

# Quantification des paramètres microstructuraux d'un acier dual-phase par analyse d'images lors d'un laminage à froid.

K. YAYA<sup>a</sup>

a. Laboratoire de Mécanique, Matériaux & Énergétique (L2ME), Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie, kamel.yaya@univ-bejaia.dz

## Résumé :

*Ce travail présente une méthode automatique, utilisant les techniques d'analyse d'images, pour quantifier l'évolution des paramètres microstructuraux (taille et forme des grains) d'un acier dual phase en fonction de divers taux de déformations par laminage à froid.*

*La procédure générale développée pour cette caractérisation a été menée en suivant les étapes suivantes : i) obtention de l'acier dual phase par un traitement thermique approprié, ii) laminage à froid d'éprouvettes de cet acier selon plusieurs taux de déformation, iii) préparation métallographique d'échantillons, iv) acquisition des images, v) traitement des images en niveaux de gris, vi) analyse des images binaires, vii) traitement statistique des résultats.*

*Les résultats montrent que tous les paramètres microstructuraux mesurés, qu'ils soient de taille ou de forme varient de manière inversement proportionnelle par rapport aux taux de déformation macroscopiques dans le sens de laminage des éprouvettes. Ceci nous permet donc de conclure à une relation étroite entre les paramètres microstructuraux de taille et de forme et les propriétés mécaniques du matériau.*

## Abstract :

*This work presents an automatic method, using image analysis techniques, to quantify the evolution of microstructural parameters (grain size and shape) of a dual phase steel as a function of various cold rolling deformation rates.*

*The general procedure developed for this characterization was carried out by following the following steps: i) obtaining the dual-phase steel by an appropriate heat treatment, ii) cold rolling test specimens of this steel at several deformation rates, iii) Metallographic sample preparation, iv) image acquisition, v) image processing in grayscale, vi) analysis of binary images, vii) statistical processing of the results.*

*The results show that all measured microstructural parameters, whether of size or shape, vary inversely with respect to macroscopic deformation rates in the rolling direction of the specimens. This allows us to conclude a close relationship between the microstructural parameters of size and shape and the mechanical properties of the material.*

**Mots clefs : acier dual-phase; analyse d'images; laminage à froid; paramètres microstructuraux.**

# 1 Introduction

Dans tous les domaines de la mécanique, les chercheurs tentent depuis des années d'établir un lien entre la microstructure des aciers et de leurs propriétés mécaniques.

Les aciers dual-phase [1] sont une classe d'aciers qui a été développée avec l'objectif d'obtenir certaines propriétés désirées pour des applications particulières. Les tôles d'aciers sont généralement façonnées en des formes compliquées pour des utilisations dans une variété d'applications, comme dans l'industrie automobile par exemple.

Une bonne mise en forme et une résistance élevée sont recherchées pour des raisons de productivité et de réduction de poids (afin d'économiser sur la consommation en carburant des véhicules par exemple).

Afin de mieux comprendre l'influence des paramètres process (tel que le laminage à froid) sur les propriétés d'emploi de ces aciers, il apparaît fondamental de relier les effets de la microstructure sur les caractéristiques mécaniques.

L'analyse d'images est un outil rapide et adapté à l'étude de l'évolution des paramètres microstructuraux (tailles des grains, formes, textures de laminage, . . .) en fonction des taux de déformations macroscopiques par laminage à froid d'un acier dual phase [2-3].

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution en développant une méthode automatique pour la quantification de l'évolution de la taille des grains (diamètres équivalents, diamètres de Féret, distributions de la granulométrie, tendances centrales et dispersions) et de la forme des grains (indices de circularité, indices d'élongation, distributions, tendances centrales et dispersions) en fonction des divers taux de déformations dans le sens de laminage obtenus par plusieurs passes de laminage à froid pour un acier dual phase.

## 2 Protocole expérimental

### 2.1 Obtention de l'acier dual-phase étudié

Pour obtenir un acier dual phase (phase de ferrite ductile + phase de martensite dure), nous avons fait subir à un acier au carbone ordinaire, de composition chimique indiquée dans le tableau 1, un traitement thermique approprié dont les différentes étapes sont résumées dans la fig. 1.

NUMÉRO AISI	C max.	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Ni max.	Cr max.	Mo max.
<b>C 1008</b>	0.10	0.50	0.040	0.050	-	-	-	-

Tableau 1 – Classification de l'acier selon la norme AISI

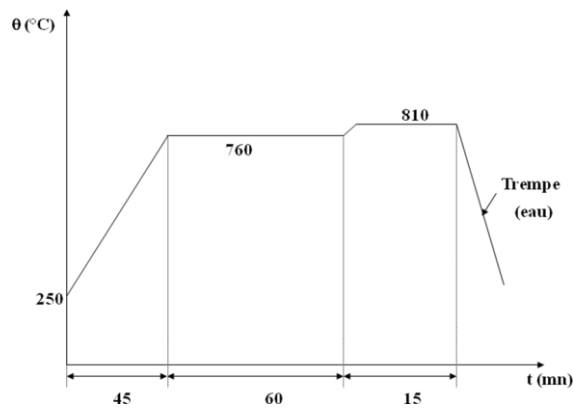
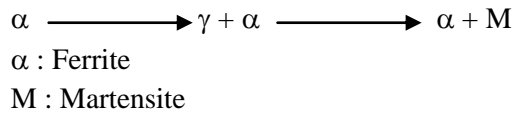


Fig. 1 – Traitement thermique pour l'obtention de l'acier dual phase

## 2.2 Laminage à froid de l'acier

L'acier dual phase obtenu après la transformation martensitique décrite ci-dessus subit des opérations de laminage à froid.

Deux taux de déformations de 25% et de 40% ont été obtenus après plusieurs passes de laminage.

L'épaisseur, la largeur et la longueur ont été mesurées sur des éprouvettes avant déformations et après chaque taux de déformation.

Les résultats obtenus et mesurés pour chaque taux de déformation sont résumés dans le tableau 2.

La relation (1) nous permet de calculer le taux de déformation en fonction de l'épaisseur initiale et de l'épaisseur obtenue après chaque déformation.

$$\varepsilon = \ln \frac{e_0}{e} \quad (1)$$

$e_0$  : épaisseur initiale

$e$  : épaisseur après déformation.

$\ln$  : logarithme népérien.

Déformation : $\varepsilon$ (%)	0	25	40
Épaisseur : $e$ (mm)	2.58	2.02	1.73
Largeur : $l$ (mm)	9.73	9.79	10.00
Longueur : $L$ (mm)	200	243	270

Tableau 2 – Résultats du laminage à froid des éprouvettes de l'acier dual phase

## 2.3 Préparation des échantillons pour l'acquisition des images

La préparation des échantillons, en vue d'une quantification par analyse d'images, est une étape importante. A cet effet les étapes suivantes ont été réalisées :

- Préparation métallographique des échantillons (échantillonnage, enrobage, polissage, attaque chimique au nital à 4%),
- Acquisition des images : l'acquisition des images a été réalisée via une caméra C.C.D. (Charge Coupled Device), reliée à un microscope optique possédant trois rapports de grandissement (200, 400 et 600) d'une part et à un micro ordinateur d'autre part. Les images digitalisées obtenues ont une dimension de 768 x 576 pixels en niveaux de gris. Plusieurs images en des endroits différents de l'échantillon ont été prises pour chaque taux de déformation dans le sens de laminage.

## 3 Traitement des images

Afin d'obtenir la représentation la plus complète de la microstructure de notre acier sur les sections planes, tous les joints de grains doivent être extraits [4-5].

La fig. 3 illustre les différentes étapes de traitement des images qui permettent d'extraire la microstructure de l'acier dual-phase à partir des sections planes examinées :

- a) Image initiale obtenue au microscope optique(x200) et numérisée avec une caméra CCD d'un acier dual-phase avant laminage (en gris les grains de ferrite, en noir les îlots de martensite),
- b) Amélioration du contraste de l'image,
- c) Révélation des contours des objets (joints de grains de ferrite) et lissage des surfaces des corps des grains,
- d) Image binaire obtenue après segmentation de l'image en niveaux de gris,
- e) Amincissement des joints de grains de ferrite par squelettisation (= 1 pixel),
- f) Transformation et Reconstruction Granulométrique; on obtient l'image finale de la microstructure,
- g) Superposition de l'image finale de la microstructure reconstruite et de l'image initiale en niveaux de gris afin de mettre en évidence les grains et les joints de grains,
- h) Suppression des îlots de martensite.

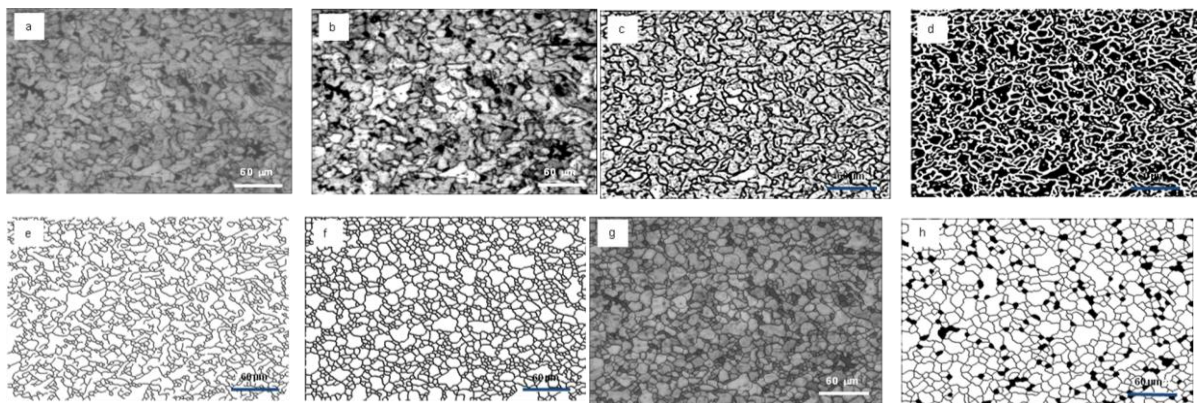


Fig. 3 – Traitement des images

## 4 Analyses des images

### 4.1 Analyse de la taille des grains

Il existe différentes définitions de la taille en analyse d'images. Un certain nombre de paramètres peuvent donc être définis et qu'on peut résumer comme suit sur la fig. 4 :




 <b>S</b>	 <b>D</b>	 <b>Df</b>
Surface de la particule	Diamètre équivalent-surface	Diamètre de Féret

Fig. 4 – Signification des différents paramètres de tailles utilisés en granulométrie [1]

## 4.2 Analyse de la forme des grains

Les caractéristiques de la forme peuvent s'étudier en utilisant les indices paramétriques classiques de forme [6].

Paramètres utilisés dans notre cas pour caractériser l'évolution de la forme des grains de ferrite:

- Indice de circularité IC:

$$IC = \frac{4\pi Ap}{Pp^2} \quad (2)$$

Avec :  $Pp$  : Périmètre de la particule.

$Ap$  : Surface de la particule.

- Indice d'Elongation IE:

$$IE = \frac{D_{orto}}{D_{max}} \quad (3)$$

L'indice d'élongation est déterminé comme le rapport du diamètre de Féret orthogonal au diamètre de Féret maximal sur le diamètre de Féret maximal.

## 5 Résultats & Discussion

### 5.1 Présentation des images obtenues

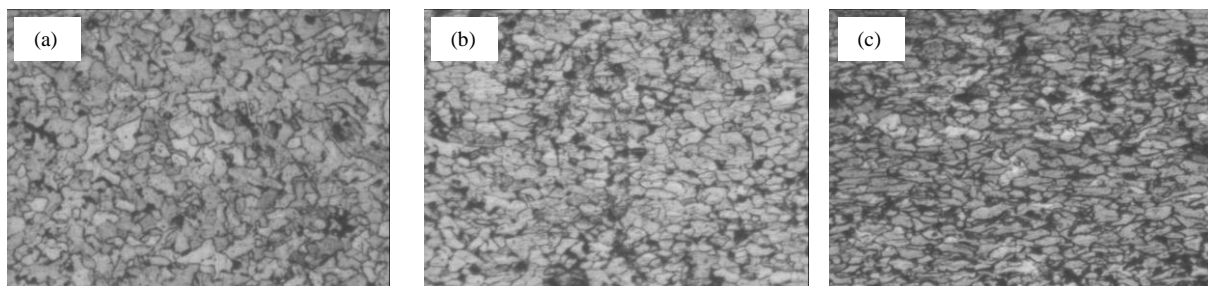


Fig. 5 – (a) Microstructure de l'acier dual phase avant laminage (b) Microstructure de l'acier dual phase après un taux de déformation de 25 % (c) Microstructure de l'acier dual phase après un taux de déformation de 40 %

La fig. 5(a) montre la microstructure d'un échantillon de l'acier dual phase avant laminage ( $e = 0\%$ ). La texture équi-axe des grains de ferrite est bien visible et on voit bien les îlots de martensite dispersés de manière homogène dans toute la matrice de ferrite.

La fig. 5(b) montre la microstructure de l'échantillon de l'acier dual phase dans le sens de laminage pour un taux de déformation de 25%. On voit bien que la forme et l'orientation des grains de ferrite commencent à changer en s'allongeant et en s'orientant selon la direction de laminage. La texture équi-axe initiale est donc transformée après déformation par laminage à froid en une texture déformée dite "texture de laminage". Les îlots de martensite étant très durs ne subissent aucune déformation.

La fig. 5(c) montre la microstructure de l'échantillon d'acier dual phase dans le sens de laminage pour un taux de déformation de 40%. Les grains de ferrite continuent à s'allonger dans la direction de laminage et l'orientation de ces grains dans cette direction est encore plus accentuée. La texture de laminage est vraiment bien visible pour ce taux de déformation. Les îlots de martensite ne subissent toujours aucune déformation.

## 5.2 Résultats de l'analyse

Le programme de traitement et d'analyse d'images proposé permet de caractériser la morphologie des grains de ferrite sur des images représentant les microstructures (textures de laminage) pour les différents taux de déformation macroscopiques obtenus par laminage à froid sur l'acier dual phase. Les résultats obtenus sont résumés ci-dessous (Tableau 3 à 6 et fig.7 à 10). Nous avons calculé les valeurs moyennes pour avoir une idée sur la variation des tendances centrales. Pour chaque taux de déformation, le programme calcule :

- La surface du champ de mesures en  $\text{mm}^2$ .
- Le nombre de grains comptés dans ce champ.
- Le diamètre équivalent minimal, maximal et moyen.
- Le diamètre de Féret minimal, maximal et moyen.
- L'indice de circularité minimal, maximal et moyen.
- L'indice d'élongation minimal, maximal et moyen.
- L'écart type.

Le programme trace ensuite l'histogramme de distribution de chacun des paramètres morphologiques ci dessus.

Nous donnons ci dessous un exemple de résultat global obtenu pour l'échantillon déformé à 40 %.

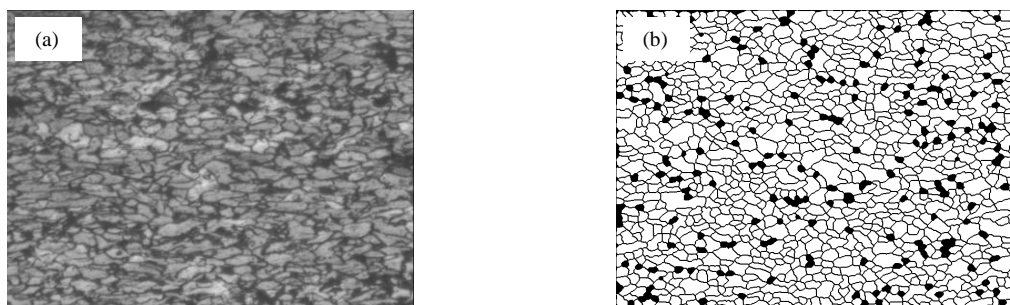


Fig.6 – (a) Image originale de l'acier dual phase déformé à 40% (x200), (b) Image obtenue après traitement et reconstruction automatique de la microstructure et sur laquelle est effectué le calcul

- **Diamètres équivalents**

Echantillon Analysé :	Ech_SL_E40_G200
Surface du champ de mesures, mm <sup>2</sup>	0.085
Nombre de grains	886
Diamètre Equivalent minimal, micron	5.7
Diamètre Equivalent maximal, micron	26.4
Diamètre Equivalent moyen, micron	9.3
Ecart – type, micron	2.9

Tableau 3 – Résultats de l'analyse des diamètres équivalents

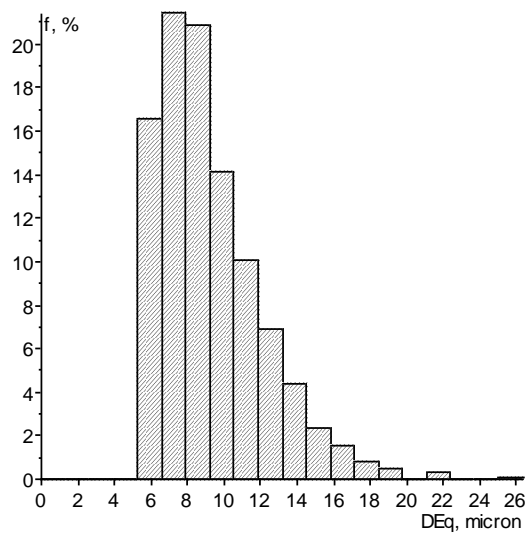


Fig.7 – Histogramme de distribution des diamètres équivalents

- **Diamètres de Féret**

Echantillon Analysé :	Ech_SL_40_G200
Surface du champ de mesures, mm <sup>2</sup>	0.085
Nombre de grains	886
Diamètre de Féret minimal, micron	6.3
Diamètre de Féret maximal, micron	29.4
Diamètre de Féret moyen, micron	11.1
Ecart – type, micron	3.7

Tableau 4 – Résultats de l'analyse des diamètres de Féret

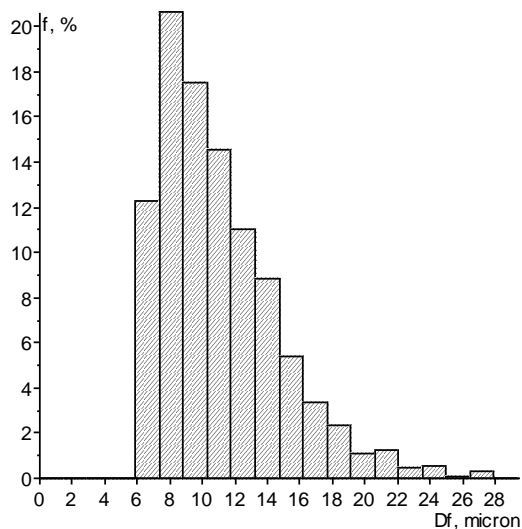


Fig.8 – Histogramme de distribution des diamètres de Féret

- **Indices de circularité**

Echantillon Analysé :	Ech_SL_40_G200
Surface du champ de mesures, mm <sup>2</sup>	0.085
Nombre de grains	886
Indice de circularité minimal, micron	0.502
Indice de circularité maximal, micron	0.941
Indice de circularité moyen, micron	0.808
Ecart – type	0.070

Tableau 5 – Résultats de l'analyse des indices de circularité

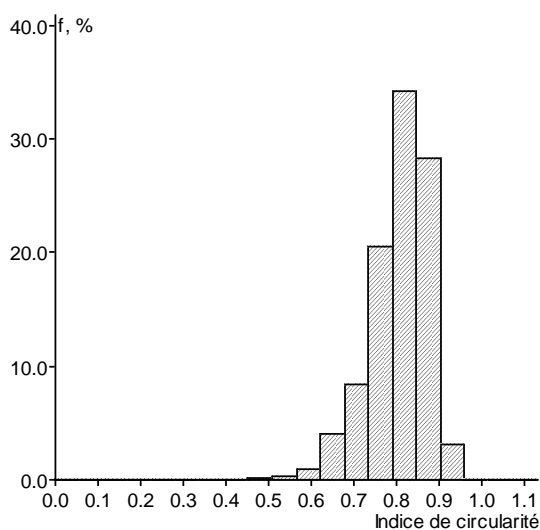


Fig. 9 – Histogramme de distribution des indices de circularité



- **Indices d'élongation**

Echantillon Analysé :	Ech_SL_E40_G200
Surface du champ de mesures, mm <sup>2</sup>	0.085
Nombre de grains	886
Indice d'élongation minimal, micron	0.258
Indice d'élongation maximal, micron	1.000
Indice d'élongation moyen, micron	0.673
Ecart – type	0.151

Tableau 6 – Résultats de l'analyse des indices d'élongation

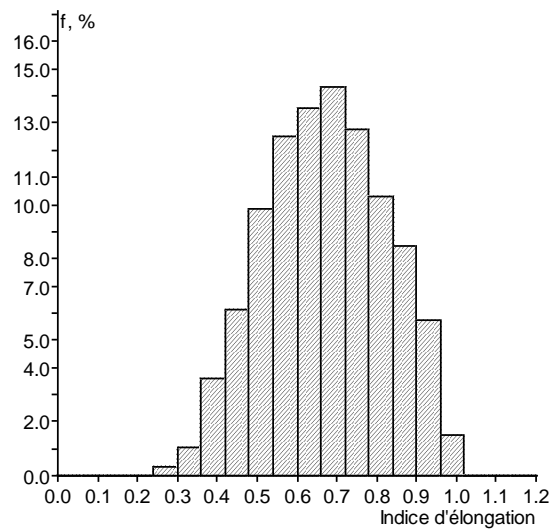


Fig.10 – Histogramme de distribution des indices d'élongation

### 5.3 Evolution des paramètres microstructuraux en fonction des taux de déformations

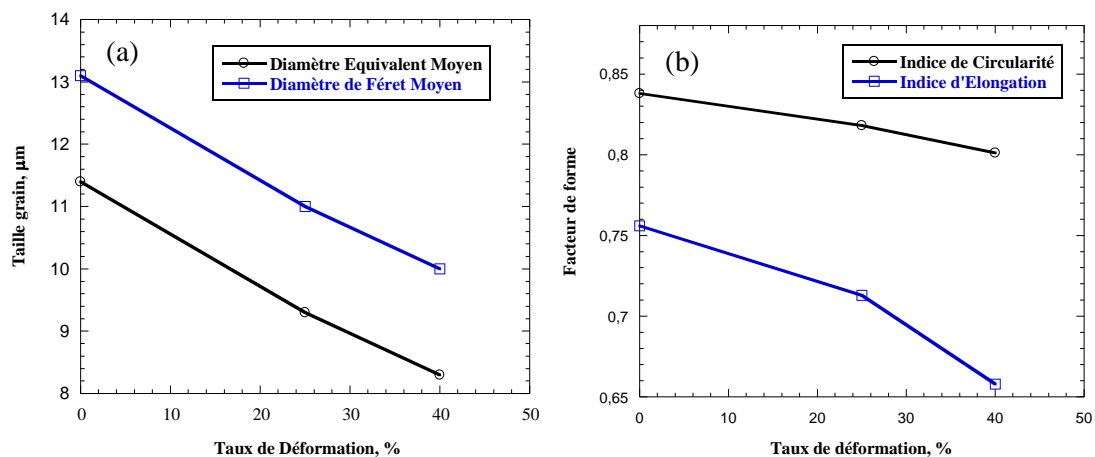


Fig. 11 – (a) Evolution de la taille des grains en fonction des taux de déformations, (b) Evolution de la forme des grains en fonction des taux de déformations

## 5.4 Discussion des résultats

L'analyse des courbes présentées dans les fig.11(a) et fig.11(b) l'évolution globale des paramètres microstructuraux en fonction des taux de déformations.

Tous les paramètres microstructuraux mesurés, qu'ils soient de taille (diamètres équivalents et diamètres de Féret des grains de ferrite) ou de forme (indices de circularité, indices d'élongation des grains de ferrite) pour les taux de déformations varient de manière inversement proportionnelle par rapport aux taux de déformation macroscopiques dans le sens de laminage des éprouvettes d'acier dual phase. Ceci nous permet donc de constater une relation étroite entre les paramètres microstructuraux de taille et de forme et les propriétés macroscopiques du matériau.

Même si les valeurs des diamètres équivalents et des diamètres de Féret diffèrent légèrement, leurs variations en fonction des taux de déformation est pratiquement constante. Ces deux paramètres de tailles rendent donc compte de manière presque identique de l'évolution du paramètre "taille de grain" en fonction des taux de déformation macroscopiques.

Par contre les deux facteurs de forme étudiés (indice de circularité et d'élongation) varient de manière sensiblement différente en fonction des taux de déformations. Alors que l'indice d'élongation varie de manière nette en fonction de ces taux de déformation, l'indice de circularité varie lui de manière moins nette. Ceci s'explique par le fait que l'indice de circularité est peu adapté comme paramètre d'élongation car c'est un rapport entre une surface et un périmètre qui peut varier beaucoup sans pour autant rendre compte de l'évolution de la forme de la particule. L'indice d'élongation est lui un rapport entre deux diamètres, il mesure donc un rapport entre deux distances qui rendent bien compte de la variation de l'allongement de la particule.

## 6 Conclusion

Dans ce travail, nous avons abordé à travers l'étude de l'évolution des paramètres microstructuraux en fonction des taux de déformation macroscopiques par laminage à froid d'un acier dual phase, l'influence de la microstructure des aciers sur leurs propriétés mécaniques qui représente l'un des grands domaines de la mécanique des matériaux. D'autre part, l'analyse quantitative d'images est devenue une technique de plus en plus courante et indispensable dans le domaine des matériaux pour déterminer les paramètres morphologiques.

Partant de ce constat, nous avons élaboré une méthode automatique de traitement et d'analyse d'images pour la quantification de l'évolution de la taille des grains (diamètres équivalents, diamètres de Féret, distributions de la granulométrie, tendances centrales et dispersions) et de la forme des grains (indices de circularité, indices d'élongation, distributions, tendances centrales et dispersions) en fonction des divers taux de déformations dans le sens de laminage obtenus par plusieurs passes de laminage à froid. A partir de ces mesures nous avons tracé les courbes d'évolution des valeurs moyennes de ces différents paramètres microstructuraux en fonction des taux de déformation macroscopiques obtenus par laminage à froid.

Les résultats trouvés montrent que tous les paramètres microstructuraux mesurés, qu'ils soient de taille ou de forme varient de manière inversement proportionnelle par rapport aux taux de déformation macroscopiques dans le sens de laminage des éprouvettes. Ceci nous permet donc de conclure à une relation étroite entre les paramètres microstructuraux de taille et de forme et les propriétés mécaniques du matériau.

## Références

- [1] G. Meyrick, R.H.Wagoner, Physical Metallurgy of Steel, The Ohio State University, USA, 2001.
- [2] M. Coster., J.L Chermant., Précis d'Analyse d'images, Presses du CNRS (1989).
- [3] J.L Chermant., Développement des techniques d'analyse d'images dans le domaine des matériaux, Spectra 2000, 120 (1987) 33-41.
- [4] M. Gay, Caractérisation de la neige, du névé et de la glace par traitement d'images, Thèse de doctorat de l'université de Grenoble 1, 1999.
- [5] S. Journaux, Evaluation de l'endommagement de pièces métalliques par analyse d'images (par piqûres de corrosion, par fluage), Thèse de doctorat de l'université de Bourgogne, Dijon, 1999.
- [6] C. Souchier, Analyse d'images, Techniques de l'Ingénieur, Traité Analyse et Caractérisation, pp. 855-1 – 855-15.