## Chapitre IV Résultats et interprétations

#### IV.1 Introduction:

Il est connu que les aciers à basse teneur en carbone possèdent une bonne aptitude à la mise en forme (bonne ductilité). Le laminage est un procédé de mise en forme qui est utilisé comme un procédé de fabrication des tôles minces, où le durcissement des tôles d'acier augmente avec le taux de déformation. Les échantillons d'acier ont été laminés à chaud jusqu'à un taux de déformation de 80% dans un temps de maintien variantes jusqu'à 10 min (chap. III, tableau5). Cette déformation entraîne d'importantes modifications de la microstructure.

Dans ce chapitre, on présente les résultats des traitements thermomécaniques appliqués à notre acier et ce-ci à partir de l'état de réception (non déformé).

## IV.2 Traitements thermomécaniques de l'acier 0.19%C:

#### IV.2.1 Microstructure initiale de l'acier 0.19%C (état non déformé) :

Le produit de départ est un tôle d'acier de 2.65 mm d'épaisseur (chap. III, paragraphe II) et est un acier hypoeutectoide (C≤0.8%) de structure ferréto-perlitique avec des grains ferritique gros de taille moyenne de 22µm (Fig.46). La ferrite, constituant majeur est une solution solide de carbone dans le ferα, cristallisant dans le système cubique centré. La cémentite est un composé défini Fe₃C (carbure de fer) qui cristallise dans le système orthorhombique. La perlite constituant de notre acier est sous forme lamellaire (Fig.46).

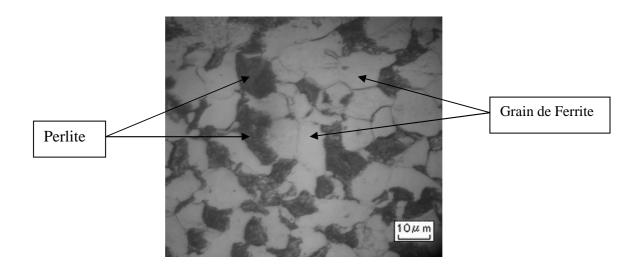


Figure 46 : Microstructure de l'acier 0.19%C non déformé (état initial).

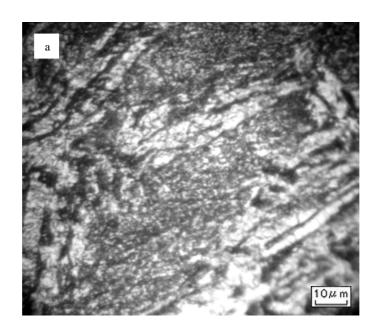
## IV.2.2 Evolution de la microstructure de l'acier 0.19%C au cours de la déformation à chaud

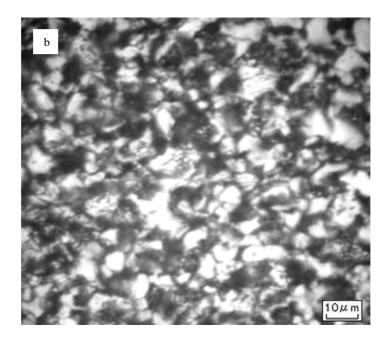
### IV.2.2.1 L'effet de temps de maintien sur la taille des grains de l'acier 0.19%C :

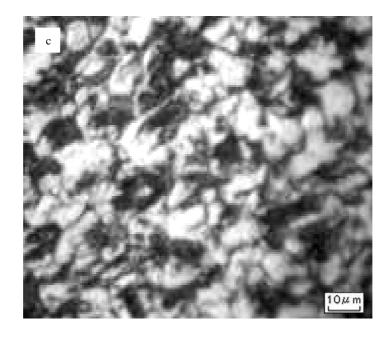
Dans cette partie de notre travail, on a suivi l'évolution de la taille des grains sur la tôle d'acier hypoeutectoide (0.19%C) au cours d'un temps de maintien à 950°C après une homogénéisation à 1150°C pendant 12 min puis une déformation à 950°C avec  $\varepsilon = 45\%$ .

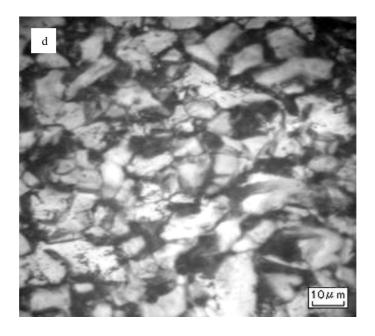
Les résultats obtenus montrent d'une part que le temps de maintien a une influence notable sur la taille des grains obtenus dans notre acier où est le prolongement de la durée de recuit à 950°C a conduit à une croissance anormale des grains par migration des joins de grains (recristallisation secondaire) car a haute température les longs durées de maintien donnent néanmoins des grains sensiblement plus gros [36], par contre pour les courts temps de maintien, les grains sont plus petits (recristallisation primaire).

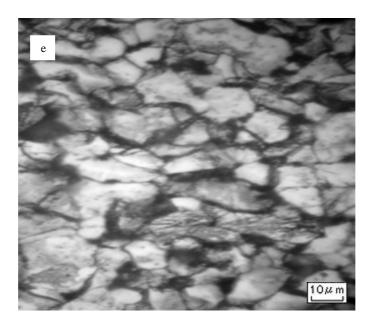
La figure 47 montre l'évolution microstructurale de l'acier 0.19%C au cours de ce dernier traitement. On observe que la taille des grains est plus petite et leur nombre est plus important pour les courts temps de maintien 0.25, 1 et 2min (recristallisation primaire) (Fig47 a-b-c.). Par contre le maintien pour un temps de 5 et 10min, on remarque un phénomène de croissance progressive des grains déjà recristallisés au premier stade de recuit (recristallisation secondaire) (Fig47 d-e.) car les température élevées conduisent à une croissance relativement rapide des grains recristallisés.





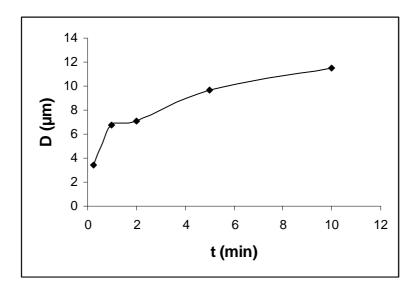






**Figure 47**: Microstructures de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivie d'une déformation ε =45% à 950°C maintenu à cette même température pendant (a) : 0.25min, (b) : 1min, (c) : 2min, (d) : 5min, (e) : 10min et enfin refroidi à l'air.

La figure 48 illustre l'évolution de la taille des grains en fonction du temps de maintien a 950°C pour l'acier déformé de 45%, on remarque que la taille des grains est augmente avec l'augmentation de temps de maintient parce que on a un phénomène de croissance progressive des grains recristallisés.



**Figure 48** : La taille moyenne des grains en fonction du temps de maintien a 950°C pour 1'acier 0.19%C déformé de 45% à cette même température

## IV.2.2.2 L'effet de taux de déformation sur la taille des grains recristallisés de l'acier 0.19%C :

Dans cette partie d'étude, on a essayé de voir l'effet de taux de déformation à chaud appliqué sur la taille des grains de notre acier (0.19%C). Pour ce la nous avons procédé à un traitement d'homogénéisation à 1150°C pendant 12 min suivie par une déformation à 950°C avec des taux différents (45, 60 et 80%) au cours de temps de maintien variant (0.25, 1, 2, 5, 10min) de même température suivi d'un refroidissement à l'air.

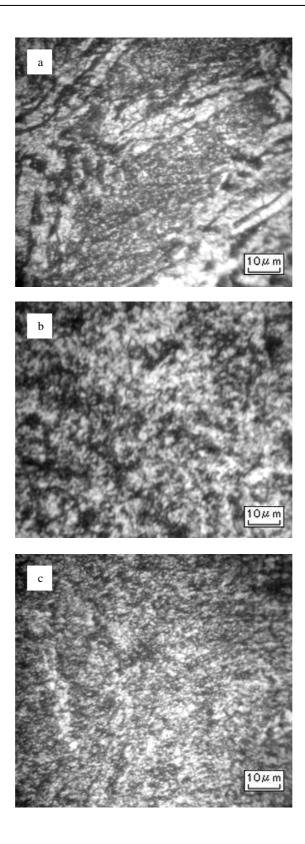
L'observation au microscope optique métallographique montre que le taux de déformation a une grande influence remarquable sur la taille des grains obtenus au cours du maintien à 950°C (Fig49, 50, 51, 52,53.).

Le suivi de l'évolution structurale a montré d'une part que le déformation à chaud à 950°C et suivi d'un maintien à cette même température provoque la formation de nouveau petits grains ferritiques avec des distributions de tailles hétérogènes surtout pour le maintien à 0.25min et ceci pour toutes les taux de déformation (45, 60 et 80%) (Fig49 a – 50b.).

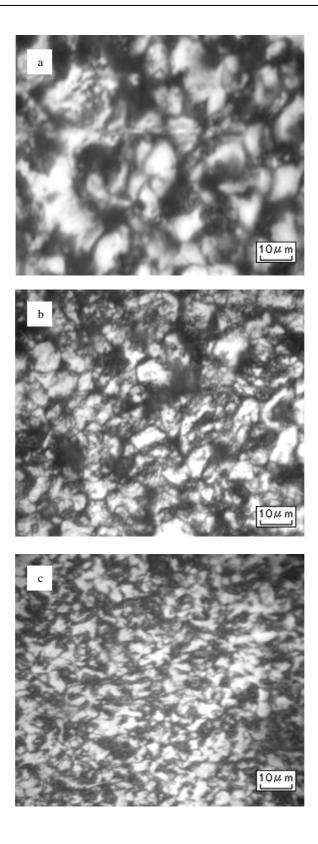
Ce résultat est en raccord avec les différents travaux et théories sur la recristallisation, car une forte déformation plastique conduit à une grande énergie stockée dans les échantillons d'acier par intermédiaire d'un nombre important de dislocation.

Ces dernières structures se développent d'une manière homogène avec le prolongement du temps de maintien (Fig49, 50, 51, 52,53 a).

On a constaté aussi que la taille des grains recristallisés d'échantillon d'acier fortement déformé (80%) est plus fine par apport à l'autre moyenne déformé (60%), et cette dernière est plus fine par apport au échantillon faiblement déformé (45%) dans tous les temps de maintien par ce que le nombre de site favorable à la germination des nouveaux grains augmente avec l'augmentation de taux de déformation[38](Fig.49, 50, 51, 52, 53.), c'est-à-dire plus le taux de déformation augmente plus la taille des grains est petite.



**Figure 49** : Microstructures de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à  $1150^{\circ}$ C suivie d'une déformation  $\epsilon$  à  $950^{\circ}$ C maintenu à cette même température pendant 0.25min, et enfin refroidi à l'air. (a) : 45%, (b) : 60%, (c) : 80%



**Figure 50**: Microstructures de l'acier 0.19% homogénéisé à 1150°C pendant 12 min puis réduit par déformation plastique : (a) : 45%, (b) : 60%, (c) : 80% à 950°C et maintenu à cette même température pendant 1min et enfin refroidissement à l'air.

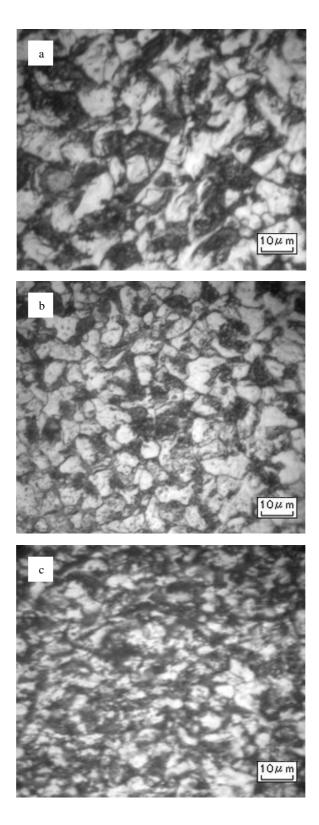


Figure 51 : Microstructures de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivie d'une déformation  $\epsilon$  à 950°C maintenu à cette même température pendant 2min, et enfin refroidi à l'air. (a) : 45%, (b) : 60%, (c) : 80%

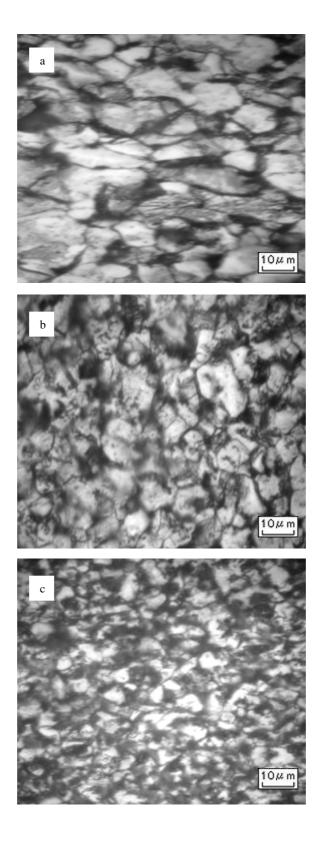


Figure 52 : Microstructures de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivie d'une déformation  $\epsilon$  à 950°C maintenu à cette même température pendant 5min, et enfin refroidi à l'air. (a) : 45%, (b) : 60%, (c) : 80%

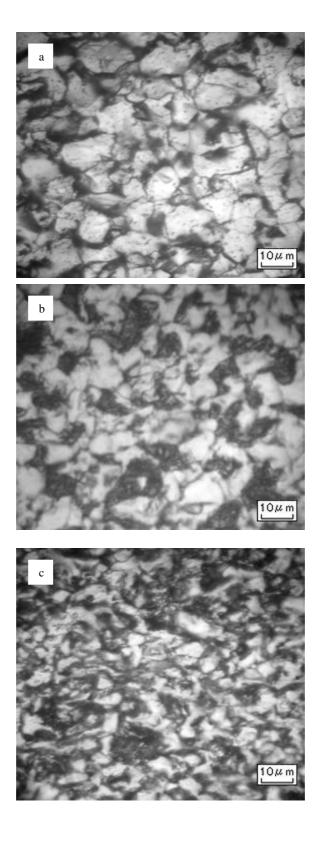
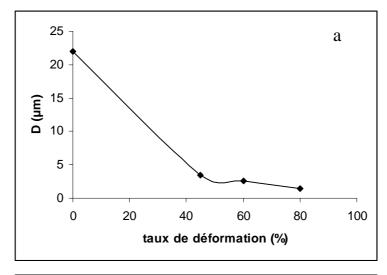
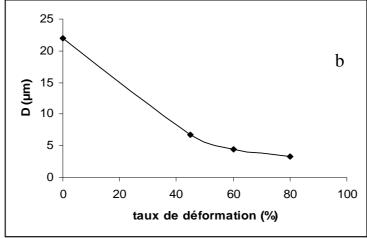
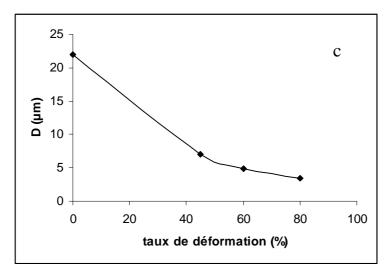


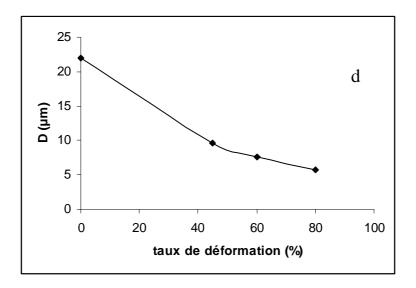
Figure 53 : Microstructures de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivie d'une déformation  $\epsilon$  à 950°C maintenu à cette même température pendant 10min, et enfin refroidi à l'air. (a) : 45%, (b) : 60%, (c) : 80%

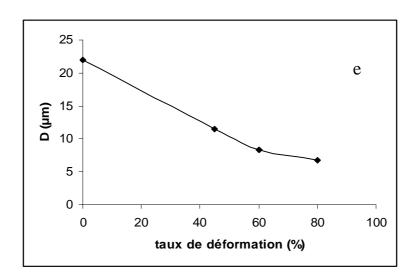
L'évolution de la taille de grains lors de maintien à 950°C en fonction du taux de réduction par laminage est illustrée dans les figures 54, on observe que la taille des grains diminués avec l'augmentation de taux de déformation car le nombre de site favorable à la germination des nouveaux grains augmente avec l'augmentation de taux de déformation.











**Figure 54** :L'évolution de la taille des grains en fonction du taux de déformation de l'acier 0.19%C lors des maintiens varient à 950°C

(a): 0.25min, (b): 1min, (c): 2min, (d): 5min et (e): 10min

#### IV.2.2.3 L'effet de vitesse de refroidissement sur la taille des grains de l'acier 0.19%C :

Le refroidissement constitue l'étape du laminage la plus importante du point de vue des traitements thermomécaniques. Le refroidissement s'accompagne d'une transformation allotropique dont le résultat, en termes de nature, de proportion et de taille des phases finales, est fortement influencé par de nombreux paramètres qu'ils soient thermiques, structuraux ou analytiques. C'est au niveau du refroidissement que la souplesse des outils est la plus grande, au moins dans le cas des produits plats.

Pour notre acier, nous allons d'écrire l'évolution de la structure au cours de refroidissement de notre échantillon. La figure 55 montres que plus la vitesse de refroidissement est élevée, plus les grains ferritiques sont fins.

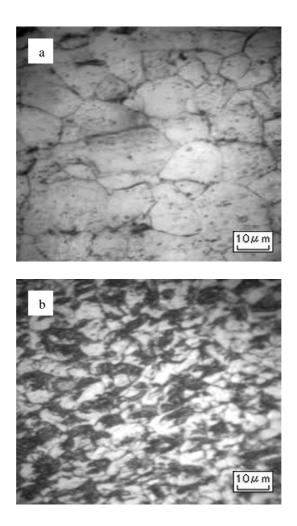


Figure 55 : Microstructure de l'acier 0.19%C après homogénéisation à  $1150^{\circ}C$  pendant 12min puis  $\epsilon=45\%$  à  $950^{\circ}C$  suivi d'un temps de maintien de 2min et enfin refroidi lent : (a) : lentement dans le four (avec  $V_{ref}=10^{\circ}C/min$ ) et (b) : à l'air

## IV.3 Etude comparative

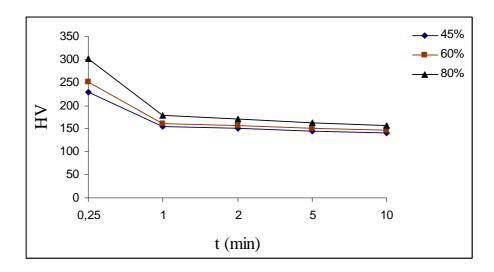
#### IV.3.1 La microdureté

#### IV.3.1.1 Variation de la dureté de Vickers en fonction de temps de maintien :

Pour déterminer les cinétiques de recristallisation, des échantillons de notre acier, déformés et recuits à 950°C pendant des temps de maintiens compris entre 0.25min et 10min, ont été caractérisés par microdureté Vickers. Nous rappelons que les mesures ont été réalisées, pour les différents temps de maintien, pour chaque échantillon, où 6 empreintes espacées ont été relevées.

La figure 56 montre la dépendance de la moyenne la dureté de Vickers (HV) et le temps de recuit (t). On Remarque que La dureté chute après les premiers temps de recuit [0.25-1 min] pour tout les taux de déformation, cette dureté diminue progressivement avec l'augmentation du temps de recuit (Fig.56). Il est connu que le fer  $\alpha$  est caractérisé par un réarrangement facile des dislocation lors de la restauration, c'est pourquoi, nous constatons dans notre échantillon déformé une chute de dureté lors des premières minutes des recuits [0.25-1 min].

La courbe d'évolution de la dureté lors de temps de recuit confirment bien le retour à l'état ductile après 1 minute de recuit du notre échantillon cette évolution est en raccord avec le changement structural (stade de restauration), c'est-à-dire avec la variation de la taille des grains (augmentation de la taille des grains).

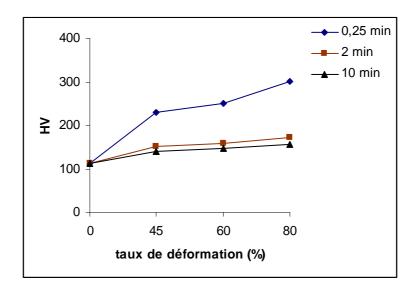


**Figure 56**: Courbe de variation de la dureté Vickers en fonction de temps de maintien de l'acier 0.19% homogénéisé à1150°C pendant 12min puis réduit par déformation plastique à 950°C suivi par un temps de maintien varient, et enfin refroidissement à l'air.

#### IV.3.1.2 Variation de la dureté en fonction de taux de déformation :

L'évolution de la dureté d'un échantillon d'acier 0.19%C en fonction de taux de déformation par laminage à chaud puis maintien de 0.25min, 2min et 10min à 950°C représentée sur la figure 57. On remarque que la dureté augmente avec la déformation (£ %). Ce phénomène est appelé durcissement par écrouissage durant lequel des dislocations sont introduites lors de la déformation plastique par laminage. De même, on peut attribué ce phénomène à la réduction de la taille des grains.

Dans les aciers à bas pourcentage de carbone, le durcissement des tôles d'acier avec le taux de déformation par laminage est lié d'une part' a la diminution de la taille de grains ferritiques et la distance interlamellaire des lamelles perlitiques et d'autre part, à l'interaction des dislocation avec la structure.



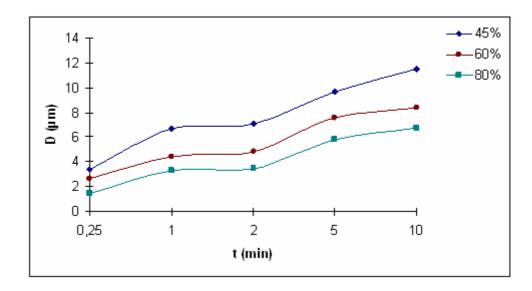
**Figure 57**: Courbe de variation de dureté de Vickers en fonction de taux de déformation de l'acier 0.19%C homogénéisé à1150°C 12min puis réduit par déformation plastique à 950°C suivi d'un temps de maintien de 0.25, 2 et 10min et enfin refroidissement à l'air.

## IV.3.2 L'évolution de la taille des grains

#### IV.3.2.1 La taille des grains en fonction de temps de maintien :

Les courbes d'évolution de la taille des grains pour les trois échantillons prédéformés (45, 60et 80%) montrent l'effet du temps de recuit sur la grosseur des grains de ferrite.

Pour que les grains restent fins il faut choisir des durées de maintien court, car le prolongement de temps de maintien est donné une croissance anormale au grains d'acier 0.19%C (Fig. 58). Le meilleur affinement des grains est obtenu pour un taux de déformation de 80% et un temps de maintien de 0.25min



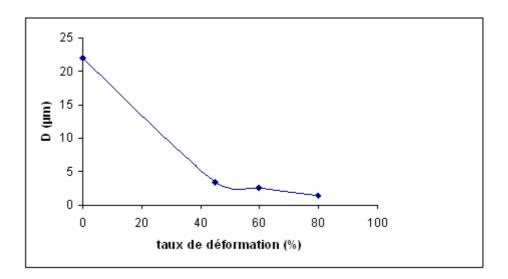
**Figure 58** : Courbes D = f (t) de l'acier 0.19% homogénéisé à 1150°C 12min puis une déformation à 950°C suivi par un temps de maintien et enfin refroidissement à l'air.

## IV.3.2.2. La taille des grains en fonction de taux de déformation

Le calcul de la taille moyenne des grains nous permet de mettre en évidence l'influence du taux de déformation par laminage à chaud sur la cinétique de recristallisation où la taille des grains sont diminue avec l'augmentation de taux de déformation (Fig.59). Autrement dit, Plus la déformation appliquée est forte, plus l'énergie emmagasinée dans la structure est importante et plus la force motrice de la recristallisation est élevée.

Cela se traduit par une accélération des cinétiques (Fig.59) en termes de germination (temps d'incubation plus court) et en termes de nombre des sites de germination de nouveaux petits grains.

En ce qui concerne la taille de grain à la fin de la recristallisation, on peut dire que plus le taux de déformation appliqué sera élevé, plus les sites de germination seront nombreux : en conséquence, la taille des grains recristallisés diminue lorsque la déformation augmente (Fig. 59).



**Figure 59**: Variation de la taille des grains d'acier 0.19%C en fonction de taux de déformation après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivi d' une déformation plastique ε =80% à 950°C puis un temps de maintien 0.25min et enfin refroidissement à l'air.

#### IV.3.3 Comportement du matériau (acier 0.19%C):

Le comportement du notre matériau (acier 0.19%C) a été déterminé par des essais de compression à 950°C, la figure 60 représente les courbe contrainte déformation de l'acier 0.19%C.

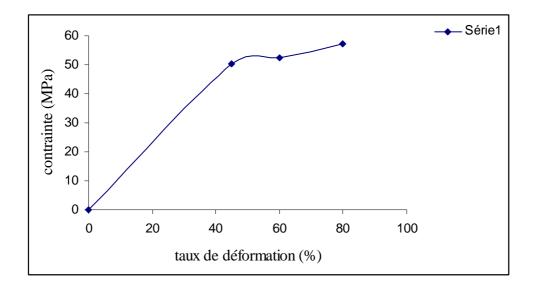


Figure 60 : Comportement du matériau (acier 0.19%C)

# IV.3.4 Etude par diffraction des rayons X de l'acier 0.19%C déformé à chaud $\epsilon$ =80%:

Cette étude par diffraction des rayons X nous a confirmé nos résultats obtenus par microscopie optique et aussi par les mesures de dureté. Par exemple, le spectre de l'échantillon maintenu à 950°C pendant un temps très court (Fig.62a) a des pics de grande intensité par rapport aux spectres des échantillons qui ont subi un recuit prolongé (Fig.62 b et c).

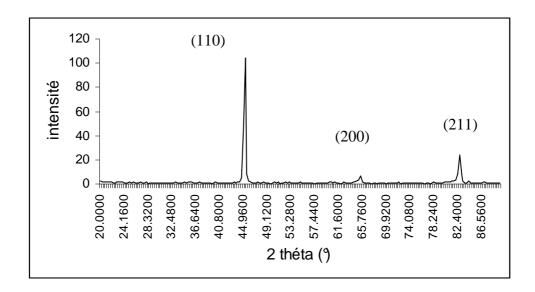
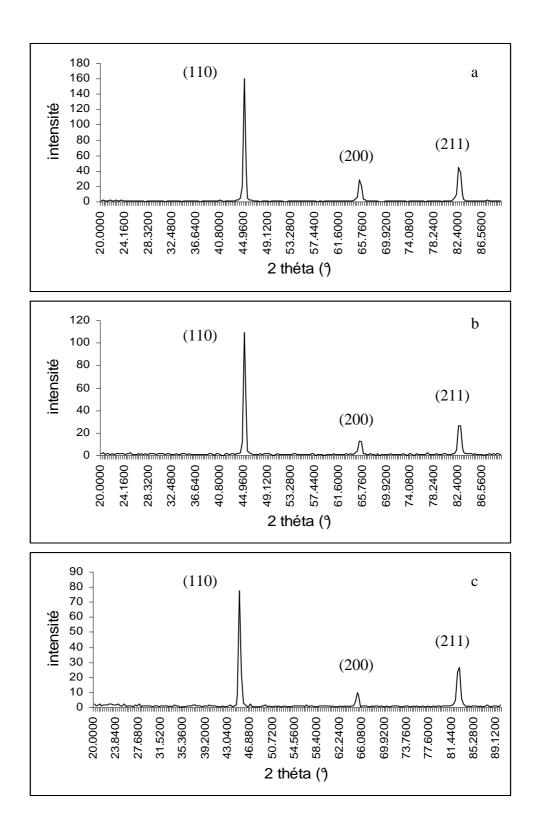
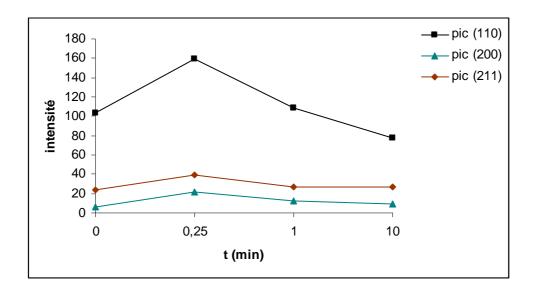


Figure 61 : Spectre de rayon X de l'acier 0.19 %C à l'état non déformé



**Figure 62**: Spectres de rayons X de l'acier 0.19% après homogénéisation de 12 min à 1150°C suivie d'une déformation ε =80% à 950°C puis d'un temps de maintien et enfin refroidissement à l'air (a) : 0.25min, (b) : 1min, (c) : 10min,

Cette grande intensité des pics est peut illustré dans la figure 63



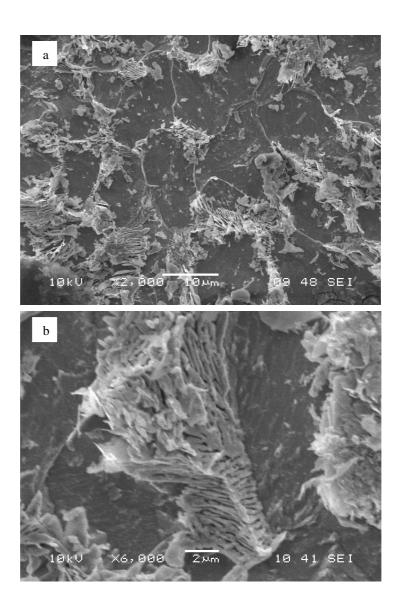
**Figure 63** : La variation de l'intensité en fonction de temps de maintien de l'acier 0.19%C homogénéisé à 1150°C 12min puis un déformation à 950°C  $\epsilon$  =80% suivi par un temps de maintien et enfin refroidi à l'air.

h	k	1	d (A)	2 thêta (°)	I (%)
1	1	0	2.02	44.96	100
2	0	0	1.424	65.44	40.79
2	1	1	1.16	82.72	51.82

Paramètre cristallin a = 2.85 A

#### IV.3.5 Etude par microscopie électronique à balayage :

Dans le but de mettre en évidence la microstructure de l'acier 0.19%C au cours de ce traitement thermomécanique, nous avons utilisé un microscope électronique à balayage. Les figures 64 montrent clairement les grains ferritiques et les colonnes perlitiques. La figure 64a montre l'état initial de l'acier avant les traitements thermo-mécaniques. On constate que la matrice est férritique avec des grains de taille moyenne (environ : 15 à  $20~\mu m$ ). La figure 64b montre l'agrandissement d'une colonne perlitique. Cette perlite est de structure lamellaire très fine, car la distance interlamellaire ne dépasse pas le 1/10 de  $\mu m$ ).



**Figure 64**: Microstructure au MEB de l'acier 0.19%C à l'état initiale (b): l'agrandissement d'une colonie perlitique.

D'autre part, la figure 65 montre la microstructure après le traitement thermomécanique, On constate une structure constituée de grains très fins de taille environ inférieure à 5  $\mu$ m.

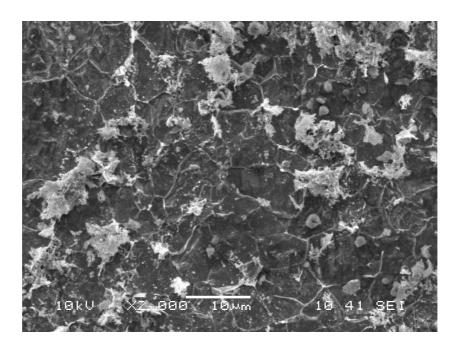


Figure 65 : Microstructure au MEB de l'acier 0.19%C après homogénéisation à 1150°C pendant 12 min suivi d'une déformation plastique  $\epsilon$  =80% à 950°C puis un temps de maintien 1 min et enfin refroidissement à l'air.