

ECOLE POLYTECHNIQUE

DE THIES

PROJET DE FIN
D'ETUDES

Gm. 0601

SUJET: AMENAGEMENT D'UNE

FONDERIE A LA RCFS

ANNEE: 1981-1982

AUTEUR

YOUSSEPH MANDIANG

DIRECTEUR

JANUSZ ZNAMIEROWSKI

ecole polytechnique
de thies

REMERCIEMENTS.

Je remercie très sincèrement M^r Janusz ZNAMIEROWSKI mon Directeur de projet pour son entière disponibilité, son aide et ses bons conseils durant tout ce projet

Je remercie également M^r Guy VIGNEAULT technicien à l'E.P.T., MM. Roger LUPIEN et Michel PETITEAU professeurs à l'E.P.T., M^r Michel RIGAUD vacataire canadien, MM. VAXELAIRE, LACOST, LOIZEAU, et LESMARIE tous de la Régie des Chemins de Fer du Sénégal (R.C.F.S.) et enfin tous ceux de l'E.P.T. et de la R.C.F.S. qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce projet.

SOMMAIRE

Nous essayons dans ce projet de trouver des solutions au problème de la dureté trop élevée des semelles de frein en fonte, produites par la Fonderie de la Régie des Chemins de Fer du Sénégal (RCFS) à partir des matériaux de récupération. Ces semelles sont parsemées des défauts — comme retassures, soufflures, inclusions etc. — connus des pièces de fonderie, d'autre part.

Pour étudier ces problèmes nous procéderons comme suit :

- Etude du comportement de la semelle dans le système de freinage ;
- Etude des constituants de base des fontes moulées ... ;
- Etude sur la germination du graphite dans une pièce en fonte, et étude expérimentale sur la dureté ;
- Etude de la marche du cubilot pour tenter de remédier à certains défauts ;
- Brève étude du bilan thermique afin de construire le cubilot qui remplacerait celui qui ne marche plus ;

Nous finirons par un chapitre de définitions de certains termes employés couramment en Métallurgie de Fonderie, mais tous les mots expliqués dans ce chapitre ne se trouvent pas le texte ; c'est pourquoi nous ne pourrions pas appeler cette partie « Lexique »

Les mots expliqués se trouvant dans le texte seront soulignés au moins une fois par un trait interrompu court (-----)

TABLE DE MATIERES

TITRE PAGE

Introduction 1

CHAPITRE 1

3-a

1.1. ETUDE AU FREINAGE 3

1.1.1. SYSTEME DE FREINAGE 3

1.1.2. Semelle de frein 3

1.1.3. Rapport des forces au cours du freinage 6

1.2. INFLUENCE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT μ_k 7

1.2.1. Freinage d'un wagon de 50t sur terrain plat 7

1.2.2. Freinage d'un wagon de 50t sur une Pente α 10

1.2.3. Etude de l'effort de freinage en fonction de μ_k et V 13

1.3. CONCLUSION SUR LE FREINAGE 16

CHAPITRE 2 17-a

2.1. CONSTITUANTS DE BASE DES FONTES 17

2.1.1. Ferrite 17

2.1.2. Cémentite 17

2.1.3. Perlite 18

2.1.4. Graphite 18

2.2. INFLUENCE DES CONSTITUANTS DE BASE 19

2.2.1. Fontes blanches 19

2.2.2. Fontes grises	20
2.2.3. Influence du graphite	21
2.2.31. Diminution du retrait	21
2.2.32. Démonstration	21
2.2.33. Amélioration des conditions de frottement	22
2.3. QUELQUES ELEMENTS D'ADDITION	23
2.3.1. Effets du silicium (Si)	23
2.3.2. Effets du Phosphore (P)	23
2.3.3. Effets du soufre (S)	24
2.3.4. Effets du manganèse (Mn)	24
2.3.5. Effets du nickel (Ni)	24
2.3.6. Effets du vanadium	25
2.3.7. Autres éléments anti-graphitisants	25

CHAPITRE 3

26-a

3.1. GRAPHITISATION	26
3.1.1. Cas général	26
3.1.2. Cas des fontes grises à faible teneur en silicium	26
3.1.21. Théorie ①	26
3.1.22. Théorie ②	27
3.1.3. Cas des fontes inoculées	27
3.1.31. Théorie ③	27
3.1.4. Facteur de graphitisation	28
3.2. INOCULATION DE LA FONTE	29
3.2.1. Temps d'action d'un inoculant	30
3.2.2. Quantité d'inoculant	30

3.2.3. Avantages de l'inoculation	32
3.2.4. Principaux inoculants industriels	32
3.3 - RESULTATS EXPERIMENTAUX	34

CHAPITRE 4 39-a

4.1. LE CUBILOTT	39
4.1.1. Cubilot charge	39
4.1.2. zones du cubilot	39
4.2. ETAPES DE LA MARCHE DU CUBILOTT	42
4.2.1. Préparation des matériaux destinés à la fusion	42
4.2.11. Triage des matériaux	42
4.2.12. Cassage de grosses pièces	42
4.2.2. Pesage	44
4.2.3. Parc à combustibles et à fondant	45
4.2.31. Coke	45
4.2.32. Fondant	46
4.2.4. Air comburant	46
4.2.5. Désulfuration	48
4.2.6. Décrassage	48
4.2.61. Décrassage du cubilot	49
4.2.62. Décrassage de la poche de coulée	49
4.2.7. Analyse du produit	51
4.2.71. Recherche de carbone équivalent par essai destructif	51
4.2.72. Recoupement par estimation de la dureté	51

CHAPITRE 5

53-a

5.1. BILAN THERMIQUE DU CUBILOT	53
5.1.1. Etude du rendement du cubilot	53
5.1.11. Le rendement du four	53
5.1.12. Le rendement de combustion	54
5.1.13. Comment améliorer le rendement ?	55
5.2. CONSTRUCTION DU CUBILOT	56
5.2.1. Isolation thermique	56
5.2.2. Température des fumées et du vent	57
5.2.3. Proposition	58

CHAPITRE 6

60-a

6.1. QUELQUES DEFINITIONS	60
<hr/>	
CONCLUSION	72
DISCUSSION et RECOMMANDATIONS	73
BIBLIOGRAPHIE	

ANNEXES

A-0

1- Coefficient de frottement en fonction de la vitesse	A-1
2- Constituants de base des fontes	A-1
3- Formation de la cémentite au refroidissement rapide	A-2
4- Diverses formes de graphite	A-3

5. Teneur en silicium d'une pièce en fonte	A-4
6. Effets du soufre sur la dureté'	A-5
7. Effets du vanadium sur la résistance à l'usure	A-5
8. INFLUENCE DU NICKEL SUR LA DURETE	A-6
9. Germination du graphite au refroidissement lent	A-7
10. Germination du graphite après inoculation au FeSi	A-8
11. Résistance R_{30} en fonction de la résistance R_{ϕ}	A-9
12. Conversion d'unités de dureté'	A-10
13. Cubilot à vent chaud par récupération	A-11

INTRODUCTION

L'art du fondeur consiste à transformer la fonte brute en gueuses, produites par les hauts fourneaux, pour lui donner les formes et les qualités requises dans l'industrie. Mais comme toutes les techniques, la fonderie évolue sans cesse. Les possibilités qu'offre actuellement cette technique d'obtention des pièces métalliques étaient naguère impensables, les méthodes scientifiques modernes, ont permis de faire connaître le rôle de chacun des éléments composants des alliages.

Nous sommes loin de l'époque où le mot « fonte » désignait un matériau lourd duquel il n'était pas nécessaire d'exiger trop de caractéristiques mécaniques.

Le fondeur doit, à l'heure actuelle, connaître d'une façon parfaite, les matériaux qu'il met en œuvre afin de pouvoir donner aux pièces qu'il produit, des propriétés physiques, chimiques ou mécaniques souhaitées par les utilisateurs.

Il s'agit ici d'étudier un projet dont l'objectif immédiat est de trouver des « solutions » aux problèmes posés au niveau d'une fonderie déjà existante au sein de la Régie des Chemins de Fer du Sénégal - RCF.S. et qui fabrique des semelles de frein en fonte pour les véhicules ferroviaires de ladite compagnie.

Cette compagnie souhaiterait une amélioration de l'efficacité du freinage de ses véhicules. Elle se plaindrait

d'autre part de l'usure élevée et prématurée des bandages, due à une fonte trop dure et à bas coefficient de frottement. Les conséquences qui en découlent ne seraient pas très heureuses.

Il est toutefois connu que le rechargement d'une jante usée demande une dépense supplémentaire d'énergie; Or une bonne conduite du cubilot assure une amélioration de la qualité de production, une économie de matière et d'énergie.

Ce modeste projet, loin de faire du lecteur un excellent fondeur, mettrait un peu de lumière sur un domaine aussi vaste et aussi complexe que la fonderie.

Il serait alors utile de préciser que dans ce texte, nous nous présenterons plutôt comme un guide pour un fondeur que pour un modelleur ou un mouleur.

CHAPITRE 1

1. 1. ETUDE AU FREINAGE

1. 2. INFLUENCE DU COEFFICIENT
DE FROTTEMENT

1. 3. CONCLUSION SUR LE FREINAGE

4-1. ETUDE AU FREINAGE

Avant de se lancer à la production d'une pièce devant faire partie d'un ensemble, il est absolument nécessaire de savoir la place occupée et le rôle joué par cette pièce au sein de cet ensemble.

Ainsi, nous pensons qu'il ne serait pas mauvais de faire une étude sur le freinage afin de mieux saisir la fonction de nos semelles dans cet ensemble qu'est le système de freinage d'un wagon.

4.1.1 Système de freinage

Nous présentons le schéma d'ensemble d'un système de freinage d'un wagon à deux essieux à la page 4 ; nous n'avons pas à y consacrer trop de temps car nous ne le montrons ici qu'en guise d'information sur la position des semelles sur une jante.

4.1.2. Semelle de frein

Une semelle de frein est dessinée à la page 5 fig 2. Au niveau de notre fonderie de la RCFS nous produisons des semelles à partir de divers modèles ; donc chaque catégorie de semelle doit avoir un nom propre. La semelle dessinée à l'échelle $\frac{1}{2}$ de la figure 2 est une semelle **U5**.

Ici aussi on ne doit pas mettre de temps supplémentaire après celui pris par le dessin.

Disposition d'ensemble des pièces pour un wagon à 2 essieux avec freinage à la charge mécanique et frein à main

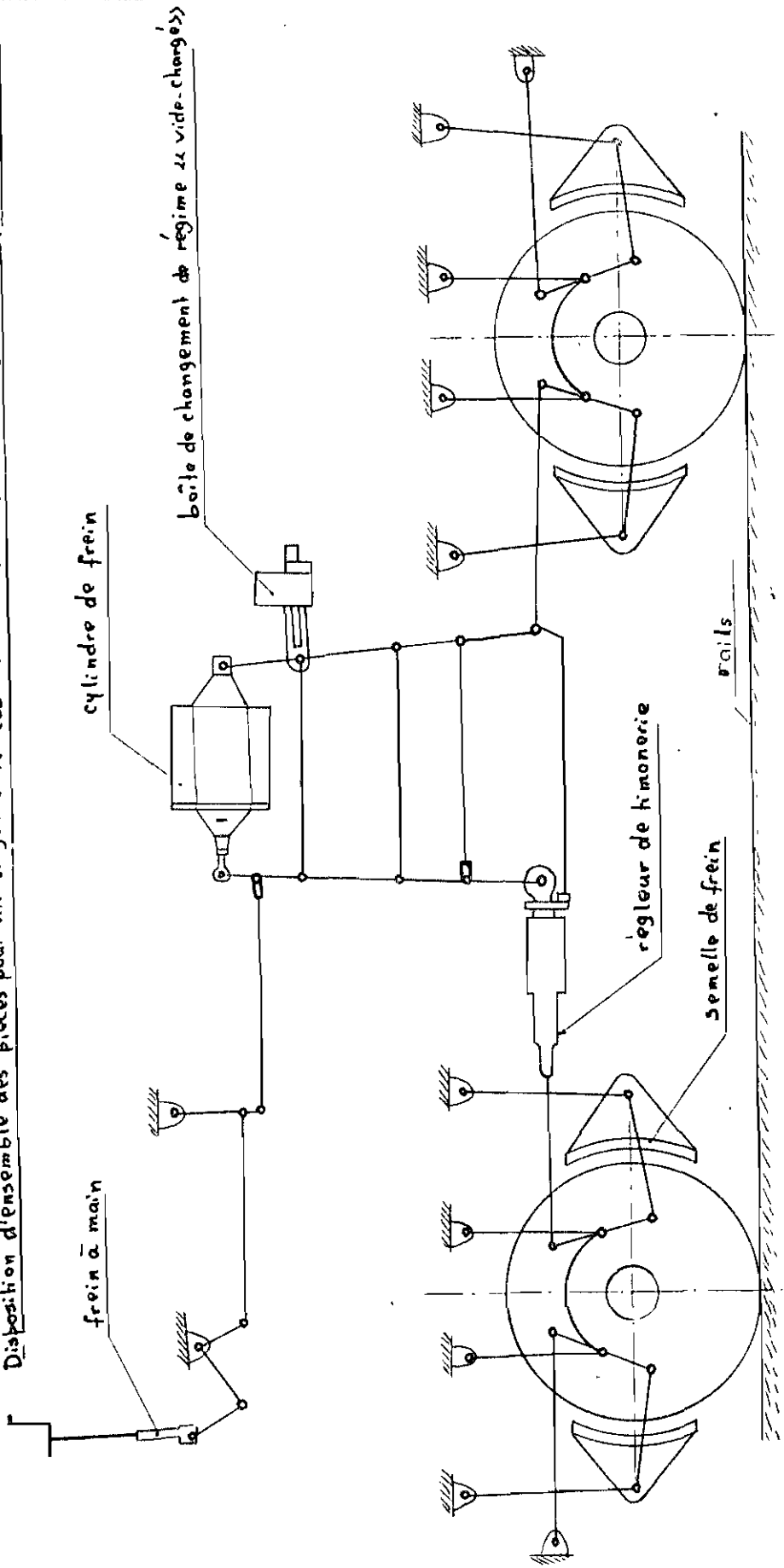
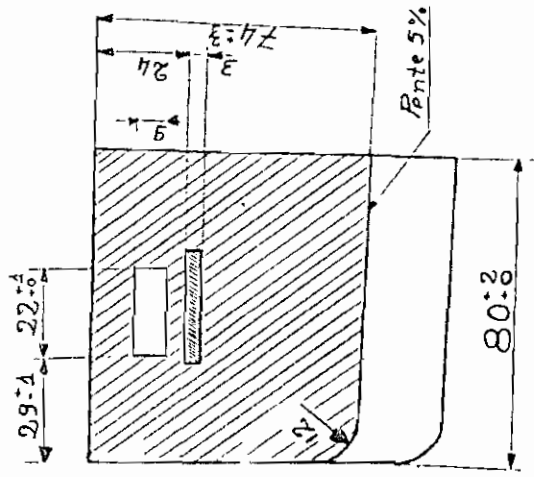


Fig. 4 Schéma de la timonerie d'un wagon à 2 essieux avec dispositif vide-charge par boîte SAB avec régleur SAB.

ECHELLE: 0.5

COUPE AA



1/2 COUPE CC

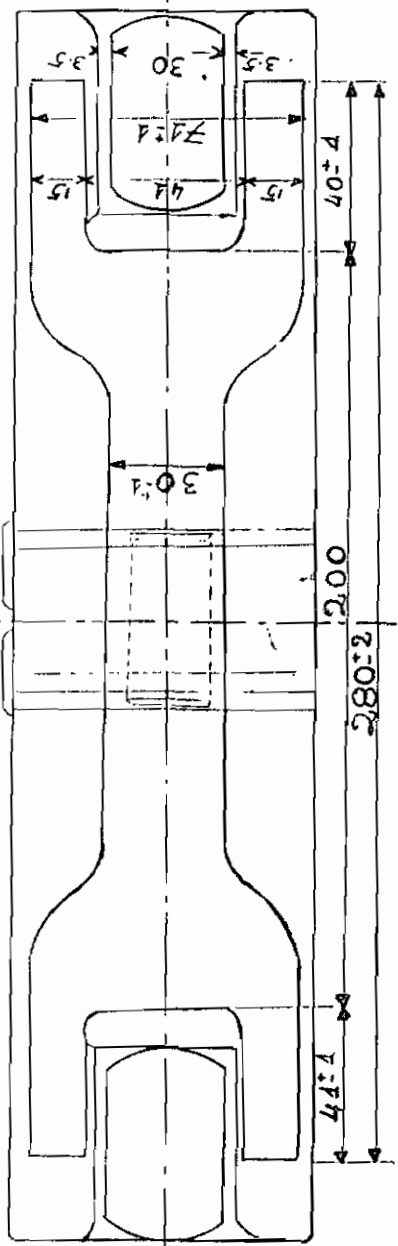
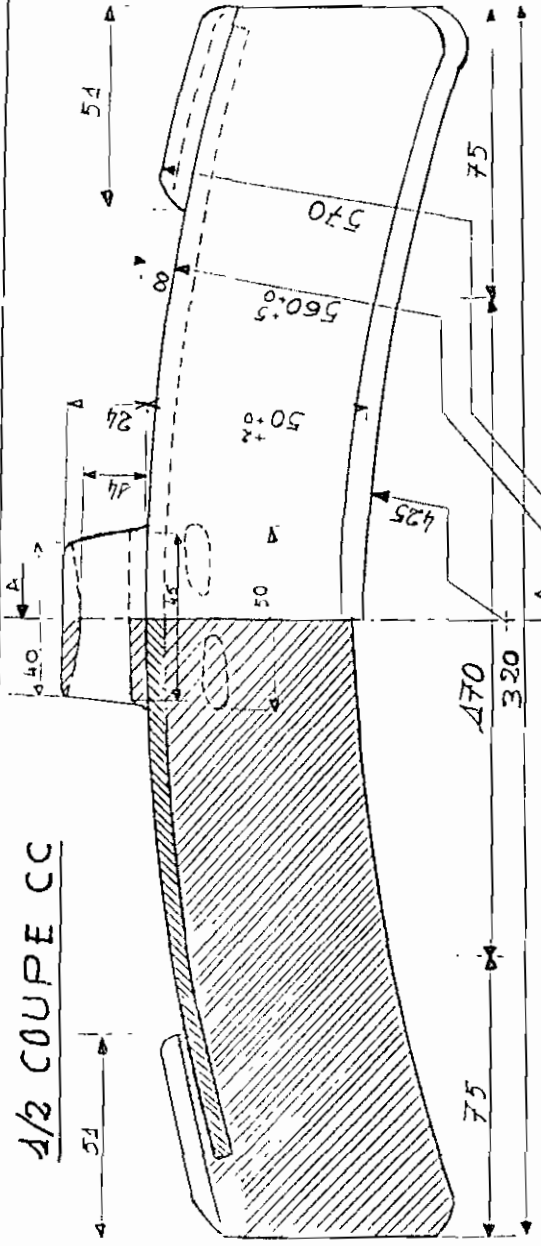


Fig. 2: SEMELLE U5

4.3 RAPPORT DES FORCES AU COURS DU FREINAGE

Pour étudier la fabrication d'une semelle de frein, il est important de savoir comment travaille celle-ci. Au cours d'un freinage, il y a deux forces qui interviennent : l'effort tangentiel engendré par la semelle et l'effort d'adhérence roue-rail. Pour éviter le glissement ou le blocage des roues lors du freinage, il faut que l'effort tangentiel créé par la semelle soit toujours inférieur à l'effort d'adhérence roue-rail (fig 3)

$$P \cdot \mu_k < Q \cdot \mu_s$$

P = Effort radial exercé par le sabot

$P \cdot \mu_k$ = Effort de freinage

Q = Charge par essieu

$Q \cdot \mu_s$ = Effort adhérent

μ_k = coefficient de frottement entre la roue et la semelle

μ_s = Coefficient d'adhérence entre la roue et le rail

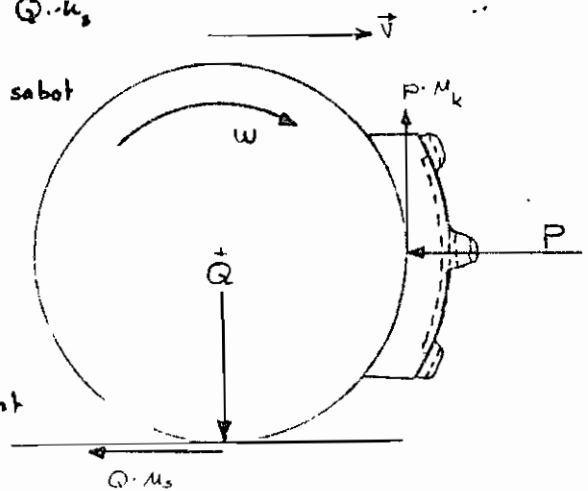


fig 3 : Rapport des forces s'exerçant sur la roue en mouvement

Le freinage est optimal lorsque l'effort $P \cdot \mu_k$ est à tout instant proche de $Q \cdot \mu_s$, sans jamais l'atteindre, i. e

$$P \cdot \mu_k = Q \cdot \mu_s - \Sigma$$

Remarque: Nous voyons ici le rôle joué par le coefficient de frottement μ_k . En effet étant donnés Q et μ_s , μ_k joue sur P .

4-2. INFLUENCE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT LORS DU FREINAGE

Nous nous proposons d'étudier ici l'influence du coefficient de frottement dynamique μ_k sur la distance parcourue par un train avant son arrêt après l'application des freins et sur l'effort nécessaire lors du freinage pour diverses vitesses.

4-2.1. Freinage d'un wagon de 50000 kg sur terrain plat.

M = masse du wagon en kg

v = vitesse du train lors du freinage

F = effort total du freinage [N]

f = effort s'opposant à l'avance du train ;

$f = F \cdot \mu_k$ où μ_k = coefficient de frottement

γ = décélération provoquée par l'effort de freinage ;

T = temps de réponse des freins (= 10 s pour trains de hoom)

x_0 = distance ~~par~~ parcourue durant le temps de réponse

X = distance brute parcourue après la réponse des freins et avant l'arrêt complet du train

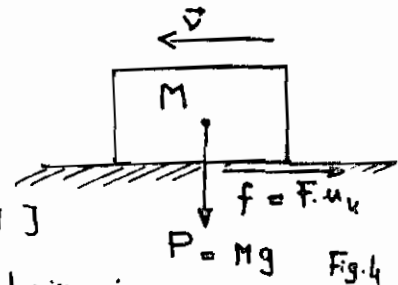
x = distance totale parcourue avant l'immobilisation totale du train ; $x = x_0 + X$ en [m]

C'est cette distance x que nous étudierons ici en fonction du coefficient μ_k et à diverses vitesses.

Le principe fondamental de la dynamique énonce :

$$- f = F \cdot \mu_k = M \gamma \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{f}{M} = \frac{F \cdot \mu_k}{M}$$

$$- v^2 = 2 \gamma X \quad \Rightarrow \quad X = \frac{v^2}{2 \gamma} = \frac{v^2 M}{2 F \mu_k}$$



On a donc $x = 10v + \frac{v^2 \cdot M}{2F \cdot \mu_k}$

Pour $v = 90 \text{ km/hr}$ ou 25 m/s

$$M = 50\,000 \text{ kg} \quad (=50 \text{ t})$$

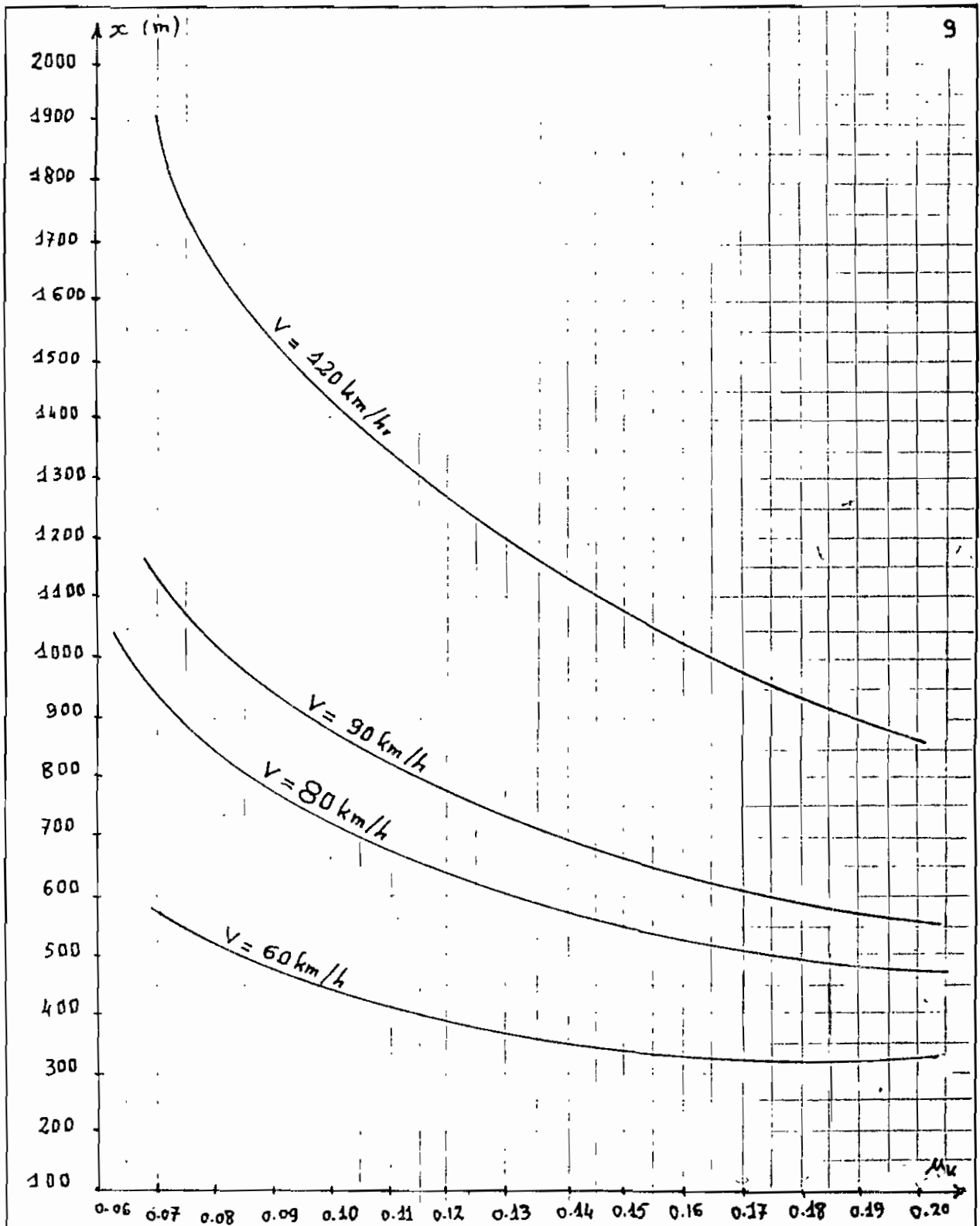
$$F = 25000 \text{ daN} = 250\,000 \text{ N} \quad \text{et} \quad \mu_k = 0.17$$

$$\text{on aura : } x = \frac{10 \cdot 25}{(\text{m})} + \frac{25^2 \cdot 50\,000}{2 \cdot 250\,000 \cdot 0.17} = 618 \text{ m.}$$

En fixant F et M et en faisant varier v et μ_k nous arrivons à établir le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Distance d'arrêt en fonction de μ_k et v sur terrain plat

μ_k	X_0 (m)	$x = X_0 + X$ (m)					
		$v = 33.33$ (120 km/h)	$v = 25 \text{ m/s}$ (90 km/h)	$v = 22.2 \text{ m/s}$ (80 km/h)	$v = 16.6 \text{ m/s}$ (60 km/h)	$v = 8.3 \text{ m/s}$ (30 km/h)	
0.08	10v	1722	1031	839	514	170	
0.09		1568	944	771	475	160	
0.10		1444	875	716	444	153	
0.11		1343	818	671	419	146	
0.12		=	1259	770	634	398	141
0.13		X_0	1187	731	602	380	136
0.14	10v	1127	696	575	365	133	
0.15		1074	667	551	352	130	
0.16		1028	641	531	340	127	
0.17		=	987	618	513	330	124
0.18		X_0	950	597	496	321	122
0.19		X_0	918	578	482	313	120
0.20	889		563	469	306	118	



Graphique 4 : Courbes des distances d'arrêt en fonction du coefficient de frottement dynamique μ_k et de la vitesse V sur un terrain plat (c.f. tableaux de la page précédente) pour le freinage d'un wagon de 50 000 kg par un effort de 250 kN.

1.2.2. Freinage d'un wagon de 50000 kg sur une pente α :

Etudions le freinage de notre wagon sur une pente de 2%
comme montré à la figure ci-dessous.

Les notations sont les mêmes
que celles présentées à la figure de
la page 7.

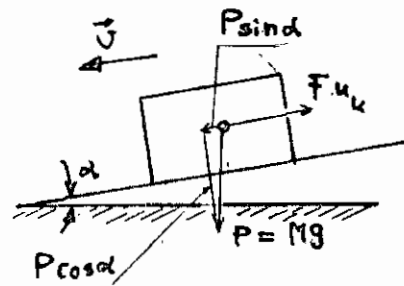


Fig. 5

En appliquant le principe fondamental de la dynamique on

$$\text{aura: } f = F \cdot \mu_k - P \sin \alpha, \quad \alpha = 2\%$$

$P = Mg$ est le poids en [N] du wagon

g = l'accélération de la pesanteur en [m/s²] d'où

$$f = M\gamma \Rightarrow \gamma = \frac{f}{M} = \frac{F \cdot \mu_k - P \sin \alpha}{M} = \frac{F \cdot \mu_k - Mg \sin \alpha}{M}$$

En suivant le même raisonnement on a :

$$x = \frac{v^2}{2\gamma} = \frac{v^2 M}{2(F \cdot \mu_k - Mg \sin \alpha)} ; \text{ on trouve en fin}$$

que la distance x est :

$$x = \frac{v^2 M}{2(F \cdot \mu_k - Mg \sin \alpha)} + 10v$$

Application :

$$M = 50000 \text{ kg}$$

$$v = 25 \text{ m/s } (90 \text{ km/h})$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$F = 250 \text{ kN} = 25 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$\mu_k = 0.15$,

La distance parcourue sera :

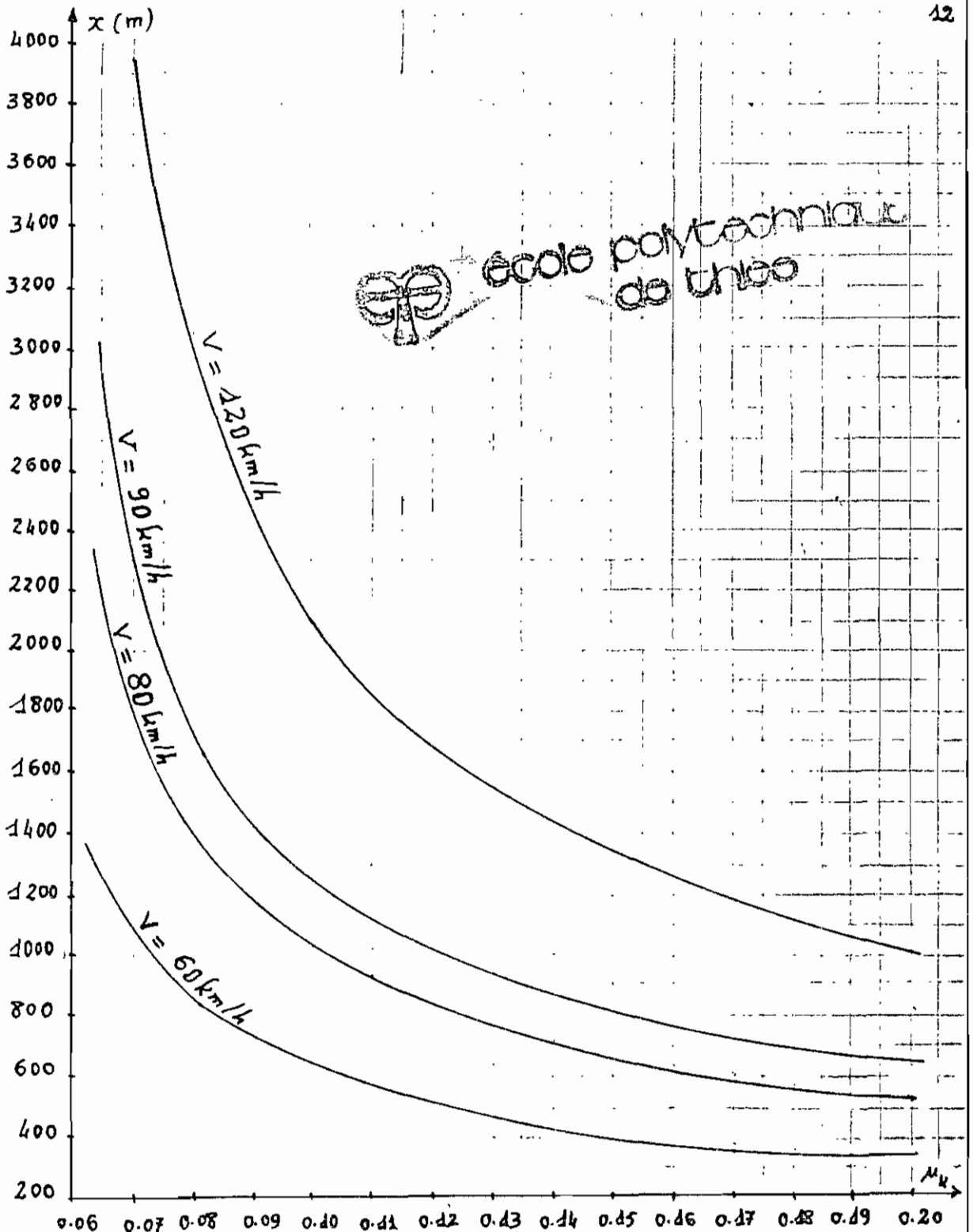
$$x = \frac{25^2 \times 50000 \text{ (m/s)}^2 \text{ (kg)}}{2(25 \times 10^4 \times 0.15 - 50000 \times 9.81 \times \sin(0.02)) \text{ (N)}} + 250 \text{ (m)}$$

$$= 814 \text{ m ;}$$

En fixant F à $25 \times 10^4 \text{ N}$ et M à 50 t et en faisant varier v et μ_k nous obtenons le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Distance d'arrêt en fonction de μ_k et v sur pente 2%

μ_k	X_0 (m)	$x = X_0 + X$ (m)				
		$v = 33.33 \text{ m/s}$ (120 km/h)	$v = 25 \text{ m/s}$ (90 km/h)	$v = 22.2 \text{ m/s}$ (80 km/h)	$v = 16.66 \text{ m/s}$ (60 km/h)	$v = 8.33 \text{ m/s}$ (30 km/h)
0.07	$X_0 = 10V$	3940	2279	1825	1068	309
0.08		3056	1782	1432	848	253
0.09		2519	1480	1194	713	220
0.10		2160	1278	1034	623	197
0.11	$X_0 = 10V$	1902	1133	920	559	181
0.12		1708	1024	833	510	169
0.13		1556	938	766	472	160
0.14		1435	870	712	442	152
0.15	$X_0 = 10V$	1336	814	668	417	146
0.16		1253	767	631	396	141
0.17		1183	728	600	379	136
0.18		1122	694	573	364	132
0.19		1070	664	550	351	129
0.20		1024	639	529	339	126



Graphique 2 : Distances d'arrêt en fonction du coefficient de frottement dynamique μ_k et de la vitesse sur un terrain de pente 2% (voir tableau 2 de la page précédente) pour le freinage d'un wagon de 50000 kg par un effort de 250 kN.

1.2.3. Étude de l'effort de freinage en fonction de μ_k et v :

Nous étudions ici l'effort de freinage en fixant notre distance x à 500 m, pour le même wagon de 50 t sur terrain plat. Reprenons la figure de la page 7.

A la page 8 nous avons établi l'équation :

$$x = 10v + \frac{v^2 M}{2F \mu_k} ;$$

De cette équation,

nous avons :

$$F = \frac{v^2 M}{2\mu_k (x - 10v)}$$

Mais $x - 10v = X$, d'où :

$$F = \frac{v^2 M}{2X \mu_k}$$

Application

$$v = 25 \text{ m/s} \quad (90 \text{ km/h})$$

$$x = 500 \text{ m} = 10v + X \Rightarrow X = 500 - 10 \cdot 25 = 250 \text{ m}$$

$$M = 50 \text{ t} = 50\,000 \text{ kg}$$

$$\mu_k = 0.17$$

$$\text{On a alors : } F = \frac{25^2 \cdot 50\,000 \text{ (m/s)}^2 \text{ (kg)}}{2 \cdot 250 \cdot 0.17 \text{ (m)}} = 368 \cdot 10^3 \text{ N}$$

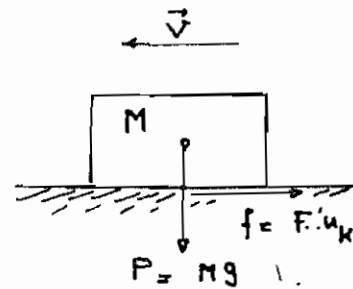
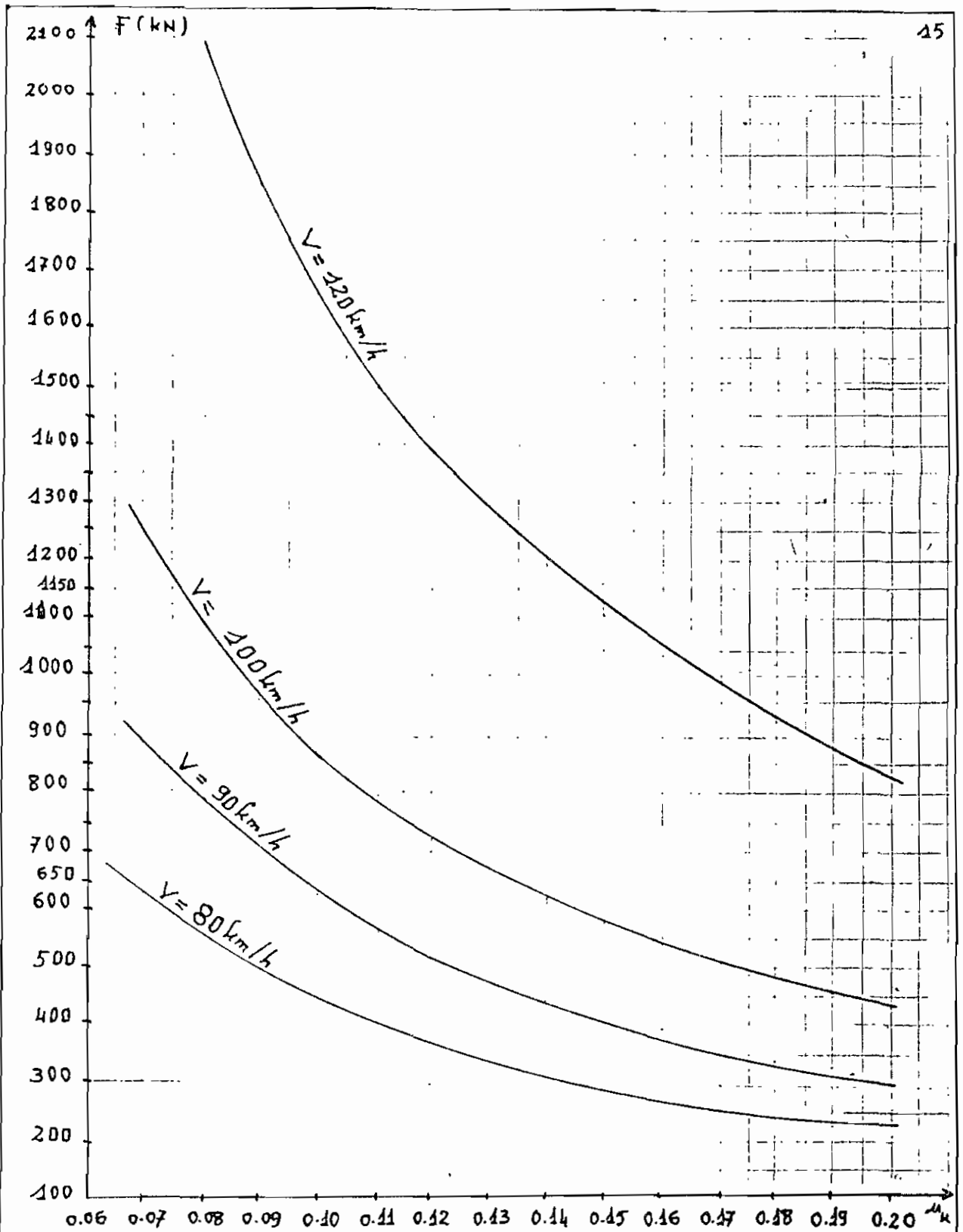


fig: 6

En maintenant x à 500 m , M à 50t et en faisant varier μ_k et V nous obtenons la tableau ci-dessous.

Tableau.3 : Effort de freinage en fonction de μ_k et V :

μ_k	$x=40V$ X (m)	$F = \frac{V^2 \cdot M}{2x \mu_k}$ (KN)				
		$V=33.3$ (120 km/h)	$V=27.78$ (100 km/h)	$V=25$ (90 km/h)	$V=22.22$ (80 km/h)	$V=16.67$ (60 km/h)
0.07	X = 500 - 40V	2380.0	2240.0	893.0	635.0	298.0
0.08		2082.5	1085.1	781.3	556.0	260.4
0.09		1851.1	964.5	694.5	494.0	231.5
0.10		1666	868.0	625.0	444.5	208.3
0.11	X = 500 - 40V	1514.5	789.1	568.2	404.0	198.4
0.12		1388.3	723.5	521.0	370.3	173.6
0.13		1281.5	668.0	481.0	342.0	160.3
0.14		1190.0	620	446.4	317.5	148.8
0.15		1111.0	579	417.0	296.3	139.0
0.16	X = 500 - 40V	1041.3	542.5	391.0	278.0	130.2
0.17		980.0	511.0	368.0	261.4	122.5
0.18		926.0	482.3	347.2	247.0	116.0
0.19		877.0	457.0	329.0	234.0	111.0
0.20		833.0	434.0	312.5	222.2	104.2



Graphique 3 : Efforts de freinage en fonction du coefficient de frottement dynamique μ_k et de la vitesse V (cf tableau 3. de la page précédente) pour freiner un wagon de 50 t sur une distance x de 500 m et sur un terrain plat.

4.3. CONCLUSION SUR LE FREINAGE

Nous venons de voir l'importance du rôle joué par le coefficient de frottement dynamique μ_k lors du freinage. L'idéal est de pouvoir parvenir à l'arrêt complet d'un véhicule sur une distance relativement courte en appliquant un effort relativement faible sur les essieux. Or nous savons maintenant que nous ne pourrions être proche de cet idéal qu'en utilisant des semelles de frein en une fonte ayant un coefficient de frottement dynamique assez élevé.

Nous savons que la dépendance du coefficient de frottement dynamique de la fonte, de la vitesse de départ est relativement grande (fig 49, annexe page A-1); mais ce désavantage de la fonte par rapport aux matières composites ne devrait pas nous décourager de rechercher les conditions favorables à l'augmentation, au sein de nos semelles de la R.C.F.S. du coefficient de frottement dynamique μ_k ; bien au contraire.

Le coefficient de frottement de la fonte variant dans un sens inverse de celui de sa résistance à l'usure nous chercherons à adoucir nos semelles en diminuant dans celles-ci, l'effet des éléments stabilisateurs des carbures par l'emploi des éléments ayant un effet contraire.

Nous devons donc savoir distinguer des éléments qui adoucissent la fonte de ceux qui la durcissent; ce sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2

- 2-1. CONSTITUANTS DE BASE DES FONTES
- 2-2. INFLUENCE DES CONSTITUANTS DE BASE
- 2-3. QUELQUES ELEMENTS D'ADDITION

2.1. CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DE BASE DES FONTES

2.1.1. Ferrite

C'est du fer à l'état allotropique α , lequel peut contenir des quantités relativement importantes de silicium, du phosphore, du Nickel.

La ferrite est magnétique et a :

- une dureté faible $HB \approx 80$
- une résistance à la rupture en tension R de l'ordre de 300 MPa;
- une densité $d \approx 8$
- un allongement A allant jusqu'à 50%

La ferrite est la structure obtenue lorsque le métal se refroidit lentement après la solidification (fig 21 annexe page A-1)

2.1.2. Cémentite

C'est un carbure de fer de formule chimique Fe_3C contenant 6.66% de carbone, qui existe dans les fontes riches en carbone et refroidies rapidement (diagramme en annexe page A-2)

La cémentite est de couleur blanche (fig 22 annexe page A-1) et a les propriétés suivantes :

- une dureté élevée ($HB \approx 800 \text{ à } 1000$)
- une densité $d \approx 7.8$
- une très grande fragilité

La cémentite peut se décomposer en fer et en graphite si les conditions de température et durée de maintien dans celles-ci sont respectées. La transformation: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + G$ ($G =$ carbone graphite) s'accompagne d'une expansion (voir page 21).

2.1.3. Perlite

C'est un agrégat se présentant sous l'aspect de paquets formés de lamelles alternées de ferrite et de cémentite dans des proportions respectives de 87% et 13%. La perlite présente des caractéristiques mécaniques dont les valeurs sont comprises entre celles de ses deux constituants :

- une dureté HB allant de 200 à 250 ;
- une résistance à la traction $R_r \approx 800 \text{ MPa}$;
- un allongement A allant de 8 à 10% .

(voir figure 23 annexe page A-1)

2.1.4. Graphite

C'est du carbone cristallisé, de couleur noire. Il est tendre et a :

- une densité relativement faible ($d \approx 2.2$) ;
- une résistance mécanique à la traction $\approx 20 \text{ MPa}$.

Le graphite possède d'excellentes qualités lubrifiantes ; selon les conditions dans lesquelles il prend naissance dans les fontes, le graphite se présente sous les aspects suivants :

- Graphite type A - En lamelles séparées de dimensions semblables, distribuées uniformément dans la masse de la fonte et orientées sans ordre défini (fig. 26 annexe page A-3)
- Graphite type A' - En pseudo-lamelles ou lamelles très courtes, compactes, à bords arrondis (fig. 27 annexe page A-3)
- Graphite type B - En rosettes lesquelles sont formées

de plusieurs lamelles (fig. 29 annexe page A-3)

- Graphite type C - En lamelles de dimensions nettement différentes (fig. 30 annexe page A-3)

- Graphite type D - Interdendritique, se présentant sous forme de très petites lamelles (fig. 31 annexe page A-3)

- Graphite en « nodules » également dit en « crabe ». Il est reparti dans la fonte sous forme d'amas ou de nodules (fig 32 annexe page A-3). Le graphite en nodules est celui que l'on trouve dans les fontes « malleables à cœur noir ».

- Graphite sphéroïdal - Il se présente dans la fonte sous forme de petites sphères aux contours bien lisses (fig 33 annexe page A-3). Le graphite sphéroïdal se rencontre dans les fontes dites à graphite sphéroïdal ou encore fontes GS.

2.2. INFLUENCE SUR LES FONTES DE CHACUN DES CONSTITUANTS DE BASE

Les constituants de base des fontes sont de teintes franchement opposées : blanche pour la cémentite et la perlite, noire pour le graphite. Selon les quantités relatives de chacun des constituants présents dans la fonte, celle-ci a une cassure allant de la teinte claire à la teinte foncée.

2.2.1. FONTES BLANCHES

Sont ainsi désignées les fontes dont la cassure a une teinte très claire. La couleur claire indique l'absence totale de graphite,

au voisinage de la cassure. Les fontes blanches sont constituées de la cémentite et de la perlite — en proportions variables suivant la teneur en carbone —, mais c'est la présence de la cémentite qui confère aux fontes blanches leurs caractéristiques essentielles à savoir :

- une très grande dureté, HB de 350 à 500 ;
- une grande rigidité, E de 160 à 200 GPa ;
- une grande fragilité ;
- une densité relativement élevée, $d = 7.5$ à 7.8 ;
- une très grande résistance à l'usure par abrasion et par érosion ;

2.2.2. Fontes grises :

Les fontes grises sont celles qui présentent après rupture à froid, une cassure de couleur grise, laquelle est due à la présence, sous une forme ou sous une autre, de graphite au sein de la fonte.

Les fontes grises constituées de perlite, de cémentite et de graphite sont des fontes grises lamellaires. Celles qui sont constituées de perlite et de graphite sont :

- des fontes grises lamellaires dites « perlitiques » ;
- des fontes malléables perlitiques ;
- des fontes à graphite sphéroïdal dites fontes GS ;

Ces fontes^{ont} une densité comprise entre 7 et 7.4 et une dureté plus faible que celle des fontes blanches.

2.2.3. Influence du graphite dans les fontes grises

C'est le graphite qui confère aux fontes grises, leur caractère particulier lequel dépend, pour chaque type de fonte grise, de la quantité, de la forme, des dimensions et de la répartition du graphite présent dans la masse de la fonte. Les effets du graphite qui nous intéressent ici sont :

- la diminution du retrait dans la pièce ;
- l'amélioration des conditions de frottement.

2.2.31. Diminution du retrait

Le carbone sous forme de graphite - carbone libre - occupant, à une masse égale, un volume plus grand que lorsqu'il est sous forme combinée, la formation du graphite dans la fonte, s'accompagne d'une expansion, et, les fontes moulées dans lesquelles il y a du graphite ont un retrait beaucoup plus faible que celles qui n'en contiennent pas.

2.2.32 Démonstration :

La masse volumique du graphite $\rho_g \approx 2.2 \text{ kg/dm}^3$ tandis que la fonte dans laquelle il prend naissance a une masse volumique $\rho_F \approx 7.0 \text{ kg/dm}^3$.

Soit une masse M d'une fonte ; le volume occupé par cette masse est : $V_F = \frac{M}{\rho_F}$

Si cette même masse M se graphitisait entièrement, le volume qu'occuperait le graphite est : $V_g = \frac{M}{\rho_g}$

Le rapport de ces deux volumes est :

$$\frac{V_g}{V_F} = \left(\frac{M}{\rho_g} / \frac{M}{\rho_F} \right) = \frac{\rho_F}{\rho_g} = \frac{7.0}{2.2} = 3.2$$

Ce rapport de 3.2 montre que le graphite contribue beaucoup à la diminution du retrait dans une pièce en fonte.

2.2.33 • Amélioration des conditions de frottement

Le graphite contribue à favoriser les conditions de frottement des pièces en fonte grise,

- d'une part, de par son effet lubrifiant propre,
- d'autre part, parce que, chacune des cavités superficielles, après avoir, en partie, abandonné un peu de graphite qu'elle contenait, joue le rôle de « bassin relai » pour lubrifiant assurant ainsi, dans une certaine mesure, la formation du « coin d'huile ».

Le graphite, de par le fait qu'il s'effrite facilement, a évité l'usure prématurée des surfaces de contact sur lesquelles frottent les pièces en fonte grise qui en contiennent.

Cette contribution du graphite à l'amélioration du coefficient de frottement nous oblige à axer nos efforts sur une étude de recherche des conditions favorables à la germination de ce graphite au sein de nos semelles de frein en fonte.

2. 3- EFFETS DE QUELQUES ELEMENTS D'ADDITION.

2.3.1. Effets du silicium Si ($\theta_f = 1480^\circ\text{C}$, densité = 2.35)

Élément normal, graphitisant énergique, le silicium se dissout dans le fer γ (austénite) avec plus de facilité que le carbone. Le silicium diminue la solubilité du carbon dans le fer γ .

En effet un fer qui devait dissoudre par exemple 3.4% de carbone serait saturé à une teneur de carbone de 2.5% s'il avait déjà dissout 0.9% Si; l'excédent de 0.9% C se précipiterait sous forme de graphite lors de la solidification et du refroidissement.

Ainsi dans une fonte à froid, il ya d'autant plus de graphite que la teneur en silicium est plus élevée. Une partie du Si total est ajoutée en fin de fusion et a un rôle d'inoculation du graphite. Mais la teneur totale en Si d'une fonte doit être ajustée en fonction de la teneur en carbone et de l'épaisseur de la pièce à obtenir (voir fig. 34 annexe p. A4) et (tableau 6) et aussi de la teneur en phosphore.

2.3.2. Phosphore P ($\theta_f = 640^\circ\text{C}$, densité \approx 2.33)

Élément normal il se combine au fer pour donner un phosphure de fer Fe_3P qui forme avec le fer un eutectique phosphoreux dont la présence dans la fonte est caractérisée par:

- une expansion accompagnant la solidification;
- une température de fusion relativement basse ($\approx 950^\circ\text{C}$);

- une très grande dureté ;
- une très grande fragilité .

2.3.3. Soufre S ($\theta_f = 112^\circ\text{C}$, densité ≈ 2)

Apporté par le coke qui en contient entre 1.5 à 2%, le soufre se combine facilement au fer pour donner le sulfure de fer FeS qui stabilise les carbures comme la cémentite .

Ainsi on dit que le soufre est nocif et :

- s'oppose à ^{la} formation du graphite
- augmente la dureté (voir fig 35 annexe page A-5)
- est responsable de certaines soufflures ;
- diminue la fluidité du métal et accroît la ségrégation de la coulée .

2.3.4. Effets du manganèse Mn ($\theta_f = 1245^\circ\text{C}$, densité ≈ 7.45)

Élément normal comme les 3 éléments précédemment étudiés, il est apporté dans la fonte par certains minerais de fer .

Aux faibles taux ($< 0.8\%$) dans la fonte le manganèse a un rôle de désulfurant qui détruit le sulfure de fer par la réaction :



Mais à une teneur supérieure à 0.8% le manganèse joue le rôle d'anti-graphitisant donc durcit la fonte .

2.3.5. Effets du nickel Ni

Élément spécial, le nickel est un graphitisant mais moins puissant que le silicium ; il régularise la précipitation du graphite et

affine ce dernier dans la fonte. On dit que le nickel diminue « la sensibilité à l'épaisseur ».

Dans une fonte grise les effets du nickel sont :

- augmentation de la dureté entre 0 et 5% Ni,
- diminution de la dureté entre 5 et 20% Ni
- légère augmentation au-delà de 20% Ni (fig. 37 annexe.)

Dans une fonte blanche on a une courbe de la dureté en fonction de la teneur en Ni avec plus d'externums que dans le cas des fontes grises (voir fig. 38 annexe page A-6)

2.3.6. Effets du vanadium

Élément spécial le vanadium a pour effet de stabiliser les carbures. Il a une action anti-graphitisante.

Le vanadium donne aux pièces moulées une grande résistance à l'usure (voir fig. 36 annexe page A-5).

Mais le vanadium a l'avantage d'être un élément désoxydant et permet donc d'obtenir des fontes très saines.

2.3.7: Autres éléments anti-graphitisants

2.3.71. Le Chrome

C'est un anti-graphitisant énergique dont l'effet sur la fonte dépend de son pourcentage dans celle-ci ; il protège cependant contre l'oxydation des pièces en fonte qui en contiennent.

2.3.72. Le molybdène

C'est un anti-graphitisant, mais moins actif que le chrome ; à une teneur dans la fonte entre 0.25 et 0.6%, il transforme la perlite en troostite

CHAPITRE 3

3.1. GRAPHITISATION

3.2. INOCULATION DE LA FONTE

3.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

ÉCOLE NATIONALE
DES CHIMES



3-4- GERMINATION DU GRAPHITE DANS LES FONTES GRISES

3-4-1. Cas général

Dans la fonte liquide considérée comme un alliage ternaire Fe, C, Si, il y aurait des groupements (Fe, Si) et (Fe, C).

Dès leur formation, ces « nuclei » tendraient à se dissocier au sein du liquide.

Deux théories de dissociation ont été proposées dans le cas des fontes non inoculées au ferro-silicium.

3-4-2 Cas des fontes grises à faible teneur en silicium

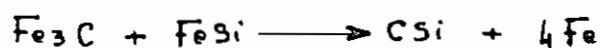
3-4-2.1 Théorie ①

Le mécanisme de formation des lamelles de graphite pourrait être le suivant :

- au refroidissement lent de l'alliage, vers la température eutectique (voir diagramme fer-graphite, annexe page A-7), il y a tendance à la formation de groupements d'atomes Fe et C pour former des prégroupements Fe_3C avec rejet des atomes Si vers le liquide voisin ;

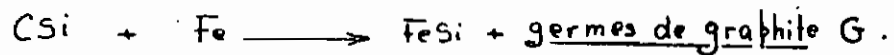
- d'où constitution d'auréoles riches en Si — autour des prégroupements Fe_3C — qui aboutit à la formation des groupements FeSi ;

- alors, de par leur voisinage, les groupements Fe_3C et FeSi peuvent réagir suivant la réaction :

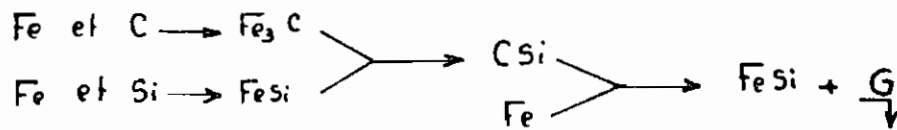


mais le carbure de silicium ou carborundum CSi instable, se décompose par dilution dans le liquide voisin selon la

réaction :



Le processus global de la germination du graphite serait :



3.1.22 Théorie ②

Un autre mécanisme de formation du graphite a été formulé :

- au refroidissement lent il y aurait formation de prégroupements

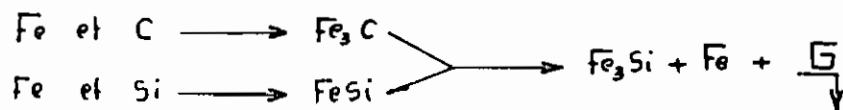
Fe_3C ;

- puis par rejet de silicium à leur entourage, il y aurait dépôt de FeSi ;

la réaction entre ces groupements serait :



En résumé le schéma global de graphitisation serait :



3.1.3 Cas des fontes inoculées au ferro-silicium FeSi

3.1.3.1. Théorie ③ de M. DECROP et MASCRE

Le carbure de silicium CSi se présente sous forme de cristaux sombres, noirs de formes allant du haricot à la sphère parfaite (voir fig. 40 annexe page A-8).

Dans les fontes inoculées au ferro-silicium, l'inoculation provoquerait les phénomènes suivants :

- formation de zones localisées riches en Si ; le fer

- Le plongeur est constitué d'une armature métallique enrobée dans du ciment réfractaire ; il est coudé et muni à l'autre extrémité d'une manche en bois.
- Comme notre poche de la RCFS, remplie de la fonte n'atteint pas 800 kilos, l'agitation de la fonte lors de l'inoculation peut être assurée à l'aide d'une louche.

3-2-1. Temps d'action d'un inoculant

Une inoculation n'est efficace que si elle est effectuée peu de temps avant la coulée. Son influence diminuerait graduellement et disparaîtrait au bout de 20 à 30 minutes.

C'est pourquoi on recommande d'inoculer au dernier moment, c'est-à-dire en poche de coulée ou au chenal.

3-2-2. Quantité d'inoculant

Suivant l'efficacité de l'inoculant, le temps de maintien en poche, l'épaisseur ou le diamètre équivalent des pièces coulées, la quantité nécessaire d'inoculant est variable.

Pour le besoin de la graphitisation, la teneur en silicium (Si) doit être beaucoup plus importante pour des pièces minces que pour des pièces massives (Fig. 34 et tableau 6 annexe page A-4)

En effet les pièces massives se refroidissent beaucoup plus lentement que les pièces minces ; or on sait qu'un refroidissement lent est une condition favorable à la germination du graphite.

C'est ainsi que dans des pièces massives, il se produit un phénomène d'autographitisation.

Dans des pièces d'épaisseurs variables la sensibilité à l'épaisseur

est inévitable si on n'y remédie pas. Si par exemple on soumet à une loi de refroidissement la pièce présentée à la figure 8 on aura :

- une structure blanche dans la zone A ;
- une structure grise dans la zone B .

Dans la plupart des cas pratiques en fonderie, la fabrication d'une pièce d'épaisseurs variables est très courante .

Dans des tels cas l'emploi des refroidisseurs est une exigence si l'on veut avoir dans toute la pièce une structure quasi homogène ou régulière .

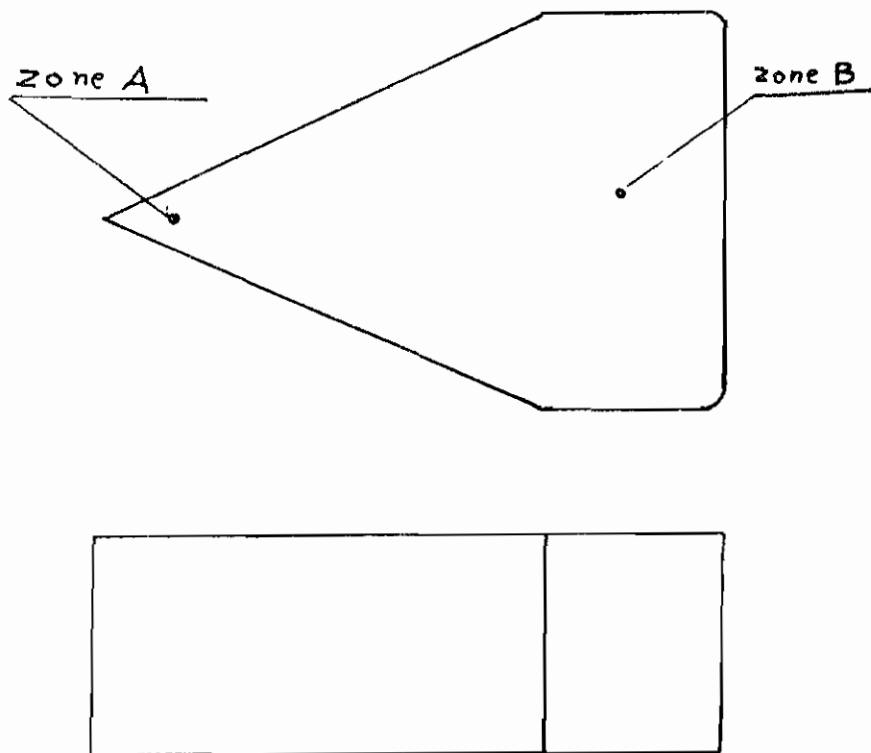


Fig 8 : PIECE D'ÉPAISSEUR VARIABLE EN
VUES DE FACE ET DE DESSUS

3-2-3 Avantages de l'inoculation

l'inoculation avant coulée d'une fonte n'est jamais nuisible.

Elle conduit à :

- obtenir un graphite fin, régulier, uniforme type A (fig 41-b annexe page A-8)
- affiner la perlite c'est-à-dire améliorer la résistance de la fonte ;
- éliminer le risque d'obtenir de la fonte blanche ou traitée très dure comportant de la cémentite Fe_3C (fig. 41-a annex. page A-8)

3-2-4. Principaux inoculants industriels

Le silicium (Si) est ajouté à la fonte sous forme d'alliage d'un des types suivants :

- Ferro-silicium (FeSi) - (de 50 à 95% Si, 0.2 à 0.8% Ca, 1 à 3% Al)
- silico-calcium SiCa - (à 50% Si, 30% Ca, 4% Al)
- Calcium-silicium-Titane, CaSiTi - (à 50% Si, 6% Ca, 10% Ti, 1% Al)
- Silico-manganèse-zirconium SiMnZr - produit dit « SMZ » - (à 60% Si, 2% Ca, 1.5% Al, 7% Mn, 6% Zr)
- Ferro-silico-calcium FeSiCa
- Ferro-silico-zirconium FeSiZr (de 40 à 65% Si, 15 à 40% Zr)
- Ferro-silicium-aluminium-strontium FeSiAlSr.
- Chrome-manganèse-silicium CrMnSi (à 18% Si, 1% Ca, 0.3% Al, 40% Cr, 10% Mn)
- Ferro-Chrome-silicium FeCrSi (à 28% Si, 50% Cr)

. Nickel-silicium NiSi - (à 30% Si, 2% Ca, 60% Ni)

Il existe plusieurs autres inoculants utilisés dans l'industrie moderne. Donc pour utiliser tel ou tel inoculant, il faut absolument connaître sa composition chimique dont dépend la qualité ou l'efficacité de cet inoculant.

Il ne serait pas souhaitable d'utiliser dans les mêmes — dans les conditions similaires — conditions, du FeSi à 50% Si et du CrMnSi à 18% Si.

En effet le FeSi à 50% Si serait utilisé pour assurer la formation du graphite dans une fonte alors que le Si du CrMnSi (à 18% Si et 40% Cr) contrebalance l'effet anti-graphitisant du Chrome afin de rendre la pièce moins fragile. Quant aux Ferro-manganèses (FeMn) et aux Manganosilicium ils sont utilisés lorsque l'on souhaite une désulfuration efficace de la fonte, mais la teneur totale du Mn ne doit pas excéder 0.8% de la masse de la poche.

N-B- les inoculants coûtent de l'argent, ils doivent donc être employés dans les conditions où leurs effets sont très sensibles; un inoculant n'est pas fait pour être mis dans le cubilot.

3-3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais que nous avons fait depuis le debut de ce projet étaient de nature non destructive. Il s'agissait des essais de dureté sur les pièces résultantes de différentes coulées qui sont au nombre de trois (3) :

- celle du 15 Février 1982
- celle du mois de mars 1982
- celle du 10 mai 1982

Les essais ont été conduits de la façon suivante :

- Pour la coulée du 15 Février, les essais de dureté ont été faits sur une semelle U5 ;

- pour la coulée du mois de mars, nous avons fait les essais sur une semelle venant d'un moule préchauffé et sur une semelle venant d'un moule non préchauffé ;

- pour la coulée du 10 mai, les essais ont été faits sur deux semelles - U5 et U3 - obtenues à partir d'une fonte à laquelle on a ajouté du ferro-silicium FeSi au cubilot.

Les résultats de ces essais sont présentés dans le tableau 4 en unité de dureté Rockwell Bille (HRB) et dans le tableau 5 page 36 en unité de dureté Brinell (HB).

Dans ces tableaux nous voyons que le préchauffage du moule a une influence relativement négligeable sur la dureté du produit. L'explication en est simple ; en effet en préchauffant un moule avant la coulée on agit plutôt sur les effets du choc thermique que sur la vitesse du refroidissement dans la mesure où le moule préchauffé est soumis après coulée de la fonte à la même loi que

TABLEAU 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

ESSAI N°	DURETE EN HRB				
	Coulée du 15 février 1982	Coulée de mars 1982		Coulée du 10 mai 1982	
		semelle du moule préchauffé	semelle du moule non préchauffé	semelle U5	semelle U3
1	105	101	106	100	90
2	103	105	107	93	96
3	103	105	104	98	98
4	104	105	105	98	95
5	107	103	105	95	94
6	106	104	106	93	99
7	105	104	105	97	94
8	102	102	104	98	93
9	106	100	103	96	100
10	106	102	105	99	98
11	107	104	105	97	101
MOYENNE	105.0	103.2	105.0	96.7	96.2

TABEAU 5 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

ESSAI N°	DURETE EN HB				
	Coulée du 15 Février 1982	Coulée de mars 1982		Coulée du 40 mai 1982	
		Semelle du moule préchauffé	Semelle du moule non préchauffé	Semelle U5	Semelle U3
1	276	247	280	242	185
2	263	276	280	195	214
3	263	276	266	228	228
4	266	276	276	228	209
5	280	263	276	209	204
6	280	266	280	195	238
7	276	266	276	219	204
8	257	257	266	228	195
9	280	238	263	214	242
10	280	263	276	238	228
11	280	266	276	219	247
MOYENNE	273	263	274	220	218

ceux qui ne l'étaient pas. Mais un fait était aussi à constater, car la semelle venant du moule préchauffé ne présentait aucune soufflure. Cela était-il un effet positif du préchauffage ou était-ce un fait du hasard? Nous ne saurions rien affirmer car le nombre d'essais ne nous le permettait pas.

Les deux dernières colonnes des tableaux indiquent par contre l'addition d'un élément graphitisant à la fonte a un effet significatif sur la dureté; mais le problème des soufflures demeure.

Nous devons alors encourager l'inoculation tout en pensant à améliorer le décrassage de la fonte tant au niveau du cubilot qu'en poche de coulée.

Le problème posé est de savoir la quantité du Ferro-silicium à ajouter au contenu d'une poche. Tout dépend du pourcentage de silicium dans notre ferro-silicium ($FeSi$) puisque l'épaisseur des semelles est de l'ordre de 50 mm.

Nous proposons d'utiliser le tableau 6 en annexe page A-4 en sa première ligne et sixième colonne en admettant que la teneur en silicium de notre fonte avant l'inoculation est négligeable.

Raisonnons sur une poche de 400 kg :

Alors on a les résultats suivants :

• Pour des pièces de 50 mm d'épaisseur il faut un pourcentage de 1.8% de silicium ;

• pour une poche de masse $m_F = 400$ kg de fonte il faut une masse m_{Si} de silicium :

$$m_{Si} = \frac{1.8}{100} \times m_F = \frac{1.8}{100} \times 400 \text{ kg} = 7.20 \text{ kg} ;$$

• pour un ferro-silicium à 50% de Si il faut une

$$\text{masse } m_{FeSi} = 7.20 \text{ kg} \times \frac{100}{50} = 14.4 \text{ kg}$$

Les 14.4 kg seront ajoutés à la fonte en poche de coulée et non dans le cubilot, en procédant à la méthode décrite à la figure 7 page 29.

Pour la coulée du 10 mai dernier nous avons ajouté le FeSi dans le cubilot pour la raison qu'il flottait à la surface de la poche de coulée.

D'autre part la quantité ajoutée n'était ^{pas} calculée parce que nous ignorions le pourcentage de Si dans le FeSi.

Nous répéterons que le manganèse d'un ferro-alliage a pour rôle de faciliter la désulfuration de la fonte et non la graphitisation de celle-ci. Il faut faire de telle sorte que la quantité de Mn ne dépasse pas 0.8% de la capacité de la poche de coulée si on a affaire avec un inoculant contenant du manganèse afin de ne pas bloquer la germination du graphite dans la fonte.

N B : Nous croyons très important d'ajouter que les conditions opératoires au niveau de la fonderie de la RCFS sont difficiles à contrôler. En effet non seulement la pesée ne s'y pratique plus, mais aussi les matériaux destinés à la fusion ne sont pas classés par famille de compositions chimiques à peu près semblables.

C'est pourquoi nous parlerons au chapitre suivant de l'importance relative de certaines étapes de la conduite du cubilot.

CHAPITRE 4

4.1. LE CUBILOT

4.2. ETAPES DE LA CONDUITE DU CUBILOT

4-1 LE CUBILOT

4-1-1- Cubilot chargé

La définition du cubilot est donnée à la page 62 . Un cubilot chargé est représenté par la figure 9 de la page suivante ; les différentes parties y sont clairement indiquées .

Il est facile ici de savoir le rôle de chaque partie du cubilot destinée à la page suivante .

Nous dirons cependant que cet appareil de fusion est supporté par 4 pieds en fonte ; la béquille n'est pas un pied . C'est un bloc de métal qu'on met sous la porte de déchargement qui soutient la sole . A la fin de la fusion le déchargement des restes se fait en basculant la béquille . On charge le cubilot de la façon suivante :
Coke + Castine + Fonte ; l'addition est à sens unique .

4-1-2- Zones du cubilot :

Les différentes zones du cubilot sont indiquées à la fig 40 de la page 41 .

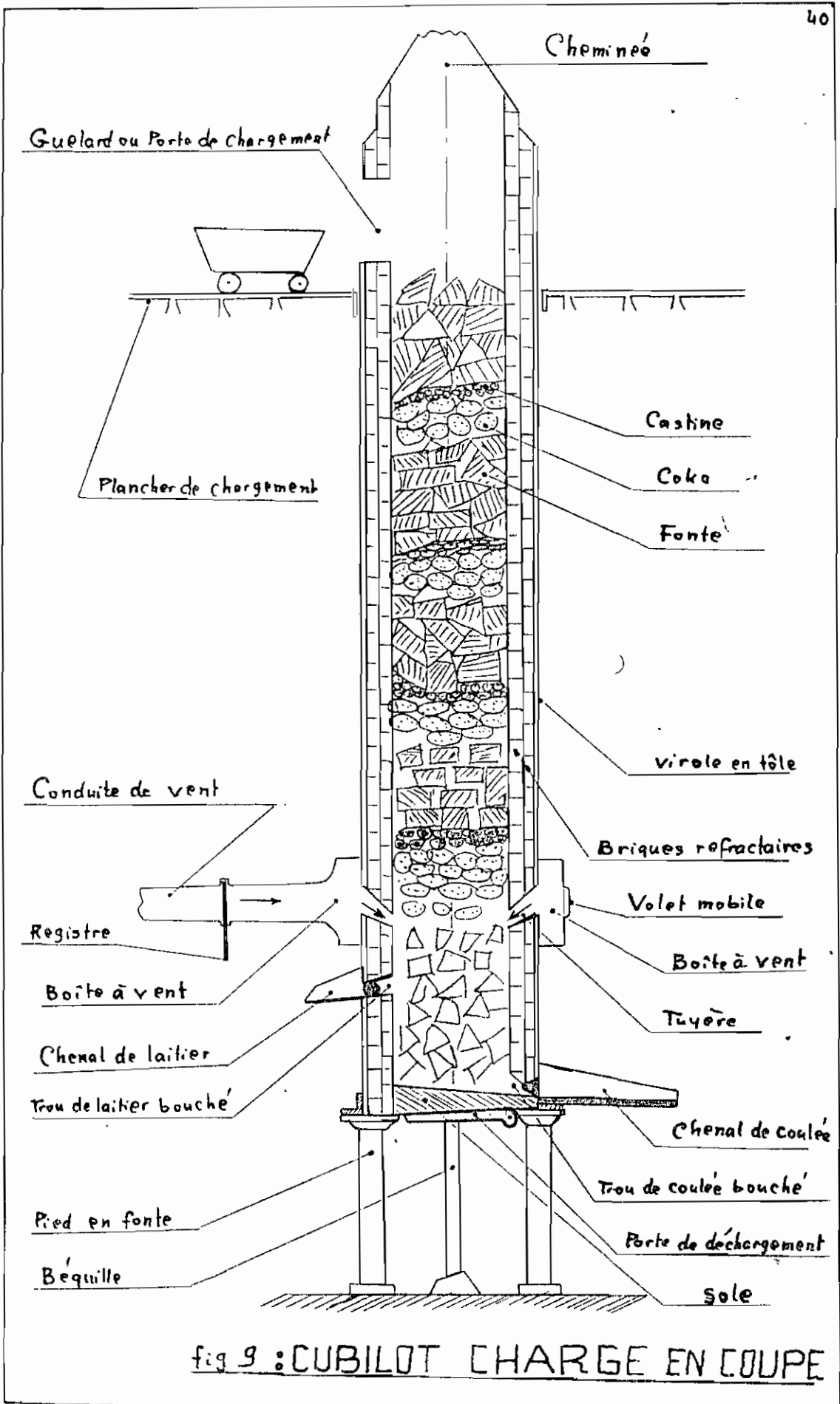


fig 9 : CUBILOT CHARGE EN COUPE

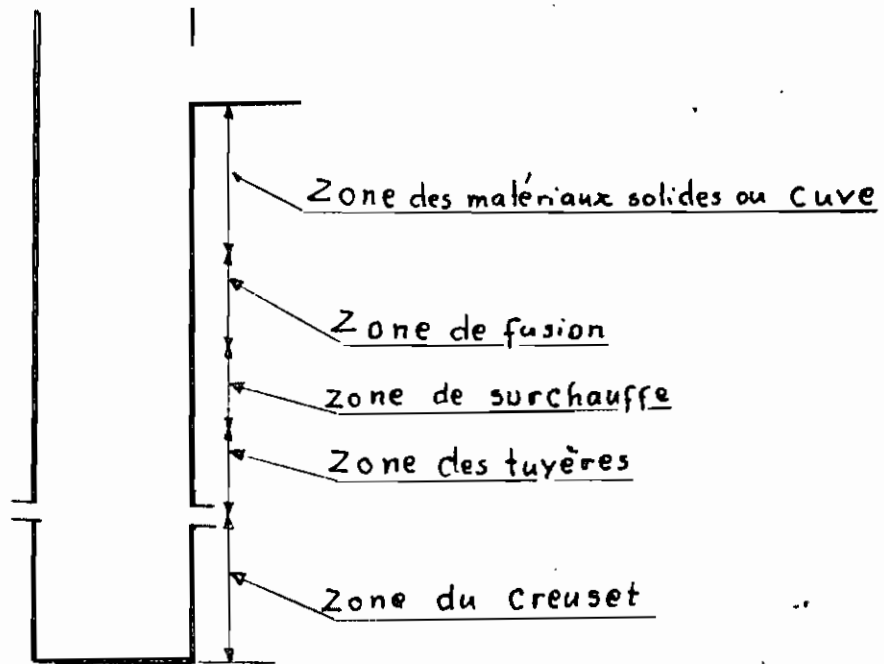


Fig.10-ZONES DU CUBILOT.

On distingue dans un cubilot cinq zones distinctes (fig 10).

Ce sont de haut en bas :

- 1 - zone de la cuve, où se fait l'échauffement des matériaux ;
- 2 - zone de fusion, où a lieu la liquéfaction de la fonte ; dans cette zone la température varie entre 1200 et 1250°C ;
- 3 - zone de surchauffe, où la température est la plus élevée, elle peut atteindre entre 1550 et 1600°C ;
- 4 - zone des tuyères, située entre le plan des tuyères et la zone de surchauffe ; la température y atteint entre 1450 et 1500°C ; c'est là qu'il y a des risques d'oxydation surtout en cas d'excès d'air comburant ;
- 5 - zone du creuset, ou zone de réserve, dans laquelle la fonte vient se rassembler entre les morceaux de coke ; la température dans cette zone varie entre 1350 et 1400°C .

4-2- ETAPES DE LA MARCHE DU CUBILOT

Nous venons d'étudier les procédés pour diminuer la dureté de nos semelles ; mais il n'y a pas que cela comme problème ; il reste d'autres problèmes comme celui des soufflures et des inclusions non métalliques dans le produit . C'est pourquoi nous jugeons utile de faire une étude sur les étapes de la marche du cubilot , étapes dont les principales sont présentées à la figure de la page suivante .

Nous développerons certaines de ces étapes et nous y ajouterons d'autres comme la question de la désulfuration et de l'air comburant .

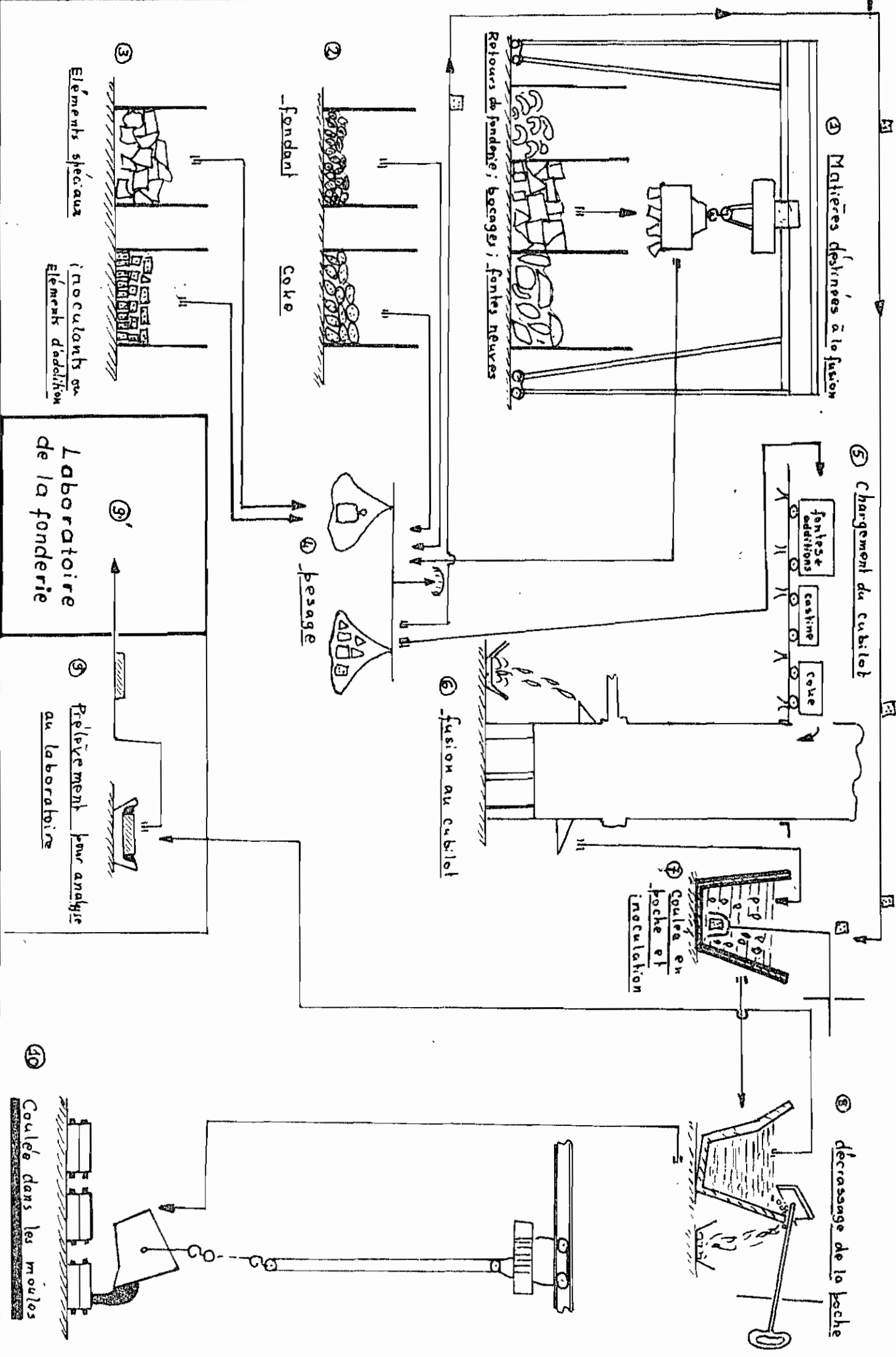
4-2.1 Préparation des matériaux destinés à la fusion

4-2.11 • Triage des matériaux

Le fondeur doit avoir une idée aussi précise que possible, de la nature des bocages de fontes qu'il utilise ; sans cela, aucune fabrication valable ne serait pensable . Il serait souhaitable qu'il puisse classer, par types d'analyses chimiques à peu près semblables tous les matériaux qu'il reçoit (depuis les fontes neuves jusqu'aux éléments d'addition en passant par les matériaux de récupération).

4-2.12 • Cassage des grosses pièces :

Les pièces de machine à refondre doivent être réduites à des dimensions convenables pour l'appareil de fusion . Le cassage des grosses pièces à la masse demande de gros efforts aux ouvriers . Nous proposons à nos amis de la R.C.F.S. , le casse-fonte présenté à la figure 42 de la page 44 . Le mécanisme de fonctionnement est très simple . La masse M sera en fonte moulée à partir d'un modèle en bois ; mais comme cette masse n'offre pas une surface plane



① Matières destinées à la fusion

⑤ Chargement du cubilot

⑧ décrassage de la poche

Retours de fonderie ; basages ; fontes neuves

② - fondant

Coke

⑥ fusion au cubilot

⑦ Coulée en poche et inoculation

④ pesage

③ Eléments spéciaux

Inoculants ou éléments d'addition

Laboratoire de la fonderie

③' Prélèvement pour analyse au laboratoire

⑩

Coulée dans les moules

Pouvant servir de joint l'exécution du moulage sera faite par le procédé du moulage au naturel avec fausse partie. Le mur de protection peut être remplacé par un grillage serré.

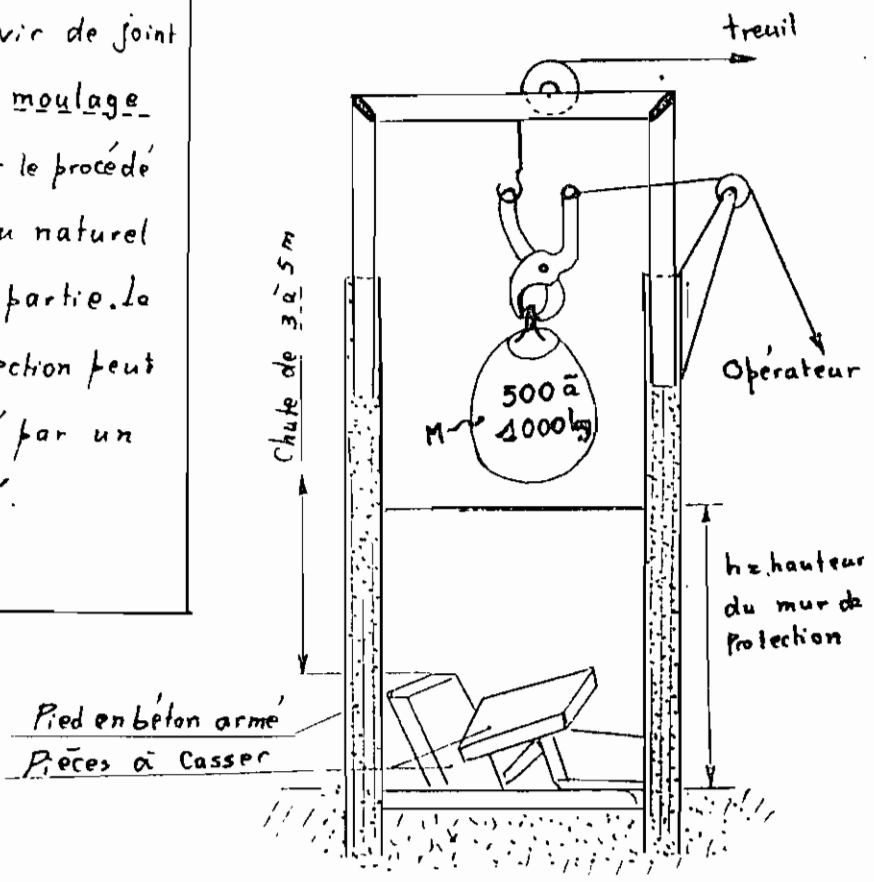


Fig. 12: CASSE FONTE

4-2-2. Pesage

Tous les matériaux constituant le lit de fusion du cubilot doivent être pesés avec une précision raisonnable. Le coke peut aussi être pesé mais à condition qu'il soit parfaitement sec. Cependant on le mesure à l'aide de récipients de volumes connus. Quant au fondant il est mesuré relativement au coke. Il serait souhaitable de connaître aussi la masse des inoculants mais leur poids est relativement faible par rapport à celui des métaux et du coke et leur mesure nécessiterait une balance très sensible. Pour éviter cela il serait bon de n'acheter que des ferro-alliages sous formes des briquettes standardisées.

Nous insistons sur le pesage car c'est une opération à ne pas négliger sous quelque prétexte que ce soit et nous demandons à la RCFS de

revenir sur le pesage qui se pratiquait semble-t-il au sein de cette Compagnie.

NB : l'appareil de pesage schématisé au point ④ du plan de la page 43 représente en réalité une bascule et non une simple balance.

4-2.3. Parc à combustibles et à fonclant

4-2.31. Coke :

Il serait souhaitable de n'employer que du coke de bonne qualité. Un bon coke de fonderie doit avoir une faible teneur en cendres et ne contenir que très peu de soufre. Les caractéristiques essentielles sont :

- Une grande porosité permettant la circulation du vent ;
- une grande résistance à l'écrasement ;
- un bon pouvoir calorifique (7200 kcal/kg)
- pas de matières volatiles

La composition chimique d'un bon coke serait de :

- 85 à 90% de carbone
- 10 à 15% des cendres
- 1% de soufre

Le poids du coke pour des charges en fontes doit être compris entre 10 et 12% du poids des charges métalliques. Ce taux doit augmenter quand les charges comportent de l'acier. L'emploi d'un taux incorrect de coke a des conséquences fâcheuses.

• si la quantité de coke est trop forte, il y aura du coke usé en pure perte par formation du monoxyde de carbone CO, gaz très polluant, abaissement de la température maximale atteinte et obtention d'une fonte plus froide, donc risque de carotée au chenal de coulée

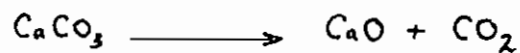
et de « non venu » sur les pièces par manque de fluidité de la fonte.

• Si le pourcentage du coke est trop faible, il y aura moins de chaleur fournie, trop d'oxygène par rapport au coke donc risque d'oxydation de la fonte et augmentation des pertes au feu.

Pensons à l'économie d'énergie et à la production de qualité pour l'emploi d'un pourcentage optimal de coke dans le sein de notre fondrière.

4.2.32 Fondant:

Les cendres du coke sont en général de la silice SiO_2 difficile à fondre ($\theta_f \approx 1700^\circ\text{C}$). Pour les transformer en un scorie fusible vers 1400°C on ajoute un antagoniste, i.e. la castine, basique CaCO_3 qui se décompose dans le cubilot vers 900°C selon la réaction:



Cette castine est chargée dans l'appareil de fusion juste après le coke et dès la première charge de coke (fig. 9 page 40 et point ⑤ du plan de la page 43).

La quantité de la castine à mettre dans la charge doit être comprise entre 25 et 30% du poids d'une charge de coke.

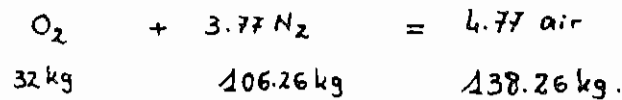
Si le laitier est trop épais il faut le fluidifier à la castine seule ne suffit ^{pas} et il faut recourir à l'emploi du spath-fluor.

4.2.4. Air comburant

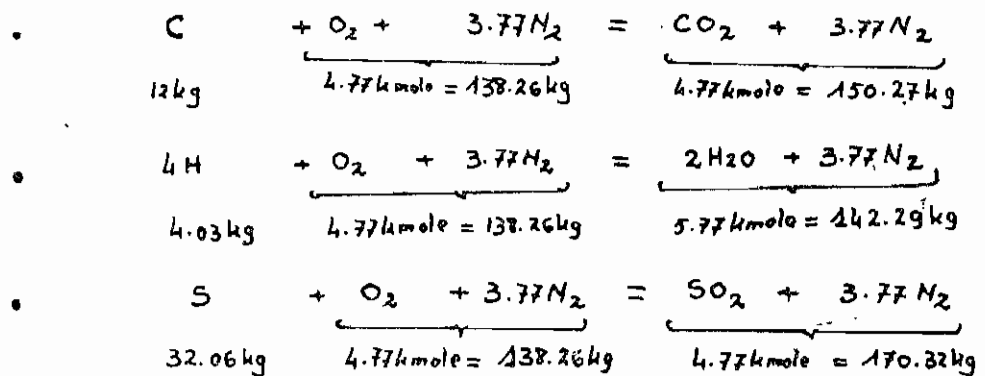
Tout combustible a besoin d'oxygène pour brûler. Dans le cubilot l'air fourni par le ventilateur est parvenu au coke par les tuyères (fig. 9 page 40), mais le pouvoir carburigène du coke comme celui de tout combustible est fonction de sa composition.

L'air sec se compose principalement d'oxygène O_2 et d'azote N_2 .

sa formule chimique est : $O_2 + 3.77 N_2 = 4.77 \text{ air}$ c'est à dire 21% de O_2 et 79% de N_2 . L'oxygène a une masse molaire de 32 kg/kmole et l'azote N_2 28.16 kg/kmole ; et la formule devient :



La combustion complète sans excès d'air des constituants élémentaires (carbone, hydrogène, soufre) d'un combustible est régie par les équations suivantes :



Dans les conditions normales de température et de pression, un mole de gaz occupe 22.4 litres soit $0.0224 \text{ m}^3/\text{mole}$ ou $22.4 \text{ m}^3/\text{kmole}$

Prenons un kilogramme d'un coke composé de 88% C, 0.25% H_2 1% S et 10.75% des cendres. Nous avons alors pour :

$$\bullet \quad C \rightarrow \frac{0.88 \times 1 \text{ kg}}{12 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmole} = 0.3498 \text{ kmole d'air}$$

occupant $22.4 \text{ m}^3/\text{kmole} \times 0.3498 \text{ kmole} = 7.836 \text{ m}^3$;

$$\bullet \quad H_2 \rightarrow \frac{0.25 \times 1 \text{ kg}}{100 \times 4.03 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmole} = 6.2 \times 10^{-4} \text{ kmoles occupant}$$

un volume de 0.0139 m^3 ;

$$\bullet \quad S \rightarrow \frac{1}{100} \times \frac{1 \text{ kg}}{32.06 \text{ kg}} \times 4.77 \text{ kmole} = 1.49 \times 10^{-3} \text{ kmoles occupant}$$

un volume de 0.0333 m^3 ;

Pour 1 kg de ce coke nous avons ; $V = 7.836 + 0.0139 + 0.0333$ soit 7.8831 m^3 ; et nous dirons que le pouvoir carburigène de ce coke est de $8 \text{ m}^3/\text{kg}$. Il serait bon de connaître la qualité du coke employé pour pouvoir régler le débit d'air au débit optimal,

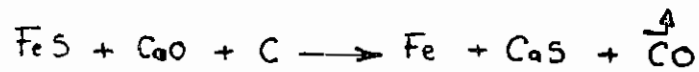
car :

- un débit trop faible entraîne un abaissement de la température d'où l'obtention d'une fonte froide, donc risque de gâchette ;
- un débit d'air trop élevé augmente la zone de surchauffe (voir fig. 40 page 44) ; ce qui entraîne l'oxydation de la fonte, donc l'augmentation des pertes au feu. Nous venons de voir que l'emploi d'un appareil de contrôle de débit d'air permettant une marche correcte ne serait pas mauvais.

4.2.5. Désulfuration :

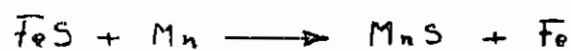
La désulfuration est une nécessité eu égard la nocivité du soufre, (voir page 24) ; le soufre se présente sous forme de sulfures.

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



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

Dans la poche on ajoute du ferro-manganèse FeMn qui donne du Mn qui se combine au soufre du FeS et libère le fer par la réaction :



Le sulfure de manganèse passe dans la scorie.

4.2.6. Décrassage

La surface du métal liquide se couvre de crasses (ou laitier) qui sont :

- des oxydes dus à l'action de l'air sur le métal liquide ;
- des composés dus à l'action des oxydes sur les produits réfractaires composant le garnissage intérieur de l'appareil de fusion.

Il faut donc épurer le métal avant la coulée dans les moules ; mais en cherchant à éliminer les impuretés du métal liquide, on ne doit pas oublier la propreté de l'atelier et la sécurité des ouvriers.

Nous ferons ici aussi des propositions.

4.2.61. Décrassage du cubilot

Ici nous ajouterons en guise de proposition, à la méthode de la R.C.F.S, simplement un pot à crasse (f.g. 14 page suivante) dont les dimensions seront déterminées en fonction de la situation de notre fonderie. La description de l'opération est très simple. Le trou de coulée étant bouché, on laisse monter le niveau de la fonte sur laquelle surnage le laitier jusqu'à un trou appelé trou de crasse jusqu'alors bouché. On arrête la fusion en arrêtant la soufflerie ; on débouche le trou de crasse et celle-ci s'écoule dans un pot à crasse qui est un récipient en tôle ou en fonte garni intérieurement de sable de moulage.

4.2.62. Décrassage de la poche de coulée

Après addition des inoculants ou des désulfurants il est nécessaire d'éliminer le bain de laitier formé à la surface du métal contenu dans la poche de coulée. La méthode décrite à la figure 13 est celle que nous proposons à la R.C.F.S. Le décrassage se fait en basculant la poche vers l'arrière de façon à ne pas détériorer le bec de coulée. Un ouvrier tire la crasse avec un crémoire qui est une planche ou une tôle fixée à une tige dont l'autre extrémité est une poignée.

L'écran protecteur, rectangulaire de $2 \times 1,5$ m et d'une épaisseur d'environ 5 mm est en bois renforcé par un cadre rigide en bois.

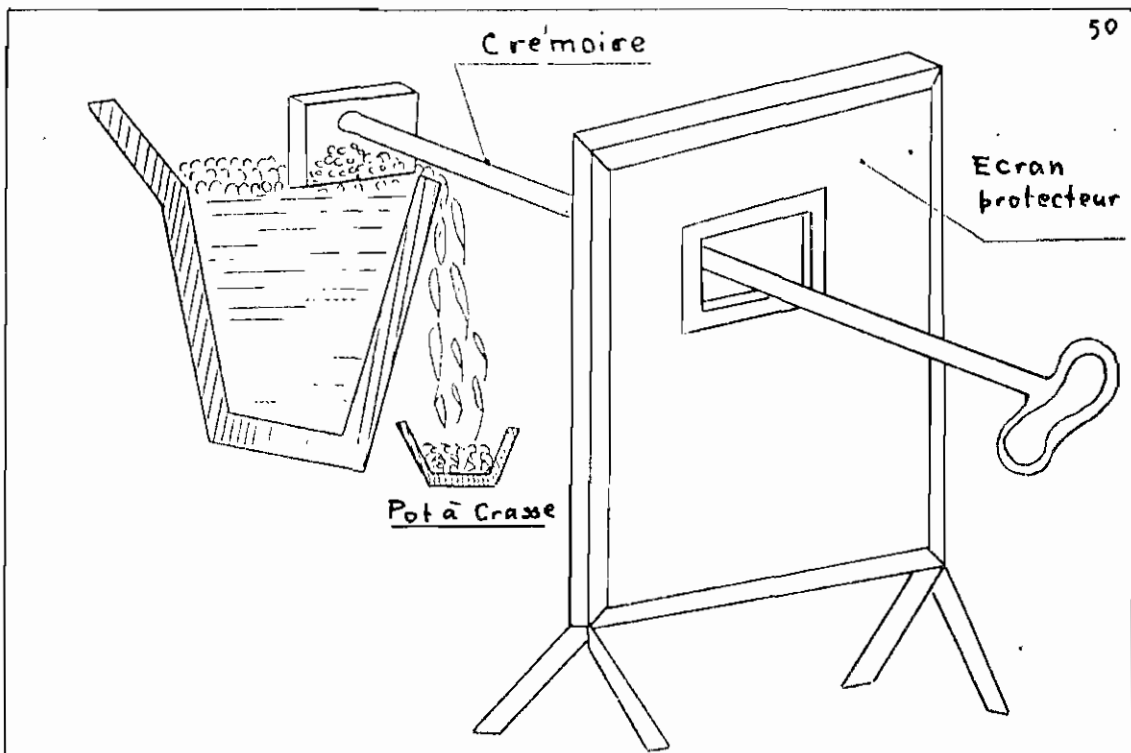


fig:43: DECRASSAGE D'UNE POCHE

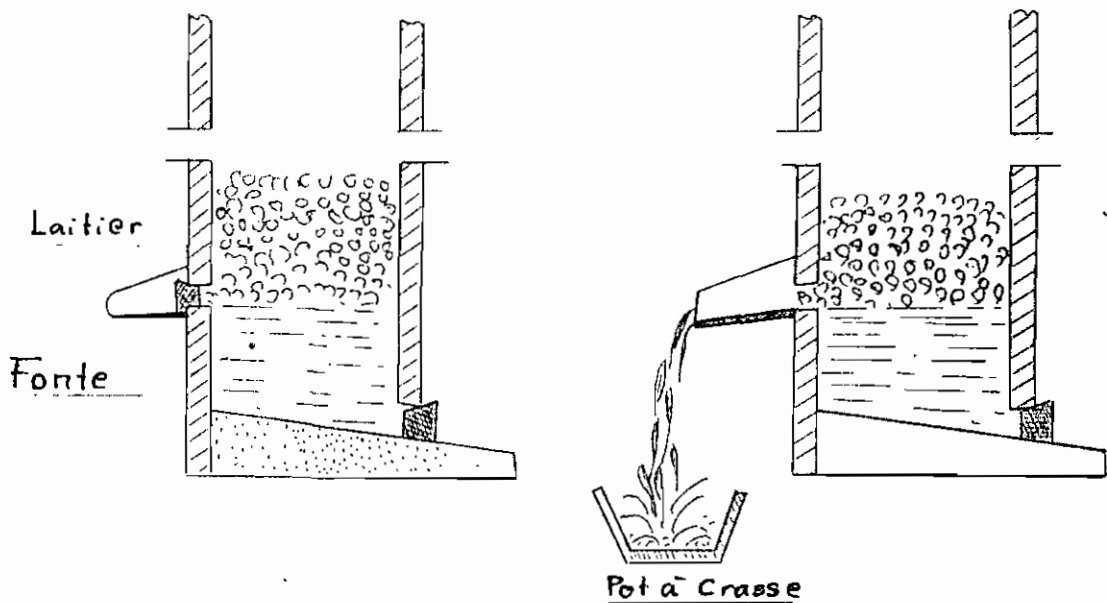


fig:14: DECRASSAGE D'UN CUBILOT

4.2.7. Analyse du produit

Dans une fonderie, l'idéale serait d'avoir un laboratoire attenant qui permettrait de faire l'analyse chimique et mécanique des pièces moulées. Mais l'analyse de la composition chimique du produit ou des matériaux destinés à la fusion nécessiterait un laboratoire suffisamment équipé et des laboratins de haut niveau en chimie; ce qui coûterait très cher pour le besoin de notre fonderie. C'est pourquoi nous proposons l'achat de machines conçues pour les essais mécaniques des pièces en fonte, afin d'approximer la composition chimique.

4.2.71. Recherche de carbone équivalent par essai destructif

Nous verrons au chapitre 6 la définition du carbone équivalent exprimé par :

$$C_e = C_T + \frac{1}{3} (Si + P) \quad \text{ou} \quad C_T = C_e + G (\%)$$

Si (%) et P (%).

Certaines formules empiriques établies par divers auteurs permettraient de relier l'épaisseur (ou diamètre), la résistance à la traction (R) et les éléments de la composition chimique. La formule du fascicule de documentation AFNOR FD A32-102 pour un diamètre de 30 mm est :

$$C_e = C_T + \frac{1}{3} (Si + P) = 5.15 - 0.0038 R_{30} (MPa)$$

Des formules établies par JUNGBLUTH permettent de relier la résistance dans le jet de 30 mm (R_{30}) en fonction de la résistance (R) souhaitée pour chaque diamètre (voir tableau 7. annexe page)

4.2.72. Recoupement par estimation de la dureté (essai non destructif)

La formule suivante :

$$R = 263 - 65 C_T - 26 Si - 13 P + 1.3 HB$$

relie la résistance R , les éléments de la composition (C , Si , P) et la

dureté Brinell HB. Cette formule valable dans un assez large domaine d'épaisseurs des pièces est de W. WEIS et K. ORTHS.

Donc au lieu d'installer un laboratoire très équipé on pourrait se procurer d'une machine pour essai de traction et la machine de dureté Brinell pour nos bancs d'essai destructif et non destructif.

On peut acheter une autre machine de dureté que celle de Brinell ; mais dans ce cas il faut utiliser le tableau 8 présenté en annexe, pour pouvoir faire une conversion.

Remarque sur le plan de la page

Ce plan n'est pas un plan d'implantation en tant que tel même s'il le ressemble. Nous répétons que ce schéma est fait dans le but unique de montrer les principales étapes d'une bonne marche de cubilot et de souligner l'importance de ces étapes pour la production de qualité et pour l'amélioration du rendement de cette production.

Précision sur le paragraphe 4-2-4.

Le volume de 8 m^3 devrait s'écrire 8 Nm^3 c'est-à-dire calculé sous les conditions normales (0°C et 1 atmosphère).

Pour l'air atmosphérique à 30°C nous aurons un volume de :

$$V_{30^\circ\text{C}} = 8 \text{ m}^3 (30 + 273) / (0 + 273) = 8.9 \text{ m}^3.$$

CHAPITRE 5

5-1. BILAN THERMIQUE DU CUBILOT

5-2. CONSTRUCTION DU CUBILOT

5-1- BILAN THERMIQUE DU CUBILOT

Un autre problème surgit au cours de ce projet : la conception d'un cubilot qui sera installé à la place de celui qui s'est fissuré au cours d'une fusion. Mais pour concevoir un cubilot il est absolument nécessaire de penser au rendement au niveau de cet appareil de fusion. Pour cela, nous croyons juste de partir du bilan thermique du cubilot.

Le bilan thermique du cubilot, comme celui de tout appareil, consiste à écrire l'équilibre entre les chaleurs reçues, les chaleurs utiles et les chaleurs perdues (non utilisées).

Au niveau d'un cubilot en régime permanent on a :

$$W_R + W_u + Q = 0 \quad \text{ou} :$$

- W_R = chaleur totale reçue (combustion + oxydation)
- W_u = chaleur réellement utilisée (négative)
- Q = chaleur perdue globalement (négative)

5-1.1 Etude du rendement du cubilot :

Le rendement global du cubilot s'exprime par le produit :

$$R = R_f \times R_c \quad \text{ou} :$$

- R_f = rendement du four
- R_c = rendement de combustion

5-1.1.1 Le rendement du four R_f

Ce rendement s'exprime par le rapport : $R_f = \frac{W_u}{W_{F0}}$

- W_u = chaleur utile en valeur absolue ;
- W_{F0} = chaleur totale abandonnée dans l'appareil.

La chaleur utile $W_u = W_{u1} + W_{u2} + W_{u3}$ ou :

- w_{u1} = chaleur d'échauffement de la fonte solide (≈ 0.17 kcal/kg°C)
- w_{u2} = chaleur latente de fusion de la fonte (≈ 46 kcal/kg)
- w_{u3} = chaleur d'échauffement de la fonte liquide (≈ 0.21 kcal/kg°C)

La chaleur w_{F0} est exprimée par la somme suivante :

$$w_{F0} = w_u + w_L + w_{Ea} + w_P \quad \text{ou} :$$

- w_u chaleur utile,
- $w_L = w_{L1} + w_{L2}$ (w_{L1} chaleur de décomposition de la coque et w_{L2} chaleur d'échauffement du laitier)
- w_{Ea} chaleur de dissociation de l'eau contenue dans l'air ou dans le coke (≈ 68.4 kcal/mole)
- w_P = chaleur évacuée par les parois.

Le rendement du four s'écrit alors :

$$R_f = \frac{w_{u1} + w_{u2} + w_3}{w_{u1} + w_{u2} + w_{u3} + w_L + w_{Ea} + w_P}$$

5-1-12. Le rendement de combustion R_c

Il est défini par le rapport :

$$R_c = \frac{w_{F0}}{w_P} = \frac{\text{chaleur abandonnée dans le caillet}}{\text{chaleur totale reçue}}$$

La chaleur totale reçue $w_P = w_{F0} + w_{Fu} + w_{Op}$ ou

- w_{F0} est comme définie précédemment ;

w_{Fu} = Chaleur perdue dans les fumées ;

- w_{Op} = chaleur apportée par l'oxydation du Si, Mn ...

Le rendement s'écrit alors :

$$R_c = \frac{w_{F0}}{w_{F0} + w_{Op} + w_{Fu}}$$

Pour une combustion complète du coke, les gaz contenus

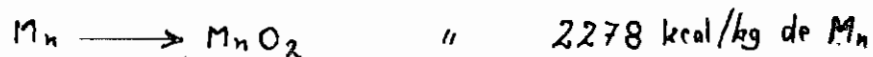
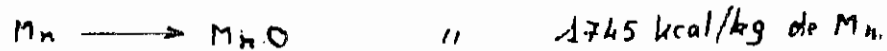
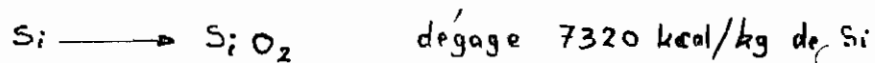
dans les fumées sont essentiellement de l'azote N_2 et du dioxyde de carbone CO_2 ; leurs chaleurs volumiques moyennes sont :

$$0.303 + 0.000027t \quad (\text{kcal/m}^3) \quad \text{pour } N_2$$

$$0.37 + 0.00022t \quad (\text{kcal/m}^3) \quad \text{pour le } CO_2$$

La température t en $^{\circ}C$.

L'oxydation du Si, ou du Mn se fait de la façon suivante d'après la littérature :



L'oxydation apporte de la chaleur mais elle augmente les pertes au feu ; on doit éviter qu'elle ait lieu dans certains cas.

5.1.13. Comment améliorer le rendement ? $R = R_f \times R_c$.

• Pour améliorer R_f (page précédente), on ne peut agir que sur W_{Ea} et W_p puisque W_u et W_L sont intouchables car elles sont nécessaires pour la fusion de la fonte et pour la formation du laitier. D'autre^{part} n'est pas facile de débarasser l'air de son humidité. On ne peut donc agir facilement que sur W_p qui dépend de la conception du cubilot, du niveau et de la répartition des températures dans la colonne du cubilot.

Une bonne isolation thermique aurait une influence positive sur le rendement du four R_f ; de bonnes conditions de marche assurent une bonne répartition des températures dans la colonne du cubilot et en conséquence, minimiserait les pertes par les parois.

• Pour améliorer le rendement de combustion, il faut abaisser la température des fumées qui contiennent les gaz d'échappement.

5-2. CONSTRUCTION DU CUBILOT

Nous venons de voir que l'isolation thermique et l'abaissement de la température des fumées ont un effet positif sur le rendement global R du cubilot.

5-2.1 Isolation thermique

Les formules de transmission de chaleur indiquent que l'isolation permet de diminuer les pertes de calories et de rendre les alentours accessibles aux personnes car les isolants ont une grande résistance thermique. Les principaux isolants naturels sont :

- les kieselguhr, terres d'infusoires ou diatomées qui sont des squelettes d'algues microscopiques rassemblés sous forme de boues ; ce sont des terres siliceuses ;
- les fibres d'amiante, appelées aussi roclaines ou amphiboles.

Mais le cubilot est souvent construit en briques réfractaires et réparé à l'aide de pisé. Ces briques de formes spéciales (fig 45) sont assemblées entre elles à l'aide de joints appelés coulis, de la même nature que les briques (fig 46)

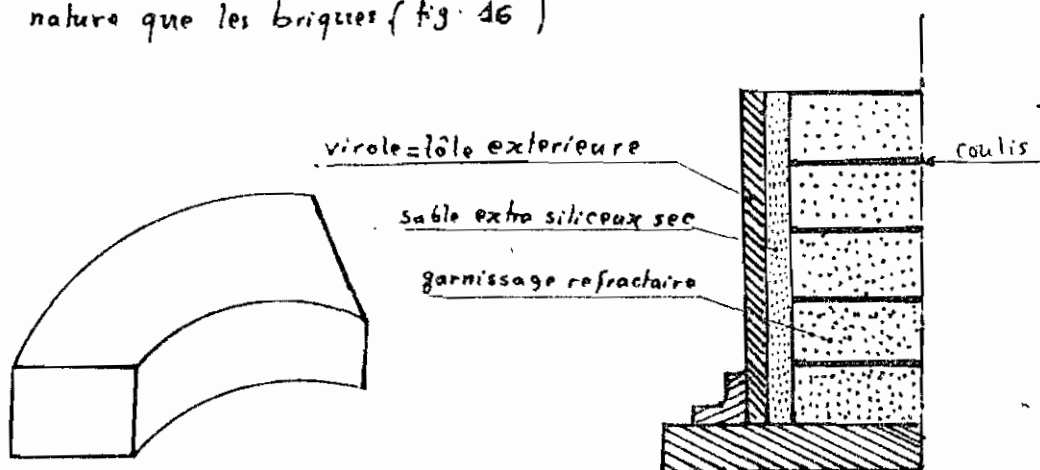


Fig 45 : brique de cubilot

Fig 46 : réalisation de garnissage

Le garnissage est entouré d'une enveloppe cylindrique extérieure dite « virole » en tôle d'acier de 5 à 15 mm d'épaisseur.

Deux rangées de briques permettent la réalisation du garnissage qui doit alors avoir une épaisseur de l'ordre de 220 mm. Pour éviter une déformation de la tôle lors d'une dilatation du garnissage en cours de fusion, on doit prévoir un jeu de 10 mm. Ce vide sera comblé, lors de la construction du garnissage, par du sable sec, extra siliceux et non tassé ; ce-ci pour éviter, dans le cas où il y aurait fissure du garnissage que la fonte liquide n'infiltrant par la fissure ne vienne en contact direct avec la tôle. Dans ce cas il y aurait fusion de la tôle et la fonte s'écoulerait en jet à l'extérieur de l'appareil ; ce qui est très dangereux car pouvant causer des accidents graves.

Dans le cas de garnissages obtenus entièrement par du pisé dame', le « vide » entre tôle et réfractaire est réalisé par interposition entre celui-ci et celle-là, d'une tôle ondulée (ou tout autre matériau compressible) laquelle permet la libre dilatation du pisé.

5-2.2. Température des fumées et du vent

Nous savons maintenant que l'abaissement de la température des fumées améliore le rendement de combustion R_c , donc le rendement global du cubilot R ; mais l'augmentation de la température de l'air aussi a un effet positif sur R_c . Cependant il n'est pas simple de parvenir à ce résultat. Il existe des installations — mais trop sophistiquées pour notre fonderie de la RCFS — qui permettent, à la fois, d'épurer au maximum

les fumées de leur chaleur et de fournir de l'air chaud au cubilot par un système de récupération et de préchauffage.

Nous présentons en annexe, page A-31, à titre d'information un exemple de ce genre d'installations. Il s'agit d'un cubilot à vent chaud par récupération, à coulée continue de la fonte et du laitier, avec garnissage réfractaire et ruissellement, à tuyères simples.

5.2.3. Proposition

Compte tenu de ce que nous venons ^{de} savoir sur le bilan thermique et des difficultés de réalisation pour son amélioration nous proposons tout simplement un cubilot simple avec les données suivantes :

- Deux rangées de briques réfractaires (briques de cubilot)
 - une épaisseur de sable siliceux entre tôle et garnissage de 10 mm
 - une enveloppe en tôle à peu près cylindrique de 5 mm d'épaisseur
 - un diamètre intérieur $D_i = 650$ mm
 - un diamètre extérieur $D_e = D_i + 470 = 1120$ mm
 - un nombre minimal de tuyères de 4 (avec œil amovible)
 - une hauteur du chenal au-dessus de sol $H'_c = 900$ mm
 - une hauteur de l'appareil (distance entre sole et guelard) $H = 4000$ mm
 - une hauteur de cheminée $H_c = 6500$ mm
 - distance de la sole au trou de laitier = 550 mm (environ)
 - distance du trou de laitier aux tuyères = 300 mm (environ)
- Les tuyères sont en fonte moulée boulonnées sur le fût (fig 17)

Pour assurer un "débouchage" ou "décrassage" automatique des tuyères lors d'une fusion nous proposons des tuyères « auto-décrassantes »

(fig 18) :

- Par inversion des volets on parvient à orienter le vent dans chaque paire

des tuyères, ainsi le laitier qui boucheait les tuyères venant d'être fermées par les volets se fluidifie et s'écoule.

Chaque tuyère doit être munie d'un œil amovible.

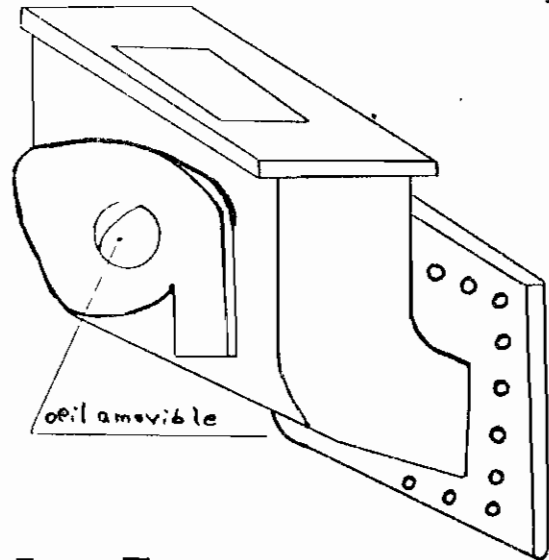


Fig. 17: Tuyère d'un cubilot

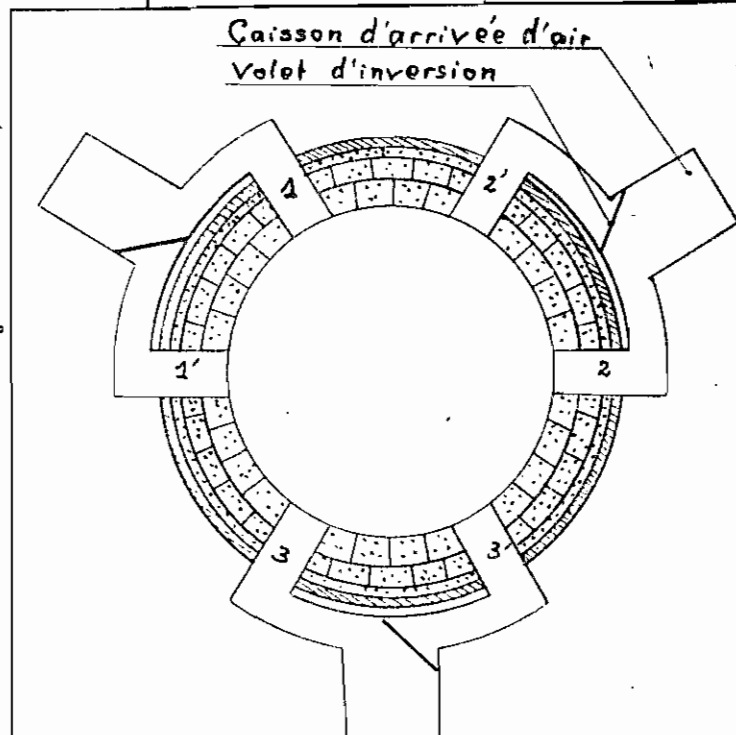


Fig. 18: Un cubilot avec tuyères auto-décrassantes

CHAPITRE 6

6.1. DEFINITIONS

6-1- QUELQUES DEFINITIONS

Nous jugeons utile de définir certains termes employés couramment en Métallurgie de Fonderie et dont la plupart se rencontrent dans ce texte. Ces mots ne viennent d'aucun dictionnaire.

En effet ils sont relevés dans la bibliographie consultée dans le cadre de ce projet. Il est fréquent qu'un même terme technique soit défini de manières légèrement différentes par divers auteurs, mais l'idée générale reste souvent la même.

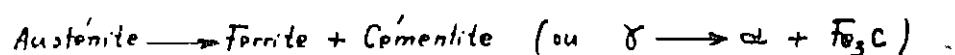
Nous classerons les mots expliqués dans un ordre « passablement » alphabétique. Environ 64 termes seront définis ou développés ici :

A

Accrochage : C'est arc-boutement des charges contre le garnissage du cubilot ; ce phénomène est constaté lorsque ces charges ne descendent pas pour être fondues.

Addition : Opération qui consiste à ajouter à la fonte, un produit qui, en se mélangeant à celle-ci en modifiera soit la composition chimique, soit les conditions de solidification.

Austénite γ : Forme allotropique d'une solution solide de carbone dans le fer. En fonction de la température l'austénite se décompose en Ferrite et en Cémentite de manière suite :



Autographitisation : Une graphitisation qui se produit dans les parties massives d'une pièce en fonte à cause de leur

refroidissement lent, favorisant ainsi la formation de graphite — tant primaire que secondaire — lequel participe à son tour, au maintien prolongé de la fonte à haute température, à une nouvelle formation de graphite....



Carbone combiné C_c : c'est le pourcentage de carbone qui, dans la fonte, est combiné au fer pour former de la cémentite

Carbone équivalent C_e (ou équivalent en carbone) : c'est la teneur en carbone que devrait avoir une fonte théorique pour que cette fonte, ayant les mêmes conditions de refroidissement qu'une fonte normale, présente à froid des mêmes structures que celle-ci. Le Carbone équivalent que l'on désigne par le symbole C_e est exprimé par la

formule : $C_e = C_T + \frac{1}{3}(Si+P)$. Une fonte normale

- est dite : - hypo-eutectique si son $C_e < 4.3$
- eutectique si son $C_e = 4.3$
- hyper-eutectique si son $C_e > 4.3$

Carbone eutectique C_E : C'est la teneur en carbone pour laquelle, compte tenu des quantités de silicium Si et de phosphore P, qu'elle contient, une fonte normale est eutectique. Le carbone eutectique C_E est donné par : $C_E = 4.3 - \frac{1}{3}(Si+P)$

Carbone graphite G (ou carbone libre) : c'est le pourcentage de carbone qui, dans une fonte se présente sous forme de graphite.

Carbone total C_T : C'est le pourcentage de carbone que, dans une fonte, révèle l'analyse chimique. $C_T = C_c + G$

Carotte au trou de coulée : C'est une fonte liquide relativement froide qui se fige au trou de coulée sous forme de cylindre solide.

Châssis : ce sont des cadres métalliques, généralement en fonte, qui maintiennent le sable de moulage serré autour d'un modèle.

Choc thermique : c'est l'effet produit — contrainte de tension, de flexion, de torsion ou de compression — sur certaines parties de pièces qui, brutalement et partiellement chauffées, sont de ce fait soumises à des déformations locales, dues à la différence de dilatation entre les points chauds et les portions voisines, lesquelles par suite du temps nécessaire à la transmission de chaleur n'ont pas encore atteint la température des points chauds.

Coulée : Opération qui consiste à remplir le moule avec du métal liquide.

Creuset : C'est un appareil de fusion pour l'aluminium ou le bronze. C'est aussi le fond du cubilot où se fait la réserve de la fonte liquide. Il s'agit du cubilot avant-creuset.

Criques : Ce sont des ruptures ou des déchirures pouvant se produire après la solidification au cours du refroidissement dans le moules et qui sont dues aux efforts s'opposant à la contraction du métal, pendant son refroidissement à l'état solide, alors qu'il est encore peu résistant.

Cubilot : appareil spécial de fusion pour la fonte.

D

Dartres : Ce sont des parties rugueuses et dures que l'on trouve sur certaines pièces de fonderie .

Décochage : rupture du moule en vue de l'extraction de la pièce , après solidification .

Défournement ou ouverture : opération qui consiste à décharger les produits qui , en fin de fusion , reste dans le cubilot , elle se fait en dégageant la béquille qui soutient la porte sous la sole du cubilot .

Dépouille : déformation , rarement prévue sur les dessins , qui consiste à donner aux surfaces d'un modèle , une légère pente qui concourt avec l'ébranlement à la levée de celui-ci .

E

Ebarbage : Enlèvement des accessoires de coulée et des bavures

Ebrantage : opération qui consiste à faciliter l'enlèvement du modèle dans le sable serré .

Éléments graphitisants : se dit des éléments — comme le silicium — , qui ont pour effet de favoriser au cours de la solidification et du refroidissement , la germination dans la fonte , du graphite .

Éléments normaux : se dit des composants tels que le silicium (Si) , le manganèse (Mn) , le phosphore (P) et le soufre (S) qui sont présents , avec des teneurs respectives plus ou moins élevées dans toutes les fontes .

Éléments spéciaux (ou éléments d'alliage) : se dit des éléments qui n'existent éventuellement dans les fontes brutes normales qu'à des teneurs très faibles — et qui de ce fait , ont une influence négligeable sur le comportement de celles-ci . après

refusion —, mais qui sont intentionnellement ajoutés aux fontes dans le but de conférer aux moulages des caractéristiques particulières que ne pourraient leur donner les fontes normales.

Éléments trempants (ou antigraphitisants) : se dit des éléments qui ont pour effet, — comme le chrome et le vanadium — de stabiliser la cémentite au cours du refroidissement de la fonte. les « antigraphitisants » sont généralement des éléments d'alliage.

F

Fondant : C'est un produit qu'on ajoute à la charge dans le but de former avec celle-ci, des combinaisons fusibles moins denses que le métal et qui surnagent à la surface

Fonderie : C'est une technique de fabrication des pièces métalliques qui consiste à verser le métal en fusion dans une empreinte appelée moule.

Fonte de deuxième fusion : fonte liquide, qui coule du cubilot, et qui résulte de la fusion d'un mélange de vieilles fontes (ou bocages) et de fontes brutes de moulage.

Fontes de première fusion : Ce sont des fontes produites par les hauts-fourneaux qui sont destinées suivant leurs compositions chimiques et sous le nom de fontes brutes, soit aux fonderies — où elles seront refondues —, soit aux aciéries afin d'être transformées après élimina-

tion d'une partie des éléments constitutants, en aciers

Fonte normale : fonte dans laquelle ne sont présents — en plus du fer et du carbone — que les éléments dits normaux. On l'appelle également fonte brute normale ou fonte brute normale de moulage.

Fonte théorique : fonte qui ne serait composée que de fer et carbone. Elle est dite eutectique pour une teneur en carbone égale à 4.3%

Four : appareil de fusion de l'acier

Fusion continue : une fusion est dite continue lorsque le métal fond et coule continuellement tandis que des charges successives sont introduites dans l'appareil de fusion.

Fusion discontinue : une fusion est dite discontinue lorsque, dès que les charges sont fondues, on cesse de chauffer et on verse le métal liquide dans des moules ou dans des poches de coulée. On charge à nouveau l'appareil de fusion, parfois avec une charge de nature différente pour produire un autre alliage et on recommence la fusion.

I

Inclusions : impuretés non métalliques, exogènes, insolubles qui, flottant dans le métal liquide tendent à circuler vers la zone de retassure où elles se déposent lors de la solidification. Les effets des inclusions sur les caractéristiques mécaniques sont néfastes.

Indice de basicité du laitier : rapport massique qui permet de déterminer le caractère basique ou acide du laitier.

L'indice de basicité que l'on désigne par le symbole i est exprimé par le rapport suivant :

$$i = \frac{\text{masse de CaO}}{\text{masse de SiO}_2} ;$$

- les laitiers à plus de 35% de SiO_2 sont acides et très fluides ;
- les laitiers de moins de 35% de SiO_2 sont basiques et visqueux.

Indice de saturation en Carbone S_c : c'est le rapport du Carbone total C_T par le Carbone eutectique C_E ;

$$S_c = \frac{C_T}{C_E} = \frac{C_T}{4.3 - \frac{4}{3}(Si+P)} ;$$

Une fonte normale est dite :

- hypo-eutectique si : $S_c < 1$
- eutectique si : $S_c = 1$
- hyper-eutectique si : $S_c > 1$

Inoculation : introduction dans la fonte liquide, une quantité de matériaux (inoculants) dans le but d'en modifier les propriétés physiques et mécaniques de façon inexplicable en termes de composition chimique.

L

Laitier : impureté se trouvant sous forme liquide sur la surface du métal en fusion ; laitier = crasse = scorie

Lit de fusion : Composition du mélange des matériaux qui constituent une charge.

M

Martensite : c'est une solution en faux équilibre de carbone dans la ferrite qui provient de la portion non transformée de l'austénite γ lors de la décomposition de celle-ci en ferrite α et cémentite Fe_3C . La martensite est la conséquence directe par trempe du refroidissement rapide d'une solution solide de carbone dans le fer.

Masselotte : une masselotte est un prolongement de la pièce, ayant pour rôle de servir de réservoir d'alliage liquide, lequel doit, lors de la solidification de la pièce, venir à chaque instant compenser la perte de volume résultant de diverses contractions subies par l'alliage. La masselotte permet ainsi de déplacer certains défauts tels que les retassures à son détriment. Après solidification et refroidissement la masselotte est enlevée de la pièce.

La masselotte est dite « directe » ou « ouverte » ou « débouchante » ou encore « libre » si elle est placée directement au-dessus de la masse à charger ;

La masselotte est dite « latérale ouverte » ou « latérale débouchante » si elle est placée sur le côté de la masse à nourrir ;

La masselotte est dite « borgne directe » ou « borgne latérale » si elle doit charger les portions massives de la partie inférieure du moule (de la pièce).

Matrice : La matrice d'une fonte, c'est la masse métallique qui entoure les particules de graphite, les cristaux de cémentite libre et les diverses inclusions ; la matrice d'une fonte est en fait, de l'acier.

Moulage : C'est la confection d'une empreinte à l'aide d'une forme appelée modèle qui, à quelques détails près rappelle celle - forme - de la pièce à réaliser.

Mise au mille : C'est la quantité de métal liquide nécessaire pour produire 1000 kg. de pièces. Lors de la charge le fondeur doit ajouter à la mise au mille, la perte au feu.

P

Perte au feu : C'est la masse des éléments d'alliage qui se combine à l'oxygène de l'air ou aux parois du cubilots pour former des produits insolubles dans le métal.

Pertes de matériaux feu ou pertes à la fusion : C'est l'ensemble de toutes les pertes subies par les matériaux depuis la fusion dans le cubilot jusqu'au remplissage des moules.

Piqures : Ce sont des petites soufflures nombreuses et plus rapprochées (cf soufflures)

Poche de coulée : C'est un récipient métallique garni intérieurement d'un revêtement réfractaire et dans lequel on transporte le métal en fusion vers les moules.

Pouvoir calorifique d'un corps : C'est la quantité de chaleur que dégage à pression constante, la combustion complète d'une unité de masse de ce corps.

Pouvoir calorifique inférieur : c'est la quantité de chaleur obtenue quand, après la combustion, toute l'eau provenant du corps est à l'état de vapeur.

Pouvoir calorifique supérieur : c'est la quantité de chaleur obtenue quand, après la combustion, toute l'eau provenant du combustible est condensée.

Pouvoir carburigène d'un combustible : c'est la quantité d'air nécessaire à la combustion complète de l'unité de masse de ce combustible.

R

Refroidisseurs externes : Ce sont des masses métalliques que l'on place autour de l'empreinte des portions du moule dont on veut activer le refroidissement afin de déplacer la cotassure

Refroidisseurs internes : ce sont des masses métalliques que l'on place à l'intérieur de l'empreinte aux endroits qui correspondent à des parties massives du moulage, et qui se trouvent entourées lors du remplissage du moule par le métal liquide ; ce dernier cède sa chaleur aux refroidisseurs et la solidification se trouve activée localement. Dans les pièces ayant des parties d'épaisseurs différentes les refroidisseurs internes concourent à la diminution de la sensibilité à l'épaisseur.

Reprises ou gouttes froides : Ce sont des solutions de continuité qu'on observe à la surface des pièces ou dans leur épaisseur et qui sont en général, le résultat d'une coulée

trop lente ou interrompue. On peut remédier à ce défaut en coulant sans arrêt dans un moule jusqu'à son remplissage et à une vitesse convenable car une coulée trop violente provoque l'arrachement du sable des parois du moule, ce qui est une cause d'inclusions.

Rendement d'un combustible η_c : c'est la part du pouvoir calorifique inférieur de ce combustible qui est convertie en chaleur durant la combustion. Ainsi $\eta_c - 1$ représente les pertes.

Retassures: Ce sont des défauts caractérisés par un affaissement de la partie supérieure de certaines pièces, et par la formation de cavernes profondes où le métal affecte une structure spongieuse et un grain grossier. C'est une conséquence du retrait, les masselottes déplacent les retassures.

Retrait: différence qui existe entre les dimensions du modèle et celles de la pièce qu'il permet d'obtenir.

Le retrait est positif si le modèle est plus grand que la pièce;

le retrait est nul si le modèle est égal à la pièce;

le retrait est négatif si le modèle est plus petit que la pièce;

le retrait volumique à la solidification, dans l'intervalle

liquide-solide est le quotient: $R_{bh} = \frac{V_s - V_l}{V_l}$ où:

V_s = volume du solide

V_l = volume du liquide

Le retrait volumique global est: $R_v = \frac{\text{Volume modèle} - \text{Volume pièce}}{\text{Volume pièce}}$

Le retrait linéaire global est: $R_l = \frac{\text{longueur modèle} - \text{longueur pièce}}{\text{longueur modèle}}$

S

Sensibilité à l'épaisseur : C'est une différence de structures qui se présente entre les parties massives et les parties minces d'une même pièce de fonderie. On y remédie en employant les refroidisseurs internes.

Soufflures : Ce sont des vides disséminés dans la masse du métal et qui sont engendrés par les bulles de gaz se trouvant emprisonnés dans le métal liquide versé dans le moule lors du remplissage de ce dernier.

T

Troostite : C'est une perlite extrêmement fine.

Trous d'air : ce sont des petits trous percés dans le sable au moment du moulage et par lesquels s'effectue l'évacuation des gaz lors de la coulée et durant toute la solidification.

CONCLUSION

La conduite de ce projet n'a pas été simple dans la mesure où les conditions opératoires de notre fonderie sont incontrôlables :

- pas de moyen de déterminer la mise au mille ou le lit de fusion
- pas de moyen de contrôler le débit ou la vitesse du vent à fournir au cubilot ni la pression à laquelle cet air est soumis
- pas de moyen de contrôle de température.

Avec le rythme d'une coulée par mois nous avons été incapables de faire suffisamment de tests ; Certes, nous avons obtenu une fonte moins dure que les autres par l'addition du silicium, mais ce résultat est loin d'être satisfaisant. En effet, la dureté de la fonte grise doit être environ 200 HB alors que nous avons obtenu une dureté moyenne de 220 HB.

Cela est dû au fait que l'effet du ferro-silicium avait considérablement diminué lorsque nous l'avions mis dans le cubilot ; le silicium s'était oxydé partiellement. Cette oxydation a cependant l'avantage d'apporter de la chaleur à la fonte : l'oxydation d'un kilogramme de silicium fournit à la fonte 7320 kcal ; cela permet d'augmenter la coulabilité de la fonte, mais la graphitisation est peu sensible.

DISCUSSION et RECOMMANDATIONS

Nous recommandons l'inoculation de la fonte avec un inoculant approprié ; mais est-ce que le procédé que nous avons proposé à la figure 7 page 29 est nécessaire ? Est-ce que si la température de surchauffe était suffisamment élevée, l'inoculant aurait le temps de flotter avant sa fusion complète ? Certains défauts — comme soufflures, retassures — constatés sur les semelles ne sont-ils pas dus à la coulée d'une fonte froide ? ou à une coulée turbulente ou trop lente ? ou à une fonte mal décaissée ? Il y a tant des questions auxquelles nous ne sommes pas en mesure de répondre avec certitude du fait de la particularité des conditions d'opération au sein de notre fonderie.

Nous avons décrit au chapitre 4 paragraphe 4-2.7 une méthode d'analyse chimique fondée sur des essais mécaniques ^{sur} des pièces moulées en fonte. Il existe aussi une autre méthode d'analyse chimique permettant d'approximer la teneur en silicium. Il s'agit d'une analyse chimique par épaisseur de trempe :

L'épaisseur de la structure blanche ou mieux, la distance qui sépare la surface de la pièce de l'endroit où la structure de la fonte trempée est constituée moitié de structure blanche et moitié de structure grise caractérise l'effet de trempe et se nomme épaisseur de trempe mesurable sur éprouvette appropriée ; la largeur de cette épaisseur en mm permet de déterminer avec des tableaux établis à cet effet la teneur en silicium de la pièce en fonte ; Cette méthode est plus rapide est plus simple.

Autres recommandations :

- augmenter l'épaisseur de la chamotte à l'intérieur de la poche de coulée afin de diminuer les pertes de chaleur à l'extérieur ;
- continuer à mettre les briquettes de FeSi dans le cubilot afin d'augmenter la coulabilité de la fonte par un apport supplémentaire de chaleur ;
- réduire les briquettes qui seront mises dans la poche pour faciliter leur fusion si la méthode décrite à la page 29 est difficile à réaliser ou inefficace ;
- employer une méthode de contrôle de température .

BIBLIOGRAPHIE

1. TECHNIQUES DE L'INGENIEUR , M3 II FONDERIE et MOUTAGE ; N° d'édition 2064 ; Année 1972
2. Manuel de base de l'ingénieur Tome II de S. H:son TIDESTRÖM , traduit par P. CHAUMELLE et J. AUXENFANS
DUNOD 1961
3. Gerard de SMET , Fatigue des traitements thermiques des métaux industriels , 7^e édition DUNOD - 1972.
4. Fernand DESLANDES et Léon VANDENBERGHE ,
le modèle de Fonderie , E. EYROLLES - 1963
5. Michel GEIER , Métallurgie de Fonderie , E. EYROLLES
TOME I - 1976 ; TOME II - 1978
6. H. LE BRETON , Manuel pratique du Fondeur de Fonte
DUNOD - 1966
7. K. STRAUSS , Applied science in the casting of metals
PERGAMON PRESS , first edition 1970
8. H. LE BRETON , Défauts des pièces de Fonderie , Tome I
E. EYROLLES - 1956
9. A. et R. NICOLET et G. BRODBECK , Le Modelleur E. EYROLLES
7^e édition 1969 .
10. J. LARGETEAU , La Fonderie Tome II ,
Presses Universitaires de France - 1975
11. Bilan thermique du cubilot , L. CHAZÉ et R. SANZ
Journal de Fonderie N° 399 mai 1980
Journal de Fonderie N° 400 juin 1980
12. Journal du Fondeur d'aujourd'hui N° 341 juin 1980

13. Notes de cours de Freinage

14 - M. BAILLY , Thermodynamique technique ,
Tome 1 , BORDAS - 1971

ANNEXES

1. Fig. 49 : COEFFICIENT DE FROTTEMENT VS VITESSE

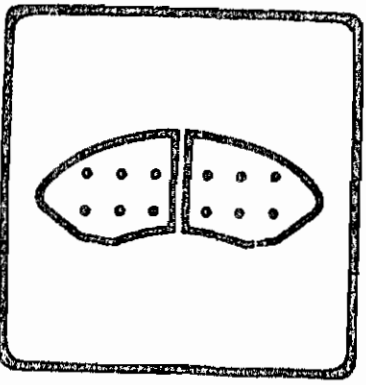
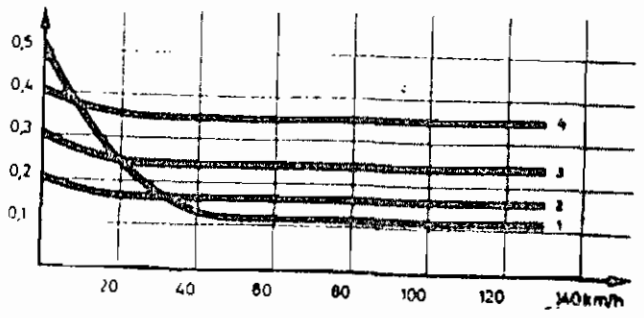


Fig. 20: SEMELLE COMPOSITE

Les matériaux JURID
Фрикционные материалы ЮРИД



Coefficient du frottement de sabots en fonte (1) et de garnitures en matière plastique (2 à 4)

Коэффициент трения колодок из серого чугуна (1) и пластмассовых накладок (2 до 4)

2. CONSTITUANTS DE BASE DE FONTE

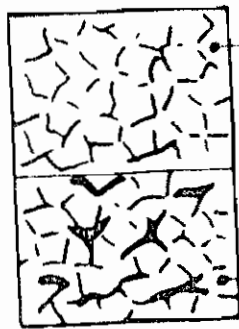


Fig. 21: ferrite



Fig. 23: perlite



Fig. 22: cementite

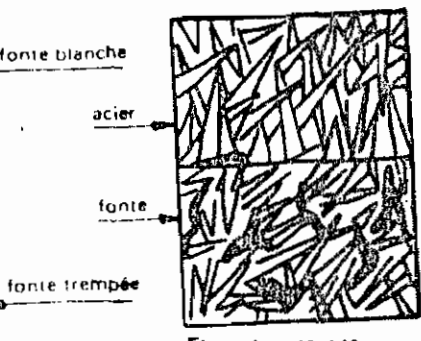


Fig. 24: martensite

acier

fonte à graphite sphéroïdal

fonte à graphite lamellaire

fonte

fonte blanche

acier

fonte

fonte trempée

3-FORMATION DE LA CEMENTITE AU REFROIDISSEMENT RAPIDE

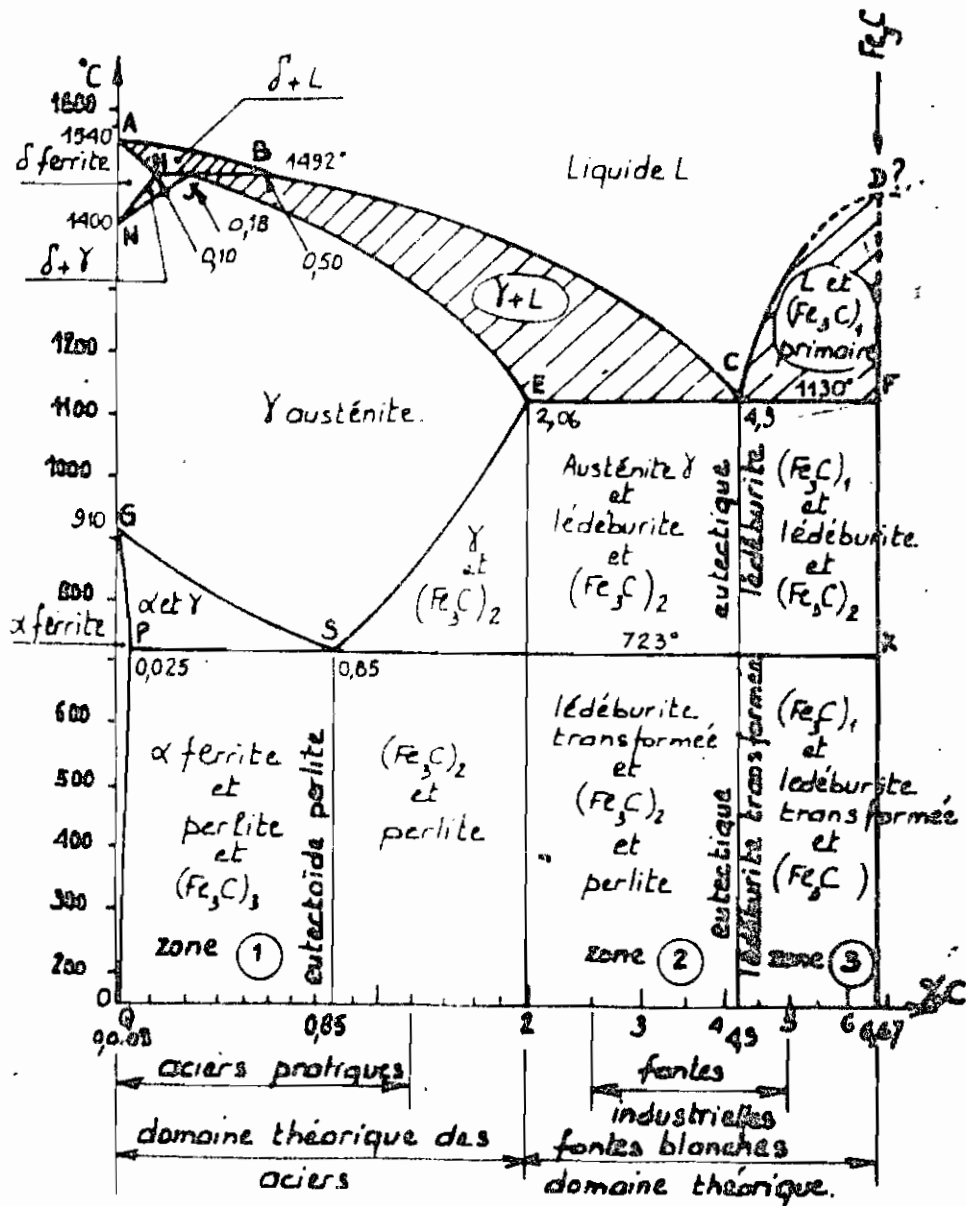


Fig. 25 Diagramme labile FER-CEMENTITE
en constituants microscopiques.

4 - DIVERSES FORMES DE GRAPHITE ^{A-3}



FIG. 26
Graph. en lamelles
(type A)

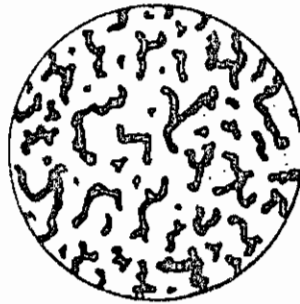


FIG. 27 - Graphite en pseudo-
lamelles (type A').

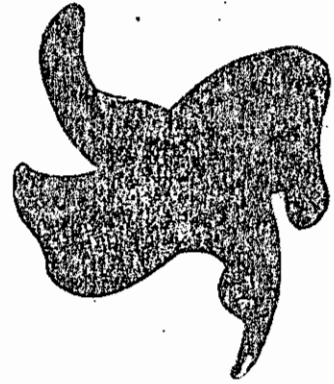


FIG. 28 - Rosette
de graphite.

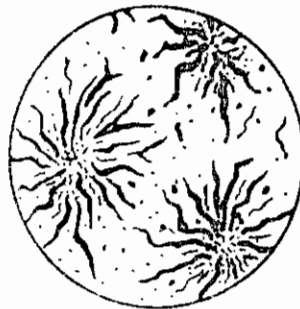


FIG. 29 - Graphite
en rosettes (type B).



FIG. 30 - Graphite type C
(lamelles superposées).

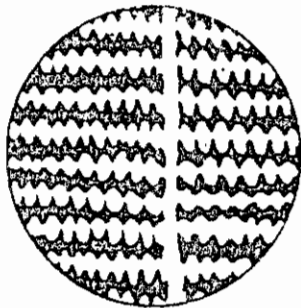


FIG. 31 - Graphite Interdendritique (type I).

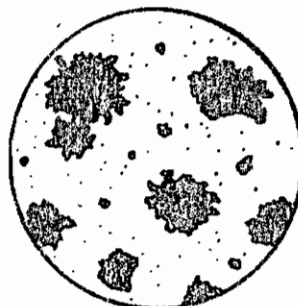


FIG. 32 - Graphite en nodules

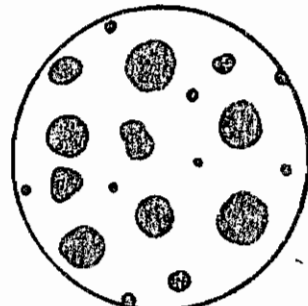


FIG. 33 - Graphite sphéroïdal

5- TENEUR EN SILICIUM D'UNE PIECE EN FONTE

Tableau 6 : Choix de la teneur en silicium (à titre indicatif) *

Résistance MPa	Carbone %	Phosphore %	Silicium % selon épaisseur moyenne						
			5 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	75 mm
150 à 200	3,2 à 3,5	0,8 à 1,2	2,6	2,3-2,4	2,1	—	1,8-1,9	1,7-1,8	1,6
200 à 250	3,1 à 3,4	0,6 à 0,8	2,3	2,0-2,1	1,8	1,6-1,7	—	1,4-1,5	1,3
250 à 300	3,0 à 3,3	< 0,4	2,1	1,8-1,9	1,6	1,4-1,5	1,3-1,4	1,3	—
300 à 400	2,9 à 3,2	< 0,2	1,9-2,0	1,7	1,4-1,6	1,4	1,3	—	—

(*) Il s'agit de la teneur finale après éventuelle inoculation (recommandable ou obligatoire pour $R > 250$ MPa), et valable pour le moulage en sable.

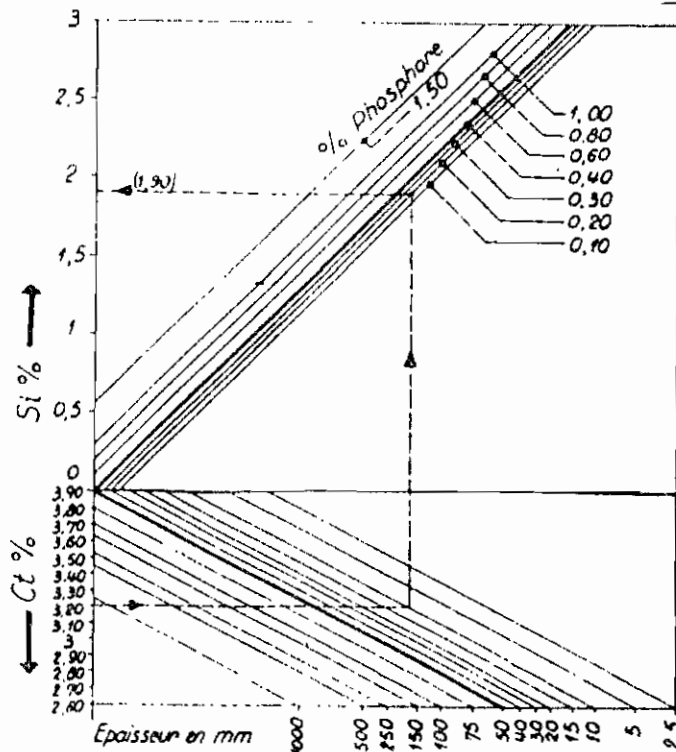


Fig 34 - Atlas d'OSINN.

Exemple : Teneur en carbone $C_t = 3,2\%$
 Teneur en phosphore $P = 0,2\%$
 Épaisseur de pièce $e = 40$ mm } \Rightarrow Teneur en silicium $Si = 1,9\%$

6. EFFETS DU SOUFRE SUR LA DURETE

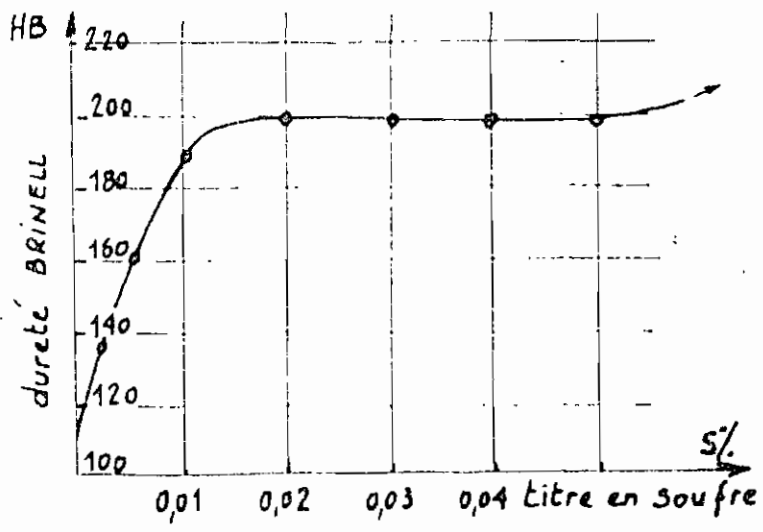


Figure 35 - effet du S sur la perlitisation de la matrice et sa dureté

7. EFFETS DU VANADIUM SUR LA RESISTANCE A L'USURE

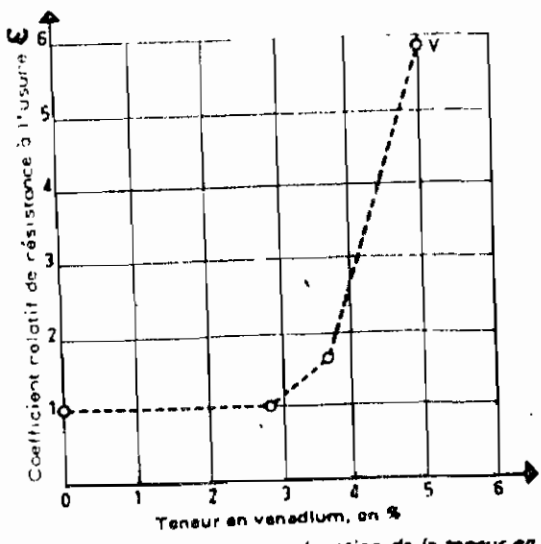


fig. 36 - Usure par frottement en fonction de la teneur en vanadium dans le cas de frottement sur papier abrasif.

8. INFLUENCE DU NICKEL SUR LA DURETE

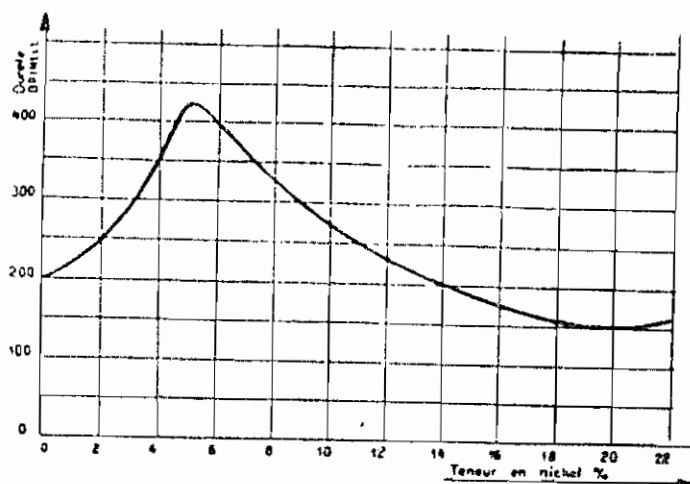


FIG. 37 — Diagramme du Dr EVEREST (1).

(Cas d'une fonte de base normale, qui, dans les conditions de l'expérience, et avant addition de nickel donne aux pièces coulées une structure grise à matrice perlitique).

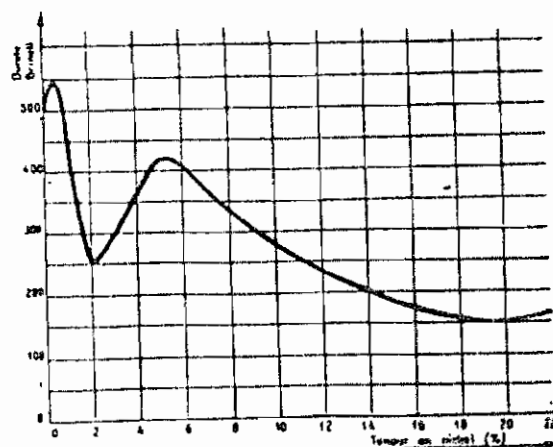


FIG. 38 — Diagramme du Dr EVEREST.

(Cas d'une fonte de base normale qui, dans les conditions de l'expérience, et avant addition de nickel donne aux pièces coulées une structure blanche).

9 - GERMINATION DU GRAPHITE AU REFROIDISSEMENT LENT

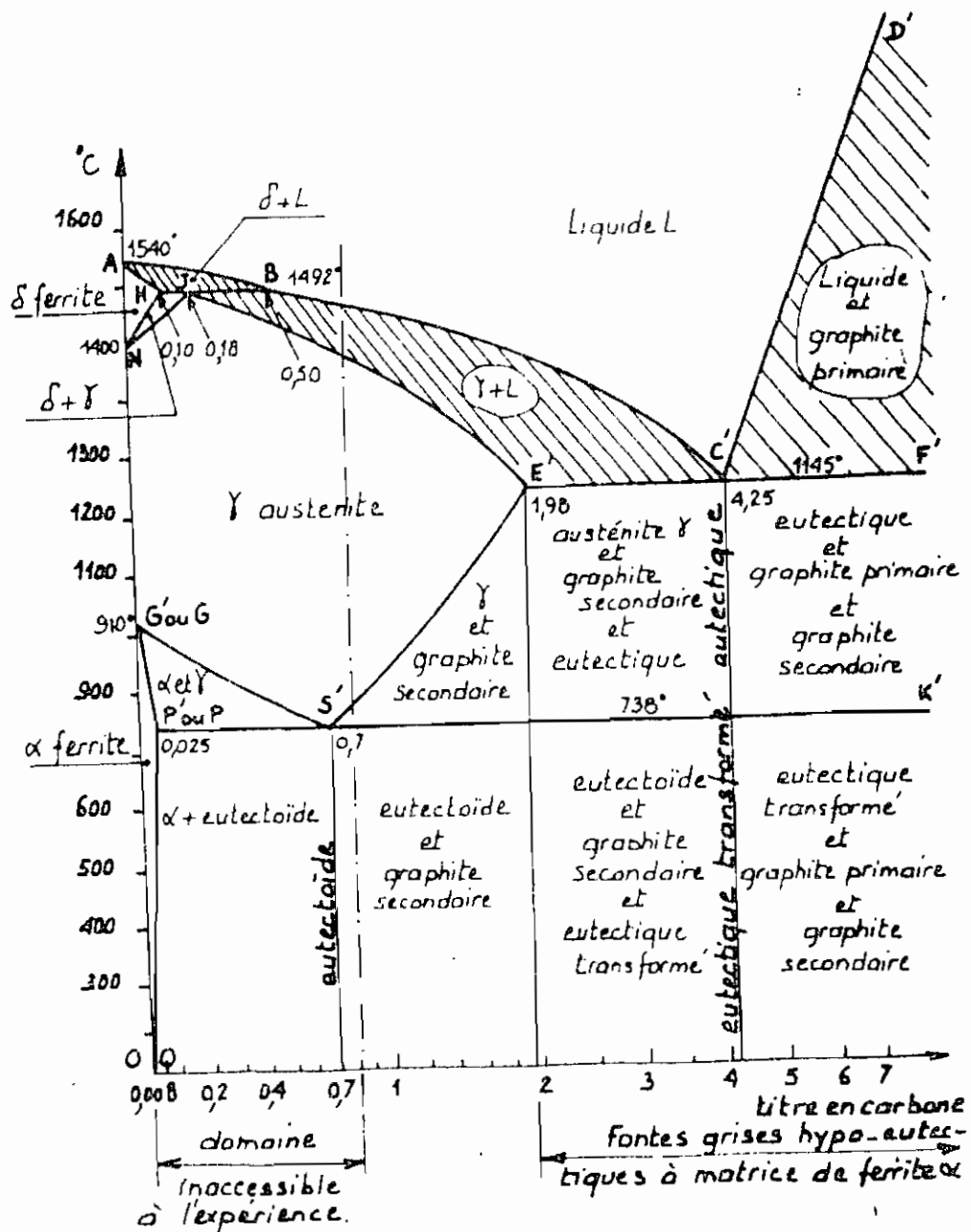


Fig. 30 - Diagramme stable FER-GRAPHITE en constituants micrographiques.

40. GERMINATION DU GRAPHITE
APRES INOCULATION AU $FeSi$

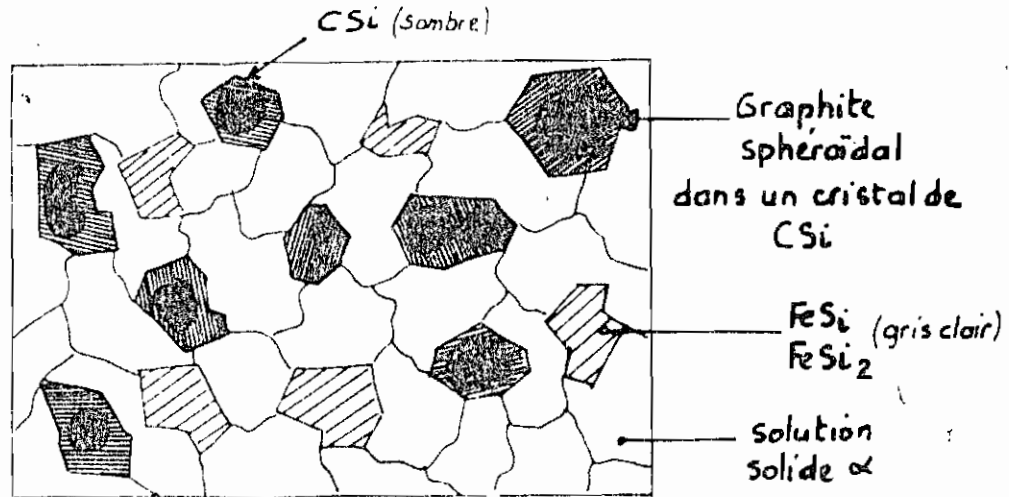
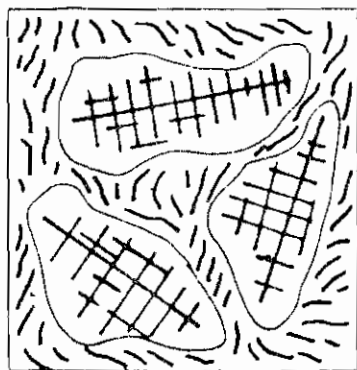
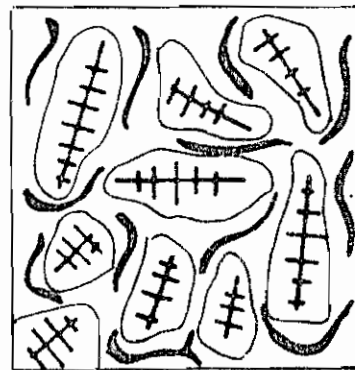


Figure 40 - Germination du graphite dans le carbure de silicium



a. sans inoculation



b. avec inoculation

Figure 41 - Effet de l'inoculation sur le morcellement des cellules dendritiques d'austénite.

11. TABLEAU 7 : RESISTANCE R_{30} VS. RESISTANCE R_{ϕ}

Diamètre ϕ en mm	Résistance à la traction en MPa
7,5	$R_{30} = 2 \quad R - 650$
10	$R_{30} = 1,5 \quad R - 333$
15	$R_{30} = 1,2 \quad R - 147$
20	$R_{30} = 1,07 \quad R - 62$
40	$R_{30} = 0,97 \quad R + 35$
50	$R_{30} = 0,97 \quad R + 45$
60	$R_{30} = 0,97 \quad R + 60$
90	$R_{30} = 0,97 \quad R + 98$

Par exemple, si l'on désire une résistance de 320 MPa dans une partie de pièce d'épaisseur équivalente à 20 mm, soit 40 mm de diamètre, on trouve $R_{30} = 345$ MPa.

Le carbone équivalent à viser d'après le fascicule FD A 32-102 sera voisin de :

$$5,15 - 0,0038 \times 345 = 3,84 \%$$

42. TABLEAU 8 : CORRESPONDANCES ENTRE UNITES H. A-10

Vickers (F ≥ 98 N) HV	Brinell (*) (0,102 · F/D² = 30) HB	Zugfestigkeit Tensile strength Résistance à la traction N/mm²	Rockwell						
			HRR	HRC	HRA	HRR *)	HR 15 N	HR 30 N	HR 45 N
80	76,0	255							
85	80,7	270	41,0						
90	85,5	285	48,0						
95	90,2	305	52,0						
100	95,0	320	56,2						
105	99,8	335							
110	105	350	62,3						
115	109	370							
120	114	385	66,7						
125	119	400							
130	124	415	71,2						
135	128	430							
140	133	450	75,0						
145	138	465							
150	143	480	78,7						
155	147	495							
160	152	510	81,7						
165	156	530							
170	162	545	85,0						
175	166	560							
180	171	575	87,1						
185	176	595							
190	181	610	89,5						
195	185	625							
200	190	640	91,5						
205	195	660	92,5						
210	199	675	93,5						
215	204	690	94,0						
220	209	705	95,0						
225	214	720	96,0						
230	219	740	96,7						
235	223	755							
240	228	770	98,1	20,3	60,7	40,3	69,8	41,7	18,9
245	233	785		21,3	61,2	41,1	70,1	42,5	21,1
250	238	800	99,5	22,2	61,6	41,7	70,6	43,4	22,2
255	242	820		23,1	62,0	42,2	71,1	44,2	23,2
260	247	835	(101)	24,0	62,4	43,1	71,6	45,0	24,3
265	252	850		24,8	62,7	43,7	72,1	45,7	25,2
270	257	865	(102)	25,6	63,1	44,3	72,6	46,4	26,2
275	261	880		26,4	63,5	44,9	73,0	47,2	27,1
280	266	900	(104)	27,1	63,8	45,3	73,4	47,8	27,9
285	271	915		27,8	64,2	46,0	73,8	48,4	28,7
290	276	930	(105)	28,5	64,5	46,5	74,2	49,0	29,5
295	280	950		29,2	64,8	47,1	74,6	49,7	30,4
300	285	965		29,8	65,2	47,5	74,9	50,2	31,1
310	295	995		31,0	65,8	48,4	75,6	51,3	32,5
320	304	1030		32,2	66,4	49,4	76,2	52,3	33,9
330	314	1060		33,3	67,0	50,2	76,8	53,6	35,2
340	323	1095		34,4	67,6	51,1	77,4	54,4	36,5
350	333	1125		35,5	68,1	51,9	78,0	55,4	37,8
360	342	1155		36,6	68,7	52,8	78,6	56,4	39,1
370	352	1190		37,7	69,2	53,6	79,2	57,4	40,4
380	361	1220		38,8	69,8	54,4	79,8	58,4	41,7
390	371	1255		39,8	70,3	55,3	80,3	59,3	42,9
400	380	1290		40,8	70,8	56,0	80,8	60,2	44,1
410	390	1320		41,8	71,4	56,8	81,4	61,1	45,3
420	399	1350		42,7	71,8	57,5	81,8	61,9	46,4
430	409	1385		43,6	72,3	58,2	82,3	62,7	47,4
440	418	1420		44,5	72,0	58,8	82,8	63,5	48,4
450	428	1455		45,3	73,3	59,4	83,2	64,3	49,4
460	437	1485		46,1	73,6	60,1	83,6	64,9	50,4
470	447	1520		46,9	74,1	60,7	83,9	65,7	51,3
480	(456)	1555		47,7	74,5	61,3	84,3	66,4	52,2
490	(466)	1595		48,4	74,9	61,6	84,7	67,1	53,1

13-CUBILOTT A VENT CHAUD
 PAR RECUPERATION A COULEE CONTINUE
 AVEC GARNISSAGE REFRACTAIRE

A-11

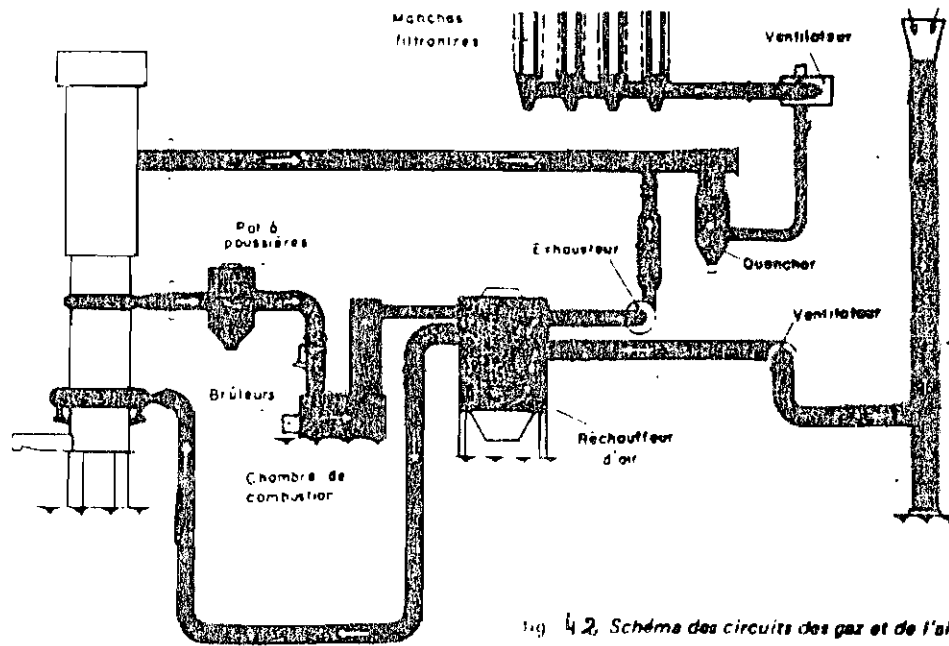


Fig. 42, Schéma des circuits des gaz et de l'air.

Le circuit de gaz schématisé sur la figure ci-dessus comprend principalement:

- une prise de gaz annulaire;
- un conduit court muni d'un pot à poussières guidant les gaz de combustion vers la chambre de combustion;
- une chambre de combustion avec brûleur additionnel à mazout;
- un récupérateur;
- un exhausteur;
- une prise de gaz au-dessus, du gueulard prenant les restant des gaz de combustion dont le CO a été enflammé au gueulard;
- un ventilateur aspirant l'ensemble des gaz de combustion;
- des filtres à manches;

Le circuit d'air est constitué par:

- un ventilateur aspirant l'air froid;
- un régulateur de débit d'air;
- un réchauffeur d'air;
- une boîte à vent calorifugée desservant les tuyères.

ERRATA: Lisez «a» «gueulard» et non «guelard»