

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Gm. 0513

ÉCOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de Thiès

Département Génie Mécanique

Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de
conception

SUJET :

Optimisation des Techniques de Fonderie à
TRANSRAIL S.A.



Auteur : M. Papa Ibrahima DIOP

Directeur interne: M. Fadel NIANG

Codirecteur : M. Ngor SARR

Directeurs externes: M. Birahim FALL

M. Daniel FEAT

Août 2008

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu louanges à ALLAH le tout puissant, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, participé à ce travail et à nous épauler durant tout notre cursus scolaire. Parmi celles-ci je me permets de citer :

- **Messieurs Fadel NIANG** (Directeur interne) et **Ngor SARR** (codirecteur), professeurs à l'Ecole Polytechnique de Thiès, qui n'ont ménagé aucun effort pour bien m'encadrer. Du début à la fin ils ont été disponibles.
- **Messieurs Birahim FALL** et **Daniel FEAT** (mes Directeurs externes), respectivement **Responsable Cellule Contrôle Qualité** à la **DMR** et **Directeur du Matériel Roulant**. Leurs conseils et disponibilité ont été d'une grande aide.
- **Les employés de la fonderie** pour leur ouverture, leur gentillesse et surtout pour la générosité dont ils ont fait preuve sur le plan de la connaissance.

SOMMAIRE

Ce travail a pour but d'atteindre les objectifs de production et d'améliorer la qualité du produit final de l'atelier de fonderie de TRANSRAIL, à savoir les semelles de freins intervenant dans le système de freinage des locomotives de la dite société.

Nous sommes partis de ce qui fait actuellement pour le comparer à ce qui devrait normalement se faire en proposant des solutions à courts et moyens termes. Ainsi nous partirons des bases même de la fonderie pour trouver les résultats escomptés. Pour cela des séances de discussion et de travail ont été menées avec les travailleurs en plus de profondes recherches liées à la fonderie et à sa science sans oublier documentations au sein même de l'entreprise par le biais de la D.M.R.

Les études ont montré que le problème de qualité est surtout dû au manque de matériels et de personnel en plus du vieillissement de ce dernier. Nous avons aussi démontré que si les quantités sont pesées et analysées avant utilisation les coûts mis en œuvre baisseront considérablement. En plus de l'avantage économique-financier il faut aussi noter les résultats très positifs attendus sur le plan qualitatif et environnemental. Enfin notons aussi la hausse de la production pour atteindre les objectifs fixés par l'administration.

La fonderie étant très riche et assez difficile à maîtriser, exige un contrôle absolu pour pouvoir assurer de bons résultats. Ainsi si un minimum d'équipements est assuré en plus d'une augmentation du personnel, nous pourrions assister à une amélioration considérable du processus. Il faut cependant noter qu'il faut beaucoup d'efforts pour pouvoir complètement moderniser la fonderie car cette dernière est en état de dégradation assez avancée. Il est à rappeler qu'avant cette étude la production marchait tant bien que mal grâce à une expérience louable des fondeurs de la place, en effet ces derniers parviennent travailler sans véritables moyens. Donc il serait nécessaire de profiter de cette expérience en leur associant des jeunes fondeurs pour équilibrer force et expérience.

Mots-clés : TRANSRAIL ; fonderie ; procédé ; matériaux ; personnel ; équipements.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Sommaire	ii
Table des matières	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Liste des photos	ix
Acronymes et abréviations	x
Avant propos	xi
INTRODUCTION	1
Chapitre 1: Situation générale	2
HISTORIQUE ET EVOLUTION	2
ORGANIGRAMME HIERARCHIQUE DE TRANSRAIL	5
Chapitre 2 : Inventaire des problèmes (état des lieux)	6
INTRODUCTION	6
I PROBLEME EXISTANTS	6
II TABLEAU RECAPITULATIF DES PROBLEMES	6
Chapitre 3 : Etat de l'art du domaine étudié (liste d'informations)	
INTRODUCTION	10
I LES DIFFERENTS TYPES DE FONDERIES	10
1 Les fonderies d'alliage ferreux	10
2 Les fonderies d'alliage cuivreux	10

II	LES DIFFERENTES PHASES DE LA FONDERIE.....	11
1	Le modelage.....	11
2	Le moulage.....	12
2.1	Montage à modèles permanents.....	16
2.2	Moulage à modèles perdus.....	28
2.3	Moulage en moules métalliques.....	28
2.4	Procédés spéciaux.....	29
2.5	Conclusion.....	29
3	La fusion et la coulée.....	30
4	Le décochage.....	42
5	L'ébarbage.....	45
	Chapitre 4 : Propositions préliminaires.....	44
	INTRODUCTION.....	44
I	PRESENTATION SOMMAIRE DES SEMELLES DE FREINS ET PROCESSUS ACTUEL.....	44
1	Présentation des semelles de freins.....	44
2	Fonctionnement actuel de la fonderie.....	46
II	MATIÈRES ET MATERIAUX.....	47
1	Sable de moulage.....	47
2	Fonte et autres métaux.....	48
3	Le coke.....	52
4	Fondant.....	53
5	Quelques notions.....	53
5.1	Carbone équivalent C_e	53
5.2	Carbone eutectique C_F	54
5.3	Carbone graphite (ou carbone libre) C_g	54
5.4	Carbone total C_t	54
III	PROCEDES.....	55
1	Le modelage.....	55
2	Le moulage.....	55

2.1	Matériaux utilisés.....	55
2.2	Description du processus.....	56
3	La coulée.....	58
3.1	Allumage.....	58
3.2	Fonte et autres métaux.....	61
3.3	Le coke.....	63
3.4	Fondant.....	64
3.5	Pesée.....	64
3.6	Air comburant.....	64
3.7	Bilan thermique.....	66
3.8	Désulfuration.....	74
4	Manutention du métal liquide.....	75
5	Coulées du métal liquide.....	80
5.1	Généralités.....	80
5.2	Coulée manuelle.....	82
5.3	Coulée mécanisée avec chariot de coulée.....	82
6	Dessin Assisté par Ordinateur (DAO).....	83

Chapitre 5 : Etudes économique, financière et environnementale

I	ETUDES ECONOMIQUE ET FINANCIERE.....	88
1	Coût actuel d'une semelle pour 600 semelles par mois.....	88
1.1	Coûts à partir des enquêtes.....	88
1.1.1	Quantités des matières premières.....	88
1.1.2	Prix des matières premières.....	89
1.1.3	Calcul du coût des matières premières pour 600 semelles.....	90
1.1.4	Masse salariale (coûts main d'œuvre).....	90
1.1.5	Autres paramètres.....	90
1.1.6	Tableau récapitulatif et résultat final.....	91
1.2	Coûts à partir des calculs.....	91
2	Coût actuel d'une semelle pour 2000 semelles par mois.....	93
2.1	Quantités des matières premières.....	93
2.2	Prix des matières premières.....	93

2.3	Calcul du coût des matières premières pour 2000 semelles.....	95
2.4	Masse salariale (coûts main d'œuvre)	95
2.5	Autres paramètres.....	96
II	ETUDE ENVIRONNEMENTALE.....	97
1	Conditions de travail.....	97
2	Environnement interne.....	97
3	Environnement externe.....	98
4	Impacts sur la santé.....	100

Chapitre 6 : Proposition d'une solution

optimisée.....	101
-----------------------	------------

INTRODUCTION.....	101
--------------------------	------------

1	Problèmes d'isolation thermique.....	101
2	Difficultés d'évacuation des fumées.....	102
3	Impossibilité de maîtriser les températures.....	102
4	Pesée et dosage des produits impossibles.....	103
5	Difficultés liées aux efforts physiques.....	103
6	Imprécisions et retards.....	103
7	Problèmes liés à la sécurité.....	103
8	Faible rendement, non atteinte des objectifs.....	103
9	Chômage technique, non atteint des objectifs.....	104
10	Incertitudes liées au produit fini.....	104
11	D'autres propositions.....	104
11.1	Changement ou amélioration des technologies existantes.....	104
11.2	Enrichissement des tâches.....	105

CONCLUSION.....	106
------------------------	------------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	107
---	------------

LISTE DES TABLEAUX

2.1 : Tableau récapitulatif.....	9
3.1 : Classification des procédés de moulage.....	15
3.2 : Exemples de composition de sable vert.....	19
3.3 : Influence du Si.....	32
3.4 : Variation des caractéristiques mécaniques.....	34
3.5 : Teneur en Si.....	35
3.6 : Correspondances des caractéristiques mécaniques.....	35
3.7 : Classification d'après essai.....	35
4.1: Composition d'une charge de fonte pour cubilot.....	52
4.2 : Besoins pour 600 semelles/mois.....	60
4.3 : Besoins pour 2000 semelles/mois.....	60
4.4 : Volumes de gaz mis en jeu pour la combustion d'1 kg de carbone.....	72
5.1 : Besoins pour 600 semelles/mois.....	88
5.2 : Coûts par unité pour 600 semelles.....	89
5.3 : Coûts par quantité pour 600 semelles/mois.....	90
5.4: Coût d'une semelle pour 600 semelles.....	91
5.5 : Besoins pour 2000 semelles/mois.....	94
5.6 : Coûts par unité pour 2000 semelles.....	94
5.7 : Coûts par quantité pour 2000 semelles/mois.....	95
5.8: Coût d'une semelle pour 2000 semelles.....	96

LISTE DES FIGURES

1.1: Ligne DAKAR-BAMAKO.....	3
1.2 : Organigramme de la société.....	5
3.1 : Influence de la surchauffe sur l'importance de la surfusion à la solidification.....	32
3.2 : Cubilot à vent froid.....	41
4.1 : Équilibre de Boudouard.....	67
4.2 : Température et composition des gaz dans le cubilot.....	67
4.3 : Atmosphère gazeuse dans le cubilot : exemples de compositions de fumées.....	69
4.4 : Température théorique de combustion des gaz en fonction de l'indice de combustion, de la température du vent et de la teneur en oxygène de l'air.....	73
4.5 : Cubilot chargé.....	75
4.6 : Poche à brancard.....	76
4.7 : Poches à quenouille.....	78
4.8 : Poches à tourillons et à pulviseur indépendant.....	79
4.9 : Poches spéciales.....	80
4.10 : Semelle de frein.....	84
4.11 : Châssis.....	85
4.12 : Modèle inférieur.....	86
4.13 : Modèle supérieur.....	87

LISTE DES PHOTOS

4.1 : Ensemble de freinage.....	45
4.2 : Des rangées de châssis après le moulage.....	58
4.3 : Poches avec système de basculement.....	76
4.4 : Poches tourneaux.....	77
4.5 : Chariot de coulée mécanisé.....	83

2.4 Masse salariale (coûts main d'œuvre)

2.5 Autres paramètres

II ETUDE ENVIRONNEMENTALE

1 Conditions de travail

2 Environnement interne

3 Environnement externe

4 Impacts sur la santé

Chapitre 6 : Proposition d'une solution optimisée

INTRODUCTION

- Problèmes d'isolation thermique
- Difficultés d'évacuation des fumées
- Impossibilité de maîtriser les températures
- Pesée et dosage des produits impossibles
- Difficultés liées aux efforts physiques
- Imprécisions et retards
- Problèmes liés à la sécurité
- Faible rendement, non atteinte des objectifs
- Chômage technique, non atteint des objectifs
- Incertitudes liées au produit fini
- D'autres propositions
 - Changement ou amélioration des technologies existantes
 - Enrichissement des tâches

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES TABLEAUX

2.1 : Tableau récapitulatif.....	
3.1 : Classification des procédés de moulage.....	
3.2 : Exemples de composition de sable vert	
3.3 : Influence du Si	
3.4 : Variation des caractéristiques mécaniques	
3.5 : Teneur en Si	
3.6 : Correspondances des caractéristiques mécaniques	
3.7 : Classification d'après essai	
4.1: Composition d'une charge de fonte pour cubilot	
4.2 : Besoins pour 600 semelles/mois	
4.3 : Besoins pour 2000 semelles/mois	
4.4 : Volumes de gaz mis en jeu pour la combustion d'1 kg de carbone	
5.1 : Besoins pour 600 semelles/mois	
5.2 : Coûts par unité pour 600 semelles	
5.3 : Coûts par quantité pour 600 semelles/mois	
5.4: Coût d'une semelle pour 600 semelles	
5.5 : Besoins pour 2000 semelles/mois	
5.6 : Coûts par unité pour 2000 semelles	
5.7 : Coûts par quantité pour 2000 semelles/mois	
5.8: Coût d'une semelle pour 2000 semelles	

LISTE DES FIGURES

- 1.1: Ligne DAKAR-BAMAKO
- 1.2 : Organigramme de la société
- 3.1 : Influence de la surchauffe sur l'importance de la surfusion à la solidification
- 3.2 : Cubilot à vent froid
- 4.1 : Équilibre de Boudouard
- 4.2 : Température et composition des gaz dans le cubilot
- 4.3 : Atmosphère gazeuse dans le cubilot : exemples de compositions de fumées
- 4.4 : Température théorique de combustion des gaz en fonction de l'indice de combustion, de la température du vent et de la teneur en oxygène de l'air
- 4.5 : Cubilot chargé
- 4.6 : Poche à brancard
- 4.7 : Poches à quenouille
- 4.8 : Poches à tourillons et à palonnier indépendant
- 4.9 : Poches spéciales
- 4.10 : Semelle de frein
- 4.11 : Châssis
- 4.12 : Modèle inférieur
- 4.13 : Modèle supérieur

LISTE DES PHOTOS

- 4.1 : Ensemble de freinage
- 4.2 : Des rangées de châssis après le moulage
- 4.3 : Poches avec système de basculement
- 4.4 : Poches tonneaux
- 4.5: Chariot de coulée mécanisé

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

D.A.O. : Dessin Assisté par Ordinateur

C.A.O. : Conception Assisté par Ordinateur

D.I.C. : Diplôme d'Ingénieur de Conception

D.I.T. : Diplôme d'Ingénieur Technologue

D.M.R. : Direction du Matériel Roulant

D.S.T. : Diplôme Supérieur de Technologie

D.U.T. : Diplôme Universitaire de Technologie

E.N.S.E.P.T. : Ecole Nationale Supérieure Enseignement Professionnel et Technologique

E.N.S.U.T. : Ecole Nationale Supérieure Universitaire et Technologique

E.P.I. : Équipements de Protection Individuelle

E.P.T. : Ecole Polytechnique de Thiès

F.C.F.A. : Franc de la Communauté Financière d'Afrique

F.G.L. : Fonte à Graphite Lamellaire

F.G.S. : Fonte à Graphite Sphéroïdale

I.S.G. : Institut Supérieure de Gestion

S.N.C.F. : Société Nationale des Chemins de Fer (France)

T.V.A. : Taxe sur la Valeur Ajoutée

U.C.A.D. : Université Cheikh Anta DIOP

U.T. : Université de Thiès

AVANT PROPOS

E.S.P.

L'Ecole Supérieure Polytechnique (E.S.P.) est un établissement qui regroupe, depuis la réforme de 1994, l'EX - E.N.S.U.T., l'EX - E.N.S.E.P.T.

Elle est rattachée à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar et comporte deux centres : le centre de Dakar et le centre de Thiès.

L'E.S.P. comporte cinq départements répartis dans les deux centres comme suit :

1 Centre de Dakar :

- 1.1 Département du Génie Chimie
- 1.2 Département du Génie Civil (formation continue)
- 1.3 Département du Génie Electrique
- 1.4 Département du Génie Informatique
- 1.5 Département du Génie Mécanique (D.U.T.)

Depuis 2005, l'EX - I.S.G. a été rattaché à l'E.S.P. sous le nom de Département de Gestion.

2 Centre de Thiès :

- 2.1 Département du Génie Civil
- 2.2 Département du Génie Mécanique - option Electromécanique (D.I.C)

Avec la réforme de 2007, l'E.S.P. est rattachée maintenant à l'U.T. avec comme nom l'E.P.T. tout en gardant le même statut et en intégrant la formation de D.U.T. en Génie Mécanique.

L'E.S.P. a pour vocation la formation de techniciens supérieurs (D.U.T. et D.S.T.) au bout de deux ans, de d'ingénieurs technologues (D.I.T.) en quatre ans et d'ingénieurs de conception (D.I.C.) en cinq ans. La recherche en troisième cycle est aussi intégrée.

A la fin du cycle d'ingénieurs de conception, l'élève ingénieur est appelé à mener un projet de fin d'études, comme celui-ci, sous la direction de ses professeurs et éventuellement de personnes externes. Ce projet lui permet de mettre en application les différentes connaissances théoriques et pratiques acquises au cours de sa formation.

E.P.T.

- ❖ Le 23 mai 1973, son Excellence Léopold Sédar SENGHOR, Président de la République du Sénégal, décrète la création de l'École Polytechnique de Thiès (EPT).
- ❖ L'École Polytechnique de Montréal en accepte le parrainage au cours de son implantation progressive. L'EPT fut rattachée au ministère des forces armées.
- ❖ En octobre 1991 rattachement au ministère de l'éducation nationale
- ❖ 25 mai 1992 rattachement à l'Université de Dakar
- ❖ En 1994, fusion de l'ENSUT et de l'E.N.S.E.T.P. pour former l'École Supérieure Polytechnique (ESP) de l'U.C.A.D.
- ❖ 2007, l'ESP centre de Thiès est rattachée à la nouvelle université créée à Thiès pour devenir École Polytechnique de Thiès.

MISSIONS:

La nouvelle EPT a pour vocation de contribuer à la diversification de l'offre d'enseignement supérieur technologique au Sénégal, dans la sous région et en Afrique.

Les missions fondamentales sont :

- ❖ La formation tant sur le plan théorique que pratique de techniciens supérieurs (DUT), d'ingénieurs d'exécution (DIT) et d'ingénieurs de conception (DIC).
- ❖ L'organisation d'activités de recherche
- ❖ La participation à des activités d'expertise à l'intention des entreprises publiques et privées.
- ❖ Assurer une formation continue de 3ème cycle dans les sciences de l'ingénieur
- ❖ Dispenser une formation continue et de perfectionnement professionnel (DST, DIT).

LES DEPARTEMENTS :

L'EPT compte actuellement deux départements:

- Génie Civil
- Génie Mécanique

Elle prévoit d'ouvrir, à moyen terme les départements suivants:

- Informatique et Télécommunication
- Architecture et Urbanisme
- Département des sciences topographiques;
- Département d'architecture et d'urbanisme;
- Département d'Electronique, Automatique et Information Industrielle;
- Département d'Informatique et Télécommunications;
- Département Energétique

LA FORMATION :

L'EPT offre les formations suivantes:

Génie Civil :

- Résistance des Matériaux, Construction Métallique
- Topographie, Hydraulique, Technologie de construction
- Conception et réalisation des infrastructures dans les travaux publics, les ouvrages hydriques et portuaires

Génie Mécanique :

- Mécanique Générale, Mécanique des Fluides
- Résistance des matériaux, froid et climatisation
- Automatismes, Electrotechnique
- Conception des systèmes mécaniques

DIPLOMES

L'Ecole Polytechnique de Thiès délivre les diplômes suivants:

- Diplôme Universitaire de Technologie DUT (bac +2)
- Diplôme d'Ingénieur Technologue (bac +4)
- Diplôme d'Ingénieur de Conception DIC (bac +5)

LA FORMATION CONTINUE :

LE CYCLE DST:

L'EPT forme en 03 années en cours du soir des Techniciens Supérieurs (BAC+2) recrutés au niveau des séries S1 S2 S3 ou d'un titre admis en équivalent

LE CYCLE DIT:

L'EPT forme des Ingénieurs Technologues (bac+4) en 03 années académiques recrutés au niveau DUT ou d'un titre équivalent.

INTRODUCTION

Les semelles de freins, étant des éléments essentiels tant sur le plan de la sécurité que sur le plan du confort, exigent une certaine maîtrise sur le plan de l'élaboration. Ce qui n'est pas toujours le cas au sein de TRANSRAIL, la composition des semelles ne répond pas à toutes les exigences de la norme. Cette composition est difficilement respectée car les moyens techniques pour s'en assurer sont inexistants si ce n'est que les fondeurs jouissent d'une expérience très riche. En plus du manque de moyens matériels s'ajoute un manque de personnel car le personnel actuel, est non seulement victime de l'âge, mais n'est pas aussi assez nombreux pour atteindre les objectifs fixés par l'administration.

Le manque de matériels et de personnel porte considérablement atteinte à la qualité du produit ce qui n'est pas normal car il y va de la sécurité de vies humaines mais aussi de l'usure prématurée des roues des locomotives.

Pour remédier à cela il faut une maîtrise totale de l'élaboration des semelles du début à la fin. Et pour cela des efforts doivent être faits tant sur le plan de l'équipement que sur le plan du personnel. Ainsi les quantités de matières premières devront être contrôlées et pour cela il faudra pouvoir faire des analyses et des pesées sur place par un personnel bien formé et assez nombreux pour pouvoir bien gérer le procédé.

Ce rapport a pour objectif principal d'améliorer la qualité du produit et d'atteindre les objectifs de production qui sont de 2000 semelles par mois contre 1050 semelles par mois produites actuellement. Ce travail se fera en sur la base d'une bonne maîtrise du processus sans négliger les différentes étapes du processus car la plus petite des étapes peut s'avérer très déterminante sur la composition du produit final.

Ainsi une étude basée sur la maîtrise et la description du procédé sans la connaissance des matériaux intervenant dans le procédé.

Sur ce après avoir bien décrit le procédé, nous allons bien détailler le procédé et la composition du procédé. Enfin une étude économique-financière basée sur les résultats donnés par le procédé viendra achever l'étude, sans oublier les exigences environnementales qui ne peuvent pas être en reste dans cette étude.

CHAPITRE 1: PRESENTATION DE TRANSRAIL S.A.

I HISTORIQUE ET EVOLUTION

Le premier réseau ferré de l'Afrique occidentale a été la ligne Dakar - Saint Louis (263 Km) dont la construction commencée en 1882 a été achevée en 1885. Son exploitation a été confiée à une société privée dénommée le DSI, (le Dakar St Louis).

La ligne reliant Thiès au Sénégal à Kayes au Mali, entamée en 1905 a été achevée en 1923. Elle constituera avec la ligne Bamako -Kayes le premier réseau d'intégration en Afrique occidentale. En 1924 et tenant compte de leur complémentarité, les réseaux sénégalais et maliens fusionnèrent pour former le Dakar Niger (DN).

En Août 1960 après l'éclatement de la fédération du Mali le Dakar Niger se scinde en deux réseaux :

- La Régie des Chemins de fer du Sénégal (RCFS)
- La régie du Chemin de Fer du mali (RCFM)

En raison de la complémentarité entre les deux réseaux, une convention établie en juin 1963 fixe les modalités d'exploitation du trafic ferroviaire international entre Dakar et Bamako. Cette convention est dénommée la Convention Internationale ferroviaire.

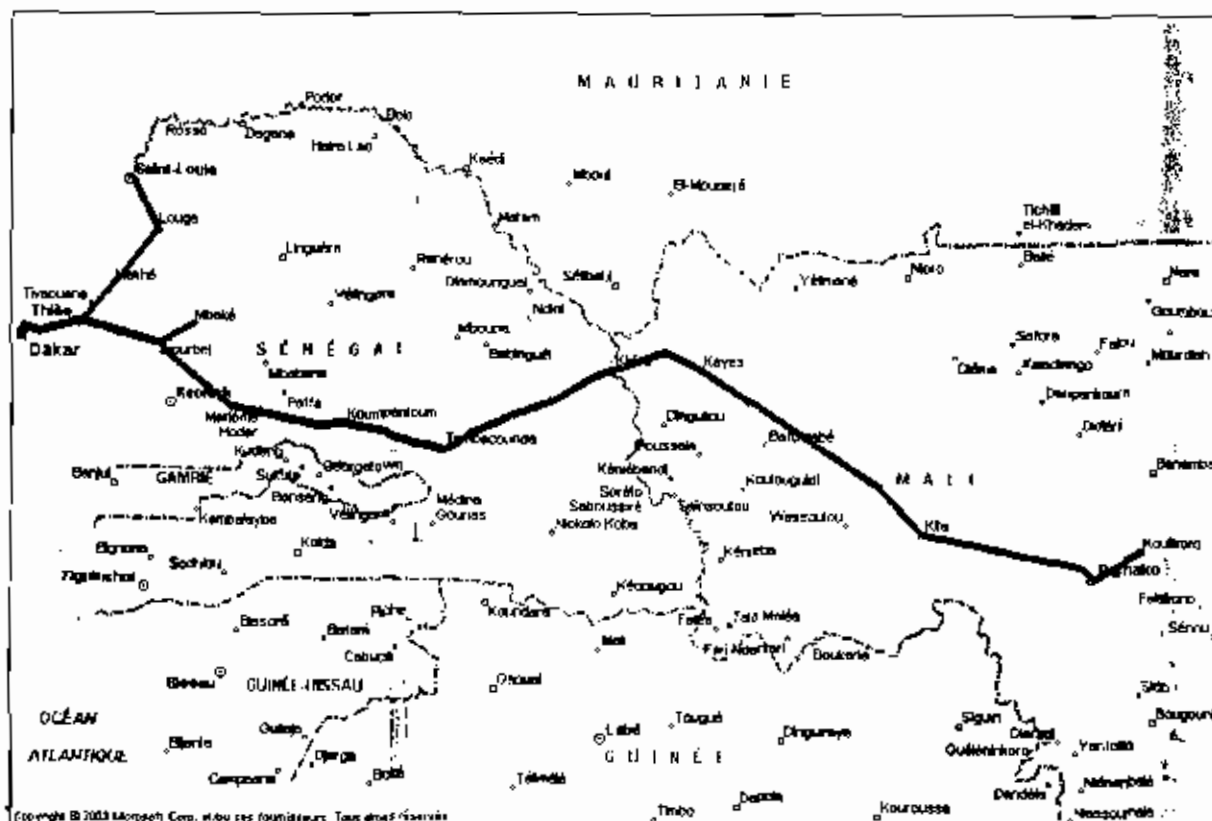


Figure 1.1 : Ligne DAKAR-BAMAKO

Au début des années 80, la Société des Industries Chimiques du Sénégal crée la Société d'exploitation Ferroviaire des industries Chimiques du Sénégal (SEFICS) qui dispose d'un parc de matériel roulant pour le transport de ses produits entre le port de Dakar et l'usine de transformation à Taïba (120 Km de Dakar). La SEFICS utilise l'infrastructure en s'acquittant d'un droit de péage.

En 1987 avec la montée démographique et l'exode, Dakar est confrontée à un problème de transport entre la banlieue et le centre ville. Grâce au génie des cheminots le Petit Train Bleu (PTB) a été créé à partir de matériel réformé et réhabilité. Aujourd'hui le PTB constitue l'épine dorsale du transport urbain à Dakar

Chaque jour 20 000 voyageurs sont transportés entre Dakar et Rufisque distantes de 30 Km.

En 1989 la Régie des chemins de Fer du Sénégal a été transformée en Société Nationale de Chemin de Fer du Sénégal (SNCS). L'objectif visé était de donner plus d'autonomie et de souplesse dans la gestion et l'exploitation du chemin de fer.

NAISSANCE DE TRANSRAIL

Au début des années 94 et face aux difficultés des réseaux, les Etats du Mali et du Sénégal ont décidé conjointement de procéder à la restructuration du transport ferroviaire entre les deux pays.

L'objectif des autorités des deux pays est d'une part d'améliorer la compétitivité des transports internationaux sur lesquels s'exerce une forte concurrence et d'autre part d'améliorer la gestion commerciale, financière et technique dudit chemin de fer.

Au terme du processus une convention de concession est alors signée entre TRANSRAIL (société concessionnaire) et les Etats du Sénégal et du Mali le 23 septembre 2003.

Le 1^{er} octobre 2003 le concessionnaire a repris les activités ferroviaires sur l'axe Dakar Bamako.

TRANSRAIL est responsable sur le chemin de fer Dakar Bamako de l'exploitation technique et commerciale des services de transport ferroviaire des marchandises et voyageurs, de l'entretien, l'exploitation, le renouvellement et l'aménagement des infrastructures et la gestion du domaine ferroviaire concédé.

II ORGANIGRAMME HIERARCHIQUE DE TRANSRAIL.

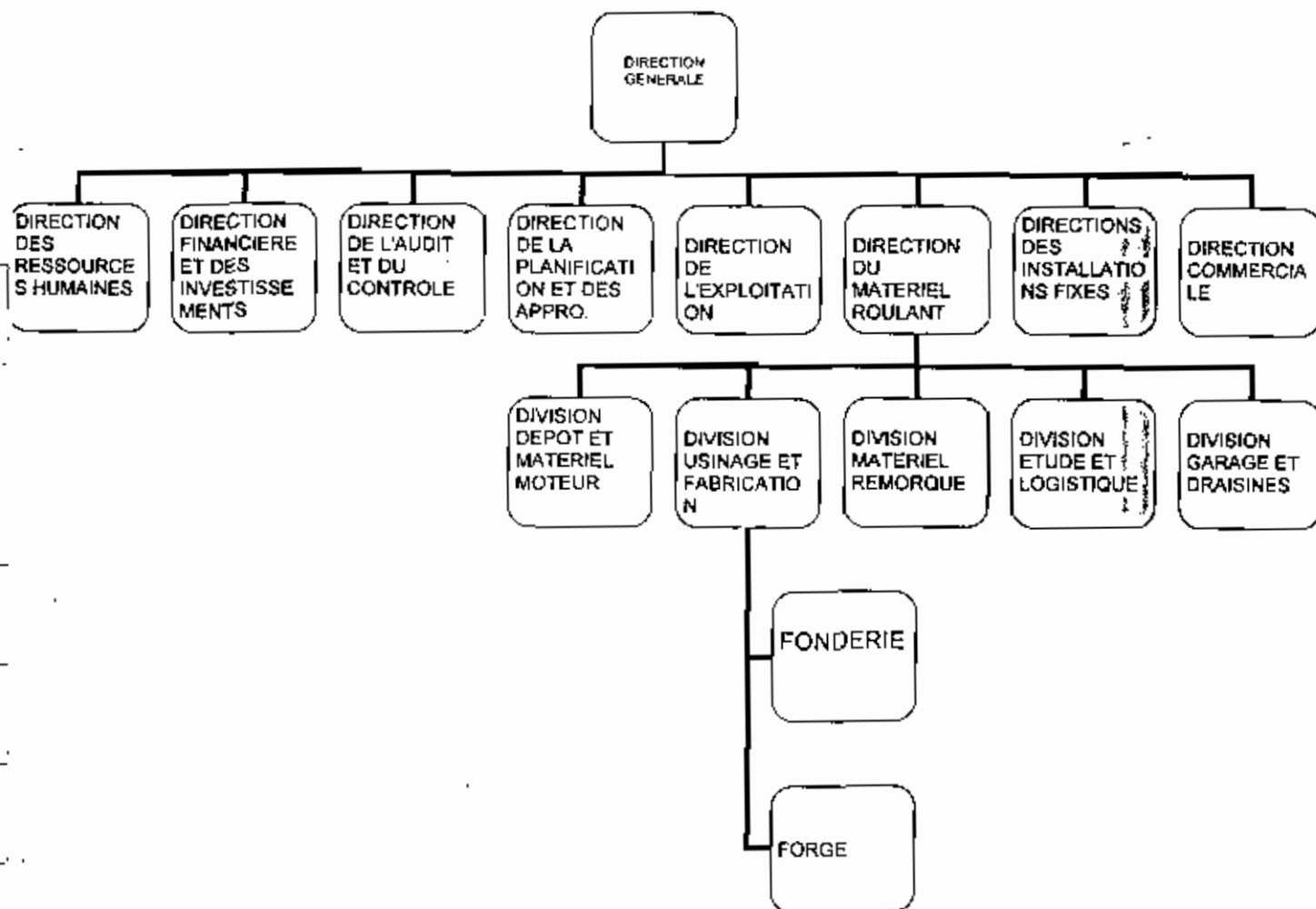


Figure 1.2 : Organigramme de la société

CHAPITRE 2: INVENTAIRE DES PROBLEMES (ETAT DE LIEUX)

INTRODUCTION

La fonderie, étant un procédé de fabrication très délicat, exige des précautions particulières. Tant sur le plan de la préparation que sur le plan de la mise en œuvre. De ce fait, une étude d'optimisation ne peut se faire sans d'abord relever toutes les difficultés rencontrées du début à la fin du processus.

I PROBLEMES EXISTANTS

Les problèmes majeurs de l'atelier de fonderie sont le manque de matériels et la vétusté de ces derniers. Étant donné que la majeure partie des installations date de plus de trente ans, leur utilisation n'est plus optimale voire impossible. L'état même de l'atelier est dégradé car les locaux qui s'y trouvent mériteraient une remise en état suite à une longue période d'occupation.

Les éléments fondamentaux de la fonderie sont les cubilots, et ces derniers regorgent de la plupart des problèmes, ce qui fait que leur remise en fonctionnement optimal résoudrait une grande partie des problèmes rencontrés. Parmi les problèmes détectés au niveau des cubilots nous pouvons d'abord citer les difficultés de se procurer des briques réfractaires, ce problème est majeur car il agit directement sur le rendement et la qualité du produit. Il faut aussi noter que seul un parmi les trois cubilots est fonctionnel et c'est en dessous de son meilleur rendement. Les deux autres cubilots de moindre taille ne sont pas équipés de briques réfractaires et, comme il a été cité précédemment, ces derniers sont des éléments essentiels des cubilots. Les fondeurs sont parfois obligés de récupérer des briques qui ne sont pas forcément adaptés à la fonderie. La remise en état des deux cubilots défectueux nécessiterait beaucoup de moyens car ces derniers sont en état de dégradation très avancé. Les parties extérieures de la colonne et du creuset mériteraient d'être retapées car l'âge et le manque d'entretien ont fait leurs effets. La sole et le gueulard ne sont pas très défectueux mais mériteraient d'être retouchés, ainsi que les tuyères et les boîtes à vent. Un problème majeur touchant tous les trois cubilots est la difficulté d'évacuation des fumées émanant de ces

derniers. En effet les cheminées, surtout celle du cubilot fonctionnel, sont en très mauvais état. Ce qui fait que les conditions de travail ne sont pas les meilleures, il y va même du rendement voire de la santé des travailleurs de la fonderie. Pour les autres problèmes touchant les cubilots, nous pouvons citer ceux qui conditionnent la qualité même du produit. Parmi eux il y a l'inexistence d'appareils de mesure de la température (pyromètres par exemple), les cubilots fonctionnant à de hautes températures doivent forcément être équipés de ces appareils de mesure car le travail de fusion de métaux ne peut pas se faire sans une maîtrise totale des températures. Ce qui fait que les fondeurs ne se fient qu'à l'expérience engrangée après des années de pratique. Même si l'expérience est primordiale dans ce type de travail, elle ne peut pas se passer d'un équipement adéquat pour ainsi assurer une productivité optimale. Sachant aussi que la fusion du métal, son osmose avec les additifs et l'évacuation des déchets se font à des températures particulières, il est vital de maîtriser l'évolution des températures dans les cubilots. L'autre problème affectant directement la qualité du produit est la difficulté de peser ou de doser les produits intervenant dans le processus, en effet l'atelier de fonderie n'est pas équipé de bascule pour faire le pesage. Et connaissant la délicatesse de ce procédé, nous pouvons dire que c'est quasi impossible d'avoir un produit de qualité sans un bon dosage. Par exemple pour une coulée, sachant qu'il doit y avoir des quantités plus ou moins exactes de fonte et de coque, sans oublier le calcaire et autres additifs, selon bien sûr la quantité du produit fini souhaité. Il serait très difficile d'assurer ce dosage adéquat sans des appareils de pesage. Une fois encore c'est l'expérience des fondeurs sur place qui règle une bonne partie de ces problèmes car ces derniers, avec le temps, ont appris à apprécier des dosages justes pour assurer au moins un produit avec un minimum de qualité. Comme nous l'avons déjà dit, ces deux problèmes majeurs précités agissent directement sur la qualité du produit. Ce qui en font des problèmes cruciaux tant sur le plan économique qu'environnemental. Ceci est délicat car un mauvais produit aurait beaucoup d'impact, car les trains utilisent les semelles, qui sont nos produits finis, dans leurs dispositifs de freinage. Maintenant nous passons à un autre type de problème qui est le manque de matériels. Comme nous l'avons déjà vu, tous les fondeurs ont dépassé l'âge de porter de lourdes charges. Ce qui fait que l'absence de machines pour les soutenir dans les efforts physiques se fera beaucoup sentir. Normalement, certaines tâches comme le recyclage et le compactage devraient être assurés par des machines. Mais il est clair que le travail ne peut pas bien se mener sans des machines telles que les presses et les recycleuses pour palier aux efforts physiques. Le manque de matériels est aussi symbolisé par le nombre relativement réduit des châssis ; ces

derniers (350 environ) ne permettent pas d'atteindre l'objectif fixé par l'administration qui est de 2000 semelles par mois soit environ 500 châssis à raison de 4 coulées par mois.

Restons sur le personnel pour parler d'un autre problème les touchant, il s'agit maintenant de la protection. Sachant que le sentiment de sécurité est indispensable pour la bonne marche d'une entreprise, nous pouvons dire qu'assurer la sécurité des travailleurs est la base de la productivité. Le constat qui est fait au niveau de l'atelier n'est pas très encourageant sur le plan sécuritaire, l'atelier n'est pas muni d'Equipements de Protection Individuelle (EPI). Les rares équipements qui se trouvent sur place ne sont pas assez pour équiper tout le personnel pendant les coulées, et en plus l'équipement paraît vieux. Au manque de matériels et d'équipements de protection s'ajoute le manque de personnel, en effet l'atelier compte seulement 10 employés et vu la forte demande, une augmentation est envisageable.

Un autre problème à mentionner est le retard constaté des commandes. En effet, des moulages et des coulées ont été maintes fois affectés par l'arrivée tardive des commandes. Les armatures (clavettes des semelles) font partie des plus touchées par ces retards, les armatures faisant partie des semelles sont des éléments fondamentaux voire indispensables de ces dernières. Pour finir notons l'impossibilité d'évaluer la qualité du produit avant l'utilisation, ceci est déterminant car il donnerait une certaine assurance avant utilisation.

Concernant la forge, les problèmes sont les mêmes sur le plan de la sécurité, de la vétusté des équipements et autres.

Il est à noter que l'étude se portera plus sur la fonderie que sur la forge, car la sensibilité et l'importance de l'étude sur l'atelier de fonderie ne laissent malheureusement pas beaucoup de temps pour une étude très approfondie sur la forge.

II TABLEAU RÉCAPITULATIF DES PROBLÈMES

Ci après nous avons le tableau récapitulatif des problèmes et quelques autres détails :

<i>PROBLÈMES IDENTIFIÉS</i>	<i>LOCALISATION</i>	<i>OBSERVATIONS</i>
Problèmes d'isolation thermique	cubilot	Difficultés de trouver des briques réfractaires
Difficultés d'évacuation des fumées	cubilot	Cheminée en mauvais état
Impossibilité de maîtriser les températures	cubilot	Inexistence d'appareils de mesure de températures
Pesée et dosage des produits impossibles	atelier	Inexistence d'appareils de pesée
Difficultés liées aux efforts physiques	atelier	Manque de machines
Imprécisions et retards	atelier	Manque de matériels (châssis et autres)
Problèmes liés à la sécurité	atelier	Manque d'E.P.I.
Faible rendement, non atteint des objectifs	atelier	Manque de personnel
Chômage technique, non atteint des objectifs	atelier	Retards dans les commandes
Incertitudes liées au produit fini	atelier	Impossibilité d'évaluer la qualité du produit

Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif

CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART DU DOMAINE ETUDIE

INTRODUCTION

Toute pratique industrielle nécessite une maîtrise optimale pour pouvoir assurer une bonne productivité et ceci dans les meilleures conditions, de ce fait nous allons essayer d'expliquer sommairement *la fonderie*.

La fonderie peut se définir comme étant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour obtenir un objet métallique (de forme et de dimensions définies) par la coulée d'un alliage (préalablement porté à l'état liquide dans un four de fusion approprié) dans une empreinte appelée moule.

La pièce obtenue par fusion et coulée doit répondre à quelques critères tels que :

- ✓ La santé (être exempt de défauts) ;
- ✓ La précision dimensionnelle ;
- ✓ L'usinabilité ;
- ✓ La résistance mécanique.

I LES DIFFERENTS TYPES DE FONDERIES

Les différents types de fonderies peuvent être classés selon les alliages utilisés, chaque nuance d'alliage implique un appareil de fusion approprié. Ainsi nous pouvons citer :

1 Les fonderies d'alliage ferreux

Fonderies d'acier moulé

Fonderies de fonte malléable

Fonderies de fonte grise (qui seront étudiées ici) : $2.5 \leq \%C \leq 3.8$.

2 Les fonderies d'alliage cuivreux

Fonderies de cuivre : plus de 95% de Cu

Fonderies de bronze : plus de 50% de Cu et du Sn

Fonderies de laiton : plus de 50% de Cu et Zn

Fonderies de cupronickel : plus de 50% de Cu et du Ni

Fonderies de cupro-aluminium : plus de 50% de Cu et du Al

Les différents types de fonderies peuvent aussi être classés indépendamment de la nuance du métal. Nous pouvons ainsi avoir :

Les fonderies sur modèles (qui seront étudiées ici)

Les fonderies sur album

Les fonderies de chauffage

Les fonderies de radiateurs

Etc.....

II LES DIFFÉRENTES PHASES DE LA FONDERIE

La réalisation d'une pièce de fonderie nécessite diverses opérations que l'on peut regrouper en cinq (5) phases distinctes :

Le modelage :

Le moulage :

La fusion et la coulée ;

Le décochage ;

L'ébarbage.

I Le modelage

Le modelage est l'ensemble des différents procédés et moyens utilisés dans le but de créer un modèle qui sera fourni au mouleur afin qu'il exécute un moule.

Par modèle, on désigne généralement la forme, l'appareil ou l'ensemble des outillages qui, par les procédés usuels, serviront à reproduire la pièce désirée.

Les modèles peuvent être classés d'après leur aspect et leur utilisation, ou d'après le matériau qui les constitue. Selon l'aspect et l'utilisation nous avons :

Les modèles pour le moulage au trousseau

Les modèles simplifiés (squelettes ou carcasses)

Les modèles au naturel

Les modèles avec boîtes à noyaux

Les plaques modèles

Selon le matériau qui les constitue nous avons aussi des types de modèles tels que :

✓ *Le bois*

C'est le matériau traditionnel du modelage. On en utilise différentes essences (sapin, pin, aulné, chêne, noyer, acajou...) ainsi que les bois reconstitués comme : contreplaqué, lattés, et lamellés-collés, plus stables dans le temps.

✓ *Le polystyrène*

Le polystyrène expansé a quasiment supplanté le bois pour la fabrication des modèles de grosses pièces unitaires, à partir de panneaux découpés et collés

✓ *Les résines du type polymérisable à froid*

Elles sont coulées sur armatures métalliques pour réaliser tout ou parties d'outillages

✓ *Les métaux et alliages*

Comme les fontes (grise, GS), les aciers (acier coulé ou forgé et usiné), ils sont surtout employés pour la réalisation d'outillages de grandes séries, ou pour les moules permanents (coquilles, moules sous pression). Ce sont en général des outillages ou des moules mécanisés de coûts très élevés qui ne peuvent s'amortir que sur des productions importantes.

2 Le 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.

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 motte, 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 oeuvres d'art, en coquille métallique par gravité, sous-pression pour les non ferreux, en coquille centrifugée pour des tuyaux notamment, etc.,

Cette très grande variété des procédés impose de les classer 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 3.1) 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 ;*
- ✓ *procédés spéciaux.*

Il faut notamment prendre en considération :

- la facilité de préparation et de mise en oeuvre des sables et des liants ;
- la durée de vie des sables préparés ;
- la bonne aptitude au stockage ;
- la perméabilité des sables
- la réfractarité 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.
 - 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 ;
- la facilité de débouillage 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 pII assez voisines par exemple) ;
- les problèmes d'environnement aux postes de préparation des sables et de confection des noyaux
- les facilités et la sûreté des approvisionnements et le faible coût des formules de sable et des modes de moulage employés ;
- le montant des investissements à prévoir pour les outillages, dont l'amortissement et l'entretien représentent une partie non négligeable du coût de la pièce.

Classification des procédés de moulage

Types de moulage	Liants	Principaux types de sable	Utilisation		Observation
			Moulage	Noyautage	
I Moulage à modèles permanents					
1. Sables restant plastiques	minéraux	+ silico-argileux + sable à vent	x	x	moulage main moulage machine
2. Sables durcissement thermique	organiques	+ huiles silicatées + Croning + lattes chaudes	x	x	noyautage et moulage en moules ou carapaces
3. Sables durcissement chimique :					
— autodurcissants	minéraux	+ ciment + plâtre + silicate-argile + silicate d'éthyle	x		moulage main
— par gazage	organiques minéraux organiques	+ furanique + silicate-CO ₂ + Aeschlar + Randol-SiO ₂ + Isocet + Betacel	x x	x x x	moulage - noyautage noyautage essentiellement
4. Sables durcissement physique :					
— V process	sans liant	+ siliceux + siliceux	x	x	moulage moulage
II Moulage à modèles perdus					
1. Polystyrène expansé	sans liant	+ siliceux	x		
2. Cire perdue		+ barbotine réfractaire	x		
3. Mercure congelé		+ barbotine réfractaire	x		
III Moulage en moules métalliques					
1. Coquille grève 2. Coquille basse pression 3. Moulage sous pression 4. Moulage par forgeage liquide	Alliages coudes Métaux ferreux et non ferreux suivant les procédés				
IV Procédés spéciaux					
1. Moulage avec refroidisseurs 2. Moulage avec inserts 3. Moulage pièces bimétal 4. Moulage par centrifugation 5. Moulage en coulée continue 6. Moulage à empreintes souples	Alliages coudes Métaux ferreux et non ferreux suivant les procédés				

Tableau 3.1 : Classification des procédés de moulage

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

2.1 Moulage à modèles permanents

2.1.1 Matériaux de moulage

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

2.1.1.1 Sables de base

Ils sont composés essentiellement de grains de silice SiO_2 ; 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.

2.1.1.2 Liants

Ce sont les deuxièmes constituants les plus importants employés pour la fabrication des moules et noyaux en fonderie.

On peut classer les liants en deux grandes familles :

- ✓ *les liants minéraux* comme les argiles, bentonite, silice colloïdale, silicate soluble, plâtre et ciment ;
- ✓ *les liants organiques* : matières amylacées (amidon), huiles siccatives, résines synthétiques.

2.1.1.3 Produits annexes et divers

Ce sont les adjuvants mélangés au sable pour obtenir d'autres propriétés.

2.1.1.4 Matériaux pour moules permanents

Certains procédés de moulage-noyautage nécessitent l'existence 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.

2.1.2 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.

2.1.2.1 Sables de moulage

✓ *Matières de base*

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 étiévés, 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.

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 oeuvre ;
- un bon état de surface des pièces ;
- 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 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 oeuvre, 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.

✓ *Préparation du sable*

• Caractéristiques des sables de moulage

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 étivés.

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 tableau 3.2 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).

Exemples de composition de *sable vert*

Type de fonderie	Sable siliceux Granulométrie série ASTM	Bentonite % en masse	Eau % en masse	Divers
Fonderie d'acier	50 à 55	4 à 5	2,5 à 3	— oxyde de fer (cf. (M 784))
Fonderie de fonte (pièces moyennes)	70 à 100	2 à 12	4 à 10	— noir minéral
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	5	2 à 4	— soufre 5 à 10% — acide borique (0,5 à 1,5% cf. (M 620))

Tableau 3.2 : Exemples de composition de sable vert

- **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 relividés (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.

- **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 sont principalement :

- des tambours magnétiques ;
- des brise-mottes ;
- des tamis vibrants ou rotatifs ;
- des refroidisseurs ;
- des broyeurs-malaxeurs ;
- des aérateurs.

- **Matériels de manutention et de stockage du sable**

Une sablerie comprend beaucoup de matériel de manutention et de stockage. Les masses de sables à mettre en oeuvre sont toujours nettement plus importantes que le tournage du métal coulé et celui des pièces produites ; par exemple pour produire 10 t/h de pièces en fonte GS (pièces de 7 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 sur 20.

- **Contrôle du sable préparé**

Rappelons que ces contrôles se font en laboratoire avec des appareils spécialisés permettant de mesurer les différents paramètres caractérisant un sable de moulage.

- **Conclusion**

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.

2.1.2.2 Procédés de moulage

Le moulage est la plus importante opération de fabrication en fonderie, c'est elle qui détermine les caractéristiques principales de la pièce et qui influe dans une très large proportion sur son niveau de qualité.

Pour satisfaire les exigences sans cesse croissantes des utilisateurs au niveau des performances et de la qualité, les procédés de moulage en sable plastique, et tout particulièrement en sable vert, ont évolué, depuis le moulage main, vers des moulages machines à basse pression puis à moyenne et haute pressions pour améliorer 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.

✓ *Moulage main*

C'est le mode de moulage le plus anciennement utilisé dans toutes les fonderies. Avec le développement du machinisme et de la mécanisation, adaptés à des productions de masse, il a peu à peu régressé pour être surtout employé aujourd'hui dans les ateliers de fabrication de pièces unitaires de tous tonnages ou de très petites séries, ne justifiant pas, dans ce cas, des coûts d'outillage type machine trop élevés.

Certes la modernisation se poursuit pour améliorer la qualité, la précision et le prix de revient des pièces. De nouveaux moyens apparaissent [Gros secoueurs à moules, grosses démouleuses], de nouveaux sables, également, préparés en continu dans des mélangeurs à vis, des modèles en polystyrène dont le développement simplifie les opérations de moulage et améliore la compétitivité de la fonderie.

Pour la réalisation de telles fabrications, le personnel doit avoir une excellente qualification, et c'est dans les ateliers de moulage main que l'on trouve les meilleurs professionnels mouleurs.

- Principe

On peut mouler une pièce d'après un modèle réalisé habituellement en bois, ce modèle pouvant être parfois simplifié (modèles carcasses ou squelettes, trousseau...).

Le modèle est généralement séparé en deux parties suivant un plan de joint, une demi-partie servant à faire le moule de dessous, l'autre demi-partie, le moule de dessus.

Pour les plus gros moules, chaque partie de modèle peut être posée directement sur des marbres, à même le sol de l'atelier.

Toutes les parties en creux de la pièce qui ne se démontent pas sont fabriquées dans les boîtes à noyaux pour être ensuite positionnées dans des parties prévues sur le modèle et reproduites en creux dans le moule.

L'apparition des modèles en polystyrène et des sables autodurcissants a permis de simplifier toutes ces opérations et d'apporter des gains de manutention considérables.

On peut aussi, en moulage main, surmouler une pièce irréparable que l'on utilise comme modèle pour fabriquer une pièce de remplacement.

- Matériaux et sables utilisés

Pour ces moulages, on utilise des sables silico-argileux avec 5 à 10 % d'humidité qu'on peut classer en trois catégories.

a) *Le sable vert (dit aussi à vert)* : réservé à la fabrication des petites et moyennes pièces, on lui ajoute parfois un peu de silicate de sodium ou de mélasse pour donner au sable un peu plus de consistance ou corps.

b) *Le sable vert grillé*

c) *Le sable étuvé*

- *Sable à la chamotte*
- *Sable au zircon*
- *Sable à la chromite*
- *Sable à l'olivine*

- Description du procédé

- Moulage de la demi-partie inférieure.
- Talcage du plan de joint pour éviter le collage.

- Indexage du demi modèle supérieur sur le demi-modèle inférieur.
- Indexage du châssis supérieur sur le châssis inférieur.
- Moulage de la demi-partie supérieure.
- Ouverture du moule pour extraire les deux demi-modèles.
- Finition du moule : descente de coulée, évènements, tirages d'air, attaques, enduirage éventuel de l'empreinte (graphite par exemple), séchage, flambage, soufflage pneumatique pour éliminer toute trace de sable).
- Remmoulage des noyaux dans la partie inférieure.
- Fermeture du moule par les systèmes d'indexage ou de goujonage.
- Pose de masses de charge (poids de charge) sur la partie supérieure ou crampage.
- Coulée.

Remarques :

- le serrage du sable de moulage se fait à la pilette manuelle ou pneumatique, ou au fouloir : il est suivi d'un damage avant le raclage ;
- le démoulage des modèles est effectué au palan ou à l'aide d'une démouleuse ;
- pour les grosses pièces, les moules sont étuvés pour augmenter la résistance du sable ;
- dans le moulage en fosse lorsque les pièces sont de grandes dimensions, les châssis sont disposés à l'intérieur d'une fosse creusée dans le sol de la fonderie pour faciliter la coulée de la pièce, les manutentions et éliminer les risques d'accident ; dans certains cas, les parois de la fosse peuvent remplacer le châssis ;
- pour les pièces linéaires ou circulaires, l'empreinte est générée par troussage. Après coulée et refroidissement, les moules sont détruits pour récupérer les pièces. Le sable de moulage est régénéré dans la sablerie.

- **Machines**

Bien qu'il s'agisse de techniques et de procédé de moulage main, on utilise dans les fonderies de moyennes et grosses pièces des machines spéciales pour aider au remplissage et au serrage des gros moules ou comme assistance pour certaines opérations, comme le démoulage des modèles par retournement.

Pour le serrage des moules, on peut utiliser :

- des secoueurs à moles pour tasser le sable;
- des machines à projection de sable fixes ou mobiles, projetant le sable de moulage par l'intermédiaire d'une turbine à palette.

Mais le sable, projeté violemment sur les modèles bois, les érode, d'autant plus qu'il n'est pas toujours bien débarrassé de toutes les petites particules métalliques provenant des pièces et de la coulée du métal.

Le serrage avec ces machines, correct sur le plan de joint et sur les parties horizontales, n'est pas parfait sur les parties verticales.

Ce sont des machines bruyantes, assez difficiles à manier et dont l'efficacité n'est pas excellente. Elles tendent à disparaître au profit des moulages en sables auto-durcissants.

Les démouleuses à retournement facilitent le démoulage des modèles en remplaçant la classique opération d'extraction au palan après retournement des moules.

Pour la mise en œuvre des nouveaux procédés de moulage au sable auto-durcissant, on utilise des mélangeurs à vis qui mélangent le sable sec avec les résines et les catalyseurs juste avant leur utilisation.

- **Outillages**

Dans les ateliers de moulage main, on utilise généralement, suivant les procédés :

- des planches de profil pour le moulage au trousseau de pièces circulaires, hélicoïdales ou rectilignes qui peuvent être moulées par ce procédé économique ;
- des modèles et boîtes à noyaux en bois ;
- des modèles en polystyrène que l'on emballe dans des sables auto-durcissants ;
- des châssis de moulage, cadres rigides en acier coulé, fonte, ou profilés métalliques, disposés autour du modèle, adaptés aux dimensions du moule, pour contenir le sable de moulage et permettre son serrage. Ils peuvent être simples ou avec des barres pour les grands moules, en général carrés ou rectangulaires, et quelquefois de formes spéciales adaptées à la pièce à fabriquer ;
- des outils de serrage du sable, pilettes, fouloirs manuels ou pneumatiques ;
- et les outillages individuels des mouleurs (spatules...).

- **Conclusion**

Bien que très ancien, le moulage main a su évoluer dans ses méthodes, ses techniques et ses procédés, ce qui lui a permis de mieux répondre aux demandes des clients et de supporter la concurrence d'autres techniques.

Mais il restera toujours obligatoire que soit mis au point le dessin de la pièce entre le bureau d'études du client, l'usineur et le fondeur, pour que le produit final réponde parfaitement au cahier des charges, dans les meilleures conditions de prix.

C'est une condition impérative pour la réussite de ces fabrications de pièces, très souvent unitaires, qui ne peuvent bénéficier de mises au point successives. Les nouvelles techniques de simulation sont dans ce domaine une assistance précieuse.

✓ *Moulage machine*

Le développement de la mécanisation et de l'automatisation en fonderie a toujours été un problème difficile à résoudre, compte tenu de l'agressivité d'un milieu particulièrement hostile à ce genre de matériel. La présence de silice, de métal en fusion, de poussières, une ambiance thermique élevée, comme à certains postes de coulée ou de décochage, des manutentions brutales, créent des conditions d'emploi très éprouvantes pour la mécanique et pour les matériels électriques et électroniques. Il a donc fallu que les constructeurs innovent dans tous ces domaines pour que le développement mécanique et automatique des installations de fonderie soit possible et devienne particulièrement fiable. Il n'est pas rare maintenant de voir des chantiers de moulage fortement automatisés qui, après mise au point, ont des rendements supérieurs à 0,8-0,9.

2.1.2.3 Moulage aux sables à durcissement thermique

✓ *Généralités*

La matière première de base pour les procédés à durcissement thermique reste le sable siliceux suffisamment pur (l'argile par exemple ne devant pas dépasser 1 % en masse) mélangé à des liants organiques (huiles siccatives, matières amylacées, résines), le sable étant serré ou soufflé dans une boîte à noyaux ou contre une plaque-modèle.

Le chauffage du mélange provoque la prise ou polymérisation des liants et le durcissement du sable.

On distingue deux procédés :

- le chauffage du sable en dehors de l'outillage après démoulage ;
- le chauffage du sable par contact avec un outillage chauffé.

✓ *Chauffage et durcissement du sable en dehors de l'empreinte*

- Principe

Le sable est mélangé avec des liants pour lui donner la cohésion à vert (conservation de sa forme après démoulage de la boîte à noyaux) et la résistance mécanique finale après cuisson à 250°C.

- Composition du sable

Pour obtenir ces qualités, le sable siliceux sec est mélangé avec 1 % en masse de dextrine, d'amidon ou de glucose pour lui donner la cohésion à vert et 1 % en masse de liant donnant la cohésion finale après cuisson (huile de lin ou tout autre produit siccatif) dans des malaxeurs à cuve avec rotor central, puis soufflé, en général, par des machines à souffler pneumatiques, dans les outillages à l'aide d'une buse de tir et d'un plateau de soufflage.

- Avantages et inconvénients

- Le sable préparé est très fluide.
- Le noyau durci à la cuisson a une grande cohésion, mais il faut le renforcer par une armature métallique.
- Le débouillage des noyaux après coulée est très facile.
- Par contre, la précision dimensionnelle est faible, le noyau se déforme au démoulage et à la cuisson.
- On constate aussi un dégagement gazeux important qui oblige à prévoir des tirages d'air pour évacuer les gaz de la masse du noyau.

On peut utiliser dans certains cas les armatures comme conduits d'évacuation des gaz.

✓ *Chauffage et durcissement du sable dans l'empreinte*

L'utilisation de mélanges de sable sec et de résines thermodurcissables permet d'obtenir directement dans des empreintes chauffées à 200-240°C des noyaux ou des carapaces, avec des temps de production de l'ordre de quelques minutes.

On distingue essentiellement deux procédés : le procédé Croning et le procédé boîtes chaudes.

- Procédé Croning

Né en 1942 en Allemagne, il est dû à J. Croning, mais il ne s'est développé industriellement qu'à partir de 1948. Suivant les pays, on l'appelle procédé Croning, moulage en carapace ou shell-molding.

Ce procédé met en oeuvre des mélanges de sable sec dont les grains sont prééchauffés à chaud avec des résines phénoliques (2 à 5 % en masse).

Au contact de l'outillage chauffé entre 200 et 300°C par des brûleurs à gaz ou des résistances électriques, le sable est d'abord aggloméré par fusion de la résine sur une certaine épaisseur dont la polymérisation provoque le durcissement définitif. On obtient ainsi de véritables carapaces (ou croûtes) autour du modèle, carapaces que l'on assemble ensuite par collage et crantage pour former le moule. La précision des moulages est bonne mais il faut tenir compte de la dilatation des outillages portés à 200-300°C dans l'établissement des cotes d'usinage des modèles, ce qui introduit une certaine imprécision.

- Procédés en boîtes chaudes ou en boîtes tièdes

Dans ces procédés, le sable siliceux sec mélangé à un liant thermodurcissable liquide (résines urée-formol, furaniques, phénoliques) dans une proportion d'environ 1 à 2 % en masse, additionné d'environ 0,5 % de catalyseur, est injecté pneumatiquement dans un outillage chauffé à 200°C environ.

Au contact de l'outillage, le sable durcit sur une certaine épaisseur, fonction de la température et du temps de chauffage, et la polymérisation se poursuit après démoulage dans toute l'épaisseur du noyau grâce à la chaleur emmagasinée dans toute la masse du sable.

Ils se distinguent du procédé d'obtention des noyaux creux en boîte chauffée (Croning) par une réduction de près de moitié des temps de prise, ce qui les destine tout particulièrement aux fabrications de grande série.

Le procédé boîte tiède est un dérivé de ce dernier procédé. Il utilise des liants à base d'alcool furfurylique pur qui polymérisent rapidement à température plus basse qu'en boîte chaude (180 à 200°C).

2.1.2.4 Moulage aux sables à durcissement chimique

Dans les procédés modernes à prise chimique, à liants organiques ou minéraux, on a cherché à supprimer l'étuvage des moules ou la cuisson des noyaux qui conduisent à des déformations.

nuisent à la qualité des pièces et nécessitent des matériels importants (étuves pour gros moules, étuves mécanisées de grande production, etc.).

2.1.2.5 Moulage aux sables à durcissement physique

Les techniques de moulage utilisant avec des modèles permanents des sables sans liant sont relativement récentes. Le principal procédé développé industriellement met en œuvre du sable siliceux, durci par dépression et application du vide dans la masse de sable, procédé appelé V-Process (Vacuum-Process).

Citons également un autre procédé consistant à utiliser des sables siliceux mélangés à de la bentonite et de l'eau, dont le durcissement est obtenu par congélation.

2.2 Moulage à modèles perdus

Nous avons regroupé dans ce paragraphe les procédés de moulage qui utilisent des modèles en matière fusible (polystyrène, cire, etc.) restant dans le moule au moment de sa confection et qui sont éliminés par la suite, soit pendant la coulée (cas du polystyrène), soit avant la coulée, par chauffage du moule (cas de la cire ou du mercure congelé).

Le maintien des modèles dans le moule permet de simplifier les opérations de moulage, de supprimer les noyaux et de faire venir plus facilement des formes complexes, en admettant des contre dépouilles, l'opération de démoulage étant supprimée. Ces procédés permettent d'améliorer la précision dimensionnelle des pièces obtenues, de réduire également la masse des pièces et d'accroître la productivité ; ils sont donc un facteur de réduction sensible des prix de revient.

2.3 Moulage en moules métalliques

Dans les procédés de moulage au sable étudiés précédemment, les moules et les noyaux doivent être refaits après chaque coulée, ce qui pose de nombreux problèmes et nécessite des installations importantes pour la production des moules neufs et de nombreuses manutentions. On peut estimer que la production d'une tonne de pièces bonnes en fonte nécessite, en moyenne, la manutention de 20 tonnes, voire 50 et même plus pour des pièces minces.

Cette production de moules entraîne de grosses consommations de sable neuf avec des problèmes d'évacuation et de mise en décharge des sables usés lorsque les procédés de récupération des vieux sables ne permettent pas un recyclage à 100 %.

Aussi s'est-on efforcé, de tout temps, de réaliser des moules ou des éléments de moules capables de supporter plusieurs coulées successives (moules en pierre taillée, en bois, en fonte, etc.).

2.4 Procédés spéciaux

Nous avons classé dans ce paragraphe un certain nombre de procédés de moulage spéciaux faisant appel à des techniques originales qui permettent d'améliorer les performances des pièces moulées ou de fabriquer certaines pièces ou produits particuliers :

- le moulage avec refroidisseurs ;
- le moulage avec inserts ;
- le moulage par centrifugation ;
- le moulage de pièces bimétalliques ;
- le moulage en coulée continue ;
- le moulage à empreintes souples.

2.5 Conclusion

La très grande variété des procédés de moulage et de noyautage mis en oeuvre en fonderie montre bien toute la richesse, toute la diversité des techniques employées, leur haut niveau technologique et l'étendue de leur possibilité.

Dans les dernières décennies, s'appuyant sur l'évolution considérable de toutes les branches des techniques industrielles, la fonderie a fait des progrès très importants.

Grâce aux alliages employés et aux procédés mis en oeuvre, la fonderie a ainsi pu pénétrer tous les secteurs industriels et devenir un fournisseur de base de l'industrie.

Mais il est certain que, devant une telle profusion de procédés, il n'est guère possible de résumer sur un tableau les caractéristiques comparatives de leurs performances. Pour dégager la meilleure solution et choisir le meilleur procédé pour la fabrication de pièces unitaires ou en petites, moyennes ou grandes séries, il est souhaitable que le client et son bureau d'études

se rapprochent, dès le départ de l'étude, du fondeur pour définir la meilleure solution répondant au problème posé.

3 La fusion et la coulée

3.1 La fusion

La production de métal liquide est avec le moulage une des opérations clefs du processus industriel de la fonderie.

En effet, le métal confèrera à la pièce toutes ses propriétés physiques (masse, stabilité dimensionnelle...), mécaniques (résistance, élasticité, usinabilité) et chimiques (corrosion...).

La qualité des pièces produites dépendra en grande partie de la qualité des alliages élaborés, elle-même liée à celle du lit de fusion (terraillles, fonte, métaux, neufs, retours, ferro-alliages, flux, etc.) et aux conditions d'élaboration.

Cela justifie tous les contrôles et toute la rigueur qu'il faut appliquer à cette partie fondamentale de la technique de fonderie. On aura présent à l'esprit que le coût d'un rebut pour une cause métallurgique est grevé également des frais de moulage et de parachèvement.

3.1.1 Alliages métalliques utilisés en fonderie

3.1.1.1 Alliages ferreux

On distingue essentiellement les fontes et les aciers séparés par une frontière fixée conventionnellement à 2,06 % de carbone.

3.1.1.1.1 Les fontes

Les fontes [1] sont les matériaux les plus employés en fonderie (environ 85 % de tonnages produits). Elles peuvent être classées en :

- fontes blanches ;
- fontes grises lamellaires ;
- fontes malléables ;
- fontes à graphite sphéroïdal (GS) ;

— fontes alliées.

Rappelons que les éléments principaux caractérisant la composition chimique d'une fonte sont C, Si, Mn, S et P. En plus de ceux-ci sont introduits volontairement ou non dans le métal des éléments d'alliage (Ni, Cr...), des traces d'éléments chimiquement réactifs ou volatils utilisés pour les traitements du métal liquide (Ca, Mg...) et des impuretés diverses (gaz, Pb...). L'élaboration d'une fonte commence en général par le choix de la composition chimique de base qui, compte tenu des matières premières disponibles ainsi que des pertes ou gains au feu, doit être obtenue à la sortie du ou des fours de fusion et de maintien, avant les traitements complémentaires éventuels sur métal liquide.

Comme les caractéristiques (normalisées ou non) des pièces moulées en fonte dépendent conjointement de la composition chimique globale (éléments principaux, éléments d'alliage et impuretés) et de la microstructure, fonction des vitesses de solidification et de refroidissement locales, c'est au fondeur qu'il appartient en définitive de choisir la composition chimique de base optimale dans le cadre de sa technique propre, même s'il est parfois justifié de lui imposer des teneurs particulières.

Ainsi par exemple, dans les fontes spéciales, les teneurs en éléments d'alliage sont généralement fixées par les normes ; dans les sabots de frein SNCF, la teneur en phosphore est étroitement spécifiée ; il peut en être ainsi dans d'autres cas particuliers plus ou moins exceptionnels.

Rappelons enfin que C, Si et P sont très souvent considérés ensemble dans le titre fictif dit carbone équivalent C_{eq} :

$$C_{eq} = C + \frac{1}{3}(Si + P) \quad (11) \quad C_{eq} = C + \frac{1}{3}Si + \frac{1}{2}P$$

o Fontes blanches

Le carbone des fontes blanches est principalement combiné pour former la cémentite Fe_3C . Elles présentent une très grande dureté, entraînant une très grande résistance à l'abrasion.

o Fontes grises à graphite lamellaire

La basse température de fusion des fontes grises, voisine de l'eutectique Fe/C, leur confère de très bonnes qualités de montage et la forme lamellaire du graphite une très bonne usinabilité. Elles sont utilisables pour toutes les pièces de fonderie moyennement chargées (pompes, corps et vanne, carters-cylindres, etc.).

Composition chimique des fontes grises

- Carbone et silicium

Les deux éléments (carbone et silicium) ont une influence directrice essentielle sur le passage de la forme métastable à la forme stable de la solidification.

Il a déjà été dit qu'il était impossible de caractériser les propriétés mécaniques d'une fonte en se fondant sur la composition chimique. Toutefois il convient de noter les points suivants qui restent valables pour toutes les fontes ordinaires.

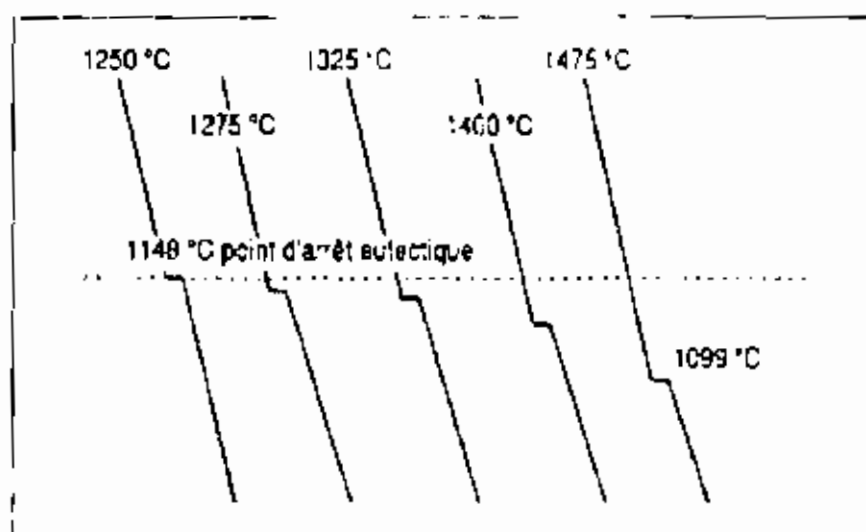


Figure 3.1 : Influence de la surchauffe sur l'importance de la surfusion à la solidification

Influence du mode d'introduction du silicium sur quelques caractéristiques mécaniques d'une fonte comprenant
3,04 à 3,10 % de C_T; 0,88 à 0,90 % de Mn et 2,07 à 2,17 % de Si

Silicium :					
— dans les charges.....%	2,17	1,50	1,00	0,50	
— ajouté à la poche.....%		0,58	1,15	1,57	2,13
Total.....%	2,17	2,08	2,15	2,07	2,13
Dureté Brinell.....	228	223	217	217	217
Résistance à la traction..... (MPa)	256 à 270	294 à 302	332 à 333	337 à 340	276 à 277
Charge de rupture à la flexion (1)..... (N)	10 200 à 10 450	10 900 à 11 350	12 500 à 13 000	12 850 à 13 450	11 000 à 11 250
Fleche (essai de flexion) (1)..... (mm)	4,7 à 4,9	5,6 à 6,0	7,2 à 8,4	8,0 à 8,7	6,9 à 6,1
(1) Essai de flexion effectué sur barreaux de 30 mm de diamètre, 850 mm de distance entre appuis, charge centrale					

Tableau 3.3 : Influence du Si

- Manganèse, Soufre et Phosphore

Le manganèse et le soufre se combinent en partie pour constituer des inclusions de sulfures de manganèse (et de fer) dont l'influence sur les propriétés est négligeable. La teneur en manganèse des fontes ordinaires est généralement inférieure à 1 %. Il est souhaitable que la teneur en soufre ne dépasse pas 0,12 %.

Le phosphore des fontes ordinaires qui en contiennent suffisamment (plus de 0,30 %) joue un rôle important déjà signalé par l'étude du système Fe-C-P.

L'influence du phosphore est complexe, car la répartition de l'eutectique phosphoreux varie considérablement suivant la vitesse de refroidissement. Lorsque celle-ci est grande (épaisseur des pièces voisine de 10 mm dans la coulée en sable), l'eutectique phosphoreux est réparti en un réseau continu délimitant complètement les cellules eutectiques dès que la teneur en phosphore atteint 0,4 %.

L'existence d'un tel réseau contribue à diminuer sensiblement la résistance à la traction.

Au contraire, dans des conditions de refroidissement normales, l'eutectique phosphoreux est réparti uniformément dans toute la pièce et joue un rôle sensible, mais nettement moins défavorable.

Choix de la teneur en silicium (à titre indicatif) d'une fonte grise non alliée, en fonction de l'épaisseur des pièces (moulées au sable) (1)

Résistance à la traction (MPa)	Teneur en carbone (%)	Teneur en phosphore (‰)	Teneur en silicium (%): pour une épaisseur moyenne de :						
			5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	75 mm
150 à 200	3,2 à 3,5	0,8 à 1,2	2,6	2,3 à 2,4	2,1	1,9 à 2,0	1,8 à 1,9	1,7 à 1,8	1,6
200 à 250	3,1 à 3,4	0,6 à 0,8	2,3	2,0 à 2,1	1,8	1,6 à 1,7	1,5 à 1,6	1,4 à 1,5	1,3
250 à 300	3,0 à 3,3	< 0,4	2,1	1,8 à 1,9	1,6	1,4 à 1,5	1,3 à 1,4	1,3	
300 à 400	2,9 à 3,2	< 0,2	1,9 à 2,0	1,7	1,4 à 1,5	1,4	1,3		

(1) Il s'agit de la teneur finale en silicium après éventuelle inoculation recommandée ou obligatoire pour $R_m \geq 250$ MPa.

Tableau 3.5 : Teneur en Si

Tableau 7 – Correspondances approximatives entre les principales caractéristiques mécaniques des fontes grises	
Résistance à la traction	R_m
Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ...	$0,8$ à $0,9 R_m$
Résistance à la flexion	$1,5$ à $2,5 R_m$
Résistance au cisaillement (MPa)	$R_m + 140$ à $100 R_m$
Résistance à la compression	$2,5$ à $4 R_m$
Résistance à la torsion	$0,9$ à $1,5 R_m$
Limite de fatigue (flexion rotative)	$0,3$ à $0,5 R_m$
Résistance aux chocs	augmente avec R_m

Tableau 3.6 : Correspondances des caractéristiques mécaniques

Classification d'après essai sur barreau coulé à part

Nuances	Valeurs garanties		Valeurs à titre indicatif		Résistance à la traction probable sur pièce R_{01} (MPa)
	Résistance minimale à la traction R_m (à obtenir sur éprouvette de 20 mm d'épaisseur dans un barreau brut coulé à part de 30 mm de diamètre)	(MPa)	Épaisseur de la pièce (mm)	pour des pièces et y compris	
FGL 150	150	1	2,5	19	155
	120		10	20	130
			20	30	120
FGL 200	200	1	2,5	19	205
	170		10	20	160
			20	30	165
FGL 250	250	1	5	30	250
	220		10	20	225
			20	30	235
FGL 300	300	1	10	20	270
	270		20	30	245
FGL 350	350	1	10	20	375
	320		20	30	265
FGL 400	400	1	10	20	365
	370		20	30	315

(1) Une fonte à graphite lamellaire de nuance définie ne doit pas avoir une résistance minimale à la traction sur échantillon à la valeur de la garantie supérieure de 100 MPa, sauf accord contraire préalable entre client et fournisseur.

Tableau 3.7 : Classification d'après essai

- Les fontes malléables

Coulées sous forme blanche, elles acquièrent par des recuits appropriés, des caractéristiques de déformation et d'allongement très supérieures à celles des fontes grises lamellaires, ce qui en permet l'emploi pour des pièces soumises à des efforts importants (pièces de sécurité, par exemple). On distingue :

- les malléables à coeur blanc (dites malléables européennes) obtenues par décarburation des pièces, ce qui limite leur épaisseur ;
- les malléables à coeur noir (dites malléables américaines) obtenues par un traitement thermique de précipitation du graphite sous forme de nodules.

- Les fontes à graphite sphéroïdal (GS)

L'obtention de la fonte GS (apparue vers 1948) se fait par un traitement approprié de la fonte liquide avant sa coulée en moule.

La solidification du graphite se produit alors sous forme de sphéroïdes qui suppriment les effets d'entaille du graphite lamellaire, conférant ainsi à la fonte des caractéristiques mécaniques comparables à celles de l'acier. Elles sont utilisées pour des pièces de sécurité ou fortement sollicitées (vilebrequins de moteurs, bras de suspension, tuyaux centrifugés, etc.).

- Fontes alliées

L'addition dans les fontes de divers éléments d'alliages (Sn, Ni, Cu, Cr, ...) permet d'agir sur leurs structures et d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques, chimiques ou leurs aptitudes à répondre aux traitements thermiques. Les additions peuvent se faire en poche ou à partir de lits de fusion appropriés, ce, le plus souvent au four électrique.

3.1.1.1.2 Les aciers

L'acier moulé s'est développé industriellement depuis plus d'une centaine d'années. Bien que concurrencé par l'apparition de la fonte GS, il reste irremplaçable dans de nombreux cas et représente encore environ 5 % du tonnage produit par la fonderie.

L'acier moulé est, pour le fondeur, plus difficile à mettre en œuvre à cause des températures plus élevées d'élaboration et de coulée.

- Les aciers au carbone et au carbone manganèse

Les premiers (C = 0,10 à 0,4 % ; Si < 0,5 %) ont des utilisations très courantes.

Les seconds permettent d'accroître la limite d'élasticité avec une bonne résistance au choc.

- Les aciers faiblement alliés (Mn > 1 % ; Cr < 5 %)

- o Les aciers fortement alliés, avec un élément au moins supérieur à 5 % (aciers au manganèse, aciers au chrome, aciers inoxydables ou réfractaires).

3.1.1.1.3 Alliages à base de nickel et de chrome

Ces alliages sont notamment utilisés pour couler les aubes de moteur d'avion parce qu'ils ont, à température élevée, de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne résistance à l'oxydation.

3.1.1.2 Alliages non ferreux

La fonderie peut produire des pièces en n'importe quel alliage non ferreux, de l'aluminium au zirconium en passant par l'uranium. Les plus importants sont ceux de cuivre, d'aluminium, de magnésium et de zinc.

3.1.1.2.1 Alliages cuivreux

Les alliages cuivreux fondent à des températures modérées (température de fusion du cuivre 1084°C) ce qui facilite leur élaboration. Ils ont un bon coefficient de frottement, une forte résistance à l'usure, une bonne conductivité thermique et électrique, une excellente résistance à diverses corrosions.

On distingue

- les bronzes
- les cupro-aluminiums
- les laitons
- les cupronickels
- les cuivres

3.1.1.2.2 Alliages d'aluminium

Les alliages à base d'aluminium sont faciles à fondre, peu oxydables à l'état solide, mais très oxydables à l'état liquide. On utilise principalement :

- la famille de l'eutectique Al-Si (7 à 13 % de Si environ)
- l'alliage A-U5G1
- la famille des alliages recyclés
- les alliages Al-Mg (3 % ou 6 % de Mg)
- l'alliage A-Z5G1 : alliage de Al-Zn-Mg

3.1.1.2.3 Alliages de magnésium

Les alliages de magnésium sont intéressants par leur légèreté mais difficiles à mettre en oeuvre. Ils sont retenus lorsqu'il est important de réduire la masse ou l'inertie. Les plus employés sont les alliages Mg-Al et les Mg-Zn, éventuellement associés à des terres rares.

3.1.1.2.4 Alliages de zinc

Le ZAMAK est le plus utilisé en fonderie ; il est coulé sous pression. Des alliages voisins sont adaptés aux autres modes de coulée.

3.2 La coulée

Appareils pour fusion de la fonte

Dans cette partie seul le cubilot à vent froid sera étudié.

Cubilot à vent froid

C'est un appareil de fusion très simple, constitué d'une virole cylindrique en tôle d'acier à axe vertical, garnie de réfractaire, comportant à la partie supérieure une ouverture (guculard) permettant de charger successivement le coke et les matières métalliques en couches alternées. À la partie inférieure, se trouvent une rangée de tuyères (en général au nombre de 6)

raccordées à une boîte à vent, pour injecter l'air de combustion soufflé par un ventilateur, et un creuset garni de pisé réfractaire pour recueillir la fonte liquide.

Il comporte un trou de coulée et un orifice de dégrassage, obturés pendant la fusion par des bouchons de terre réfractaire. Le fond du creuset est fermé par deux portes que l'on peut ouvrir pour vider le cubilot après la fin des opérations.

L'ensemble du cubilot est surmonté d'une cheminée munie d'un dépoussiéreur, généralement hydraulique pour filtrer les fumées avant leur évacuation.

Fonctionnement

Le cubilot fonctionne à contre-courant, les charges métalliques s'échauffant au fur et à mesure de leur descente jusqu'à la zone de fusion où elles passent à l'état liquide.

Les gouttelettes de métal liquide ruissellent sur le coke incandescent où elles se surchauffent, se chargent en carbone mais aussi en soufre, avant de venir s'accumuler dans le creuset où le laitier préserve le métal liquide de l'oxydation par l'air soufflé par les tuyères. La coulée se fait par piquées successives, en général toutes les 20 min, le laitier étant évacué par le trou à crasse. Certains cubilots sont étudiés pour pouvoir évacuer automatiquement le laitier et la fonte en coulée continue.

Bilan thermique

Étant donné la marche à contre-courant et, le contact intime entre le métal et le coke incandescent, la transmission d'énergie thermique est relativement bonne dans le cubilot et son rendement thermique assez élevé.

Globalement le bilan se présente de la façon suivante :

- pertes par les fumées 40 à 65 % :
- chaleur sensible 15 à 25 %,
- chaleur latente (CO) 20 à 45 % :
- pertes par le laitier et les parois 10 % :
- enthalpie de la fonte :
- fonte à 10 % de coke 40 à 45 %,
- fonte à 15 % de coke 30 %.

Lits de fusion

Leur composition est essentiellement fonction des fontes que l'on veut obtenir.

Matières métalliques :

Variation des caractéristiques mécaniques avec l'épaisseur des pièces en fontes grises

Composition chimique (%)					Caractéristiques mécaniques	Diamètre des barreaux (mm)					
C ₁	Si	Mn	S	P		50	50	32	22	15	10
3,10	2,79	0,67	0,06	0,78	R _m (MPa)	152	163	236	256	302	376
					E (GPa)	103	114	115	120	123	126
					HB	177	187	212	223	246	266
3,33	2,95	0,76	0,06	0,16	R _m (MPa)	147	195	236	237	296	335
					E (GPa)	75	94	102	107	110	115
					HB	151	159	171	187	218	256
3,55	2,82	0,66	0,06	0,16	R _m (MPa)	133	135	139	163	199	220
					E (GPa)	96	99	92	99	96	103
					HB	149	156	156	156	202	214
3,16	1,75	0,58	0,13	0,20	R _m (MPa)	234	269	280	312		
					E (GPa)	153	184	135	141		
					HB	208	207	212	231		
3,26	1,73	0,59	0,04	0,20	R _m (MPa)	202	284	250	288	304	
					E (GPa)	114	128	132	130	137	
					HB	184	143	204	213	246	
3,53	1,76	0,54	0,04	0,27	R _m (MPa)	133	152	195	245	251	
					E (GPa)	93	107	109	111	119,5	
					HB	153	159	170	187	222	
3,53	1,35	0,56	0,05	0,22	R _m (MPa)	95	153	177	210	236	
					E (GPa)	110	119	119	119	125	
					HB	107	159	189	211	222	
3,04	2,88	0,71	0,05	0,16	R _m (MPa)	92	125	162	198	234	260
					E (GPa)	105	120	118	126	132	199
					HB	193	211	229	241	257	285
3,12	1,84	1,07	0,09	1,01	R _m (MPa)	116	136	251	269		
					E (GPa)	128	133	137	146		
					HB	164	240	262	278		

R_m (MPa) : résistance à la traction
 E (GPa) : module d'élasticité longitudinal mesuré au pendule Le Ballan
 HB : dureté Brinell mesurée au centre de la section

Tableau 3.4 : Variation des caractéristiques mécaniques

Composition chimique courante (cubilot) :

C : 3,2 à 3,5 % ;

Si : à régler suivant l'épaisseur généralement compris entre 1,3 et 3 % ;

Mn : 0,5 % ;

S : 0,08 à 0,12 % ;

P : 0,8 à 1,2 %

— fontes neuves.....	25 à 35 % ;
— jeûs de coulée et retour de fabrication	20 à 30 % ;
— bocages	30 à 40 % ;
— ferraille.....	10 à 15 %.
Coke.....	10 à 14 % (de la charge métallique)
Castine.....	2 à 3 %
Éléments d'addition (ferro-alliages) pour compenser les pertes au feu :	
— faibles pour le fer	0,1 à 0,3 % ;
— plus importantes pour les éléments plus avides	
d'oxygène.....	Si 8 à 12 %
Mn	12 à 16 %.

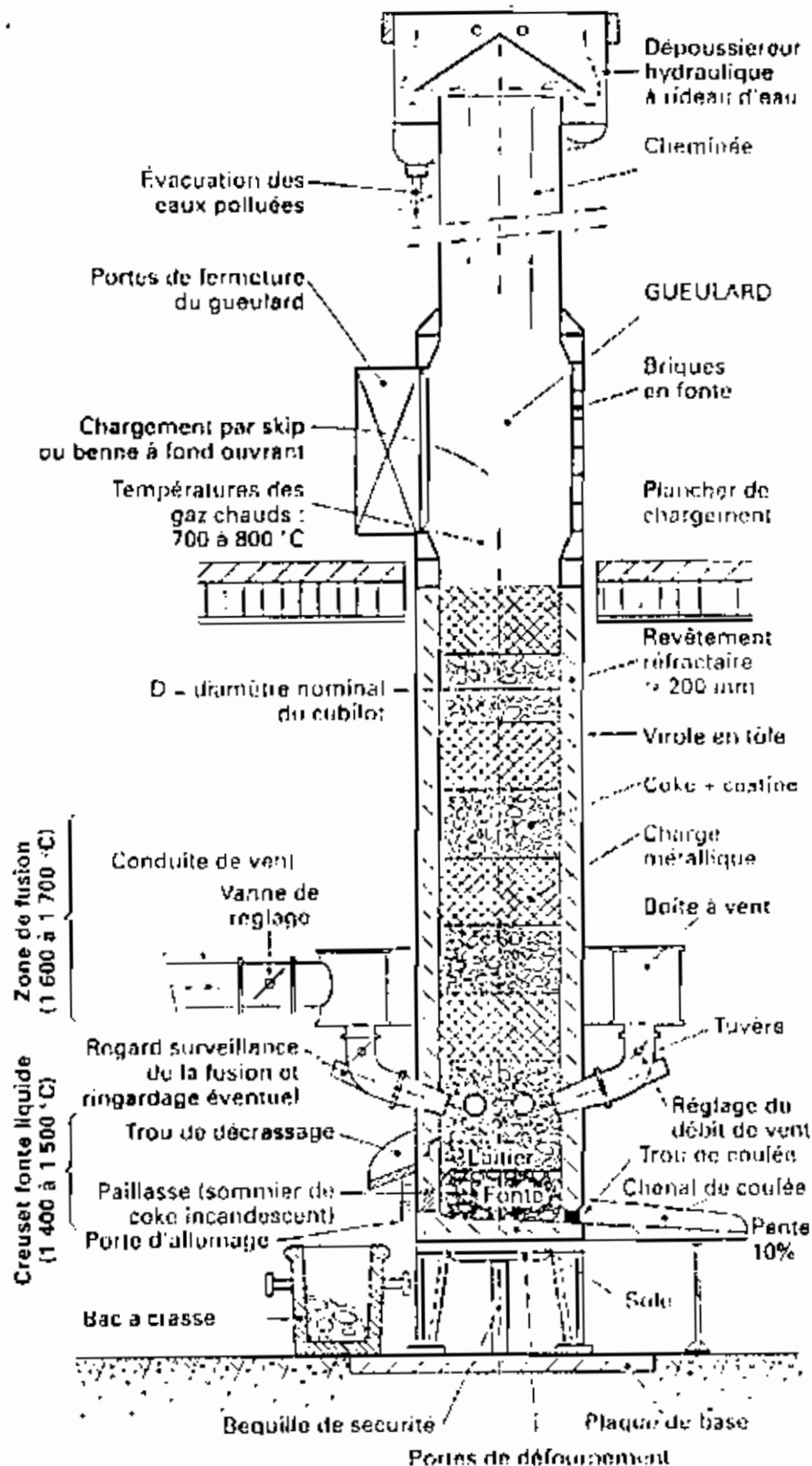


Figure 3.2 : Cubilot à vent froid

Débit d'un cubilot

Formule pratique :

Débit en t/h = $6D^2$ avec D (m) diamètre au nez des tuyères.

Garnissage

Généralement réalisé en pisé silico-alumineux, le garnissage se dégrade assez rapidement, notamment dans la zone de fusion (durée de vie de 8 à 12 ou 15 h), ce qui oblige à faire une réfection journalière après défournement et refroidissement du cubilot.

Avantages et inconvénients du cubilot

Le cubilot est un appareil rustique, de conduite assez facile, ne nécessitant pas d'investissements considérables pour les petites unités et qui convient parfaitement pour de petites productions.

En revanche, la fonte produite contient du soufre apporté par le coke, et son analyse chimique est difficile à maintenir dans des fourchettes de variations très serrées. La recarburation est limitée, ce qui oblige à charger beaucoup de fontes neuves onéreuses. Enfin, la fonte est livrée de façon discontinue ce qui gêne l'alimentation des chaînes de moulage, et peut amener à installer une poche mélangeuse à la sortie du cubilot.

La réfection journalière liée à l'usure du pisé entraîne l'obligation de disposer de 2 appareils. Il faut noter aussi que c'est un outil polluant dont les fumées contiennent beaucoup de poussières. Si jusqu'à maintenant et grâce à des dépoussiérages hydrauliques on a pu respecter les normes antipollution (250 mg/Nm^3 au maximum) il est certain que l'apparition de normes plus sévères obligera à installer des dépoussiérages plus efficaces.

4 Le décochage

Dès que la pièce solidifiée est suffisamment refroidie, le est détruit :

- soit à la main, sur le sol même de la fonderie ou sur une grille fixe, à l'aide de masse ;
- soit automatiquement, sur une grille à secousses ou vibrante.

Cette opération est désignée sous le nom de « décochage ».



5 L'ébarbage

Les pièces débarrassées de leurs accessoires de coulée ou d'alimentation (jets, événements et masselottes) possèdent des excédents de matière, sortes de moignons qui les relient à ces événements, masselottes et coulées. On les fait disparaître à la lime, au burin, à la scie, à la meule à main ou à la meule montée sur un bâti fixe et quelques fois par l'usinage lui-même. Cette opération est désignée sous le nom d' «ébarbage ».

[3] ; [5] ; [8].

CHAPITRE 4: PROPOSITIONS PRELIMINAIRES

INTRODUCTION

Après avoir donné les détails nécessaires pour la compréhension et la connaissance de la fonderie, nous allons maintenant les utiliser pour expliquer les différentes étapes du processus et aussi faire les calculs indispensables pour déterminer les quantités et la qualité des produits intervenant dans le procédé.

II PRESENTATION SOMMAIRE DES SEMELLES DE FREINS ET PROCESSUS ACTUEL.

1 Présentation des semelles de freins

Nous allons d'abord essayer de donner quelques informations concernant notre produit final qui est la semelle de frein (figure 4.1). Cette dernière est en fonte grise phosphoreuse (P10) et requiert des aptitudes spéciales pour assurer un bon freinage des wagons. Ce dernier ne peut se faire sans une bonne adhérence de la semelle sur la roue, c'est-à-dire un bon coefficient de frottement.

Si nous avons :

P = effort radial exercé par le sabot ;

μ_k = coefficient de frottement Roue/Semelle $\rightarrow P \cdot \mu_k$ = effort de freinage ;

Q = charge par essieu ;

μ_s = coefficient d'adhérence Roue/Rail $\rightarrow Q \cdot \mu_s$ = effort adhérent.

Nous aurons ainsi : $P \cdot \mu_k = Q \cdot \mu_s - \varepsilon$

Car il faut que l'effort de freinage soit inférieur à l'effort adhérent pour éviter le glissement ou le blocage des roues lors du freinage. Il est à noter que le freinage est optimal si ε est très petit.

Si nous avons :

V = vitesse du train lors du freinage ;

M = masse du wagon en kg ;

F = effort total du freinage ;

X , distance totale parcourue avant l'immobilisation totale du train sera donnée par :

$$X = 10V + \frac{V^2 \cdot M}{2F \cdot \mu_k} \text{ ; Terrain plat}$$

$$X = 10V + \frac{V^2 \cdot M}{2(F \cdot \mu_k - Mg \sin \alpha)} \text{ ; Sur une pente } \alpha$$

Dans toutes les formules précédentes nous voyons que μ_k apparaît, et sachant que μ_k dépend essentiellement du matériau, ceci nous montre l'importance de bien maîtriser les éléments qui entrent dans la composition des semelles de frein.



(1) : Porte semelle ;

(2) : Semelle ;

(3) : Clavette.

Photo 4.1 : ensemble de freinage

[7] ; [9].

2 Fonctionnement actuel de la fonderie

Maintenant nous allons essayer d'expliquer brièvement comment se passe la procédure d'obtention des semelles de frein. Nous pouvons dire qu'actuellement la fonderie fonctionne sans une véritable politique d'ordonnancement des travaux, sinon que les fondeurs se fient à leur expérience et à leur intuition de fondeurs pour mener leurs travaux.

Commençons par dire qu'il y a environ trois coulées par mois ce qui veut dire qu'une coulée leur prend 10 jours, donc après la coulée il y a un (1) jour de repos, deux (2) jours pour le démoulage, deux (2) jours pour le recyclage, quatre (4) jours pour le moulage et un (1) jour pour la remontée de la fonte sur la plateforme de chargement.

Pour le démoulage, les châssis sont lancés à même le sol pour récupérer les pièces et en même temps mettre le sable récupéré d'un côté. Un palan est utilisé pour acheminer les châssis vers l'endroit du démoulage. C'est aussi durant le démoulage que les excédents de matière sont enlevés.

Le recyclage se fait après le démoulage et après que tout le sable soit récupéré. Ce dernier est humidifié grâce à un apport d'eau et de pelles pour bien le rendre homogène. C'est aussi durant cette opération qu'un ajout de sable et des autres liants est effectué, car il y a toujours des pertes durant le démoulage.

Vient maintenant le moulage qui est l'opération la plus éprouvante et la plus longue, elle demande beaucoup d'efforts et de concentration, et étant donné qu'aucune presse ne fonctionne l'opération est des plus éreintantes.

La remontée de la fonte et des autres éléments entrant dans le cubilot est l'ultime opération avant la coulée, elle se fait aussi grâce à un palan et nécessite aussi des efforts physiques.

Vient enfin la coulée qui ferme le cycle. Par coulée nous sous-entendons ici la fusion et la coulée dans les moules, c'est l'opération la plus délicate et la plus potentiellement dangereuse. Elle comprend le décrassage du cubilot, sa mise à feu, le chargement, la combustion et la coulée.

II. MATIERES ET MATERIAUX

1. Sable de moulage

Ce nom est donné aux sables préparés pour la confection des moules. Un sable de moulage doit remplir les conditions suivantes :

- Réfractaire, pour résister aux hautes températures de la fusion de la fonte. Pour cela il doit avoir une teneur en silice (SiO_2) la plus élevée possible.
- Plastique, pour épouser et garder facilement les formes de l'empreinte des moules ; la plasticité ou cohésion croît avec la teneur en argile qui varie de 15 à 25 % dans les sables dits argileux. Les qualités de sables les plus pauvres en argile, contenant moins de 15 % ont assez de cohésion tant qu'elles sont humides et contiennent 6 à 10 % d'eau. Au séchage, elles perdent leur cohésion de sorte que le moule s'émiette et ne présente plus la résistance voulue à la fonte liquide ; pour cette raison on utilise un sable de moins de 15 % d'argile pour le moulage à vert.
- Résistant, pour supporter, sans se déformer, la poussée du métal au moment de la coulée ; la résistance est obtenue lorsqu'il ne contient pas un excès d'argile, lorsque le mélange est très homogène, que les grains sont d'une grosseur uniforme et la surface des grains est plutôt rugueuse afin d'empêcher leur glissement.
- Perméable ou poreux, pour laisser échapper facilement les gaz des moules.
- Assez fin, pour donner un bel aspect aux pièces coulées. La perméabilité est une qualité prépondérante pour le sable vert, car le séchage avantagera, à cet égard, le moule étuvé.

A côté du sable principal de moulage nous avons :

✓ *Les sables à noyaux*



Les noyaux doivent remplir des qualités spéciales au triple point de vue de leur porosité, de la facilité du retrait de la fonte et de l'opération ultérieure du dessablage.

Si les noyaux sont petits et destinés à des moules à couler en sable vert, ils pourront être fabriqués avec du sable vert de moulage ; si ces noyaux sont destinés à être étuvés ils seront préparés au sable d'étuve très poreux.

Il faudra aussi s'assurer de la quantité des différents constituants nous avons :

- *Silice* 75 à 85 % ;
- *Alumine* 7 à 10 % ;
- *Chaux et magnésie réunies* 6 % au maximum ;
- Les *alcools* (substances basiques) moins de 0.75 % ;
- L'*oxyde de fer* 6 % au maximum ;
- Le total des quatre (4) derniers éléments cités ne doit pas dépasser 5 à 6 % ;
- L'eau variera de 5 à 8 %.

[8] : [1].

2 Fonte et autres métaux

Nous allons essayer de faire des calculs avec des valeurs choisies en compagnie des fondeurs. Avant les calculs nous allons essayer d'introduire quelques notions qui pourraient nous aider dans les calculs.

✓ *La mise au mille*

Le poids des pièces à couler, quand il est porté sur les plans ou sur la commande, est celui de la pièce usinée ; le poids de la pièce brute est supérieur si elle doit être ultérieurement usinée. Au poids de la pièce brute il faut ajouter celui des descentes de coulées, des chenaux de coulée et celui des masselottes qui dépend des formes de la pièce et du métal dont elle est composée.

Ces considérations font que pour obtenir 1000 kg de pièces décochées il faut :

- 1200/1300 kg de fonte ordinaire liquide ;
- 1500/1800 kg de fonte spéciale ou alliée, liquide ;
- 1600/2000 kg de fonte malléable liquide ;
- 1800/2200 kg d'Al, de bronze, ou d'acier ordinaire, liquide ;

- 2000/3000 kg d'acier fortement allié liquide.

Cette quantité de métal liquide nécessaire pour produire 1000 kg de pièces est la *mise au mille*.

✓ *Les pertes au feu*

A la mise au mille le fondeur doit ajouter la perte au feu, c'est-à-dire le poids des éléments de l'alliage qui se combinent à l'oxygène de l'air et aux parois des creusets pour former des produits insolubles dans le métal. Ces produits sont éliminés sous forme de crasses ou partent en fumées dans l'atmosphère.

La perte au feu s'exprime en kg pour 100 kg chargés (%).

Elle varie surtout en fonction du procédé de fusion : elle est d'autant plus élevée que la surface du bain de métal est grande, que les réfractaires qui composent le creuset du four sont mal choisis, ou que l'atmosphère du four à laquelle est exposé le métal est plus oxydante.

Nous avons pour le cubilot :

Carbone.....	10 %	(gain)
Silicium.....	15/20 %	(perte)
Manganèse.....	20/25 %	(perte)
Fer.....	1/3 %	(perte)

Nous admettons que la teneur de phosphore ne change pas et la teneur de soufre augmente mais très sensiblement.

Nous voulons élaborer une fonte contenant :

3.25 % de carbone C :

1.8 % de silicium Si :

1 % de phosphore P :

0.6 % de manganèse Mn :

0.1 % de soufre S.

- La mise au mille est 1300.
- Les pertes au feu sont 20 % du Si et 25 % du Mn, tandis que nous avons un gain de 10 % du C.

Sur le parc fonderie nous avons :

- Les jets des coulées précédentes de même analyse (bocages intérieurs).
- Un lot de fontes hématites dont la composition est environ :
 - 3.85 % de C ;
 - 2.5 % de Si ;
 - 0.65 % de Mn ;
 - 0.1 % de P.
- Des bocages extérieurs type VF 1 dont la composition est environ :
 - 3.15 % de C ;
 - 1.7 % de Si ;
 - 0.7 % de Mn ;
 - 0.11 % de S ;
 - 0.4 % de P.
- Riblons d'acier dont la composition est d'environ :
 - 1.7 % de C ;
 - 0.3 % de Si ;
 - 0.4 % de Mn ;
 - 0.05 % de P.

En raison des gains et des pertes au feu, la composition moyenne de la charge doit être :

$$C : 3.25 - 10 \% = 2.925 \%$$

$$Si : 1.8 + 20 \% = 2.16 \%$$

$$Mn : 0.6 + 25 \% = 0.75 \%$$

D'après la norme française il faut une charge de 800 kg pour un cubilot de 1 m de diamètre et étant donné que nous avons un cubilot d'environ 0.57 m de diamètre, nous pouvons donc dire que nous devons avoir une charge de 456 kg et nous pouvons arrondir à 460 kg.

La norme dit aussi que nous devons, en raison de la mise au mille et des pertes au feu, escompter le retour de 20 % environ de la charge soit 92 kg (bocages intérieurs).

La charge de 460 kg doit contenir :

$$2.925 \% \text{ de C} \quad \text{soit} \quad 13.455 \text{ kg}$$

$$2.16 \% \text{ de Si} \quad \text{soit} \quad 9.936 \text{ kg}$$

$$0.75 \% \text{ de Mn} \quad \text{soit} \quad 3.45 \text{ kg}$$

Les 92 kg de bocages intérieurs en apportent respectivement :

2.99 kg 1.656 kg 0.552 kg

Il reste, pour compléter la charge, à apporter :

13.455 - 2.99 = 10.465 kg de C
 9.936 - 1.656 = 8.28 kg de Si
 3.45 - 0.552 = 2.898 kg de Mn

Le tableau suivant présente les éléments de la charge et la quantité de C, Si et de Mn qu'ils apportent.

	Carbone		Silicium		Manganèse	
Analyse projetée						
%		3,25		1,8		0,6
Perte						
%		-10		20		25
Analyse des charges						
%		2,925		2,16		0,75
Poids des charges						
kg	460					
Élément contenu						
kg		13,455		9,936		3,45
Jets						
kg	92					
Élément contenu						
kg		3,25		1,8		0,6
Élément contenu poids						
		2,99		1,656		0,552

kg					
Reste à charger					
kg		10,465		8,28	2,898
Bocages extérieurs					
kg	210	4,63		4,6	1,0764
Acier					
kg	105	3,79		3,128	0,7592
fontes hématites					
kg	53	2,045		0,552	1,0624
Total des éléments contenus dans les jets, fontes et autres		10,465		8,28	2,898
kg		2,99		1,656	0,552
kg		13,455		9,936	3,45

Tableau 4.1: Composition d'une charge de fonte pour cubilot
 [5] : [4].

3 Le coke

Il faut employer exclusivement du coke de bonne qualité. Un bon coke de fonderie doit avoir une faible teneur en cendres et ne contenir que très peu de soufre (- de 1%). Il doit être gris mat, dur et d'un calibre suffisant. *Exiger toujours du coke de fonderie.* Il doit avoir une dureté et une densité suffisante pour lui permettre de supporter, sans s'écraser, la charge de la fonte pendant la fusion. Certains coques trop friables sont impropres à cet usage.

Le pouvoir calorifique du coke est d'environ 7200 kcal/kg et sa composition chimique est de :

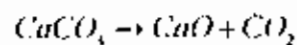
- 85 à 90 % de C ;
- 10 à 15 % de cendres ;
- 1 % de S.

[1]

4 Fondant

La castine est une pierre contenant de la chaux en forte proportion. Selon les régions la castine varie de composition (pierre à chaux, macadam, etc.). Elle doit être cassée en petits morceaux 40 mm environ de diamètre moyen. Elle doit être pure pour assurer l'économie de la fusion et pour obtenir le meilleur effet utile. Elle doit contenir le minimum de silice et d'alumine et seulement des traces de phosphore. Les meilleures castines pour cubilot contiennent 52 à 53 % de chaux et 3 à 4 % de silice et alumine totalisées. Son principal rôle est de rendre les cendres du coke plus fusibles sous forme de laitier. A la place de la castine le *spath-fluor* ou *fluorine* est aussi utilisé.

Les cendres du coke sont en général de la silice SiO_2 difficile à fondre ($\theta_f = 1700^\circ C$). Pour les transformer en une scorie (résidu) fusible vers $1400^\circ C$ on ajoute la castine $CaCO_3$ qui se décompose dans le cubilot vers $900^\circ C$ selon la réaction :



[9]

5 Quelques notions

5.1 Carbone équivalent C_e

C'est la teneur en carbone que devrait avoir une fonte théorique pour que cette dernière, ayant les mêmes conditions de refroidissement qu'une fonte normale, présente à froid les mêmes structures que celle-ci. Elle est exprimée par :

$$C_e = C_r + 0.312 Si \% + 0.33 P \% - 0.06 Mn \%$$

Si %, P % et Mn % étant les teneurs respectives en Silicium, phosphore et manganèse.

Dans la pratique, on néglige la correction due au Mn et la formule simplifiée devient :

$$C_e = C_r + \frac{1}{3}(Si\% + P\%)$$

Une fonte normale est dite :

- Hypo-eutectique si son $C_e < 4.3$
- Eutectique si son $C_e = 4.3$
- Hyper-eutectique si son $C_e > 4.3$

5.2 Carbone eutectique C_e

C'est la teneur en carbone pour laquelle, compte tenu des quantités de silicium et de phosphore, qu'elle contient, une fonte normale est eutectique. Il est donné par :

$$C_e = 4.3 - \frac{1}{3}(Si\% + P\%)$$

5.3 Carbone graphite (ou carbone libre) C_g

C'est le pourcentage de C qui, dans une fonte, se présente sous forme de graphite.

5.4 Carbone total C_t

C'est le pourcentage de C que, dans une fonte, révèle l'analyse chimique. Il est donné par :

$$C_t = C_e + C_g$$

[9]

III. PROCÉDES

Précisons d'abord que l'étude des procédés sera faite seulement avec le matériel dont dispose actuellement la fonderie, seule une augmentation du personnel sera considérée.

Nous essayerons de dire exactement comment les différentes étapes du processus devront se passer pour assurer une bonne productivité.

1 Le modelage

En ce qui concerne le modelage, il n'y a pas beaucoup de conseils à donner car l'atelier dispose déjà de modèles tous faits et prêts à l'emploi. Sinon dire que le type utilisé est le modèle métallique car c'est celui qui convient le plus au travail en série.

2 Le moulage

Conformément au tableau 3.1 du précédent chapitre, nous pouvons dire que nous procédons à un moulage à main à modèles permanents, avec sables restant plastiques (sable à vert), utilisant des liants minéraux.

2.1 Matériaux utilisés

Rappelons d'abord que le sable utilisé est le sable silico-argileux synthétique, utilisé à l'état brut et essentiellement composé de grains de silice SiO_2 .

Venons maintenant au liant utilisé qui est la bentonite et d'après le tableau 3.2 du chapitre 3 nous avons 7 à 10% en masse du sable. Donc nous aurons la masse M annuelle de bentonite qui sera égale à :

$$M = 0.1 \times \rho_{\text{sable}} \times V_{\text{sable}}$$

Nous $V_{\text{sable}} = \text{volume de sable} = 32 \text{ m}^3$ (voir tableau 4.2).

$$\rho_{\text{sable}} \approx 2.5 \text{ t/m}^3 \text{ soit } 2500 \text{ kg/m}^3$$

Ainsi nous avons :

$$M = 0.1 \times 2500 \times 32 = 8750 \text{ kg} = 8.75 \text{ t}$$

Nous constatons que cette quantité est beaucoup supérieure à celle prédite par les fondeurs qui est de 3.5 t.

Notons que le sable synthétique est un mélange de sable siliceux de granulométrie appropriée, de bentonite (variété d'argile particulièrement active), du noir minéral (et divers autres produits suivant les besoins, le tout additionné d'un certain pourcentage d'eau (4 à 10% de la masse de sable).

En principe la préparation du sable doit obéir à certaines normes qui vont de paire avec l'utilisation de machine. En effet les sableries, qui sont les installations où sont effectués la préparation, le décochage et la régénération des sables récupérés, doivent être équipées de machines telles que les broyeurs, les refroidisseurs, les aérateurs...

2.2 Description du processus

Nous allons maintenant essayer de décrire étape par étape le moulage en tant que tel :

- Tout d'abord nous procéderons au moulage de la demi-partie inférieure, rappelons que nous disposons déjà de modèles et que sur chaque châssis nous aurons deux empreintes de semelles ;
- Ensuite c'est le talcage du plan de joint pour éviter le collage, ici c'est le sable de mer qui est utilisé à la place du talc ;
- Passons à l'indexage du châssis supérieur sur le châssis inférieur ;
- Moulage de la demi-partie supérieure ;
- Maintenant c'est la finition du moule avec les étapes suivantes : descentes de coulée, événements, tirages d'air, etc.... ;
- Remmoulage des noyaux dans la partie inférieure;
- Après nous fermons le moule par les systèmes d'indexage ou de goujonnage ;

Après ceci c'est la pose de masses de charge (poids de charge) sur la partie supérieure ou crampage, ce qui ne se fait pas actuellement à la fonderie. Ceci est la dernière étape avant la coulée. Durant le processus décrit en haut le moyen utilisé n'est pas précisé, et bien que ceci soit un procédé de moulage en main nous avons besoin de machines pour pouvoir gagner en temps et ces dernières diminuent surtout les efforts physiques.

En effet pour assurer une bonne productivité et atteindre les objectifs fixés, l'aide de machines peut être déterminante, car pour le serrage du sable ce serait mieux d'utiliser des secoueurs à moules ou des machines à projection de sable. Les démouleuses à retournement sont aussi utilisées pour faciliter le démoulage des modèles en remplaçant la classique opération qui consiste à utiliser ses mains.

Cependant il faut avouer que les machines ne sont pas parfaites et sont souvent moins fiables que l'homme. Ce qui fait que la précision est plus assurée par l'homme.

En plus des machines, un certain nombre d'outils est requis pour assurer le bon déroulement du procédé. Parmi lesquels, peut être, les plus importants qui sont les châssis. En effet sans un nombre suffisant et en bon état de châssis, l'objectif ne pourra pas être atteint.

L'objectif étant de deux mille (2000) semelles par mois et sachant que présentement nous produisons environ mille cinquante (1050) semelles par mois à raison de trois (3) coulées par mois avec environ trois cent cinquante (350) châssis à notre disposition. Nous pouvons ainsi faire le calcul suivant :

Nombre de semelles à ajouter : $2000 \text{ semelles} - 1050 \text{ semelles} = 950 \text{ semelles (1)}$;

Au lieu de trois (3) coulées par mois, nous en ferons quatre (4) de 500 semelles chacune et sachant que deux (2) châssis (supérieur et inférieur) donnent deux (2) semelles, nous avons :

Nombre de châssis correspondant = 500;

Nombre de châssis à augmenter : $500 \text{ châssis} - 350 \text{ châssis} = 150 \text{ châssis}$

Étant donné que des châssis peuvent à tout instant se casser et que beaucoup de châssis sont en ce moment défectueux, nous proposons une augmentation de 200 châssis.

Après les châssis, nous pouvons citer d'autres outils tels que ceux de serrage de sable, les pilettes, les fouloirs manuels ou pneumatiques et les outillages individuels des mouleurs (spatules...).

Nous allons terminer par dire que beaucoup d'étapes citées précédemment sont respectées par l'atelier de la fonderie, mais nous pouvons dire qu'il y a des changements et des efforts à faire surtout sur le plan de l'équipement. En effet, l'atelier devra être équipé de machines et d'outillage pour pouvoir mener à bien le procédé.



La Fonderie de senelles à la Régie des Chemins de fer du Sénégal.

Photo 4.2 : Des rangées de châssis après le moulage

3 La coulée

3.1 Allumage

Procéder à celui-ci *au moins 4 heures* avant l'heure prévue pour la coulée. Ceci est l'une des conditions essentielles de la bonne marche de l'appareil.

Lorsque l'allumage se fait avec du bois, comme dans notre cas, nous devons disposer sur la sole des copeaux, en les enfournant par l'ouverture ménagée. Puis du bois; allumer, en laissant ouvertes les tuyères. Quand le petit bois est pris en mettre du plus gros que l'on lance par le gueulard, puis des petites bûches de 30 cm de longueur environ. Attendre que le tout soit bien pris, puis charger un peu de coke de gaz (10 à 20 kg environ) lequel facilite la prise. Enfin du coke de fonderie.

Il est important de ne jeter le coke que sur un lit suffisant de bois, pour ne pas abîmer la sole.

Alimenter de temps à autre, par petites quantités, de façon à obtenir une totale prise de tout le coke. Quand il y a environ les trois quarts du volume du creuset rempli de coke bien allumé, on peut charger par quantités plus importantes (20 à 30 cm d'épaisseur par charge).

Maintenant avant de décrire les différentes étapes de la coulée, nous allons essayer de calculer les différentes quantités des produits intervenant dans le processus.

Commençons d'abord par donner les résultats de l'enquête menée auprès des fondeurs, ensuite nous comparerons ces résultats par ceux donnés par nos calculs. Il est à remarquer que les fondeurs se basent seulement sur leur expérience engrangée après des dizaines d'années d'expérience.

Les tableaux suivants donnent les résultats des enquêtes :

DESIGNATION	BESOIN ANNUEL	BESOIN MENSUEL
Fonte de récupération		20 TONNES
Coke de fonderie		6 TONNES
Plombagine	1.5 TONNES	
Bentonite	3 TONNES	
Sable de mer	32 m ³	
Argile	20 m ³	
Gomme arabique		10 KG
Silicium		1500 KG
Bois de chauffe		300 KG
calcaire (castine craie)		100 KG

Tableau 4.2 : Besoins pour 600 semelles/mois

DESIGNATION	BESOIN ANNUEL	BESOIN MENSUEL
Fonte de récupération		30 tonnes
Coke de fonderie		6,5 tonnes
Plombagine ⁽¹⁾	2 tonnes	
Bentonite	3,5 tonnes	
Sable de mer	32 m ³	
Argile ⁽¹⁾	20 m ³	
Gomme arabique ⁽¹⁾		10kg
Silicium		2 tonnes
Bois de chauffe		300 kg
Huile de lin ⁽¹⁾		20 litres
calcaire (castine, craie)		200 kg

Tableau 4.3 : Besoins pour 2000 semelles/mois

(Avec des stagiaires et 1 coulée par semaine i.e. 500 semelles/semaine)

- (1) : la plombagine rend le sable lisse et compact
- (2) : l'argile est utilisé pour le noyautage
- (3) : la gomme arabique surtout utilisée pour le noyautage
- (4) : l'huile de lin est aussi utilisée pour le noyautage, facilite le débouillage en donnant une très grande résistance au sable à 200 °C.

Le tableau 4.1 nous donne les quantités nécessaires pour les 600 semelles suite à une enquête menée il y a quelques mois. Rappelons que ces résultats ne sont pas obtenus sur la base d'un calcul.

Le tableau 4.2 lui est le résultat de l'enquête menée récemment auprès des fondeurs.

Passons maintenant à la détermination des quantités.

3.2 Fonte et autres métaux

Notons d'abord que différents types de matériaux interviennent dans le procédé et que nous allons essayer de donner avec exactitude les compositions et les proportions de chacun d'eux.

Dans les variantes de fonte, nous avons :

- *les bocages extérieurs* : vieilles fontes tels que les carters, blocs cylindre, organes mécaniques.... ;
- *Les bocages intérieurs* : vieilles fontes tels que les retours, appendices (jets, évents....) ; ils sont de même composition que notre produit.
- *Des lots de fonte brute en gueuse*

Les proportions de tous ces types de fonte doivent être calculées avec un minimum de précaution et doivent aussi être pesées pour assurer un produit de qualité, d'où la nécessité de se munir d'un pont bascule pour le pesage.

Il est à noter que les quantités et les types de fonte disponibles varient et ne peuvent donc pas être calculés avec une extrême précision.

Compte tenu des disponibilités au niveau de la réserve de matière, nous décidons de charger 85 % de bocages extérieurs, 12 % de bocages intérieurs au lieu de 20 % imposé par la norme, 2 % de riblons d'acier et 1 % de fontes hématites. *Notons que ces pourcentages ne sont pas figés dans le temps et que les calculs qui seront faits le seront à titre exemplaire.*

Connaissant la composition d'une charge nous pouvons calculer et donner la quantité totale de fonte à disposer pour assurer la production.

La norme française nous dit qu'il faut environ 1350 à 1650 kg de fonte froide par tonne de pièces finies.

Nous allons nous baser sur ces résultats pour donner la quantité de fonte à disposer.

Sachant que nous ferons quatre (4) coulées par mois à raison de cinq cents (500) semelles par coulée. Chaque semelle pèse environ onze (11) kg. ce qui implique qu'il nous faudra :

$$11 \times 500 = 5500 \text{ kg de pièces finies}$$

L'équivalence en fonte froide sera :

Au minimum :

$$\frac{5500 \times 1350}{1000} = 7425 \text{ kg par coulée i.e. } 29700 \text{ kg par mois}$$

En moyenne :

$$\frac{5500 \times 1500}{1000} = 8250 \text{ kg par coulée i.e. } 33000 \text{ kg par mois}$$

Au maximum :

$$\frac{5500 \times 1650}{1000} = 9075 \text{ kg par coulée i.e. } 36300 \text{ kg par mois}$$

Ces valeurs viennent confirmer les valeurs avancées par les fondeurs qui sont de 30000 kg.

Avec un chargement de 460 kg et une quantité de 8250 kg nous pouvons donner le nombre de chargement par coulée qui sera de :

$$\frac{8250}{460} = 17.93 \approx 18 \text{ chargements.}$$

Venons en à la production horaire qui est donnée par la relation :

$$P_h = 6000 D^2$$

P_h en kg

D en m

Donc avec un diamètre de 0.57 m nous aurons :

$$P_h = 6000 \times 0.57^2 = 1949.4 \text{ kg}$$

La mise au mille qui est aussi égale à la consommation de fonte froide par tonne de fonte chaude est estimée à 1300 kg, nous avons donc la quantité de fonte chaude pour 500 semelles qui est donnée par :

$$\frac{5500 \times 1500}{1300} \approx 6346 \text{ kg}$$

Avec la connaissance de P_h nous pouvons donner à peu près le temps nécessaire pour achever la coulée qui sera de :

$$t = 6346 \div 1949,4 = 3\text{h}15\text{mn}$$

Nous aurons donc, dans les conditions optimales, une charge toutes les dix (10) à onze (11) minutes.

3.3 Le coke

Dans les normes le chargement du coke s'effectue au volume, sans pesée. Nous constatons, en effet, que la régularité de fusion au cubilot dépend de l'invariabilité de hauteur de la zone de fusion. Il en résulte que le volume de la charge de coke dépend du diamètre du cubilot. Si on tient compte de la densité du coke qui est de 450 kg/m^3 , du diamètre du cubilot qui est de 0.57 m et sachant aussi que la hauteur du lit de coke est inférieure ou égale à 0.2 m , nous pourrions ainsi calculer la masse de coke correspondant :

$$m = 450 \frac{\pi D^2}{4} \times 0.2 = 70D^2$$

soit

$$m = 70 \times 0.57^2 = 22.743 \text{ kg}$$

m étant la masse de coke sec par charge, la formule nous montre que la masse de coke à enfourner, par charge, ne doit jamais varier, pour un cubilot donné.

Connaissant le poids dans une charge nous pouvons connaître le poids mensuel :

Soit M la masse mensuelle de coke :

$$M = 22.743 \times 18 \times 4 = 1637.5 \text{ kg}$$

Nous constatons que cette quantité est beaucoup inférieure à celle prédite par les fondeurs qui est de 6.5 t .

3.4 Fondant

La quantité de castine à mettre dans une charge doit être comprise entre 25 et 30 % du poids d'une charge de coke. Elle est chargée dans le cubilot juste après le coke et dès la première charge de cette dernière.

La masse de la charge de coke étant de 22.743 kg nous avons donc :

$$\text{La masse de castine} = 0.3 \times 22.743 = 6.8229 \approx 7 \text{ kg}$$

Connaissant le poids dans une charge nous pouvons connaître le poids mensuel :

Soit M la masse mensuelle de castine :

$$M = 7 \times 18 \times 4 = 504 \text{ kg}$$

Nous constatons que cette quantité est plus du double de celle prédite par les fondeurs qui est de 200 kg.

Si le laitier est trop épais il faut le fluidifier en ajoutant du spath-fluor à la castine car cette dernière à elle seule ne suffira pas.

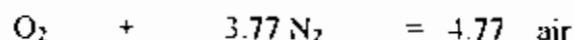
3.5 Pesée

La pesée est l'une des opérations les plus importantes dans le processus mais malheureusement elle n'est pas respectée. Ceci est surtout dû au manque de balances dignes de ce nom dans l'atelier. Notons que sans pesée les proportions exactes ne peuvent pas être respectées avec exactitude ce qui peut conduire à un produit d'une qualité médiocre. C'est pourquoi nous préconisons l'acquisition de ponts-bascules pour assurer un produit optimal.

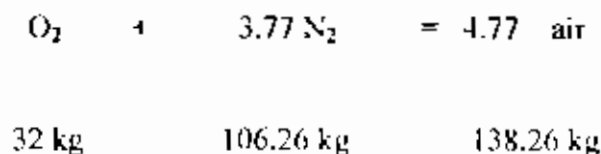
3.6 Air comburant

Nous savons que tout combustible a besoin d'oxygène pour brûler. Dans le cubilot, l'air fourni par le ventilateur est parvenu au coke par les tuyères ; mais le pouvoir carburigène (quantité d'air nécessaire à la combustion complète de l'unité de masse de ce combustible) du coke est fonction de sa composition.

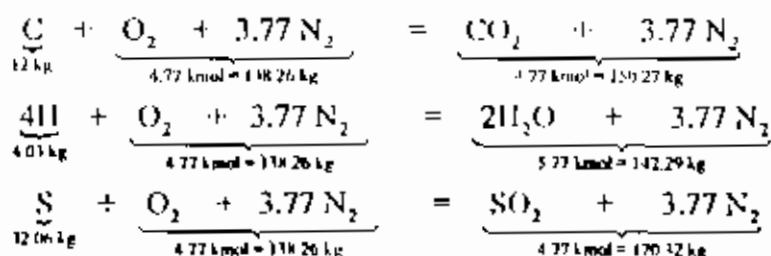
L'air sec composé principalement de O_2 et de N_2 a pour formule chimique :



C'est-à-dire 21 % de O_2 et 79 % de N_2 . L'oxygène a une masse moléculaire de 32 kg/kmol et l'azote N_2 28.16 kg/kmol ; et la formule devient :



La combustion complète sans excès d'air des constituants élémentaires (C, H_2 , et S) d'un combustible est régie par les équations suivantes :



Dans les conditions normales de températures et de pression, une mole de gaz occupe 22.4 litres soit 0.0224 m^3 ou $22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$. Prenons 1 kg d'un coke composé de 88 % de C, 0.25 % de H_2 , 1 % de S et 10.75 % de cendres. Nous avons alors pour :

- $$C \rightarrow \frac{0.88 \times 1 \text{ kg}}{12 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmol} = 0.3498 \text{ kmol d'air}$$

Occupant un volume de $22.4 \text{ m}^3/\text{kmol} \times 0.3498 \text{ kmol} = 7.836 \text{ m}^3$

-

$$H_2 \rightarrow \frac{0.25}{100} \times \frac{1 \text{ kg}}{4.03 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmol} = 6.2 \times 10^{-4} \text{ kmol}$$

Occupant un volume de 0.0139 m^3

[

$$S \rightarrow \frac{1}{100} \times \frac{1 \text{ kg}}{32.06 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmol} = 1.49 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

Occupant un volume de 0.0333 m^3

Pour 1 kg de coke, nous avons :

$$V = 7.836 + 0.0139 + 0.0333 = 7.8832 \text{ m}^3$$

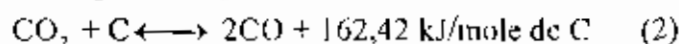
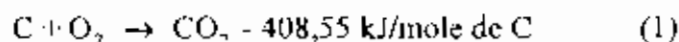
Et nous dirons que le pouvoir carburigène de ce coke est de $8 \text{ m}^3/\text{kg}$. Il serait bon de connaître la qualité du coke employé pour pouvoir régler le débit d'air ou débit optimal, car :

- Un débit trop faible entraîne un abaissement de la température d'où l'obtention d'une fonte froide ;
- Un débit trop élevé augmente la zone de surchauffe, ce qui entraîne l'oxydation de la fonte, donc l'augmentation des pertes au feu.

3.7 Bilan thermique

3.7.1 Réactions

L'énergie thermique est libérée au cubilot par la combustion du carbone et du coke, nécessairement incomplète du fait de la présence simultanée de carbone, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone. En effet l'oxydation exothermique du carbone en CO_2 est suivie d'une réduction partielle du CO_2 en CO par le carbone présent, dont l'importance dépend du niveau des températures, selon les réactions classiques :



L'état d'équilibre entre ces trois éléments (équilibre de Boudouard) est fonction de la température selon la courbe de la figure 4.3

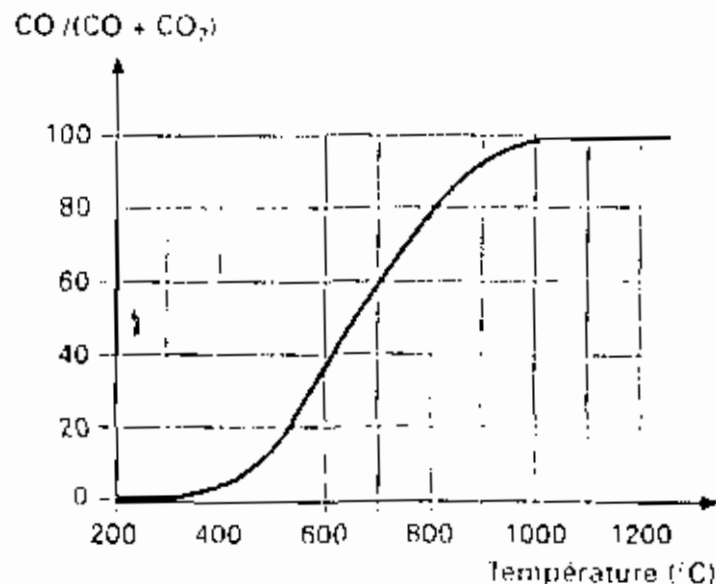


Figure 4.1 : Équilibre de Boudouard

Nota : selon les conventions habituelles en thermochimie, l'enthalpie des réactions exothermiques est affectée du signe -, et celles des réactions endothermiques du signe +.

La réduction de CO_2 est d'autant plus active que la température est élevée.

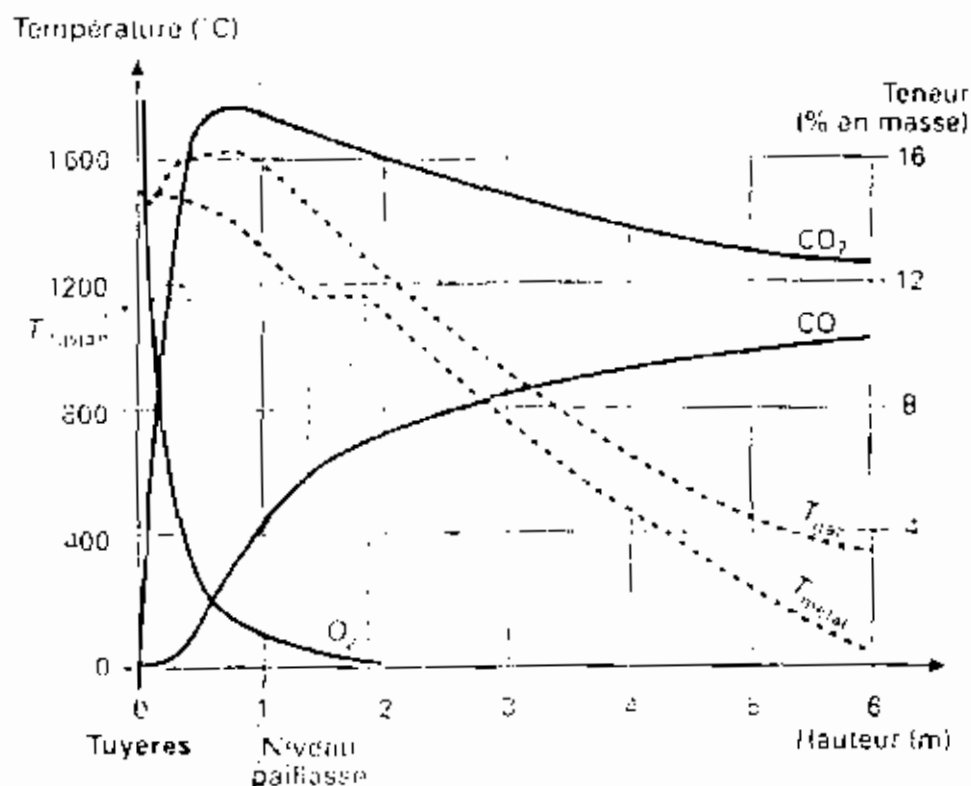


Figure 4.2 : Température et composition des gaz dans le cubilot

Les températures développées dans le cubilot (figure 4.4) montrent que cette réduction, très vive au niveau des tuyères, diminue en s'élevant dans la colonne du cubilot.

Au cubilot cet équilibre n'a pas le temps de s'établir et le CO formé dans les zones à température élevée subsiste au gueulard en proportion plus élevée que ne l'indique l'équilibre de Boudouard compte tenu de la température des gaz au gueulard. On observe le plus souvent une composition des gaz au gueulard de 8 à 18 % en CO et de 16 à 10 % en CO₂. Cependant, si l'on ne peut procéder à des calculs à partir de l'équilibre de Boudouard, on peut dire que toutes les mesures qui tendront à augmenter les températures dans la zone de combustion du cubilot auront pour conséquence un accroissement de la teneur en CO. La réduction de CO₂, qui prévaut au cubilot est endothermique, on a donc intérêt, sur le plan thermique, à tenir au plus bas la teneur en CO des fumées mais sa présence est cependant métallurgiquement nécessaire car elle diminue les effets oxydants et décarburants de l'atmosphère du cubilot.

Un compromis est donc à trouver entre l'économie de coke d'une part et le niveau de carburation et de pertes en silicium et manganèse d'autre part.

3.7.2 Zones gazeuses dans le cubilot

L'évolution de la composition des gaz entre les tuyères et le gueulard (figure 4.5) montre donc une décroissance rapide de l'oxygène, une formation de dioxyde de carbone dont la teneur passe par un maximum qui se situe dans la zone des températures maximales, puis diminue sous l'effet de la réaction de réduction de Boudouard, enfin une augmentation progressive du monoxyde de carbone au détriment du dioxyde de carbone.

La composition des gaz entre la sortie des tuyères et la cheminée n'évolue pas selon des plans horizontaux comme on le schématise parfois. Cette évolution se fait dans l'espace du cubilot le long de la trajectoire des filôts gazeux et selon des volumes que l'on peut imaginer (figure 4.5). On peut distinguer trois zones (figure 4.5).

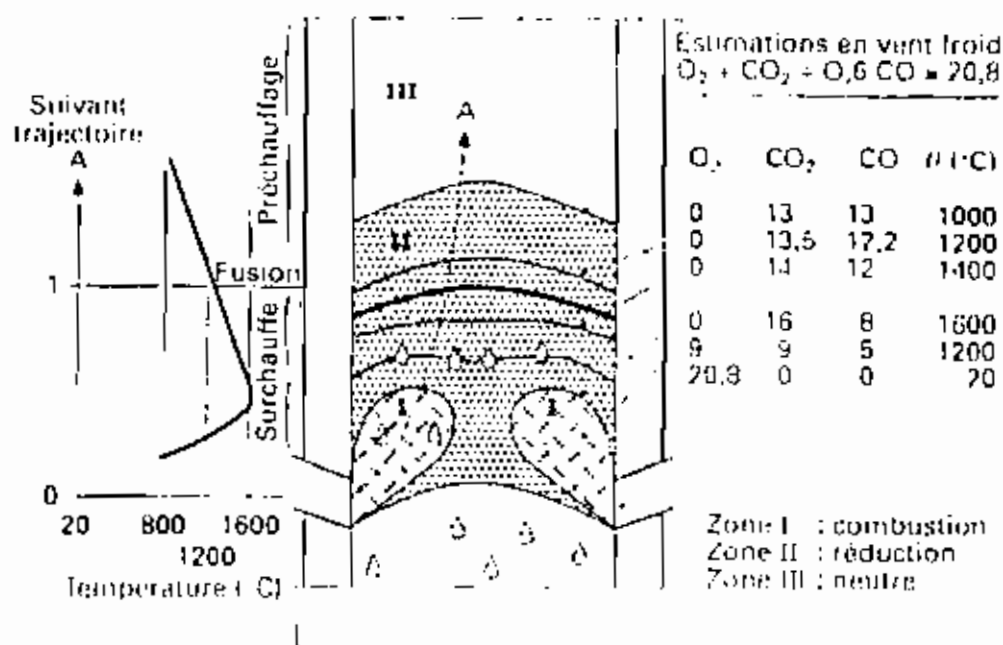


Figure 4.3 : Atmosphère gazeuse dans le cubilot : exemples de compositions de fumées

- ✓ Au nez des tuyères une zone I dans laquelle, au fur et à mesure que les filets d'air pénètrent dans le cubilot, la teneur en oxygène de 20,8 % en volume à la sortie des tuyères (pour l'air atmosphérique), diminue rapidement, par suite de la réaction d'oxydation du carbone. Corrélativement, la teneur en CO_2 augmente. Par suite de la température élevée produite par la combustion, dès que du CO_2 est formé il est réduit en partie par le carbone pour donner du CO (équilibre de Boudouard). De l'entrée à la sortie de cette zone (figure 4.5) les teneurs varient pour l'oxygène de 20,8 à 0 %, pour CO_2 de 0 à 16 ou 18 % environ, pour CO de 0 à 8 ou 5 % environ ; ces teneurs étant liées par la relation $CO_2 + O_2 + 0,6 CO = 20,8$ % (en tenant compte du CO_2 apporté par la castine) pour l'air atmosphérique à 20,8 % d'oxygène. La température maximale de 1 500 à 1 700°C environ, se situe à l'endroit où la teneur en CO_2 est maximale, soit vers la fin de cette zone I.
- ✓ Une zone II dans laquelle il ne se produit plus de CO_2 , tout l'oxygène ayant été consommé, mais du CO par la réaction de Boudouard qui se poursuit, de moins en moins activement, du fait de la diminution de la température quand on s'élève dans la colonne du cubilot. De l'entrée à la fin de cette zone, qui va jusqu'à la surface isotherme de 1 000°C environ, la teneur en CO_2 diminue de 16-18 % à 10-16 % environ, au bénéfice de la proportion de CO qui augmente de 8-5 % à 18-8 % environ

selon les conditions de marche. Ces teneurs sont toujours liées par la relation (teneur en $O_2 = 0$) :

$$CO_2 + 0,6 CO = 20,8 \%$$

- ✓ Une zone III située entre l'isotherme 1 000°C et le gueulard où la composition de la phase gazeuse varie peu, comprenant, généralement, 10-16 % de CO_2 et 18-8 % de CO. La température des gaz va de 1 000 à 300-600°C selon l'importance du volume de préchauffage. L'importance du volume de ces zones est influencée par de nombreux facteurs, notamment : le nombre de tuyères, la vitesse de l'air à la sortie des tuyères, la température du vent, la suroxygénation de l'air.

3.7.3 Calcul des débits

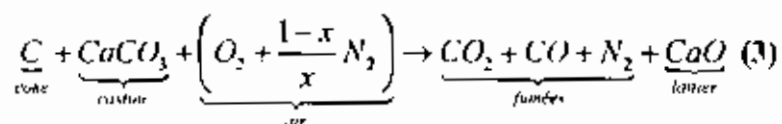
N'ayant la possibilité, ni de calculer, ni de mesurer d'une manière fiable, donc de connaître, ce qui se passe à l'intérieur du cubilot, l'étude de la combustion du coke ne peut se faire qu'à partir des mesures à l'entrée et à la sortie.

- ✓ **À l'entrée**
 - Le coke qui contient du carbone, du soufre, des cendres et de l'eau. Le carbone est l'élément actif, sa teneur se situe de 90 à 92 % pour les coques de bonne qualité. Le soufre est un mal inévitable provenant essentiellement des fines (granulats composés d'éléments de très petites dimensions) à coke ; il se situe entre 0,7 à 1 %. La teneur en cendres est inférieure à 10 % pour un bon coke. Enfin l'eau qui est garantie généralement au-dessous de 1 % à la sortie de la cokerie évolue à l'emploi de 1 à 10 % selon les conditions de stockage et les conditions atmosphériques.
 - La castine qui est du carbonate de calcium ($CaCO_3$) avec quelques impuretés, souvent en proportion inférieure à 1 %.
 - L'air, composé, pour ce qui nous intéresse ici, d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau. La proportion d'oxygène, de 20,8 % pour l'air atmosphérique, peut être augmentée par addition d'oxygène pur, ce qui diminue d'autant la proportion d'azote
 - Les charges métalliques, pour mémoire ici car elles n'entrent pas dans notre étude de la combustion du coke.

✓ **À la sortie**

- Les **fumées** qui contiennent du dioxyde de carbone (CO₂) et du monoxyde de carbone (CO) provenant de la combustion du carbone, de l'hydrogène provenant en partie du coke et en partie de la réduction de la vapeur d'eau contenue dans l'air soufflé, de la vapeur d'eau résultant de la vaporisation de l'humidité du coke, enfin l'azote de l'air qui transite dans le cubilot.
- Le **laitier** composé essentiellement de chaux, de silice, d'alumine, d'oxydes de fer et manganèse et de soufre.
- La **fonte**, pour mémoire dans cette étude de la combustion du coke.

En tenant compte du CO₂ dégagé par la décomposition de la castine et de l'utilisation d'un air à teneur en oxygène quelconque, l'équation de combustion *non équilibrée* peut s'écrire :



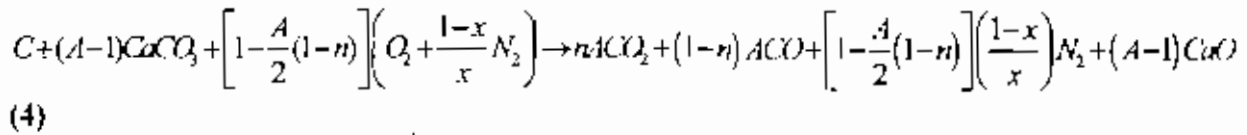
Avec x teneur en oxygène de l'air.

En désignant par :

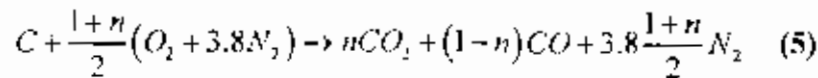
- k le rapport $CaCO_3/C$ brûlé (carbone de recarburation déduit) ;
- $A = 1 + 0,2 k$;
- a teneur en CO₂ des fumées ;
- b teneur en CO des fumées ;
- e teneur en hydrogène des fumées ;
- d teneur en N₂ des fumées ;
- n indice de combustion $n \doteq a/(a+b)$.

L'indice (ou rapport) de combustion n caractérise le régime de marche du cubilot. Il situe l'allure entre oxydante (combustion stoechiométrique du coke en CO₂, $b = 0$) et réductrice (formation de CO, $a = 0$).

En équilibrant l'équation précédente (3) on arrive à la relation générale de combustion suivante (2) :



Avec l'air atmosphérique à 20,8 % d'oxygène et en négligeant le dégagement de CO₂ de la castine cette équation se simplifie comme suit :



Ces équations permettent de calculer les volumes ou masses des éléments en jeu et l'énergie thermique dégagée par la réaction à partir des entrées et des sorties connues du système (tableau 4.4).

	Volume (m ³ /kg)	
	d'après la formule (4)	d'après la formule (5)
O ₂	$1,867 \left(1 - \frac{A}{2}(1-n)\right)$	0,932(1+n)
Air	$\frac{1,867}{x} \left(1 - \frac{A}{2}(1-n)\right)$	4,457(1+n)
CO ₂	$\frac{1,867 \cdot n \cdot A}{2}$	$\frac{1,867 \cdot n}{2}$
CO	$1,867(1-n)A$	1,867(1-n)
N ₂	$1,867 \left(1 - \frac{A}{2}(1-n)\right) \frac{1-x}{x}$	3,553(1+n)

(1) Volumes mesurés dans les conditions normales de température et de pression

Tableau 4.4 : Volumes de gaz mis en jeu pour la combustion d'1 kg de carbone (carburation déduite)

Les équations (4) et (5) permettent d'établir la relation entre les teneurs en CO₂ (a) et en CO (b) des fumées. Avec l'équation simplifiée (5) on obtient :

$$a + 0,6b = 0,208$$

Avec de l'air à teneur en oxygène x, cette relation devient :

$$a + \frac{1+x}{2} b = x$$

3.7.4 Température dans le cubilot

Avec l'équation simplifiée (5) l'énergie thermique fournie par la combustion du coke s'exprime par la relation suivante :

$$W = 246,13 + 162,42 n \text{ en MJ/kmol de C}$$

Ou

$$W = 20,51 + 13,55 n \text{ en MJ/kg de C}$$

On peut calculer à partir des enthalpies de formation des gaz (table de Rimhault) la température théorique qu'atteindraient les gaz de combustion. La figure 4.6 donne cette température en fonction de l'indice de combustion n , dans différents cas : air atmosphérique, vent froid suroxygéné à 25 et 30 %, vent chaud atmosphérique chauffé à 500°C et 1 000°C.

La température réelle dans le cubilot, fonction des transferts thermiques est difficile à calculer.

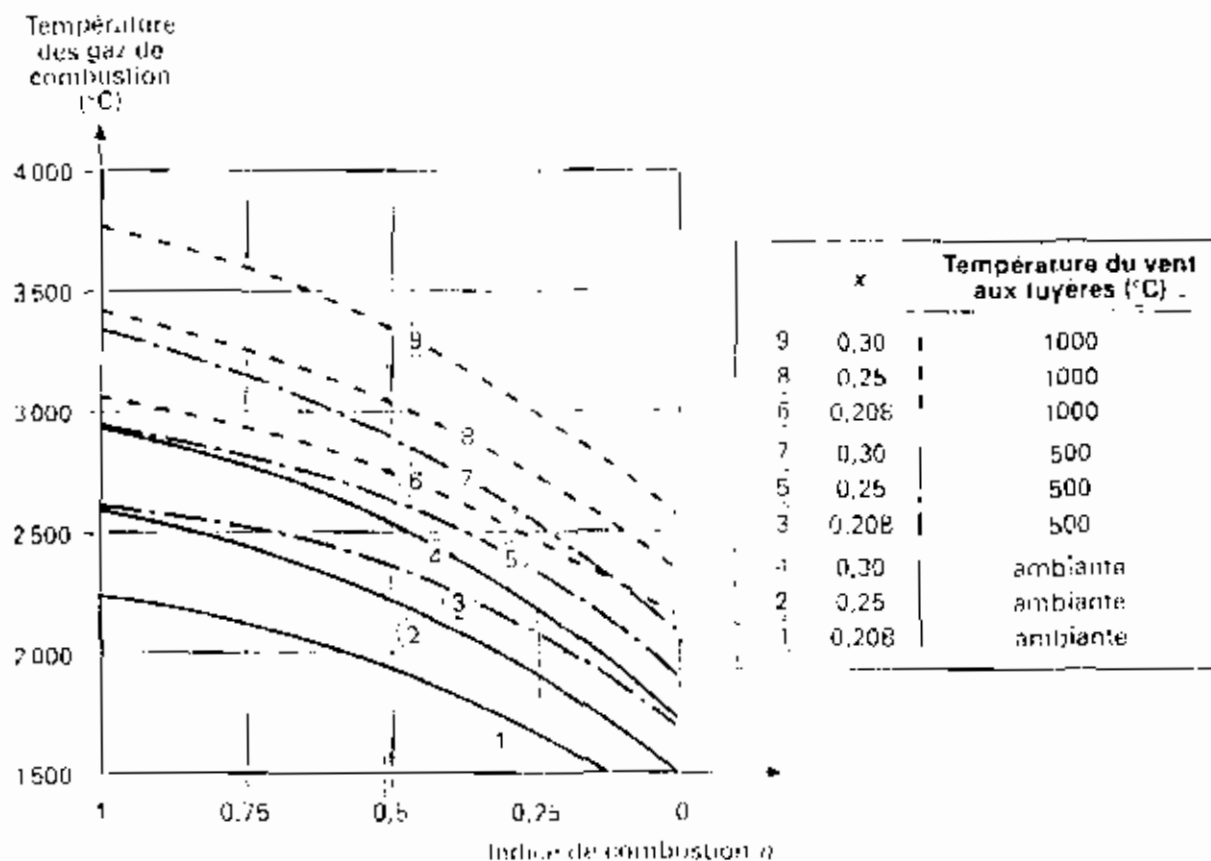
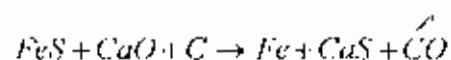


Figure 4.4 : Température théorique de combustion des gaz en fonction de l'indice de combustion, de la température du vent et de la teneur en oxygène de l'air

3.8 Désulfuration

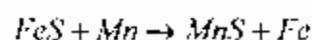
La désulfuration est une nécessité en regard de la nocivité du soufre ; le soufre se présente sous forme de sulfures.

Dans le cubilot la désulfuration est assurée par la chaux vive CaO (provenant de la décomposition de la castine) qui détruit le sulfure de fer FeS par la création de :



Le sulfure de calcium CaS passe par la scorie (résidu) qui surnage et est éliminé par le décrassage.

Dans la poche on doit ajouter du ferro-manganèse FeMn qui donne du Mn qui se compose au S du FeS et libère le fer par la réaction suivante :



Le sulfure de manganèse passe dans la scorie

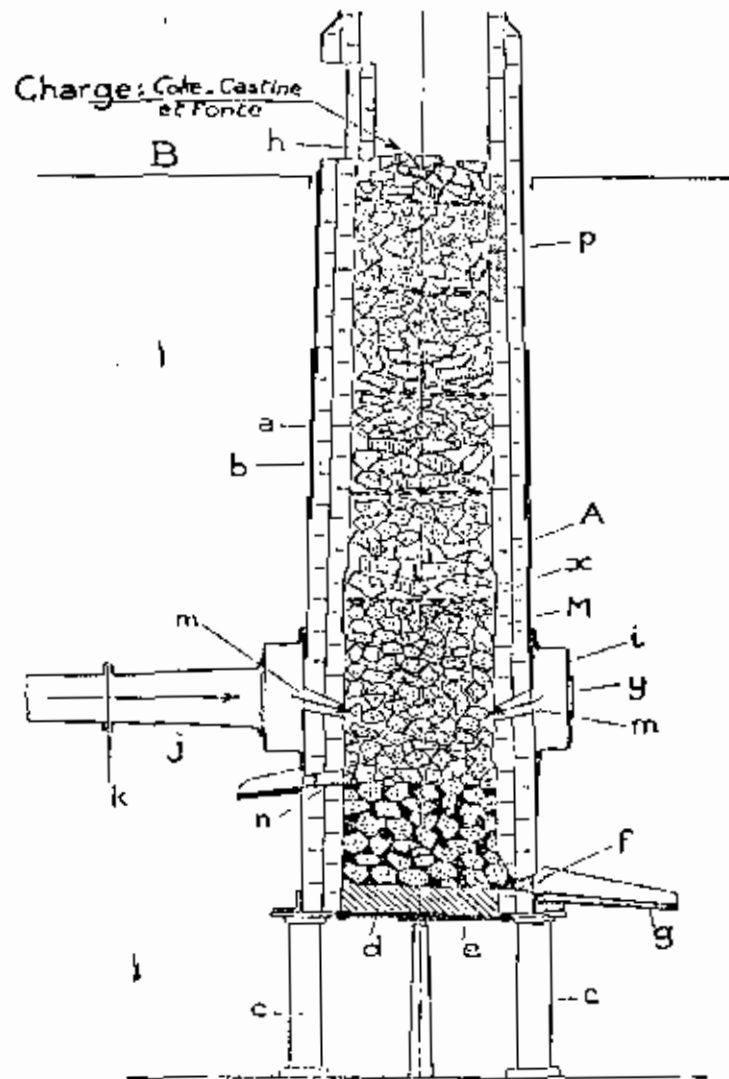


Figure 4.5 : Cubilot chargé

[1], [4], [5], [6], [7], [8], [9]

4 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 ;
- utiliser 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 :

- ✓ *poches à brancard* (figure 4.8) manutentionnée par deux hommes pour la coulée de moules de 10 à 50 kg :

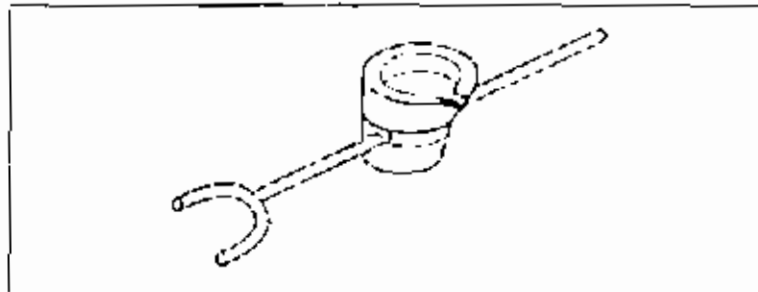


Figure 4.6 : Poche à brancard

- ✓ *poches avec système de basculement* (figure 4.9) capacités de quelques centaines de kilogrammes à plusieurs tonnes à commande manuelle ou électrifiée et le plus souvent du type théière :

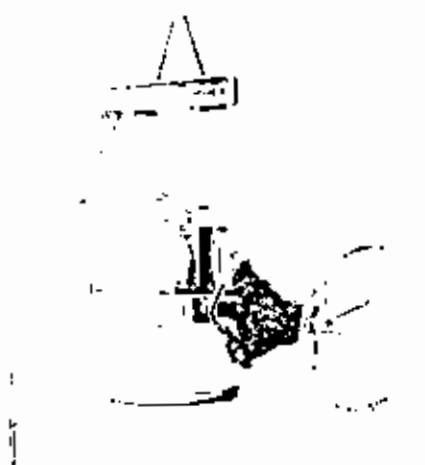


Photo 4.3 : Poches avec système de basculement

- ✓ *poches tonneaux* (figure 4.10) plus maniables, mieux calorifugées, souvent de type théière mécanisées ou électrifiées et pour des utilisations sur des chantiers de moulage continus, avec des capacités de 0,2, 0,5, 1 à 3 t ;

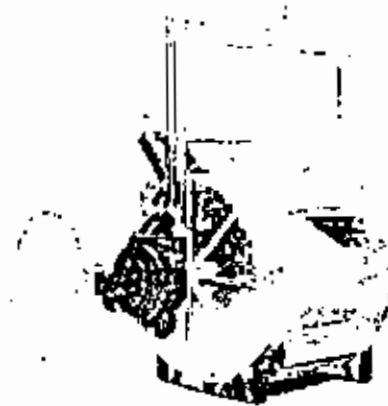


Photo 4.4 : Poches tonneaux

- ✓ *poches à quenouille* (figure 4.11), surtout utilisées pour l'acier, elles permettent de couler un métal exempt de laitier et plus chaud mais demandent davantage de soins avec des frais d'exploitation relativement élevés. En fonderie de fonte, on emploie les quenouilles surtout dans les systèmes de coulée mécanisés ;

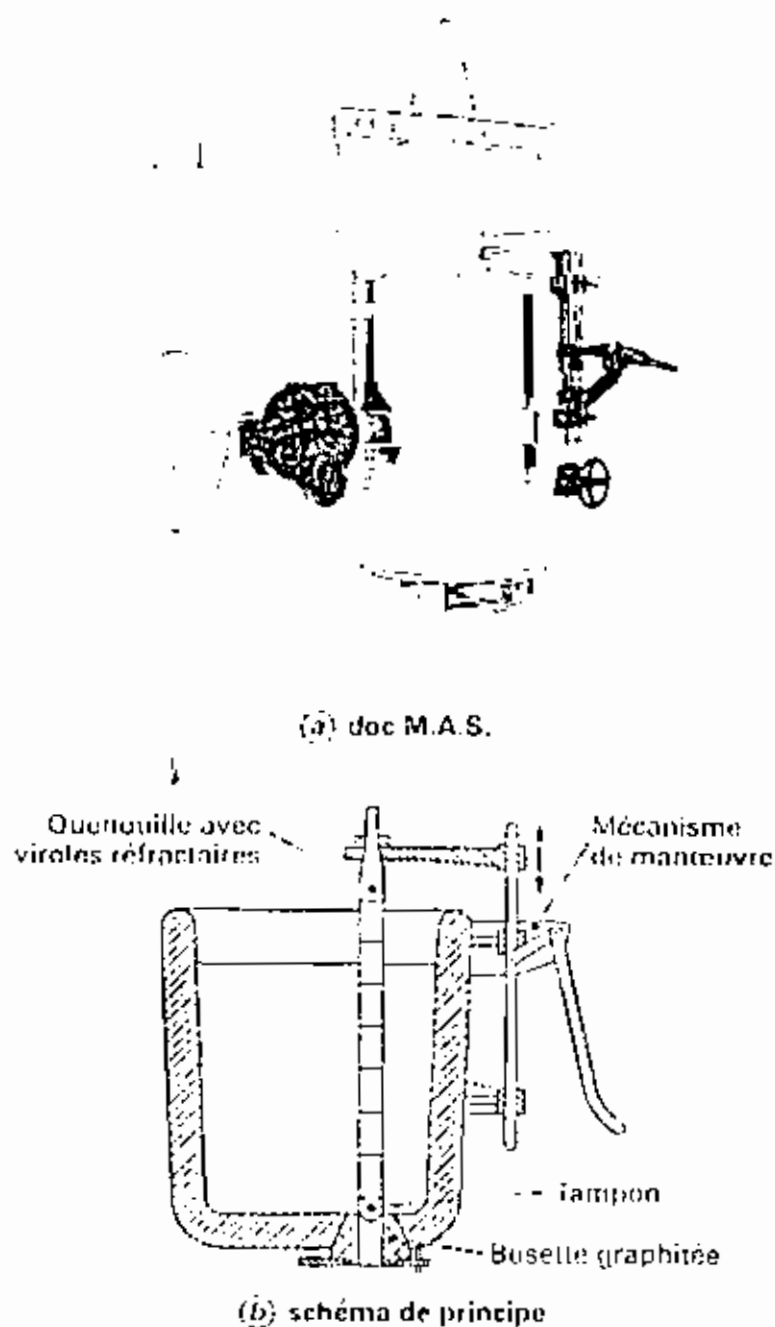


Figure 4.7 : Poches à quenouille

- ✓ *poches à tourillons et à palonnier indépendant* : ce sont des poches de grosses capacités manutentionnées au pont roulant par palonnier avec basculement commandé par le petit crochet du pont (figure 4.12) :

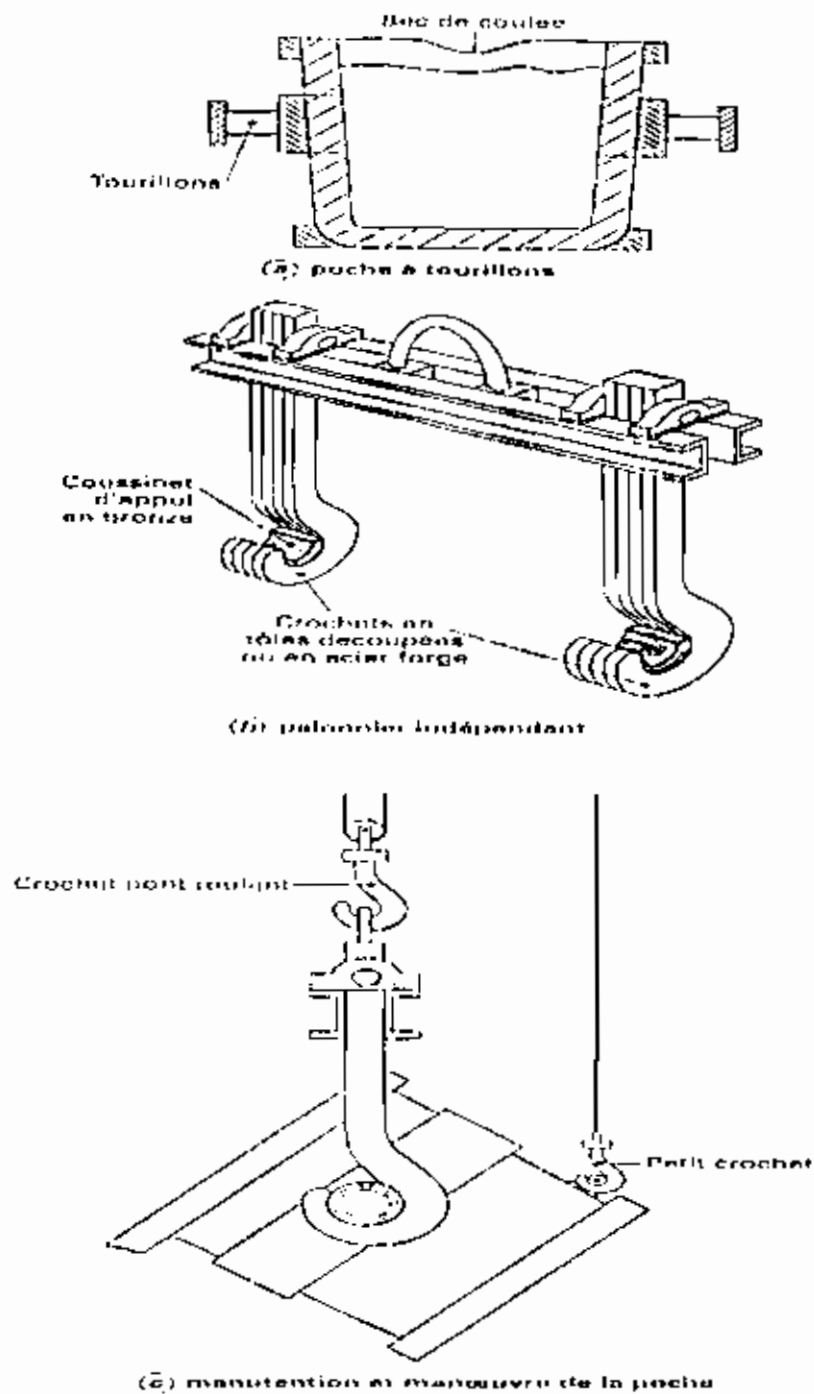
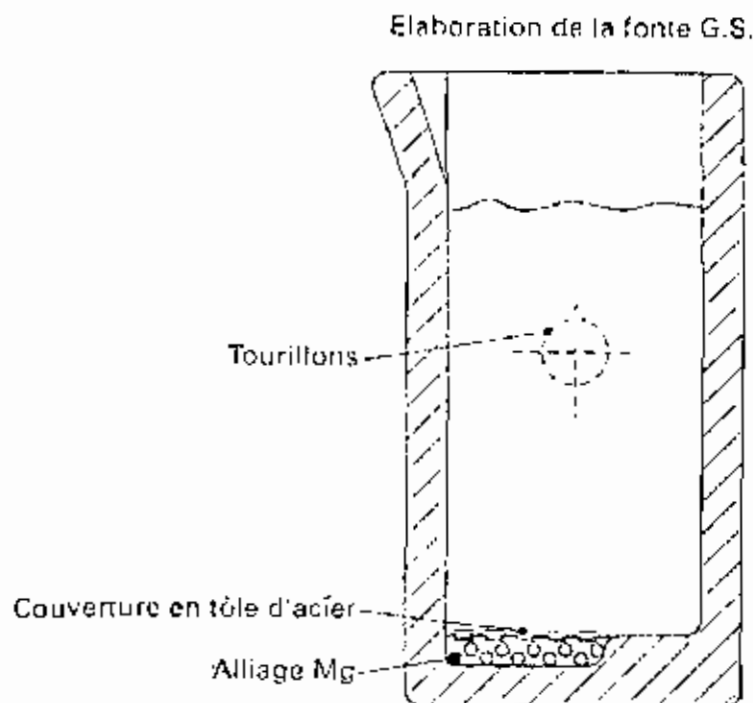


Figure 4.8 : Poches à tourillons et à palonnier indépendant

- ✓ *poches spéciales* par exemple poche profonde pour l'obtention de la fonte GS par la méthode *sandwich* (figure 13).



La hauteur de la poche favorise le rendement de la réaction

Figure 4.9 : Poches spéciales

[8]

5 Coulées du métal liquide

5.1 Généralités

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 décasser 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 décassage 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 ;
- maintien d'un débit constant de métal liquide ;
- 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.

Différents modes de coulée existent dans les fonderies. Nous en indiquons ci-après les plus fréquemment utilisées.

5.2 Coulée manuelle

Elle peut se faire à poste fixe (cas des gros moules par exemple) ou en accompagnant les moules transportés par un carrousel. Dans ce cas, la vitesse de déplacement du palan support de poche est souvent synchronisée avec celle du carrousel.

Pour éviter les débordements de métal en fin de coulée, on peut mettre un petit morceau de fil de magnésium dans un évent du moule. La combustion du magnésium, déclenchée par l'arrivée du métal dans l'évent sera un excellent indicateur pour l'arrêt de la coulée.

La coulée manuelle est souvent une opération délicate qui demande une certaine expérience de la part des opérateurs. Les conditions de travail, rendues souvent pénibles par la chaleur, les poussières, les fumées et les projections de métal, obligent le personnel au port de vêtements de sécurité et de lunettes de protection parfaitement adaptés et nécessitant l'installation de ventilation efficace.

Malgré les difficultés des problèmes à résoudre, le développement de la mécanisation et de l'automatisation de la coulée des moules a permis de réduire ou de supprimer la plupart de ces nuisances, tout en améliorant la productivité des installations et la qualité des pièces produites, comme le montrent les exemples ci-après, rencontrés principalement dans les fabrications de grandes séries.

5.3 Coulée mécanisée avec chariot de coulée

La poche est portée par un chariot qui suit le carrousel de coulée.

Elle peut basculer autour du bec pour verser le métal dans le moule.

Le coureur, porté par le chariot, commande les différents mouvements, déplacement et centrage du chariot sur le moule, basculement de la poche, etc. Il existe de nombreux moyens de déplacement du chariot (monorail aérien, rails au sol, etc.).



Coulée de la fonte.

Photo 4.5: Chariot de coulée mécanisé

[8], [10]

6 CAO et DAO

Il n'y aura pas beaucoup de détails concernant cette partie sinon que les dessins ont été faits avec SOLIDWORKS qui est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

6.1 Semelle

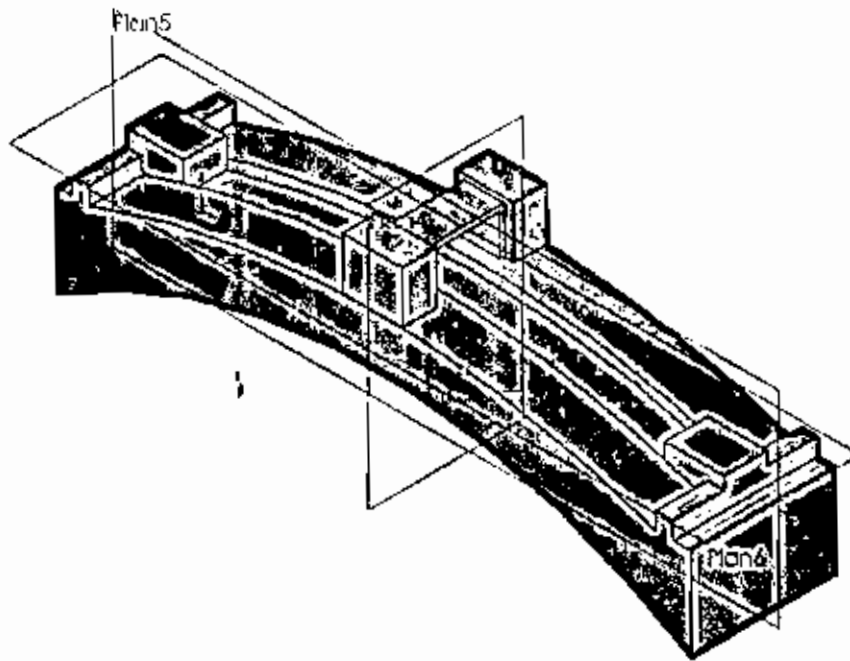


Figure 4.10 : Semelle de frein

6.2 Châssis

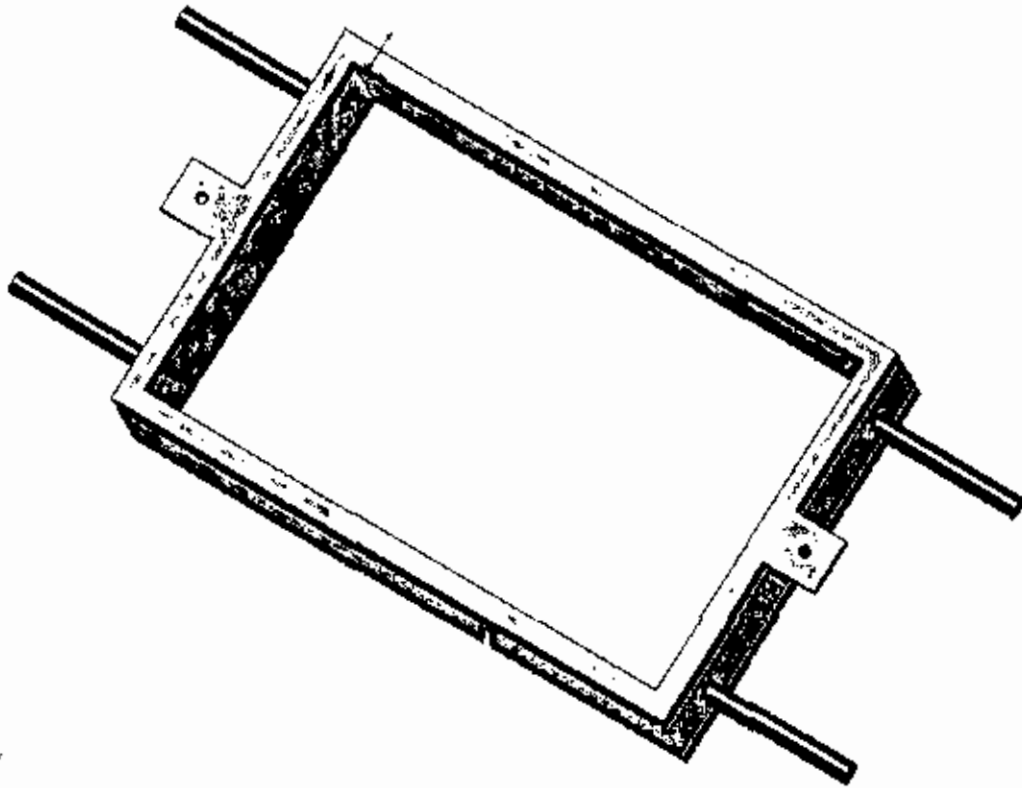


Figure 4.11 : Châssis

6.3 Modèles

- **Modèle inférieur**

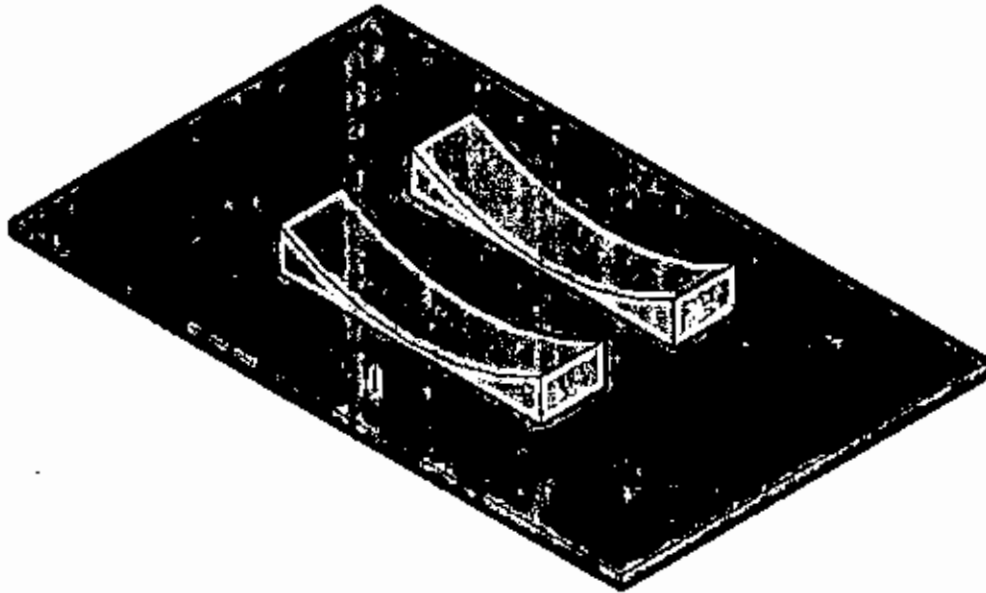


Figure 4.12 : Modèle inférieur

- **Modèle supérieur**

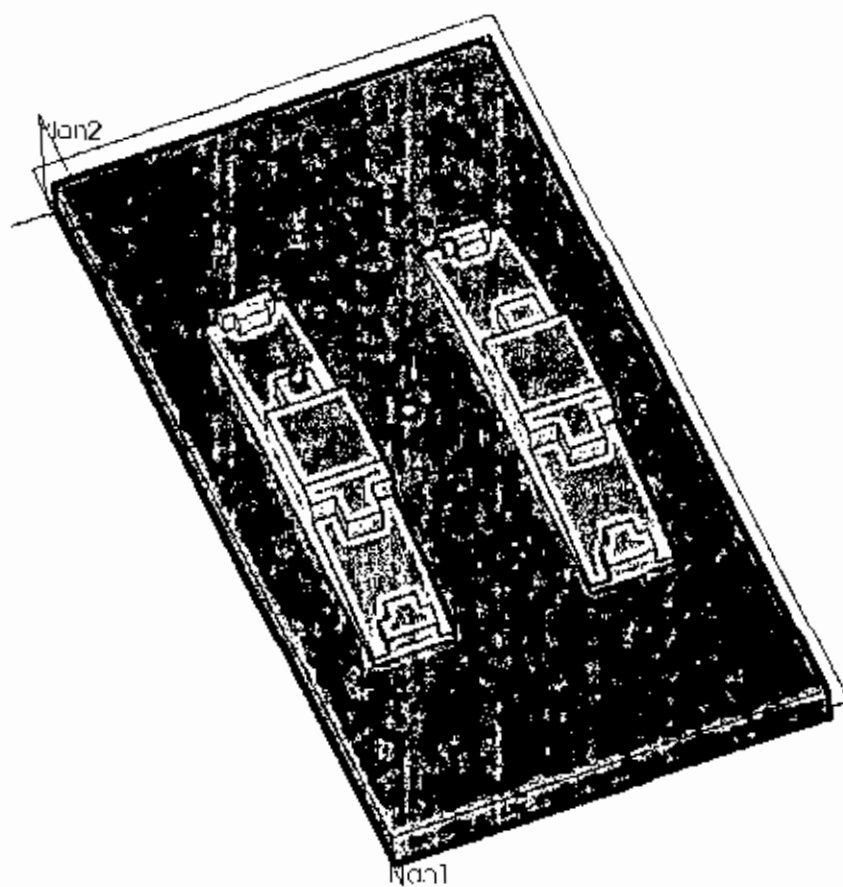


Figure 4.13 : Modèle supérieur

CHAPITRE 5 : ETUDES ECONOMIQUE, FINANCIERE ET ENVIRONNEMENTALE

I ETUDES ECONOMIQUE ET FINANCIERE

Dans cette partie nous essayerons, suite aux nouvelles quantités déterminées, d'évaluer le coût moyen d'une semelle de frein. Ceci en partant des données recueillies au niveau de l'entreprise.

Nous allons d'abord essayer d'évaluer le coût pour les 600 semelles produites il y a quelques mois et le comparer à celui des 2000 semelles en perspectives. Nous avons choisi de faire l'étude comparative en utilisant les 600 semelles car la dernière étude effectuée sur les coûts des matières premières s'était faite sur la base des 600 semelles.

1 Coût actuel d'une semelle pour 600 semelles par mois

1.1 Coûts à partir des enquêtes

1.1.1 Quantités des matières premières

DESIGNATION	BESOIN ANNUEL	BESOIN MENSUEL
Fonte de récupération		20 TONNES
Coke de fonderie		6 TONNES
Plombagine	1,5 TONNES	
Bentonite	3 TONNES	
Sable de mer	32 m ³	
Argile	20 m ³	
Gomme arabique		10 KG
Silicium		1500 KG
Bois de chauffe		300 KG
calcaire (castine craie)		100 KG

Tableau 5.1 : Besoins pour 600 semelles/mois

1.1.2 Prix des matières premières

DESIGNATION	Unité	Prix unitaire (FCFA)
Fonte de récupération	TONNE	150000
Coke de fonderie	TONNE	531108
Plombagine	Kg	1650
Bentonite	sac de 20 kg	16763.90
Sable de mer	m ³	9600
Gomme arabique	Kg	585
Silicium	Kg	407
Bois de chauffe	Kg	80
calcaire (castine craie)	Kg	105
Argile	m ³	15000

Tableau 5.2 : Coûts par unité pour 600 semelles

1.1.3 Calcul du coût des matières premières pour 600 semelles

DESIGNATION	QUANTITES ANNUELLES	COÛTS ANNUELS (FCFA)
Fonte de récupération	240 TONNES	36 000 000
Coke de fonderie	72 TONNES	38 239 776
plombagine	1,5 TONNE	2 475 000
Bentonite	3 TONNES	2 514 585
Sable de mer	32 m ³	307 200
Gomme arabique	120 kg	70 200
Silicium	18 TONNES	7 326 000
Bois de chauffe	3,6 TONNES	288 000
calcaire (castine craie)	1,2 TONNE	126 000
argile	20 m ³	300 000
TOTAL		87 646 761

Tableau 5.3 : Coûts par quantité pour 600 semelles/mois

1.1.4 Masse salariale (coûts main d'œuvre)

Présentement la fonderie compte 10 employés dont un chef de groupe et la masse salariale annuelle est de : 37 680 000 FCFA.

1.1.5 Autres paramètres

1.1.5.1 Frais indirects

Concernant les frais indirects, ils sont le plus souvent fixés par l'entreprise dans laquelle l'étude est faite. Dans notre cas ils sont égaux à 17% du coût des matières. C'est donc égal à :

$$0,17 \times 87\,646\,761 = 14\,899\,950 \text{ FCFA}$$

1.1.5.2 Frais généraux

Les frais généraux, étant essentiellement constitués des salaires des directeurs et autres frais n'agissant pas forcément sur le produit, ne sont pas pertinents.

1.1.5.3 Taxes

Il est aussi à noter que la Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA) ne sera pas prise en compte car nous procédons à une étude comparative d'un même produit.

1.1.6 Tableau récapitulatif et résultat final

DESCRIPTION	MONTANT (FCFA)
Matières	87 646 761
Frais indirects Ateliers	14 899 950
Main œuvre	37 680 000
TOTAL	140 226 711
Nombre de semelles	7200
Coût d'une semelle	19 476

Tableau 5.4: Coût unitaire pour 600 semelles

1.3 Coûts à partir des calculs

Les calculs de quantités ne seront pas détaillés ici.

DESIGNATION	QUANTITES ANNUELLES	COUTS ANNUELS (FCFA)
Fonte de récupération	148.5 TONNES	22 275 000
Coke de fonderie	14.74 TONNES	7 827 185
plombagine	1.5 TONNE	2 475 000
Bentonite	3 TONNES	2 514 585
Sable de mer	32 m ³	307 200
Gomme arabique	120 kg	70 200
Silicium	18 TONNES	7 326 000
Bois de chauffe	3.6 TONNES	288 000
calcaire (castine craie)	4.536 TONNES	476 280
argile	20 m ³	300 000
TOTAL		43 859 450

Le salaire moyen étant inchangé, il est égal à 37 680 000 FCFA, les frais indirects sont égaux à : 7 456 107 FCFA. Le coût de la semelle serait donc de :

DESIGNATION	BESOIN ANNUEL	BESOIN MENSUEL
Fonte de récupération		12.375 TONNES
Coke de fonderie		1.228122 TONNE
Plombagine	1.5 TONNES	
Bentonite	3 TONNES	
Sable de mer	32 m ³	
Argile	20 m ³	
Gomme arabique		10 KG
Silicium		1500 KG
Bois de chauffe		300 KG
calcaire (castine craie)		378 KG

DESCRIPTION	MONTANT (FCFA)
Matières	43 859 450
Frais indirects Ateliers	7 456 107
Main œuvre	37 680 000
TOTAL	88 995 557
Nombre de semelles	7200
Coût d'une semelle	12 360

Nous constatons que le coût serait considérablement diminué,

{10}

2 Coût actuel d'une semelle pour 2000 semelles par mois

2.1 Quantités des matières premières

Dans cette partie nous allons nous baser sur les quantités déterminées au précédent chapitre, le nouveau tableau sera ainsi le suivant :

DESIGNATION	BESOIN ANNUEL	BESOIN MENSUEL
Fonte de récupération		33 TONNES
Coke de fonderie		1.6375 TONNE
Plombagine	2 TONNES	
Bentonite	8.75 TONNES	
Sable de mer	32 m ³	
Argile	20 m ³	
Gomme arabique		10 kg
Silicium		2 TONNES
Bois de chauffe		300 kg
Huile de lin		20 litres
calcaire (castine, craie)		504 kg

Tableau 5.5 : Besoins pour 2000 semelles/mois

2.2 Prix des matières premières

DESIGNATION	Unité	Prix unitaire (FCFA)
Fonte de récupération	TONNE	150000
Coke de fonderie	TONNE	531108
plombagine	Kg	1650
Bentonite	sac de 20 kg	16763.90
Sable de mer	m ³	9600
Gomme arabique	Kg	585
Silicium	Kg	407
Bois de chauffe	Kg	80
calcaire (castine, craie)	Kg	105
argile	m ³	15000

Tableau 5.6 : Coûts unitaire pour 2000 semelles

2.3 Calcul du coût des matières premières pour 2000 semelles

DESIGNATION	QUANTITES ANNUELLES	COÛTS ANNUELS (FCFA)
Fonte de récupération	396 TONNES	59 400 000
Coke de fonderie	19.65 TONNES	10 436 272
plombagine	2 TONNES	3 300 000
Bentonite	8.75 TONNES	7 334 206
Sable de mer	32 m ³	307 200
Gomme arabique	120 kg	70 200
Silicium	24 TONNES	9 768 000
Fois de chauffe	3.6 TONNES	288 000
calcaire (castine craie)	6.048 TONNES	635 040
argile	20 m ³	300 000
TOTAL		91 838 918

Tableau 5.7 : Coûts par quantité pour 2000 semelles/mois

2.4 Masse salariale (coûts main d'œuvre)

Présentement la fonderie compte 10 employés mais dans la perspective d'augmenter la production, une augmentation du personnel est prévue. Cette augmentation se limitera à un apport en stagiaires qui sera au nombre de huit (8). Il est aussi prévu une augmentation de la prime des fondeurs. De ce fait le coût de la main d'œuvre passera de 37 680 000 FCFA à 49 080 000 FCFA

2.5 Autres paramètres

2.5.1 Frais indirects

Ils sont égaux à 17% des matières. Ceci sera donc égal à :

$$0.17 \times 91\,838\,918 = 15\,612\,616 \text{ FCFA}$$

2.5.2 Frais généraux

Comme nous l'avons précisé précédemment ils ne sont pas pertinents.

2.5.3 Taxes

Il est aussi à noter que la Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA) ne sera pas prise en compte.

2.6 Tableau récapitulatif et résultat final

DESCRIPTION	MONTANT (FCFA)
Matières	91 838 918
Frais indirects Ateliers	15 642 616
Main œuvre	49 080 000
TOTAL	156 561 534
Nombre de semelles	24 000
Coût d'une semelle	6 523

Tableau 5.8: Coût unitaire pour 2000 semelles

[10]

II ETUDE ENVIRONNEMENTALE

Les fonderies peuvent être des sources de pollution pour l'extérieur (poussières, bruit, fumées...). Il convient donc de mettre en place les systèmes de dépollution nécessaires pour éviter ces nuisances et être en conformité avec les réglementations existantes, en prévoyant que celles-ci évolueront dans l'avenir vers plus de contraintes. Cet aspect devra être pris en compte au moment du choix d'un nouvel investissement. Son impact sur la santé des travailleurs est aussi à considérer, en effet beaucoup d'effets secondaires sont observés après des années de service.

1 Conditions de travail

La mécanisation et l'automatisation en fonderie peuvent se justifier économiquement, sur la base de critères de productivité et de qualité mais également sous l'aspect amélioration des conditions de travail, certains appareillages automatisés permettant de supprimer toute intervention humaine dans des postes pénibles, empoussiérés ou dangereux.

2 Environnement interne

- ✓ Mise en place d'installations générales de chauffage et de ventilation qui permettent :
 - Un assainissement de l'atmosphère des fonderies en créant un renouvellement d'air optimal;
 - Un maintien à une température raisonnable des zones;
 - Une économie d'énergie, dans certains cas, en effet secondaire.

- ✓ Conception de fonderies favorisant le plus possible l'éclairage naturel dans les zones où il y a de fortes concentrations de personnel.

- ✓ Choix judicieux des matériaux constituant les bâtiments, de manière à diminuer la réflexion des bruits.

- ✓ Mise en place de dispositifs réduisant les nuisances à la source :
 - Capotage de machines ;

- Aspirations des fumées et des poussières ;
- Éclairage artificiel adapté ;
- Définition ergonomique des postures de travail.

3 Environnement externe

En cette matière, les évolutions majeures ont porté sur l'environnement externe aux fonderies.

Une nouvelle législation est en cours d'élaboration qui comporte plusieurs volets :

- la lutte contre la pollution de l'air ;
- la lutte contre la pollution de l'eau ;
- la protection contre le bruit et les vibrations ;
- la gestion des déchets industriels ; et par conséquent :
- la refonte de la législation des installations classées.

3.1 Lutte contre la pollution de l'air

La valeur limite de rejet de poussières totales est de 50 mg/Nm^3 pour toutes opérations de fonderie.

3.2 Lutte contre la pollution de l'eau

Contrairement à son premier volet portant sur la lutte contre la pollution de l'air, l'arrêté du 1er mars 1993 en France n'introduit qu'une mise à jour de la réglementation qui porte sur :

- ✓ les prélèvements et la consommation d'eau ;
- ✓ les rejets de toutes natures dans l'air et dans l'eau.

Ces réglementations peuvent être différentes suivant la localisation de la fonderie et donc dans tous les cas les administrations locales doivent être consultées.

3.3 Protection contre le bruit et les vibrations

Comme pour la lutte contre la pollution de l'eau, l'arrêté « intégré » rappelle la réglementation existante dont la philosophie pourrait se résumer ainsi : « la fonderie, comme

toute entreprise industrielle, ne doit pas générer, en matière de bruit et vibrations, de nuisances pour les tiers ».

Là encore la localisation de la fonderie conditionne les règles à respecter, et le concepteur d'une nouvelle unité ou d'un aménagement d'unité existante consultera avantageusement les administrations locales.

3.4 Gestion des déchets industriels

En fonction des problèmes qu'ils posent, les déchets sont classés en trois catégories :

- ✓ **les déchets inertes** (du point de vue chimique et physique) sont essentiellement constitués de déblais, de produits de démolition, etc., ne contenant pas de substances toxiques ou dangereuses ni souillées. Ces déchets peuvent être enfouis dans des *sites de décharge perméables* dits de *classe 3* ;
- ✓ **Les déchets industriels banals** sont également solides à l'état brut et de nature assimilable à celle des ordures ménagères : comme les déchets inertes, ils ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ces déchets sont traités de la même façon que les ordures ménagères et peuvent être enfouis en *sites de décharge semi-perméable* dits de *classe 2* ;
- ✓ **Les déchets industriels spéciaux** (déchets générés par des activités spécifiques) contiennent des éléments nocifs ou dangereux (toxicité chimique ou biologique, risques d'incendie ou d'explosion, radioactivité, etc.) et impliquent des précautions particulières d'élimination.

10 % des déchets industriels spéciaux sont dits *dangereux* car présentant, du fait de la nature ou de la concentration des produits qu'ils contiennent, des risques potentiels importants pour le milieu naturel et les personnes. Ces déchets, après traitement de stabilisation, peuvent être enfouis dans des *sites de décharge imperméables* dits de *classe 1*.

À la suite des études de déchets effectuées dans les fonderies, deux arrêtés ont été pris : tous deux sont relatifs au stockage de déchets industriels ultimes et stabilisés, l'un pour les installations nouvelles, l'autre pour les installations existantes. Ils dressent, d'une part, la liste des déchets concernés, soit pour la fonderie :

— les sables n'ayant pas subi la coulée et dont la teneur en phénol est supérieure à 50 mg/kg ;
— les poussières de fabrication d'aciers alliés ;
— les poussières issues de procédés de fabrication de métaux (ce qui semble inclure les poussières générées lors de la fusion des métaux) ; et, d'autre part, les règles d'exploitation des décharges de classe 1 destinées à recevoir, pour ce qui concerne les fonderies, les déchets spéciaux signalés ci avant. En outre, pour être admis, ces déchets devront présenter des caractéristiques limites définies également dans ces arrêtés.

En outre, un projet d'arrêté relatif aux décharges de résidus urbains devrait faire l'objet d'une publication ultérieure.

Il concernerait néanmoins certains déchets industriels dont :

— les sables de fonderie dont la teneur en phénol est inférieure à 50 mg/kg ;
— les déchets industriels banals jusqu'en 1995 (leur devenir après 1995 n'étant pas précisé).

[8]

4 Impacts sur la santé

Les risques pour la santé des personnes sont très présents dans la fonderie. Ils ont pour noms :

Blessures oculaires et eutanées, chutes, brûlures....

Maladies professionnelles : silicose, intoxication au plomb, asthme, surdité, lombosciatique, tétanos.....

La gestion des ces risques se fera par l'utilisation des mesures de protection collectives et individuelles qui seront sans cesse contrôlées pour leur pérennisation.

Il convient également d'équiper l'atelier

- o De toilettes fonctionnelles et propres.
- o De boites à pharmacie.
- o De fontaines
- o De casiers métalliques pour le rangement des tenues de travail.

[2]

CHAPITRE 6: PROPOSITION D'UNE SOLUTION OPTIMISEE

INTRODUCTION

Etant la partie ultime du travail, cette partie va surtout être un récapitulatif et un résumé des différentes propositions faites durant tout le travail abattu. Pour commencer, nous allons utiliser le **tableau 2.1** du chapitre 2 comme base. Ainsi nous allons donner solution par solution pour les différents problèmes.

PROBLEMES IDENTIFIES	LOCALISATION	OBSERVATIONS
Problèmes d'isolation thermique	cubilot	Difficultés de trouver des briques réfractaires
Difficultés d'évacuation des fumées	cubilot	Cheminée en mauvais état
Impossibilité de maîtriser les températures	cubilot	Inexistence d'appareils de mesure de températures
Pesée et dosage des produits impossibles	atelier	Inexistence d'appareils de pesée
Difficultés liées aux efforts physiques	atelier	Manque de machines
Imprécisions et retards	atelier	Manque de matériels (châssis et autres)
Problèmes liés à la sécurité	atelier	Manque d'E.P.I.
Faible rendement, non atteinte des objectifs	atelier	Manque de personnel
Chômage technique, non atteint des objectifs	atelier	Retards dans les commandes
Incertitudes liées au produit fini	atelier	Impossibilité d'évaluer la qualité du produit

1 Problèmes d'isolation thermique

Ces problèmes sont d'autant plus importants qu'ils sont les causes de grandes pertes d'énergie donc baisse du rendement thermique. Ils sont dus à d'énormes difficultés de trouver des briques réfractaires. Jusqu'à présent ils se réglaient par la récupération des briques qui ne sont

forcément conformes à cette fin. Au sein d'un entretien avec les fondeurs, ils ont dit pouvoir les fabriquer eux même. Donc cette idée mériterait d'être mûrie car, avec leur expérience, les fondeurs sont les mieux placés pour régler ce problème. Il faut aussi noter que seul un cubilot sur trois est fonctionnel et que les deux autres ont surtout des problèmes de briques réfractaires. Donc la solution à ce problème serait très fructueuse dans le fonctionnement de la fonderie.

2 Difficultés d'évacuation des fumées

Notons que nos craintes concernant l'évacuation des fumées ne sont plus d'actualité car la cheminée a été récemment remise en état. Sinon dire que nous préconisons que les cheminées des deux autres cubilots soient aussi retapées pour une éventuelle mise en service.

3 Impossibilité de maîtriser les températures

Des instruments pour la maîtrise et le contrôle des températures existent, de la plus simple à la plus complexe. Parmi eux nous pouvons citer les thermomètres et les pyromètres.

Les thermomètres ne mesurant généralement que des températures en dessous de 1000 °C sont moins indiqués que les pyromètres. Le seul problème avec les pyromètres est que ces derniers sont moins précis et qu'il faut souvent ajouter une marge.

Mais étant donné que les moyens manquent et que la production doit continuer d'ici l'achat du matériel, nous proposons *la régulation à vue* qui consiste à apprécier la température par la couleur de la texture du métal. Ainsi nous pouvons dire que à :

- 1000 °C nous avons une couleur **rouge cerise brillant** ;
- 1100 °C nous avons une couleur **orange foncée** ;
- 1200 °C nous avons une couleur **orange clair** ;
- 1300 °C nous avons une couleur **orange blanc** ;
- 1400 °C nous avons une couleur **blanche soudante** ;
- 1450 °C nous avons une couleur **blanche éblouissante**.

[5]

9 Chômage technique, non atteint des objectifs

Dans la liste des obstacles pour atteindre les objectifs nous avons aussi le retard de certaines commandes. En effet, les fondeurs ont maintes fois cessé de travailler à cause de ces retards. Nous préconisons donc une politique d'approvisionnement plus efficace pour palier à ces problèmes, quitte à adopter une politique de gestion des stocks pour prévenir d'éventuelles pénuries.

10 Incertitudes liées au produit fini

Comme la pesée, l'analyse des matières premières est indispensable pour assurer la bonne qualité du produit final. Toute bonne fonderie doit avoir un laboratoire d'analyse en son sein. C'est pourquoi la mise en place d'un laboratoire devrait faire partie des objectifs imminents de l'entreprise.

11 D'autres propositions

1.1 Changement ou amélioration des technologies existantes

On peut distinguer, à ce niveau, deux types d'actions que nous allons illustrer par quelques exemples :

✓ Action directe :

- la fusion électrique, en remplaçant le cubilot, a sensiblement amélioré les conditions de travail et d'environnement interne :
- les machines mécanisées ou automatiques de parachèvement, en transformant l'ouvrier en surveillant, ont grandement éliminé les contraintes de bruits, vibrations, poussières, etc.

✓ Action indirecte : l'amélioration des procédés (haute pression en moulage) et des outillages de moulage et de noyautage permet de réduire les bavures sur les pièces et, par conséquent, les opérations de finition, allant même jusqu'à les supprimer complètement: les postes pénibles correspondants sont en conséquence également éliminés.

1.2 Enrichissement des tâches

Cela est une autre forme d'amélioration des conditions de travail ; il s'agit, par exemple, de création d'équipes autonomes à qui l'on confie un contrat de production et de qualité sans imposer d'organisation rigide. Cela conduit :

- à une rotation des postes entre les différents opérateurs ;
- à un enrichissement de la tâche par intégration de la fonction contrôle.

[8]

CONCLUSION

Cette étude étant portée sur la fonderie en général, a livré beaucoup d'informations pour optimiser la production des semelles de freins. Nous avons pu démontrer qu'avec un minimum de matériels, nous pouvons considérablement améliorer la production et atteindre ainsi les objectifs fixés par l'administration. Durant l'étude nous ne nous sommes basées que sur les installations existant sur place pour faire nos calculs. Ce qui veut dire qu'avec l'acquisition de nouveaux matériels, certes il y'aurait un investissement conséquent mais cela contribuerait aussi à l'optimisation de la production. A coté des installations, nous avons aussi le personnel qui doit faire l'objet d'un investissement. En effet ce personnel vieillissant mériterait d'être assisté par un personnel plus jeune ce qui favoriserait un transfert de connaissance fructueux pour la production, il faut faudrait aussi penser à la protection de ces derniers car négligence de sécurité rime souvent avec manque de productivité. Enfin disons qu'une étude devrait être faite sur la modernisation totale de l'atelier pour rendre le travail plus sure et plus simple.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. E. FABART : "Manuel du Fondeur" J. B. BAILLIÈRE & fils, 1926, 416 pages.
- [2] Docteur François COLY : "RAPPORT D'INSPECTION DE LA FONDERIE", 2003, 5 pages.
- [3] Fadel NIANG : "Procédés de fabrication" Notes de cours 2007 2008.
- [4] H. LE BRIETON : "Manuel Pratique du Fondeur de Fonte" Manuels pratiques DUNOD, 1966, 224 pages.
- [5] Jean LARGETEAU : "La fonderie 2 Fusion des Métaux" Presse universitaire de France, 1975, 213 pages.
- [6] Michel GEIER : "Métallurgie de Fonderie tome 2" B. EYROLLES, 1978, 264 pages.
- [7] Revue générale de chemins de fer : "LE RAIL ET LE MONDE" DUNOD, 1989, pages 43, 44, 45 et 46.
- [8] Techniques de l'ingénieur.
- [9] Y. MANDIANG : "Aménagement d'une fonderie à la R.C.F.S." Projet de Fin d'Etudes juin 1982.
- [10] Birahim FALL : "Etude sur l'amélioration de la production de l'atelier de fonderie et des coûts de fabrication des semelles de frein" mars 2007.