

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DEPARTEMENT DU GENIE ELECTROMECHANIQUE



Gm. 0288

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception

TITRE:

AMÉLIORATION DE LA FONDERIE DE L'ALUMINIUM
ET DE SES ALLIAGES

AUTEUR: Félix Narcisse HOUEDOKOHO
DIRECTEUR: Maurice DUVAL Ing,PhD
CO-DIRECTEUR: Sérigne DIOF

DATE: JUILLET 1992

A ma mère,
A mon père,
A mes frères,
A mes soeurs,
A tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier très sincèrement Monsieur Maurice Duval, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès (EPT), qui n'a ménagé ni ses connaissances, ni ses expériences pour la réussite de nos travaux.

Notre reconnaissance va également à Monsieur Sérigne Diop de la SENELEC, pour sa totale disponibilité à répondre à toutes nos questions ainsi qu'à nos besoins aussi bien en documentations qu'en matériaux de construction dans le cadre de nos travaux sur le four de fusion.

Nous remercions de tout coeur Messieurs Lamine Lô, Mamadou DIAGNE, Alassane DIENE, Techniciens à l'EPT, et Monsieur Salif GAYE, Ingénieur de travaux chargé de laboratoire à l'EPT, pour leurs précieux concours à la réussite de nos travaux.

Nous apprécions beaucoup l'entière disponibilité des artisans chaudronniers de Thiès et les agents des Eaux et Forêts du SENEGAL, toujours prêts à apporter les réponses pertinentes à nos interrogations. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Enfin à tous ceux qui de près ou de loin ont apporté une contribution à la réussite de nos travaux nous adressons nos sincères remerciements.

SOMMAIRE

Ce rapport présente les études que nous avons menées sur l'amélioration de la fonderie des alliages d'Aluminium. Ces études visent à résoudre les différents problèmes rencontrés dans ce secteur et qui entravent dans une certaine mesure son développement dans la plupart des pays africains. Elles peuvent être divisées en quatre grandes parties.

La première partie concerne l'enquête sur le terrain en vue du recensement et de l'analyse des différents problèmes qui entravent le développement du secteur de la fonderie des alliages d'Aluminium. Nos travaux ont débouché sur l'identification de deux catégories de problèmes. D'abord les problèmes de la fusion, qui se manifestent par l'oxydation et le gazage du métal liquide; Ensuite les défauts de fonderie tels que les retassures, les criques, les piqûres ...etc

La deuxième partie, présente les solutions aux différents problèmes identifiés dans la première partie. Elle présente d'une part dans son intégralité l'ensemble du processus de conception et de réalisation d'un prototype du four capable de réduire à des degrés acceptables l'oxydation et le gazage du métal fondu. Elle se termine par une liste de procédures de lutte contre les défauts de fonderie, qui sont particulièrement nuisibles aux propriétés mécaniques.

La troisième partie traite des perspectives d'avenir qui s'offrent au secteur de la fonderie artisanale. Celles-ci se présentent d'abord sous l'aspect de la diversification des pièces moulées. La conclusion de ce premier point est nette: les pièces moulées embrassent la plupart des activités de l'HOMME depuis les pièces décoratives jusqu'aux technologies de pointe en passant par l'agriculture, l'aéronautique ...etc. Elle se termine par un bref aperçu sur la fabrication assistée par ordinateur des pièces moulées.

Enfin la dernière partie présente les discussions, conclusions et recommandations sur les résultats de nos travaux.

TABLE DES MATIERES

	Pages
Page titre.....	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Sommaire.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	x
Introduction.....	1
Chapitre I: Problèmes de la fonderie des alliages d'Aluminium	3
I°) Les problèmes liés à la fusion.....	4
1°) Composition correcte.....	5
2°) Oxydation des bains.....	5
3°) Absorption des gaz.....	6
4°) Grossissement du grain.....	7
5°) Conditions de fusion des alliages d'aluminium dans la fonderie artisanale.....	7
II°) Les défauts de fonderie.....	8
1°) Les défauts provenant de l'outillage.....	8
2°) Les défauts dûs à la mauvaise venue de la pièce.....	9
3°) Les irrégularités de surface.....	9
4°) Pièces déformées et voilées.....	10
5°) Les retassures.....	11
6°) Les piqûres.....	11
7°) Les soufflures.....	12
8°) Les grains ou points durs.....	12
Chapitre II: Conception du four de fusion.....	14-A
I°) Définition du problème.....	14
II°) Objectifs de la conception.....	15
III°) Critères d'évaluation.....	16

IV°)	Recherche de solutions.....	16
V°)	Etude de faisabilité.....	26
VI°)	Choix de la solution finale.....	31
Chapitre III: Dimensionnement du four de fusion.....		33
I°)	Evaluation des besoins en chaleur.....	34
1°)	Notation.....	34
2°)	Chaleur utile.....	34
3°)	Estimation des pertes.....	35
4°)	Evaluation de la quantité de chaleur totale.....	35
II°)	Calcul de la combustion.....	36
1°)	Détermination des quantités de gaz théoriques...	36
2°)	Détermination des quantités de gaz réelles.....	38
3°)	Détermination du débit du combustible.....	39
III°)	Dimensionnement du four.....	40
1°)	Dimensionnement de la chambre de fusion.....	40
2°)	Dimensionnement de la chambre de combustion.....	41
3°)	Dimensionnement de la chambre de soufflage.....	42
4°)	Dimensionnement des parois réfractaires.....	43
5°)	Calcul de l'échangeur de chaleur.....	44
6°)	Calcul de la voûte.....	51
7°)	Calcul de la bouche d'alimentation en charbon...	56
IV°)	Calcul des ventilateurs.....	57
1°)	Ventilateur d'insufflation.....	57
2°)	Ventilateur de tirage.....	58
V°)	Estimation du rendement global du four.....	58
Chapitre IV: Evaluation économique.....		61
I°)	Gamme de fabrication	62
II°)	Coût de fabrication.....	65
III°)	Avantages du four.....	66
Chapitre V: Remèdes aux problèmes de fonderie		
des alliages d'Aluminium.....		68
I°)	Recherche de la composition correcte	68
1°)	Composition des charges.....	68

2°) Enrichement ou appauvrissement d'un élément en cours de fusion.....	69
3°) Hétérogénéité du bain	70
4°) Température et temps de fusion.....	71
II°) Remèdes contre les défauts de fonderie.....	71
1°) Les défauts provenant de l'outillage.....	72
2°) Les défauts dûs à la mauvaise venue de la pièce.	73
3°) Les irrégularités de surface.....	73
4°) Pièces déformées et voilées.....	73
5°) Les retassures.....	74
6°) Les piqûres.....	74
7°) Les soufflures.....	74
8°) Les grains ou points durs.....	74
III°) Réparation des défauts.....	74
IV°) Traitement des alliages à l'état liquide.....	75
1°) Protection des bains.....	76
2°) Désoxydation.....	76
3°) Affinage.....	77
4°) Dégazage.....	77
V°) Mise au point des sables	78
1°) Sable de moulage.....	78
2°) Sable de noyautage.....	80
Chapitre VI: Perspectives d'avenir de la fonderie artisanale.....	82
Chapitre VII°) Recommandations et conclusion	85
I°) Recommandations.....	86
II°) Conclusion.....	87
Annexe 1: Tableau des principaux alliages d'Aluminium.....	A1
Annexe 2: Dessin de définition du four	B1

Annexes3: Extrait de la norme française	D1
Bibliographie.....	E1

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure # 1: Four à résistance	18
Figure # 2: Four à induction	19
Figure # 3: Four à charbon sans préchauffage	21
Figure # 4: Four à charbon avec préchauffage latérale	23
Figure # 5: Four à charbon avec préchauffage à la base	24
Figure # 6: Four à combustible liquide ou gazeux	25
Figure # 7: Modèle de calcul de l'échangeur de chaleur	45
Figure # 8: Modèle de calcul du contre-poids	54
Figure # 9: Porte de l'orifice d'extraction des cendres	56
Figure # 10: Modèle de calcul des pertes de chaleur	59

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau # 1: Critères d'évaluation	16
Tableau # 2: Synthèse de l'étude de praticabilité	30
Tableau # 3: Matrice de décision	32
Tableau # 4: Constituants du charbon de bois	38
Tableau # 5: Caractéristiques des gaz de combustion	49
Tableau # 6: Synthèse du calcul des pertes de charge	57
Tableau # 7: Gamme de fabrication de l'échangeur de chaleur ..	62
Tableau # 8: Coût de fabrication du four	65
Tableau # 7: Constitution des sables de moulage	80
Tableau # 8: Constitution des sables de noyautage	81

INTRODUCTION

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans la plupart des secteurs d'activités de l'HOMME depuis l'agriculture jusqu'à l'industrie de pointe en passant par l'automobile, le bâtiment, l'industrie lourde ...etc. Ils ont contribué au développement de secteurs entiers tel l'aéronautique. Cet emploi généralisé de l'aluminium et de ses alliages résulte de leurs propriétés mécaniques, physiques et électriques .

La faible densité de l'aluminium et de ses alliages est une propriété tellement importante que c'est elle qui donne lieu au plus grand nombre d'applications de ces métaux.

La conductibilité thermique de l'aluminium le place immédiatement après l'or, l'argent et le cuivre. Son utilisation pour les casseroles le prouve largement.

la conductibilité électrique de l'aluminium et de ses alliages est après, la densité, la propriété physique la plus utilisée dans l'application de ces métaux.

L'aluminium présente également des propriétés optiques intéressantes. Son pouvoir réfléchissant varie en lumière blanche de 0,75 à 0,80. On l'utilise pour le revêtement des miroirs.

Dans la plupart des applications le moulage tient une place prépondérante. Il consiste à injecter le métal liquide dans un moule en sable, en coquille ou métallique, de façon à obtenir des

pièces épousant, au retrait près, l'empreinte gravée dans le moule. On distingue le moulage par gravité et le moulage sous pression.

Cette prépondérance du moulage s'explique par le peu d'équipements requis par ce procédé relativement aux autres formes de mise en oeuvre des métaux tels l'usinage, le laminage ... etc. Et c'est là une opportunité pour les pays en voie de développement de s'impliquer activement dans la mise en oeuvre des métaux et donc de combler un temps soit peu leurs retards par rapport aux pays développés surtout que les ressources ne manquent pas.

Malheureusement le procédé n'a pas connu de développement dans les pays en voie de développement surtout au niveau de la fonderie artisanale en raison de différents problèmes que les fondeurs ne parviennent pas à résoudre convenablement. Ces problèmes conduisent à des coûts de production élevés (du fait des nombreux rebuts occasionnés) et une production limitée à des pièces simples (marmites, cuillère ...). Ce qui enlève toute compétitivité au secteur malgré les qualités indéniables de l'aluminium et de ses alliages.

Il importe de donc résoudre les problèmes qui assaillent le secteur en vue de permettre son développement. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent projet.

CHAPITRE I

PROBLEMES DE LA FONDERIE
DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les problèmes du secteur peuvent être répartis en deux catégories:

les problèmes liés à la fusion du métal et les problèmes liés au moulage.

I°) LES PROBLEMES LIES A LA FUSION

Tous les métaux et alliages exigent pour leur fusion des processus et des matériaux répondant à certaines exigences découlant de leurs propriétés spécifiques. L'aluminium et ses alliages, bien qu'ayant des températures de fusion et de coulée inférieures à celles des métaux ferreux ou cuivreux, n'échappent pas à cette règle.

Un métal fondu de qualité doit avoir une composition chimique entrant dans les tolérances bien définies (exemple NF A.57.702) et ne doit pas être altéré physiquement par les conditions mêmes de la fusion.

Les principales propriétés spécifiques de l'aluminium et de ses alliages à l'état liquide étant la facilité d'oxydation, l'absorption de gaz et l'action sur le fer, les principes généraux de la fusion conduiront donc tout naturellement à rechercher :

- Une composition correcte
- L'absence d'oxyde dans le métal
- Une teneur suffisamment faible en gaz

- Recherche d'un grain fin.

1°) Composition correcte

En dehors des compositions prévues et spécifiant la teneur en éléments à titre d'impuretés, certains éléments dissous peuvent avoir une influence néfaste sur les caractéristiques recherchées. Il s'agit surtout du fer et du magnésium.

Le fer est un élément généralement nuisible, même pour les teneurs faibles (0,3 à 0,4 %). Il forme, avec l'aluminium, le composé Al_3Fe à structure aiguillée diminuant les caractéristiques mécaniques en particulier l'allongement $A\%$ et la résistance à la rupture R , et provoquant des porosités.

Le magnésium est un élément très oxydable, il tend donc à disparaître de la composition sous forme d'oxyde.

2°) Oxydation des bains

L'oxydation des alliages d'aluminium est lente à froid mais très rapide à l'état liquide. Ce phénomène est accentué parce que la pellicule d'alumine déjà formée est poreuse à l'oxygène de l'air et tend de ce fait à s'épaissir assez rapidement. L'alumine a une densité (3,2) nettement supérieure à celle de l'aluminium mais sa forme spongieuse et sa tension superficielle élevée font qu'elle ne décante pratiquement pas dans le bain. Elle apparaît sous forme de mousse, points durs, peaux, crasses qui sont la cause de nombreux

défauts en particuliers la porosité et la fragilité. Les alliages sont d'autant plus sensibles aux oxydes que leurs composants sont eux-mêmes sensibles à l'oxydation. C'est le cas des alliages contenant le magnésium.

3°) Absorption des gaz

L'aluminium et ses alliages présentent une très nette tendance à absorber l'hydrogène et plus faiblement, le méthane, l'anhydride carbonique, l'oxygène, l'oxyde de carbone et l'azote (ce dernier peut former un nitrure d'aluminium AlN lorsque la température du bain est portée à plus de $800^{\circ}C$)

C'est surtout l'absorption d'hydrogène qui est vraiment néfaste, d'autant que ce gaz est présent sous forme d'humidité dans presque tout ce qui entoure la fusion (fondant, creuset, réfractaire, métal etc...). Il est à noter que tout contact des alliages d'aluminium liquide avec l'eau donne une réaction provoquant deux défauts:

- Gazage par rapport à l'hydrogène
- Oxydation par rapport à l'oxygène.

La solubilité des gaz en général et de l'hydrogène en particulier, diminue avec la température. Ces gaz tendent donc à s'échapper au moment du refroidissement et ils peuvent, ce qui est souvent le cas, rester prisonniers à l'intérieur de la masse et apparaître dans la structure sous forme de microporosités. Ce qui

affecte les caractéristiques mécaniques, l'étanchéité et l'aspect de surface des pièces.

4°) Grossissement du grain

Les surchauffes, les refusions nombreuses, le maintien prolongé à l'état liquide, tendent à provoquer un grossissement de grain. Les gros grains diminuent les caractéristiques mécaniques et l'aptitude à l'étanchéité des pièces.

5) Condition de fusion des alliages d'aluminium dans la fonderie artisanale

De façon générale, les procédés de fusion employés dans les pays sous-développés, ne permettent pas toujours de préserver ces principes fondamentaux.

Une petite analyse de ces procédés montre que :

- les fondeurs ne prennent aucune précaution spécifique pour la composition des charges;
- les fondeurs accordent très peu d'importance au nettoyage des fours et des creusets;
- Le temps de fusion est relativement long, en raison des faibles rendements des fours utilisés.
- aucune précaution n'est prise contre l'absorption des gaz.
- La température de coulée n'est pas contrôlée.

Tout cela favorise une mauvaise fusion et conduit inéluctablement à des défauts de fonderie.

II - LES DÉFAUTS DE FONDERIE

Nous n'envisagerons ici que les défauts "courants" constatés sur les pièces de série. Ces défauts peuvent se classer en deux groupes :

- Les défauts externes, que l'on constate sur la pièce après la coulée;
- Les défauts internes, les plus dangereux, que l'on ne peut déceler que par radiographie ou par cassure aux endroits supposés défectueux.

Ils peuvent avoir deux origines :

- Les facteurs métallurgiques
- Les facteurs de moulage.

En pratique, ces facteurs n'interviennent que très rarement seuls, leurs actions sont presque toujours combinées.

On distingue :

1°) Les défauts provenant de l'outillage

Ils sont dûs au retrait des alliages de fonderie. Ils se manifestent surtout dans les pièces d'assez grandes dimensions, comportant de nombreux noyaux intérieurs. Le retrait ne s'effectue pas régulièrement dans toutes les dimensions et peut être contrarié par la présence de noyaux, refroidisseurs.

2°) Les défauts dûs à la mauvaise venue de la pièce

Ils apparaissent souvent sous forme d'un manque de métal, de forme diverse, plus ou moins grande, appelé non-venue. Ils peuvent aussi se manifester sous forme de fissures appelées reprises. On en distingue généralement deux types: la reprise froide, à bords arrondis et la reprise chaude, à bords nets.

La faible densité des alliages d'Aluminium et aussi la forte tension superficielle de la pellicule d'alumine qui recouvre toujours le métal à l'état liquide, facilite ces défauts.

Les principales causes sont :

- Température de coulée trop basse
- Température de coulée trop élevée
- Ventilation insuffisante du moule
- Mauvaise alimentation du moule
- Coulée interrompue
- Mauvais choix de l'alliage.

3°) Les irrégularités des surfaces

Ces défauts peuvent se présenter différemment : galles, gouttes froides, flou, pièces voilées.

a°) Galles

Ce sont des déformations de la surface des pièces, provoquées par des décollements du sable de la parois du moule ou du noyau. On distingue les galles franches et les galles volantes.

Les sables fins ou les sables trop humides en sont les principales causes.

b°) Gouttes froides

Elles se présentent sous forme d'inclusion de parties métalliques présolidifiées entraînées lors de la coulée de la pièce. La principale cause réside dans la disposition et la section des différentes coulées.

c°) Flou

C'est un défaut de surface apparenté aux reprises. Il nuit à la bonne présentation de la pièce. Un excès d'humidité en est la principale cause.

4°) Pièces déformées et voilées

Ces défauts proviennent d'un refroidissement irrégulier des différentes parties de la pièce, de la résistance des noyaux ou du moule s'opposant au retrait, enfin du traitement thermique.

5°) Les retassures

Les retassures sont dues au changement de volume de la pièce coulée jusqu'à sa solidification complète. Elles peuvent être externes ou internes. Les alliages à grand intervalle de solidification donnent le plus souvent des retassures externes. Par contre dans les alliages eutectiques ou proches de l'eutectique, pour lesquels la température reste constante pendant toute la durée de la solidification, les parois externes, qui se solidifient les premiers, tendent à localiser la contraction au sein du métal sous forme de retassures ou microretassures. La présence de retassure réduit fortement les caractéristiques mécaniques de la pièce considérée.

6°) Les piqûres

Elles sont dues au dégagement partiel pendant la solidification, des gaz qui se trouvent en dissolution dans le métal liquide. Ces gaz peuvent avoir diverses origines (métal, fusion, moule).

Dans les alliages eutectiques ou proches de l'eutectique, les piqûres prennent habituellement une forme spécifique : elles ne communiquent généralement pas entre elles. Dans les alliages à grand intervalle de solidification, les piqûres provoquent des cavités de forme irrégulière, qui épousent le contour des cristaux.

7°) Les soufflures

Les soufflures se présentent sous forme de cavités ouvertes ou fermées, résultant d'air emprisonné à la coulée, ou de vapeur dégagées à travers le métal liquide par le moule ou les noyaux. On remarque en général deux sortes de soufflures : celles qui se produisent lorsque le métal est encore fluide et celles qui se forment lorsque le métal est devenu pâteux. Les premières sont les cavités le plus souvent fermées, à parois légèrement rugueuses, principalement pour les soufflures importantes, car il y a eu passage de gaz au travers du métal jusqu'à la fin de la solidification. Les secondes sont lisses, le plus souvent ouvertes et s'expliquent par la résistance du métal pâteux qui ne permet plus aux gaz de le traverser, mais simplement de le déformer.

8°) Grains ou points durs

Les grains ou points durs sont de petits cristaux, généralement rassemblés en amas, qui se rencontrent aussi bien à la surface des moulages qu'à l'intérieur du métal. Les grains durs, rassemblés, apparaissent sous forme de taches grisâtres, dont les éléments sont plus ou moins foncés. Ils sont constitués pour la plupart d'oxydes.

Voilà présenté brièvement l'ensemble des défauts de fonderie en ce qui concerne le moulage en sable.

De façon générale on peut, eu égard aux causes des différents défauts constatés, conclure que la qualité de la fusion du métal tient une part importante dans l'ensemble des difficultés du procédé du moulage en sable. Or, cette qualité dépend pour une large part des performances du four utilisé pour la fusion. C'est pourquoi, notre démarche consistera dans un premier temps à concevoir un four capable de palier les insuffisances des fours actuellement utilisés par les artisans. Ensuite nous essaierons de dégager des procédures simples qui permettent, ayant un métal de qualité, de palier les défauts de fonderie.

CHAPITRE II

CONCEPTION DU FOUR DE
FUSION

I°) Définition du problème

Dans la fusion de l'aluminium et de ses alliages, deux points essentiels sont à considérés :

- L'absorption de gaz
- L'oxydabilité du bain.

Pendant l'opération de fusion, ces deux points dépendent de la température, de la durée, de la surface du bain, de l'atmosphère du four et de la pression qui y règne.

Dans la fonderie artisanale, les fours utilisés ne permettent pas de satisfaire ces points convenablement pour diverses raisons parmi lesquelles le faible rendement des fours utilisés par les artisans tient une place prépondérante. Ce faible rendement a deux conséquences majeures :

- Augmentation du temps de fusion du métal, ce qui favorise l'absorption de gaz et l'oxydation du métal fondu.
- Augmentation de la consommation en combustible.

En outre, la plupart de ces fours n'autorisent pas une régulation de la température. Ce qui pose le problème de la température de coulée.

Il apparaît donc que ces fours ne permettent pas d'assurer une bonne qualité au métal fondu.

Coception du four de fusion

Notre objectif sera alors de concevoir un four de fusion capable d'assurer une fusion excellente pour l'aluminium et ses alliages.

II*) Objectifs de la conception

Le four devra satisfaire aux points suivants:

- Fusion dans un temps minimal
- précision de température
- uniformité de température
- contamination minimale du métal fondu.

A ces objectifs fondamentaux, nous devons ajouter les préoccupations des artisans. Il s'agit de:

- faible coût de fabrication
- frais d'exploitation minimum
- perte au feu minimal
- consommation minimale
- main-d'oeuvre de conduite et de surveillance minimale
- matériaux de fabrication disponible sur le marché
sénégalais
- encombrement réduit.

III°) Critères d'évaluation

Critères	Pondération %
Fusion dans temps minimal	10
Uniformité des températures	10
Degré de contamination (gaz et oxydes)	15
Coût de fabrication	20
Frais d'exploitation	10
Facilité de chargement	5
Contrôle des températures	10
Contrôle de pression	5
Degré d'encombrement	5
Sécurité	10

IV°) RECHERCHE DE SOLUTION

L'objectif que nous cherchons est d'aboutir à un four répondant au mieux aux caractéristiques et critères que nous avons définis dans les paragraphes précédents. Nous allons donc laisser libre cours à notre imagination afin de répertorier toutes les idées qui peuvent nous permettre d'atteindre nos objectifs.

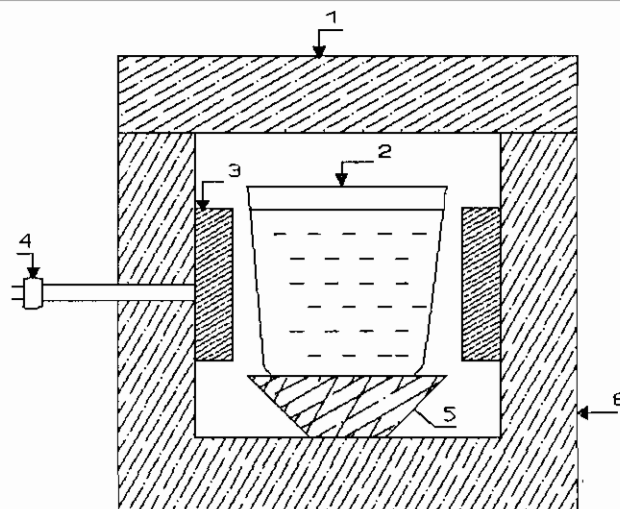
Nous nous inspirerons également des modèles de fours de fusion existants.

Coception du four de fusion

Ce travail nous a permis d'aboutir à plusieurs solutions que nous présentons dans le paragraphe suivant :

1°) SOLUTION #1: Four à résistance

Il s'agit d'un four cylindrique. Le chauffage est assuré par les résistances métalliques logées dans les parois latérales. La chaleur est transmise à la charge par radiation et conduction. La charge est contenue dans un creuset en matériau approprié. Le chargement des alliages à fondre s'effectue par le haut du four. La partie interne du four est isolée du milieu ambiant par des parois réfractaires doublées d'un calorifugeage approprié.

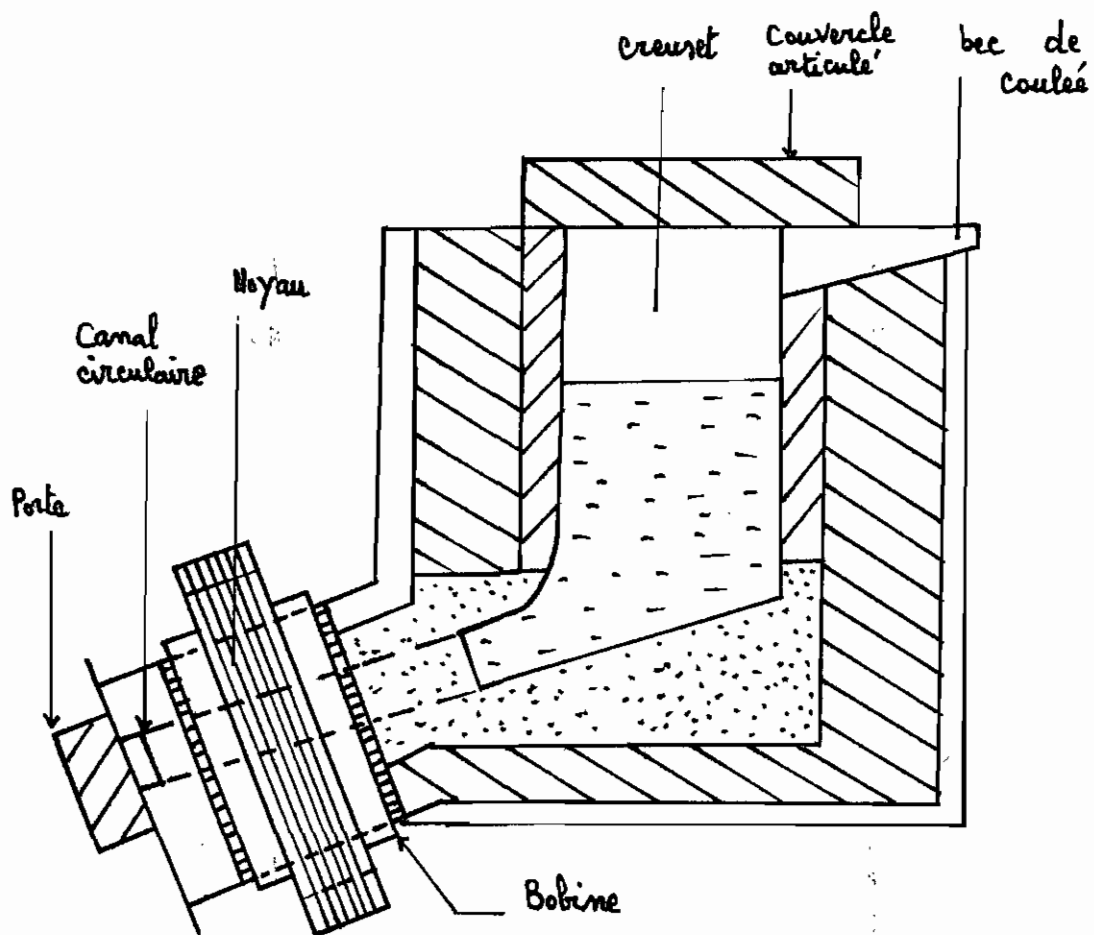
**LEGENDE**

- 1: Couvercle
- 2: creuset charge
- 3: Résistances chauffantes
- 4: Fils de branchement
- 5: Support du creuset
- 6: Parois externe

Coception du four de fusion

2°) SOLUTION #2: Four à induction

Dans ce four, la chaleur produite se dégage à l'intérieur du métal par effet joule en basse fréquence et par courant de Foucault en haute fréquence. Le creuset est intégré à la structure du four. Le métal fondu coule à travers un tuyau dans un deuxième creuset de récupération qui sert pour les différentes coulées du métal.

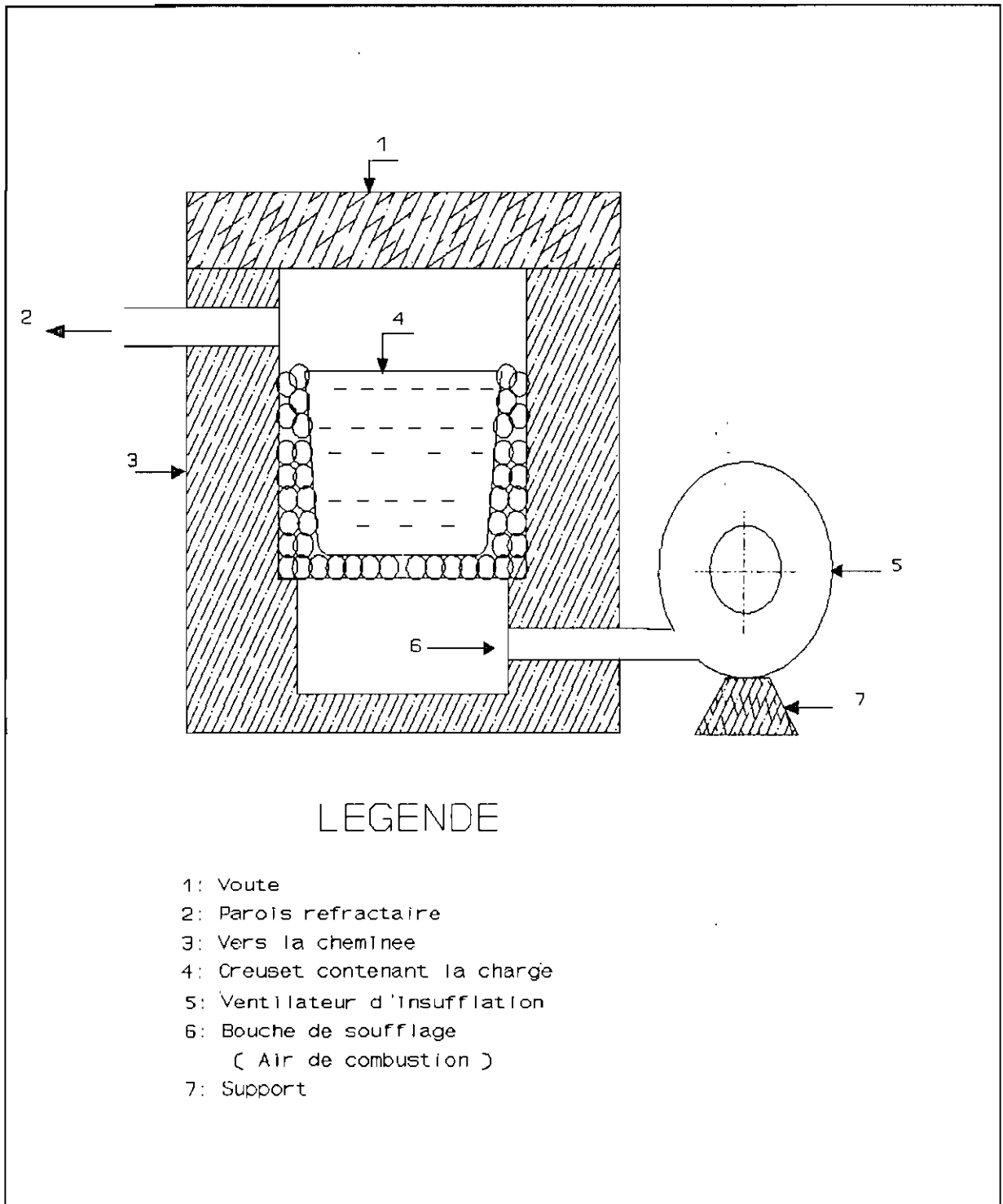


Coception du four de fusion

3°) SOLUTION #3: Four à charbon

Il s'agit d'un four cylindrique comportant essentiellement deux chambres : la chambre de soufflage et la chambre de combustion. Dans ce four, la charge est contenue dans un creuset posé dans la chambre de combustion. Les cokes disposés autour du creuset transmettent à ce dernier, par radiation et conduction, la chaleur issue de leur combustion. L'ensemble creuset-coke est posé sur une grille en acier. L'air nécessaire à la combustion est soufflé sous la grille par un système de ventilation.

Après la combustion les cendres redescendent au fond de la chambre de soufflage tandis que les gaz de combustion s'échappent par le tuyau d'évacuation en haut de la chambre de combustion. Les deux chambres sont isolées du milieu ambiant par des parois réfractaires doublées d'un calorifugeage approprié.



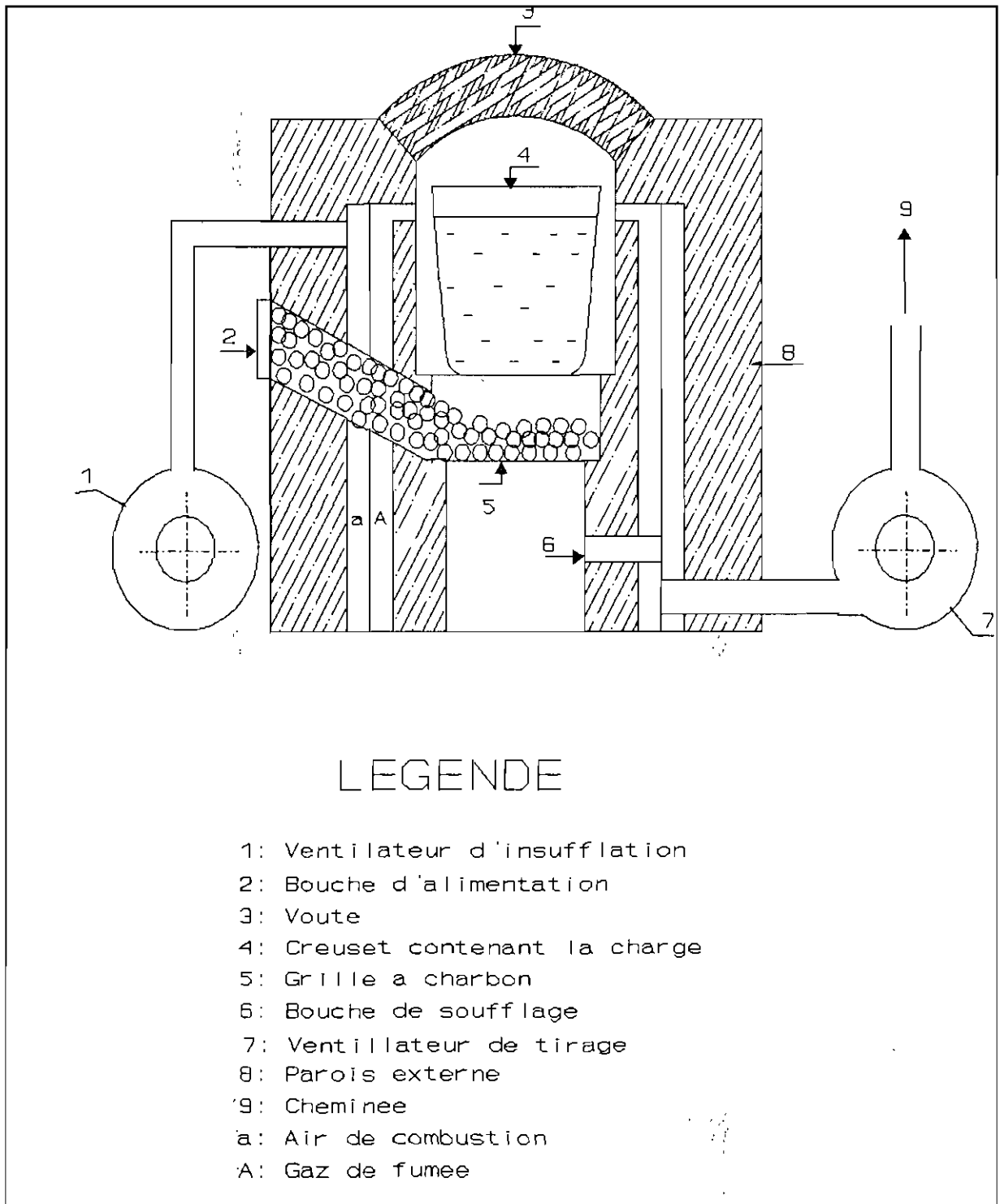
Coception du four de fusion

4°) SOLUTION #4: Four à charbon

Dans ce four, on distingue 4 parties :

- Le système de préchauffage de l'air de combustion
- La chambre de soufflage
- La chambre de combustion
- La chambre de fusion.

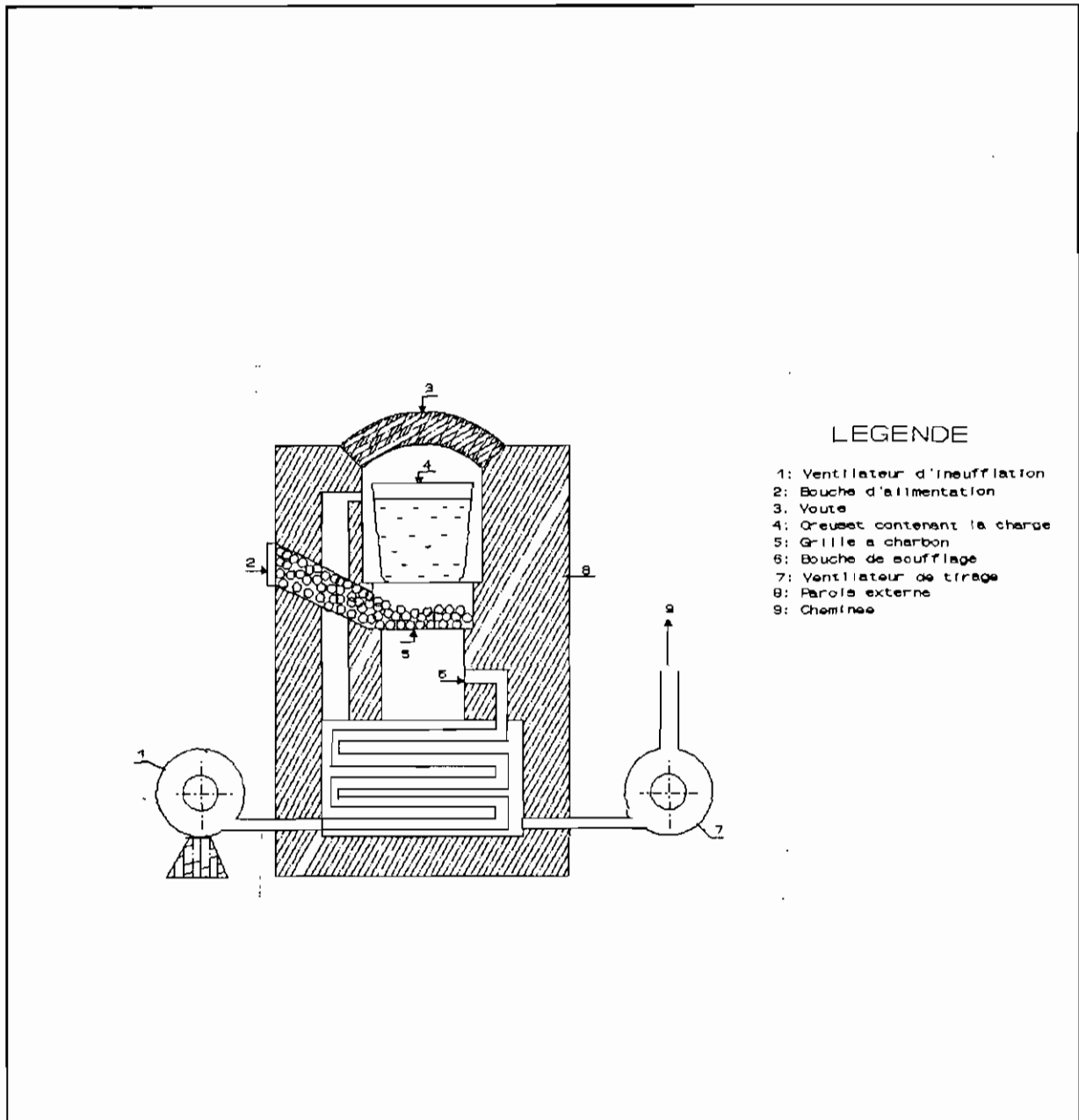
Les cokes sont disposés sur une grille. L'air nécessaire à la combustion est soufflé à partir de trois (3) bouches situées sous la grille à charbon. Après la combustion, les cendres descendent au fond de la chambre de soufflage tandis que les gaz issus de la combustion remontent vers la chambre de fusion où ils cèdent une partie de leur chaleur à la charge contenu dans le creuset. Ils sortent de la chambre de fusion par l'orifice d'échappement puis rentrent dans l'échangeur de chaleur qui assure le préchauffage de l'air de combustion qui sera soufflé plus tard dans la chambre de soufflage. L'ensemble est isolé, du milieu ambiant par des parois réfractaires doublées d'un calorifugeage adéquat. Le couvercle du four est muni d'un contre-poids qui en facilite la manipulation.



Coception du four de fusion

5°) SOLUTION #5

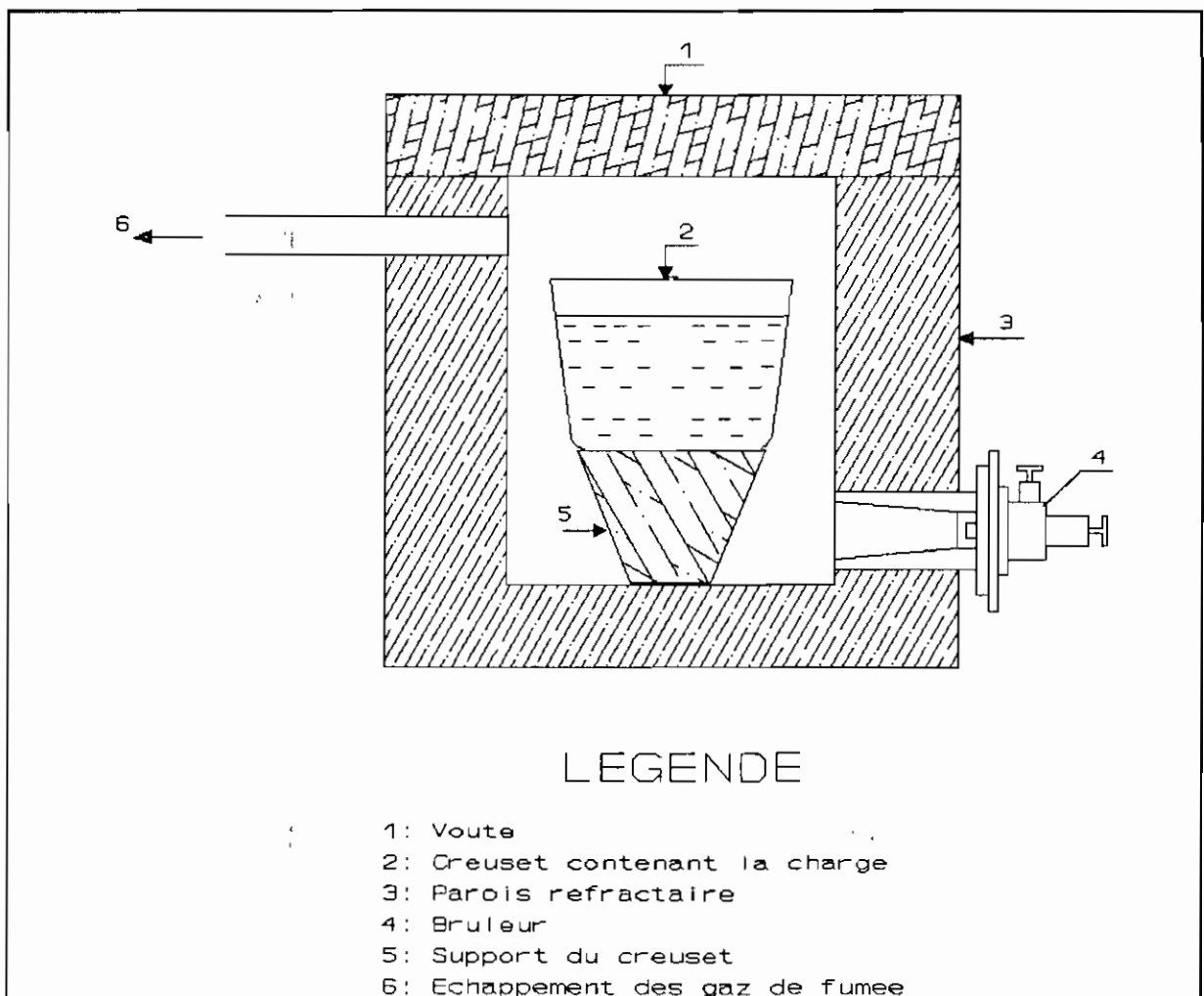
Elle est fondée sur le même principe que la solution #4. Cependant dans ce four l'air de combustion est préchauffé dans une chambre située à la base du four.



Coception du four de fusion

6°) SOLUTION #6 : Four à combustible liquide ou gazeux

Dans ce four l'air de combustion et le combustible sont préchauffés par les gaz issus de la combustion. Par la suite ils sont introduits dans les proportions requises, dans le brûleur. Les gaz issus de la combustion montent et transmettent une partie de leur chaleur au creuset dans la chambre de fusion. Un système de récupération permet de les utiliser pour préchauffer l'air de combustion et le combustible.



Coception du four de fusion

V°) ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Notre imagination et nos connaissances nous ont permis de dégager les situations que nous venons de présenter. Cependant il n'est pas certain que ces solutions trouvées répondent d'une part aux critères que nous nous étions fixés au préalable et d'autre part aux contraintes technique et scientifique. C'est pourquoi nous allons procéder à l'étude de faisabilité de chaque solution afin de dégager les solutions qui ne se heurtent pas à des problèmes de réalisation et qui satisfont :

- les objectifs fixés
- les contraintes établies.

Cette étude se fera à travers l'analyse de chacune des solutions au regard des facteurs :

- physique (praticabilité de la réalisation scientifique et technologique)
- économique (coût de fabrication, coût d'exploitation)
- Qualité du métal fondu (degré de gazage, degré d'oxydation)
- facteurs environnementaux (sécurité, ergonomie)

1°) SOLUTION #1

Elle présente l'avantage d'offrir une régulation excellente de la température et une absence totale de gaz dans le métal fondu. Cependant le four doit être très bien calorifugé. Ce qui conduit à un très grand encombrement.

Coception du four de fusion

En outre la consommation électrique est importante par ces fours et le temps de fusion est relativement long du fait de leur grande inertie. Il en résulte des coûts de fabrication d'exploitation très élevés.

2°) SOLUTION #2

Le mode de chauffage de ce four indique un volume minimal des réfractaires et calorifuges. Ce volume très réduit ne crée qu'une inertie thermique faible et les montées en températures sont obtenues rapidement avec une dépense d'énergie unitaire moindre que dans le cas précédant.

Par contre, ce four ne peut s'envisager que pour une marche continue, sans changement d'alliage et ils doivent rester en marche à allure réduite, avec réserve de métal liquide, pendant les arrêts de l'atelier.

En outre il faudra prendre des précautions contre :

- les arrêts prolongés de courant.
- l'encrassage des canaux, qui nécessite un nettoyage périodique.

Par ailleurs le métal est non gazé. Mais le coût de fabrication demeure toujours élevé.

3°) SOLUTION #3

Ce four présente des difficultés de conduite (réglage de température et surveillance continue) et une manutention délicate des creusets.

Le métal obtenu est légèrement gazé et il faut prendre soin d'éviter pendant la fusion les points chauds locaux et les "coups d'air froid" sur le creuset, en surveillant la descente du coke dans l'espace creuset-réfractaire. De plus le métal peut se renverser sur les braises; ce qui provoque des explosions très violentes.

4°) SOLUTION #4

Ce four présente aussi des difficultés de conduite. Cependant il offre les avantages suivants:

- séparer la chambre de combustion de la chambre de fusion: ce qui facilite la manutention du creuset.
- préchauffer l'air de combustion: ce qui élimine les risques de coup d'air froid sur le creuset.

En outre ce four présente l'avantage de pouvoir s'adapter à l'utilisation de gaz ou de fuel par l'installation de brûleurs dans la chambre de combustion. Le métal est légèrement gazé.

5°) SOLUTION #5

La principale difficulté, dans la réalisation de ce four, réside dans la réalisation de la chambre de préchauffage.

Il faudrait faire circuler l'air de combustion sur une grande distance avant de prétendre à des gains de températures acceptables. De ce fait la chambre devrait avoir de grandes dimensions.

Sur les autres points le four est semblable au four de la solution #4.

6°) SOLUTION #6

Le principal inconvénient réside dans le fait qu'ils ont tendance à donner un métal gazeux. On peut améliorer le degré de gaz dissous par un réglage et une orientation correcte des brûleurs. Mais cela se fait au détriment du rendement, de la capacité horaire de production et de l'oxydation du métal liquide.

7°) tableau récapitulatif de l'étude de faisabilité

(confère page suivante)

TABLEAU DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE PRATICABILITÉ

	ASPECTS PHYSIQUES	ASPECTS ÉCONOMIQUES	QUALITÉ DU MÉTAL FONDU	ASPECTS Environnementaux	DECISION
	Scientifiquement et Techniquement Réalisable	Coût de fabrication Et d'exploitation Supportable pour Les petites entreprises	Degré de gazage et Degré d'oxydation Conformés aux Normes	Sécurité et Ergonomie Conformés aux Normes	
SOLUTION #1	OUI	Non, en raison du coût des résistances et coût de l'énergie électrique durant l'exploitation	OUI	OUI	Rejetée a cause du prix
SOLUTION #2	OUI	Non, en raison des coût d'exploitation	OUI	OUI	Rejetée a cause du prix
SOLUTION #3	OUI, mais conduite difficile de la fusion et risque de points chauds et de coup d'air froid	OUI	OUI	OUI, mais risque d'éclaboussement du métal liquide sur les braises	Rejetée a cause des difficultés d'exploitation et de la sécurité
SOLUTION #4	OUI	OUI	OUI	OUI	RETENUE
SOLUTION #5	OUI, mais encombrant en raison des dimensions de la de prechauffage	OUI	OUI	OUI	RETENUE
SOLUTION #6	OUI	Non, en raison des brûleurs et de leurs entretiens	OUI, si la fusion se fait sous flux	OUI	RETENUE

VI°) CHOIX DE LA SOLUTION FINALE

L'étude de praticabilité nous a permis de dégager pour chaque solution trouvée l'ensemble des avantages et des inconvénients eu égard à nos objectifs de départ.

De cette étude nous remarquons que seules un nombre réduit de ces solutions satisfont aux critères de faisabilité. Il s'agit des solutions #4, #5 et #6. C'est donc de ces 3 solutions que nous dégagerons la solution finale. La sélection de celle-ci se fera à l'aide de la matrice de décision.

1°) Matrice de décision

(Confère page suivante)

On remarque que la solution #4 présente le plus grand total pondéré. En vertu du principe de la matrice de décision, c'est elle qui constitue notre solution finale.

MATRICE DE DECISION

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Ponderation ()	10	10	15	20	5	5	5	10	10	10	100
Solution #4	80	85	80	85	90	90	90	90	90	90	8600
Solution #5	70	80	80	75	80	85	75	75	70	90	67925
Solution #6	85	80	55	60	70	85	80	80	65	75	7375

- (0): Critères d'évaluation détaillé
- (1): Fusion dans un temps minimal
- (2): Uniformite de la température
- (3): Degré de contamination du métal
- (4): Coût de fabrication
- (5): Dépenses d'exploitation
- (6): Facilité de chargement
- (7): Degré de contrôle de la température
- (8): Degré de contrôle de la pression
- (9): Degré d'encombrement
- (10): Sécurité
- (11): Satisfaction globale aux critères

CHAPITRE III

DIMENSIONNEMENT DU FOUR
DE FUSION

I°) Évaluation des besoins en chaleur

1°) Notation

- Q_T : Quantité de chaleur totale apportée
 Q_U : Quantité de chaleur utile apportée
 Q_A : Quantité de chaleur absorbée par les alliages
 Q_C : Quantité de chaleur absorbée par le creuset
 Q_p : Quantité de chaleur perdue par différentes sources (parois, rayonnement lors de l'ouverture du four etc...)
 M : Masse d'alliage à fondre
 m : Masse du creuset
 C : Chaleur spécifique des alliages d'aluminium
 c : Chaleur spécifique du creuset
 t_0 : Température ambiante
 t_f : Température de fusion des alliages
 t_c : Température de coulée des alliages
 L : Chaleur latente de fusion des alliages d'aluminium

2°) ÉVALUATION DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR UTILE

La chaleur utile comprend la chaleur fournie au creuset et la chaleur fournie aux alliages pour les amener à la température de coulée:

$$Q_A = MC(t_f - t_0) + ML + MC(t_c - t_f)$$

$$Q_c = mc(t_c - t_0)$$

APPLICATION NUMÉRIQUE

D'après les valeurs indiquées dans la Thermiques appliquée au four industriels Tome 1 et 2 de W. HEILIGENSTAEDT nous avons:

$L=259$ kcal; $C=0,26$ kcal/kg; $c=0,12$ kcal/kg (creuset en fonte)

$t_f=650$ °C ; $t_c=800$ °C

D'autre part en considérant:

$M = 10$ kg ; $m = 0.5$ kg; $t = 30$ °C;

On obtient:

$$Q_A = 3118 \text{ kcal}$$

$$Q_c = 46,8 \text{ kcal}$$

$$Q_{U'} = 3164.8 \text{ kcal}$$

3°) Estimation des pertes

L'absence de données sur les dimensions du four, sur la nature des matériaux de sa construction etc..., dans cette phase nous oblige, à recourir à des méthodes empiriques pour ce qui concerne le calcul des pertes.

D'après les travaux de Friedrich NUBER et Karl NUBER dans Calculs thermiques des chaudières les pertes de chaleur s'évaluent environ à 80% de la chaleur utile:

$$Q_p = 0.8 * Q_{U'} = 2531.84 \text{ kcal}$$

4°) Évaluation de la quantité de chaleur totale

4°) Évaluation de la quantité de chaleur totale

Nous avons:

$$Q_T = (Q_U + Q_c + Q_p) / r$$

où r est le rendement de la combustion

D'après les tables de rendement données dans Thermique appliquée aux fours industriels de W. HEILIGENSTADT, pour le charbon de bois nous pouvons considérer un rendement de combustion de 0,482. Nous obtenons alors:

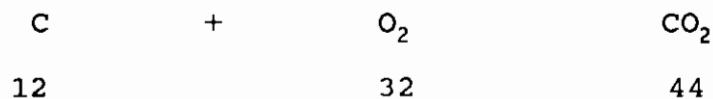
$$Q_T = 11866.25 \text{ kcal}$$

Dans la suite des calculs nous considérerons $Q_T = 12\ 000 \text{ Kcal}$.

II°) Calcul de la combustion

Le calcul de la combustion comprend le calcul de la quantité d'air nécessaire à la combustion et le calcul de la composition des gaz de combustion. Ces calculs dépendent pour une large part de la composition du charbon de bois utilisé. Le charbon de bois se compose de carbone (C%), d'humidité (E%), d'hydrogène (H%), d'oxygène (O%), d'azote (N%) de soufre (S%) de chlore (Cl%) et de gaz carbonique (CO₂%) (Source: La valorisation du charbon par Marc FERRETI)

L'équation de la combustion du carbone s'écrit:



Donc 1Kg de carbone nécessite $32/12 = 2,667 \text{ Kg}$ d'oxygène.

Dimensionnement du four de fusion

De même on peut écrire:

$$1 \text{ Kg de carbone donne } 44/12 = 3,667 \text{ Kg de CO}_2$$

En supposant que l'air est composé de 76,8 % d'azote et de 23,2 % d'oxygène, on peut écrire que l'azote amené par l'air de combustion est:

$$2,667 * 76,8 / 23,2 = 8,8 \text{ Kg}$$

La quantité d'air nécessaire à la combustion est donc:

$$M_{\text{oxygène}} + M_{\text{azote}} = 2,667 + 8,8 = 11,467 \text{ Kg.}$$

La quantité de gaz théorique:

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{N}_2} = 3,667 + 8,8 = 12,467 \text{ Kg.}$$

En procédant de manière analogue pour chacun des éléments constitutifs du charbon de bois, on peut obtenir tous les paramètres de la combustion.

Pour un charbon de bois de composition respective C%, H%, O%, N% et S% en Carbone, Hydrogène, Oxygène, Azote et Soufre nous obtenons les relations suivantes:

La quantité d'air théorique A1 nécessaire à la combustion est:

$$A1 \text{ (en kg)} = 11,47 * C + 34,48 * (H - O/8) + 4,31 * S$$

Les gaz de combustion se composent de gaz secs et de vapeur d'eau.

La quantité G1 de gaz sec s'écrit:

$$G1 \text{ (en kg)} = 12,47 * C + 26,48 * (H - O/8) + 5,31 * S + N$$

La quantité G2 de vapeur d'eau contenu dans les gaz de combustion s'écrit:

Dimensionnement du four de fusion

$$G_2 \text{ (en kg)} = 9 \cdot H + E$$

où E est la teneur en humidité du charbon de bois

Dans les calculs numériques l'absence de données sur la composition du charbon nous a amené à estimer sa composition à partir de celle du bois sec. Les compositions sont résumées dans le tableau suivant:

Humidité E%	Cendre %	Carbone C%	Hydrogène H%	Oxygène O%	Azote N%	Soufre S%	CO ₂ %
2,1	38,5	48,6	3,5	6,7	1,1	1,7	1,1

a°) Exemple de calcul

La quantité d'air théorique est:

$$A_1 = 11,47 \cdot 0,486 + 34,48 \cdot (0,035 - 0,067/8) + 4,31 \cdot 0,017 = 6,566 \text{ kg}$$

En procédant de manière analogue on retrouve les résultats suivants:

$$A_1 = 6,566 \text{ kg}$$

$$G_1 = 6,87 \text{ kg}$$

$$G_2 = 0,336 \text{ kg}$$

b°) Détermination de la quantité d'air réel

La quantité d'air calculée précédemment est la quantité juste nécessaire pour avoir une combustion complète et suppose que chaque molécule de carbone et chaque molécule d'hydrogène a à son contact

le nombre de molécule d'oxygène requis pour la réaction d'oxydation. Cela suppose un mélange parfait entre les molécules d'air et les molécules du combustible. De telles conditions sont difficilement réalisables dans la pratique. Aussi prévoit-on un excès d'oxygène pour assurer une combustion complète.

Dans le cas du charbon de bois, on recommande de prendre un excès d'air de 40% (Source: Calcul thermique des chaudières par Friedrich NUBER et Karl NUBER)

On en déduit la quantité A d'air réelle:

$$A = 1,4 * A_1 = 9,13 \text{ kg}$$

La quantité total de gaz est alors:

$$G = G_1 + G_2 + (A - A_1)$$

$$G = 9,83 \text{ kg}$$

c°) Détermination du débit du combustible

Le débit $M_{\text{combustible}}$ du combustible est fonction du pouvoir calorifique $C_{\text{combustible}}$ du combustible utilisé et de la puissance effective P_{eff} du four. Nous avons:

$$P_{\text{eff}} = Q_T / t_{\text{fusion}} \quad \text{avec } t_{\text{fusion}} \text{ la durée totale de la fusion;}$$

$$M_{\text{combustible}} = P_{\text{eff}} / C_{\text{combustible}}.$$

$$Q_T = 12 \ 000 \text{ Kcal}$$

$$t = 30 \text{ minutes}$$

Le pouvoir calorifique du charbon de bois est fonction de l'espèce du bois de base. Pour le Sénégal, les essais réalisées par

le laboratoire des Eaux et Forêts révèle que le pouvoir calorifique moyen du charbon de bois le plus courant sur le marché vaut:

$$C_{\text{combustible}} = 6300 \text{ Kcal/Kg.}$$

On obtient: $M_{\text{combustible}} = 3,81 \text{ Kg/heure.}$

Dans la suite des calculs nous considérerons $M_{\text{combustible}} = 4 \text{ Kg/heure.}$

Le débit d'air de combustion est:

$$A_T = M_{\text{combustible}} * A = 36,52 \text{ Kg}$$

Le débit de gaz de fumée est:

$$G_T = M_{\text{combustible}} * G = 39,32 \text{ Kg}$$

III°) Dimensionnement du four

1°) Dimensionnement de la chambre de fusion

La forme et les dimensions de la chambre de fusion dépendent de la forme et des dimensions du creuset d'une part et d'autre part de l'espace requis pour une bonne manipulation du creuset.

En considérant que le four sera capable de fournir 10 kg de métal liquide par demi-heure on obtient:

$$M = V$$

$$\text{donc } V = M / \rho = 10 / 2700 = 3703 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{or } V = R^2 H$$

Imposons $H = 20 \text{ cm}$ pour limiter la hauteur du four.

On obtient $R = 7,67 \text{ cm.}$

On peut prendre alors prendre un diamètre extérieur $R_{\text{ext}} = 10 \text{ cm}$ comme base de calcul pour le projet.

Dimensionnement du four de fusion

On obtient donc un creuset cylindrique de diamètre extérieur

$R_{\text{ext}} = 10$ cm et de hauteur $H = 20$ cm.

En ce qui concerne l'espace requis pour une manipulation aisée du creuset, on peut prendre un espace annulaire d'épaisseur $e = 5$ cm autour du creuset. Il en résulte que la chambre de combustion est un cylindre de diamètre $D = 30$ cm et de hauteur $H = 20$ cm.

2°) Calcul de la chambre de combustion

Les dimensions de la chambre de combustion dépendent du volume des gaz de fumée c'est-à-dire de la puissance du four. Notons $W_{\text{combustion}}$ la vitesse des gaz de fumée dans la chambre de combustion et $S_{\text{combustion}}$ la section de cette chambre. Nous avons:

$$G_T = S_{\text{combustion}} * W_{\text{combustion}}$$

Pour rester en harmonie avec les dimensions de la chambre de fusion et permettre que le creuset se repose sur un palier, nous allons imposer le diamètre D_c de la chambre de combustion :

$$D_c = 26 \text{ cm}$$

on en déduit: $W_{\text{combustion}} = 4 * G_T / (\pi D^2)$

La masse volumique des gaz de fumée dépend de la composition des gaz de fumées.

Dans le cas de la combustion du charbon de bois nous n'avons pas pu déterminer avec précision la composition des gaz de fumée. Aussi avons nous assimilé les gaz de fumée à l'air chaud pour

lequel les valeurs de la chaleur spécifique sont tabulées en fonction de la température (confère calcul thermique des chaudières de Friedrich NUBER et Karl NUBER).

On obtient à 1000 °C: $C_{\text{air}} = 0,278 \text{ Kg/m}^3$

Donc en imposant la hauteur $H_{\text{Combustion}} = 10 \text{ cm}$ on trouve:

$W_{\text{combustion}} = 0,73 \text{ m/s}$.

3°) Dimensionnement de la chambre de soufflage

Nous disposerons les bouches de soufflage à $H = 10 \text{ cm}$ au dessous de la grille à charbon.

Par ailleurs il faut prévoir, dans la chambre de soufflage, une hauteur H_{cendre} pour l'accumulation des cendres issues de la combustion des morceaux de charbon de bois. En supposant que les cendres seront débarrassées du four à la fin de chaque journée de travail, on peut choisir:

$H_{\text{cendre}} = 10 \text{ cm}$.

En ce qui concerne le diamètre D_s de la chambre de combustion, nous devons avoir à l'esprit que pour que tous les morceaux de charbon posés sur la grille participent activement à la combustion il faut qu'ils puissent recevoir convenablement l'air venu de la chambre de soufflage. L'écart entre les diamètres de la chambre de combustion et celui de la chambre de soufflage doit donc être réduit au minimum nécessaire pour supporter la grille à charbon et sa charge. On peut donc prendre:

Dimensionnement du four de fusion

$$D_s = D_c - 4 \text{ cm} = 22 \text{ cm.}$$

Nous en déduisons que la chambre de soufflage est donc un cylindre de diamètre $D_s = 22 \text{ cm}$ et de hauteur $H_s = 20 \text{ cm}$.

4°) Dimensionnement des parois réfractaires

a°) Parois interne

La paroi interne du four est soumise sur chacune de ses deux faces à la température T des gaz de fumée. Comme cette température est élevée ($1000 \text{ °C} < T < 1300 \text{ °C}$), il faudrait réaliser les parois internes en briques (ou béton) réfractaires capables de supporter des températures de l'ordre de 1500 °C afin de disposer d'une marge de sécurité de 200 à 500 °C .

Par ailleurs la température des gaz de fumée étant identique de part et d'autre de la paroi interne, en régime permanent, cette dernière n'a aucun rôle d'isolation. on peut donc réduire au minimum son épaisseur e_b de façon à minimiser l'inertie thermique du four.

Nous pouvons donc imposer: $e_b = 3 \text{ cm}$ dans la chambre de fusion.

Il en résulte l'épaisseur dans les autres chambres:

dans la chambre de combustion l'épaisseur e_c de la paroi interne est: $e_c = 3 + 4 = 7 \text{ cm};$

dans la chambre de soufflage l'épaisseur sera de:

$$e_s = 7 + 4 = 11 \text{ cm.}$$

En ce qui concerne le choix du béton nous avons opté pour les bétons PLICAST qui présentent la bonne tenue aux hautes températures que nous recherchons.

b') Dimensionnement des parois externes

La paroi externe, contrairement à la paroi interne, est soumise à des températures relativement faibles. Aussi avons nous pensé la réaliser en béton ordinaire. Cela nous permettra de réduire les coûts de revient du four.

Le problème ici est de limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur du four. Cependant nous ne devons pas perdre de vue qu'une trop grande épaisseur augmenterait l'encombrement du four. Aussi allons nous imposer une épaisseur e_e .

On peut choisir: $e_e = 10$ cm.

c) Isolation de la paroi externe

La paroi externe sera recouverte d'une couche de 3 cm d'épaisseur de laine de verre afin de renforcer l'isolation thermique du four.

5°) Calcul de l'échangeur (Voir schéma en annexe)

La fonction de l'échangeur est de transférer à l'air de combustion une partie de la quantité de chaleur contenue dans les gaz de fumée de façon à amener l'air de combustion à une

température supérieure à la température minimale requise pour une combustion optimale du charbon de bois.

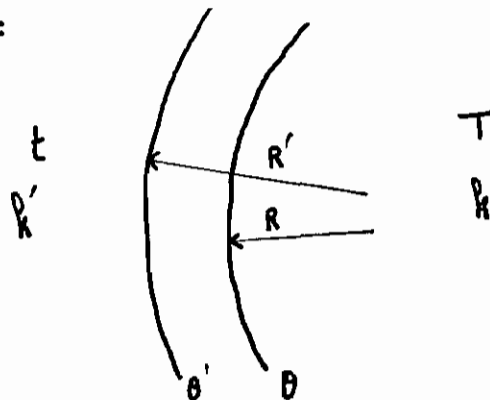
a°) Choix du matériau de l'échangeur

Les caractéristiques fondamentales de l'échangeur sont d'une part une bonne conductibilité thermique et d'autre part une bonne tenue aux hautes températures (800 °C). La plupart des métaux lourds (or, cuivre, argent, alliages des métaux lourds ...) satisfont à ces critères. On pourrait utiliser n'importe quel alliage réfractaire. Malheureusement la corrosion sèche limite les choix possibles aux seuls alliages réfractaires contenant le Chrome et le Nickel tels les aciers inoxydables. Cependant pour des raisons économiques (diminuer le coût de revient du four) nous avons opté pour l'acier ordinaire.

c°) Coefficient de transmission global de l'échangeur de chaleur

Nous allons supposer un régime stationnaire pour effectuer le calcul de l'échangeur de chaleur.

Nous avons:



Dimensionnement du four de fusion

D'après les notations de la figure ci-dessus, nous avons:

Face1: Parois interne de l'échangeur

$$Q_c/S = \alpha(T - \theta) \quad \text{par convection}$$

$$Q_r/S = A\sigma_0(T^4 - \theta^4) \quad \text{par rayonnement et } T \text{ et } \theta \text{ en Kelvin}$$

$$Q_r/S = k_r(T - \theta)$$

Pour les calculs on peut utiliser $k_r = A\sigma_0(T + \theta)(T^2 + \theta^2)$ qui est additif avec en vertu de la règle d'addition des coefficients de transmission en parallèle. Posons:

$$\alpha + k_r = k$$

$$Q/S = (Q_c + Q_r)/S = (\alpha + k_r)(T - \theta)$$

Dès lors, T et θ peuvent être exprimé en °C. Les valeurs de α et k_r sont tabulées.

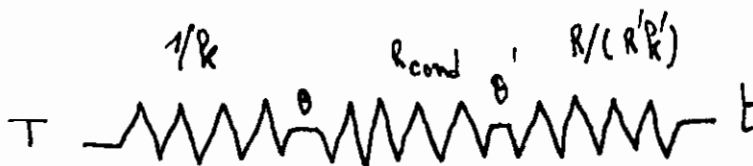
Conduction dans la parois:

$$Q = 2\pi\lambda L[(\theta - \theta')]/\ln(R/R')$$

Face2

$$Q/S = (k'R'/R)(\theta' - t)$$

En utilisant l'analogie électrique, la transmission de la chaleur de la face1 à la face2 se représente comme suit:



$$R_{\text{conduction}} = \ln(R'/R)/(2L\pi\lambda)$$

Dimensionnement du four de fusion

La résistance équivalente $1/K_g$ s'écrit:

$$1/K_g = 1/k + \ln(R'/R)/(R\lambda) + R/(R'k')$$

K_g est le coefficient de transmission global.

Application numérique

$$k = \alpha + k_r$$

La section d'écoulement des gaz de fumée peut être assimilée à un rectangle de longueur $b = 25$ cm et de largeur $a = 3$ cm.

Donc la vitesse d'écoulement est:

$$W_0 = M/(\rho S_e) = 5,27 \text{ m/s}$$

Le diamètre hydraulique d_h de la section d'écoulement des gaz de fumée vaut:

$$d_h = 2ab/(a+b) = 5,4 \text{ cm.}$$

En utilisant le tableau 50 de la Thermique appliquée au four, on obtient:

$$\alpha = 7,5W^{0,5}d^{-0,5} = 74,40 \text{ Kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

$$k_r = A^0(T + \theta)(T^2 + \theta^2)$$

$$A = 0,5 \text{ (facteur de forme)}$$

$$\theta_0 = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

$$T = 1273 \text{ K}$$

$$\theta = 1000 \text{ K}$$

$$\text{On obtient: } k_r = 171,08 \text{ Kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

$$\text{D'où } k = \alpha + k_r = 245,49 \text{ Kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

En ce qui concerne l'air de combustion:

$$\alpha = 3,4 * W^{0,5} * d^{-0,5} = 15,32 \text{ Kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$$

Dimensionnement du four de fusion

En procédant de manière analogue pour le calcul de k' on trouve:

$$k' = 40,59 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}.$$

En ce qui concerne la conductibilité de l'acier ordinaire, nous pouvons lire dans les tables: $\lambda = 25 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.

Finalement

$$r = 360 \text{ mm} \quad \text{et} \quad R' = 361 \text{ mm}$$

nous trouvons: $K_g = 56,11 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

d*) Évolution des températures le long de l'échangeur de chaleur

α *) Hypothèses de calcul

- _ les grandes lettres sont relatives aux gaz de fumée,
- _ les petites lettres sont relatives à l'air de combustion
- _ le coefficient K_g est supposé constant le long de l'échangeur de chaleur;
- _ C et c sont également supposés constants;
- _ l'indice 0 est relative à la section de l'échangeur par laquelle entre les gaz de fumée;
- _ l'indice 1 est relative à l'autre extrémité de l'échangeur.

Nous attribuons un signe aux débits M et m des deux fluides.

Le sens positif de parcours est celui des gaz de fumée.

Posons $r = -(MC)/(mc)$, rapport des valeurs en eau des fluides changées de signe.

S = section de chauffe comptée à partir de la section d'indice 0.

Nous avons:

La chaleur élémentaire dQ échangée à travers l'élément de surface dS peut s'exprimer de trois manières:

$$dQ = K_g(T-t)dS$$

$$dQ = MCdT$$

$$dQ = mc dt$$

d'où:

$$t - rT = t_0 - rT_0 = \text{Constante}$$

$$T - t = (T_0 - t_0) \text{Exp}[K_g S(1 - r)/(MC)]$$

$$T = [t_0 - rT_0 + (T_0 - t_0) \text{Exp}[K_g S(1 - r)/(MC)]] / (1 - r)$$

$$t = [t_0 - rT_0 + r(T_0 - t_0) \text{Exp}[K_g S(1 - r)/(MC)]] / (1 - r)$$

β) Calcul de la valeur de r

$$r = -MC/mc$$

Les valeurs de c , c , ρ , ρ' sont tabulées et on obtient:

	Air de combustion	Gaz de fumée
Température ($^{\circ}\text{C}$)	25	1000
c_p (Kcal/m ³ °C)	0,311	0,337
ρ (Kg/m ³)	1,185	0,278
c_p (Kcal/Kg°C)	0,262	1,212

Nous obtenons $r = -5,088$

Dimensionnement du four de fusion

γ°) DÉTERMINATION DES INCONNUES

Il s'agit pour nous de déterminer:

- la température finale de l'air de combustion qui doit être supérieure ou égale à la température de combustion optimale qui pour la combustion du charbon de bois doit avoir une valeur au moins égale à 350 °C;
- la température finale du fluide chaud. Cette température doit être au moins supérieure à la température de rosée (c'est-à-dire du point de condensation) des gaz de fumée. D'après Gumz (Calcul technique des foyers) cette température de rosée est dans le cas de la combustion du charbon de bois, avec un excès d'air de 14%, est de l'ordre de 58 °C. Donc nous devons avoir:

$$T_1 > 58^\circ\text{C}.$$

En reprenant les équations (1) et (2) nous obtenons:

$$T_1 = (t_0 - rT_0 + (T_0 - t_0)\text{Exp}[-K_g S_T(1 - r)/(MC)]) / (r(T_0 - t_0))$$

$$t_1 = (t_0 - rT_0 + r(T_0 - t_0)\text{Exp}[-K_g S_T(1 - r)/(MC)]) / (r(T_0 - t_0))$$

En notant D le diamètre de la parois cylindrique de l'échangeur, on a:

$$S_T = D * L * \pi.$$

Les résultats numériques sont consignés dans le tableau suivant:

K_g Kcal/m ²	r	t_0 °C	T_0 °C	L cm	D cm	t_1 °C	T_1 °C
45,77	-5,088	25	1000	50	42	740,4	759,4

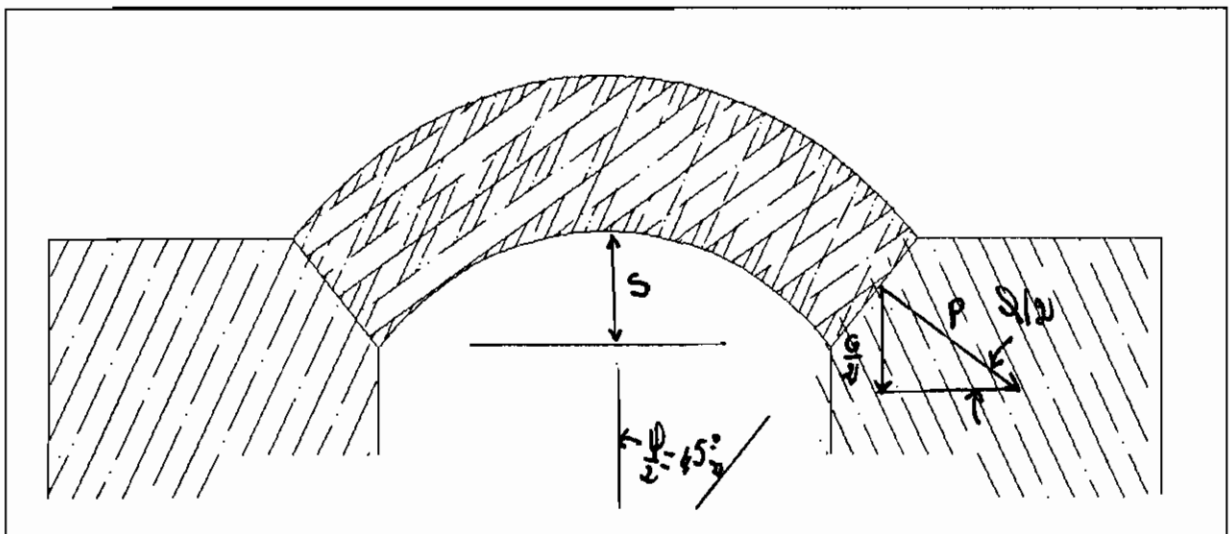
6°) Calcul de la voûte

La voûte devant faire l'objet d'une manipulation régulière, nous devons limiter son poids à des valeurs non contraignantes pour l'effort humain.

Cela contribue également à la réduction de l'inertie du four.

Nous pouvons donc la réaliser en béton réfractaire de 10 cm d'épaisseur.

a°) Tenue mécanique de la voûte



Dimensionnement du four de fusion

L'isolement de la voûte du four provoquant un chauffage intense des briques dans toute leur épaisseur, la tenue mécanique de la voûte doit faire l'objet d'une étude approfondie.

La pression maximale se produit sur les faces d'appui de la parois externe. Il faut donc la calculer avant toute chose.

Le rayon intérieur de la voûte est donné par la relation:

$$r = (r' - s) + (b/2) \quad \text{ou}$$

$$2rs = s + b/4.$$

L'habitude étant de donner la flèche en % de la longueur de la voûte, nous introduirons la flèche réduite $\varphi = s/b$. Il vient alors:

$$r = b/2[(1 + 4\varphi^2)]/(4\varphi).$$

de plus

$$\sin(\varphi/2) = b/(2r) = (4\varphi)/(1+4\varphi^2)$$

$$= \text{ArcSin}[(4\varphi)/(1 + 4\varphi^2)]$$

$$\text{et } b_1 = b(1 + 4\varphi^2) (4\varphi) \text{ArcSin}[(4\varphi)/(1 + 4\varphi^2)]$$

Nous pouvons alors calculer le volume V de la voûte:

$$V = (\varphi/(2\pi)) (4\pi(r + e)^3/3 - [(\varphi/(2\pi)) (4 r^3/3]$$

$$= 2\varphi/3[(r + e)^3 + r^3]$$

$$= 2\varphi/3[[b/2(1 + 4\varphi^2)/(4\varphi) + e]^3 - [b/2(1 + 4\varphi^2)/(4\varphi)]^3]$$

Le poids G de la voûte est alors:

$$G = \rho Vg$$

D'après le diagramme de la figure de la voûte:

$$\sin(\varphi/2) = G/(2P)$$

$$\text{et } P = G/(2\sin(\varphi/2))$$

La pression sur les briques d'appui est alors:

$$p = P/e_v$$

La force latérale exercée sur l'ancrage, qui n'intervient d'ailleurs pas dans la présente étude est:

$$H = P \cos(\psi/2)$$

$$\cos(\psi/2) = [1 - \sin^2(\psi/2)]^{1/2} = [1 - [4\sigma/(1 + 4\sigma^2)]^2]^{1/2}$$

$$\cos(\psi/2) = (1 - 4\sigma^2)/(1 + 4\sigma^2)$$

ce qui donne

$$H = G/2 [(1 + 16\sigma^4)^2 (16\sigma^2) \text{ArcSin}[(4\sigma)/(1 + 4\sigma^2)]]$$

Les résultats numériques sont consignés dans le tableau suivant:

	b	e		G	P	p	H
Valeurs calculée	30	10	2179	106,80	369,9	7397	366

La comparaison de ces valeurs avec les valeurs admissibles pour les bétons PLICARTS révèle qu'il n'y aura pas de problème de tenue mécanique.

Par ailleurs lorsque le four s'échauffe, la partie interne de la voûte se dilate d'abord selon la température atteinte. La partie externe se dilate ensuite. Il en résulte que la voûte tend à s'élever et que si l'on suppose une absence totale de plasticité des briques, celles-ci ne restent en contact que par le long de

leurs arêtes inférieures. les joints de dilatation adoucissent la rigidité. En l'absence de joints de dilatation la pression sur les arêtes seraient si élevée que celles-ci s'arrondiraient.

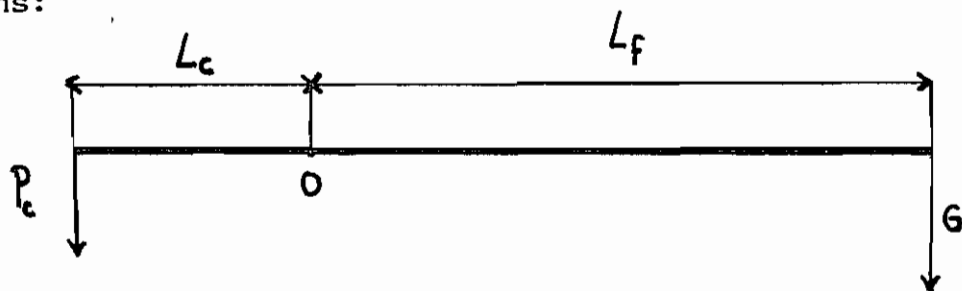
a') L'étanchéité de la voûte

Comme nous l'avons souligné précédemment, la dilatation différentielle entre les parois interne et externe de la voûte a tendance à soulever la voûte. Il résulte donc que sans disposition complémentaire, l'étanchéité au niveau de la voûte serait fortement compromise. C'est pourquoi nous devons disposer sur la parois externe de la chambre de fusion un filament d'amiante afin de renforcer davantage l'étanchéité au niveau de la voûte.

b') Calcul du contre-poids

Le contre-poids servira à faciliter la manipulation de la voûte étant donné le poids relativement important (par rapport à l'effort humain) de celle-ci.

Nous avons:



$$\sum M/O = 0 \text{ c'est-à-dire } P_c L_c - G L_f = 0$$

$$\text{donc } P_c = (L_f/L_c) G$$

Dimensionnement du four de fusion

Dans le souci de limiter l'encombrement du four, nous allons choisir $L_c = L_f/2 = 17 \text{ cm}$.

On obtient alors $P_c = 2G = 213,6 \text{ N}$

c°) Choix de la tige de support du contre-poids

La tige de support est en acier de diamètre $D_{\text{Support}} = 3 \text{ cm}$

7°) Calcul de la bouche d'alimentation en charbon

La bouche d'alimentation en charbon sert à l'approvisionnement de la chambre de combustion pendant les cycles de fusion.

C'est un cylindre incliné par rapport à l'axe horizontal et débouchant dans la chambre de combustion au dessus de la grille à charbon. L'inclinaison permet d'utiliser la force gravitationnelle pour déposer les morceaux de charbon de bois dans la chambre de combustion. Les essais que nous avons faites au laboratoire de résistance des matériaux nous ont permis de choisir une inclinaison de quarante et cinq degrés dans le sens horaire.

Le diamètre D_{bouche} du cylindre doit intégrer le temps d'autonomie souhaité pour le four c'est-à-dire le rythme de chargement. Cependant ce diamètre est limité par la hauteur de la chambre de combustion. Nous avons donc choisi:

$$D_{\text{bouche}} = H_{\text{combustion}} = 10 \text{ cm.}$$

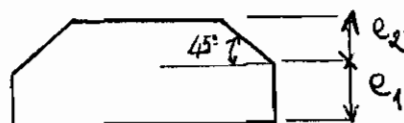
a°) Calcul de la porte de la bouche d'alimentation

Il s'agit ici de maintenir la chambre de combustion étanche vis-à-vis du milieu ambiant. Cette étanchéité est importante pour deux raisons notamment:

- réduire les pertes de chaleur à travers la bouche d'alimentation,
- éviter la consommation du charbon de réserve contenu dans le cylindre.

On peut considérer pour les fins de calcul que les morceaux de charbon sont des réfractaires. Donc ils limitent, un temps soit peu, la température, appliquée sur la face interne de la porte, à des valeurs relativement faibles comparativement à la température qui règne dans la chambre de combustion. Malheureusement nous disposons pas de données sur la conductibilité thermique du charbon de bois.

Nous pouvons donc prendre: $e_1 = e_2 = 4$ cm (Voir schéma ci-dessus)

8) Calcul des dimensions de la de l'orifice d'extraction des cendres

Cette porte a une fonction similaire à celle de la porte de la bouche d'alimentation en charbon.

Suivant la notation de la figure ci-dessus on prendra:

$$e_1 = e_2 = 4 \text{ cm.}$$

IV°) Calcul des ventilateurs

1°) Ventilateur d'insufflation

a°) Calcul des pertes de charge sur le circuit d'air de combustion

(Confère le tableau récapitulatif de la page suivante)

Il est a noter que le coefficient de perte de charge n'intègre pas la perte de charge issue du ruchage de l'air de combustion sur les morceaux de charbon posés sur la grille.

Cette perte de charge peut être estimé a $DH=200$ Pa. La perte de charge totale du circuit d'air de combustion est donc:

$$H_1 = 501,01 \text{ Pa}$$

b°) Puissance P du ventilateur d'insufflation

Nous avons:

$$P = H * M / (\rho \eta)$$

où η représente le rendement globale du ventilateur. En général varie entre 0,45 et 0,70. On peut donc considérer $\eta = 0,45$. La puissance du ventilateur est alors:

$$P = 9,38 \text{ W}$$

Il est à remarquer que le moteur d'entraînement doit être choisi avec une puissance supérieure d'environ 20% afin de palier les

Dimesionnement des ventilateurs

Repere du toncon	Debit (Kg/s)	(Kg/m)	W (m/s)	S (m)	Diametre (m)	j (Pa/m)	Longueur (m)	jL (Pa)		W /2 (Pa)	DP Total (Pa)
O	0.01	1.185	4.3	0.001963	0.05	-	-		0.5	5.477662	5.477662
B	0.01	1.185	4.3	0.001963	0.05	-	-		1.2	13.14639	13.14639
C	0.01	1.185	4.3	0.001963	0.05	-	-		1	10.95532	10.95532
AB	0.01	1.185	4.3	0.001963	0.05	50	3	150	-		150
CD	0.01	0.876	3.04	0.0038	0.054				30	121.4346	121.4346
											301.0140

surcharges de fonctionnement. On doit donc choisir un moteur de puissance $P_{\text{moteur}} = 11,76 \text{ W}$ pour l'entraînement du ventilateur.

2°) Ventilateur de tirage

Le circuit d'évacuation des gaz de fumée étant à peu près identique à celui de l'air de combustion, on peut supposer que les deux circuits occasionnent sensiblement les même perte de charge.

Cependant les pertes de charge issues du ruchage ne font plus partie des pertes de charge.

On en déduit donc que les pertes de charge totales $H_{\text{Évacuation}}$ valent:

$$H_{\text{ÉVACUATION}} = 301,01 \text{ Pa}$$

On trouve alors que la puissance $P_{\text{Évacuation}}$ à considérer pour le choix du moteur d'entraînement vaut:

$$P_{\text{Évacuation}} = 26 \text{ W}$$

On en déduit que la puissance du moteur d'entraînement vaut:

$$P_{\text{Moteur-Evacu}} = 31,2 \text{ W}$$

V) Evaluation du rendement du four

Quantité de chaleur totale apportée:

$$Q_{\text{Total}} = VC_{\text{gaz}} = \dot{M}C_{\text{gaz}}T/\rho$$

Avec T la température des gaz de fumée de la chambre de combustion.

On trouve: $C_{\text{gaz}} = 0,337 \text{ Kcal/m}^3$; $\rho = 0,278 \text{ Kg/m}^3$; $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dimensionnement du four de fusion

$$Q_{\text{Total}} = 48000,31 \text{ Kcal/h}$$

Perte de chaleur par les gaz de fumée:

$$Q_{p_fumée} = VC_{\text{gaz}} = MC_{\text{gaz}}T/\rho$$

avec T1 la température de sortie du four des gaz de fumée.

On trouve: $C_{\text{gaz}} = 0,328 \text{ Kcal/m}^3$; $\rho = 0,362 \text{ Kg/m}^3$

$$Q_{p_fumée} = 27233,42 \text{ Kcal/h}$$

Perte par les parois latérales:



$$R_4 \approx 0$$

$$R_1 = R_{\text{Convection}} = 1/(h \cdot S)$$

$$R_2 = R_{\text{Isolant}} = \ln(R_3/R_2)/(2\pi\lambda_2 L)$$

$$R_3 = R_{\text{Beton}} = \ln(R_3/R_2)/(2\pi\lambda_3 L)$$

$$h = 10 \text{ W/m}^2 ; S = 1,168 \text{ m}^2 ; \lambda_2 = 0,040 \text{ W/m} ; \lambda_3 = 1 \text{ Kcal/m.h.}$$

En considérant une température ambiante de $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,

On trouve: $R_1 = 0,01 \text{ }^\circ\text{C/Kcal}$; $R_2 = 0,78 \text{ }^\circ\text{C/Kcal}$; $R_3 = 0,11 \text{ }^\circ\text{C/Kcal}$;

$$P_{\text{parois}} = 416 \text{ Kca/h.}$$

En considérant les rapports d'épaisseur entre la parois latérale et la voûte d'une part et d'autre part le rapport des températures mises en jeu de part et d'autre des parois respectives on peut estimer la perte de chaleur à travers la parois de la voûte au double de celle à travers la parois latérales du four.

$$\text{Soit } Q_{\text{voûte}} = 832 \text{ Kcal/h}$$

Dimensionnement du four de fusion

On en déduit que le rendement du four est:

$$\eta = 40,6$$

Ce qui est assez élevé comparé au 10% rendement habituel des fours présentement utilisés dans le secteur. Il s'en suit une économie d'énergie de 30% .

Dimensionnement du four de fusion

CHAPITRE IV

EVALUATION ECONOMIQUE

E*) Coût de fabrication du four1*) Gamme de fabrication de l'échangeur de chaleur

N°	OPÉRATION ¹	MACHINE ET FIXATION	INSTRUMENT DE CONTROLE	TEMPS DÉBUT	DURÉE
200	- Découpage $Cm_1=122,5$ $Cm_2=122,5$ $Cm_3=60$ $Cm_4=60$	- Guillotine Électrique - Gabarit de montage	- Ruban mètre	8h30	5
201	- Traçage des lignes de spires	- Trusquin - Règle	- Ruban mètre	8h40	10
202	- Découpage de la fenêtre $Cm_1= Cm_2 = 10$ $Cm_3=10$	- Scie sauteuse - Gabarit de montage	- Ruban mètre	8h55	5
203	- Perçage $D_1= 8$ $D_2= 4$ $D_3= 4$ $D_4= 4$	- Perceuse - Gabarit de montage	- Pied à coulisse	9h05	10
204	- Découpage des spires $Cm_1= Cm_2= 5$	- Scie sauteuse - Gabarit de montage	- Ruban mètre - Règle flexible	9h15	20

Evaluation économique

N°	OPÉRATION	MACHINE ET FIXATION	INSTRUMENT DE CONTROLE	TEMPS DÉBUT	DURÉE
205	- Cintrage D= 39 H= 60	- Rouleuse Manuelle	- Ruban mètre	9h40	20
206	- Soudage	- Poste de soudure oxy- acétylénique		10h15	5
207	- Soudage spire interne	- Poste de soudure oxy- acétylénique		10h25	30
208	- Soudage spire externe	- Poste de soudure oxy- acétylénique		11h	30
209	- Traçage de la trémie d'alimentation	- Trusquin - Règle	- Ruban mètre	11h35	10
210	- Découpage de la trémie	-Scie sauteuse - Gabarit de montage	- Ruban mètre	11h45	10

Evaluation économique

N°	OPÉRATION	MACHINE ET FIXATION	INSTRUMENT DE CONTROLE	TEMPS DÉBUT	DURÉE
220	- Cintrage de la trémie	- Enclume - Marteau	- Ruban mètre	12h	5
221	- Soudage de la trémie	- Poste de soudure oxy- acétylénique		12h25	5

¹: Toutes les dimensions sont en centimètres.

°) Coût de fabrication

MATÉRIAU	QUANTITÉ	PRIX UNITAIRE	COÛT TOTAL
Tôle d'acier (1 mm)	1m*2m	21000	21000
Ciment	1/2 paquet	1800	900
Béton	0,3 m ³	-	5000
réfractaire ⁽¹⁾	-	-	4000
Tuyauterie	3 h	1500	4500
Main d'oeuvre (soudure)	-	-	3000
Main d'oeuvre (Maçonnerie)	2	7000	
Ventilateur	-	-	14000
Accessoires divers (charnières ...)	-		5000
Laine de verre			10000
Pyromètre			30 000

Le coût total du four est donc de 67 000 Francs hormis le coût du pyromètre. Ce coût pourrait être réduit d'au moins 1/3 dans le cas d'une production en série.

Evaluation économique

Dans tous les cas le coût de production du four est assez faible comparée aux avantages qu'il procure.

II°) Avantages du four

La construction du four offrent d'énormes avantages sur les fours que les artisans utilisent présentement. Ces avantages peuvent être résumés comme suit:

- élimination des risques de "points chauds" et de coup d'air froid;
- amélioration de la sécurité lors de la fusion: le creuset ne reposant plus sur les morceaux de charbon de bois, les risques de renversement du métal fondu sur les braises (et l'explosion qui s'en suit) sont éliminés;
- le rendement est nettement amélioré. Il s'en suit une économie d'énergie et une réduction des dépenses d'exploitation;
- les temps de fusion sont réduits; ils s'en suit une augmentation de la productivité;
- le métal liquide est moins contaminé; ce qui autorise une diversification des produits;
- le four est amovible; ce qui autorise un aménagement dynamique de l'atelier;
- le four permet d'utiliser d'autres combustibles solides comme la tourbe, les cokes d'arachide etc...

-
- le four offre des possibilités d'adaptation à l'utilisation de combustibles liquides ou gazeux à travers l'installation d'un brûleur;
 - le four est totalement compatible avec l'utilisation des appareils de mesure (pyromètre, baromètre)

CHAPITRE V

REMEDES AUX PROBLEMES DE
FONDERIE DES ALLIAGES
D'ALUMINIUM

L'étude des diverses causes des défauts de fonderie a révélé que ceux-ci sont dus principalement à un certain nombre de facteurs contrôlables par le fondeur. c'est donc dire que les défauts de fonderie sont les résultats des petites erreurs d'appréciation, commises par le fondeur, sur certains paramètres du moulage. Il importe donc de maîtriser ces paramètres pour lutter efficacement contre les défauts de fonderie.

I°) RECHERCHE DE LA COMPOSITION CORRECTE

Les écarts de composition par rapport aux compositions chimiques peuvent avoir différentes causes:

- composition des charges,
- enrichissement ou appauvrissement d'un élément en cours de fusion,
- hétérogénéité du bain.

La recherche d'une composition correcte passe donc par une lutte contre ces trois causes.

1°) Composition des charges

La fonderie artisanale utilise principalement des jets ou alliages de deuxième fusion (coulée, masselottes, rebuts). Ces jets risquent de provoquer des altérations graves, si leur

classement n'a pas été fait d'une façon rigoureuse. A cet effet on peut utiliser la méthode des teintes conventionnelles qui consiste à repérer chaque alliage par une couleur ou groupe de couleurs spécifique suivant une convention qu'on se définit. Les tableaux des principaux alliages d'aluminium de l'annexe 1 pourraient servir de référence. En outre il serait intéressant d'éviter tout mélange après le classement ainsi fait. Il faudrait donc prévoir des bacs, des caisses, des casiers de stockage pour chaque classe d'alliages constituée.

Enfin une dernière précaution à prendre contre l'altération des alliages est le nettoyage systématique des creusets après chaque fusion ou coulée. On emploiera si possible un creuset par alliage ou tout au moins par groupe d'alliages (Si - Cu - Mg - Zn).

2°) Enrichissement ou appauvrissement d'un élément en cours de fusion

On distingue ici l'écart de teneur en magnésium et l'enrichissement en fer.

En ce qui concerne le premier point il est difficile de préconiser des mesures puisque celles-ci dépendent des conditions de fusion, du choix et des quantités de flux employé dans le cas de la fusion sous flux.

Pour ce qui est du deuxième point notons que l'aluminium et ses alliages fondus, plus particulièrement ceux du groupe Al-Si, attaquent rapidement le fer et l'acier et plus lentement la fonte. Cette attaque croît d'ailleurs avec la température et le temps de maintien en contact. Notons que le fer est une impureté nuisible aux caractéristiques mécaniques.

Si l'on veut éviter tout enrichissement en fer de l'alliage fondu, il faut employer des creusets en graphite ou en carborandum, cependant plus fragiles et moins bons conducteurs que les creusets en fonte.

Dans le cas de l'emploi des creusets en fonte il faut procéder journalièrement au poteyage de ceux-ci.

Des creusets et outils en aciers ne doivent pas être utilisés, l'acier étant plus sensible que la fonte à l'attaque des alliages d'aluminium fondus.

3°) Hétérogénéité du bain

Elle résulte en général d'un brassage insuffisant, dans le cas d'alliages comportant surtout des éléments lourds (Cuivre, Nickel) ou peu solubles (Titane).

Il faut donc brasser le bain, de façon à faire remonter le métal du fond avant la coulée, ou périodiquement en cours de maintien, mais en opérant sous la surface, protégée de préférence par un flux.

4°) Température et temps de fusion

Un contrôle de la température de coulée est absolument nécessaire pour obtenir une reproductibilité, d'abord des traitements métallurgiques du bain, assurant des caractéristiques élevées à l'alliage, ensuite des conditions de coulée.

On peut utiliser à cet effet un pyromètre à thermo-électrique. On peut choisir le couple Chromel-Alumel qui offre des possibilités de mesures jusqu'à 900 °C. Il est important d'étalonner les pyromètres au moins une fois par semaine. L'étalonnage pourrait se faire au point de fusion de l'aluminium pur (658 °C) ou de celui d'un alliage dont le point de fusion est connu (par exemple l'A-S13 qui fond à 575 °C).

En ce qui concerne le temps de fusion il est important de noter qu'il doit être le plus petit possible pour limiter la contamination du bain. On pourrait fractionner la fusion compte tenu des besoins en métal liquide. Dans le cas de fusion de longue durée il faut utiliser des flux de protection.

II°) REMEDES CONTRE LES DÉFAUTS DE FONDERIE

Les paramètres qui déterminent l'occurrence d'un défaut varie d'un défaut à un autre. Aussi avons nous regroupé les actions de contrôle à effectuer par catégorie de défauts afin de permettre une meilleure utilisation.

1°) Les défauts provenant de l'outillage

- Augmenter la température, compte tenu des prescriptions données pour la fusion de l'alliage considéré;
- Surveiller la température de fusion et éviter qu'elle ne prenne des valeurs élevées;
- Employer des flux de couverture;
- Vérifier que la perméabilité du sable, la serre, l'humidité sont suffisantes;
- Surveiller l'étuvage des noyaux (dégagement de gaz);
- Placer des événements dans les régions où se produit le défaut;
- Adjoindre des tirées d'air ou goupilles d'air;
- Multiplier les attaques pour amener le métal sur place;
- Changer l'orientation et la forme des attaques par des essais successifs
- Augmenter la vitesse du métal, en augmentant la pression par l'adjonction d'un godet de coulée;
- Augmenter le nombre de jets de coulée;
- Dans le cas de pièces importantes, des essais de coulée à "découvert" permettent de se rendre compte du remplissage du moule;
- Tenir le jet de coulée toujours plein pour éviter les entraînements d'air;
- Choisir convenablement l'alliage à utiliser en se référant au tableau des alliages en annexe.

- les mastics et les bavures pour les défauts d'aspect.

En ce qui concerne la soudure, une bonne réparation de qualité doit toujours utiliser une soudure autogène, soit oxy-acétylénique soit à l'arc sous argon en employant des baguettes de métal d'apport ayant une composition chimique identique ou très voisine de celle de la pièce à réparer.

Quant aux brasures elles ne doivent être utilisées que pour réparer des défauts d'aspect. On ne doit jamais les employer pour réparer des défauts compromettant la solidité de la pièce.

Enfin les enduits et les mastics ne permettent de réaliser que des camouflages qui sont parfois acceptables; mais en aucune façon ils n'améliorent la qualité de la pièce, si ce n'est son aspect. Ils sont à base de résines complexes chargées de pigments alumineux pour les teinter. Ces résines mélangées à un durcisseur, sont appliquées sur les pièces préalablement bien dégraissées et rendues rugueuses pour permettre un bon accrochage.

IX°) Traitement des alliages à l'état liquide

Nous n'aborderons ici que les traitements qui rentrent dans les remèdes que nous avons préconisés contre les défauts de fonderie. Il s'agit des traitements relatifs à la protection, à la désoxydation, à l'affinage et au dégazage du métal liquide.

Toutes ces opérations se font à l'aide de flux, se présentant en général sous forme de sels complexes et de gaz agissant par

3°) les irrégularités de surface

a°) Les Galles

- Vérifier la granulométrie et l'humidité du sable;
- Multiplier les coulées : le passage d'une trop grande quantité de métal donne un point chaud qui provoque un érosion du sable;
- Les angles vifs doivent être proscrits, prévoir de larges congés de raccordement;
- Vérifier l'épaisseur et la qualité de l'enduit. Une couche trop épaisse est à prohiber;

b°) Les gouttes

- Éviter les chutes exagérées du métal;
- Prévoir un entonnoir de coulée de dimensions appropriées pour éviter le tourbillon.

4°) Pièces déformées et voilées

- Attendre que le métal soit solidifié avant d'ouvrir le moule

5°) Les criques

- Utiliser les noyaux à vert de préférence aux noyaux en sable aggloméré. Dans le cas de noyaux en sable aggloméré, les éviter ou les entailler au maximum, avec garnissage en sable de moulage.

- Dégazer le métal au besoin

6°) Les pigures

- Désoxyder le métal liquide, n'employer que les flux secs;

7°) Les soufflures

- Aérer les noyaux d'air;
- Sécher les noyaux à coeur;
- Réduire au maximum l'humidité du sable;
- Diminuer la vitesse de coulée;

8°) Les grains et points durs

- Éviter une surchauffe excessive du bain;
- Dégazer le bain;
- Désoxyder le bain.

III°) Réparation des défauts

Certains défauts de fonderie n'affectent pas les pièces d'une façon irrémédiable et peuvent être donc réparés. Il s'agit notamment des fuites d'étanchéité et des défauts d'aspect. On peut à cet effet utiliser:

- la soudure en général pour les défauts importants,
- l'imprégnation pour l'étanchéité,

barbotage. Il est à noter que tous ces produits doivent présenter, en dehors de leurs actions spécifiques, les qualités de base suivantes:

- Pour les flux solides : être fusibles à la température de fusion de l'alliage considéré; ils ne doivent pas oxyder le bain, ne pas modifier sa composition ni par élimination d'un élément ni par addition d'un nouveau élément; ils doivent pouvoir être écrémés sans perte de métal; ne pas être hygroscopiques et enfin être d'une manutention pratique et sans danger.
- Pour les flux gazeux: ne pas être toxiques, être d'un emploi facile et sans danger; ne pas éliminer, en se combinant avec eux, certains éléments de composition du bain; être rigoureusement secs.

1°) Protection des bains

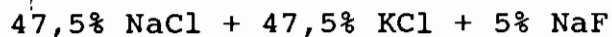
La protection s'obtient en recouvrant la surface du bain avec un flux de couverture dont une des propriétés est de dissoudre l'alumine qui se forme. Il contient en général de la cryolithe (AlF_6Na_3) ou de la canalithe (MgCl_2 , KCl).

2°) Désoxydation

Si le bain est oxydé, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, il est pratiquement impossible de l'améliorer par décantation des

oxydes formés. La seule action efficace est celle d'un flux que l'on fait pénétrer au sein du métal liquide. Ces flux contiennent des solvants de l'alumine (fluorures) et dégagent des gaz inertes vis-à-vis de l'aluminium et de ses alliages, qui accentuent le brassage pour mettre en contact l'alumine et les sels de flux et les sels. Ces flux plus légers remontent en surface, chargés d'alumine; Cette opération peut se faire successivement plusieurs fois en cas d'alliages très oxydé.

A titre d'exemple on peut utiliser la solution suivante:



3°) Affinage

Pour affiner une structure, c'est-à-dire avoir un grain fin, facteur de très bonnes caractéristiques, on doit ajouter aux bains certains éléments ayant des propriétés affinantes, tels que le titane, le zirconium, le bore et le phosphore.

4°) Dégazage

L'élimination effective des gaz dissous s'obtient en créant l'équilibre complet et rapide entre les gaz dissous dans l'alliage et une atmosphère exempte de gaz ou ne contenant que des gaz inertes. Le dégazage peut être obtenu de deux façon.

a°) Dégazage par maintien à basse température

On maintient l'alliage à une température voisine de celle du solidus pendant un temps plus ou moins long (30 minutes à plusieurs heures) suivant la surface du bain. On remonte ensuite le plus rapidement possible à la température de coulée et l'on coule immédiatement.

b°) Dégazage par action d'un flux solide ou gazeux

Dans les deux cas c'est l'action mécanique et/ou chimique des gaz dégagés qui élimine les gaz dissous. Les sels sont en général des produits chlorés ou fluorés dont les gaz en se dégageant, se combinent avec l'hydrogène; une agitation mécanique accélère le phénomène.

v°) MISE AU POINT DES SABLES**1°) Sables de moulage**

L'analyse des défauts de fonderie nous a révélé qu'une grande partie des rebuts de fonderie doit être attribuée à l'emploi de sables à mouler inadéquats. Un mélange approprié de sable neuf et le "vieux" sable pour la préparation du "sable d'oeuvre" n'est possible que si l'on est en mesure de déterminer les propriétés des sables. Celles-ci font intervenir les caractéristiques physiques chimiques du sable.

Dans leur état d'utilisation, les sables de moulages doivent être modérément humide (4 à 6 %) avoir une certaine plasticité et

présenter une perméabilité suffisante pour que l'air contenu dans l'empreinte ainsi que les gaz qui se dégagent pendant la coulée puissent s'échapper rapidement au travers du moule ; enfin ils doivent convenir à la finesse de peau réclamée pour les pièces. Il est donc nécessaire que le sable de moulage des alliages d'Aluminium contienne, d'une part, une quantité déterminée d'argile (8 à 15 %) et que l'autre part, les grains de silice qui le constituent, répondent à certaines caractéristiques de dimensions.

On trouve à l'état naturel, des sables silico-alumineux qui jouissent de ces propriétés fondamentales, grâce à la pellicule d'argile qui enrobe leurs grains.

Pour préciser numériquement les qualités du sable de moulage, on procède à la mesure des caractéristiques directement utiles pour son emploi. Il s'agit de la perméabilité, de la granulométrie et de la cohésion. Ces déterminations sont faites en laboratoire sur des éprouvettes normalisées.

La constitution d'un bon de sable de moulage est indiquée dans le tableau suivant :

COMPOSANT	TENEUR MOYENNE %
Silice	80/90
Alumine	8/15
Chaux (exprimé en carbonate)	1
Magnésie	1
Oxyde de fer	2,5
Matières organiques	1

XI°) Sable de noyautage

Les sables de noyautage doivent avoir des caractéristiques de perméabilité supérieures à celle du sable de moulage pour être à même d'évacuer plus rapidement les gaz dégagés à la coulée puisque les noyaux ont très généralement une surface de contact (rapportée à leur masse) beaucoup plus grande que celle du moule.

On utilise surtout des sables siliceux auxquels on ajoute des agglomérants, tels que les sables aux silicates de soude.

La constitution d'un sable de noyautage est indiquée dans le tableau suivant:

COMPOSANT	TENEUR MOYENNE
Silice	>98
Alumine	<0,30
Oxyde de fer	traces
Chaux	<0,15
Magnésie	<0,10
Eau combinée	<0,40

CHAPITRE VI

PERSPECTIVES D'AVENIR DE LA
FONDERIE ARTISANALE DES
ALLIAGES D'ALUMINIUM

La non maîtrise des règles fondamentales de la fonderie de l'aluminium et de ses alliages a confiné les travaux des artisans dans des pièces simples ne présentant aucune complexité géométrique telles que les chaudrons, certaines pièces décoratives...

Aujourd'hui, avec la maîtrise des règles de la fusion et de la coulée, ce sont de larges possibilités qui s'offrent aux artisans. Ils peuvent désormais envisager la fabrication de pièces de formes complexes, en particulier en y ajoutant des éléments noyés à la coulée et ayant des propriétés spécifiques, tels que les goujons, les bagues, les plaques d'usure ...etc et dont la matière peut être de l'acier, du bronze, du laiton ou des cupro-aluminium ...

En outre la soudure autogène à l'arc sous argon (procédés TIG et MIG) donnant d'excellentes liaisons, on peut aboutir à des éléments de pièces réalisés par les artisans et assemblés ensuite pour former des pièces très complexes.

Les artisans peuvent ainsi dépasser le cadre de leurs anciennes productions et s'impliquer plus dans la fabrication de produits qui jusque-là sont réservés à l'industrie.

On pourrait citer par exemple les produits comme des pièces de moteurs, des outils portatifs ...etc.

Par ailleurs il importe pour les États de créer les conditions d'une formation complémentaire aux artisans fondeurs en vu de les

Perspectives d'avenir de la fonderie artisanale des alliages d'Aluminium

sensibiliser sur les derniers développements des techniques et procédés de fonderie afin de les rendre plus aptes à profiter et faire profiter la population entière des énormes possibilités de l'aluminium et de ses alliages.

Au niveau de l'industrie la fonderie a de sérieux atouts pour rester concurrentielle vis-à-vis d'autres procédés tels que le forgeage, l'estampage, l'usinage, le mécano-soudage ...

Par contre certaines technologies mettant en oeuvre des matériaux non métalliques en particulier, deviennent des concurrents très potentiels pour la fonderie.

Cependant le développement de l'automatique et de contrôle de processus, a permis à la fonderie de se redorer son blason du fait de l'amélioration :

- de la qualité des produits,
- de la productivité de ses installations,
- des conditions de travail de son personnel.

La mise en oeuvre de l'aluminium et de ses alliages a encore de beaux jours devant elle.

CHAPITRE VII

RECOMMANDATIONS ET
CONCLUSION

I) Recommandations

La résolution des problèmes que nous avons recensés dans la fonderie artisanale a soulevé d'autres points qu'il serait intéressant d'étudier. Malheureusement le temps qui est imparti à nos travaux ne nous autorise pas à les aborder dans toutes leurs dimensions. Aussi voudrions nous laisser en recommandation quelques travaux afin que d'autres puissent les aborder et les concrétiser. Ces travaux concernent:

- l'étude de la possibilité d'utiliser l'énergie contenu dans les gaz d'échappement pour préchauffer la charge;
- l'étude de l'amélioration de la durée de vie des sables de moulage et de noyautage;
- l'étude du nettoyage de la parois cylindrique de l'échangeur de chaleur (des dépôts de carbone peuvent s'y former et rendre l'échange de chaleur, entre l'air de combustion et les gaz de fumée, moins efficace)
- l'étude de la correction de l'écart de teneur en magnésium dans les conditions de fusion du four;
- l'étude et la conception d'un brûleur multicom bustible pour le four;
- l'étude de l'impact de l'utilisation de la tourbe sur la qualité du bain fondu dans le cas d'une fusion sans flux de protection;

II) CONCLUSIONS

Les résultats de nos travaux contribueront, nous en sommes convaincus, à résoudre les difficultés que nous avons recensés dans la fonderie artisanale. Cependant, il serait un peu erroné de considérer nos travaux comme une oeuvre entièrement finie; comme toute oeuvre scientifique, ils restent améliorables, perfectibles. Nous n'en voulons pour preuve que l'émergence de certaines insuffisances qui ont failli bloquer nos travaux lors de la réalisation du prototype. Insuffisances que nous n'avions pas soupçonnées à la phase de conception, mais que nous sommes, quand même parvenus à combler. C'est pourquoi nous souhaiterions la poursuite incessante des travaux que nous avons laissés en recommandation afin de rendre nos travaux plus complets.

Il est important de remarquer que nos travaux sur le four contribuent également à la lutte contre la déforestation (fortement engagée au SENEGAL) d'une part par le rendement élevée de notre four comparativement aux four actuellement utilisés dans le secteur, ce qui contribue, comme nous l'avions vu, à une économie de 30 % de charbon de bois et d'autre part par l'adaptation du four à l'utilisation d'autres combustibles tels que la tourbe, les gaz, les fuels. A ce propos nous souhaiterions, la réalisation, dans les meilleurs délais, du brûleur afin de mettre à la disposition des artisans un four multicomcombustible complet.

Par ailleurs, il nous apparaît très important de développer la fonderie artisanale pour deux raisons.

Primo, c'est un secteur qui permet de disposer de biens qu'il n'est pas toujours rentable de produire industriellement tels que les pièces décoratives, les chaudrons...

Secundo, elle permet d'assainir l'environnement. En effet la fonderie artisanale utilise essentiellement des pièces de rebuts (pièces de moteur, emballages, toiture, quincaillerie ...) qu'il serait difficile d'éliminer autrement que par la fonderie. A ce titre la fonderie joue un grand rôle dans l'assainissement de l'environnement.

c'est pourquoi il nous apparaît important que les autorités gouvernementales prennent des mesures pour la formation continue des artisans fondeurs, à travers l'organisation de séminaires et de conférences destinés à les sensibiliser sur les nouvelles techniques intervenues dans la fonderie.

ANNEXE1: TABLEAU DES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE

Appellation	Méthode de moulage		État d'utilisation	Résistance (Kg/mm ²)	Soudabilité	Usinabilité
A5	Sable	Coquille	Brut de coulee	Z	E	A
A-M4	Sable	Coquille	Brut de coulee	Z	B	A
A-S2U	Sable	Coquille	Recuit et stabilise	Y	E	B
A-S4G	Sable	Coquille	Brut ou trempe revenu	Y	E	A
A-S7G	Sable	Coquille	Brut ou trempé revenu	Y	E	A
A-S5U3	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	B	B
A-S9KG	Sable	Coquille	Brut ou trempee revenu	Y	E	A
A-S10G	Sable	Coquille	Brut ou trempee revenu	Y	E	A
A-S10UG	Sable	Coquille	Brut et stabilise	Y	B	B
A-S12N2G		Coquille	Stabilise	Y	A	A
AS12UN		Coquille	Stabilise	Y	A	A
A-S13	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	B	A
A-S20U		Coquille	Stabilise	Y	B	A
A-S22UNK		Coquille	Stabilise	Y	B	A
A-G3T	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	E	E
A-G4Z	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	B	E
A-G6	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	B	E
A-Z5G	Sable	Coquille	Trempe mûri	X	B	E
A-U4NT	Sable	Coquille	Brut ou trempé mûri	Y	A	E
A-U5GT	Sable	Coquille	Trempe mûri	X	A	E
A-U8S	Sable	Coquille	Brut de coulee	Y	A	E
A-U10G		Coquille	Stabilise	Y	A	E
A-10S4		Coquille	Brut de coulee	Y	A	E

CONVENTION
E: EXCELLENT
B: BON
A: ACCEPTABLE
I: IMPROPRE
X: 20 < R < 32
Y: 11 < R < 20
Z: R < 11

ANNEXE1: TABLEAU DES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE (SUITE)

Appellation	Résistance Aux agents atmosphériques			Aptitude au filage		Aptitude a l'anodisation		Aptitude au Polissage
	Atmosphère Rurale	Atmosphère Industrielle	Atmosphère Marine	Coulabilité	Etanchéité	Protection	Décoration	
A5	E	E	B	A	A	E	B	A
A-M4	E	E	B	A	A	E	A	A
A-S2U		A	I	B	E	B	B	E
A-S4G		E	B	E B	B	B	A	E
A-S7G		E	B	E B	E	B	I	B
A-S5U3		A	I	E	B	A	I	A
A-S9KG		E	B	E B	B	B	I	A
A-S10G		E	B	E B	B	B	I	A
A-S10UG		A	I	B E	B	A	I	A
A-S12N2G		A	I	E	B	A	I	A
AS12UN		A	I	E	B	A	I	A
A-S13		E	B	E	E	A	I	A
A-S20U		B	I	B	A	I	I	A
A-S22UNK		B	I	B	A	I	I	A
A-G3T		E	E	A	A	E	E	E
A-G4Z		E	B	A	A	E	E	E
A-G6		E	E	A	A	E	B	E
A-Z5G		B	B	B A	B	E	B	E
A-U4NT		A	I	B A	B	B	B	A
A-U5GT		A	I	B A	B	B	B	B
A-U8S		A	I	E	E	I	I	A
A-U10G		A	I	B	B	I	I	A
A-10S4		A	I	E	E	I	I	B

CONVENTION
E: EXCELLENT
B: BON
A: ACCEPTABLE
I: IMPROPRE

ANNEXE 1: TABLEAU DES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE (SUITE)

Appellation	Résistance Aux agents atmosphériques			Aptitude au filage		Aptitude à l'anodisation		Aptitude au Polissage
	Atmosphère Rurale	Atmosphère Industrielle	Atmosphère Marine	Coulabilité	Etanchéité	Protection	Décoration	
A5	E	E	B	A	A	E	B	A
A-M4	E	E	B	A	A	E	A	A
A-S2U		A	I	B	E	B	B	E
A-S4G		E	B	E B	B	B	A	E
A-S7G		E	B	E B	E	B	I	B
A-S5U3		A	I	E	B	A	I	A
A-S9KG		E	B	E B	B	B	I	A
A-S10G		E	B	E B	B	B	I	A
A-S10UG		A	I	B E	B	A	I	A
A-S12N2G		A	I	E	B	A	I	A
AS12UN		A	I	E	B	A	I	A
A-S13		E	B	E	E	A	I	A
A-S20U		B	I	B	A	I	I	A
A-S22UNK		B	I	B	A	I	I	A
A-G3T		E	E	A	A	E	E	E
A-G4Z		E	B	A	A	E	E	E
A-G6		E	E	A	A	E	B	E
A-Z5G		B	B	B A	B	E	B	E
A-U4NT		A	I	B A	B	B	B	A
A-U5GT		A	I	B A	B	B	B	B
A-U8S		A	I	E	E	I	I	A
A-U10G		A	I	B	B	I	I	A
A-10S4		A	I	E	E	I	I	B

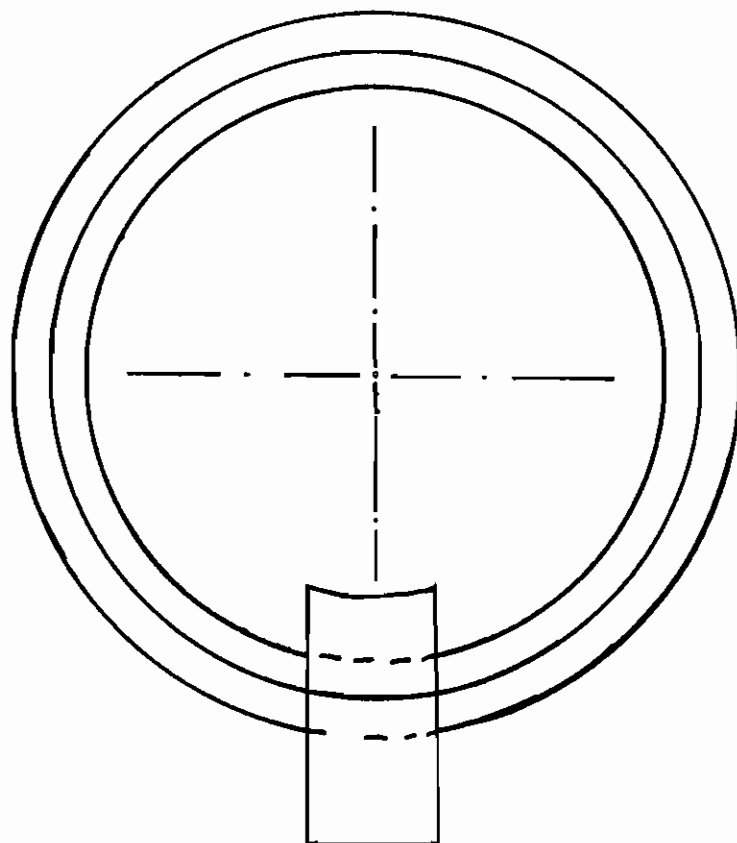
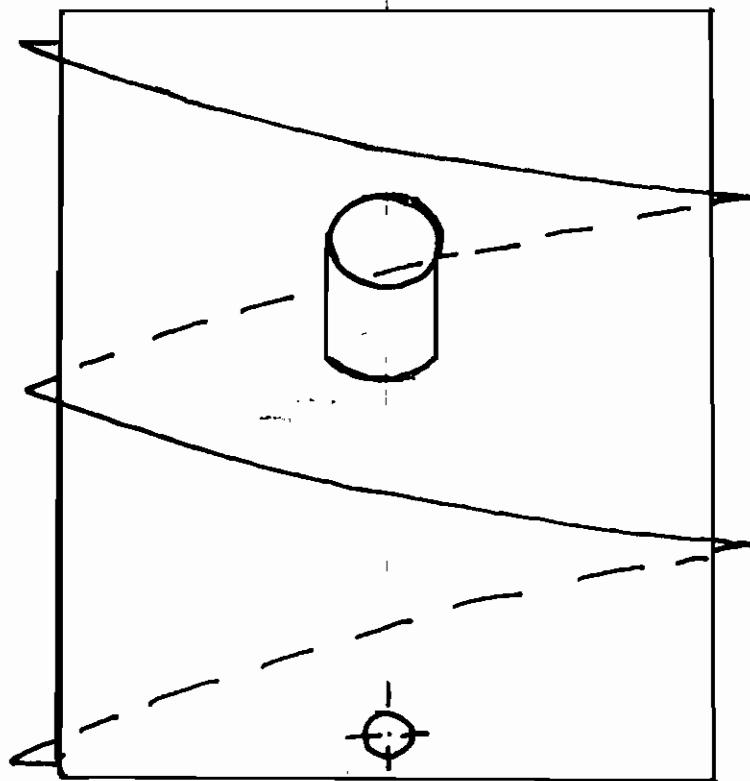
ANNEXE1: Tableau des principaux alliages d'Aluminium

(SOURCE: L'Aluminium Tome 2 des Ingénieurs du groupe PECHINEY)

Appellation	Produit commerciaux usuels	Propriétés particulières et Principales application
A9	Tôles, profils	Excellentes résistance à la corrosion Réflecteurs-Industriechimique
A5	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres	Assemblage légèrement sollicités-Industries chimique Industrie alimentaire-Industrie électrique-Toiture
A4	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres	Electro-domestique-bardage-profils d'architecture Emballages-Ustensils ménagers
A-M1	Tôles, profils	Pièces de chaudronnage et d'emboutissage-Toiture-Bardage Emballages-Panneaux de véhicules-Réservoirs
A-M1G	Tôles, profils,tubes soudés	Tubes soudés-Tôles pour architecture
A-G06	Tôles, profils	Panneaux de véhicules-articles de ménage-Toiture Bardage-Profils d'architecture
A-GS	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres	Industries électrique-Menuiseries métalliques Profils d'architecture-Grillage-Clou
A-SG	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres Pièces forgées	Chimie-Alimentation-Pièces d'emboutissage Pièces de matricage-Charpente-Visserie
A-G3	Tôles, profils,tubes	Industrie chimique et alimentaire-réservoirs sous pression Réservoir à gaz liquéfié-construction navale carrosserie automobile-Quincaillerie-matériel roulant
A9-G3	Tôles, profils	
A-G4	Tôles, profils,tubes	
A-G5	Tôles, profils	
A-Z4G	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres	
A-Z5G	Tôles, profils,tubes,fils rond,barres	Alliages auto trempant-Automobile-matériels de mines-Charpente Matériels pour industrie textile-menuiseries métalliques-Boulonnerie
A-Z4GU	Ronds, profils	Visserie à haute résistance
A-Z5GU	Pièces forgées, profils	Aviation-Armement-Pièces forgées
A-Z8GU	Pièces forgées, profils	Pièces matricées-Articles de sport
A-U2G	Tôles	Carrosserie automobile
A-U2N	Pièces forgées et matricées	pièces forgées et matricées-Aviation et armement
A-U2GN	Tôles, pièces forgées et matricées, profils	
A-U4G	Tôles, profils,tubes,fils rond,méplats	Aviation-Automobile-Charpentes très sollicitées Robinneterie-Horlogerie-Pièces forgées-visserie
A-U4Pb	Ronds	Visserie et décolletage
A-U4N	Pièces forgées	pièces forgées
A-U4G1	Pièces forgées, profils	Aviation-Armement-Article de sport-Visserie

ANNEXE1: TABLEAU DES PRINCIPAUX ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE (SUITE)

Appellation	Propriétés particulières et Principales application
A5	Appareils ménagers-Alimentation-Bâtiment-Electricité (Rotors-raccords divers)
A-M4	Appareils ménagers-Electro-domestique (Brûleur de cuisinière)
A-S2U	Automobile-Aviation-Mécanique
A-S4G	Appareils ménagers-Appareillage électrique-Automobile-Bâtiment-Chemin de fer-Chimie-Cycle Electricité-Manutention-Marine-Mécanique-Mines-Motocycles-Robinetterie-Textile Travaux publics
A-S7G	Appareils ménagers-Appareillage électrique-Automobile-Bâtiment-Chemin de fer-Chimie-Cycle Electricité-Manutention-Marine-Mécanique-Mines-Motocycles-Robinetterie-Textile
A-S5U3	Automobile-Mécanique
A-S9KG	Armement-Automobile-Aviation-Chemin de fer-Marine-Mécanique-Mines-Appareillage électrique
A-S10G	Agriculture-Appareils ménagers-Automobile-Armement-Bâtiment-Chemin de fer-Chimie-Cycle Electricité-Manutention-Marine-Mécanique-Mines-Motocycles-Textile
A-S10UG	Pistons (Automobile-Motocycle)
A-S12N2G	Pistons (Automobile-Motocycle-Moteur Diesel-Compresseur)
AS12UN	Agriculture-Alimentation-Appareils ménagers-Automobile-Aviation-Bâtiment-Chemin de fer-Chimie-Cycle Electricité-Electro domestique-Manutention-Marine-Mécanique-Mines-Motocycles-Textile
A-S13	Pistons (Automobile-Motocycle)
A-S20U	Pistons (Motocycle)
A-S22UNK	Pistons (Motocycle-Motocycle)
A-G3T	Alimentation-Appareils ménagers-Automobile-Chemin de fer-Bâtiment(quincaillerie d'appartement Chimie-Electricité-Electro domestique-Marine-Mines-Textile
A-G4Z	Bâtiment(quincaillerie d'appartement)-Chemin de fer-Marine(quincaillerie)
A-G6	Alimentation-Appareils ménagers-Automobile-Bâtiment-Chemin de fer-Chimie Electricité-Electro domestique-Marine-Textile
A-Z5G	Automobile-Electro domestique-Cycle-Radionavigation-Industrie pétrolière-Mécanique-Electricité
A-U4NT	Automobile-Motocycle-Aviation-Optique
A-U5GT	Armement-Automobile-Aviation-Chemin de fer-Manutention-Mécanique-Mines Motocycle-Textile-Travaux publics-Appareillage électrique
A-U8S	Automobile-Mécanique-Divers: Plaques modèles
A-U10G	Pistons (Motocycle-Motocycle)
A-10S4	Alliage à grande dureté à chaud (Electro-ménager).



Ecole POLYTECHNIQUE DE THIES

Date 04-07-92

Echelle : 1/5

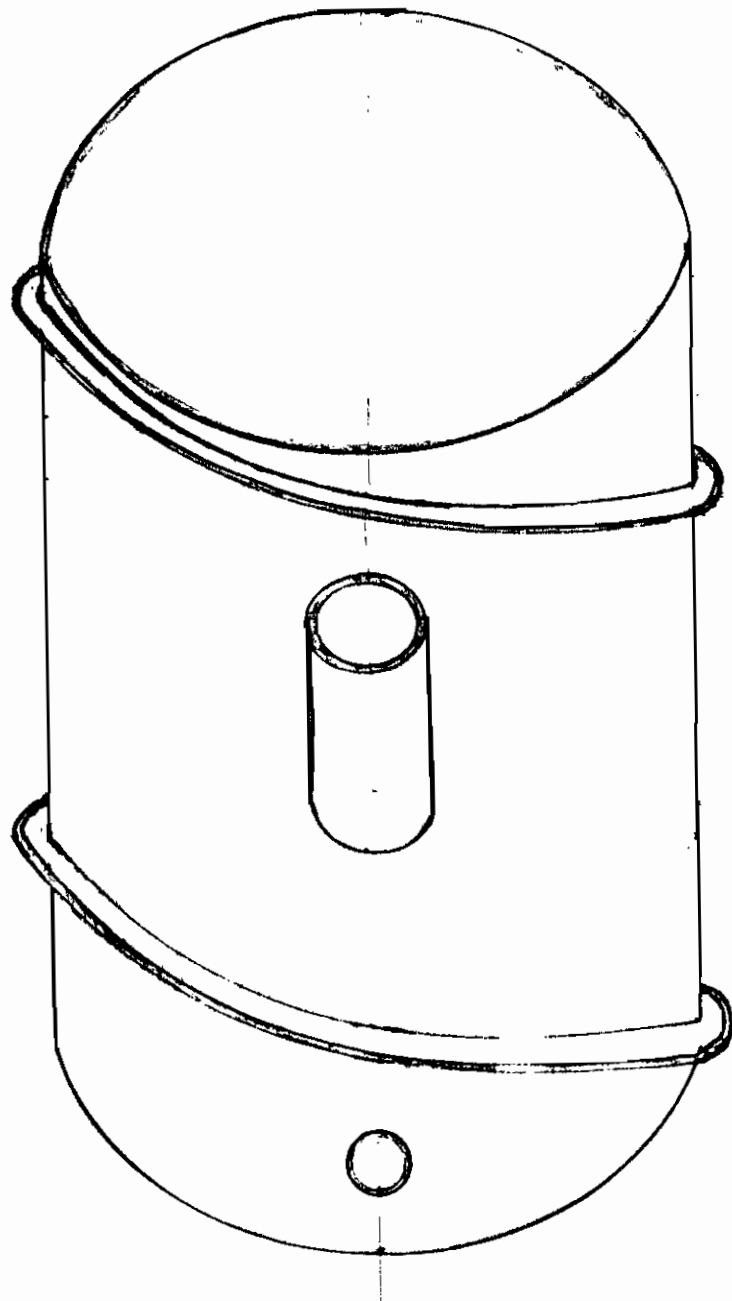
ECHANGEUR DE CHALEUR

Nom HOUEDOKHO,
F. NARCISSE



N° 722

feuille C1



Ecole POLYTECHNIQUE DE THIES	Date 04-07-92	Echelle
ECHANGEUR DE CHALEUR	Nom HOUEDOKOHO F. NARCISSA	
	N° 722	feuille C2

TABLEAU I

Aluminium non allié	Alliages d'aluminium		
	au cuivre	au silicium	au magnésium
A 7-Y	A-U4 N T-Y	A-S2 U-Y	A-G3 T-Y
A 5-Y	A-U5 G T-Y	A-S4 G-Y	A-G4 Z-Y
A 4-Y	A-U8 S-Y	A-S9 K G-Y	A-G6-Y
	A-U10 G-Y..	A-S10 G-Y	A-G11-Y
		A-S12 N-Y	
		A-S13 U-Y	
		A-S20 U-Y	

b) Pièces.

Les pièces sont définies, d'une part, par la composition chimique et les caractéristiques mécaniques du métal ou de l'alliage qui les constitue, d'autre part, par les caractéristiques géométriques et physiques qu'elles présentent.

ARTICLE IV

Désignation.

La désignation des pièces moulées en aluminium non allié et en alliages d'aluminium est faite conformément aux stipulations de la norme NF A 02-001 « Désignation chimique conventionnelle des métaux et alliages » et à celles du projet de norme en application PN A 02-002 « Désignation conventionnelle des modes d'obtention et des états de livraison des métaux et alliages non ferreux » (1).

Les modes d'obtention et les états normaux de livraison sont indiqués dans le tableau III ci-après.

TABLEAU III

Symbole	Mode d'obtention et états normaux de livraison
Y 20	Moulé en sable, non traité thermiquement.
Y 23	— trempé et revenu (1).
Y 24	— trempé et mûri (2).
Y 25	— stabilisé (3).
Y 29	— traité suivant prescription.
Y 30	Moulé en coquille, non traité thermiquement.
Y 33	— trempé et revenu (1).
Y 34	— trempé et mûri (2).
Y 35	— stabilisé (3).
Y 39	— traité suivant prescription.

(1) Ce traitement a pour but l'amélioration de certaines caractéristiques mécaniques. Il comporte une trempe à l'eau, à l'huile ou à l'air, suivie d'un chauffage de revenu à une température déterminée.

(2) Ce traitement a pour effet d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques. Il est analogue au précédent et s'applique aux alliages pour lesquels le revenu s'effectue à la température ambiante.

(3) Ce traitement a essentiellement pour objet d'assurer la stabilité des dimensions.

Exemple de désignation : Pièce en alliage d'aluminium à 4% de silicium et 0,65% de magnésium, coulée en sable, trempée et revenue : A-S4 G-Y 23.

ANNEXE III

NORMES FRANÇAISES

Il nous a paru indispensable pour compléter cette traduction d'y faire figurer — en plus des normes allemandes DIN auxquelles il est souvent fait allusion dans la littérature ou les relations industrielles — les normes françaises AFNOR relatives aux pièces de fonderie en alliages légers. La norme actuellement en vigueur est la norme NF A 57-702 dont les rubriques les plus importantes sont reproduites ci-après (1).

ARTICLE PREMIER

Domaine d'application.

La présente norme définit les pièces moulées en aluminium non allié ou en alliages d'aluminium dits de première fusion, coulées par gravité.

Elle fixe la terminologie, la classification et la désignation de ces produits, leurs conditions de fabrication, leurs caractéristiques et les techniques propres à les déterminer. Enfin, en annexe, elle précise leurs conditions de réception et les marques servant à les identifier.

ARTICLE II

Terminologie.

On entend par aluminium et alliages d'aluminium de première fusion ceux dans l'élaboration desquels n'est entré aucun produit de récupération.

L'aluminium non allié et les alliages d'aluminium répondent aux définitions suivantes :

- aluminium non allié : métal titrant au moins 98 % ;
- alliage d'aluminium : alliage contenant au moins 50 % d'aluminium.

ARTICLE III

Types normaux.

a) Métal ou alliage.

Les types normaux d'aluminium non allié sont classés en trois qualités et les quinze types normaux d'alliages d'aluminium en trois groupes : ils sont mentionnés dans le tableau I ci-dessous (2).

(1) Extraits de la norme NF A 57-702, décembre 1953, révisée le 31 août 1955, avec l'autorisation de l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 23, rue Notre-Dame des Victoires, Paris II^e. Seule fait foi la norme originale, dans son édition la plus récente.

(2) Les types mentionnés dans le tableau sont ceux dont l'utilisation est la plus fréquente.

ARTICLE IX

Caractéristiques mécaniques.

Les tableaux IV, V et VI ci-après fixent les valeurs minima des caractéristiques mécaniques ; ces valeurs s'entendent pour des éprouvettes coulées à part et du type défini plus loin à l'article XII.

Dans le cas où la commande stipule que les éprouvettes seront attenantes ou prélevées dans les pièces, toutes précisions devront être données au sujet du type d'éprouvette, des zones où le prélèvement devra être effectué, ainsi que sur les valeurs des caractéristiques mécaniques à obtenir (*). De même, pour les pièces devant satisfaire à des exigences particulières et présenter des caractéristiques plus élevées que celles figurant dans la présente norme, les conditions spéciales de réception devront figurer sur la consultation et sur la commande.

TABLÉAU IV
Alliages au cuivre

Designation	Résistance à la traction <i>R</i> minimum kgf/mm ² (1)	Limite d'élasticité <i>E</i> minimum kgf/mm ² (1)	Allongement à l minimum %	Dureté Brinell <i>H</i> minimum
A-U4 N T-Y20	16	12	a	70
A-U4 N T-Y24	22	16	a	85
AL4- N T-Y30	18	14	a	80
A-U4 N T-Y34	24	18	a	95
A-U5 G T-Y24	30	18	5,0	85
A-U5 G T-Y34	33	20	7,0	85
A-U8 S-Y20	16	11	a	75
A-U8 S-Y30	18	12	a	80
A-U10 G-Y 35	18	15	a	110

(1) Aux termes du décret du 28 février 1948, l'unité légale de force est le sthène et l'unité légale de pression, le pascle. Le kilogramme-force (kgf) valant pratiquement 0,98 esn et le kilogramme-force par millimètre carré (kgf/mm²) valant pratiquement 0,98 mpa, ne sont maintenus qu'à titre provisoire.

Il est précisé que les valeurs minima de dureté figurant dans les tableaux s'entendent pour des mesures effectuées sur les têtes des éprouvettes de traction coulées à part. Dans le cas où l'essai de dureté est exécuté sur les pièces, les valeurs minima et les four-

(*) D'une façon générale, il ne faut pas s'attendre à retrouver dans toutes les parties des pièces les valeurs des caractéristiques mécaniques relevées sur les éprouvettes coulées à part, ceci en raison de la complexité des pièces et des difficultés rencontrées pour leur moulage ; à titre d'indication et dans les cas les plus défavorables, ces valeurs peuvent subir un abaissement pouvant atteindre 30% pour la résistance à la traction et la limite d'élasticité et 50% pour l'allongement.

Cependant, le fondeur peut, moyennant des précautions spéciales, obtenir dans certaines régions de la pièce des caractéristiques approchant ou dépassant celles relevées sur éprouvettes coulées à part.

De ceci découle la nécessité d'une étroite collaboration entre le client et le fondeur lors de la conception et de la fabrication des pièces.

chettes de dureté doivent faire l'objet d'une convention particulière (voir Annexe art. 4-A).

Nota. — Dans les tableaux, la lettre E indique la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% de l'éprouvette, telle qu'elle est définie dans la norme NF A 03-101 « Essai de traction » : sa recherche n'est envisagée que si elle fait l'objet d'une stipulation à la commande.

La lettre « a » indique que l'allongement est trop faible pour être mesuré par les procédés habituels.

TABLEAU V
Alliages au silicium

Désignation	Résistance à la traction R minimum kgf/mm ² (1)	Limite d'élasticité E minimum kgf/mm ² (1)	Allongement A minimum (%)	Dureté Brinell H minimum
A-S2 U-Y20	14	10,0	3,0	60
A-S2 U-Y25	17	12,0	2,0	70
A-S2 U-Y30	16	12,0	3,0	70
A-S2 U-Y35	20	14,0	2,0	80
A-S4 G-Y20	15	10,0	1,0	60
A-S4 G-Y23	23	18,0	1,5	85
A-S4 G-Y30	18	10,0	1,0	65
A-S4 G-Y33	25	19,0	1,5	85
A-S9 K G-Y23	24	16,0	3,0	80
A-S9 K G-Y33	25	17,0	3,0	85
A-S10 G-Y20	16	9,5	3,5	55
A-S10 G-Y23	24	18,0	1,5	80
A-S10 G-Y30	19	11,0	2,0	65
A-S10 G-Y33	26	19,0	1,5	85
A-S12 U N-Y35	18	15,0	a	95
A-S13-Y20	17	8,0	4,0	55
A-S13-Y30	18	8,0	4,0	60
A-S20 U-Y30 ou 35	18	12,0	a	85

(1) Aux termes du décret du 28 février 1948, l'unité légale de force est le sthène et l'unité légale de pression, la piéze. Le kilogramme-force (kgf) valant pratiquement 0,98 csn et le kilogramme-force par millimètre carré (kgf/mm²) valant pratiquement 0,98 mapz ne sont maintenus qu'à titre provisoire.

TABLEAU VI
Alliages au magnésium

Désignation	Résistance à la traction <i>R</i> minimum kgf/mm ² (1)	Limite d'élasticité <i>E</i> minimum kgf/mm ² (1)	Allongement <i>A</i> minimum (%)	Dureté Brinell <i>H</i> minimum
A-G3 T-Y20	16	6	4	50
A-G3 T-Y30	18	6	5	60
A-G4 Z-Y20	16	6	4	50
A-G4 Z-Y30	18	6	5	60
A-G6-Y20	16	10	2	60
A-G6-Y30	19	11	4	65
A-G11-Y24	30	15	8	75

(1) Aux termes du décret du 28 février 1958, l'unité légale de force est le sthène et l'unité légale de pression, la piéze. Le kilogramme-force (kgf) valant pratiquement 0,98 esn et le kilogramme-force par millimètre carré (kgf/mm²) valant pratiquement 0,98 mapz ne sont maintenus qu'à titre provisoire.

ARTICLE X

Caractéristiques chimiques.

Les tableaux VII, VIII, IX et X ci-après fixent les caractéristiques chimiques des pièces ; sauf convention contraire, seul le dosage des éléments critiques dont les valeurs sont mentionnées en caractères gras est obligatoire.

Nota. — Lorsque certains de ces alliages sont utilisés pour la fabrication d'ustensiles destinés à être en contact avec des aliments ou à assurer leur cuisson, l'analyse chimique ne devra, en aucun cas, faire apparaître pour chacun des éléments ci-dessous :

- beryllium,
- tantale,
- thallium,
- arsenic,

une teneur supérieure à 0,05 % (voir normes NF D 21-440 et NF D 21-441).

TABLEAU VII
Aluminiums non alliés

Désignation	Composition chimique, %		
	Al	Fe + Si	Somme des autres éléments (1)
A 7-Y	le reste	< 0,30	< 0,05
A 5-Y		< 0,50	< 0,10
A 4-Y		< 1,00	< 0,20

(1) Les autres éléments sont considérés comme impuretés ; ils ne doivent pas individuellement dépasser 0,05 % en poids.

TABLEAU VIII
Alliages au cuivre

Désignation	Composition chimique, %									
	Al	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Somme des autres éléments (1)
A-U4 N T-Y (2)	< 0,65	< 0,65	3,50 à 4,50	±	1,20 à 1,80	±	±	1,70 à 2,30	0,20	< 0,20
A-U5 G T-Y (2)	< 0,35	< 0,30	4,20 à 5,00	±	0,15 à 0,35	---	---	---	0,30	< 0,20
A-U8 S-Y	le reste	< 0,80 à 1,50	2,00 à 4,50	6,00 à 8,50	±	±	< 0,20	---	0,20	0,50
A-U10 G-Y		0,60 à 1,30	0,80	9,30 à 10,70	±	0,15 à 0,35	0,20	< 0,20	0,20	0,20

Légende: ± < 0,10 --- 0,05 (traces).

(1) Les autres éléments sont considérés comme impuretés ; ils ne doivent pas individuellement dépasser 0,10 % en poids.

(2) L'addition du titane est nécessaire pour l'affinage de ces alliages.

Cet élément pouvant être effacé avec une teneur non détectable pratiquement, il n'y a pas lieu de lui fixer une valeur minimum.

TABLEAU IX
Alliages au silicium

Désignation	Composition chimique, %										
	Al	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Co	Somme des autres éléments (1)
A-S2 U-Y...		0,80 à 1,20	1,90 à 2,50	1,15 à 1,50	× +	0,05 à 0,15	+ +	1,15 à 1,50	< 0,20		< 0,20
A-S4 G-Y...		0,65	3,50 à 4,50	+	+ +	0,45 à 0,85	0,50 à 0,90	+ +	+	< 0,20	< 0,20
A-S9 K G-Y...		0,60	8,80 à 9,70	+ +	+ +	0,17 à 0,25	+ +	+ +	+	0,35 à 0,55	< 0,20
A-S10G-Y	le reste	< 0,65	8,90 à 10,10	+	+ +	0,17 à 0,35	0,25 à 0,50	+ +	+	< 0,20	< 0,20
A-S12 U N-Y		0,75	11,50 à 13 (2)	0,50 à 1,50	+	0,80 à 1,50	0,30 à 1,50	0,50 à 1,50	+		0,20
A-S13-Y		0,75	12,00 à 13,70	+	+	+	< 0,30	+ +	+	0,20	0,20
A-S20 U-Y...		0,75	18,00 à 22,00	1,00 à 3,00	+	+	+	1,50	-		< 0,20

Légende : + < 0,10 -+ < 0,05 (traces).

(1) Les autres éléments sont considérés comme impuretés; ils ne doivent pas individuellement dépasser 0,10 % en poids.

(2) Compte tenu du rectificatif du 31 août 1955.

TABLEAU X
Alliages au magnésium

Désignation	Composition chimique, %										Somme des autres élé- ments (1)
	Al	Fe	Si	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Cr	
A-G3 T-Y...		< 0,50	< 0,40	+	+	2,50 à 3,50	< 0,50	+-	< 0,20	< 0,20	< 0,20
A-G4 Z-Y...		< 0,55	< 0,50	-	+	0,90 à 1,45	3,50 à 4,50	< 0,30	+-	< 0,20	< 0,20
A-G6-Y...	le reste	< 0,50	< 0,40	-	+	5,00 à 7,00	< 0,50	++	< 0,20	0,20	< 0,20
A-G11-Y (2)		< 0,30	< 0,20	-	+	10,50 à 12,00	-	--	< 0,20	< 0,20	< 0,20

Légende : + < 0,10 ++ < 0,05 (traces).

(1) Les autres éléments sont considérés comme impuretés; ils ne doivent pas individuellement dépasser 0,10 % en poids.

(2) L'alliage A-G11 peut présenter une teneur en béryllium inférieure à 0,05 % qui ne doit pas être considérée comme impureté.