

# Comportement à l'usure des boulets de broyage moulés et forgés

## Caractérisation et comparaison

Bouhamla Khedidja<sup>1</sup>, Hadji Ali<sup>2</sup>, Gharbi amel<sup>1</sup>, Ghelloudj Oualid<sup>1</sup>, Maouche Hichem<sup>1</sup>, Derradji Fatima Zohra<sup>3</sup>, Remili Salhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center in Industrial Technologies, CRTI, P.O.Box 64, Cheraga 16014, Algiers, Algeria [crti.dz](mailto:crti.dz),

<sup>1</sup>[k.bouhamla@crti.dz](mailto:k.bouhamla@crti.dz).

<sup>2</sup>[hadji.lrf@gmail.com](mailto:hadji.lrf@gmail.com)

<sup>3</sup>[a.gharbi@crti.dz](mailto:a.gharbi@crti.dz).

<sup>4</sup>[o.ghelloudj@crti.dz](mailto:o.ghelloudj@crti.dz)

<sup>5</sup>[h.maouche@crti.dz](mailto:h.maouche@crti.dz)

<sup>6</sup>[fatimazohra@gmail.com](mailto:fatimazohra@gmail.com)

**Résumé / Abstract :** *Les secteurs miniers sidérurgiques et cimentiers utilisent de grandes installations pour préparer la matière première et la rendre aussi fine que possible pour répondre à des exigences de process bien définies. Généralement deux types de boulets sont utilisés, les boulets de fonderie et les boulets forgés. Les boulets de fonderie sont en fonte au chrome par contre les boulets forgés sont en acier. Ces derniers sont fournis en différentes granulométries et composition chimique. En cours de broyage, les boulets subissent des sollicitations différentes qui se résument en un impact une abrasion une friction ainsi que d'autres types d'usure. La tenue à l'usure de ces deux types de boulets est différente du fait qu'ils ne présentent pas le même type de microstructure. Les boulets en fonte au chrome sont constitués d'une microstructure mixte composée d'un réseau de carbure contenu dans une matrice à prédominance martensitique par contre les boulets en acier, la phase carbure existe en proportion très minime. La microstructure est constituée d'un mélange de martensite et bainite.*

*Dans ce travail, nous présentons une étude comparative sur le comportement à l'usure les boulets en fonte au chrome et les boulets en acier forgé. Des caractérisations chimique, métallographique et microstructurales par DRX sont effectuées pour définir la composition chimique, le type de microstructure, la nature et la proportion des phases microstructurales existantes. Des mesures de dureté et des essais d'abrasion et de frottement sont aussi réalisés afin d'évaluer le comportement à l'usure des deux matériaux étudiés. Les résultats obtenus révèlent une large différence du point de vue composition chimique et composants microstructuraux. Les essais d'usure ont montré que les boulets en fonte au chrome et les boulets en acier forgé manifestent un comportement à l'usure qui diffère selon le type d'usure subit. Les boulets en fonte au chrome résistent mieux au frottement par contre les boulets forgés ont une meilleure résistance à l'abrasion.*

**Mots clefs :** Boulets moulés, boulets forgés, microstructure, usure.

### 1. Introduction

Plusieurs formes de corps broyant sont utilisées dans le domaine du traitement de la matière première. En plus des cylindres et des barres de broyage, les boulets sont les corps broyant les plus couramment utilisés dans le secteur cimentier. Ces boulets sont en fonte au chrome ou en acier forgés. Il est bien connu que la fonte à forte teneur en chrome est sollicitée pour les applications nécessitant une meilleure résistance à l'usure [1-7]. Ce type de matériau combine de bonnes propriétés de moulage et une bonne résistance à l'usure. A l'état brut de coulée, les fontes au chrome sont constituées d'une microstructure composée d'une matrice

austénitique ainsi que d'une fraction volumique d'eutectique se présentant sous forme d'un réseau de carbures  $M_7C_3$  et d'austénite eutectique interpénétrés dans la matrice austénitique. Les fontes à haute teneur en chrome se solidifient selon le diagramme ternaire Fe-Cr-C [8,9]. Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur le type de microstructure, le comportement à l'usure ainsi que sur les procédés d'élaboration de ce type de matériaux [10-13].

En plus des boulets en fonte au chrome, les secteurs de préparation des matières premières utilise aussi des boulets en aciers forgé. Une large gamme de ces derniers est fournie sous différentes compositions chimiques. On rencontre les boulets à faible teneur en carbone, les boulets à teneur moyenne en carbone, à haute teneur en manganèse et les boulets en acier au chrome-molybdène- terres rares. Ces derniers sont commercialisés sous différentes granulométries.

Les domaines cimentier, minier et sidérurgique sont trop exigeant quant à la résistance à l'usure des boulets qu'ils utilisent dans leurs pratiques quotidiennes de broyage et de concassage. Ces opérations se déroulent dans un environnement très agressif car le broyage et le concassage des matières premières sont régis par des sollicitations abrasives et de frottement exposant le matériau à une usure en cours de service. Ces corps broyant doivent avoir une bonne résistance à l'abrasion et une résistance aux chocs suffisante et ne doivent pas être brisés lors de leur exploitation.

### 2. Procédure

Deux types de boulets de broyage sont utilisés dans ce travail : les boulets en fonte au chrome et les boules forgées. Les boulets en fonte au chrome sont produits par la fonderie de Tiaret dans un four à induction électrique industriel. Cependant, les boulets forgés ont été façonnés en utilisant un procédé de forgeage à matrice ouverte au niveau de Ferrovia. Le matériau destiné au forgeage est reçu sous la forme d'une barre de section transversale circulaire, puis découpés en lopins dimensionnés avec précision. Ces lopins sont ensuite chauffés à une température avoisinant 1100 °C et finalement mis en forme par estompage. Le tableau 1 présente la composition chimique des alliages étudiés.

Les échantillons en fonte au chrome et d'acier forgé ont subi un traitement thermique conformément aux pratiques industrielles (figures 1 et 2).

Tableau 1. Composition chimique des boulets étudiés

Ech	C	Cr	Si	Mn	S	P	Mo
Fonte	2.31	15.01	0.87	0.77	0.08	0.031	0.02
Acier	0.45	0.159	0.32	0.59	0.031	0.003	-

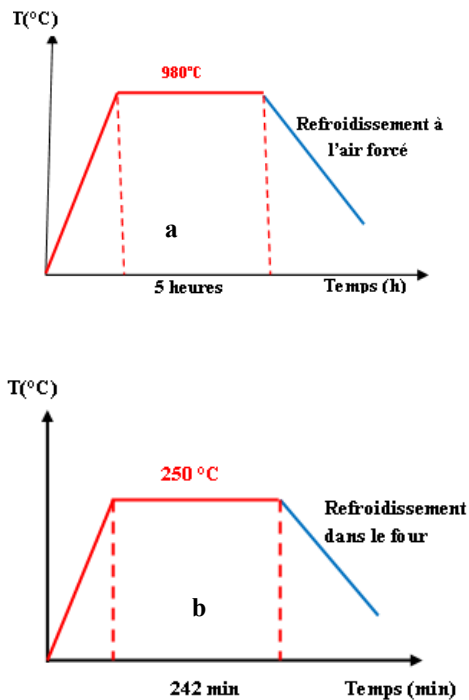


Figure 1 : Cycles de traitement thermiques des boulets en fonte au chrome: a : trempe ; b : Revenu

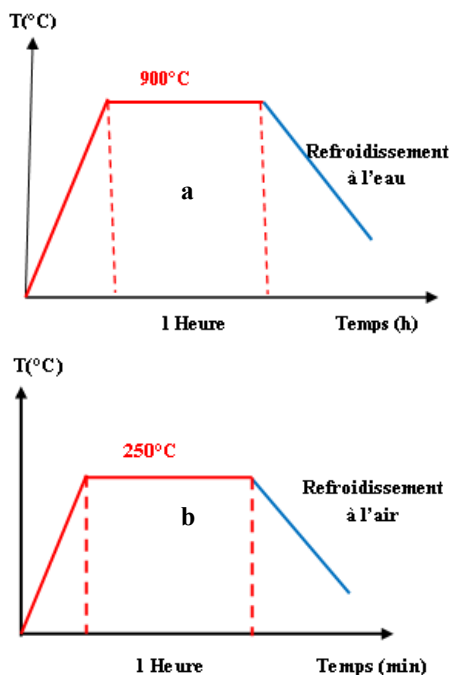


Figure 2 : Cycles de traitement thermiques des boulets forgés : a : trempe ; b : Revenu

Les investigations de la microstructure sont effectuées sur des échantillons préparés selon la procédure métallographique classique. L'analyse chimique des échantillons a été effectuée par spectrométrie. Les microscopies optique et SEM ont été effectuées sur un microscope optique NIKON LV150N et un microscope électronique à balayage EVO / MA25 ZEISS, respectivement. Les spectres de diffraction des rayons X ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre à géométrie avancée Brucker D8 ( $\theta - 2\theta$ ) appelé Bragg-Brentano sur une plage angulaire de  $0 - 120^\circ$  sur  $2\theta$  avec un pas de  $0,02^\circ$ . Le rayonnement utilisé est celle du cuivre de longueur d'onde  $\lambda_{CuK\alpha} = 1,54056 \text{ \AA}$ . L'ajustement des diffractogrammes a été effectué en utilisant la méthode de Rietveld en utilisant le programme MAUD (Analyse de matériau par diffraction) [14,15]. Les tests d'usure utilisé est un test standardisé visant à quantifier la quantité de matériau éliminé par abrasion et par frottement. Cet essai consiste à mesurer la quantité de matière perdue après un parcours de 40 m de l'échantillon sur un disque en quartz de 120 mm avec une vitesse de rotation de 120 tr / min sous une charge P de 0,5 kg. La perte de poids par abrasion est réalisée dans un broyeur à boulet de laboratoire. Cette technique consiste à mettre les échantillons à étudier dans un broyeur à boulets avec du sable siliceux pour accentuer le taux d'usure. Le broyeur tourne à une vitesse de 75 tours /min. La perte de matière est mesurée après chaque 5 minute d'intervalle pendant une heure.

### 3. Résultats

L'analyse chimique des boulets en fonte au chrome et des boulets en acier forgé est présentée sur le tableau 1. Il s'agit d'une fonte à 15% de chrome. Les boulets en acier forgé sont en acier XC38. Ce type d'acier est destiné pour le traitement thermique et le forgeage.

Les deux types de boulets ont subi un traitement thermique selon les cycles présentés sur les figure 1 et 2. Les microscopies optique et MEB obtenues sur les surfaces polies des deux boulets étudiés sont présentées sur la figure 3 et 4. La solidification des fontes au chrome se fait selon le diagramme Fe- Cr-C [8, 9,16]. La solidification débute par la germination et croissance de dendrites d'austénite proeutectiques qui évoluent en fonction de la diminution de la température jusqu'à la température eutectique où un agrégat d'austénite et de carbure  $M_7C_3$  donne lieu à la formation d'un eutectique [16,18]. A l'état brut de coulée, selon le diagramme Fe-Cr-C, la fonte de base est constituée d'une matrice austénitique. Le traitement thermique appliqué (trempe à l'air) permet, suite à l'austénitisation, une dissolution des éléments d'alliage. Le refroidissement rapide ne permet pas la diffusion, phénomène thermiquement activé, de se produire. Les atomes de carbone et des éléments d'alliage se trouvent alors piégés à l'intérieur de la maille cristalline de l'austénite qui, sursaturée en carbone, se déforme pour devenir quadratique et contenir le carbone en excès. Il y a donc un cisaillement du réseau cristallin. Après traitement thermique, l'austénite s'appauvrit en élément d'alliage et se transforme en martensite. L'acier forgé présente à l'état brut de coulée une structure constituée de ferrite et de perlite. Après forgeage et le traitement thermique,

les transformations ayant eu lieu rendent la structure mixte (figure 3B).

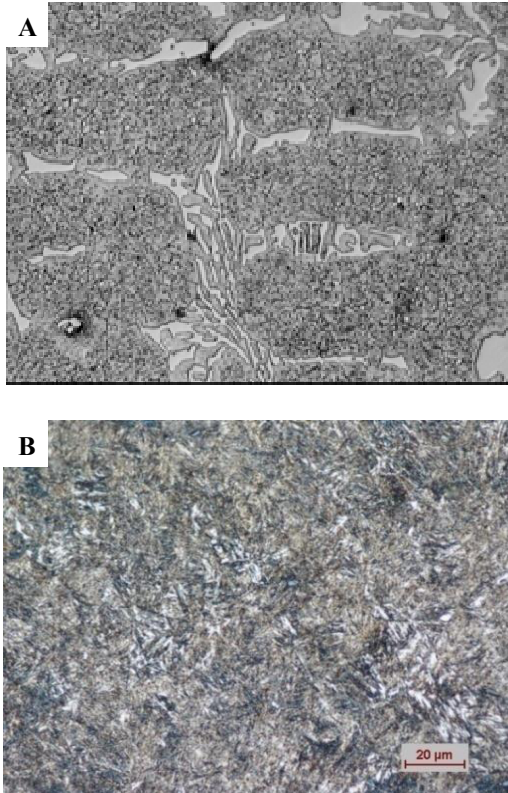


Figure 3 : Micrographies optiques des boulets de broyage :  
A : Moulé ; B : Forgé

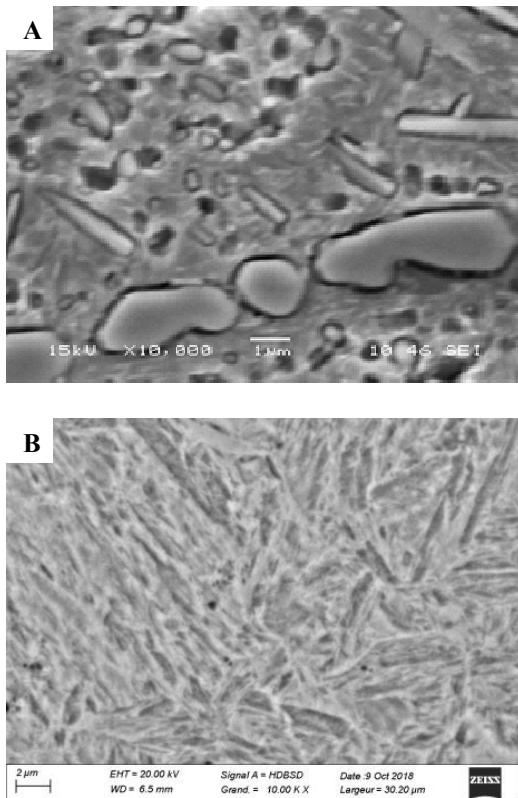


Figure 4: Micrographies MEB des boulets de broyage :  
A : Moulé ; B : Forgé

L'analyse par diffraction X moyennant le logiciel MAUD a permis d'identifier la nature et la proportion des phases existantes dans les deux types de boulets étudiés. Les résultats d'affinement Rietveld sont présentés sur les figures 5 et 6. L'affinement Rietveld des diffractogrammes X enregistrés sur les échantillons montre le type de phases existantes. L'ajustement des diffractogrammes est réalisé selon le modèle isotropique qui permet une caractérisation moyenne des paramètres microstructuraux des échantillons analysés.

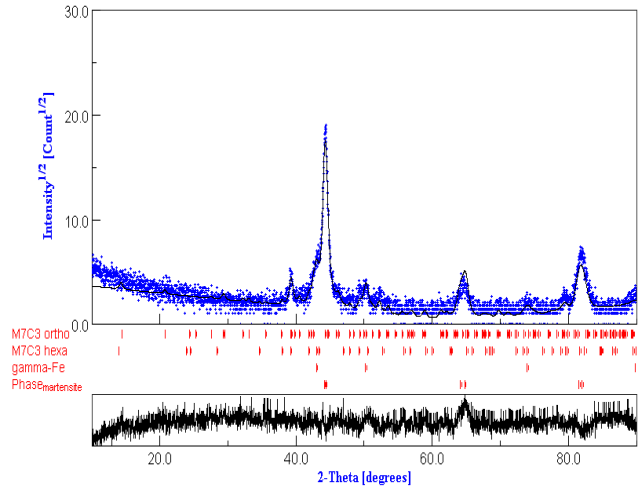


Figure 5 : Affinement Rietveld du diffractogramme X du boulet en fonte au chrome traité

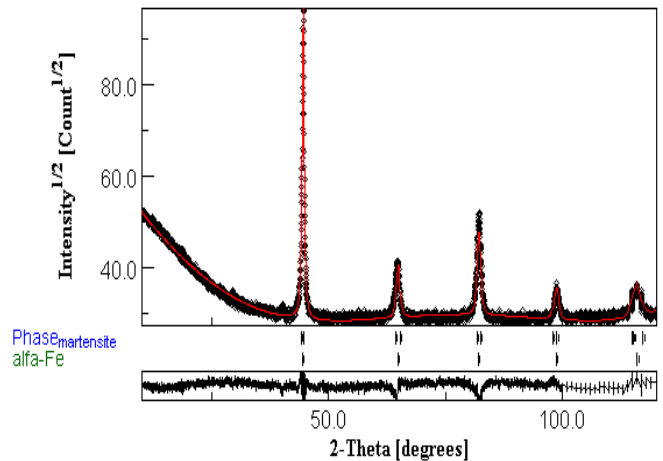


Figure 6. Affinement Rietveld des diffractogrammes X du boulet forgé traité.

La mesure de la micro dureté a été prise sur les échantillons étudiés en balayant la surface de la périphérie vers le centre en choisissant aléatoirement les points de mesure. Par contre, pour les fontes au chrome la mesure de microdureté pour la fonte au chrome, la mesure de microdureté a été effectuée sur des plages de matrice et sur des plages de carbures. Les résultats obtenus sont indiqués sur les figures 7 et 8.

Les microduretés mesurées sur la matrice sont différentes d'une plage à une autre. Ceci révèle une distribution hétérogène des éléments d'alliage dans la microstructure de la fonte. La même remarque peut être faite pour les carbures eutectiques. Ceci veut dire, même si les plages sont de même nature, elles diffèrent du point de vue composition

chimique, traduisant ainsi l'effet de la dissolution des éléments d'alliage dans la matrice et dans les carbures. Les carbures, dans ce cas, ne sont pas de même composition même s'ils sont du même type. Lors de la solidification, les éléments d'alliages distribués d'une manière hétérogène à travers le métal liquide ont tendance à se dissoudre potentiellement dans certains endroits et moins dans d'autres. Partant de cette hypothèse, la seule éventualité pour expliquer la différence dans les valeurs de microdureté est la distribution de ces dernières dans la fonte liquide d'où certains carbures eutectiques type  $M_7C_3$  sont plus chargés en éléments d'alliages par rapport à d'autres. Ceci provoque des différences de microdureté de la phase en question suite à la présence d'éléments d'alliage en quantité plus au moins importante dans son réseau cristallin. Toutes les mesures prises sur des plages de la matrice indiquent qu'il s'agit de la martensite. La dispersion enregistrée sur ces mesures n'est qu'une conséquence d'une hétérogénéité de composition chimique.

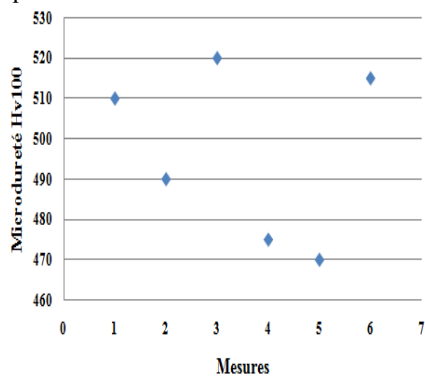


Figure 7 : Microdureté du boulet forgé

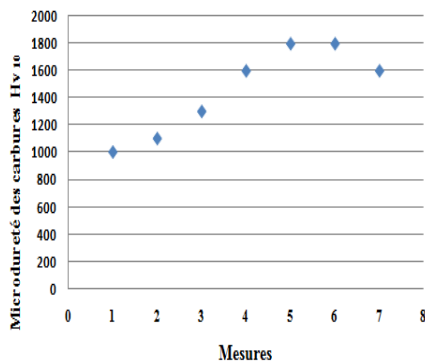
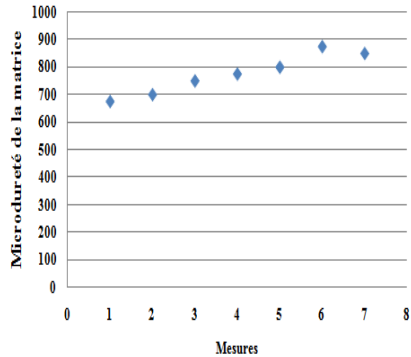


Figure 8 : Valeurs de microdureté des boulets en fonte au chrome

Les résultats de mesure de perte de masse par frottement et par abrasion sont présentés sur la figure 9. Les boulets for-

gés se comportent mieux à l'abrasion qu'au frottement. La microstructure des boulets forgés, comparativement à celle des boulets en fonte au chrome, est homogène car elle constituée uniquement d'une matrice ferrifère constituée de bainite et de martensite par contre la microstructure des boulets en fonte au chrome est constitué d'une matrice à prédominance martensitique et d'un réseau de carbure eutectique de type  $M_7C_3$ . Ces carbures étant très durs, ils cassent facilement en cours de service.

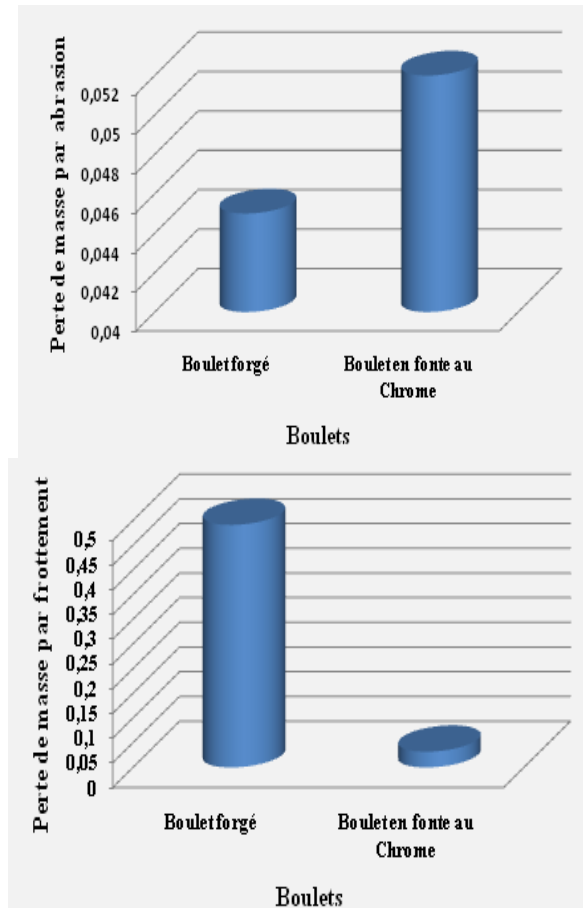


Figure 9: Perte de masse par abrasion et par frottement des boulets en fonte au chrome et des boulets en acier forgé

#### 4. Conclusion

Ce travail a porté sur une étude comparative sur le comportement à l'usure des boulets de broyage en fonte au chrome et des boulets en acier forgé. L'étude a fait ressortir les différences entre ces deux matériaux du point de vue microstructure, type de phases microstructurales, dureté et comportement à l'abrasion et au frottement.

Les boulets en fonte au chrome titrent environ 15% de chrome et 2.31 % de carbone. Ce type de fonte est composition hypoeutectique et se solidifie selon le diagramme Fe-Cr-C. Après traitement thermique cette fonte au chrome présente un structure à dominance martensitique avec la présence d'austénite résiduelle formant une matrice contenue dans un réseau de carbure eutectique du type  $(Cr,Fe)_7C_3$ . Aussi des précipitations secondaires en forme de plaquette et tubulaire sont nettement distribuées d'une manière homogène dans la matrice. Les boulets en acier

forgé, titrent 0.447 %C et environ 0.16 % de chrome. C'est un acier du type XC38 destiné pour le traitement thermique et la forge. Cet acier, après traitement thermique, révèle une microstructure mixte constituée de martensite et de bainite.

Les valeurs de microdureté mesurées sur la fonte au chrome diffèrent du fait qu'elles soient prises sur la matrice ou bien sur les plages de carbure. Elles varient entre 600 et 850 pour la matrice et entre 1000 et 1800 pour les carbures. Par contre les boulets en acier forgé manifestent une microdureté qui varie entre 470 et 520Hv.

Le comportement à l'usure par abrasion et par frottement a montré que la fonte au chrome résiste mieux au frottement qu'à l'abrasion par contre les boulets forgés paraissent plus résistants à l'abrasion.

## 5. Références

- [1] K. H. Zum, G. H. Elidis, Abrasive Wear of White Cast Irons, *Wear* 64 (1980) 175-194.5.
- [2] J. T. H. Pearce, Structure and Wear Performance of Abrasion Resistant Chromium White Cast Iron, *AFS Trans.* 92 (1984) 599-622.
- [3] W. A. Fairhurst, K. Rahrig, Abrasion resistant high chromium cast irons, *Foundry trade J.* 136 (1974) 685-698.
- [4] Manuel des fontes moulées, éditions techniques des industries de la fonderie- Paris 1983.
- [5] J.T.H. Pearce, High chromium cast irons to resist abrasive wear, *The Foundryman*, vol. 95, (2002), pp. 156.
- [6] Tabrett C P. Sare I R. Ghomashchi M R., Microstructure Property Relationships in High Chromium White Iron Alloys *J. Int Mater Rev*, vol. 41, n°2, (1996), pp.59-82.
- [7] J. M. Radzikowska, Metallography and microstructure of cast iron, the foundry research institute, Krakow, Poland - *ASM handbook*, vol. 9, edition 2004.
- [8] F. Maratray, A. Poulion, Austenite retention in high-chromium white irons, *AFS. Trans.* 27-82 (1982) 795-804.
- [9] I. R. Sare, B. K. Arnold, The effect of heat treatment on the gouging abrasion resistance of alloy white cast iron, *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 357-370.
- [10] Bedolla-Jacuinde, Microstructure of vanadium-, niobium- and titanium-alloyed high-chromium white cast irons, *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 13, Issue 6, 2001, Pages 343-361.
- [11] P. S. M. Jena et al., Improvement of toughness of high chromium white cast iron: duplex ferritic-austenitic matrix, *Materials Science and Technology*, Volume 34, Issue 3, 2018, Pages 299-304.
- [12] Mervat Mohamed Ibrahim et al., Enhancement of wear resistance and impact toughness of as cast hypoeutectic high chromium cast iron using niobium, *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 31, Issue 2, 2018, Pages 72-79.
- [13] Bedolla-Jacuinde et al., Boron effect on the precipitation of secondary carbides during destabilization of a high-chromium white iron, *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 29, Issue 1-2, 2016, Pages 55-61.
- [14] <http://maud.radiographema.eu/>
- [15] L. Lutterotti, Maud program, 2000, CPD. Newsletter (IUCr) 24.
- [16] K. Kuyucak, R. Llewellyn, High-chrome white irons incorporating ultra-hard carbide-forming elements for improved wear-resistance, *AFS Transaction*, (2006), pp.1-23.
- [17] *ASM hand book Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, edition ASM international 2005.
- [18] Madeleine Durant-charre, la microstructure des aciers et des fontes, genèse et interprétation, Ed. SIRPE, Paris 2003.