

## **ÉTUDE MÉTALLURGIQUE DU FER BRUT TRADITIONNEL DE BANDJELI**

**P. KPELOU<sup>1,2\*</sup>, G. DJETELI<sup>1</sup>, A. HOUNSI<sup>1</sup>, K. NAPO<sup>1</sup> et T. A. ABOKI<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Labratoire sur l'Energie Solaire- Chaire UNESCO des énergies renouvelables-Université de Lomé-TOGO, BP : 1515-Lomé*

*<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris- Laboratoire de Physicochimie des Surfaces (LPCS)-Groupe de Métallurgie Structurale (GMS) – UMR7045*

---

\* Correspondance, e-mail : [pkpelou@yahoo.fr](mailto:pkpelou@yahoo.fr)

### **RÉSUMÉ**

Cet article présente l'étude microstructurale et mécanique de fer brut traditionnel de Bandjeli. Les fondeurs de ce village de la préfecture de Bassar au Togo, avaient mis sur pied une technique de réduction directe du minerai de fer dans un bas fourneau à convection naturelle. Ils obtenaient une loupe qu'il fallait forger pour élaborer des outils aratoires. Ils produisaient après 48 heures, 12 kg de loupe de fer à partir de 35 kg de minerai de fer et de 100 kg de charbon de bois. Les études microstructurales et mécaniques montrent que le fer brut traditionnel (FBT) de Bandjeli est inhomogène. Il contient des bulles allongées, des pores de grande taille et des inclusions non métalliques. Le FBT a une microstructure de type Widmannstätten, une dureté de 175-230 Hv<sub>0,3</sub> et contient un taux de C inférieur à 1%.

**Mots-clés :** *élaboration traditionnelle du fer, bas fourneau à convection naturelle.*

### **ABSTRACT**

#### **Metallurgical examination of Bandjeli's traditional iron**

This paper presents the mechanical and microstructural study of traditional iron from Bandjeli. The iron smelters of this village in the prefecture of Bassar in Togo had developed a technique for direct reduction of iron ore in a natural draft furnace. They got a lump that was forged to develop agricultural tools. They produced after 48 hours 12 kg of iron ingot from 35 kg of iron ore and 100 kg of charcoal. The microstructural and mechanical studies show that this traditional iron (FBT) is inhomogeneous. It contains elongated bubbles, large pores and nonmetallic inclusions. The FBT has a

Widmannstätten microstructure, a hardness of 175-230 Hv<sub>0,3</sub> and C contains less than 1% wt.

**Keywords:** *traditional ironmaking, natural draft furnace.*

## I - INTRODUCTION

Le fer est l'un des métaux dont l'élaboration a fortement influencé l'histoire de l'humanité. Les techniques de production du fer sont passées de la méthode directe utilisant un bas fourneau et du charbon de bois [1] au procédé indirect fonctionnant à base du haut fourneau et le coke plus adapté à la production de masse.

L'histoire de la sidérurgie du fer en Afrique de l'Ouest couvre une vaste période allant de deux à trois siècles av. J.C jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle [2 - 3]. Les sites les plus anciens sont Taruga, Jos, Méma et le massif de Termit [4]. Toutes les techniques de production du fer découvertes dans ces sites sont de nature directe [2-5]. Il est de même du site de Bandjeli au Togo où la sidérurgie a pris fin tardivement en 1950 [3]. Il y existe des bas fourneaux actuellement fonctionnels [3,6]. Ce site revêt une importance capitale dans l'étude et la compréhension de la métallurgie du fer en Afrique. En Europe, si des études scientifiques retracent l'évolution de l'industrie du fer, en Afrique par contre, les rares études ont pour objet l'impact de la métallurgie du fer sur l'organisation de la société [7].

De nombreux travaux montrent qu'il était impossible de produire de l'acier dans un bas fourneau mais, les travaux récents de HAHN à Bandjeli tendent à prouver le contraire [1,3]. La sidérurgie de Bandjeli emploie un bas fourneau à convection naturelle et utilise du charbon de bois comme combustible. Ce type de bas fourneau n'a été découvert qu'en Afrique et particulièrement à Bandjeli au Togo [3,6]. Les fondeurs de ce village Bassar produisaient au début du XX<sup>e</sup> siècle environ 200 tonnes de loupe de fer forgeable par an [3,6]. Les cultivateurs ayant utilisés les outils aratoires fabriqués à partir de ce fer ont témoigné que ceux-ci présentent de meilleures propriétés mécaniques que ceux forgés avec la ferraille d'importation.

Malheureusement aucune étude scientifique permettant de relier les propriétés physico-chimiques de la loupe de fer aux processus de réduction à travers les étages du bas fourneau n'a été entreprise. L'objectif de ce papier est de déterminer les caractéristiques microstructurales et mécaniques de loupes de fer issu de cette technique d'élaboration de Bandjeli afin de juger de son efficacité métallurgique (qualité de l'acier) voire écologique et

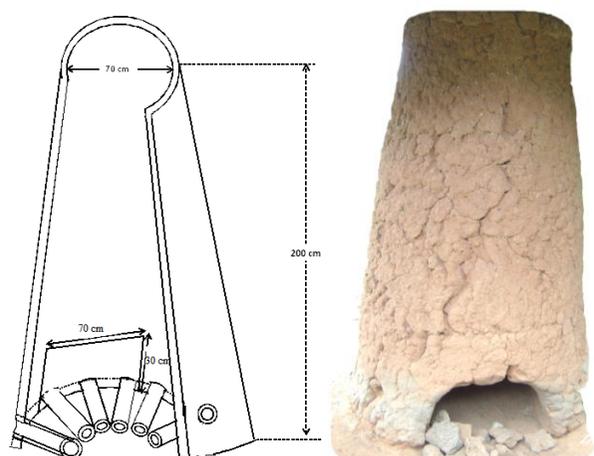
économique. Elle pourrait potentiellement avoir un impact important sur l'industrie de l'acier en général.

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

### II-1. Technique d'élaboration du fer brut traditionnel de Bandjeli

#### II-1-1. Dimension et profile du bas fourneau

Le bas fourneau de Bandjeli comporte à sa base une ouverture dont la hauteur est de 30 cm et la largeur de 70 cm environ (*Figure 1*). A une hauteur de 30 cm du niveau du sol sont percés une douzaine de trous circulaires de 3 cm de diamètre: ce sont les tuyères servant à l'aération du fourneau (*Figure 1*).

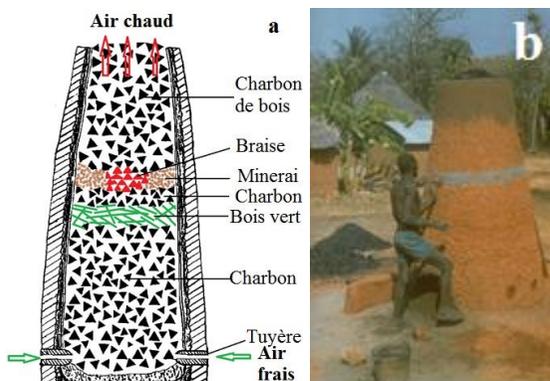


**Figure 1** : Coupe schématique et photo du bas fourneau

#### II-1-2. Chargement du bas fourneau et processus de réduction

Le chargement du bas fourneau se fait en couches alternées (*Figure 2a*). Au total le bas fourneau est chargé de 108 kg de charbons de bois et 35 kg de minerai concassé (*Figure 2b*).

Le bas fourneau ainsi chargé est mis en feu. L'air chaud s'échappe par le sommet et naturellement l'air frais entre par les tuyères : cette convection naturelle assure l'aération du bas fourneau et entretient la combustion (*Figure 2a*).



**Figure 2** : Coupe schématique (a) et photo (b) du bas fourneau chargé

Après 48 heures, on ouvre la porte du bas fourneau et on extrait la loupe de fer pesant en moyenne 12 kg (**Figure 3**)



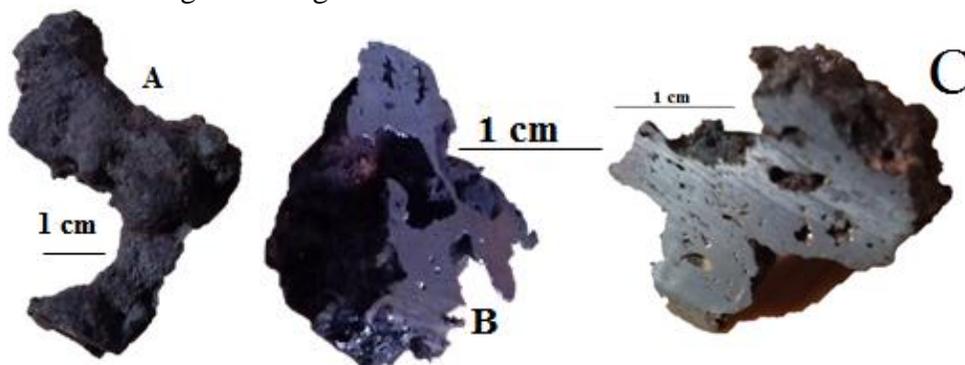
**Figure 3** : Extraction (a) et photo de la loupe de fer brut (b)

### **II-1-3. Traitement des échantillons et techniques de caractérisation**

Trois morceaux de loupe de fer brut issus de trois loupes différentes élaborés par la méthode décrite ci-dessus ont été soumis aux analyses (**Figures 4a, b et c**). Trois échantillons ont été découpés de chacun des trois morceaux de loupe de fer de Bandjeli : on obtient un total de neuf échantillons de fer brut. Ces échantillons ont été ensuite polis, nettoyés avec du méthanol, séchés à l'air comprimé puis attaqués chimiquement au nital 3% et enfin, observés au microscope optique pour déterminer leur microstructure.

Un échantillon de fer brut découpé de chaque morceau de loupe a été laminé à froid. D'autres échantillons prélevés des mêmes morceaux sont traités

thermiquement entre 600 et 1100°C pendant deux heures et trempés ou laminés à chaud. Tous ces échantillons sont observés au microscope optique après une attaque chimique au nital 3%. Ils sont ensuite soumis à la diffraction des Rayons X pour déterminer leur structure cristalline et enfin leur dureté Vickers a été mesurée à l'aide d'un microduremètre MHT-200 sous une charge de 300 g.



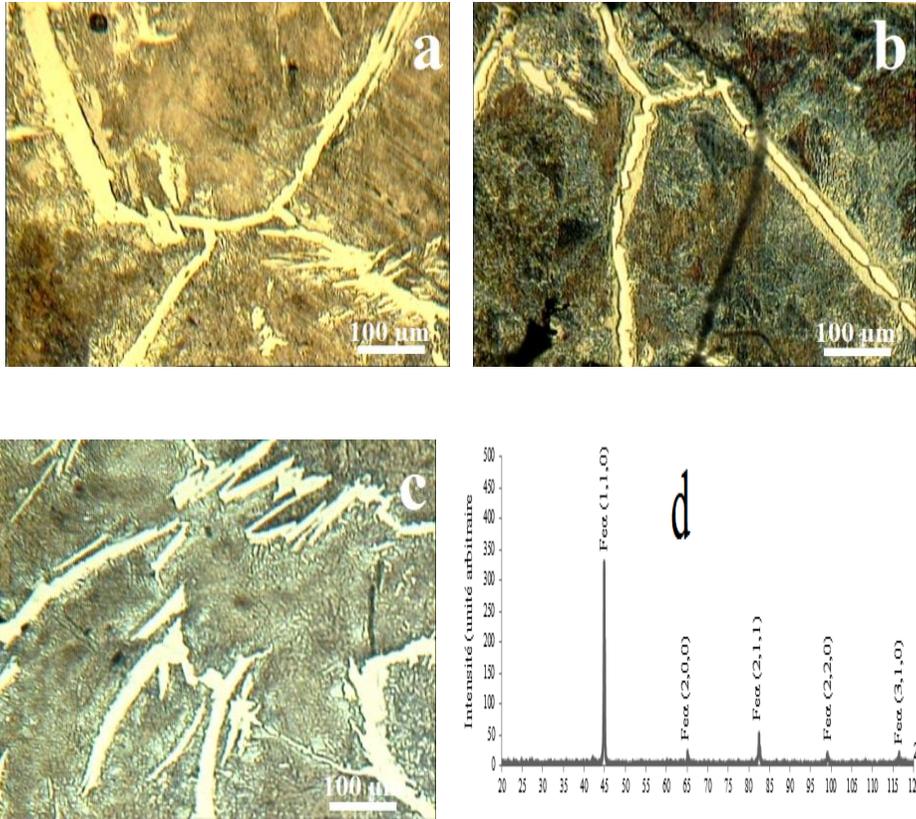
**Figure 4** : Morceaux de loupe de fer traditionnel brut après découpe

### III - RÉSULTATS

#### III-1. Fer brut traditionnel

Les *Figures 4a, 4b et 4c* montrent les images des morceaux de fer brut traditionnel utilisés lors de notre étude. Après découpe, on observe une surface métallique brillante (*Figures 4b et 4c*) comportant des pores et des bulles allongées. Après l'attaque chimique, on observe une microstructure formée de graines allongées de ferrite dans une matrice de perlite (*Figures 5a, 5b et 5c*). Cette microstructure est de type Widmannstätten. Le matériau présente de nombreuses inclusions et des bulles.

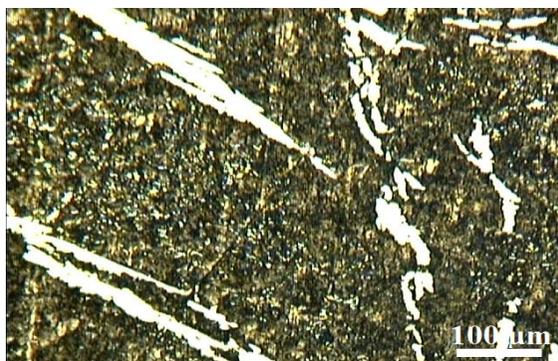
La diffraction des rayons X sur le fer brut montre des pics caractéristiques de la ferrite ou fer  $\alpha$  (*Figure 5.d*).



**Figure 5** : Micrographies optiques du brut après attaque chimique (a, b et c) ; digramme de diffraction des rayons X du fer brut (d)

### III-2. Fer brut laminé à froid

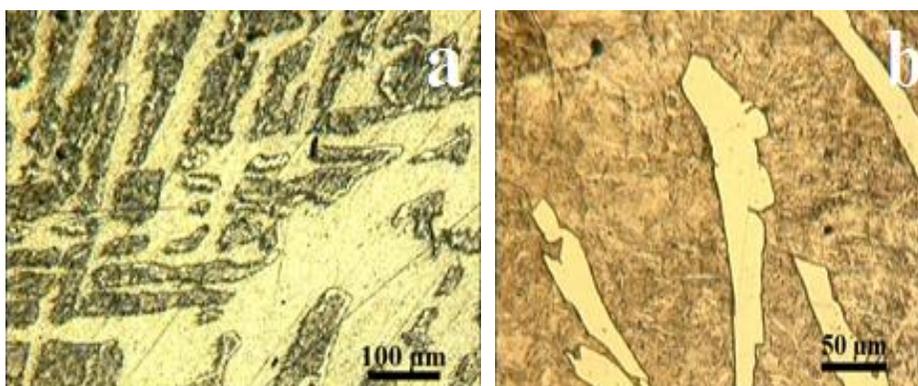
La **Figure 6** représente la microstructure du fer brut laminé à froid : le taux de laminage est de 24%. Elle est formée d'une matrice de perlite contenant des grains allongés de ferrite. On note la disparition de la structure de type Widmannstätten. La dureté moyenne du fer brut laminé à froid est de 272 Hv alors que celle du fer brut duquel il est découpé est de 175 Hv. La matrice perlitique plus dur est écrouie ce qui se traduit par la valeur plus grande de la dureté du brut laminé.

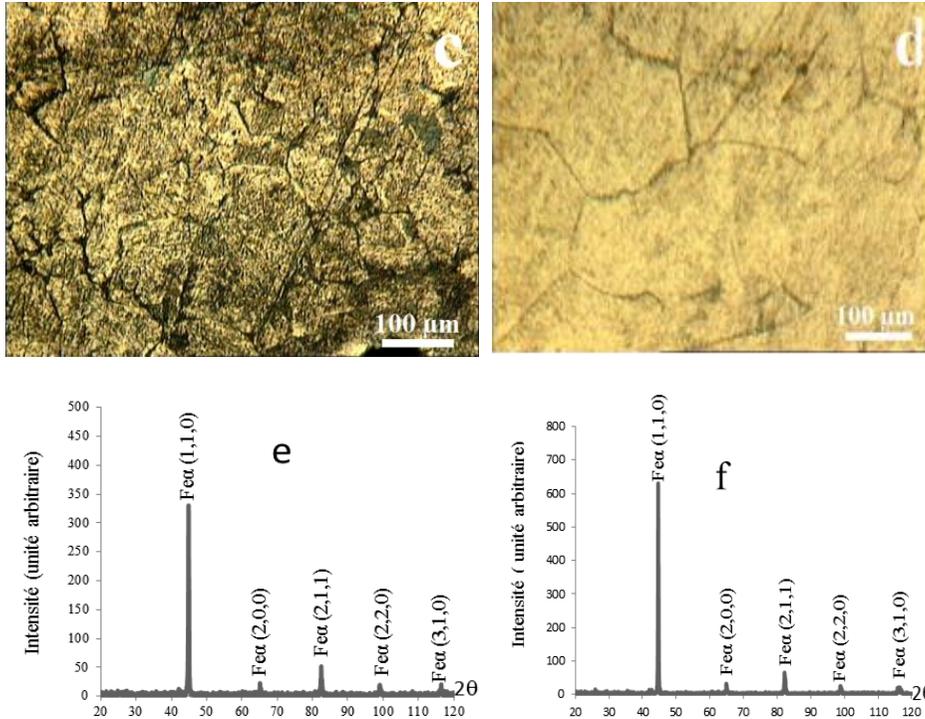


**Figure 6 :** Micrographie optique du fer brut laminé à froid

### III-3. Fer brut recuit et trempé

La **Figure 7a** montre la micrographie optique du fer brut recuit à 600°C. On remarque que la microstructure n'a pas beaucoup évolué. On observe cependant une croissance des grains de ferrite : le recuit à 600°C aurait entraîné une décarburation du moins proche des bords. Le recuit à 800°C a transformé la matrice perlitique en martensite après la trempe (**Figure 7b**). On y remarque la persistance des grains de ferrite. Les recuits à 950°C et 1100°C (**Figures 7c et 7d**) donnent après la trempe une structure aciculaire (**Figure 7d**). Les diagrammes de diffraction des rayons X du fer brut recuit à 800 et 1100°C (**Figures 7e et 7f**) mettent également en évidence des pics caractérisant exclusivement le fer  $\alpha$  : le fer brut de Bandjeli contient une forte proportion de ferrite.

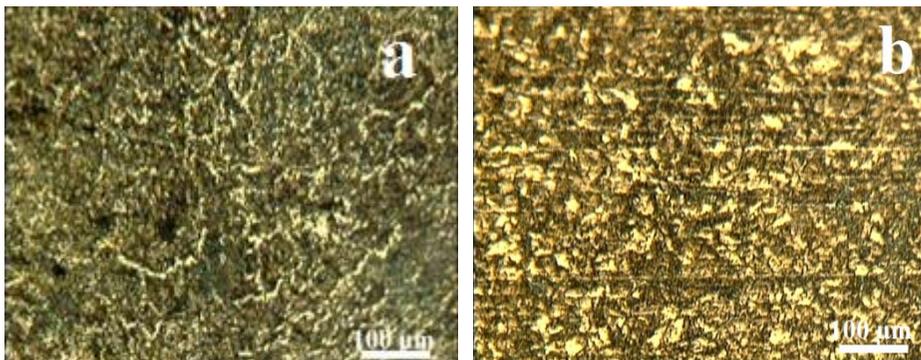


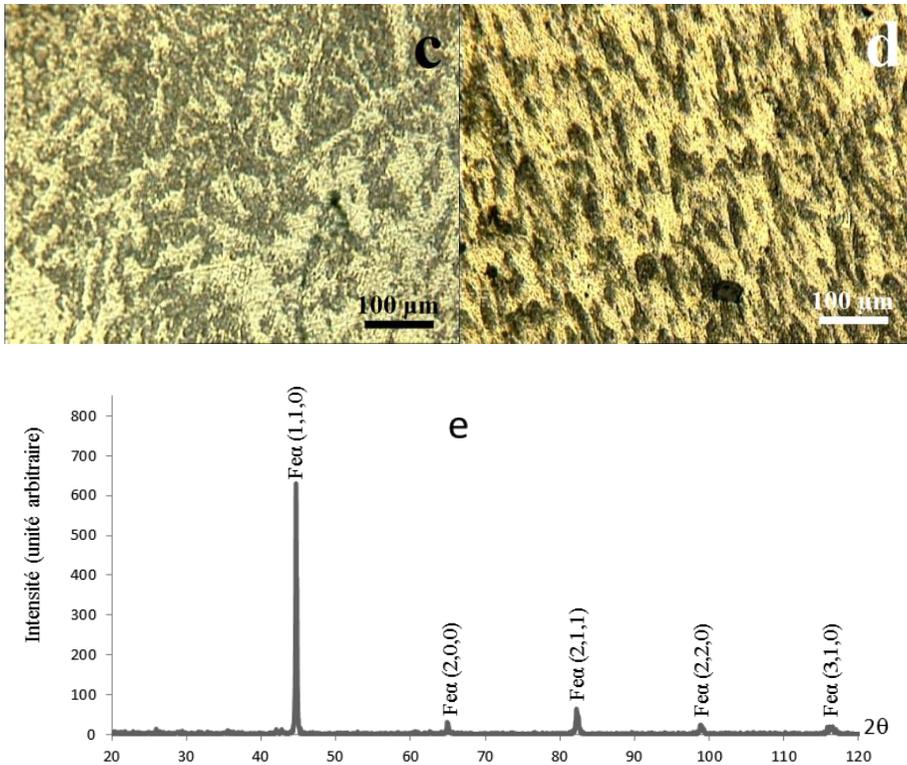


**Figure 7 :** Micrographie optique du brut recuit à 600°C (a), 800°C (b), 950°C (c), 1100°C (d) ; diagrammes de diffraction des rayons X du brut recuit à 800°C (e) et à 1100°C (f).

### III-4. Fer brut recuit et laminé

Le laminage rend la microstructure des échantillons traités à 600°C et 800°C beaucoup plus homogène (*Figures 8a et 8b*). Pour les échantillons traités à 950°C et 1100°C, après le laminage on observe des grains allongés : c'est l'effet de l'écroutissage (*Figures 8c et 8d*).



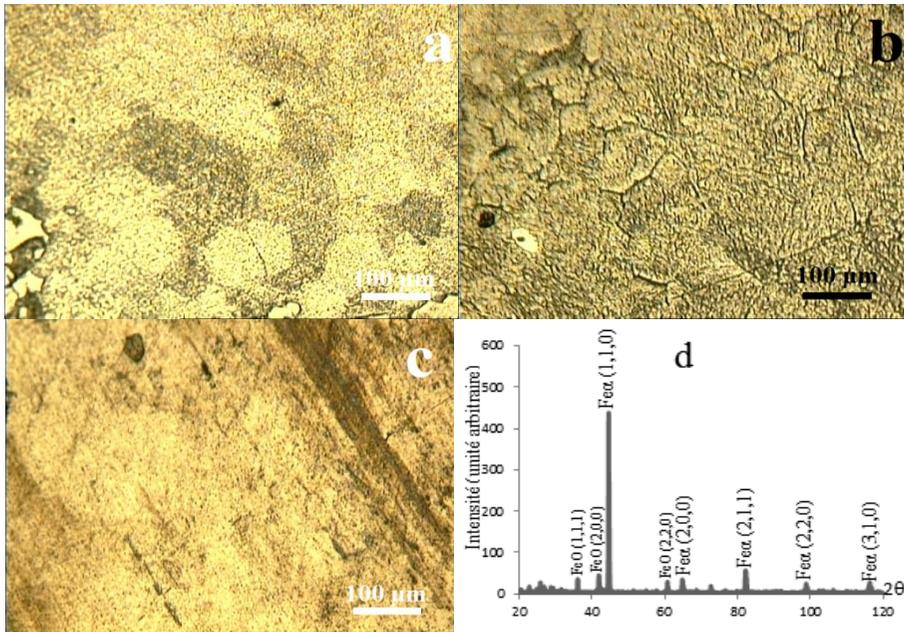


**Figure 8 :** Micrographie optique du brut recuit à 600°C (a), 800°C (b), 950°C (c), 1100°C (d) et laminé ; digramme de diffraction des rayons X (e) de (d)

Le diagramme de diffraction des rayons X du fer brut recuit à 1100°C et laminé à chaud montre une fois de plus les pics caractéristiques de la ferrite (*Figure 8e*).

### III-5. Lames de fer brut recuites et trempées

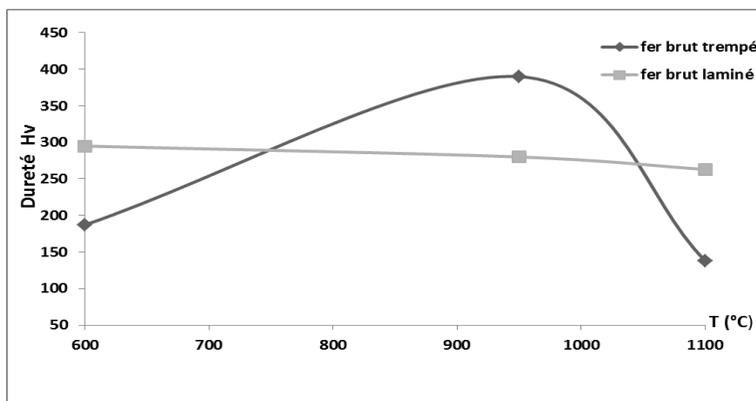
Le recuit des lames entraîne la restauration des grains et de la structure aciculaire (*Figure 9b*). Le diagramme de diffraction des rayons X de la lame recuite à 1100°C et trempée met non seulement en évidence les pics caractéristiques de la ferrite mais aussi des pics correspondants à l'oxyde de fer (FeO) (*Figure 9d*). La présence de cet oxyde serait due à l'oxydation superficielle à haute température des échantillons par le dioxygène présent dans l'atmosphère du four.



**Figure 9 :** Micrographies optiques des lames recuites à 800°C (a), 950°C (b), 1100°C (c), et trempées ; diagramme de diffraction des rayons X de (c) (d).

### III-6. Mesure de dureté Vickers

La dureté du fer brut varie de 175 à 230 Hv. Pour le brut recuit et trempé, la dureté la plus élevée est obtenue pour la température de 950°C (**Figure 10**). On remarque pour le brut laminé et les lames recuites et trempées que la dureté décroît en fonction de la température de traitement.



**Figure 10 :** Dureté Vickers des échantillons traités thermiquement

#### IV - DISCUSSION

Les résultats de ces analyses montrent que le fer brut de Bandjeli a une microstructure biphasée de type Widmannstätten. Le matériau présente de nombreuses inclusions et des bulles. Les traitements thermiques et laminage rendent la microstructure plus homogène mais on remarque cependant la présence des inclusions. La formation de la structure aciculaire par trempe, ne peut être constitutive de la martensite car sa dureté est inférieure à celle de la martensite, de l'écroutissage et la régénération des grains après les traitements thermiques du brut laminé montrent que le fer brut de Bandjeli serait de l'acier contenant des phases ou des zones riches en carbone. La structure de type Widmannstätten, la dureté de 175-230 Hv<sub>0,3</sub> et la possibilité de laminage à froid (du moins pour les taux de laminage inférieurs à 24%) du fer brut permettent de conclure que le fer brut de Bandjeli est de l'acier faiblement carburé contrairement au produit obtenu par les autres techniques anciennes [1].

#### V - CONCLUSION

Le présent travail visait la caractérisation du fer brut obtenu par la technique traditionnelle d'élaboration du fer par les fondeurs du village de Bandjeli au nord du Togo. Les résultats de nos analyses montrent que le fer brut traditionnel de Bandjeli est inhomogène. Il contient des inclusions non métalliques et des pores de grande taille. Il a une microstructure de type Widmannstätten et une dureté de 175-230 Hv<sub>0,3</sub>. Le fer brut de Bandjeli est donc de l'acier contenant un taux de carbone inférieur à 1%. Ce résultat montre donc que la technique d'élaboration du fer de Bandjeli est performante du point de vue métallurgique.

#### RÉFÉRENCES

- [1] - The late N. YAMAGUCHI, ISIJ Int, Vol. 37 No. 2, (1997), pp. 97-101.
- [2] - Tylecote R. F., *West African Journal of Archaeology* 5: 1975, 1-9
- [3] - Hans Peter HAHN, Techniques de la métallurgie du fer au nord Togo Collection « Patrimoines » n°6, Presse de l'UB, Lomé 1997.
- [4] - Tylecote R. F., *Journal of the historical Metallurgy society*, IX (1975) 49-56
- [5] - Bellemy, C.V. JISI 56, 1904, p.99-126
- [6] - De Barros Philipp, *The Bassar: Large scale Iron producers of the West African savannas*, 1985,
- [7] - Élisée Coulibaly, Savoirs et savoir-faire des anciens métallurgistes d'Afrique Occidentale, Éditions KARTHALA 2006.