

R. DUTERTRE, R. GEYMOND, P. DETREZ

Acieries de Paris et d'Outreau

DIX ANS D'EXPERIENCE DES ACIERS MOULES AU CHROME-MOLYBDENE EN CIMENTERIE

1 - INTRODUCTION. Les problèmes posés par la cimenterie

Nous distinguons les trois types de fabrication du ciment: la voie sèche, la voie semi-sèche, la voie humide.

La voie humide étant grande consommatrice d'énergie, c'est vers la voie sèche /taux d'humidité inférieur à 15%/ et semi-sèche que le développement s'oriente.

La figure 1 schématise le fonctionnement d'une cimenterie en voie sèche.

Pour la bonne compréhension des explications, nous avons précisé sur la figure 2 la terminologie appliquée au broyeur qui est l'engin où se situe le plus grand nombre de pièces moulées.

Au niveau de la carrière, figure 1, les pièces d'usure sont surtout des dents de pelles fabriquées essentiellement en Z 120 MC 12-2 - M /marque A.P.O.: EMNS/ et la nuance CS, acier faiblement allié pour une dureté de 450 HB environ.

Au niveau des concasseurs primaires et secondaires, ce sont des giratoires, des concasseurs à mâchoires ou à marteaux. L'acier au manganèse austénitique Z 120 MC 12-2 - M est employé pour l'ensemble des pièces d'usure. Des nuances nouvelles sont expérimentées pour répondre à certains cas particuliers comme par exemple, les fortes teneurs en silice.

Le broyeur sécheur travaille à une température de 200° - 300°C.

Selon les zones et les matières à broyer, différentes nuances ont été mises au point pour répondre aux diverses formes de sollicitations auxquelles elles sont soumises: ces nuances sont reportées sur la figure 2.

Un choix définitif dans la gamme des nuances présentées se fait à partir de la connaissance des données techniques propres à chaque installation. Nous exerçons à ce moment le rôle de conseiller technique à la fois pour le choix de la nuance et la conception du dessin des pièces et de leur adaptation.

Le four rotatif fait appel d'une part à des aciers de construction mécanique comme les galets, bandages, paliers et, d'autre part, à des aciers spéciaux devant répondre à des sollicitations très différentes: abrasion et résistance à haute température notamment.

Pour ce deuxième point, citons par exemple le REFRAL 40 /25%Cr - 12% Ni/ et le REFRAL 47 /25%Cr - 20% Ni/, pour les refroidisseurs et des nuances plus alliées encore comme le REFRAL 56 /18%Cr - 38% Ni/ et le REFRAL 72 /14%Cr - 60% Ni/ pour les pièces de Nozering. Ces nuances, par leurs teneurs en chrome, nickel et carbone équilibrées, présentent, en plus de leur réfractarité, une excellente tenue à l'abrasion.

Pour le broyeur à clinker où l'abrasivité est généralement plus importante que dans le broyeur sécheur, on fait appel aux nuances les plus performantes telles que le BCR 6 et le CMX 500.

Le tableau 1 donne un aperçu des caractéristiques des différentes nuances de marques limitées aux aciers résistant à l'usure puisque les autres nuances destinées soit à la construction mécanique des broyeurs soit aux pièces en aciers réfractaires fabriqués par les Aciéries de Paris et d'Outreau sortent du cadre de cet exposé.

II - LE CHROME ET LE MOLYBDENE, éléments de base pour la fabrication des aciers résistant à l'usure

1/ Le chrome dans la matrice et les carbures

Le chrome est un élément qui peut se trouver dans la matrice ou les carbures où il joue dans les deux cas un effet durcissant. Il intervient également sur la trempabilité de l'alliage.

Les diagrammes d'équilibre donnent une idée de la répartition des phases en fonction de la température: figures 3-4-5-6-7. [1]

Selon les taux de carbone et de chrome, on peut par traitement thermique remettre en solution plus ou moins complètement le carbone.

Pour une composition chimique repérée par le carré sur les graphiques, on constate par exemple à 1000°C une mise en solution pratiquement complète avec une faible quantité de carbure C_2 qui est disparue à 1090°C. On considère qu'à 1050°C on crée une phase gamma homogène.

Cette remarque n'est valable que pour un alliage fer - chrome - carbone à l'état d'équilibre. La présence de molybdène modifie la stabilité des carbures et nécessite une élévation de la température pour obtenir une mise en solution et lors du traitement thermique la vitesse de montée en température et le temps de maintien interviennent également sur le résultat final.

Au cours du refroidissement, la solubilité étant moins grande que dans le fer gamma, on assiste à la formation de carbures; une vitesse de refroidissement assez rapide ne permettra pas à ces carbures de se propager aux joints de grains.

Les carbures du type C_2 seront très fins et répartis de façon homogène dans une matrice martensitique.

Si la dissolution n'a pas été complète, nous trouverons à la température ambiante une certaine quantité de carbures C_3 aux joints de grains.

On peut noter d'autre part que le point M_s varie avec la température d'austénitisation. Plus la température est élevée, plus le point M_s est bas, d'où une augmentation de la quantité d'austénite résiduelle avec l'élévation de température.

Le traitement thermique sera donc conduit pour obtenir un compromis entre la quantité d'austénite résiduelle et la quantité de carbures C_3 non dissous.

2/ Le molybdène

Le coefficient de partage ne se détermine pas avec précision étant donné notamment la grande affinité du molybdène pour le carbone, il en résulte que le coefficient de partage devient pratiquement infini pour certaines valeurs du rapport $\frac{Mo}{C}$.

La précipitation du molybdène dans les carbures entraîne un effet durcissant. On a noté que la résistance peut s'élever de 380 MPa pour 1% de molybdène.

Le plus souvent, on se trouve en présence d'un carbure complexe $/M/3C$, mais on rencontre aussi $/M/2C$. Ces deux carbures sont les seuls semblant être stables dans l'austénite. Le molybdène intervient donc dans l'augmentation de la résistance à la rupture et de la dureté, il augmente aussi la tremabilité.

On dispose, en dehors des courbes de transformation en refroidissement continu, d'éléments de réglage qui permettent d'ajuster la composition chimique des nuances des ACIERIES DE PARIS et D'OUTREAU à la nature des pièces et à leurs destinations comme, par exemple, les courbes de trempabilité des figures 8 et 9 [2] ou le calcul de la trempabilité [3].

On voit qu'à partir de la connaissance des phénomènes métallurgiques d'une part et les diagrammes établis expérimentalement d'autre part, les métallurgistes peuvent équilibrer la composition chimique et définir les traitements thermiques pour obtenir les caractéristiques qui seront les mieux adaptées à l'usage auquel les pièces sont destinées:

- Dureté
- Tenacité
- Trempabilité.

On conçoit que la maîtrise métallurgique va s'exercer en grande partie à l'élaboration et aux traitements thermiques où seule l'expérience permettra d'apprécier l'effet des interactions du carbone, du chrome et du molybdène sur la qualité finale du produit qui devra être livré dans un état structural stable, conforme aux buts recherchés, et reproductible.

III - ELABORATION ET TRAITEMENTS THERMIQUES

1/ Elaboration

Les charges sont sélectionnées et le nombre de retours contrôlés.

L'élaboration est réalisée dans un four basique selon la méthode classique. En cours de fusion, on effectue un certain nombre de contrôles selon une gamme de fabrication pré-établie:

- Contrôle de la vitesse de fusion

Une fusion de 3 tonnes dure régulièrement 1 h.30.

- Contrôle de la température aux différents stades de l'élaboration à l'aide d'une canne pyrométrique plongée dans le bain de métal liquide, système à embout perdu donnant une réponse rapide et précise.

- Contrôle de l'analyse avant coulée pour ajustement des éléments à l'aide d'un spectromètre à réponse rapide.

- Contrôle de la température de coulée déterminée selon l'importance des pièces.

2/ Traitements thermiques

On dispose d'un ensemble de moyens de traitements thermiques et de parachèvement spécialisés.

Les traitements de longue durée réservés à certains aciers nous obligent à avoir des fours de grande capacité qui permettent de traiter mensuellement 300 tonnes de pièces.

Les fours destinés aux aciers au manganèse disposent d'un bac de trempe à l'eau situé au pied des fours.

L'ensemble de ces fours fonctionne avec programme et enregistrement des cycles de chauffage, de maintien et de refroidissement.

Les problèmes de décarburation revêtant une certaine importance, les fours sont équipés d'un système de régulation de pression.

IV - UNE NUANCE POUR CHAQUE BESOIN

Nous avons situé dans l'introduction les problèmes d'abrasion posés par la fabrication du ciment, de la carrière à l'expéditeur.

Il nous semble nécessaire de revenir sur la détermination des nuances adaptées aux différents types de pièces constituant le garnissage des broyeurs. Le broyage du clinker est un point critique de la fabrication compte tenu du haut degré d'abrasivité et du haut niveau de chocs rencontrés. Des solutions mal adaptées conduisent à des usures importantes ou casses, donc à une augmentation rapide du coût de production et à une perte financière.

Les ACIERIES DE PARIS et D'OUTREAU ont mis au point, en conjuguant les recherches métallurgiques et les observations de tenue en service, des nuances adaptées à chaque besoin.

L'acier BCR 6 à structure martensitique et nombreux carbures complexes finement répartis, traité pour 600 HB, allie une résistance à l'usure et une résistance aux chocs exceptionnelles. L'acier BCR 6 est la nuance la mieux adaptée pour la réalisation de plaques de blindage de premier compartiment, c'est-à-dire dans les conditions les plus sévères de chocs /gros boulets/ et d'usure. L'acier BCR 6 convient pour toutes les pièces convenablement appuyées sur leur support.

L'acier CMX 500, pour lequel la réduction de la teneur en carbone a été compensée par d'autres éléments tels que le Vanadium, présente, pour une dureté encore très élevée /500 - 550 HB/ une résistance exceptionnelle aux chocs permettant de régler le problème des blindages de fonds d'entrée - pièces très sollicitées de par leurs dimensions et les conditions de fixation.

La composition analytique et le choix des traitements confère à cet acier des caractéristiques intéressantes pour la réalisation de pièces soumises à l'abrasion à chaud /jusqu'à 400°C/ ou de pièces très épaisses à résistance à l'usure homogène dans toute la masse.

L'acier GMV présenté en deux variantes, 350/400 HB et 450/500 HB, apporte une solution à la réalisation de pièces délicates et ajourées telles que des secteurs de grilles de séparation /cloison relevée entre compartiments/.

Les nuances CD 400 et CD 500 constituent des variantes plus économiques pour 2^{ème} compartiment de broyeurs peu sollicités.

Le tableau 2 classe les aciers les uns par rapport aux autres dans des conditions virtuelles d'utilisations semblables correspondant au broyage du ciment CPA 325.

V - TENUE EN SERVICE ET REFERENCES INDUSTRIELLES

Le tableau 3 ci-joint donne les tenues en service de garnissages en acier BCR 6 de 1^{er} compartiment de broyeurs à boulets. Il est utile de noter que tous ces broyeurs fonctionnent avec des boulets de très grande dureté disponibles sur le marché français. L'emploi systématique de ces boulets très durs à haute teneur en chrome a condamné les nuances antérieurement utilisées /casse et usure rapide/.

A titre de comparaison, on peut noter que le garnissage en acier BCR 6 du broyeur de 3,800 m, qui a duré 56.000 heures à Montalieu, a succédé à un garnissage livré par le constructeur en acier à 12/14% de manganèse dont la durée de vie n'avait pas dépassé 6,500 heures et à un garnissage à 13% de chrome démonté après 13.000 heures de marche.

Il faut noter les espérances de vie calculées par les cimenteries entre 60.000 et 100.000 heures.

Des résultats remarquables ont été obtenus pour des blindages en acier BCR 6 dans le cas de conditions abrasives exceptionnelles telles que, par exemple, le broyage de ciment fondu extra alumineux. Seuls les blindages en BCR 6 ont permis l'exploitation de broyeurs modernes de grand diamètre /3,800 m/.

Les figures 10 et 11 indiquent, pour deux types de plaques de blindage différents, les usures constatées en service par démontage et pesée de ces plaques.

Les tenues en service de secteurs de grilles ou de blindages de fonds d'entrée sont moins spectaculaires mais correspondent au doublement minimum de la durée obtenue antérieurement.

L'augmentation de la tenue en service est obtenue principalement par l'adaptation métallurgique des nuances aux conditions de service. Il ne faut cependant pas négliger le tracé des pièces qui permet l'utilisation de ces nuances dures et une amélioration du rendement du broyeur.

Une longue collaboration entre le bureau d'études des ACIERIES DE PARIS et D'OUTREAU et les cimenteries a conduit à une politique d'adaptation optimale des tracés, des nuances d'acier et du rendement du broyeur.

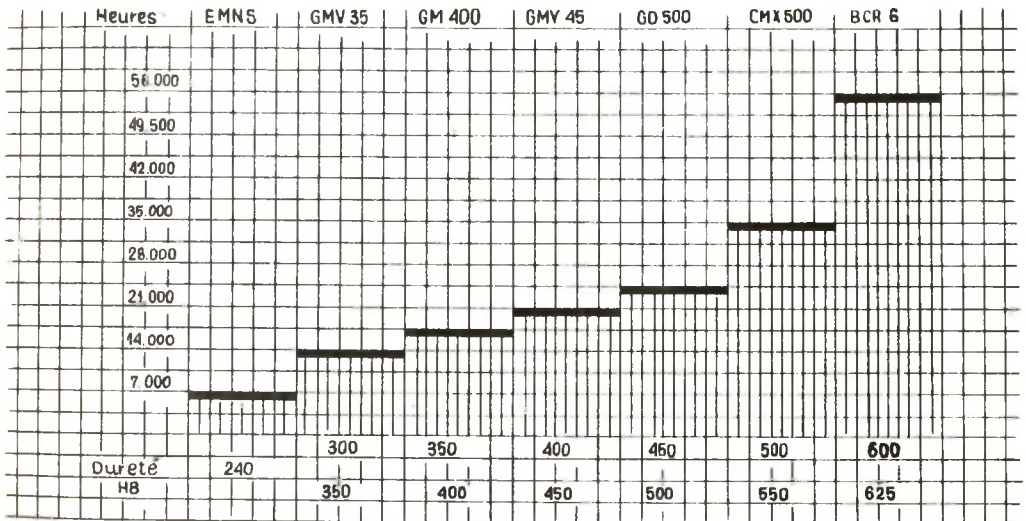
BIBLIOGRAPHIE

1. Aciers d'Outillage.
2. Fostini R.V., Shoen F.J.: Effects of carbon and austenitic grain size on the hardenability of Molybdenum Steels. Symposium "Transformation and hardenability in steels" University of Michigan - February 27-28 - 1967.
3. Detrez P.: "Manuel des Aciers Moulés" Editions Techniques des Industries de la Fonderie 12, Avenue Raphaël - 75016 PARIS /France/.

Tableau 1

Désignation A.P.O.	EMNS	GMV 35	CD 400	GMV 45	CD 500	CMX 500	BCR 6
Dureté HB	240	300 350	350 400	400 450	450 500	500 550	600 625
Composition chimique	C 1,2 Mn 12 Cr 1,5	C 0,6 Cr 3,0 Mo 0,6	C 0,3 Cr 1,5 Mo 0,6	C 0,8 Cr 4 Mo 0,6	C 0,4 Cr 2,0 Mo 0,6	C 0,4 Cr 5,0 Mo 1,2	C 1,0 Cr 6,0 Mo 1,0
Utilisation recommandée		Grilles de broyeur	Plaques de blindage 2ème chambre	Grilles et fond d'entrée de broyeur	Plaques de viroles 2ème chambre	Fond d'entrée de broyeur	Plaques de virole 1ère chambre

Tableau 2



Ce tableau n'a pour but que de classer les aciers les uns par rapport aux autres dans des conditions virtuelles d'utilisations semblables correspondant au broyage de ciment type CPA 325.

Tableau 3

REFERENCES DE TENUE EN SERVICE DE L'ACIER "BCR 6"
 POUR LE BLINDAGE CONSTITUANT LE GARNISSAGE DE
 1ère CHAMBRE DE BROyeurs A CIMENT

Groupe	Usine	Ø broyeur	
Cts Dannes	Dannes	3,200	en place depuis 1967 55.000 h
Cts Vicat	Montalieu	3,800	dépose après 56.000 h
" "	La Grave de Peille	3,400	en place depuis 1968 broyeur sécheur
Cts Lafarge	Cruas	2,200	en place depuis 1968 55.000 h
D C R	St-Brieuc	2,200	" " 1968
Cts Français	Beaumont	3,000	" " 1968 40.000 h
Cts Français	Barlin	3,500	" " 1968
Cts d'Origny	Origny	3,800	" " 1969
Cts de l'Adour	Boucau	3,000	" " 1970
Cts Français	Guerville	3,400	" " 1970
Cts Français	Beffes	2,750	" " 1969
Cts Français	Gargenville	3,000	" " 1970
Cts Français	Beaumont	2,800	" " 1970
Cts Lafarge	Val d'Azergues	3,400	" " 1970
Cts d'Origny	Lumbres	3,800	" " 1972
Cts Dannes	Dannes	4,000	" " 1972

Compte tenu des résultats obtenus jusqu'alors, on peut, pour certains appareils, avoir un espoir de vie de 60.000 à 100.000 h, ce qui représente 8 à 14 années.

De nombreuses livraisons ont été faites à l'étranger:

- Hollande - Allemagne - U.S.A. - Corée
- Brésil - Algérie - Tunisie,

soit directement, soit par l'intermédiaire de constructeurs.

FABRICATION du CIMENT VOIE SECHE

Outreau Mat

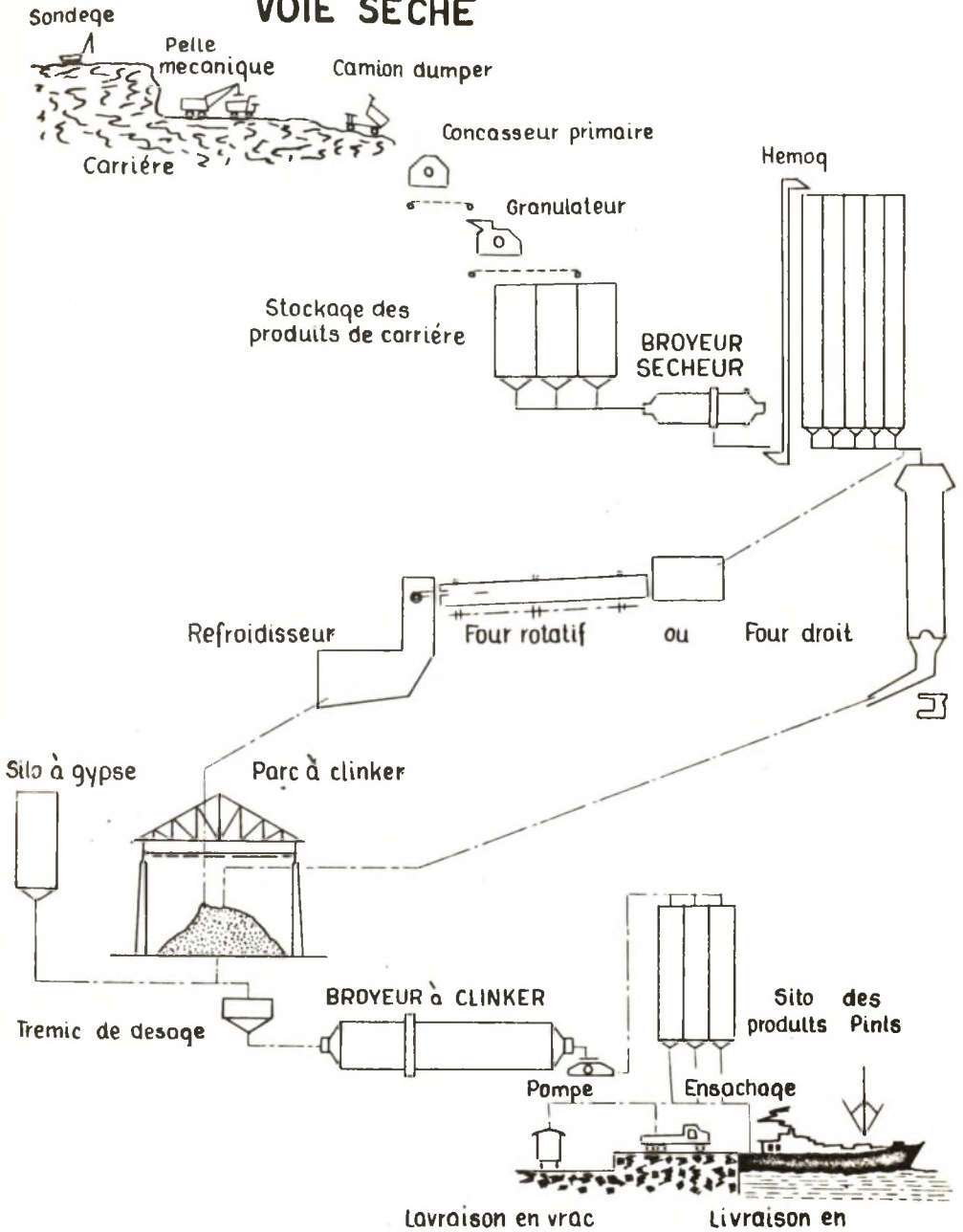
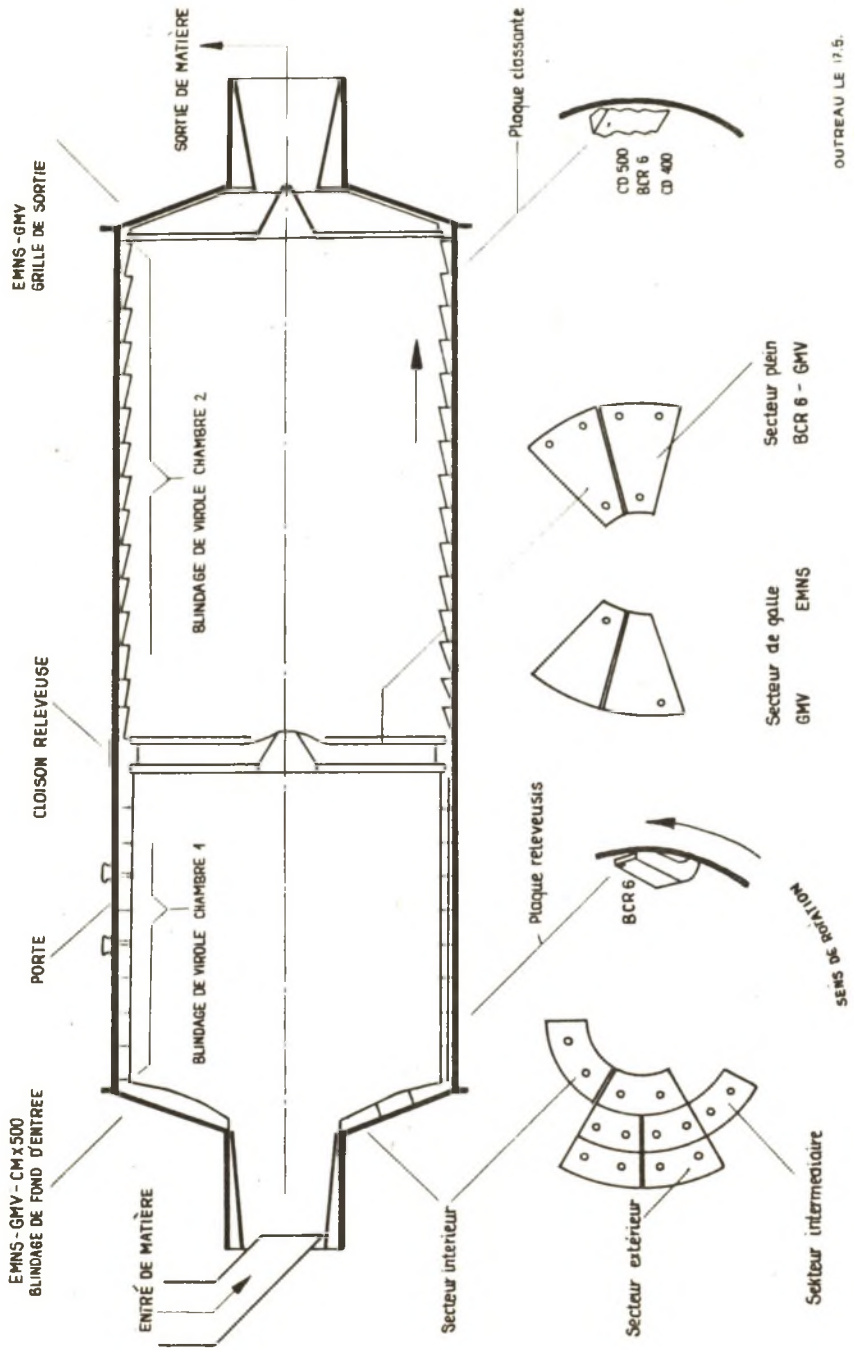


Figure 1



OUTREAU LE 17.5.

N: 725 81 16

Figure 2

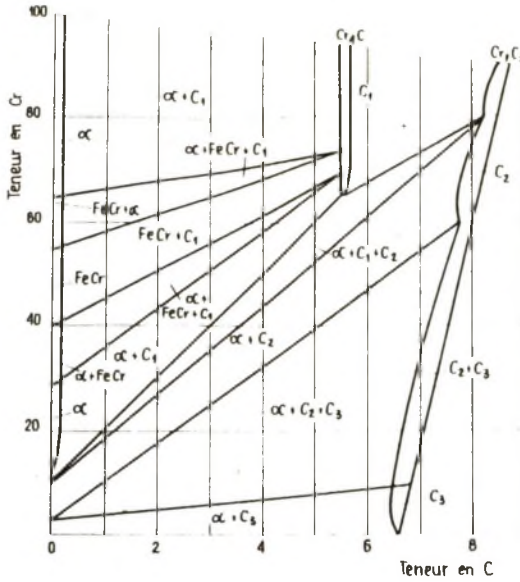


Fig. 3. Section par un plan à température ambiante du diagramme ternaire Fer, Carbone, Chrome, Tofaute, Kuttner et Bullinghaus $C_1 = /CrFe/3C$
 $C_2 = /CrFe/7C_3 = /FeCr/3C$ Extrait Aciers d'outillage page 370.

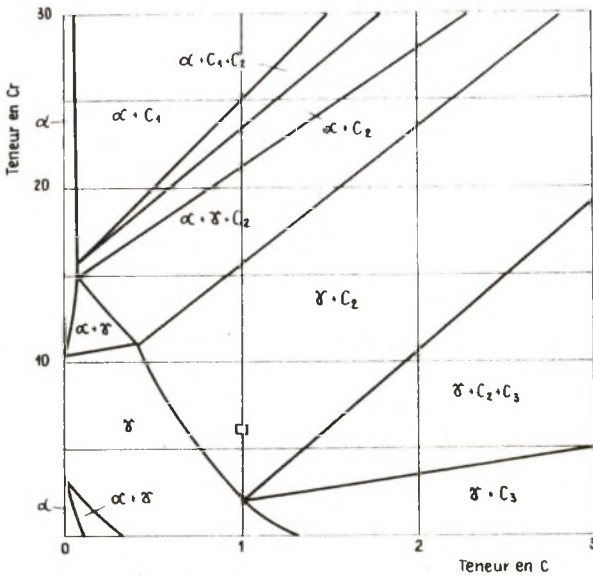


Fig. 4. Sections isothermes du diagramme ternaire Fer, Carbone, Chrome à 850°C.
 Extrait Aciers d'outillage page 375.

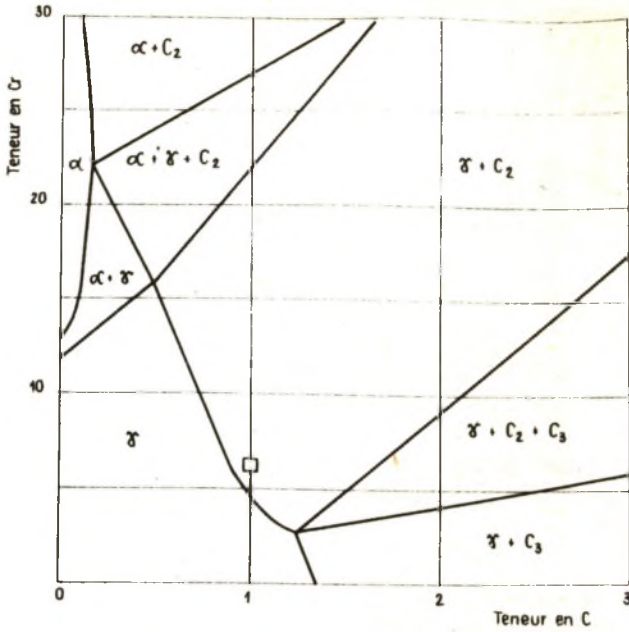


Fig. 5. Section isotherme du diagramme ternaire Fer, Carbone, Chrome à 1000°C
Extrait Acier d'outillage page 376

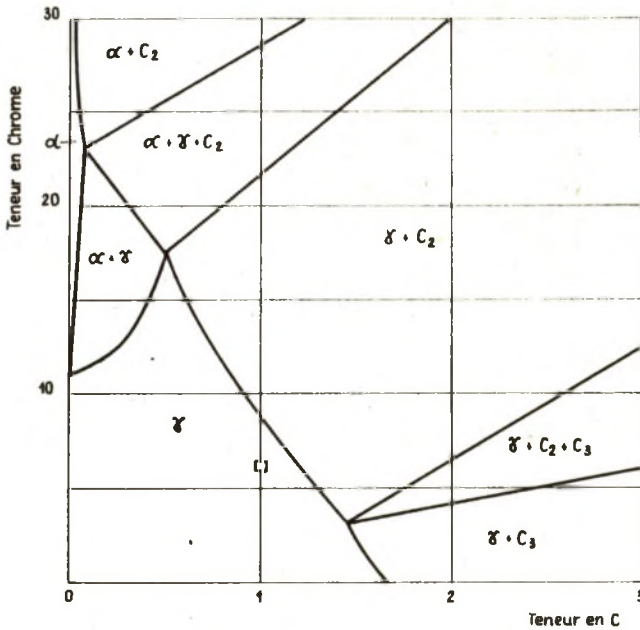


Fig. 6. Section isotherme du diagramme ternaire Fer, Carbone, Chrome à 1090°C.
Extrait Aciers d'outillage page 377

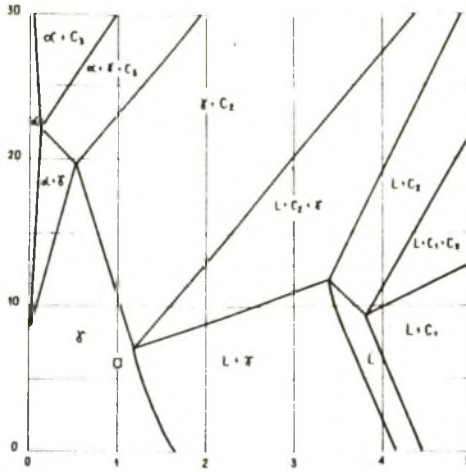


Fig.7. Section isotherme du diagramme ternaire Fer, Carbone, Chrome à 1145°C.
Extrait Aciers d'outillage page 377

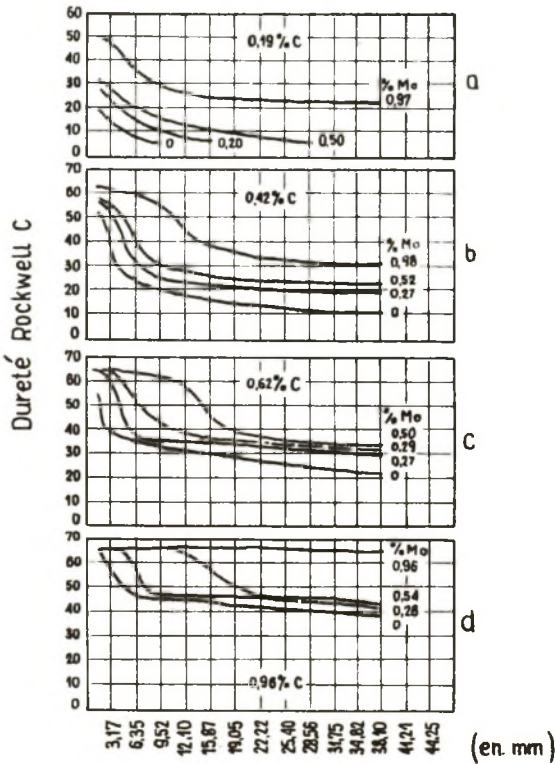


Fig.8. Distance depuis partie trempée

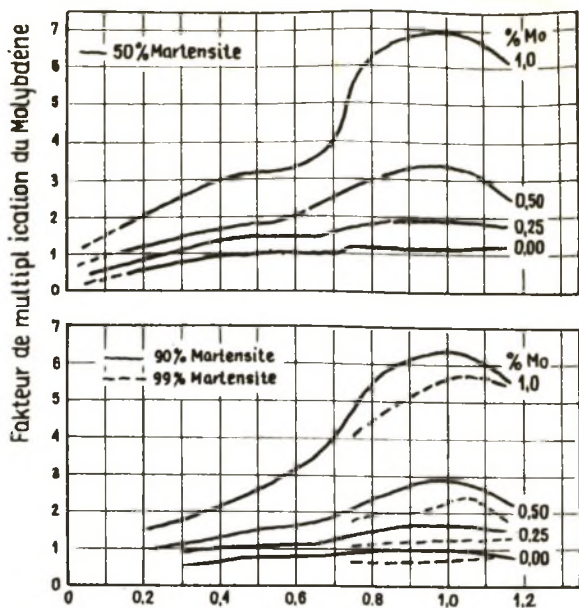


Fig. Taux de Carbone %

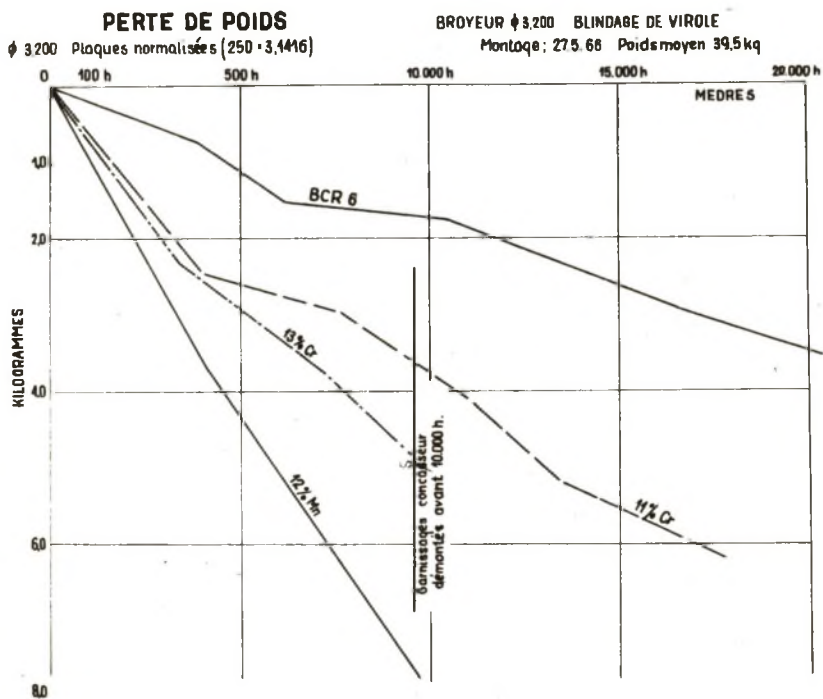


Fig.10

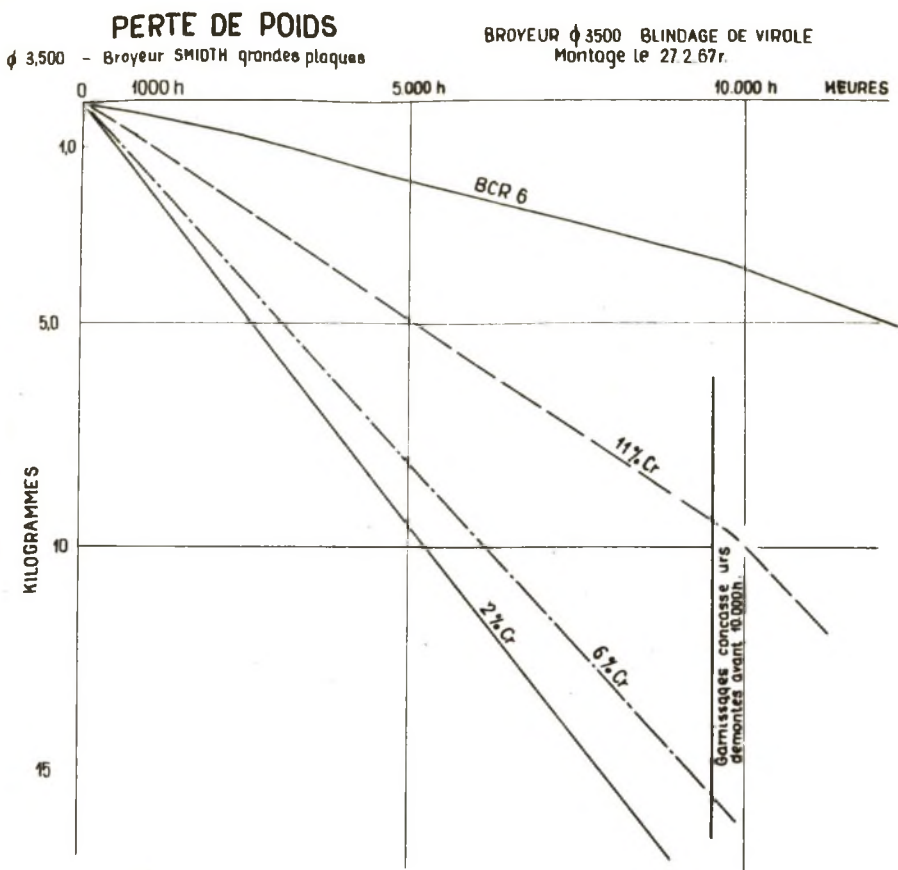


Fig.11