



Université **S**idi Mohammed **B**en **A**bdellah - Fès

FACULTE DES **S**CIENCES ET **T**ECHNIQUES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'Obtention du

Diplôme de **M**aster **S**ciences et **T**echniques

Option : **I**ngénierie **M**écanique

*Estimation des coûts énergétiques et analyse technico-économiques
de récupération du sable de fonderie*

Présenté par :

RAZZAK Mohammed

Effectué à :



Fonderie Et Aciérie Du Maroc

Soutenu le «26 /06/2015 »devant le jury :

Mr. A. ABOUTAJEDDINE Encadrant de projet (FST)

Mr. J. ABOUCHITA Examineur (FST)

Mr. M. EL MAJDOUBI Examineur (FST)

Faculté des Sciences et Techniques - Fès - B.P. 2202 – Route d'Imouzer – FES

☎ 212 (0) 05 35 60 29 53 Fax: 212 (0) 05 35 60 82 14 Web: <http://www.fst-usmba.ac.ma/>

Année 2014-2015

Dédicaces

Je dédie ce présent travail :

À la ressource de tendresse, à celle qui a apporté la torche du sacrifice pour éclaircir mon chemin, à celle qui a fortifié ma volonté, qui m'a consolidé, et qui lève ses mains à chaque prière pour me souhaiter la réussite et le bonheur, à ma douce et fidèle mère.

À celui qui a guidé mes pas, qui font de mon éducation sa principale préoccupation, à mon cher père.

Mes sincères expressions d'amour, de respect, et de confiance, à mes chers frères et sœur et sans oublier les vrais amis, ainsi à tous ceux qui me sont chers.

Remerciement

Cette page répond à une exigence morale bien plus qu'à l'habituel souci d'honnêteté formelle. En effet, il serait difficile d'établir une liste exhaustive des personnes, ayant d'une façon ou d'une autre, permis la réalisation de ce modeste rapport. L'absence d'une référence explicite à chacun d'entre eux ne saurait, en aucun cas, être interprétée comme un manque de reconnaissance.

*Mes chaleureux remerciements vont également à l'intention de **Mr. A. Aboutajeddine**, mon encadrant pédagogique au sein de la FSTF professeur au département Génie mécanique, pour ses conseils lucides et pertinents, également pour sa disponibilité et son ouverture*

*Je tiens aussi à présenter mes sincères remerciements à mon encadrant techniques monsieur **A. FARIS** directeur technique au sein de la « F.A.M », pour ses efforts considérables afin de bien assurer mon projet de fin d'études, en donnant plus d'intérêt aux guides et aides pendant toute la durée de stage, sans oublier les responsables au sein de l'usine pour leurs conseils, leurs idées, leur expérience et leur savoir-faire, et aussi pour les énormes efforts qu'ils ont élaboré pour me mettre les pieds sur le chemin professionnel, par les conseils précieux et les recommandations qu'ils nous ont prodigué durant toute la période du stage et qui m'ont été d'une grande utilité.*

Aussi j'adresse mes remerciements à tous les professeurs du département Génie mécanique pour la qualité et la diversité des enseignements qui nous été dispensés.

Par la même occasion j'adresse mes vifs remerciements à, qui m'a orienté pour réussir ce projet. Mes sincères remerciements s'adressent à ma chère famille. Merci pour votre soutien moral et financier, vos encouragements et votre confiance, et surtout merci pour votre amour sans faille, et ceux qu'ayant contribué de près ou de loin à la réussite de mon stage.

Résumé

La maîtrise des coûts, au plus tôt du cycle de vie produit, est devenue un atout majeur dans la compétitivité des entreprises confrontées à la mondialisation de la concurrence. Après avoir mis en avant les problématiques liées à la difficulté de cette maîtrise, je présente une démarche liée à une approche définissant un concept d'entité coût lié au domaine d'activité du produit à concevoir et à réaliser.

Pour estimer le coût de la quantité de sable à vert récupérée en « **Fonderie Et Aciérie Du Maroc** » deux méthodes ont été appliquées en plus d'une étude bibliographique :

- Mesure des consommations énergétiques d'installation,
- Estimation à partir des tonnages de métal coulés,

Le projet réalisé de février 2015 jusqu'à juin 2015, a répondu à ces attentes.

Donc l'objectif du projet était de faire la démonstration industrielle de l'intérêt d'une installation de régénération thermique des sables de fonderie, qui soit à la fois peu consommatrice d'énergie et de coût peu élevé.

Pour atteindre cet objectif principal, la première partie du travail a été consacrée à la définition et à l'analyse de l'état actuel de la zone (Information générale sur les sables de fonderie, Moyens et méthodes de contrôles de sables, Description et bilans énergétiques de l'installation). Ces analyses m'ont ensuite orientée, chacune dans une démarche d'amélioration ces données, et les actions d'amélioration proposées m'ont permis de proposer les techniques d'analyse d'efficacité énergétique et d'éclaircir le mode expérimental afin d'élaborer des actions de surveillance de l'installation.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	10
------------------------------------	----

CHAPITRE 1 : Présentation de l'entreprise

I. Présentation de FAM :	12
1. Historique de FAM :	12
2. Fiche technique :	12
3. Position sur le marché :	13
4. Types de clientèle :	13
5. Les équipements de l'entreprise :	14
6. Organigramme de FAM :	15
II. Procédé de fabrication :	16
1. Principe du moulage en sable :	16
2. Fabrication des modèles :	16
3. La fusion du métal :	18
4. La coulée du métal en fusion :	20
5. Le décochage :	22
6. Le parachèvement:	22
7. Conclusion	23

CHAPITRE 2 : Informations générales sur les sables de fonderie

I. Les sables de fonderie	25
1. Introduction	25
2. Origine, Elaboration	25
3. Caractéristique physico-chimiques	26
II. Principaux sables de production du moule et noyau	29
1. Description	29
2. Sable siliceux	30
3. Sable de chromite	30
4. Sable de zircon	31
III. Liants et autre produits chimiques	31
1. Bentonite	31
2. Résines	32
3. Poussière de charbon	32
4. Liants amylicés	33

IV.	Moyens et méthodes de contrôles ; définition des méthodes :	33
1.	Méthode d'analyse de l'humidité.....	33
2.	Détermination de la perte au feu	34
3.	Granulométrie par voie sèche :	34
4.	Détermination du pH des sables :.....	36
5.	Détermination de la compacité C et la porosité p :	37
V.	Critères d'acceptation :	38
VI.	Qualités exigées d'un sable de fonderie :	38

CHAPITRE 3 : Description / bilans énergétiques des consommations de l'installation de régénération

I.	Introduction.....	41
II.	Traitement du sable neuf	41
1.	Séchage du sable	41
2.	Refroidissement et transport du sable	42
III.	Récupération du sable de remplissage	43
1.	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2.	Installation de régénération mécanique du sable.....	43
2.1	Description de l'installation.....	43
2.2	Décochage et pré-régénération	44
2.3	Régénération mécanique	45
IV.	Récupération du sable de contact	45
1.	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2.	Séparateur magnétique	46
3.	Installation de régénération thermique du sable	47
3.1	Description	47
3.2	Installation de gaz.....	47
3.3	lit Fluidisé de calcination.....	47
3.4	Refroidissement et Aspiration	48
3.5	Contrôle du processus	48
V.	Les différents consommateurs de l'installation :	48
1.	Les consommateurs d'électricité	48
1.1	Installation de pré-régénération et transport pneumatique	49
1.2	Installation de la régénération thermique.....	49

2.	Consommation d'air comprimé.....	50
1.1	Compresseurs	50
1.2	Sécheur frigorifique	51
3.	Consommation du gaz propane	51

CHAPITRE 4 : Calcul des coûts énergétiques des installations et étude de faisabilité

I.	Comptage de la consommation énergétique	53
1.	Comptage de la consommation gaz propane.....	53
2.	Comptage de la consommation électrique	54
3.	Comptage d'air comprimé	54
II.	Mesure de consommation énergétique	56
1.	Mesure sur l'unité de traitement mécanique	56
2.	Mesure sur l'unité de traitement thermique.....	57
2.1	Calcul de la consommation du gaz propane.....	57
2.2	Calcul de la consommation d'air comprimé.....	58
3.	Mesure sur l'unité de traitement du sable neuf	58
III.	Evaluation des consommations d'énergies	59
1.	Bilan technico-économique d'unité de traitement thermique	60
2.	Bilan technico-économique d'unité de traitement du sable neuf.....	61
3.	Faisabilité des deux unités de traitement	63

Conclusion

Référence bibliographique

Liste des figures

Figure 1 : les coordonnées de F.A.M	13
Figure 2 : disposition des différentes sections de l'entreprise	15
Figure 3 : Organigramme de FAM	15
Figure 4 : Le différent retrait (%)	16
Figure 5 : Le plan et le modèle en bois de la pièce.....	17
Figure 6 :Four à induction.	18
Figure 7 : Préchauffage la poche de mautention	20
Figure 8 : Service de coulage	22
Figure 9 : L'Opération de fabrication de pièces de fonderie	23
Figure 10 : Procédé d'élaboration d'un sable pour l'industrie de la fonderie	26
Figure 11 : Sécheur à tambour rotatif	42
Figure 12 : synoptique d'installation de récupération mécanique du sable.....	44
Figure 13 : description de fonctionnement de tour de régénération.....	45
Figure 14 : séparateur a tampon magnétique rotatif.....	46
Figure 15 : synoptique d'installation de récupération thermique	47
Figure 16 : Le Compteurs divisionnaires de comptage à gaz pour la mesure de la consommation.....	53
Figure 18 : déférentes propulseur d'installation	55
Figure 19 : l'activateur l'installation	55
Figure 20 : schéma d'installation de régénération mécanique.....	56

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de composition de sable de moulage.	27
Tableau 2 : Propriétés des sables de base disponibles	31
Tableau 3 : Composition du mélange d'additif pour la préparation de sable vert	33
Tableau 4 : tamis de contrôle selon la norme ASTM	35
Tableau 5 : granulométrie et indice de finesse.....	36
Tableau 6 : Critères d'acceptation de la qualité du sable.....	38
Tableau 7 : Consommation électrique de pré-régénération	49
Tableau 8 : Consommation électrique de régénération thermique.....	49
Tableau 9 : caractéristiques des compresseurs d'installation d'air comprimé.....	50
Tableau 10 : caractéristiques de sécheur d'installation d'air comprimé.....	51
Tableau 11 : caractéristique des propulseurs de transport pneumatique	56
Tableau 12 : mesure d'installation de régénération mécanique	57
Tableau 13 : quantité du sable estimé pour l'année 2014	59
Tableau 14 : consommation d'unité de traitement thermique	60
Tableau 15 : coût de consommation d'installation.....	61
Tableau 16 : consommation d'unité de traitement du sable neuf.....	61
Tableau 17 : coût de consommation d'installation.....	62
Tableau 18 : Hypothèses chiffres retenues pour la faisabilité.....	63

Introduction générale

Les fonderies fondent des métaux et des alliages ferreux et non ferreux et les refaçonnent en produits sous leur forme finie ou presque par la coulée et la solidification du métal ou de l'alliage en fusion dans un moule. L'industrie de la fonderie est différenciée et diverse. Elle se compose d'une large gamme d'installations, certaines étant petites, d'autres très grandes, chacune mettant en œuvre une combinaison de technologies et d'opérations sélectionnées en fonction des intrants, de la taille de série et des types de produits fabriqués. L'organisation du secteur est fondée sur le type d'apport métallique, la principale distinction s'établissant entre les fonderies de métaux ferreux et celles de métaux non ferreux. Étant donné que, de manière générale, les pièces moulées sont des produits semi-finis, les fonderies sont situées à proximité de leurs clients.

Les fonderies utilisant de grandes quantités de sable en tant que matière première inerte, la régénération et la réutilisation de ce sable représentent un point important à prendre en considération dans les fonderies. Différentes techniques sont utilisées pour la régénération du sable (traitement et réutilisation interne en tant que sable de moulage).

Consciente de ce facteur stratégique, et dans ce contexte mon projet dans la société FAM était de suivre et d'analyser les niveaux de consommations technico-économiques de l'installation de récupération mécanique-thermique du sable usée afin d'estimer le coût de récupération du sable et d'évaluer des actions préventive de l'installation.

Pour atteindre l'objectif, je me suis basé sur des informations générales sur les sables de fonderie et sur la description des composantes de l'installation en se servant de la méthode de contrôle de la qualité du sable. Ce qui m'a facilité la tâche pour faire une analyse de la consommation énergétique de la station. Pour laquelle j'ai pu établir un plan d'action basée sur les résultats de la méthode et du calcul ainsi qu'un plan de maintenance basée sur la faisabilité par des actions amélioratrices ou/et préventives.

CHAPITRE 1 :
Présentation de l'entreprise

I. Présentation de FAM :

1. Historique de FAM :

Société créée par des industriels français, au début de la 2^{ème} guerre mondiale, pour apporter un soutien aux unités industrielles basées au Maroc, en pièces de rechange. La société fonderie de fonte était la première et unique, à Casablanca, dans le domaine métallurgique.

En 1951, l'usine a été construite dans la nouvelle zone industrielle à Ain Sebâa, en association avec les Aciéries Thomie pour apporter la technologie de l'acier d'où la création de la société Fonderies et Aciéries du Maroc (FAM).

FAM s'est tracée une politique d'investissement en matériels lui assurant une grande souplesse afin de répondre aux demandes diversifiées de ses clients, et avec des délais courts tout en garantissant une qualité répondant aux normes internationales.

«*Fonderies et Aciéries du Maroc*» dont l'origine remonte à 1940, est implantée à Casablanca, le centre industriel du pays. Pour répondre aux besoins les plus exigeants de ses clients, FAM poursuit sa politique d'investissement dans du matériel moderne et performant.

Par plus d'un demi-siècle d'expérience, et par des relations étroites avec des partenaires étrangers leader dans la métallurgie, FAM assure une formation permanente de son personnel, elle met à la disposition de sa clientèle :

- Un département d'étude.
- Un département de produit et d'équipement.
- Un laboratoire de contrôle.

La devise de la Société FAM est :

- Ⓢ L'innovation
- Ⓢ La qualité
- Ⓢ Le service

2. Fiche technique :

- Ⓢ Raison sociale : Fonderies et Aciéries du Maroc.
- Ⓢ Forme juridique : Société Anonyme.
- Ⓢ Domaine d'activité : Elaboration des pièces en acier et fonte moulés.

- Ⓢ Capital : 15.925.000,00 DH
- Ⓢ Année de création : 1940
- Ⓢ Superficie : 17000m² dont 1500m² sont couverts.
- Ⓢ Adresse : 19, chemin des pivoines Ain Sebâa, BP : 13654.
- Ⓢ Tél : 0522.35.58.88 ; Fax : 022.35.39.63
- Ⓢ Email : fam@wanadoo.net.ma



Figure 1 : les coordonnées de F.A.M

3. Position sur le marché :

La F.A.M. se positionne au Maroc en leader dans le domaine de la fonderie aussi bien en chiffres d'affaires qu'en dimension de l'entreprise.

4. Types de clientèle :

La clientèle locale de la FAM est composée de sociétés opérant dans des domaines très variés et importants pour l'économie du Maroc. On y trouve principalement :

- Ⓢ Des cimenteries
- Ⓢ Des sucreries
- Ⓢ Des mines
- Ⓢ Des sociétés opérant dans le domaine des Travaux Publics et du Bâtiment.
- Ⓢ Des offices opérant dans les domaines de l'énergie et du transport.
- Ⓢ Des travaux publics.
- Ⓢ La sous-traitance en fonderie.

Les clients à l'étranger sont basés aussi bien en Europe qu'en Afrique.

5. Les équipements de l'entreprise :

Pour répondre aux besoins les plus exigeants de ses clients, FAM s'est tracée une politique d'investissement en matériels modernes et performants. Cette politique assure au groupe une grande souplesse afin de répondre aux demandes diversifiées de ses clients avec des délais courts et de garantir une qualité qui répond aux normes internationales.

Ce matériel accompagne toutes les phases du procédé et équipe tous les ateliers respectifs, notamment :

- **L'atelier du modelage** : il est entièrement équipé pour la réalisation et la remise en état des modèles et noyaux en bois.
- **L'atelier de la fusion** : il contient 5 fours à induction dont 2 sont d'une charge de 4 tonnes, 2 d'une charge de 1 tonne et 1 de 500 kg.
- **L'atelier du moulage** : il est doté d'un chantier carrousel pour le moulage des pièces de moyennes séries et d'une masse inférieure à 200 kg, d'un chantier Fast-Loop semi-automatique pour le moulage des pièces allant jusqu'à 4 tonnes en masse. Cet atelier dispose aussi d'un chantier de moulage main contenant des moules destructibles de sable durci à froid pour la fabrication des pièces allant jusqu'à 7 tonnes et d'une installation de régénération mécanique et thermique du sable.
- **L'atelier du traitement thermique** : il contient 2 fours automatiques munis de capteurs et gérés par des automates programmables, ayant chacun une capacité de 5 tonnes. Ces fours sont dédiés au chauffage et au maintien en température des pièces obtenues par moulage. Cet atelier comprend aussi un bac de trempe à eau destiné au refroidissement rapide des pièces chauffées préalablement introduites dans le four. Sinon, il s'agit d'un refroidissement lent si elles sont refroidies à l'air ambiant, ce type de refroidissement est connu sous le nom de trempe à l'air. C'est au niveau de cet atelier où la pièce subit les traitements thermiques tels que la trempe, le revenu et la normalisation pour acquérir les propriétés mécaniques requises.
- **Les ateliers de parachèvement et d'usinage** : L'atelier de parachèvement reçoit à son entrée des pièces moulées traitées thermiquement afin de dégager à sa sortie des pièces finies ou semi-finies. Pour ce faire, il est doté de divers équipements de finition, à savoir : une grenailleuse d'une capacité de 3 tonnes, une presse de 400 tonnes pour le redressage des pièces et des meules pour leur surfaçage.

Quand la pièce exige une grande précision dimensionnelle, elle doit être usinée une fois le parachèvement est fini, d'où l'obligation de passer par l'atelier de l'usinage doté de fraiseuses et tours conventionnels qui peuvent traiter des pièces de révolution dont le diamètre va jusqu'à 2.5 m.

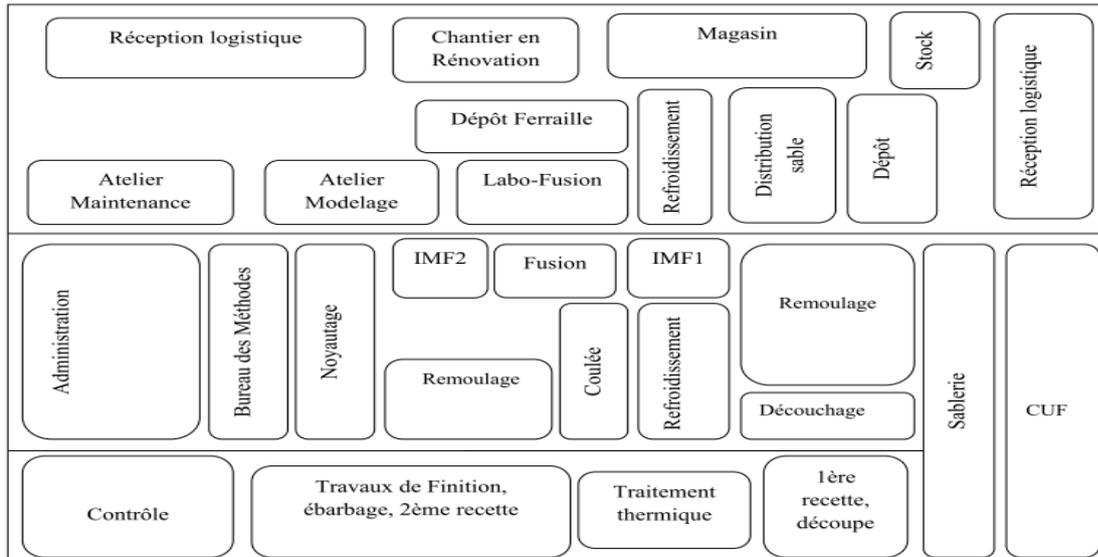


Figure 2 : disposition des différentes sections de l'entreprise

6. Organigramme de FAM :

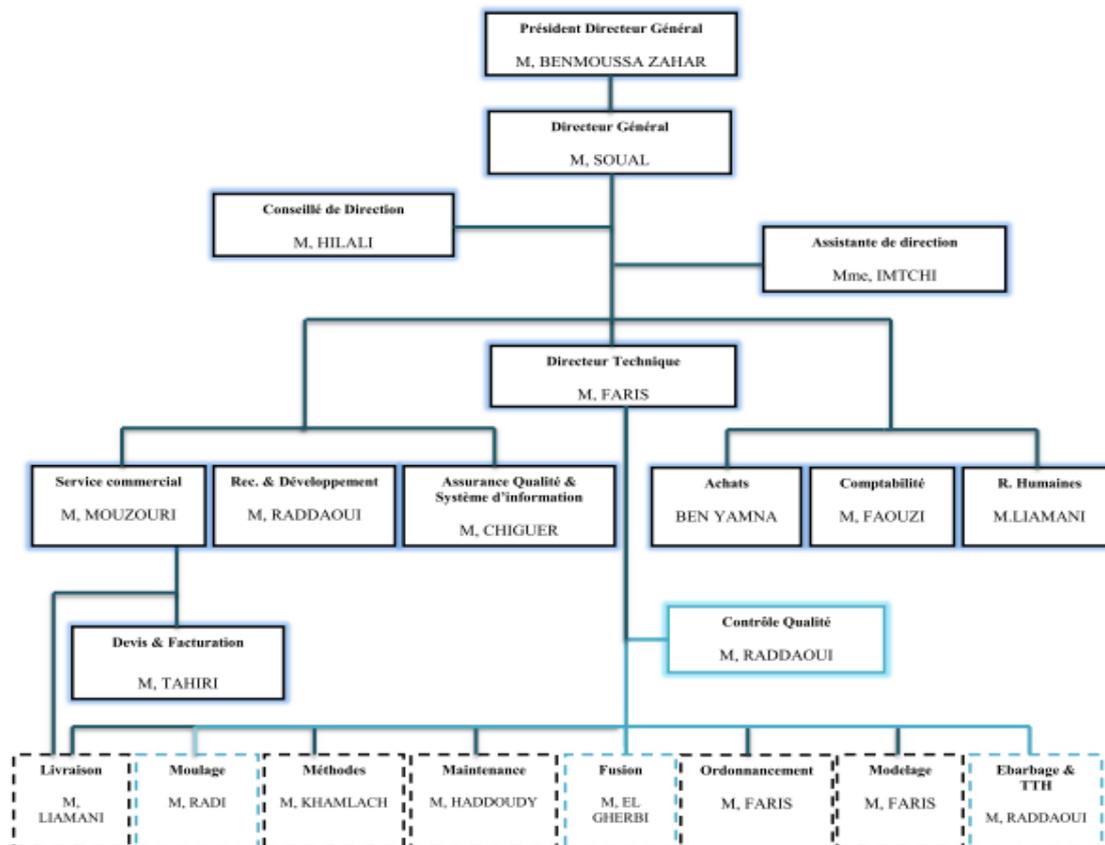


Figure 3 : Organigramme de FAM

II. Procédé de fabrication :

1. Principe du moulage en sable :

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Un moule simple est constitué de deux parties : la partie supérieure et la partie inférieure. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'au remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.

2. Fabrication des modèles :

Le modèle est l'appareil utilisé pour la réalisation économique de l'empreinte dans le moule. Les principaux facteurs influant sur sa conception sont le nombre de pièce à fabriquer, la précision demandée, les dimensions et formes des pièces, la méthode de moulage et de noyautage choisie.

❖ Conception des modèles en bois :

Lors de leur réalisation, il convient de tenir compte d'un certain nombre de facteurs :

Le retrait : C'est un phénomène physique de contraction du métal (ou alliage) lors de sa solidification (recristallisation).

Alliage	Retrait (%)	Alliage	Retrait (%)
Al-Cu	7 à 8	Aciers non alliés	5 à 7
Al-Si	3,5 à 5	Aciers alliés	7 à 10
Cu-Sn	4,5	Fontes GL	0,5 à 3
Cu-Zn	6,5	Fontes GS	3 à 6
Mg	4	Zn	5 à 6

Figure 4 : Le différent retrait (%)

Son existence oblige le modeleur à prévoir sur le modèle des dimensions supérieures à celles de la pièce, d'environ : 1,2 à 2,4% pour les aciers et 1 à 1,5% pour les fontes.

Lors de leur réalisation, il convient de tenir compte d'un certain nombre de facteurs :

- Ⓢ **Les surépaisseurs d'usinages** : Réserves de matière nécessaires à l'usinage, elles sont fonction du nombre de passes effectuées et des copeaux minimaux (ébauche, semi finition, finition).
- Ⓢ **La dépouille** : Inclinaison des parois verticales du modèle ou boîte à noyaux par rapport au sens de démoulage, elle permet de faciliter l'extraction du modèle. Le sens du démoulage est défini par le plan de joint.
- Ⓢ **Les congés** : Arrondis de rayon variable qui permet d'éviter les tensions internes et de faciliter le démoulage.
- Ⓢ **Les portées de noyau** : Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.
- Ⓢ **Les noyaux** : Parties de moule exécutées séparément, les noyaux permettent le plus souvent de ménager des évidements dans les pièces, parfois de faciliter le démoulage. Ils comportent toujours deux zones :
 - L'une qui sera en contact avec le métal liquide et donnera la forme à la pièce.
 - L'autre, en contact avec le sable du moule, sert à son positionnement (portée).
- Ⓢ **Les masselottes** : Ce sont des réserves de métal liquide, ménagées dans les moules, destinées à céder du métal à la pièce pendant sa solidification. Elles permettent, en outre, de localiser les défauts internes à l'extérieur des pièces, les impuretés remontant en surface.

❖ **La construction du moule en sable :**

Le moulage consiste à réaliser une empreinte en sable à partir d'un modèle aux formes de la pièce. Deux châssis métalliques, parfaitement repérés entre eux, servent à maintenir le sable utilisé pour prendre l'empreinte du modèle.

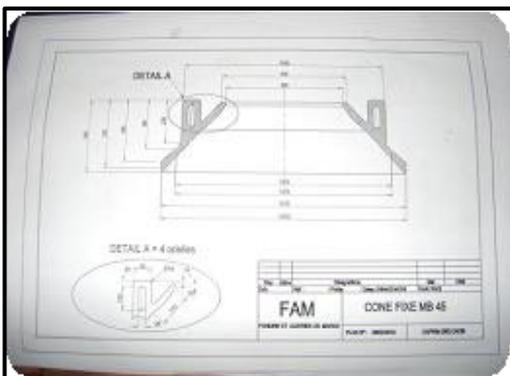


Figure 5 : Le plan et le modèle en bois de la pièce

3. La fusion du métal :

La fonderie utilise des ferrailles de nuances différentes qu'elle achète et classe dans le parc des matières premières.

Pour une nuance donnée, le calcul de la charge du four s'effectue à l'aide d'un logiciel de calcul. Le calcul détermine la masse et la nuance de la matière première tout en optimisant les coûts ; il est à noter que des ajustements sont pris en compte pour compenser les pertes. La charge est portée à une température supérieure à la température de fusion de l'alliage.

❖ Appareils de fusion :

La FAM est équipée de 2 fours à inductance de 4 tonnes, un four à inductance de 750kg et 2 fours à inductance de 500 kg.

Principe de fonctionnement d'un four à inductance :

La charge métallique à fondre est placée dans un creuset réfractaire au centre d'une bobine inductrice. Le courant induit dans la charge réchauffe celle-ci et la porte à la fusion.

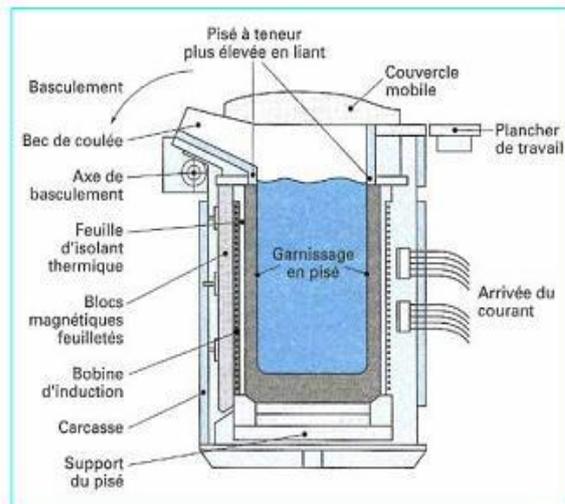


Figure 6 : Four à induction.

Lorsque le métal est fondu, une éprouvette coulée à la louche est destinée à une analyse par spectrométrie d'émission optique. Afin d'obtenir des mesures fiables, le spectromètre doit être régulièrement recalibré à l'aide des échantillons homogènes de composition connue (livrées

avec l'appareil). Cette analyse permet de s'assurer que le métal en fusion est conforme à la spécification, des ajouts de correction sont rajoutés afin d'atteindre le milieu de la fourchette de spécifications de l'alliage concerné.

Une seconde éprouvette est réalisée pour vérifier l'effet de la correction. Si les résultats d'analyse de cette seconde éprouvette sont conformes, les pièces peuvent être coulées et ce sont ces résultats qui seront inscrits sur le cahier de coulé ainsi que sur les certificats de conformité qui seront remis au client avec ses pièces.

❖ **Traitements du métal liquide :**

Après fusion, il est nécessaire de traiter le métal liquide pour éliminer les crasses qui surnagent à la surface, l'affiner et améliorer ses caractéristiques avant de le couler dans les moules. Ces traitements peuvent se faire directement dans le four, dans la poche ou à la coulée dans les moules, l'élimination des composants indésirables s'effectue par décrassage

Ⓢ **Décrassage :**

C'est une opération commune à tous les modes d'élaboration et à tous les métaux et alliages pour éliminer les scories (impuretés non ferreuses) qui décantent dans le métal liquide et qui peuvent être source de défauts dans les pièces.

Pour décrasser le métal liquide, on utilise différents produits (fondants à base de chaux, spath fluor, ou dérivés), pour fluidifier les impuretés qui proviennent des charges métalliques, des retours (sable sur les jets, descentes de coulée...), etc.

❖ **Manutention du métal liquide :**

Pour la manutention du métal liquide on utilise des poches garnies de matériaux réfractaires. Chaque transvasement refroidit le métal liquide.

Dans le cas de la fonte, on peut perdre 100 °C entre le four et l'entrée dans le moule. Il faut donc :

- Ⓢ préchauffer les poches le mieux possible.
- Ⓢ utilisé des contenants bien isolés munis de couvercles.
- Ⓢ limiter les transvasements et les faire rapidement.

Pour le transport du métal liquide on peut utiliser différents types de poches, FAM utilise la poche de système de basculement qui a une capacité de quelques centaines de kilogrammes à plusieurs tonnes.

Pour chaque jours les poches sont réparées à l'opération de garnissage par contre les fours après 70 fusions



Figure 7 : Préchauffage la poche de mautention

4. La coulée du métal en fusion :

Le métal liquide, destiné à remplir l'empreinte du moule est recueillie dans une poche de coulé, représentant un récipient en tôle d'acier garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire préalablement chauffé.

Selon la capacité de la poche de coulée, celle-ci est transportée et manœuvrée à la main ou mécaniquement.

Le métal liquide est versé par le trou de coulée jusqu'à remplissage complet (Figure5).Lorsque la quantité de métal à couler est relativement importante ou lorsque la pièce représente des parties épaisses, on ajoute des masselottes qui constituent des réserves de métal en fusion permettant le bon remplissage de l'empreinte ; les masselottes sont calculées pour conserver une température plus élevée que la pièce, afin d'alimenter celle-ci en métal qui a lieu au moment de la solidification.

La coulée du métal liquide dans un moule constitue la phase finale du processus de création de la pièce après la confection du moule et l'élaboration du métal.

Cette rencontre d'un métal à haute température et d'un moule, généralement à température ambiante, nécessite de prendre beaucoup de précautions pour garantir la bonne venue de la pièce et la sécurité du personnel.

On surveillera particulièrement les trois paramètres principaux de cette opération.

- Ⓢ Moule : Il devra être parfaitement sec et exempt de toute trace d'humidité qui pourrait entraîner des risques d'explosion, de soufflures ou de piqûres dans les pièces, notamment lorsque les moules comportent des refroidisseurs. De nombreux systèmes existent pour sécher et réchauffer les empreintes avant la fermeture des moules (par exemple séchage à la flamme d'un chalumeau à gaz, séchage par rayonnement de panneaux infrarouges, etc.).
- Ⓢ Métal liquide : En provenance des appareils de fusion, le métal liquide devra être à la bonne température, avoir une analyse correcte, être très propre, sans crasse ; sans peaux d'oxyde ni autres impuretés qui pourraient compromettre la santé de la pièce. D'où la nécessité de bien décrasser le métal à chaque transvasement, et notamment dans la poche de coulée et au bec de celle-ci, à la naissance du jet de coulée, pour éviter tout entraînement de crasse dans le moule. L'emploi de poche théière avec barrage est particulièrement recommandé pour assurer un bon décrassage du métal.
- Ⓢ Coulée : Elle se fera en respectant un certain nombre de règles simples :
- Ⓢ Bon centrage du jet de coulée dans le godet de coulée au départ, pour éviter toutes projections du métal et risque de gouttes froides dans la pièce.
- Ⓢ Remplissage rapide du godet pour éviter la création de vortex risquant d'entraîner de l'air dans la pièce.
- Ⓢ Arrêt de la coulée en temps utile pour bien remplir le moule, en évitant tout débordement sur le dessus du moule, sur les châssis ou sur le carrousel de coulée entraînant également des risques pour le personnel.
- Ⓢ Allumage des gaz provenant de la distillation des agglomérants au cours de la coulée et pouvant créer des risques d'explosion.

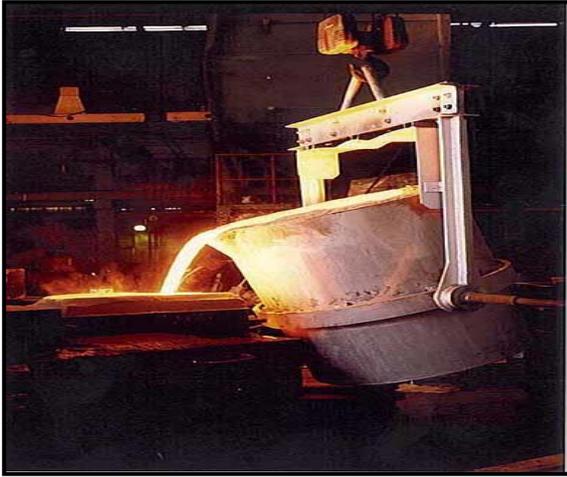


Figure 8 : Service de coulage

5. Le décochage :

Le décochage consiste à casser le sable pour libérer la pièce moulée. Cette opération est réalisée par le choc de vibration produite au moyen d'une grille vibrante. Le sable du moule est récupéré pour une régénération afin d'être réutilisé.

6. Le parachèvement:

Une fois la pièce moulée est récupérée, on procède à son:

- ⓐ **Débouillage** : cette opération a pour but d'éliminer le sable adhérent aux surfaces et les noyaux restés dans les pièces sont réalisées à la grenailleuse par projection sur la pièce de la grenaille d'acier.
- ⓐ **Ebarbage** : cette opération, consiste à enlever les bavures et les masselottes qui sont restés attachés à la pièce. L'ébarbage se fait à l'aide de cisailles, chalumeau oxycoupeur ou machines-outils.
- ⓐ **Traitement thermique** : les pièces coulées avec certains alliages ne peuvent rester brutes de coulée. Il faut leur faire subir un traitement thermique pour leur donner la structure et les caractéristiques recherchées.
- ⓐ **Meulage** : les irrégularités qui restent après l'ébarbage sont éliminés par meulage au moyen de fixes ou portatives selon les dimensions des pièces.
- ⓐ **Usinage** : cette opération permet l'obtention des formes et des dimensions exigées sur la pièce. Cette dernière enfin contrôlée pour y déceler les défauts éventuelles.

7. Conclusion

L'ensemble des opérations de fabrication de pièces de fonderie est donné par le schéma ci-dessous :

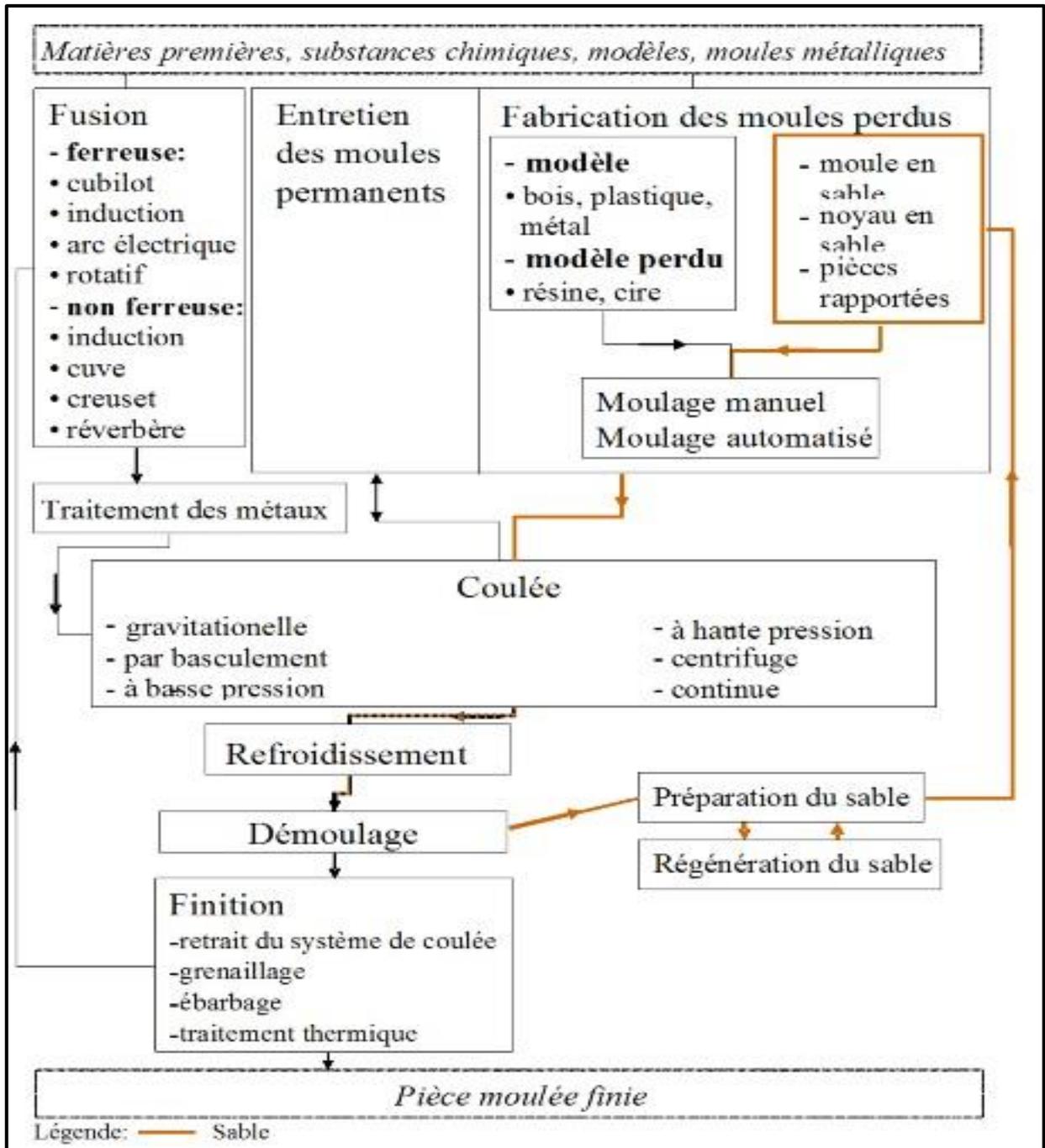


Figure 9 : L'Opération de fabrication de pièces de fonderie

CHAPITRE 2 :

Informations générales sur les sables de fonderie

I. Les sables de fonderie

1. Introduction

Ce sont des sables siliceux liés avec des matériaux naturels (bentonite, sables à verts) ou de résines chimiques (sables à prise chimique), les sables de fonderie sont utilisés pour confectionner des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion.

Ce procédé de «moulage au sable» est utilisé pour la totalité des productions de fonderie de fonte et d'acier et pour environ la moitié des productions d'alliages et de métaux non ferreux.

Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduels (nommés également «sables rejetés», «vieux sables» ou «sables brûlés») doivent être éliminés.

2. Origine, Elaboration

2.1 Origine

Le sable de fonderie est un sable propre, de granulométrie uniforme, ayant une haute qualité qui est lié par un liant pour former des moules afin de mouler des pièces en métal ferreux ou non ferreux. Le procédé de moulage au sable, l'élaboration des sables de fonderie se fait schématiquement en plusieurs étapes successives.

2.2 Elaboration d'un sable pour l'industrie de la fonderie

Il existe trois procédés pour la production de sables pour l'industrie de la fonderie. Chaque procédé est utilisé pour une application donnée.

Procédé sable naturel : Ce sable est directement extrait de carrière et se compose de silice et d'argile en forte proportion. Il est utilisé en fonderie d'art.

Procédé sable silico-argileux ou sable à vert: Ce sable est constitué de sable siliceux à 70-80% en masse, mélangé à 5-15% d'argile souvent de type bentonite (montmorillite) qui sert de liant. Ce liant est activé par 7 à 10% d'eau (la masse d'eau incorporée est souvent égale au tiers de la masse d'argile). Un additif carboné (noir minéral qui est un charbon pulvérisé) est souvent utilisé à 3-5% en masse. Ce sable est utilisé pour le moulage de pièces de faible dimension.

Procédé sable à prise chimique: Ce sable est composé de silice à 93-95% (pour le moulage de l'aluminium et la fonte) ou de chromite (pour les aciers) préalablement tamisée, lavé et séchée à laquelle une résine chimique (liant organique) est ajoutée à 1-3% en masse du sable. Cette résine est souvent de type furanique ou polyuréthane ou époxy. Peu de temps avant la réalisation du moule, le mélange est activé par l'ajout d'un catalyseur à l'aide malaxeur à vis rapide, muni de pompe doseuse qui délivre la quantité de sable préparée nécessaire à la réalisation du moule. Au cours de cette étape, le catalyseur active la polymérisation de la résine, qui permet la liaison du mélange. Ce procédé est utilisé pour le moulage de grandes pièces.

Procédé mixte: Pour des pièces de forme compliquée, les deux procédés sable à vert et sable à prise chimique peuvent être utilisés en même temps. Le premier pour la partie extérieure du moule de la pièce et le deuxième pour la partie intérieure de la pièce (le noyau). Ces différents primaires produisent des sables de fonderie usés qui peuvent être régénérés et réutilisés en fonderie pour la confection de nouveaux moules et la fabrication de pièces métallique.

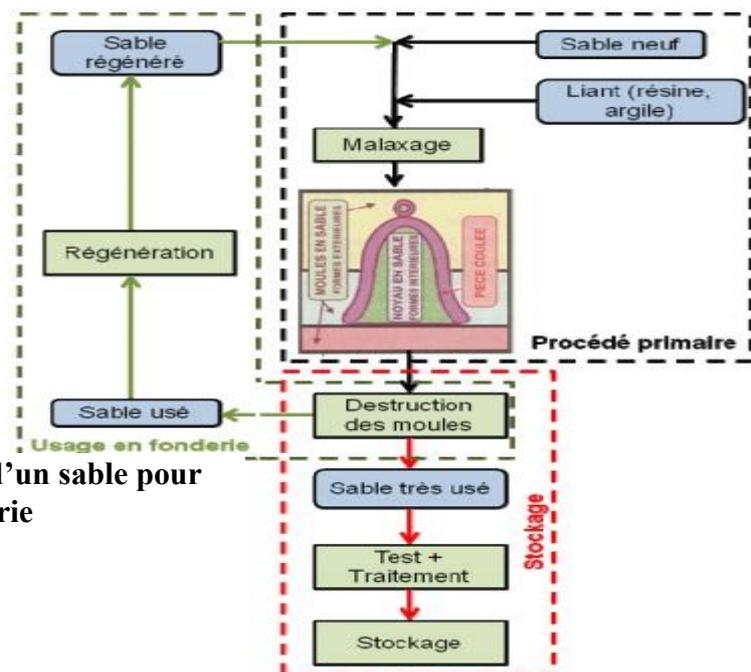


Figure 10 : Procédé d'élaboration d'un sable pour l'industrie de la fonderie

3. Caractéristique physico-chimiques

3.1 Les sables de moulage

L'industrie de la fonderie utilise de nombreux types de sables qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métallique. En général le sable siliceux complété par un liant minéral ou organique.

Les sables sont d'origine naturelle constitués principalement de grains de silice pure (quartz) ou exceptionnellement d'autre minéraux comme la chromite, le zircon, l'olivine... Ils ne présentent généralement pas plus de 0.5% d'impuretés (oxyde de fer, aluminium...) ainsi qu'une très faible quantité d'argile. Pour des questions tant de prise de liante que de rejet, le pH des sables mesurés est sensiblement neutre.

Lors de l'élaboration du sable de moulage, différentes catégories de liants sont mélangées au sable d'origine selon les applications envisagées et le type d'alliage.

Les quelques compositions de sables de moulage trouvées dans la littérature sont reportées dans le tableau.

Tableau 1 : Exemples de composition de sable de moulage.

	Sables silico-argileux (%)	Sables à noyaux (%)	Sable à noyaux (%)
Silice	88.7	98.8	98.2
Bentonite sodique activée	6.7	--	--
Noir minéral	1.2	--	--
Eau	3.4	--	--
Résine polyuréthane	--	1.2	--
Résine phénolique	--	--	1.8

3.2 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 1 220 °C ;
- au manganèse ;
- au carbone des fontes et des aciers provoquant la décarburation superficielle des moulages.

3.3 Propriétés physiques

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

▪ Propriétés physiques à froid :

La masse volumique absolue ρ_a a peut varier de 2,5 à 5 g/cm³ suivant les matériaux disponibles.

Les sables de base ont une masse volumique en vrac ρ_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**, qui est le pourcentage en volume des matières solides dans la masse compactée, exprimée par la formule :

$$C = \rho_v / \rho_a * 100$$

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

$$P = 100 - C$$

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

La **perméabilité** est l'aptitude d'un sable de base à se laisser traverser par les gaz. Un minimum de perméabilité est indispensable, car il est nécessaire, lors de la coulée, de pouvoir évacuer les gaz contenus dans l'empreinte du moule ainsi que ceux générés par les liants.

▪ Propriétés physiques à chaud

- ⊙ **Réfractarité** : 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 réfractarité (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, Une sélection judicieuse des liants et l'apport de divers additifs permettent en partie de pallier cet inconvénient.

- ⊙ **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
- ⊙ **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.

II. Principaux sables de production du moule et noyau

1. Description

Quel que soit le liant utilisé, les propriétés physiques et chimiques du matériau réfractaire utilisé pour fabriquer les moules et les noyaux affectent leurs caractéristiques et leur comportement au cours de la coulée. Cela n'est pas surprenant puisque ces matériaux constituent 95 à 99 % des produits utilisés.

Le prix d'achat de chaque type de sable compte quatre composantes principales : l'extraction, la préparation, l'emballage et le transport. Les coûts de transport varieront en fonction des différentes régions. Le facteur principal dans le prix est cependant le type de sable. Le prix d'achat moyen pour les divers types de sable varie fortement. D'après un questionnaire britannique de 1995, le prix du tonnage de sable de chromite et de zircon était respectivement 9 à 14 fois supérieur à celui d'un sable silicieux. Au Portugal, le coût du sable varie en fonction de la quantité achetée, mais le sable est généralement moins cher au Portugal qu'en Espagne, France ou Italie. Les prix portugais (année 2003) sont compris entre 20 et 25 euros par tonne de sable séché **AFS 55**, plus le transport. En République tchèque (année 2003) les prix pour du sable silicieux sont compris entre 10 et 20 euros par tonne de sable siliceux, le prix étant fonction du volume, de l'emballage et du traitement du sable. Le prix pour du sable de chromite est de 250 à 300 euros/tonnes, et pour du sable de zircon de 250 à 400 euros/tonnes.

Les différents types de sables réfractaires utilisés dans un but de fonderie sont décrits dans les sections suivantes.

2. Sable siliceux

Ce type de sable est le plus couramment utilisé, en grande partie du fait de sa forte disponibilité et de son coût relativement faible. Le sable siliceux est composé du "quartz" minéral (SiO_2), qui est plus ou moins pur et propre, en fonction de son origine. Son poids spécifique à sec fluctue entre 2,5 et 2,8 kg/dm^3 . La densité apparente (ou le poids volumique) du sable siliceux est de **1,4 à 1,6 kg/dm^3** .

La dilatation thermique du sable siliceux génère un mouvement du moule lors de la coulée et du refroidissement. Des additifs spécifiques sont donc utilisés, en particulier lors de la fabrication de noyaux, afin de prévenir des erreurs de coulée. Il peut s'agir de poussière de bois, d'oxyde de fer ou de sable de fonderie étuvé. Le sable contenant du feldspath a une dilatation thermique inférieure au sable quartzueux pur et un point de frittage inférieur, mais il est largement utilisé pour minimiser les défauts de dilatation dans les pièces coulées. Dans la technique du moulage en sable vert, le contrôle de la répartition granulométrique est très important. La répartition granulométrique est utilisée pour calculer le numéro AFS (AFS = American Foundry Society). Cela donne la finesse totale du sable. Plus le numéro AFS est élevé, plus le sable est fin.

Un sable de qualité plus fine comportera davantage de grains par gramme, et ainsi aura une superficie supérieure. Cela nécessite plus d'ajout de liant pour une résistance de moule égale. Les opérateurs essaient donc d'utiliser le sable le plus grossier, mais un sable qui donne quand même un bon aspect de finition de surface. Les numéros AFS standard sont compris entre 50 et 60. Un sable fin est nécessaire pour des surfaces très lisses, de ce fait on utilise habituellement un sable ayant un AFS compris entre 90 et 110. Les sables fins sont également utilisés dans certains cas pour remplacer les revêtements du moule.

3. Sable de chromite

La chromite est un minéral de chrome ayant la formule théorique $\text{FeO Cr}_2\text{O}_3$, qui contient d'autres constituants tels que des oxydes de magnésium et d'aluminium. Pour son utilisation en fonderie, sa teneur en silice doit être inférieure à 2 % afin d'empêcher un frittage à basses températures.

Le sable de chromite est plus réfractaire que la silice. Il est plus stable thermiquement et a une puissance de trempe plus importante. Le sable de chromite offre une meilleure finition de surface sur des pièces coulées de grande taille. Il est donc utilisé pour la production de pièces coulées de grande taille et à des endroits du moule où la trempe est nécessaire.

4. Sable de zircon

Le zircon est un silicate de zirconium silicate, $Zr SiO_4$. Le zircon est le minerai de zirconium le plus répandu.

Les caractéristiques générales du sable de zircon sont similaires à celles du sable de chromite, mais le sable de zircon offre une meilleure finition du fait que l'on utilise une qualité plus fine. Ces propriétés physiques et thermiques expliquent son utilisation pour le moulage ou le noyautage dans des cas difficiles, en dépit de son prix très élevé.

Tableau 2 : Propriétés des sables de base disponibles

Propriété	Silice	Chromite	Olivine	Zircon
Disponibilité	Très abondante	Limitée	Limitée	Limitée
Coût	Très bon marché	Elevé	Moyen	Elevé
masse volumique absolue (g/cm^3)	2,65	4,3 à 4,5	3,2 à 3,6	4,4 à 4,7
Température de fusion °C	1730	1760 à 1980	1540 à 1760	2000 à 2200
Stabilité	Bonne	Bonne	Bonne	Excellent
Dilatation thermique à 1000°C. (en 10^{-3})	16	4	8	3
Conductivité thermique	Faible	Très élevée	Moyenne	Très élevée
Mouillage par métal liquide	Aisé	Difficile	Possible	Difficile
Acidité-basicité	Acide	Neutre-basique	Basique	Acide-neutre
Masse volumique en vrac (g/cm^3)	1,55 à 1,60	2,7	1,9	2,8

III. Liants et autre produits chimiques

1. Bentonite

La bentonite est une argile smectique qui a une structure lamellaire. Par l'ajout d'eau, la structure argileuse gonfle en raison de l'absorption des molécules d'eau. L'argile devient alors exploitable et peut être étalée de façon à revêtir les grains de sable au cours de l'opération de mélange.

Le fait de couler un métal fondu dans un moule en sable vert a pour effet de soumettre le sable de moulage à une chaleur considérable. Cette chaleur élimine l'humidité du sable et détruit la structure liée à l'argile (et les additifs). Si au cours de la coulée et du refroidissement la bentonite reste en dessous de la température de désactivation, la structure lamellaire est maintenue ainsi que son aptitude au gonflement et au développement de la cohésion. La température de désactivation varie en fonction du type de bentonite.

2. Résines

Au cours des dernières décennies, une gamme de liants chimiques a été développée. Il s'agit de systèmes à composant unique ou à plusieurs composants qui sont mélangés au sable de fonderie jusqu'à ce que les grains soient enduits d'une pellicule mince. Après mélange, une réaction de durcissement débute, liant ensemble les grains de sable et développant la solidité du moule. Les résines peuvent être classées en fonction du procédé de durcissement :

- les résines à durcissement à froid
- les résines à durcissement au gaz
- les résines à durcissement à chaud.

Les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2%, comme liant organique

3. Poussière de charbon

La poussière de charbon est habituellement ajoutée au sable vert pour un moulage de fonte. Elle est utilisée jusqu'à une certaine limite dans certaines fonderies non ferreuses. La poussière de charbon peut être mélangée à de petites quantités de résines et de produits huileux. Au cours de la coulée, la dégradation thermique produit du "carbone brillant", qui améliore la finition de surface de la pièce coulée et les propriétés de décochage. La poussière de charbon est ajoutée pour trois raisons :

- ① pour créer une atmosphère inerte dans l'empreinte du moule au cours de la coulée, grâce à la combustion des composés organiques qui garantissent à leur tour l'oxydation du métal (formation du laitier)
- ② pour réduire la pénétration du métal entre les grains de quartz, grâce au dépôt d'une pellicule de graphite qui crée également une surface de coulée plate
- ③ pour réduire la quantité de sable qui reste à la surface de la pièce coulée lors du décochage

Pour les aciers moulés, la poussière de charbon n'est pas utilisée en raison de la contamination en carbone. Dans ce cas, elle est habituellement remplacée par des liants amylicés tels que de l'amidon ou de la dextrine.

4. Liants amylicés

Les liants amylicés sont principalement utilisés dans les fonderies d'acier pour accroître la résistance du sable vert. Il existe deux types principaux de liants amylicés : L'amidon est le matériau de base qu' est produit à partir de plusieurs matières végétales, l'amidon de maïs étant le plus couramment utilisé pour la fonderie. La dextrine est une forme repolymérisée de l'amidon qu'est produite par le biais d'un traitement acide et thermique consécutif de l'amidon.

Les amidons peuvent contribuer à réduire les défauts de dilatation, étant donné qu'au fur et à mesure qu'ils s'épuisent par combustion, ils permettent aux grains de sable de se déformer sans déformer le moule. Les liants amylicés permettent d'accroître la résistance au vert, la résistance à sec et la ténacité mais peuvent réduire l'aptitude à l'écoulement. Les dextrines améliorent l'aptitude à l'écoulement et la rétention d'humidité, empêchant ainsi l'assèchement des moules et l'effritement des bords.

Tableau 3 : Composition du mélange d'additif pour la préparation de sable vert

Métal	Additifs pour la préparation de sable vert
Coulée de fonte à graphite sphéroïdale	Bentonite
Coulée de fonte lamellaire	Liant amylicé*
Coulée de fonte malléable	Poussières de charbon
Coulée d'acier	Bentonite + Liant amylicé*
Coulée de métal léger et d'aluminium	Bentonite + Liant amylicé*
Coulée d'aluminium alliée à du magnésium	Bentonite + Acide borique
Coulée de magnésium	Bentonite + Soufre en poudre + Acide borique
Coulée de métal lourd (alliages de cuivre)	Bentonite
*Additif facultatif	

IV. Moyens et méthodes de contrôles ; définition des méthodes :

1. Méthode d'analyse de l'humidité

Principe : On détermine la teneur en eau sur sable par séchage à l'étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ d'une masse connue d'un échantillon de sable.

Appareillage :

- _ Matériel courant du laboratoire
- _ Etuve réglée à $105 \pm 5^\circ\text{C}$

Mode opératoire :

- _ Peser à 1mg près, environ 10 g de l'échantillon dans un vase à peser (préalablement séché à 105°C et taré).
- _ Porter le vase à peser ouvert dans une étuve réglée à 105 °C ± 5°C
- _ Laisser séjourner jusqu'à masse constante (environ 1 heures 30 min)
- _ Laisser refroidir dans un dessiccateur le vase à peser fermé.
- _ Peser à 1 mg près.

Expression de calcul :

$$H_2O\% = [(M_0 - M_1)/E]*100$$

- M_0 : masse en grammes du vase et de la prise d'essai avant séchage
- M_1 : masse en grammes du vase et de la prise d'essai après séchage
- E : masse en grammes de la prise d'essai

2. Détermination de la perte au feu

Principe : déterminer la perte de masse après calcination à une température de 900°C

Mode opératoire : Un échantillon de sable préalablement séché est introduit dans un four à moufle pendant une durée de **1h30min**, Après refroidissement on pèse la masse obtenue M_2 . La différence de masse entre l'échantillon calciné et l'échantillon séché constitue la perte au feu.

Appareillage :

- _ Matériel courant du laboratoire
- _ Four à moufle réglée à 900°C

Expression de calcul :

La perte au feu à 900°C du sable se calcule de la manière suivante :

$$\%P.F = [(M_1 - M_2) / E]*100$$

- M_0 : masse en gramme de la capsule pleine de sable après séchage,
- M_1 : masse en grammes de la capsule pleine de sable après calcination,
- E : masse en grammes de la prise d'essai

3. Granulométrie par voie sèche :

Principe : Séparer les différentes tranches granulométriques d'un échantillon sable.

Domaine d'application : Cette méthode prescrit une technique de séparation des tranches granulométrie d'un échantillon de sable à l'aide d'un vibreur magnétique.

Appareillage:

- _ Balance de précision au 1/10 mg
- _ Série de tamis à utiliser normalisés (AFS)
- _ Vibreur magnétique

Mode opératoire:

1. Homogénéiser et quarter l'échantillon du sable,
2. Peser une masse de l'échantillon de 50 g,
3. Placer les tamis par ordre de maille décroissant de haut en bas sur le vibreur magnétique. Verser l'échantillon pesé sur le tamis de maille supérieure, fermer avec le couvercle, et centraliser les tamis sur la base du vibreur magnétique,
4. Régler la vitesse de vibration et le temps (20 mm en principe),
5. Après la fin des vibrations, retirer les tamis un par un, s'assurer que toutes les tranches granulométriques sont bien séparées, si non terminer le travail manuellement, en secouant chacun des tamis et en récupérant le passant du tamis(n) dans le tamis(n-1) de maille directement inférieure,
6. Récupérer le refus de chacun des tamis dans une capsule propre, détacher toute les particules qui adhèrent à la grille du tamis,
7. Mettre une étiquette dans chacune des capsules portant le numéro ou référence de l'échantillon et l'ouverture du tamis,
8. Peser le contenu de chacune des capsules.

Expressions de calcul :

Les tamis de contrôle satisfont aux spécifications données dans la norme ASTM E11-87.

Tableau 4 : tamis de contrôle selon la norme ASTM

Numéro de tamis ASTM	Ouverture nominale de maille En μm	Tolérance sur les moyennes d'ouverture de maille en μm
6	3350	110
12	1700	60
20	850	35
30	600	25
40	425	19
50	300	14
70	212	10
100	150	8
140	106	6
200	75	5

Ⓢ Calcul de l'indice de finesse :

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

Tableau 5 : granulométrie et indice de finesse

N° de tamis	Refus en g	Refus (R) en %	Coefficient	Produit(P)
6	M1	R1	3	3*M1*R1
12	M2	R2	5	5*M2*R2
20	M3	R3	10	
30			20	
40			30	
50			40	
70			50	
100			70	
140			100	
200			140	
270			200	
fines	M12	R12	300	300*M12*R12
total		R		P

L'indice de finesse (**I**)=**P/R** ou de façon générale **I** s'exprime par le résultat du rapport suivant :

$$\text{Indice de finesse (I)} = (3 \cdot R1 \cdot M1 + 5 \cdot R2 \cdot M2 + \dots + 300 \cdot R12 \cdot M12) / (\sum R)$$

4. Détermination du pH des sables :

Principe : déterminer le besoin en acide. Exprimé en millilitres d'une solution aqueuse de 0,1mol/L de HCl nécessaires pour ramener 50 g de sable à pH 3.

Matériels :

- Bêcher de 250 ml forme haute.
- Agitateur et barreau magnétique.
- pH-mètre.
- Eau distillé (ultra pure).

Mode opératoire :

- Peser dans un bêcher de 250 ml, $5 \pm 0,1$ g de sable à tester.
- Ajouter 50 ± 1 ml d'eau ultra pure.

- Placer sur l'agitateur magnétique, agiter vigoureusement 10 mn maximum,
- Stopper l'agitation et placer l'électrode dans la solution surnageant.
- Lire le pH après stabilisation de la valeur.
- Ajouter la solution acide jusqu'à pH=3, et noter V_{aj} .

Remarque :

Ne pas placer l'électrode durant l'agitation ; l'abrasion risquerait de détruire celui-ci.

Expressions de calcul :

$$\text{Demande en acide} = V_{aj} \times 10$$

5. Détermination de la compacité C et la porosité p :

Principe : déterminer la porosité et la compacité du sable par détermination de la masse volumique apparente (ou en vrac) et réelle (absolue).

Matériels :

- Eprouvette graduée de 100 ml

Mode opératoire :

On remplit une éprouvette graduée par le sable après l'avoir tarée, on note son volume apparent et sa masse M_1 , puis on ajoute de l'eau jusqu'à saturation, ensuite on enlève le surplus de l'eau et on note la nouvelle valeur de la pesée (sable-eau) M_2 .

Expressions de calcul :

- **Masse volumique apparente :**

$$\rho_{\text{apparent}} = M_1 / \text{Volume}$$

- **Masse volumique réelle :**

$$\rho_{\text{réelle}} = M_1 / [\text{Volume} - ((M_2 - M_1) / \rho_{\text{eau}})]$$

- **la compacité :**

$$C = \rho_{\text{apparent}} / \rho_{\text{réelle}} * 100$$

- **la porosité :**

$$P = 100 - C$$

V. Critères d'acceptation :

Pour l'ensemble des paramètres de contrôle les critères d'acceptation sont comme suivant :

Tableau 6 : Critères d'acceptation de la qualité du sable

	Sable neuf (siliceux-chromite)	Sable récupéré (mécanique-thermique)
Taux d'humidité	<0.20	<0.30
Perte au feu	<0.5	<5.5
Indice AFS	40 – 55	40 – 50
$\rho_{réelle}$	2.2 – 5	2.5 – 5
PH	Neutre – basique	Acide – basique
Demande en acide	Environ 0.5 – 3	Faible

VI. Qualités exigées d'un sable de fonderie :

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 réfractarité, 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.

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 œuvre ;
- 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.

**CHAPITRE 3 : Description / bilans énergétiques des
consommations de l'installation de régénération**

I. Introduction

Les sables de fonderie usée peuvent être réutilisés en fonderie pour la fabrication de nouveaux moules. Cet usage est intégré au procédé de préparation des mélanges agglomérés pour le moulage, il est précédé d'un procédé de régénération du sable. La régénération consiste à séparer le plus complètement possible la silice des autres constituants du sable usée.

Dans les sables organo-synthétiques mélangés, des liants synthétiques organiques durcis sont présents sur les grains de sable. La poussière est composée de bentonite active et durcie, de poussière de charbon (uniquement pour les fonderies de fonte), de fines de quartz et de résidus de liant organique. Les sables mélangés sont principalement utilisés dans les fonderies de fonte et représentent quelque 75 % de la production totale de sable usagé. La régénération peut être accomplie à l'aide de systèmes mécaniques, pneumatiques, thermiques ou combinés.

Le sable est prétraité (tamisage, séparation magnétique) et séché, afin de réduire la teneur en eau à un niveau <1 %. Après cela le sable est nettoyé mécaniquement ou pneumatiquement afin de retirer une partie de liant. A l'étape thermique, des constituants organiques sont brûlés, et des constituants inorganiques sont transférés vers la poussière ou brûlés sur l'écran. Dans un traitement mécanique final ces couches sont retirées mécaniquement ou pneumatiquement et mises au rebut en tant que poussière.

II. Traitement du sable neuf

1. Séchage du sable

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide.

Avant le séchage le sable est d'humidité de 5% à un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles, L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progressant, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du sable.

Pour la diminution de l'humidité on utilise le sécheur à tambour rotatif: il est constitué par un long cylindre légèrement incliné tournant à l'intérieur d'une enceinte chauffée par des gaz de combustion d'un brûleur. Le sable descend sous l'action de la gravité et de l'entraînement. Le mouvement de rotation permet le renouvellement du solide au niveau des surfaces chauffantes. Ils sont très appropriés pour des produits minéraux supportant des températures élevées.

La méthode de transfert de la chaleur conventionnelle est : la convection c'est-à-dire que le séchage est le résultat du contact entre l'air chaud et la matière humide. Même si l'extraction de l'humidité par évaporation de la surface du solide dans un environnement chaud est essentielle pour le processus du séchage.



Figure 11 : Sécheur à tambour rotatif

2. Refroidissement et transport du sable

La manutention des sables séché se fait par un système de transport pneumatique qui convient particulièrement pour ce genre d'industrie, où les différentes opérations sont effectuées au moyen d'installations **fonctionnant par refoulement** avec des réservoirs d'expédition. Le transport pneumatique est donc constitué par une conduite dans laquelle on crée un courant d'air ayant une intensité telle qu'un grain ou un groupe de grains du produit à transporter, soit translaté d'une extrémité à l'autre du tuyau. Les caractéristiques d'une installation de manutention pneumatique dépendent de la nature du produit transporté et de l'utilisation de ce produit.

Habituellement, le sable doit être refroidi afin de maintenir le niveau d'humidité du sable préparé aussi constant que possible et d'éviter toute perte par évaporation.

Le refroidissement est souvent réalisé dans un échangeur de chaleur avec tuyaux d'eau à ailettes branché, selon les conditions du lieu, à une tour d'évaporation, à un groupe de refroidissement ou à un échangeur air-eau.

III. Récupération du sable de remplissage

La régénération primaire, également connue sous le terme d'attrition ou de mise en particules, implique la fragmentation du sable des moules ou des noyaux de façon à ce qu'il revienne à sa granulométrie d'origine. Cette régénération primaire comporte les étapes de tamisage du sable, élimination des impuretés métalliques, et séparation et élimination des fines et des agglomérats sur dimensionnés. Le sable est ensuite refroidi avant d'être stocké, renvoyé dans le circuit de sable de remplissage.

1. Installation de régénération mécanique du sable

2.1 Description de l'installation

Ce système représenté sur la figure pour la régénération mécanique du sable de fonderie se base sur l'action de frottement des grains entre eux pour fendre et réduit le film de résine qui les recouvre. Le tout se réduit en quatre opérations élémentaires, comme suit :

- Désenrobage des grains.
- Dépoussiérage.
- Tamisage.
- Refroidissement.

Ces quatre opérations commencent dans la décocheuse et se complètent dans une seule tour verticale mise en dépression par un filtre à manches.

L'emploi des installations de régénération mécanique est très approprié dans les fonderies qui régénèrent des types de sable agglomérés par tous genres de processus chimique.

Les capacités suivantes sont disponibles : 4–6 t/h, 10–12 t/h, 15–20 t/h et 25–30 t/h.

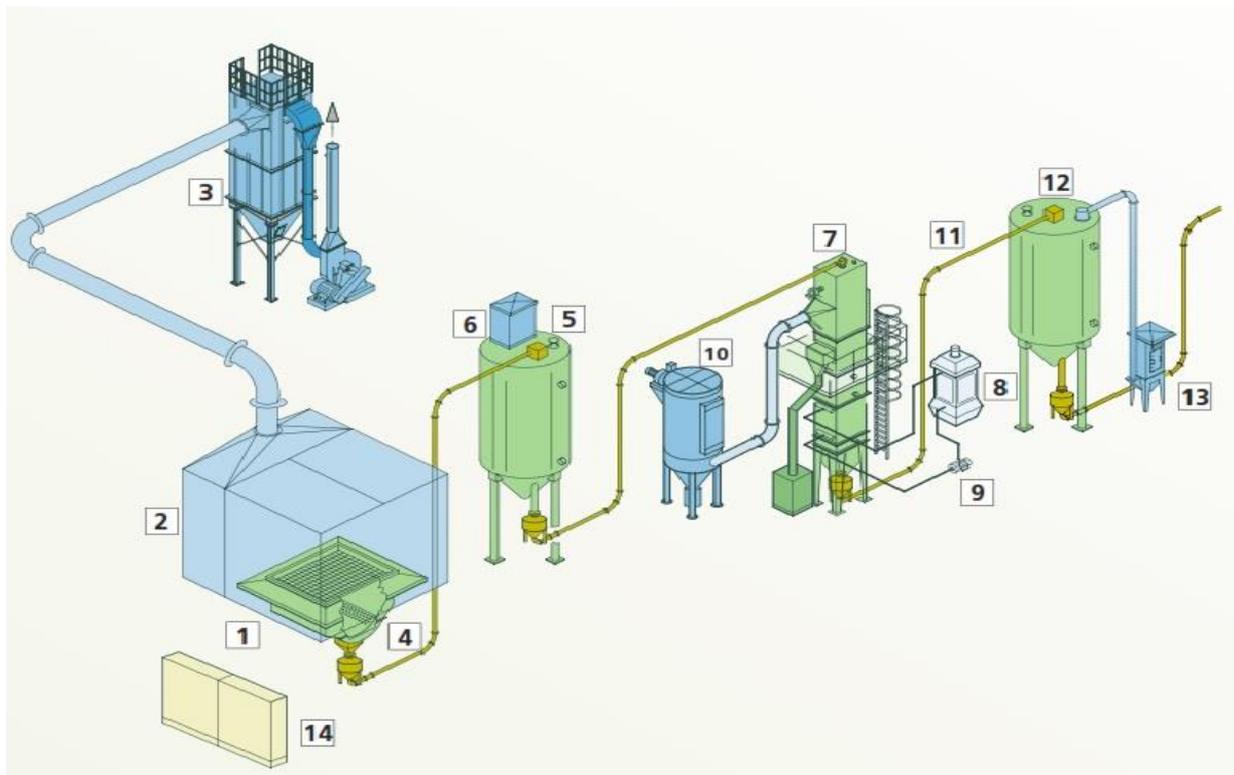


Figure 12 : synoptique d'installation de récupération mécanique du sable

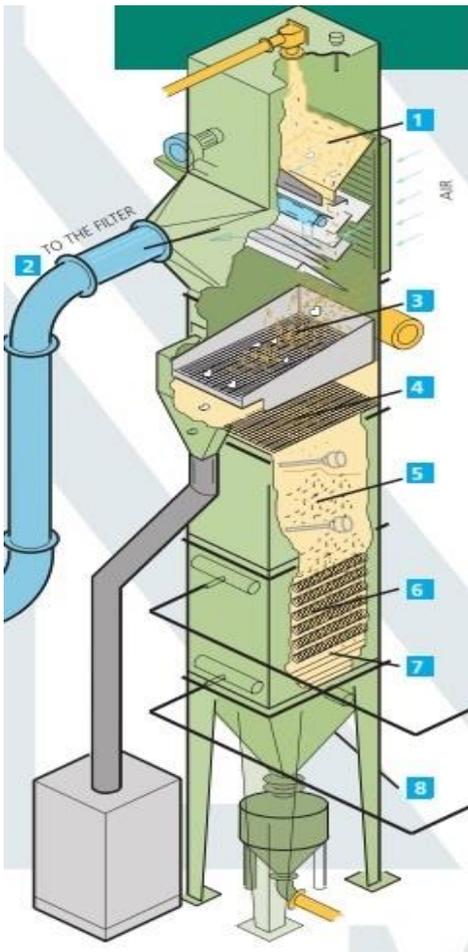
Légende

- 1_
- 2_Filtre pour l'abattage des poussières
- 3_Transport pneumatique au silo poumon
- 4_Silo de stockage
- 5_Filtre pour le silo de stockage
- 6_Tour de régénération
- 7_Tour d'évaporation
- 8_Pompe de circulation
- 9_Filtre à manches pour le contrôle de l'aspiration des poussières
- 10_Transport pneumatique aux points d'utilisation
- 11_Silo au sable régénéré
- 12_Filtre pour silo
- 13_Tableau de commande

2.2 Décochage et pré-régénération

Une décocheuse démolit les moules. Le sable tombe dans le pré-régénérateur où la vibration provoque un effet de frottement qui réduit les grumeaux en grains séparés et les dépouille partiellement de leur film de résine. Le matériau qui ne peut plus se réduire (gouttes métalliques, etc.) est retenu par la tôle perforée anti-usure du pré-régénérateur et périodiquement vidé au travers d'un clapet pneumatique.

2.3 Régénération mécanique



Les grains sont dépouillés dans une chambre de nettoyage pneumatique du sable (1) où les poussières de résines sont éliminées par l'aspiration du filtre (2).

Pour plus d'efficacité, le sable est ensuite envoyé à un tamis vibrant (3). Une grille fixe de sécurité (4) protège le refroidisseur en cas où la grille du tamis se casserait.

Une trémie équipée de sonde de niveau mini et max (5) assure le remplissage optimal du refroidisseur placé en dessous.

Le sable ensuite rapporté à sa température idéale à travers un échangeur de chaleur avec tuyaux d'eau à ailettes (6) branché, selon les conditions du lieu, à une tour d'évaporation, à un groupe de refroidissement ou à un échangeur air-eau.

Une sonde thermostatique reliée à la grille de décharge située sous le refroidisseur (7) garantit le déchargement du sable à la température désirée.

Un système d'ouverture sur toute la surface transversale (8) garantit un déchargement uniforme et empêche que le sable ne se groupe en veines et s'accumule en tas ce qui diminuerait le rendement du groupe de refroidissement.

Figure 13 : description de fonctionnement de tour de régénération

Les sables récupérés pouvant nécessiter un taux de résine un peu plus élevé pour leur réemploi. On peut aussi stocker sur le silo régénéré pour les réutiliser comme sable de remplissage ou transporter sur séparateur magnétique puis régénération thermique pour réintroduire le sable neuf comme sable de contact.

IV. Récupération du sable de contact

La régénération secondaire implique le traitement supplémentaire du sable auparavant sous forme de particules pour éliminer le résidu de liant. Le sable est renvoyé avec une qualité similaire à celle du sable neuf, ou meilleure. Les fonderies utilisant une technique de régénération secondaire ont, dans certains cas, quasiment éliminé la nécessité d'utiliser du sable neuf. Pour éliminer le liant résiduel, des techniques plus agressives que celles destinées à la régénération primaire sont nécessaires. Les techniques de régénération secondaire principales sont :

- un traitement mécanique à froid :

- attrition à basse énergie: frottement, impacte (pour les résines à durcissement à froid)
- addition à haute énergie: usure pneumatique, meulage, frottement centrifuge
- **traitement thermique** (habituellement dans un lit fluidisé)
- **épuration par voie humide.**

Le traitement thermique implique la combustion du liant organique. La bentonite est désactivée par la température élevée du traitement. Pour des écoulements de sable contenant du sable vert, tout traitement thermique quelconque devra donc être combiné à un traitement mécanique et séparateur magnétique.

1. Séparateur magnétique

Puisque le sable contient habituellement des éléments métalliques tels que des bavures, des chutes de coulée, des pièces de descente de coulée ou même des petites parties de la pièce de coulée, tous ces éléments doivent être retirés, tout d'abord à l'aide de séparateurs de fer magnétiques. Si la séparation des pièces de coulée en fer magnétique n'est pas accomplie ou est impossible, la séparation peut être effectuée par des séparateurs à courant de Foucault. Les mottes résiduelles sont ensuite morcelées. Il est important de ne pas concasser le sable afin d'empêcher la ségrégation du sable et de la bentonite.



Figure 14 : séparateur à tampon magnétique rotatif

2. Installation de régénération thermique du sable

2.1 Description

La régénération thermique utilise la chaleur pour brûler les liants et les contaminants. Chaque procédé thermique nécessite une étape mécanique initiale pour amener le sable à la granulométrie correcte et pour éliminer par tamisage tout contaminant métallique. Ce prétraitement peut également utiliser une abrasion (partielle) de la bentonite et une élimination de la poussière. Le chauffage du sable est habituellement réalisé à l'aide d'un four à lit fluidisé, fonctionnant à des températures principalement comprises entre 600 et 700 °C. Des fours rotatifs ou des fours à soles multiples sont également utilisés.



Figure 15 : synoptique d'installation de récupération thermique

3.2 Installation de gaz

Conçue selon les normes de sécurité courantes, cette installation comprend des électrovannes, des vannes manuelles, des réducteurs de pression ainsi que des mesureurs de débit. La vanne progressive est un élément essentiel qui assure l'alimentation optimale du gaz selon la température du sable.

3.3 lit Fluidisé de calcination

Le mélange correct d'air et de gaz dans le lit fluidisé de calcination produit une combustion uniforme et permet de contrôler au mieux la température. Les composants organiques

éliminés du sable complètent leur combustion dans la chambre supérieure où les fumées sont retenues juste le temps nécessaire pour atteindre ce résultat.

3.4 Refroidissement et Aspiration

Le sable à haute température (600°-700° C) entre dans le lit fluidisé de refroidissement où un serpentin avec circulation d'eau le libère des calories. En sortie, la température du sable est appropriée à son utilisation immédiate pour la réalisation de mottes ou de noyaux.

Les fumées de la combustion mélangées aux poussières aspirées dans le refroidisseur aboutissent à un filtre à manches qui se charge de l'abattage de fines et de poussières. Le système d'aspiration est dimensionné afin que ces fumées, après être passées à travers le cyclone, aboutissent au filtre à une température de travail appropriée aux éléments filtrants.

3.5 Contrôle du processus

La signalisation de la température provenant du lit fluidisé aboutit à un "contrôleur" PID qui règle la vanne de modulation du gaz. D'autres thermocouples commandent l'alimentation du sable tandis que d'autres encore se chargent de contrôler la température des fumées brûlées. Ce processus est entièrement surveillé et géré par un PLC.

V. Les différents consommateurs de l'installation :

1. Les consommateurs d'électricité

La distribution électrique en entreprise répond à plusieurs objectifs : le bon fonctionnement des procédés industriels, la sécurité des personnes, le non détérioration du matériel, ainsi que la préservation de la stabilité, de la continuité et de la qualité de l'alimentation électrique du réseau.

Le sous-comptage électrique est plus répandu dans les fonderies par rapport au gaz naturel, car il est moins coûteux et plus facile d'implantation. Par ailleurs, l'utilisation ultérieure des relevés est plus simple et ne nécessite pas de conversion.

1.1 Installation de pré-régénération et transport pneumatique

Tableau 7 : Consommation électriques de pré-régénération

Moteurs électriques	Valeur de Puissance
Décocheuse	18.5 kW
Pompe de Lubrification	0.18kW
Aspirateur Filtre à manche	7.4kW
Ventilateur de Poussière	1.1kW
Tamis Vibrant	750W
Pompe Eau	5.5kW
Tour de refroidissement	3kW
Alimentation automatique de transport du sable	0.25 kW
Puissance absorbée globale	$P_m = 786\text{kW}$

1.2 Installation de la régénération thermique

Tableau 8 : Consommation électrique de régénération thermique

Moteurs électriques	Valeur de Puissance
Alimentateur Vibrant	0.4KW
Soufflante Four	4KW
Soufflante Refroidisseur	5.5KW
Ventilateur Tour Evaporatoire	1.1KW
Pompe Eau	2.2KW
Filtre Aspiration four	5.5KW
Déchargeur Filtre	1KW
Séparateur Magnétique	2.37 kW
Puissance absorbée globale	$P_t = 24.87\text{kW}$

2. Consommation d'air comprimé

Les systèmes d'air comprimé se composent de plusieurs sous-systèmes et composants principaux. Les systèmes d'air comprimé peuvent également être subdivisés en deux parties: Le côté **production** et le côté **consommation**.

Le côté **production** comprend les compresseurs, le traitement de l'air et les installations de stockage primaire. Un système bien géré va produire de l'air propre, sec et stable, délivré à la pression voulue de façon fiable et économique. Les principaux sous-systèmes de production d'air comprimé incluent normalement la prise d'air, le compresseur d'air (à vitesse fixe et/ou à vitesse variable), le refroidisseur de sortie, le moteur, les dispositifs de régulation, les équipements de traitement de l'air et les accessoires.

Le côté **consommation** inclut les tuyauteries de distribution, les stockages secondaires et les appareils d'utilisation. Un système de consommation bien géré minimise les différences de pression, diminue les pertes d'air dues aux fuites et aux dispositifs de purge, et procure l'air comprimé aux appareils et applications appropriés. Les tuyauteries de distribution acheminent l'air comprimé, du compresseur aux points d'utilisation finale. On utilise également à des réservoirs d'air comprimé côté consommation afin d'améliorer la stabilité de la pression du système.

1.1 Compresseurs

En fonderie, l'air comprimé est un fluide énergétique incontournable pour le transport du sable et son usinage, l'air comprimé est à présent produit par deux compresseurs d'air à vis (Ingersoll M90, CompAir DEMAG REGATTA 140).

Tableau 9 : caractéristiques des compresseurs d'installation d'air comprimé

Model Compresseur	Capacité	Pression	Puissance Total
	m^3/min	bar	kW
Ingersoll M90	16.99	7	124
Compair regatta 140	13.74	7.5	96.39

1.2 Sécheur frigorifique

La qualité de l'air a un impact significatif sur les systèmes à air comprimé. Un air comprimé correctement traité améliore la productivité, le rendement du système et la qualité du produit du processus.

L'air comprimé est traité à la qualité requis par un sécheur frigorifique INGERSOLL RAND assurent un fonctionnement fiable et économique, tout en distribuant un air sec, Des caractéristiques suivante :

Tableau 10 : caractéristiques de sécheur d'installation d'air comprimé

Model Sécheur	Capacité	pression	Puissance Total
	m^3/min	bar	kW
Ingersoll Rand	21.66	7.5	6.72

3. Consommation du gaz propane

Les exigences réglementaires pour l'environnement, liées à des coûts dissuasifs de mise en décharge, favorisent le recyclage complet des sables de fonderie enrobés de résines organiques polluantes.

- Gaz contact : le sable est mis en contact avec la flamme d'un brûleur qui détruit les résines;
- Lit fluidisé: le sable est mis en suspension dans un courant d'air chaud qui oxyde les résines. Passé à environ 800°C durant quelques heures, le sable est purifié. Afin d'assurer la destruction complète du phénol des résines, une post-combustion peut être mise en place.

Concernant notre cas, on peut conclure que cette consommation du gaz propane est due principalement au four de calcination lors du traitement thermique et le sécheur d'humidité du sable, lors du traitement du sable neuf, détaillons ensuite dans la chapitre suivante la mesure de cette consommation selon le mode opératoire adopté qui va nous sert à déterminer le comptage du compteur du gaz.

**CHAPITRE 4 : Calcul des coûts énergétiques des
installations et étude de faisabilité**

I. Comptage de la consommation énergétique

1. Comptage de la consommation gaz propane

Le sous-comptage de la consommation du gaz naturel ou du propane dans les fonderies. En règle générale, peu de sites disposent de compteurs intermédiaires entre le poste de livraison principal et le procédé consommateur, ce qui limite les possibilités de diagnostiquer les installations.

Lorsque des compteurs divisionnaires sont installés, ils sont généralement du type compteur à membrane, cette technologie est reconnue depuis plusieurs décennies pour sa précision et sa robustesse. On trouve des compteurs avec rotation de turbine ou action de pistons, également robustes et précis (Figure).



Figure 16 : le Compteurs divisionnaires de comptage à gaz pour la mesure de la consommation.

Technologie avec rotation de turbine, modèle Quantomètre MZ de ITRON.
(Source ITRON)

Les compteurs divisionnaires utilisés dans les fonderies affichent des consommations de gaz en mètres cubes réels. Ils comptabilisent le nombre de mètres cubes passés au travers du compteur. Les gaz sont compressibles et leur masse volumique est très dépendante de la pression. Ainsi, lorsque l'on s'intéresse à la consommation énergétique d'un procédé, on aura intérêt à convertir les valeurs affichées en m³ réels, en normo mètres cubes (Nm³). L'abréviation des normo mètres cubes peut également s'écrire m³(n).

Pour la facturation, le volume mesuré par le compteur est ramené en kg à l'aide d'une formule donné par le service de maintenance.

2. Comptage de la consommation électrique

C'est à partir de la connaissance de la répartition de la consommation électrique d'une fonderie que l'on peut déterminer l'enjeu économique lié aux systèmes d'entraînement motorisés (pompage, ventilation, etc.)

Un diagnostic énergétique fournit une telle répartition, peuvent être obtenus soit à partir :

- ⊗ de l'exploitation des consommations issues de la comptabilité analytique ;
- ⊗ d'une estimation des consommations à partir des puissances installées et de l'évaluation des temps de fonctionnement correspondants ;
- ⊗ d'une instrumentation et des sous-comptages énergétiques (beaucoup plus précis).

En pratique, c'est un recoupement de ces trois sources d'investigations qui permet de déterminer la répartition de la consommation électrique.

3. Comptage d'air comprimé

La manutention du sable et des additifs tels que bentonite et noir minéral pose des problèmes importants de nuisances et d'entretien. Le transport pneumatique convient particulièrement pour ce genre d'industrie, où les différentes opérations sont effectuées au moyen d'installations fonctionnant par refoulement avec des réservoirs d'expédition. Ce mode de fonctionnement, dans lequel aucune pièce mécanique en mouvement n'est en contact avec le produit, est utilisé pour le déchargement des véhicules pour produits en vrac, le transfert Entre les silos de stockage et les trémies journalières, et entre celles-ci et les postes d'utilisation.

La consommation d'air comprimé d'installation se fait par :

- **Transport pneumatique en dense phase**

Le système de transport pneumatique en phase dense est composé d'un réservoir propulseur et de la ligne de transport ou tuyauterie.

Le réservoir propulseur est rempli avec le sable à transporter après quoi, il est mis en pression généralement de 1 à 6 bar selon les performances requises de l'installation; une fois la pression nécessaire atteinte, la valve d'échappement vient commuter et le transport commence son parcours le long de la tuyauterie de transport.

Le système est géré automatiquement par un cadre électrique avec logique à PLC et un pneumatique.



Figure 18 : différentes propulseur d'installation

- **Des activateurs d'air comprimé qui favorisé le transport du sable**



Figure 19 : l'activateur l'installation

II. Mesure de consommation énergétique

1. Mesure sur l'unité de traitement mécanique

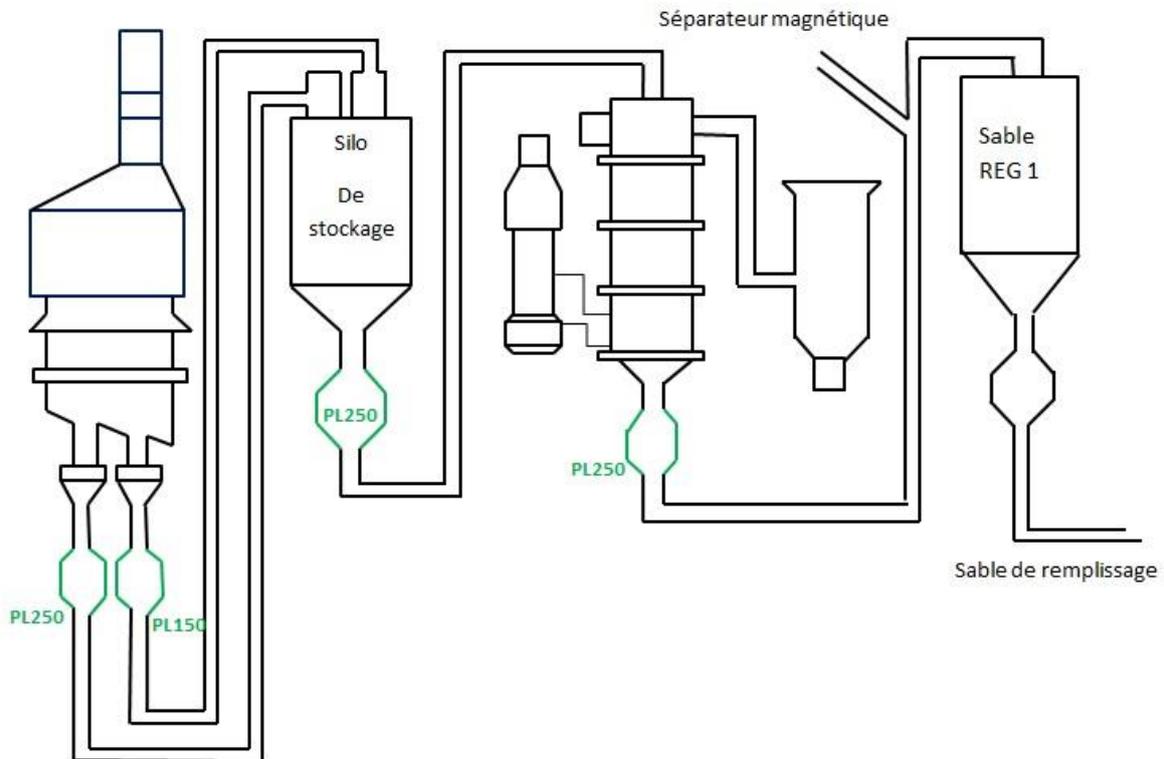


Figure 20 : schéma d'installation de régénération mécanique

Il ne suffit pas d'additionner la consommation d'air comprimé des différents consommateurs d'air pour déterminer les besoins d'un réseau d'air comprimé. Il faut également tenir compte de certains facteurs qui influencent la consommation d'air comprimé.

La majorité des appareils pneumatiques, ne sont pas utilisés en continu. Ils sont déclenchés et arrêtés en fonction des besoins. Il est donc important de déterminer la durée de fonctionnement **DF** moyenne pour obtenir une estimation exacte des besoins en air comprimé.

Tableau 11 : caractéristique des propulseurs de transport pneumatique

Propulseur	PL250	PL150
Quantité du sable	395 kg	237 kg
Temps de lancement	50 s	40 s
Temps de remplissage	90 s	60 s

➤ **Donné l'installation**

- **Pression d'air comprimé : P = 6 bar**
- La densité d'air en (kg/m³) à 6bar : $\rho_{ac} = 5.39$
- Diamètre de conduit d'air comprimé de **propulseur PL250 : d = 2po**
- Diamètre de conduit d'air comprimé de **propulseur PL150 : d = 2po**
- Diamètre de conduit de l'**activateur : d = 1po**
- **3 propulseur PL250 ;**
- **1 propulseur PL150 ;**
- **6 activateurs ;**

Les relations utilisées :

$$Q = S \times V \quad \text{et} \quad P_{dy} = \frac{1}{2} \rho_{ac} V^2$$

De l'ensemble de ces données relatives aux conditions de fonctionnement, il est possible de calculer les économies d'énergie d'air comprimé et le débit du sable assurées par cette unité de régénération mécanique.

L'analyse des données pour un temps de fonctionnement de **2h** donne :

Tableau 12 : mesure d'installation de régénération mécanique

Quantité du sable régénérer mécanique à 2h	Quantité d'air produit
14 tonne	15240 m ³

2. Mesure sur l'unité de traitement thermique

2.1 Calcul de la consommation du gaz propane

Le débitmètre installé dans le circuit de gaz du four de calcination indique les valeurs suivantes :

- à t = 0h 17904.59 m³
- à t = 24h 18008.37 m³

Conversion des m³ réel en kg : $m^3 = \sqrt{\frac{P_a + P_s}{P_a}} \times 0.63 \times 1.83$ (avec $P_a = 1.01$ et $P_s = 2.2$)

- la consommation du propane est : **C_m = 8.8875 kg / heure**
- débit du sable produit par four de calcination : **Q = 456 kg / heure**

2.2 Calcul de la consommation d'air comprimé

➤ Donné l'installation

- Pression d'air comprimé : **P = 6 bar** ;
- La densité d'air en (kg/m^3) à 6bar : $\rho_{ac} = 5.39$;
- Diamètre de conduit d'air comprimé de propulseur PL50 : **d = 1po** ;
- **1 propulseur PL250** ;
- **1 propulseur PL50** ;
- **3 activateurs** ;
- la consommation d'air comprimé d'unité de récupération thermique pour transporter 500kg du sable est :

$$C_{air} = 730\text{m}^3$$

3. Mesure sur l'unité de traitement du sable neuf

➤ Donné l'installation

- **3 moteurs électriques de transmission** (convoyeur, tambour rotatif et pompe de refroidissement)
- Pression d'air comprimé : **P = 6 bar** ;
- **1 propulseur PL150** ;
- **1 propulseur PL50** ;
- **3 activateurs** ;
- Débit mètre de gaz installé dans le circuit du four (sècheur) indique la valeur suivante :

$$C_m = 0.257 \text{ kg / heure}$$

- Le four fonctionne avec un débit de sable de 500 kg/h :

$$Q = 500 \text{ kg/h.}$$

- La consommation d'air comprimé d'unité pour transporter 500kg du sable:

$$C_{air} = 745\text{m}^3$$

- La consommation absorbée par les moteurs électriques : **P = 32 kW**

III. Evaluation des consommations d'énergies

Pour estimer la consommation énergétique et quantité du sable récupérer par les fonderies de métaux ferreux (fonte et acier), j'ai envisagée une méthode d'estimation à partir du tonnage des pièces produites pour l'année 2014 :

Sachant que l'industrie de la fonderie estime qu'en moyenne, pour une tonne de pièces produites, on utilise 10 tonnes de sable de fonderie

Tableau 13 : quantité du sable estimé pour l'année 2014

	Tonnage des pièces	Quantité de sable (1t __ 10t)	Quantité Sable de remplissage (55%)	Quantité Sable récupéré thermique (20%)	Quantité sable neuf (25%)
Janvier	15,00072	150,0072	82,50396	30,00144	37,5018
Février	14,50063	145,0063	79,753465	29,00126	36,251575
Mars	20,95768	209,5768	115,26724	41,91536	52,3942
Avril	19,29996	192,9996	106,14978	38,59992	48,2499
Mai	17,24172	172,4172	94,82946	34,48344	43,1043
Juin	15,23025	152,3025	83,766375	30,4605	38,075625
Juillet	19,71198	197,1198	108,41589	39,42396	49,27995
Aout	19,73812	197,3812	108,55966	39,47624	49,3453
Septembre	19,46673	194,6673	107,067015	38,93346	48,666825
Octobre	19,24358	192,4358	105,83969	38,48716	48,10895
Novembre	24,929	249,29	137,1095	49,858	62,3225
Décembre	24,81698	248,1698	136,49339	49,63396	62,04245
SOMME	230,13735	2301,3735	1265,755425	460,2747	575,343375

1. Bilan technico-économique d'unité de traitement thermique

En se basant sur les mesures trouvées et les données citées en dessous issus du service de maintenance ($1\text{m}^3 \rightarrow 0.12\text{kW}$), j'ai pu déterminer la consommation électrique et celle du gaz propane, indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 14 : consommation d'unité de traitement thermique

	Quantité Sable récupéré thermique (20%) en tonne	temps de fonctionnement en heure	consommation électrique kWh	consommation gaz propane kg
Janvier	30,00144	65,792632	7399,7	666,5945
Février	29,00126	63,599254	7153,01	644,37175
Mars	41,91536	91,919649	10338,2	931,30691
Avril	38,59992	84,648947	9520,47	857,64197
Mai	34,48344	75,621579	8505,16	766,17893
Juin	30,4605	66,799342	7512,92	676,79423
Juillet	39,42396	86,456053	9723,71	875,95111
Aout	39,47624	86,570702	9736,61	877,11271
Septembre	38,93346	85,380395	9602,73	865,05281
Octobre	38,48716	84,401667	9492,66	855,13659
Novembre	49,858	109,33772	12297,2	1107,7824
Décembre	49,63396	108,8464	12242	1102,8045
SOMME	460,2747	1009,3743	113524	10226,728

En utilisant les prix cités en dessous et les résultats trouvés du tableau précédent , j'ai pu déterminer le cout total comme suit :

- Le prix du propane est de **12,5dh/kg**
- Le coût de l'énergie électrique est de **0,122dh/kW.**
- Coût de mains d'ouvres production est **17.35dh**

Tableau 15 : coût de consommation d'installation

	coût de consommation électrique DH	coût de consommation du gaz DH	main d'oeuvre production DH	coût total DH
Janvier	902,7631	8332,4	1141,5022	10376,7
Février	872,667	8054,6	1103,4471	10030,8
Mars	1261,261	11641	1594,8059	14497,4
Avril	1161,497	10721	1468,6592	13350,7
Mai	1037,629	9577,2	1312,0344	11926,9
Juin	916,5765	8459,9	1158,9686	10535,5
Juillet	1186,293	10949	1500,0125	13635,7
Aout	1187,866	10964	1502,0017	13653,8
Septembre	1171,533	10813	1481,3498	13466
Octobre	1158,104	10689	1464,3689	13311,7
Novembre	1500,26	13847	1897,0094	17244,5
Décembre	1493,519	13785	1888,4851	17167,1
SOMME	13849,97	127834	17512,645	159197

2. Bilan technico-économique d'unité de traitement du sable neuf

Suivant la même démarche appliquer précédemment, aboutissons aux résultats suivants :

Tableau 16 : consommation d'unité de traitement du sable neuf

	sable neuf (25%)	temps de fonctionnement heures	consommation électrique kWh	consommation gaz propane kg
Janvier	37,5018	75,0036	9105,44	19,275925
Février	36,251575	72,50315	8801,88	18,63331
Mars	52,3942	104,7884	12721,3	26,930619
Avril	48,2499	96,4998	11715,1	24,800449
Mai	43,1043	86,2086	10465,7	22,15561
Juin	38,075625	76,15125	9244,76	19,570871
Juillet	49,27995	98,5599	11965,2	25,329894

Aout	49,3453	98,6906	11981	25,363484
Septembre	48,666825	97,33365	11816,3	25,014748
Octobre	48,10895	96,2179	11680,9	24,728
Novembre	62,3225	124,645	15131,9	32,033765
Décembre	62,04245	124,0849	15063,9	31,889819
SOMME	575,34338	1150,6868	139693	295,72649

Tableau 17 : coût de consommation d'installation

	coût de consommation électrique DH	coût de consommation du gaz DH	main d'ouvre production DH	coût total DH
Janvier	1110,863	240,95	1301,3125	2653,12
Février	1073,83	232,92	1257,9297	2564,68
Mars	1552	336,63	1818,0787	3706,71
Avril	1429,239	310,01	1674,2715	3413,52
Mai	1276,818	276,95	1495,7192	3049,48
Juin	1127,861	244,64	1321,2242	2693,72
Juillet	1459,751	316,62	1710,0143	3486,39
Aout	1461,687	317,04	1712,2819	3491,01
Septembre	1441,589	312,68	1688,7388	3443,01
Octobre	1425,064	309,1	1669,3806	3403,54
Novembre	1846,092	400,42	2162,5908	4409,1
Décembre	1837,797	398,62	2152,873	4389,29
SOMME	17042,59	3696,6	19964,415	40703,6

3. Faisabilité des deux unités de traitement

Tableau 18 : Hypothèses chiffres retenues pour la faisabilité

Description du processus	Hypothèses chiffres retenues
<p>Unité de traitement thermique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • la consommation du propane est : $C_m = 8.8875 \text{ kg / heure}$ • débit du sable produit par four de calcination : $Q = 456 \text{ kg / heure}$ • Puissance absorbée globale : $P_t = 24.87 \text{ kW}$ • Le prix du propane est de 12,5dh/kg • Le coût de l'énergie électrique est de 0,122dh/kW. • Coût de mains d'ouvres production est 17.35dh/heure • la consommation d'air comprimé pour transporter 500kg du sable est : $C_{air} = 730 \text{ m}^3$ • conversion à partir de TF des compresseur : $1 \text{ m}^3 = 0.12 \text{ kW}$
<p>Unité de traitement du sable neuf</p>	<ul style="list-style-type: none"> • la consommation du propane est : $C_m = 0.257 \text{ kg / heure}$ • débit du sable produit par le sécheur : $Q = 456 \text{ kg / heure}$ • La consommation absorbée par les moteurs électriques : $P = 32 \text{ kW}$ • la consommation d'air comprimé pour transporter 500kg du sable est : $C_{air} = 745 \text{ m}^3$

La description des étapes du processus et le choix des hypothèses pour le calcul de faisabilité nous permet de conclure que pour **une tonne** récupérée thermiquement Ça coute **600 DH** alors que pour une tonne du sable neuf ça coutent environs **1000DH**.

Ce qui nous pousse à garder l'unité et à réfléchir aux procédés et à la possibilité d'améliorations.

Conclusion

Après avoir décrit les différents constituants (sable de base, liants, ...) et leur méthode de contrôle, aussi 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. Il apparaît que 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.), ce qui nécessite, au moment du choix, de bien connaître les performances et les prix de revient de chacun des procédés possibles.

Les différentes techniques de recyclage permettant une réutilisation des sables ayant déjà subi la coulée sont également exposées dans ce rapport, en effectuant des moyens de contrôle du sable, description des différentes composantes d'unité de récupération et le calcul de la consommation de cette dernière à partir du coût de la consommation énergétique tout en étudiant à la fin la faisabilité du four de calcination en comparant avec celui du traitement du sable neuf produisant les deux à la fois du sable de contact.

Grâce à ce stage qui s'est déroulé dans des bonnes conditions et meilleures ambiances, j'ai pu découvrir le monde professionnel et avoir une idée réelle sur ce dernier. Il m'a permis de me familiariser avec la vie industrielle de point de vue de traitement, méthodes d'analyses et relation humaines.

Enfin, j'ai vraiment obtenu une grande expérience dans la vie de travail en vue d'enrichir mes connaissances théoriques et surtout celles de pratiques, et je remercie vivement tout le cadre administratif et enseignant qui m'a permis de vivre cette période inoubliable.

Référence bibliographique :

- **1 : www.FAM.com**
- **2 : Jean-Marc PIATEK**
Maîtrise de l’Energie dans l’Industrie de la Fonderie
D’élaboration avec l’ADEME et le CTIF.
- **3 : Document de référence sur les meilleures techniques disponibles**
Forges et fonderies.
Ce document est la traduction de la version anglaise publiée par la
Commission européenne qui seule fait foi.
- **4 : Philippe JASSON**
Techniques de l’ingénieur : Sables et matériaux de moulage de fonderie.