonderie de métaux non ferreux (aluminium, Zamac) des coulées en coquille par gravité, basse pression et sous-pression.

III-5-2 Produits spéciaux:

Beaucoup de procédés de moulage particuliers font appel à des produits spéciaux, comme par exemple la fonderie de précision (dite aussi en cire perdue) qui utilise des modèles injectés en cire, ou en urée, puis éliminés par chauffage après dépôt et durcissement des couches réfractaires sur les modèles.

Citons aussi les élastomères pour le moulage de certaines pièces difficiles à mouler (statues, bijoux, etc.).

III-6-Moulage aux sables restant plastiques:

Ce sont les procédés de moulage les plus universels et les plus couramment employés, et qui restent toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes.

Ils permettent de couler aussi bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage.

III-6-1 Sables de moulage:

On utilise soit du sable silico-argileux naturel, soit du sable synthétique formé d'un mélange de grains de silice et d'argile, 5 à 10 % suivant les alliages moulés, humidifiée pour former un lait d'argile qui enrobe les grains en les agglomérant entre eux et de divers adjuvants.

On peut distinguer trois grandes familles de sables :

-les sables naturels (peu utilisés maintenant) ;

-les sables étuvés, surtout pour le moulage à l'unité de pièces importantes ;

- les sables synthétiques, sables verts**,** utilisés directement après leur préparation, éventuellement grillés ou flambés en surface pour en augmenter la résistance à l'action du métal.

On peut reprocher au sable vert :

- la présence d'humidité dans le sable créant des risques de défauts de piqûres sur les pièces coulées;

-le manque de dureté des empreintes, surtout dans les parties verticales, en faible dépouille ;

- la chute possible de sable dans les empreintes au moment de la pose des noyaux, de la fermeture des moules, et l'entraînement de sable au moment de la coulée ;

-le manque de résistance au rayonnement thermique du métal liquide dans les parties en plafond de l'empreinte au moment du remplissage du moule, risquant de provoquer l'apparition de gales;

- la difficulté d'obtenir des cotes précises, des parois minces, etc.

Tous ces défauts sont maîtrisables après mise au point de la fabrication. Mais il faut contrôler rigoureusement tous les stades de production du sable et de sa mise en œuvre. De la qualité du sable et, par conséquent, de sa bonne préparation, de sa régénération correcte et du bon réglage de ses caractéristiques, dépendra en finale, et pour une très grande partie, la qualité des pièces fabriquées. C'est tout l'art du fon

À l'avantage de ce sable vert, il faut noter :

-son très bon prix de revient ;

- sa très grande souplesse d'utilisation et de mise en œuvre ;
- un bon état de surface des pièces, des détails bien venus et des *coutures* de moulage peu apparentes ;
- le faible risque de crique dans les pièces au moment du retrait du métal pendant son refroidissement, le sable étant compressible ;
- la possibilité de recycler la quasi-totalité du sable après décochage, réduisant les problèmes d'évacuation et de décharge.

Ces problèmes existent bien entendu, mais ils proviennent essentiellement des surplus de sable apportés dans le circuit par les noyaux au moment du décochage, et qu'il faudra évacuer à l'extérieur.

En conclusion, on peut constater, avant d'aborder dans l'étude des procédés de moulage proprement dits, que le moulage en sable silico-argileux, et notamment en sable vert, grâce aux progrès considérables accomplis dans les techniques de préparation du sable et de sa mise en œuvre, résiste avec succès aux procédés plus modernes employant des sables durcis à prise chimique ou thermique, mais toujours d'un prix de revient plus élevé, qui les font préférer, dans la très grande majorité des cas, pour la confection des noyaux.

III-6-2 Caractéristiques des sables de moulages:

Dans le passé, la fonderie utilisait beaucoup les sables silico argileux naturels, mélanges de sables siliceux et d'argile utilisables à l'état tel, après humidification.

Ces sables sont maintenant de moins en moins employés, remplacés par des sables synthétiques, à base de sable siliceux et d'argile pure, utilisés exclusivement dans tous les procédés de moulage dits en sable vert, c'est-à-dire en sable gardant une certaine humidité interne, par opposition aux sables étuvés.

Un sable synthétique est un mélange de divers constituants :

-sable siliceux de granulométrie appropriée ;
- bentonite (variété d'argile particulièrement active)
-noir minéral; et divers autres produits suivant les besoins ; le tout additionné d'un certain pourcentage d'eau.

Les teneurs de ces différents constituants et leurs caractéristiques sont adaptées aux procédés de moulage, aux alliages coulés et aux pièces à fabriquer.

Le (tableau1) indique quelques formules de sable vert parmi les plus couramment employés.

À noter que tous ces sables de moulage sont réutilisés après récupération et régénération, et que les apports de sable siliceux neuf sont très faibles (quelques pour-cent au maximum) [19].

III-6-3 Sableries:

La préparation et la régénération des sables récupérés après décochage se font dans des installations appelées sableries où les sables sont tamisés, démottés, concassés, déferrés, dépoussiérés et refroidis (dans certains cas avant d'être malaxés et mélangés dans les broyeurs avec les apports d'eau et d'adjuvants, bentonite, noir minéral, etc.), pour être ensuite envoyés aux machines à mouler.

Le refroidissement du sable s'impose dans les gros chantiers de moulage mécanisés, où le sable tourne vite, et où le rapport masse de métal coulé/masse de sable mis en œuvre est trop élevé (1 à 10 – 1 à 12 : rapports limites pour des chantiers de pièces en fonte), entraînant des échauffements importants du sable en circuit.

La température doit être abaissée à des valeurs d'environ 10 à 20 °C au-dessus de l'ambiante avant l'entrée dans les broyeurs.

Les figures 1 et 2 représentent le schéma synoptique et l'ensemble des matériels et appareils de manutention, stockage et traitement des sables de moulage.

III-6-4 Matériels et appareils de traitement des sables:

Une sablerie comporte :

- des appareils de traitement du sable (broyeurs, refroidisseurs, trommel, aérateurs) ;

et des matériels de manutention.

En suivant le circuit du sable depuis le décochage, on trouve différents appareils de nettoyage, de traitement et de préparation du sable, qui est principalement :

- des tambours magnétiques, chargés d'éliminer les déchets et ferrailles du sable décoché ;
- des brise-mottes pour concasser les mottes de sable, appareils constitués de turbines projetant violemment le sable et les mottes sur des barreaux métalliques ;
- des tamis vibrants ou rotatifs pour éliminer les dernières mottes et les déchets de toutes sortes ;
- des refroidisseurs constitués de dispositifs d'humidification du sable décoché et d'une insufflation d'air qui se sature avec l'eau évaporée en absorbant la chaleur du sable. On peut ainsi ramener la température du sable de 80, 100, 120 °C à 35 ou 40°C ce qui permettra d'obtenir une meilleure préparation du sable dans le malaxeur ;
- des broyeurs-malaxeurs qui sont les appareils de base de la sablerie. Dans ces appareils, le sable à régénérer est mélangé à la bentonite neuve venant remplacer la bentonite détruite à la coulée, au noir minéral, à un peu de sable neuf si nécessaire, aux divers adjuvants, et à une certaine quantité d'eau adaptée à l'humidité du sable à régénérer, à sa température, à la

quantité des additifs et à l'humidité à obtenir pour le sable régénéré, ces différentes opérations étant effectuées, dans les sableries modernes, par des appareils automatiques .

-Les broyeurs-malaxeurs doivent, par un travail mécanique, traiter et homogénéiser la masse de sable, de liant et d'eau, et répartir uniformément autour des grains la pâte argileuse formée pendant le malaxage sous forme d'un film de quelques dixièmes de millimètre. Cela nécessite un travail mécanique intense de frottage, malaxage et brassage de toute la masse de sable pour bien en homogénéiser tous les constituants.

Il existe de nombreux types d'appareils. On peut distinguer principalement les broyeurs à meules et les malaxeurs à turbines.

a) Les broyeurs à meules sont les appareils les plus anciens. Ils peuvent être à cuve fixe ou mobile; ils comportent des meules très lourdes chargées d'écraser et de malaxer le sable, mais leur action est longue et peu efficace, et on peut constater souvent un enrobage discontinu des grains et des accumulations de bentonite dans le sable préparé.

b) Les malaxeurs à turbines ou à tourbillons sont des appareils plus modernes, beaucoup plus efficaces et plus rapides.

Ils sont composés d'une cuve, de deux turbines ou tourbillons à axe vertical et d'un axe central avec raclettes de brassage pour malaxer et brasser la masse de sable. Dans ces malaxeurs le sable et l'eau sont soumis à un effet d'impact intensif, ce qui permet une répartition uniforme des grains et leur bon revêtement par la bentonite.

On trouvera sur la figure un graphique comparant l'efficacité de ces deux types d'appareils qui montre tout le progrès apporté par ces malaxeurs à turbines dans la préparation des sables verts.

Tableau III-2 – Exemples de composition de sable vert				
Type de fonderie	**Sable siliceux Granulométrie (unité ASTM)**	**Bentonite (% en masse)**	**Eau (% en masse)**	**Divers**
Fonderie d'acier	50 à 55	4 à 5	2,8 à 3	oxyde de fer
Fonderie de fonte (pièces moyennes)	70 à 100	7 à 10	4 à 10	noir mineral
Moulage de l'aluminium et ses alliages	120 à 150	10 à 15	4 à 6	carbonate de calcium< 1 % magnésie < 1 % oxyde de fer < 2 % matière organique< 1 %
Moulage du magnésium et ses alliages	50 à 60	16	2 à 4	soufre 5 à 10 % acide borique 0,8 à 1,5 %

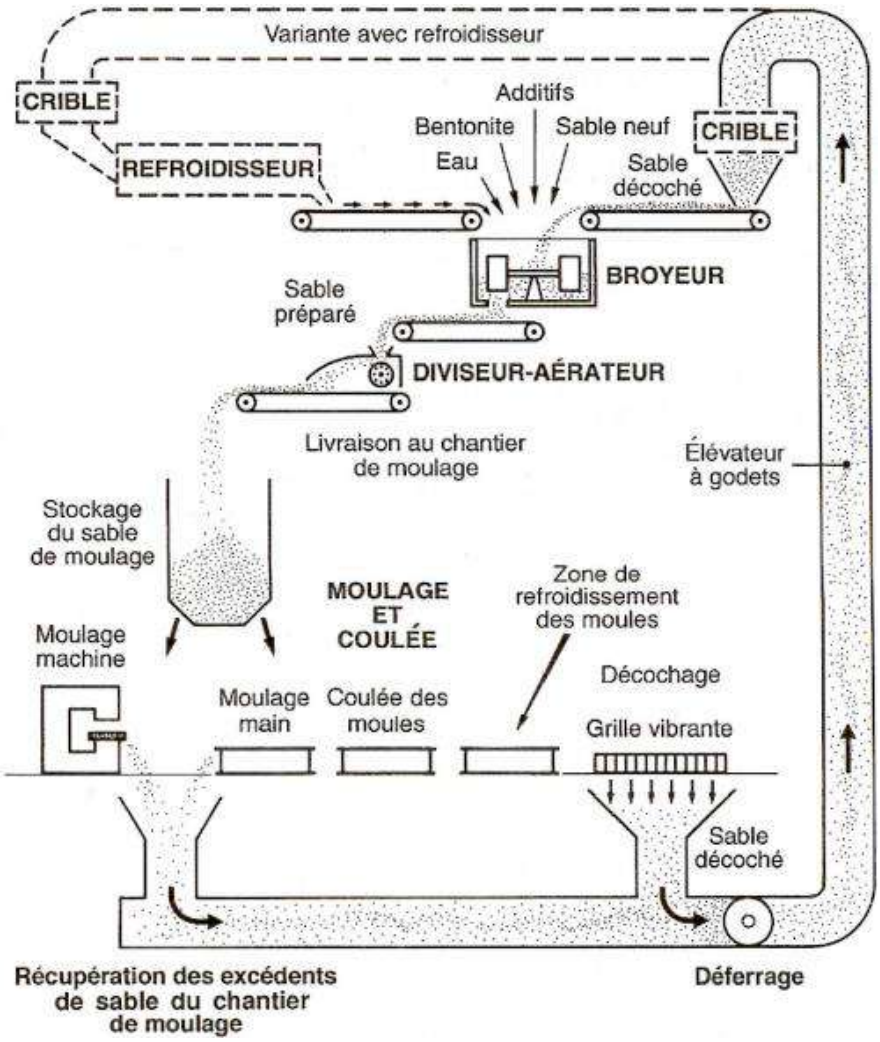


Figure III-1– Schéma de principe d'une sablerie [18]

- **Les aérateurs** : avant la mise en œuvre des sables préparés on installe souvent des aérateurs de sable, constitués de turbines à barreaux, pour aérer le sable et lui donner ainsi le maximum de fluidité au moulage.

III-6-5 Matériels de manutention et de stockage du sable:

Comme on peut le voir sur la (figure III-2), une sablerie comprend beaucoup de matériel de manutention et de stockage. Les masses de sables à mettre en œuvre sont toujours nettement plus importantes que le tonnage du métal coulé et celui des pièces produites ; par exemple pour produire 10 t/ h de pièces en fonte GS (pièces de7 à 8 kg), il faut couler 20 t de fonte liquide par heure et mouler 200 t de sable à l'heure, soit un rapport de 1 à 20.

La manutention du sable se fait par l'intermédiaire de tapis ou bandes en caoutchouc et d'élévateurs, généralement à godets, pour les changements de niveaux.

Une sablerie est aussi une installation polluante qu'il faut dépoussiérer soigneusement avec des systèmes d'aspiration et de filtration efficaces de l'air rejeté.

III-6-6 Contrôle du sable préparé:

On trouvera dans l'article toutes les indications détaillées concernant les contrôles à faire sur les sables de moulage silico-argileux verts.

Rappelons que ces contrôles se font en laboratoire avec des appareils spécialisés permettant de mesurer les différents paramètres caractérisant un sable de moulage. Citons parmi les plus importants : l'humidité, la granulométrie, la teneur en argile, la cohésion (résistance au cisaillement), la perméabilité, la résistance à la compression, etc. [20].

Pour suivre le bon fonctionnement d'une sablerie, on pourra se contenter de mesurer, à intervalles réguliers (toutes les 1/2 h, par exemple) deux des valeurs importantes : l'humidité H et la cohésion à vert C (ou résistance au cisaillement) qui permettent d'établir les paramètres C/H et C×H et de calculer les ajouts d'eau et d'argile à faire dans le broyeur. On notera que, pour une teneur en argile donnée, la zone correcte d'aptitude au moulage correspond à une plage de teneur en eau assez étroite. D'où l'importance de ces contrôles pour produire, dans les sableries, la meilleure qualité de sable de moulage.

Dans les sableries de grande production, il est nécessaire de mesurer en continu, à l'aide d'appareils automatiques, les caractéristiques du sable en cours de préparation dans le broyeur. Ces appareils régulent les apports dans le malaxeur pour obtenir un sable conforme aux spécifications et apte au moulage [21].

Devant la difficulté de mesurer séparément en continu les variables les plus importantes (humidité, argile...), on a cherché à déterminer des critères globaux qui rendent compte de la qualité du sable de moulage. Citons par exemple :

- **l'indice de moulabilité** qui traduit l'aptitude du sable à bien s'écouler et à remplir facilement les châssis, qualité qui est mesurée et réglée en continu pendant le travail du mélangeur par un appareil appelé *(*moldability controler) ;

- **l'aptitude au serrage ou compressibilité**, propriété très importante, surtout pour les moulages haute pression ; elle s'exprime en pourcentage de réduction de volume d'une éprouvette cylindrique de 100 mm de hauteur, sous une pression statique de 1MPa ; par expérience, on détermine des valeurs optimales :

• 35 à 42 pour les machines haute pression,

• 42 à 52 pour les machines moyenne pression,

• et supérieures à 50 pour le moulage main.

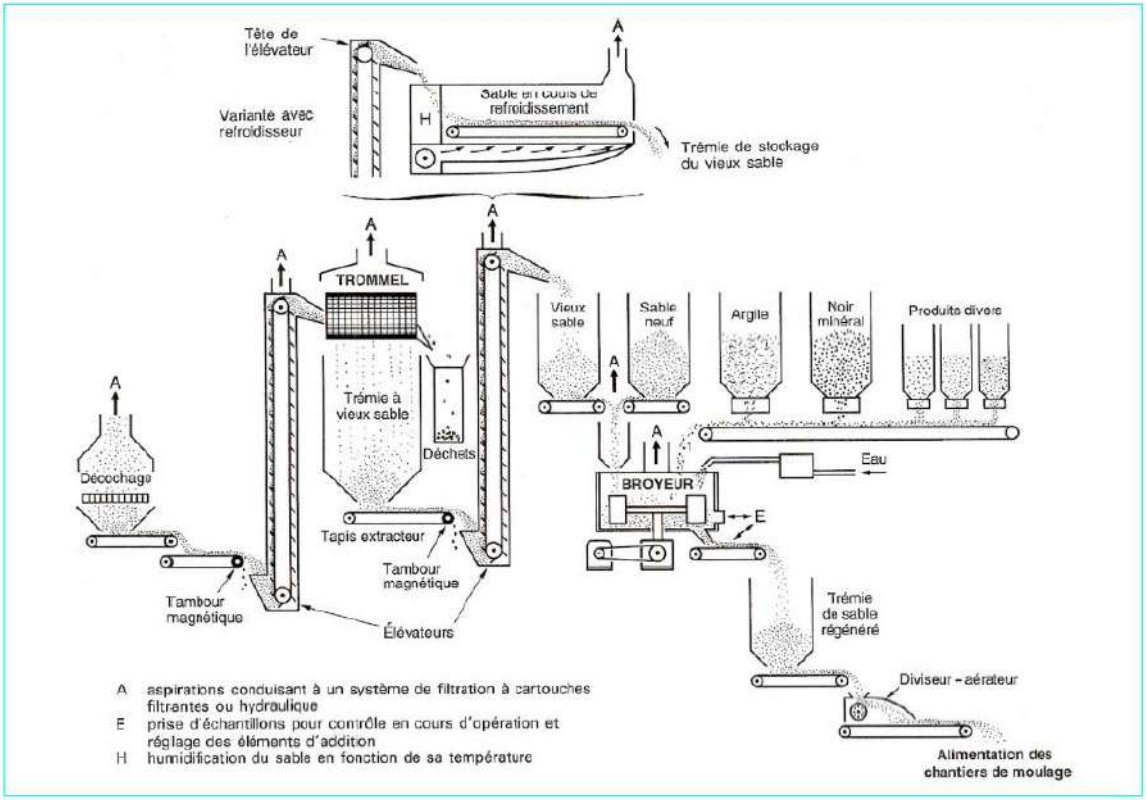


Figure III-2- Croquis synoptique des systèmes de manutention et de stockage d'une sablerie [18]

Le réglage de l'humidité optimale d'un sable se mesure désormais plus par son aptitude au serrage que par sa teneur absolue en eau.

Cette aptitude au serrage peut également être mesurée par un appareil automatique qui pourra ensuite réguler le broyeur. Ces deux appareils sont présentés ci-après :

a-***Moldability controler*** (figure III-2) : cet appareil mesure la cohésion du sable vert à l'état meuble, et donc son aptitude au moulage. La mesure se fait en continu, sur le sable prélevé dans le broyeur au cours de l'opération de malaxage. Le sable passe dans un petit couloir vibrant comportant deux fentes, une étroite et une plus large.

Le sable passe plus ou moins bien dans chacune de ces fentes en fonction de sa cohésion. Les débits dans les fentes sont mesurés par des cellules photoélectriques qui règlent les apports d'eau dans le broyeur pour obtenir une répartition idéale entre ces deux fentes, et par conséquent l'obtention de la bonne aptitude au moulage du sable régénéré ;

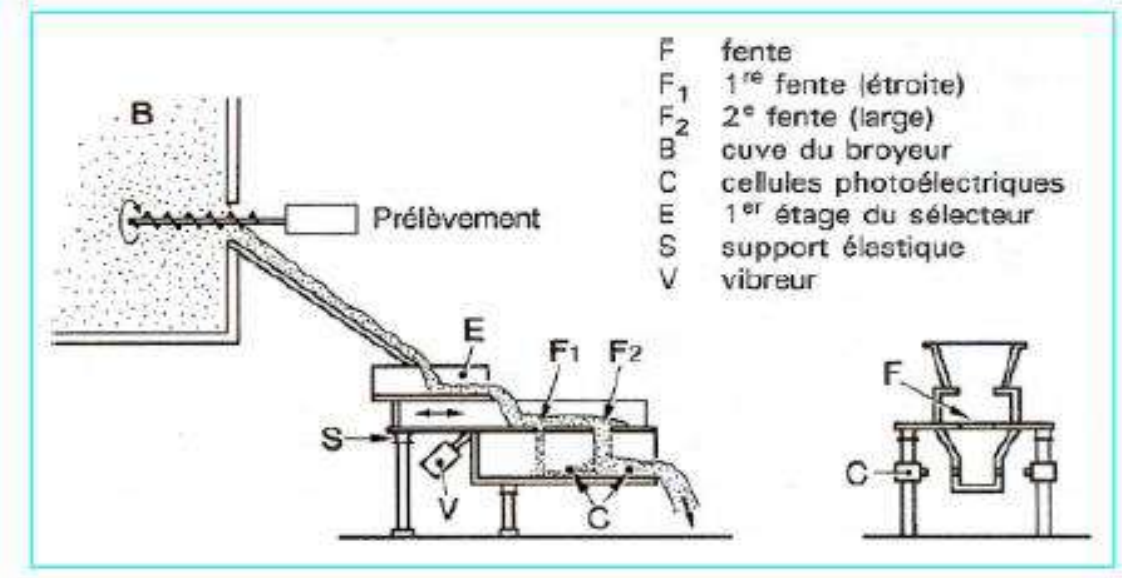


Figure III-3 – Controleur d'aptitude au moulage (Moldability controler)[18]**.**

b- ***roto control***: cet appareil fournit automatiquement par des moyens classiques mécaniques :

• l'aptitude au serrage,

• le cisaillement,

• la limite de déformation des sables liés à l'argile.

Il comporte un système de prélèvement du sable préparé sortant du mélangeur, un plateau tournant discontinu avec quatre douilles présentées successivement aux différents postes de travail :

- remplissage ;
- mesure de l'aptitude au serrage ;
- mesure de la limite de déformation et du cisaillement ;
- vidange ; la durée minimale d'un pas étant de 10 s.

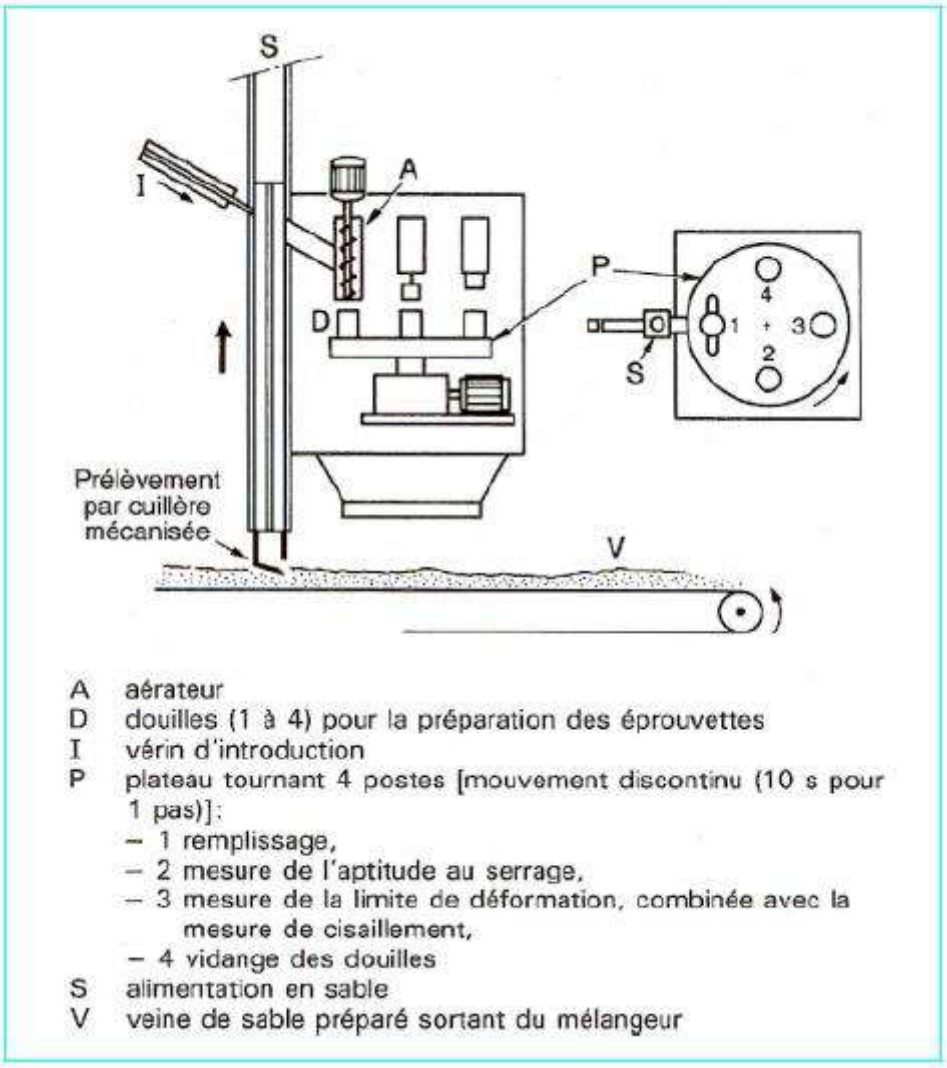


Figure III-4 – Roto control [18]

Les mesures et leur traitement sont pratiquement instantanés ; leurs valeurs sont transmises à un calculateur où sont introduites également les valeurs de la température et de l'humidité du sable en cours de préparation dans le mélangeur. Le calculateur intervient ensuite, en temps réel, sur les valeurs de consigne des automatismes de dosage et de pesage des différentes additions dans le mélangeur, vieux sables, additifs, eau, etc.

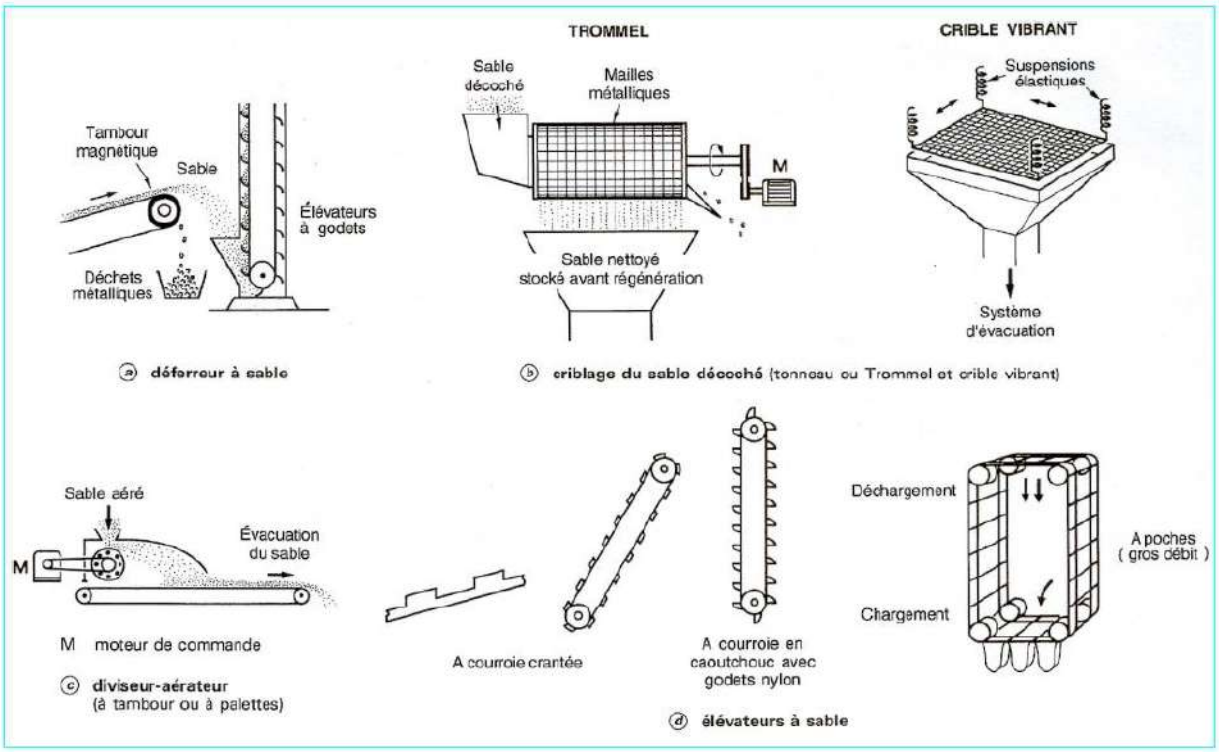


Figure III-5 Schémas des différents appareils de traitement du sable[18]

Les sableries modernes, grâce aux appareils performants qui les équipent, et notamment les refroidisseurs de sable, les malaxeurs, et les systèmes de contrôle automatiques fiables qui les gouvernent, permettent de fournir aux ateliers de moulage des sables préparés d'excellente qualité, avec des caractéristiques correspondant aux valeurs requises et d'une excellente régularité. La précision dimensionnelle des pièces produites, la constance de leur masse et leur état de surface, sans toutefois que le serrage haute pression ne dépasse certaines limites, un excès de serrage pouvant produire d'autres défauts, dus à des perméabilités insuffisantes par exemple.

Pour étudier les différents procédés de moulage utilisant des sables silico-argileux, nous les avons classés suivant le mode de serrage employé, principal critère à fixer pour une fabrication et qui détermine, par conséquent, toutes les installations de production des moules, moulage main, moulage machine et moulage mécanisé.

Chapitre VI

Techniques expérimentales

VI-1 Introduction :

Il a été remarqué qu'il y a un besoin énorme en matière de sable neuf de fonderie pour l'alimentation des chantiers de moulage de grande capacité. Aussi, il s'est avéré nécessaire de chercher d'autres sources en matière de sable. Ceci, nécessite l'exploitation de nouvelles carrières proches de l'usine qui va servir de cette matière, afin de satisfaire les besoins en cette entité de sable brute.

Les normes en matière de sable neuf de fonderie utilisés ont un ratio qui vaut de 20 tonnes des sable pour 01 tonne de métal. Ainsi, qu'à l'alimentation des chantiers de moulage de grande capacité qui a un ratio de 60 tonnes de sable / heure.

Pour cette raison, nous avons étudié le sable brute de Bougezoule en vue de trouver une source proche à exploiter. Ce sable choisi qui se trouve en quantité et qui a une qualité meilleure pour une éventuelle possibilité d'alimenter les fonderies.

L'adaptation de ce sable doit prendre en considération les mesures des qualités appliquées pour les sables quartzeux de fonderie selon le cahier de charge.

Dans notre cas l'étude a été faite en comparaison avec les mesures appliquées dans l'unité fonderie de Berrouaghia.

VI-2 Prélèvement et échantillonnage :

VI-2-1 Lieu de l'échantillonnage :

Après prospection des lieux de prélèvement des différents échantillons, on a opté pour une carrière à Bougezoule.

VI-2-2 Dénomination du sable et état à échantillonnage:

L'échantillon doit être caractérisé par mention de l'appellation du sable et de son état.

Pour le sable usuel de fonderie : dénomination suivant le but d'utilisation, par exemple sable pour modèles (sable de contacte), sable de remplissage, sable unitaire, sable e noyautage et ainsi de suite.

Comme état, mentionné : brut, trié, traité, humide de carrière, sable séché à l'air, et ainsi de suite.

Remarque :

- pour notre cas, et d'après les résultats d'analyses effectuées ultérieurement, notre sable est classé comme sable de remplissage.

- et son état est mentionné comme humide de carrière.

VI-2-3 Exécution de l'échantillonnage pour l'échantillon de collecte :

L'échantillon de collecte doit constituer une moyenne de la quantité totale à analyser.

Sur une quantité de sable d'environ 15 tonnes, prélever un échantillon type d'au moins 10kg.

En, service de prospection ou dans les travaux de découvertes géologiques, les lieux de prélèvement des différents échantillons devront être répartis de manière fonctionnelle suivant les circonstances locales.

L'échantillon de collecte doit se composer d'au moins 10 échantillons individuels.

Les échantillons individuels en 10 endroits répartis régulièrement espacés les uns des autres, à au moins 300mm des bords dans une profondeur de 100 à 200mm sous la surface.

VI-2-4 Exécution de l'échantillonnage pour l'épreuve final *:*

Pour l'épreuve finale, on a besoin de 3kg qui sont à séparer de la quantité totale par la méthode de division par quatre.

VI-3 Contrôle réception du sable :

Il ne faut pas oublier que contrôle réception des sables sera différents 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

VI-4 Examen Visuel :

A la réception de sable de Bougezoule ce dernier se caractérisé par :

- Présence de l'humidité au environ 4%.

- Présence d'impureté tel que : les cailloux et débris végétal.

- Présence de poussière.

VI-5-Détermination de la teneur en Humidité :

- Exécution de la détermination:

Tarer l'échantillon individuel préparer à 20g (poids en état humide M_u) et le faire séché à 106° +2 degrés dans une étuve appropriée .l'échantillon séché jusqu'à la stabilisation de poids est alors peser (poids a secM_{tr}).

Pour effectuer les analyses industrielles, on peut aussi se servir de séchoirs ménagers, de séchoirs infrarouges et autres. Un dispositif approprier pour la détermination rapide de l'humidité est le ("déterminateur rapide")

- Analyse :

La teneur en humidité se calcule d'après la formule suivante :

$$U = \frac{\mathrm{M_u\, M_{Tr}}}{\mathrm{M_u}} \times 100$$

Signification des différents symboles :

U = Teneur en humidité (%)

M_u=Poids en état humide (g)

M_{TR} = poids à sec (g)

Donc l'humidité : **U=6.67%**

VI-6-Détermination de la réparation granulométrique de sable de Bougezoule :

a-But de travail :

Ce travail pratique a pour but d`apprendre la méthode de la détermination de la granulométrie et les calculs des caractéristiques granulométriques des sables silico-argileux.

b- Principe :

Dans la technique du tamisage, la taille de la particule est déterminée par le fait qu`elle passe ou ne passe pas par l`ouverture des mailles d`une toile métallique. Cela correspond au plus petit diamètre de la particule en faisant abstraction des angularités des grains.

c-Description de la méthode d'essai :

La méthode consiste en la séparation des grains de sables par tamisage. On emploie généralement une série de tamis d`ouverture décroissante en série de Renard que l`on place sur un système agitateur-secoueur., le sable étant versé sur le tamis ayant la plus grande ouverture. L`échantillon doit être séché et débarrassé de ses éléments inferieurs a 20 micromètres. Ceux-ci sont trop mobiles pour être séparés efficacement par un système secoueur .Pour caractériser les répartitions granulométriques par tamisage, on utilise couramment la notion d`indice de finesse qui correspond au numéro d`un tamis fictif qui laisserait passer toutes les particules ayant exactement la même dimension.

d-Appareillage *:*

Deux séries de tamis sont couramment utilisées :

Celle extraite de la spécification ASTM E11-87 (tamis A.F.S équipant le matériel dieter

Et celle extraite de la norme allemande DIN 4188 (tamis G.F).

Toute fois rien ne s`oppose à l`emploi de tamis différents, par exemple ceux conformes à la norme AFNOR X 11-501.

L`appareillage comprend :

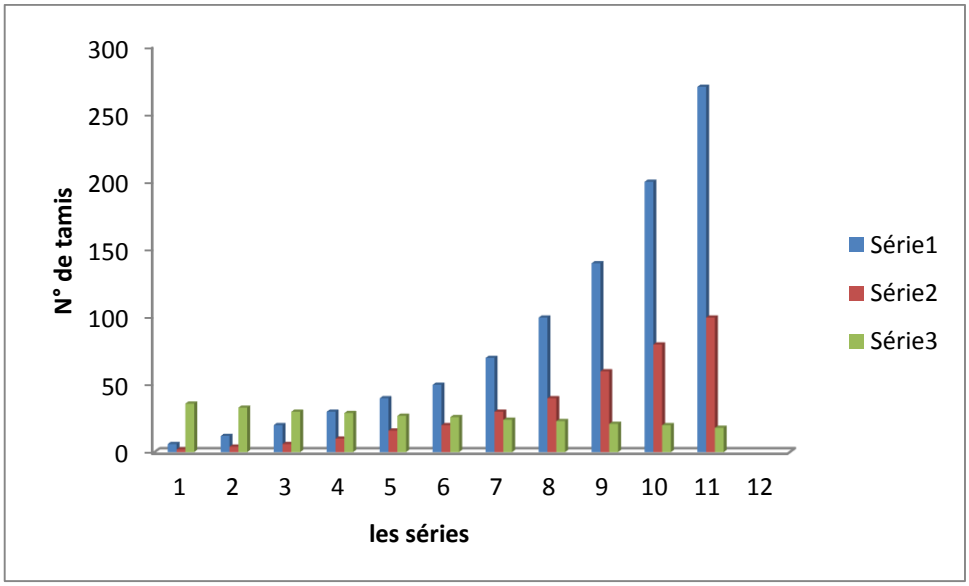
- Suivant la norme choisie un jeu de 11 tamis A.F.S ou 10 tamis G.F voir tableau(IV-1).

- Un secoueur de tamis.

- Un jeu de brosses de qualité assortie à l`ouverture des mailles.

Tableau VI-1: les séries des tamis utilisés selon les normes internationales.

N° tamis A.F.S	N° tamis G.F	N° tamis AFNOR
6	2	36
12	4	33
20	6	30
30	10	29
40	16	27
50	20	26
70	30	24
100	40	23
140	60	21
200	80	20
270	100	18



N° de tamis AFNOR.

N° de tamis A.F.S.

N° de tamis G.F.

Figure VI-1 : Représentation des séries des tamis utilisés selon les normes internationales.

e- Mode Opératoire :

L`analyse granulométrique est normalement faite sur un échantillon préalablement débarrassé de ses éléments de moins de 20 microns et séché à 105°C jusqu`à masse constante.

-S`assurer que la série de tamis soit complète, que les toiles soient parfaitement propres et en bon état.

- Emboiter les tamis les uns dans les autres, dans l`ordre décroissant des ouvertures de mailles.

- Verser soit 20, soit 50, soit100 g d`échantillon sur le tamis supérieur et fermer ce dernier par le couvercle.

- Fixer la série sur l`appareil et effectuer le tamisage du sable pendant un temps constant.

- L`opération terminée, recueillir séparément les refus : brosser la toile au moyen d`une brosse appropriée afin de récupérer les grains retenus dans les mailles. Effectuer cette opération sur les deux faces de la toile.

- Peser au cg près chaque refus. En noter la masse en regard du N° de tamis.

La somme des refus doit correspondre à la masse de sable initiale, avec une tolérance de ± 0.2%. L`écart conforme à cette tolérance est reporte sur le tamis le plus chargé (ou par moitié sur chacun des deux tamis les plus charges si ceux-ci accusent des refus égaux à 10% près).

- Calculer chaque refus en pourcentage de la masse de sable utilisée avant élimination des éléments de moins de 20 micromètres (chaque refus est automatiquement exprime en pourcent si l`échantillon était de 100 g).

d-Expression des résultats :

-Dénomination de sable :

a- La fraction basique F_B :

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

5.42 (a)

4.01

1.78 (b)

5.42+4.01+1.78=11.42

La fraction basique : ***FB=11.42%***

b -Le Groupe :

Le groupe est déterminé d`après le numéro de tamis présent dans le milieu de la fraction basique, suivant L`analyse granulométrique, le sable est divisé en 8 groupes universels suivants :

Tableau VI-2: les groupes de sables.

Groupes de sables		
Dénoménation du groupe	**Indication du groupe (N° de tamis)**	**Tamis de la fraction basique**
Gros	0,500	0,71-0,5-0,355
Trés grand	0,355	0,5-0,355-0,25
Grand	0,250	0,355-0,25-0,20
Moyen	0,200	0,25-0,20-0,18
Fin	0,180	0,20-0,18-0,125
Très fin	0,125	0,18-0,125-0,09
Mince	0,090	0,125-0,09-0,063
Poussiéreux	0,063	0,09-0,063-cuve

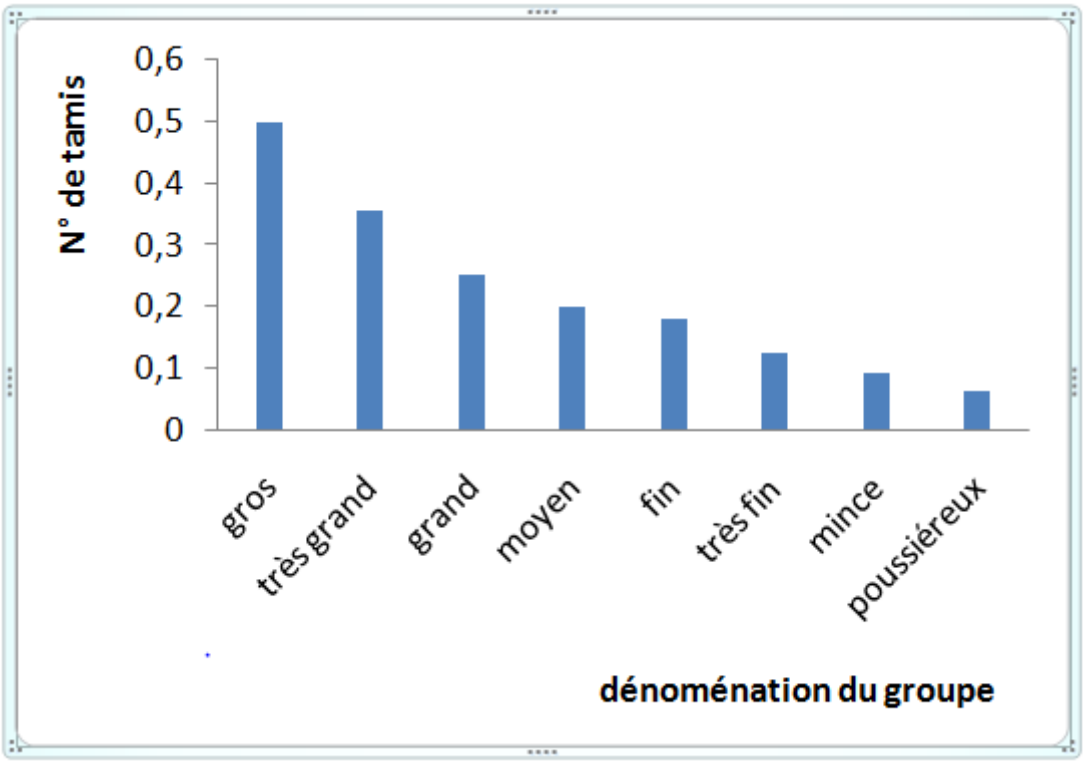


Figure VI-2 : Histogramme représente la variation du diamètre relatif aux groupes de sables.

Donc d'après le (tableau VI-2), il s'agit du sable de groupe : mince.

c-La Catégorie :

Le sable est de **la catégorie a** ,le résidu du sable dans le tamis inferieur extrême de la fraction basique est plus grands par rapport au résidu du sable dans le tamis supérieur extrême.

VI-7 La structure granulaire :

Il ya trois structure granulaire de sable sont :

-Sable à structure granulaire concentrée **:** si la quantité de sable se trouvant dans les trois tamis voisins est > 70%.

- Sable à structure étalée : si la somme est située entre 60-70%.

-Sable a structure très étalée et dispersée **:** si la somme est < a 60%.

Le sable de Bougezoule qui a servi à cette étude a une structure très étalée et dispersée puisque le degré d'uniformité calculé vaut d'une valeur de **DU = 56%.**



Figure VI-3 : Photographie du tamiseur utilisé au cours de notre étude.

Calcul de l`indice de finesse et présentation des résultats

On obtient cet indice de finesse en multipliant chaque refus, exprimé en pour-cent, par un nombre, caractéristique du tamis correspondant, puis en cumulant ces résultats. On divise cette somme par le pourcentage de résidus granuleux obtenu après élimination des éléments de moins de 20 microns.

Tableau VI-3 : Tamis utilisés en fonderie (ouvertures et multiplicateurs)

Série A.F.S (ASTM E11-87)			**Série G.F (selon DIN 4188)**	
N° de tamis	**Ouverture des mailles en mm**	**Multiplicateur**	**Ouverture des mailles en mm**	**Multiplicateur**
	3.350	3		
	1.700	5	1.4	6
	0.850	10	1.0	9
	0.600	20	0.71	17
	0.425	30	0.50	31
	0.300	40	0.355	41
	0.212	50	0.25	52
	0.150	70	0.18	71
	0.106	100	0.125	103
	0.075	140	0.09	146
	0.053	200	0.063	186
		300	Fond	281

Le tableau indique les multiplicateurs à utiliser selon la série employée. Ils ont été choisis en tenant compte des différences d`ouverture de mailles d`une série à l`autre, afin d`obtenir un indice comparable, quelle que soit la méthode utilisée.

Indice de finesse est un chiffre qui cependant l'avantage d'indiquer numériquement la prédominance des grains les plus nombreux d'un sable étudié, il est calculé à partir des valeurs de chaque tamis selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{AFS=\sum ai.ri/\sum ri}$$

ri=le résidu du sable dans chaque tamis (voir tableau VI-1).

ai=le coefficient multiplicateur pour chaque tamis (voir tableau VI-1).

L`analyse granulométrique du sable neuf de BOUGEZOULE nous a donné les

Résultats dans le tableau suivant :

Tableau VI-4: répartition granulométrique de sable bougazeule .

Diamètre de tamis en (mm)	**Multiplication Selon DIN 4188**	**Refus en (g)**	**Refus *Multiplicateur**
1.400	6	0	0
1.000	9	0.2	0.18
0.710	15	0.1	01.5
0.500	25	0.24	6
0.355	35	0.62	21.7
0.250	45	2.16	97.2
0.200	52	1.85	96.2
0.180	60	1.53	91.8
0.125	81	5.42	439.02
0.090	118	4.01	473.18
0.063	164	1.78	291.92
<0.063	275	0.3	82.5
Au total		∑ 18.03	∑ 1600.48

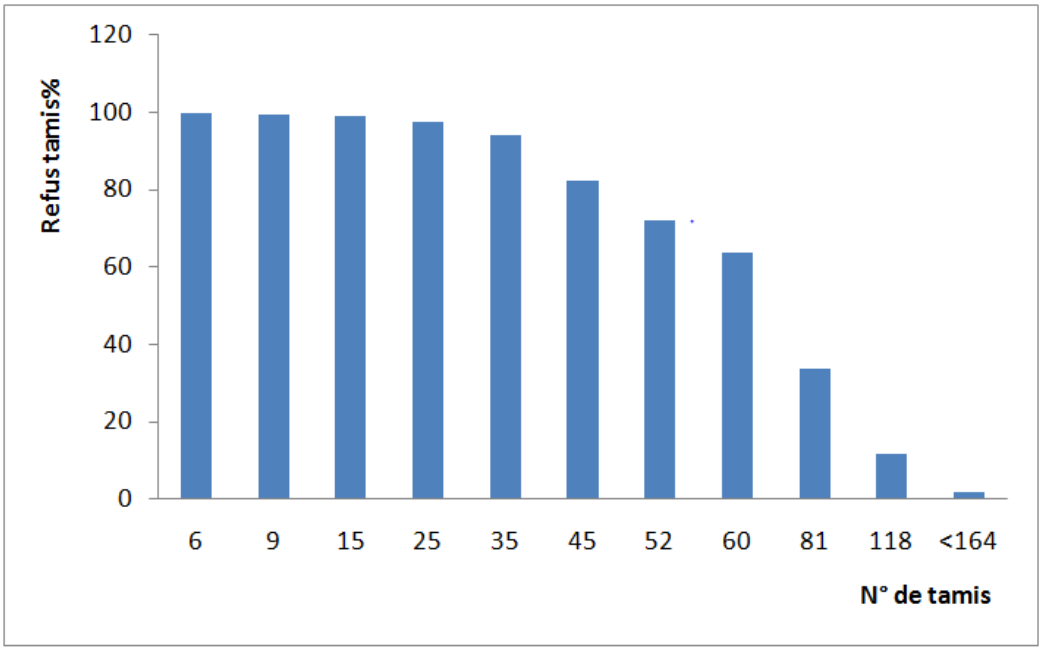


Figure VI-4 : histogramme de la répartition granulométrique de sable Bougazeule.

***AFS*=1600.48/18.03=88.80**

AFS=88.80%

D'après le tableau : relation entre indice de finesse et dimensions moyens des grains notre sable est situé entre 0.18 et 0.12 mm.

Tableau VI-5: répartition granulométrique de sable de Bougezeul pour tracer le graphe en forme « S »

Diamètre de tamis en (mm)	**Refus en (g)**	**Refus en (%)**	**Refus cumulés (%)**
1.000	0.2	0.11	100
0.710	01	0.55	99.89
0.500	0.24	1.33	99.34
0.355	0.62	3.43	98.01
0.250	2.16	11.98	94.56
0.200	1.85	10.26	82.60
0.180	1.53	8.48	72.34
0.125	5.42	30.06	63.76
0.090	4.01	22.24	33.80
0.063	1.78	9.88	11.56
<0.063	0.30	1.66	1.68

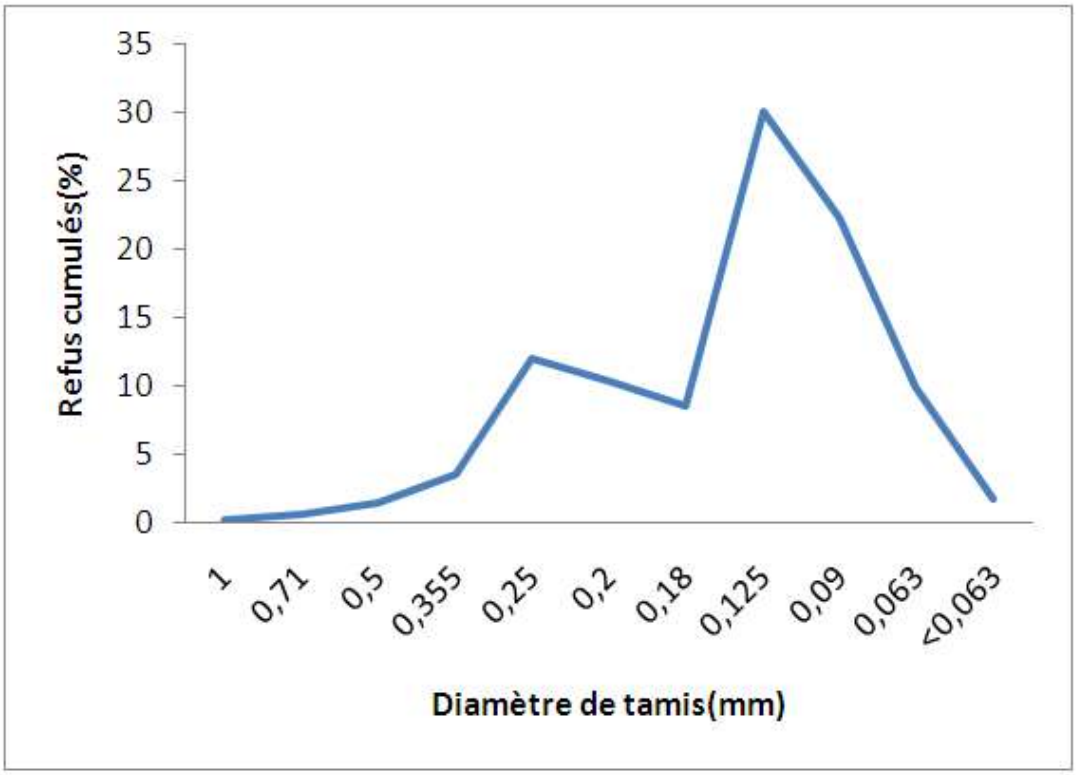


Figure VI-5 : courbe refus cumulés en fonction de diamètre de tamis

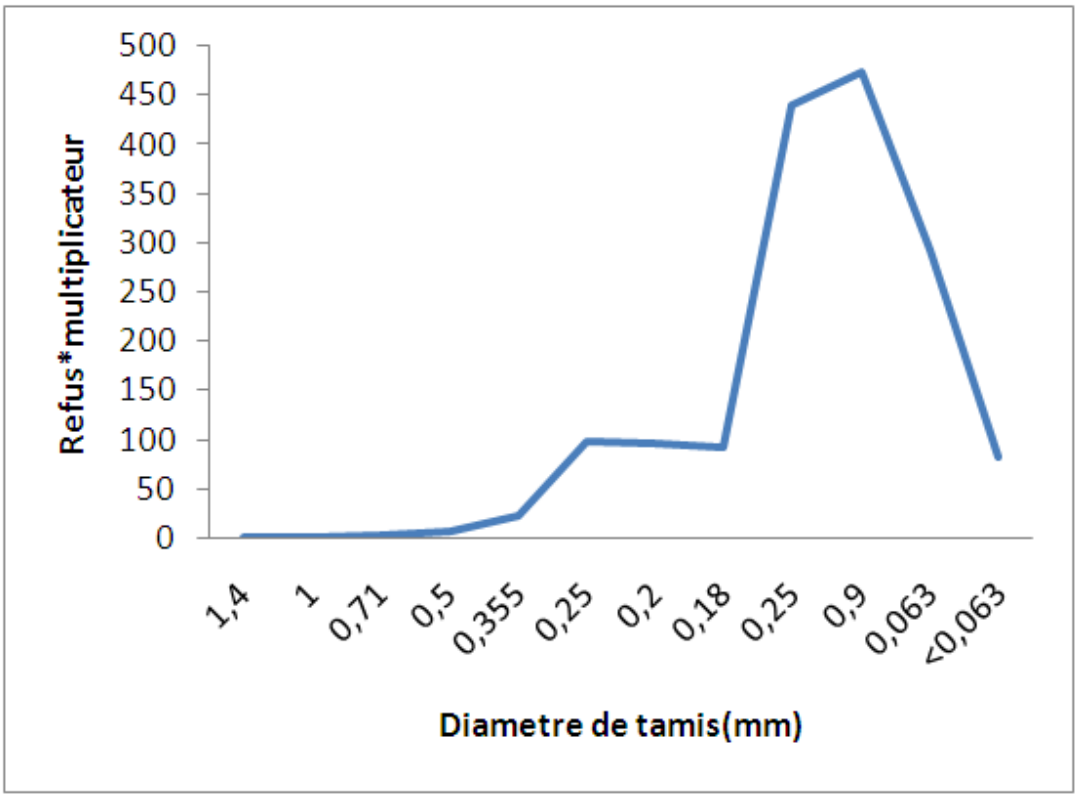


Figure VI-6 : courbe refus ×multiplicateur en fonction de diamètre de tamis.

VI-8 Déterminé le diamètre moyen

Pour obtenir le diamètre moyen des grains de sable qui par définition est le tamis fictif retenant 50% de masse de sable.

On trace la ligne horizontale du pourcentage 50% sur l`axe d`ordonnées jusqu`à intersection avec la courbe (figure VI-2), on baisse une ligne perpendiculaire jusqu'à l`axe des abscisses et on note le point dm correspondant au diamètre moyen.

Résultat :

Diamètre moyen égale a DM=0.15mm

VI-9 Degré d'uniformité :

Pour la détermination du degré de régularité on calcule d'abord 2/3dm et 4/3dm. Puis on détermine log 2/3dm et log 3/4dm on établi ces point sure l'axe des abscisses, on rétablit deux perpendiculaires jusqu'à la courbe et puis on trace 2 lignes horizontale jusqu'a l'axe d'ordonnées, on obtient 2points A et B et on calcule le degré de régularité DR

DR%=A%-B%

A%=4/3×0.15=0.1 $\Longrightarrow$ 17% (dans la courbe)

B%=2/3×0.15=0.2 $\Longrightarrow$ 73% (dans la courbe)

73% - 17% =56%

Donc degré d'uniformité : ***Du=56%***

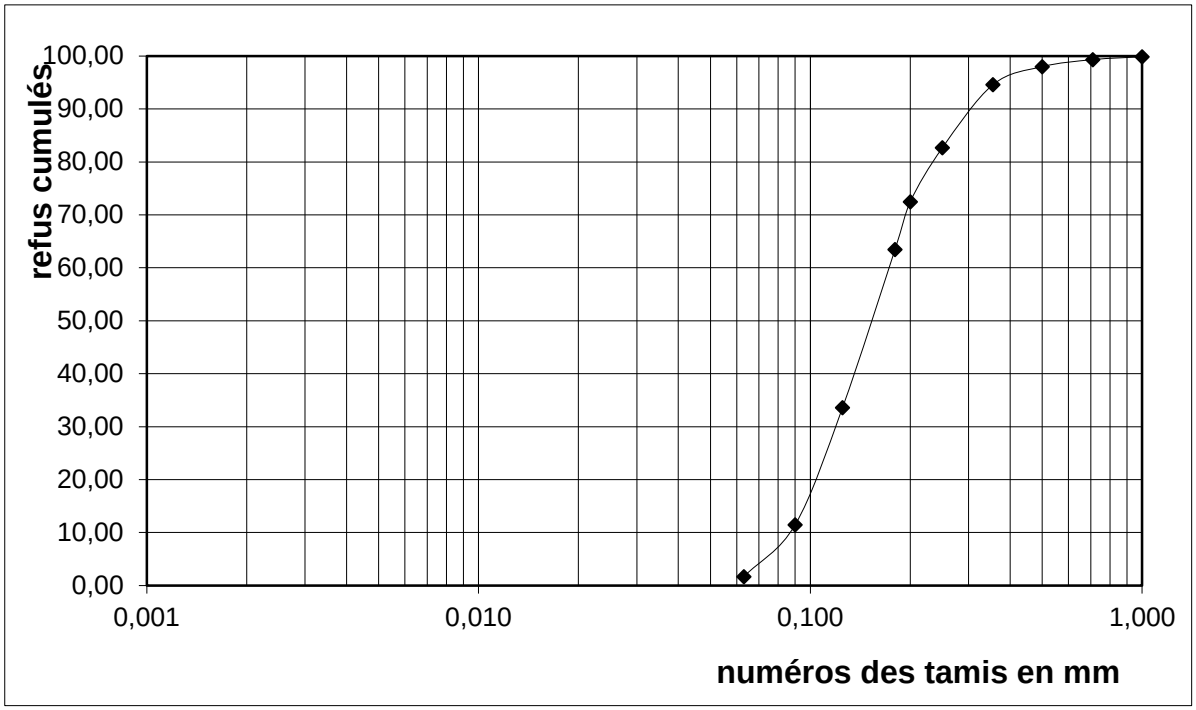


Figure VI-7 *:* Courbe granulométrique cumulative de refus (sable de Bougezoule) .

VI-10 Détermination de la teneur en matières en suspension (MS%):

On peut déterminer d'abord la teneur en élément inferieurs 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 poussière de silice.

Pesé 20 (g) de sable préalablement séché à 105°C ajouter 5(ml) de solution de tétra sodium-di phosphate $Na_4\ P_2O_7.\ 10H_2O$et 100(ml) H_2O dans un bécher de 600(ml).Chauffer pendant 10 min puis ajouter H_2O jusqu' à 400(ml) puis mettre le bêcher sous la lixiviation pendant 10 min. Après retrait du bêcher laver à l`aide d`une pissette, l`hélice et les parties inferieurs de l`arbre et des tiges. Ensuite ajouter un peu d'eau et laisser reposer pendant 30 min. Au cours de ce maintien les grains de sable et les particules dont les dimensions sont supérieures a 0,020 mm s`abaissent dans le fond du bêcher mais les particules argileuses restent en état de suspension.

Evacuer l`eau par siphonage, remplir de nouveau à l`eau siphonner.

L`eau trouble après 10 Répéter le siphonage avec maintien de 5 min. répéter cette dernière opération jusqu`à ce que le liquide surnageant soit clair ce qui signifie que toutes les particules argileuses sont éliminées.

On filtre le résidu et on le met dans un creuset on séchée on met dans le four à 1050°C pendant 2 heures.

Matière en suspension ***MS=7.30%***

VI-11 Détermination de la Perte au Feu :

Peser 10(g) de sable séché dans un creuset préalablement calciné et pesé , puis calciner dans le four à 1050°C pendant 2 heures.

Résultat :

Pert au feu PF=3.31%

Des pertes au feu élevées indiquent la présence des substances nocives, par exemple :

- Substances organiques
- carbonates

VI-12 Détermination de la morphologie des grains :

Appareil d'essai : microscope optique

D'après observation sur microscope optique et avec une comparaison avec des images les grains sont de forme arrêts arrondis.



Figure VI-8 : Photographie d'un microscope optique utilisé au cours de la présente étude.

- **Interprétation des résultats:**

L'analyse de l'échantillon montre que le sable de Bougazeule à une teneur élevée en matière en suspension de l'ordre de 7% (trop de poussière) selon les normes industrielle fonderie la teneur e matière en suspension ne doit pas être supérieur à 2% .

Donc ce taux élevé en matière en suspension démunie la force liante argile-silice ce qui conduit à la dégradation des caractéristique de moulage telle que: La plasticité, la cohésion…etc.

L'analyse de l'échantillon montre aussi que le sable brut de bougazoule à un pourcentage excessif en perte au feu de l'ordre de 3,31%. Selon les normes industrielles fonderie ce taux doit être inferieure à 1%. Donc avec ce teneur élevé, on aura une dégradation du mur de sable au contact de métal fondu, ce qui cause un rebut énorme en pièces coulées.

Toujours d'après l'analyse du sable de BOUGAZOULE, ce dernier à une grosseur moyenne de 0,15mm, et qui est hors norme selon les exigences industrielles fonderie (0,17 à 0,25),ce qui a pour conséquences

- une surconsommation en argile.

- une diminution alarmante de la perméabilité qui va provoquer les défauts de gaz (soufflures).

VI-13 Caractéristiques de sable de moulage (utilisant le sable neuf de Bougezoule):

Pour mieux jugé la qualité de sable neuf de bougazoul il faut l'utiliser comme un composant pour sable de moulage.

Pour la détermination des caractéristiques mécaniques nous prenons un mélange comportement 81%de sable neuf de Bougezoule ,10%de bentonite, 5%charbon et 4% d'eau nous l'introduisant dans un malaxeur à meule de capacité 5 kg la duré da malaxage est de l'ordre 5 min.



Figure VI-9: photographie d'un malaxeur utilisé au cours de la présente étude.

VI-13-1 Détermination de résistance au cisaillement :

a-But de travail :

Cette recommandation technique a pour objet de définir le mode opératoire de détermination de résistance au cisaillement d'un sable silico-argileux.

Le domaine d'application est limité aux sable silico-argileux utilisées en fonderie comme sable de moulage.

La mesure de résistance au cisaillement permet d'apprécier la résistance des moule vis-à-vis des efforts tranchant .Elle est généralement comprise entre le tiers et le quart de la résistance à la compression.

b- Principe :

Une charge constante est appliquer sur ½ face planes diamétralement opposés d'une éprouvette cylindrique en sable serré, la résistance au cisaillement est le rapport entre la charge et la section de rupture (hauteur × diamètre) de l'éprouvette.

Les éprouvettes utilisées sont soit au format européen (diamètre et hauteur : 50mm) soit au format américaine (diamètre et hauteur : 2Inch=50.8mm).

c-Appareillage :

- machine d'essais mécanique.

- mors de cisaillement.

- tube de l'éprouvette.

- damoire et accessoire pour la fabrication des éprouvettes.

d- Mode opération :

- Réaliser une éprouvette en sable selon les prescriptions de la recommande.

- Placer cette éprouvette entre les mors de cisaillement.

- Mètre en route la machine d'essais.

- Après rupture, noter la valeur obtenue.

e- Expression de résultat :

La résistance au cisaillement correspond à la moyenne de 3 essais réalisé :

1^{er} essai = 0.18 kgf/cm^2

2^{em} essai = 0.15 kgf/cm^2

3^{em} essai =0.18 kgf/cm

$$R_{cis} = \frac{0.18+0.15+0.18}{2} = 0.17 \text{ kgf/cm}^2$$



Figure VI-*10 :* Machine universelle pour détermination de la résistance à la compression / cisaillement

VI-13-2 Détermination de la résistance à la compression :

a-But de travail :

Cette recommandation technique a pour objet de définir le mode opératoire de détermination de la résistance à la compression d'un sable.

Le domaine d'application est limité au sable utilisé en fonderie comme sable de moulage.

La mesure de résistance à la compression permet d'apprécier la cohésion des sables.

b-Principe :

Une charge croissante est appliquée sur les faces planes d'une éprouvette cylindrique en sable serré.

Résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette.

Les éprouvette utilisé sont soit au format européen (diamètre et hauteur : 50mm) soit au format américaine (diamètre et hauteur : 2Inch=50.8mm).

c- Appareillage :

- machine d'essais mécanique conforme aux exigences de la recommandation.

Remarque : suivant le type de machine d'essai, les résultats peuvent être différents .notamment l'utilisation de machines manuelles conduit ,en générale, à des résistance mécanique supérieurs .

- mors de compression.

- tube de l'éprouvette.

- damoire et accessoire pour la fabrication des éprouvettes.

d- Mode opératoire :

- Réaliser une éprouvette en sable selon les prescriptions de la recommande.

- Placer cette éprouvette entre les mors de compression.

- Mètre en route la machine d'essais.

- Après rupture, noter la valeur obtenue.

e-Expression des résultats :

La résistance à la compression correspond à la moyenne des 3 essais réalisés :

1^{er} essai = 1.22 kgf/cm^2.

2^{em} essai = 1.19 kgf/cm^2

3^{em} essai = 1.23 kgf/cm^2

$R_{com}=\frac{1.22+1.19+123}{3} = 1.17$ kgf/cm^2

VI-13-3 Détermination de plasticité :

Pendant le moulage, le sable doit être hautement plastique, c'est-à-dire doit précisément reproduire les contours du modèle, sans nécessiter des grandes dépenses d'énergie.

- Le sable doit conserver, de façon hautement stable, la forme obtenue par moulage et compression, il doit se comporter comme corps solide afin de garantir la conformité entre les contours du modèle et de la pièce coulée.

La plasticité est le rapport résistance au cisaillement par la résistance à la commpression.

$$\textbf{Plasticité} = \frac{\textbf{Résistance au cisaillemant}}{\textbf{Résistance à la compression}}$$

Plasticité $= \frac{0.17}{1.21} = 0.14$

VI-13-4 Détermination de la perméabilité :

a- But de travail :

Cette recommandation technique définit le mode opératoire de détermination de la perméabilité d'un sable silico-argilo utilisé à vert.

Elle s'applique aux essais utilisant un perméamètre de type à cloche.

La perméabilité est l'aptitude que possède le sable serré à se laisser traverser par le gaz.

b-principe :

La perméabilité est déterminée par le temps par certain volume d'air, sous une certaine pression pour traverser une éprouvette cylindrique de sable aux dimensions fixées :

h = 50 min ; Ø = 50mm (pour une éprouvette au standard européen).

La perméabilité est de définie par la loi de darcy qui décrit l'écoulement de l'air dans en milieu poreux, homogène et isotrope en régime laminaire par la relation :

$$\mu = \frac{V.h}{P.a.t} \times \eta$$

μ : perméabilité du sable.

v : volume d'air écoulé.

h : hauteur de l'éprouvette.

P : pression d'air.

a : section de l'éprouvette.

t : temps de passage.

ŋ : viscosité de l'air (ŋ=1.8 10^{-5} pa s pour l'air à 23°)

c- appareillage :

Perméamètre (type manomètre) mesurant la pression d'air à débit d'air constant

(v/t= constante) .le débit d'air maintenu constant grâce à des buses .l'indice de perméabilité est dans ce cas inversement proportionnel à la pression lue.

Les perméamètre sont souvent gradués directement en en indice de perméabilité calcule à partir de :

- temps de passage de l'air en minute.

- volume d'air écoulé en cm^2.

- pression d'air en cm de colome d'eau.

- hauteur d'éprouvette en sable en cm.

- section de l'éprouvette en cm^2 et en considérant la viscosité de l'air comme constante.

d-Mode opératoire :

- se mettre dans la position correspondant à la libre communication avec l'atmosphère ;

- Soulever la cloche à l'air la remplir;

- maintenir la cloche et couper la libre communication avec l'atmosphère (position fermée ou arrêt). Relâcher doucement la cloche;

- choisir l'échelle de mesure correspondant à la perméabilité attendue du matériau .remettre l'aiguille à zéro le cas échéant;

- placer le tube contenant l'éprouvette, elle doit être élaborée suivant la prescription de la recommandation technique;

- noter la valeur indiquée par l'appareil;

Résultat :

$P_r=28$



Figure VI-11: appareil d'essai de perméabilité

VI-13-5 Confection d'une éprouvette :

a-But de travail :

Cette recommandation technique a pour objet de définir le mode opératoire de confection des éprouvettes.

Le domaine d'application est limité aux sable silico-argileux utilisé en fonderie comme sable de moulage.

Le suivi de l'évolution permet d'apprécier la variation du taux d'argile morte dans le sable.

b- principe :

Les éprouvettes destinées à la détermination des déférentes caractéristiques du sable préparé doivent répondre à des exigences de dimensions et de serrage bien définis .leur façonnage est réalisé au moyen d'un tube et d'un fouloir.

Elles sont des formes cylindrique pour les essais sur les sables silico-argileux.

Deux standards d'éprouvette sont couramment utilisés, le standard européen ou « GF » et les standards américains ou « DIETERT ». selon ces deux standards, les éprouvette, les tubes à éprouvette et les fonction (au damoire)sont légèrement déférents (voir tableau ci-après). cependant, il est important de ne peut pas mélanger ces deux standards ,il ne faut pas ,par exemple confectionner une éprouvette au standards américain avec un fouloir au standards européen .de plus, les machines d'essai spécifique aux essais de sable sont prévues pour travailler selon l'un ou autre des standards .là encore ,il ne faut pas, par exemple, déterminer la résistance à la compression avec un matériel DIETERT sur une éprouvette au standards européen.

Tableau VI-6 *:* caractéristique des éprouvettes.

Caractéréstique	Standard Européen	Standard Américain
-Diamètre de l'éprouvette en mm	50.00	50.8
-Hauteur de l'éprouvette en mm	50.00	50.8
-Tolérance sur la hauteur de l'éprouvette en mm	±0.3	±0.3
-Hauteur du tube pour éprouvette en mm	100	120.08
-Tolérance de diamètre de tube en mm	0.1	0.1
-Masse mobile de fouloir en g	6666	6350
-Hauteur de chute en mm	0.1	50.8
-Energie de serrage pour 3 coupes de fouloir	9.81j	9.49J
-Charge de serrage au fouloir pneumatique	1960N	1960N

c- Appareillage :

- balance de laboratoire, les pesées se feront au gramme près.

- fouloir manuel, Il doit être installé sur une embase rigide et fixe, éloignée des sources de vibration.

- récipient étanche.

- tamis d'une ouverture de maille comprise entre 3 et 5mm.

- tube pour éprouvette, ayant une paroi intérieure polie

- bloc démouleur.

d-Mode opératoire :

Avertissement : Il est recommandé d'opérer rapidement et de maintenir pendant la manipulation, le sable à l'abri de l'air (dans un récipient étanche par exemple)pour éviter son dessèchement.

- tamiser le sable à l'aide du tamis.

- Peser la quantité de sable nécessaire pour que l'éprouvette serrée soit conforme à la hauteur prescrite. Cette quantité est déterminée à ±1 près par tâtonnement, en générale, elle est comprise entre 145 et170g.



Figure VI-12 : machine de confection des éprouvettes.

Tableau IV-7 : La comparaison entre les normes internationale de sable de base et sable de Bougezoule selon la norme ASTM.

Caractéristique	Normes internationales de sable de moulage	Sable de Bougezoule
SiO_2 en %	≥97	89.39
Diamètre moyen (mm)	0.2----0.3	0.15
Degré de régularité (%)	65----85	56
Perte au feu (%)	<1	3.31
Matière en suspension (%)	0.5----2	7.20
Humidité (%)	3.5----4.0	4.33
Bentonite (%)	9----14	10
Charbon (%)	3.5----4.5	3.76
Résistance à la compression (kgf/cm^2)	0.19----0.26	0.17
Résistance au cisaillement (kgF/cm^2)	0.9----1.2	1.21
Plasticité	1.21	0.14
Perméabilité	100----180	28

Conclusion

Conclusion:

La silice (SiO_2) représente un composant principal utilisé dans diverses applications telles que la fabrication des verres, les céramiques, les fonderies et même pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Malgré cette importance, l'utilisation de sables siliceux en Algérie reste limitée suite à la qualité du matériau renfermant des inclusions nocives. C'est le cas du gisement de BOUGAZOULE où la présence d'impureté notamment la matière en suspension limite industriellement leur utilisation pour la production des pièces de fonderie de qualité.

Donc, on doit rechercher des considérations physico-chimiques, particulièrement la pureté de sable qui doit répondre aux normes strictes dont la teneur en SiO_2 doit être pas moins à 98 %. En outre, la granulométrie à également une influence majeure sur la qualité du moule. Les tailles moyennes des grains de quartz utilisées dans La fonderie sont comprises entre 0,2 et 0,3 mm.

Cette étude est basée sur des analyses de la composition du sable quartzeux du gisement de BOUGAZOULE. Selon les objectifs visés pour l'intégration de ce produit comme matière première primordiale pour l'industrie fonderie, et vue le tonnage important journalier demandé (ratio 20/1 métal-sable), une caractérisation physico-chimique de la matière première de la silice est nécessaire et à cet effet des analyses granulo-chimiques et minéralogiques sont d'une importance capitale pour mieux décider à son étude de faisabilité. Il ressort que legisement de BOUGAZOULE n'est pas suffisamment pur pour être exploité comme matière première pour l'industrie dans la fonderie.

La caractérisation physico-chimique à été faite en se basant essentiellement sur les normes admissibles pour l'industrie fonderie.

Différentes techniques d'analyses ont été employées, telles que la granulométrie par tamisage. Les différentes caractérisations physico-chimiques du sable quartzeux nous ont permis de trier les conclusions suivantes :

- L'analyse chimique de l'échantillon montre que le sable quartzeux de BOUGAZOULE à une teneur élevée en matière en suspension 7 % (trop de poussière).

Cependant, la pureté du sable quartzeux est de 89,39% (au lieu > 97% selon les normes), donc les teneurs d'impuretés sont également remarquables.

- Selon les exigences industrielles fonderie la teneur en perte au feu doit être inférieure à 1 %.

Cependant, au cours de notre étude nous avons trouvé 3,31%.

Il a été conclu par la présente étude que le gisement de Bougezeule ne peut être utilisé comme sable de noyautage, ni comme sable de contact. Néanmoins ce sable peut être utilisé pour le remplissage la fabrication du moule non permanant en sable à vert.

BIBLIOGRAPHIE

[1]- Technique de l'ingénieur CUENIN(p) sable et matériaux de moulage de fonderie.

[2]-Sables autodurcissants, récupération associée au grenaillage Fonderie, Octobre 1980;Fonderie. Fondeur d'aujourd'hui n°11, janvier 1982.

[3] Noel (m)-la chimie au service de la. Hommes et fonderie n83 mars1988.

[4]- Recherche de la qualité des pièces de fonderie CIATF 1986.

[5]- SANDERS (C.A)-foundry sand p American colloid company.

[6]- JASSON(p) –granulométrie et perm lite des sables en fonderie.

[7]-Technique de l'ingénieur LUCAS(L.D) donnés physico chimiques des principaux métaux et métalloïdes M65.

[8]-HOFMANN(F) –technologie des matériaux de moulage en fonderie Georges Fisher.

[9]Liants argileux pour sable de fonderie SCRTA Technical bulletin n°8.

[10] JEANCOLAS(M) et VIROLLE(x)-guide de l'agglomération des sables siliceux par le procédé de silicate de soude-gaz carbonique CTIF4215.

[11]VIROLLE (X) et CALAIS(A) –Sable auto-durcisseurs du silicate de soude et au silicium .fonderie n°234.

[12] article sable en matériaux de moulage en fonderie [M3 575].

[13] Les cours de Mr Hbireche.

[14] [15] Classeur de fonderie Berrouaghia.

[16] Société française des bentonites.

[17] Mémoire (nouveau processus d'élaboration du sable de moulage en fonderie de Berrouaghia) Ladjal, Missoum.

[18] Technique d'ingénieur moulage-noyautage .

[19] [35] (cf. article Sables et matériaux de moulage de fonderie dans ce traité).
[20] [[M 3 575] Sables et matériaux de moulage de fonderie de ce traité].

[21] (cf. article [P 3 660] Analyse et caractérisation des matériaux de construction dans le traité Analyse et caractérisation).