

Caractérisation de la forme tridimensionnelle complexe des particules

La caractérisation de la forme tridimensionnelle complexe des particules intermétalliques $Al_x(Fe,Mn)$ contenues dans les alliages d'aluminium de type 5182 présente pour l'analyse des propriétés physiques du matériau final un grand intérêt. En effet, au cours des études réalisées à l'École des Mines de Saint-Étienne ainsi qu'au CRV ALCAN en amont de ce travail [5] [28], il a été montré que la forme des particules et leur aptitude à la rupture conditionnent la formabilité de l'alliage ainsi que son aspect de surface.

La caractérisation de la forme d'objets est une thématique très souvent abordée en analyse d'images. De nombreux ouvrages traitent le sujet de la caractérisation de formes bidimensionnelles simples à complexes comme le livre de M.Coster et J.L.Chermant au chapitre 9 [18], ou encore celui de L. da Fontoura Costa and R.C.Jr.Marcondes [22] entièrement dédié à ce sujet, et qui tente d'établir les méthodes applicables dans le cas de l'analyse tridimensionnelle de forme. Les particules intermétalliques étudiées sont de forme tridimensionnelle complexe.

Dans ce chapitre, nous utilisons plusieurs approches pour les caractériser. Les deux premières dérivent directement des méthodes d'analyse de formes simples et complexes bidimensionnelles de la littérature, adaptées à la nature tridimensionnelle de l'information. La troisième est une approche originale.

Tout d'abord une approche paramétrique de la forme est appliquée. Celle-ci permet d'obtenir un paramètre spécifique pour chaque mesure effectuée. Ensuite nous avons utilisé une approche spectrale, chaque particule étant caractérisée par un spectre de mesures. Enfin, nous proposons une approche originale basée sur l'ensemble de l'information de courbure à la surface des

particules intermétalliques.

Les différentes approches sont illustrées sur quelques formes typiques extraites de la base de données des particules de la phase au fer sur les échantillons de AA5182.

Les deux premières approches de caractérisation de la forme ont été présentées dans des articles de colloques : [71] [76] [75] [73] [74].

5.1 Caractérisation paramétrique

L'originalité de l'approche paramétrique présentée ici consiste dans la sélection des paramètres morphologiques utilisés [84] [18] [83]. Nous nous sommes en effet polarisés sur des mesures possédant une interprétation et un sens physique.

Nous présentons dans cette section les paramètres que nous avons mis en oeuvre et dont l'étude nous a semblé pertinente en vue de la compréhension des propriétés mécaniques de rupture des particules.

5.1.1 Les paramètres de base

Ils sont représentés par la mesure du volume et de la surface, ainsi que par les paramètres combinant les deux informations. Ils caractérisent les objets, et sont facilement mesurables en analyse d'images.

Le volume

Le volume V est calculé en comptant les voxels qui constituent l'objet tridimensionnel étudié.

La surface

La surface S est mesurée à partir de la méthode stéréologique de Crofton [19] [82]. Cette méthode estime la surface à partir de la mesure des aires projetées A_p de l'objet tridimensionnel sur des plans bidimensionnels d'orientation variée. La surface correspond à un facteur 4π à la moyenne des aires A_p mesurées (équation 5.1).

$$S = 4\pi \langle A_p \rangle \quad (5.1)$$

Les indices de formes

Ils comparent la forme étudiée à une forme de référence [85]. Ils sont très sensibles au bruit présent à la surface de l'objet.

L'indice de sphéricité Il est défini par l'équation 5.2. Il compare la forme de l'objet à celle d'une sphère. Si la forme de l'objet est proche de celle de la sphère alors il est égal à 1.

$$I_s = 36\pi \frac{V^2}{S^3} \quad (5.2)$$

5.1.2 Les paramètres basés sur la notion de distance géodésique

Les paramètres présentés dans cette section sont basés sur la notion de distance géodésique [50] [51]. Cette distance est une métrique au sens défini au chapitre 4 section 1. Elle est particulièrement intéressante pour appréhender les formes tridimensionnelles complexes.

Nous rappelons tout d'abord la définition de la distance géodésique puis présentons des mesures morphologiques basées sur cette notion : la fonction de propagation géodésique, la longueur géodésique, le centre géodésique, l'indice d'élongation, et enfin le rayon maximal calculé à partir de la fonction distance.

La distance géodésique

Soit un ensemble X (figure 5.1), et 4 points x_1, x_2, x_3 et x_4 appartenant à cet ensemble. Un arc géodésique d'extrémité x_1 et x_2 vérifie les conditions suivantes :

- il est totalement inclus dans X ,
- il correspond au plus court chemin reliant x_1 à x_2 .

La distance géodésique entre 2 points x et y appartenant à X notée $d_X(x, y)$ correspond au chemin le plus court $C = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ reliant x à y et inclus dans X (équation 5.3).

Sur la figure 5.1, la distance $d_X(x_i, x_4)$ avec i variant de 1 à 3 ne remplit pas la première condition ; en effet x_i et x_4 appartiennent à deux parties disjointes de X . Par convention cette distance est égale à l'infini.

$$d_X(x, y) = \min \{L(C) \mid x_1 = x, x_2 = y \text{ et } C \subseteq X\} \quad (5.3)$$

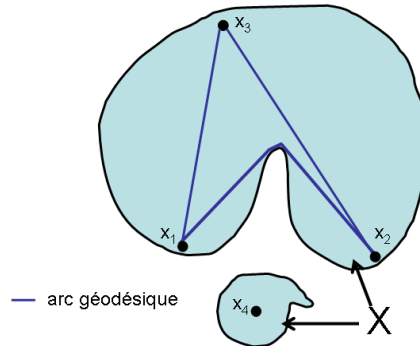


FIG. 5.1: Définition d'un arc géodésique dans une forme X , entre les points x_1, x_2, x_3 et x_4

La fonction de propagation géodésique

La fonction de propagation géodésique est définie en terme de distance géodésique. Elle permet de déterminer des paramètres de forme pour les objets.

Elle correspond pour un point donné x appartenant à un ensemble X simplement connexe, c'est à dire sans trou et d'un seul tenant, à la longueur maximale des arcs géodésiques dont l'une des extrémités est x . La fonction de propagation géodésique s'exprime à partir de l'équation 5.4.

$$\forall x \in X, P_X(x) = \max \{d_X(x, y) \mid y \in X\} \quad (5.4)$$

La longueur géodésique

La longueur géodésique d'un ensemble X simplement connexe est définie par l'équation 5.5. Elle correspond à la valeur maximale prise par la fonction de propagation géodésique. Cette mesure est sensible à la présence de bruit à la surface de l'objet étudié.

$$\forall x \in X, L_g(X) = \max \{P_X(x)\} \quad (5.5)$$

Le centre géodésique

Le centre géodésique d'un ensemble X simplement connexe est défini comme le minimum régional de sa fonction de propagation géodésique. Par définition le centre géodésique appartient toujours à X . Il est invariant à la présence de bruit sur la frontière de l'ensemble. La valeur de la fonction

de propagation au centre géodésique correspond au rayon géodésique noté $R_g(X)$.

L'indice d'élongation géodésique

L'indice d'élongation géodésique tridimensionnel IG_g est un nouvel indice développé au cours de la thèse. Il correspond à une extension 3D de l'indice d'allongement géodésique bidimensionnel d'équation 5.6 proposé par C.Lantuejoul et F.Maisonneuve [51]. Il caractérise l'élongation de l'objet X étudié. L'indice d'élongation géodésique tridimensionnel IG_g est défini par l'équation 5.7.

Dans le cas de l'étude d'une sphère, IG_g est égal à 1. En effet, la sphère représente l'objet le plus compact que l'on puisse définir. L'indice d'élongation augmente avec l'allongement de l'objet. Il correspond par exemple pour un segment à sa longueur.

Contrairement aux autres indices de forme présentés à la section précédente, il est insensible au bruit présent à la surface de l'ensemble étudié.

$$\text{dans le cas 2D : } IG_g(X) = \pi \frac{[L_g(X)]^2}{4A(X)} \quad (5.6)$$

$$\text{dans le cas 3D : } IG_g(X) = \pi \frac{[L_g(X)]^3}{6V(X)} \quad (5.7)$$

Le rayon maximal

Le rayon maximal R_{\max} , est un paramètre original. Il correspond au minimum absolu des maxima régionaux de la fonction distance définie au sens géodésique (chapitre 4 section 1). Il correspond à la plus grande boule incluse dans la forme qui peut être translatée dans l'ensemble de son enveloppe interne, et centrée sur son pseudo-squelette géodésique.

Il est normalisé pour correspondre à un indice de forme qui compare le volume de l'objet à celui de la boule incluse de rayon R_{\max} (équation 5.8).

$$R_{norm}(X) = \frac{4}{3}\pi \frac{R_{\max}^3(X)}{V(X)} \quad (5.8)$$

Mise en oeuvre

Les paramètres basés sur la distance géodésique ont été implémentés sur le logiciel Aphelion©. Ils ont été validés sur des formes simples pour lesquelles les mesures théoriques ont été calculées algébriquement : sphères, parallélépipèdes, union de sphères, union de sphères et de parallélépipèdes.

Sphères	V théo.	V calc.	R_g	L_g	Temps d'exécution
R=5 voxels	523	485	4	8	7 secondes
R=15 voxels	14137,2	13997	14	28	3472 secondes
R=25 voxels	65449,8	65117	24	48	41.154 secondes

TAB. 5.1: Temps d'exécution de l'algorithme de fonction de propagation pour des sphères de rayons croissants, et mesures du rayon et de la longueur géodésique correspondants

La complexité de l'algorithme de calcul de la fonction de propagation est en $O(n^2)$. Les temps de calcul sont donc longs. Ils augmentent rapidement avec le volume des particules étudiées (voir tableau 5.1) ; aussi nous n'avons pas calculé la fonction de propagation sur l'ensemble des voxels constituant chaque particule.

Nous avons donc mis au point un algorithme rapide pour le calcul de la longueur géodésique basé sur la fonction distance géodésique. Cet algorithme consiste en 6 étapes :

1. Calculs de la fonction distance géodésique dans la forme.
2. Extraction des maxima régionaux de la fonction distance, le pseudo-squelette géodésique 3D est obtenu.
3. Extraction de la valeur minimum des maxima régionaux de la fonction distance dans la particule formant le pseudo-squelette géodésique, détermination de R_{max} .
4. Dilatations conditionnelles successives du pseudo squelette (dans la forme de la particule).
5. Extractions des maxima locaux, ils correspondent aux points extrémaux de la forme.
6. Pour chaque maximum extrait, calcul de la fonction de propagation géodésique. La longueur géodésique correspond au maximum de la fonction de propagation mesuré sur l'ensemble des points extrémaux.

Cet algorithme permet d'obtenir rapidement le rayon maximal ainsi que la longueur géodésique.

Les temps de calcul nécessaires à la mesure des paramètres classiques ainsi que de R_{norm} et L_g sur un PC AMD Athlon 2600+, 2Go de RAM sont fournis dans le tableau 5.2 pour des boules de rayons croissants.

Sphères	V théo.	R_{max}	L_g	Temps d'exécution
R=5 voxels	523	5	8	2 secondes
R=15 voxels	14137,2	15	28	2 secondes
R=25 voxels	65449,8	25	48	4 secondes

TAB. 5.2: Temps d'exécution de l'algorithme mis au point pour la détermination rapide de R_{max} et de L_g

5.1.3 Paramètres basés sur la matrice d'inertie

Les paramètres basés sur le calcul de la matrice d'inertie d'objets apportent des connaissances sur leur orientation dans l'espace, et également sur leur forme par l'étude de la distribution de leur masse.

Définition de la matrice d'inertie dans le cadre de la mécanique du solide

La matrice d'inertie d'une particule est définie par la matrice d'équation 5.9 (où x_i , y_i , et z_i correspondent aux coordonnées des voxels de la particule dans le repère centré au centre d'inertie, et d'axes parallèles aux axes de l'image). Nous supposons pour les calculs d'inertie que la répartition en masse des particules intermétalliques est uniforme et que le volume élémentaire est le voxel (de masse élémentaire m_i égale à 1).

La matrice d'inertie est symétrique et définie positive; elle admet donc une base de trois vecteurs propres orthogonaux $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3$. Leurs composantes par rapport à la base de départ sont données par la matrice de passage P (équation 5.10). Cette base est appelée base principale d'inertie, ses axes, axes principaux d'inertie. Dans cette base, la matrice d'inertie devient diagonale. Elle est appelée matrice principale d'inertie (équation 5.10). Les termes diagonaux I_1, I_2, I_3 sont appelés moments principaux d'inertie.

$$[J_0] = \begin{pmatrix} I_{ox} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{oy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{oz} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

$$\text{avec } \underbrace{\begin{matrix} I_{xy} = \sum m_i (y_i \cdot x_i) \\ I_{yz} = \sum m_i (y_i \cdot z_i) \\ I_{xz} = \sum m_i (z_i \cdot x_i) \end{matrix}}_{\text{Produits d'inertie}} \quad \underbrace{\begin{matrix} I_{ox} = \sum m_i (y_i^2 + z_i^2) \\ I_{oy} = \sum m_i (x_i^2 + z_i^2) \\ I_{oz} = \sum m_i (y_i^2 + x_i^2) \end{matrix}}_{\text{Moments d'inertie}}$$

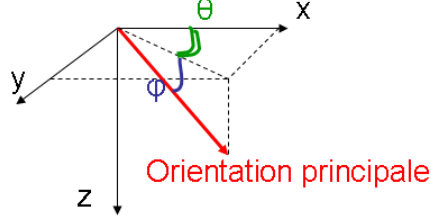


FIG. 5.2: Orientation de l'axe principal d'inertie de la particule (vecteur rouge) dans le repère de l'image.

$$P = \underbrace{\begin{pmatrix} u_{11} & u_{21} & u_{31} \\ u_{12} & u_{22} & u_{32} \\ u_{13} & u_{23} & u_{33} \end{pmatrix}}_{\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3} [J_0] = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

Orientation des particules

À partir de la matrice de passage P et des moments principaux d'inertie I_1, I_2, I_3 , nous déterminons l'orientation moyenne des particules.

Tout d'abord, l'axe principal d'inertie est déterminé. Il correspond à l'axe dont le moment principal d'inertie est le plus important, c'est à dire celui dont la valeur numérique est la plus grande. Ensuite, l'orientation de l'axe principal d'inertie est calculée dans la base composée des axes xyz de l'image à partir de la matrice P (équation 5.10). Elle est mesurée par les angles d'Euler θ et φ dans le repère de l'image (figure 5.2). Les angles d'Euler θ et φ sont calculés directement à partir de la projection du vecteur directeur \vec{u}_i de l'axe principal d'inertie d'inertie i dans le repère orthonormé de l'image (équations 5.11 et 5.12).

$$\theta = \arctan\left(\frac{u_{i2}}{u_{i1}}\right) \quad (5.11)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{(u_{i1})^2 + (u_{i2})^2}}{u_{i3}}\right) \quad (5.12)$$

Paramètres de distribution de masse

Définitions Les paramètres de distribution de masse correspondent à la valeur des moments principaux d'inertie. Ils rendent compte de la distribution

de masse de l'objet et sont caractéristiques de sa forme lorsque la masse est répartie uniformément dans l'objet.

Si les trois valeurs propres sont égales, la distribution de la masse est isotrope, le système étudié est sphérique. Si deux valeurs propres sont égales, alors la distribution de la masse est cylindrique. Si les trois valeurs sont différentes, aucune hypothèse de symétrie n'est possible.

Nous normalisons les valeurs propres des axes principaux d'inertie (équation 5.13), de manière à obtenir des paramètres de forme originaux λ_i indépendants du volume de l'objet.

$$\lambda_i = \frac{I_i}{(I_1 + I_2 + I_3)} \text{ avec } i = 1, 2, 3 \quad (5.13)$$

Les moments d'inertie normalisés présentent des paramètres de forme possédant une riche interprétation physique. En effet, ils permettent d'estimer la ressemblance d'un objet aux formes de distribution connues :

- la distribution de masse sphérique
- la distribution de masse cylindrique :
 - de type filaire
 - de type plan

De plus, ils présentent des propriétés géométriques intéressantes. Par définition, les moments d'inertie normalisés ont une somme égale à 1 (équation 5.14), et il existe une relation d'ordre entre eux (équations 5.15). Aussi l'étude de deux paramètres est elle suffisante pour décrire entièrement la distribution de masse de l'objet.

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \quad (5.14)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (5.15)$$

À partir de la définition des moments d'inertie et des équations 5.13, 5.14, et 5.15, on peut déduire les inégalités 5.16 et 5.17 (démonstration en annexe E).

$$\forall i, \lambda_i \leq 0,5 \quad (5.16)$$

$$\lambda_2 \geq 0,5(1 - \lambda_1) \quad (5.17)$$

Le graphe des valeurs propres normalisées À partir des équations 5.13, 5.14, 5.15 et des inégalités 5.16, 5.17, il est possible de tracer le graphe des valeurs prise par λ_1 en fonction de celles de λ_2 .

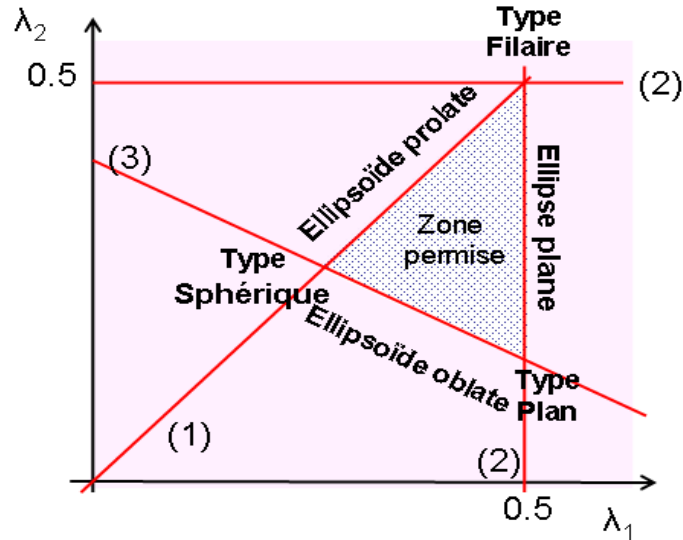


FIG. 5.3: Graphe théorique présentant les valeurs de λ_1 en fonction de λ_2

Le graphe obtenu (figure 5.3) représente en rouge le tracé des équations suivantes : l'inégalité 5.16 est représentée par les droites horizontale et verticale 2, la droite oblique 1 correspond à l'inégalité 5.13, enfin l'inégalité 5.17 est tracée par la droite 3.

Une fois toutes les relations entre les valeurs propres normalisées représentées, nous obtenons une *zone permise* de forme triangulaire. Ainsi tout système continu ou discret (points pesants) peut être reporté par un point à l'intérieur de ce triangle.

L'étude de ce graphe, permet de déduire de riches informations sur la forme des objets pouvant y être projetés.

Nous décrivons la forme connue des objets en fonction des zones du triangle (dans le sens anti-trigonométrique)

- La forme de distribution de masse sphérique correspond au point : $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{3}$.
- La forme de distribution de masse cylindrique de type filaire correspond au point : $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{2}$.
- La forme de distribution de masse cylindrique de type plan correspond au point : $\lambda_1 = \frac{1}{2}$ et $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{4}$.

À l'intérieur du triangle la forme des objets varie continûment. Le long de ses arêtes les formes sont également définies. Il s'agit d'ellipsoïdes oblates (c'est à dire aplatis), d'ellipses planes et d'ellipsoïdes prolates (c'est à dire allongés).

Mise en oeuvre

Le calcul de la matrice d'inertie de chaque particule a été implémenté sur Aphelion©. Un fichier texte contenant l'ensemble des matrices d'inertie pour les particules intermétalliques d'un état de déformation donné, est créé. La diagonalisation de la matrice est réalisée à l'aide d'un code écrit sous MATLAB©. En effet, MATLAB© est un logiciel dédié au calcul matriciel et il nous permet d'obtenir très rapidement la matrice de passage, les moments principaux d'inertie, ainsi que le calcul des angles θ et φ .

Les temps de calcul pour une population de 18.000 particules sur un PC AMD Athlon 2600+, 2Go de RAM sont de 17.011 sec pour l'algorithme de calcul de la matrice d'inertie, et d'environ 4 sec pour le programme écrit sur MATLAB©.

5.2 Caractérisation spectrale

La caractérisation spectrale est couramment utilisée dans le cadre de l'analyse de texture. Le travail de Aubert et Jeulin est un exemple intéressant [4]. Elle est également appliquée à la caractérisation et classification des formes bidimensionnelles. L'ouvrage [22] de L. da Fontoura Costa et R.C.Jr.Marcondes en montre différentes applications.

La caractérisation spectrale de la forme des intermétalliques correspond au calcul d'un graphe qui représente une série de mesures d'un paramètre de forme pour plusieurs itérations d'une transformation effectuée sur chaque particule [18] [85].

Les mesures sont réalisées à la suite de transformations de l'objet. Nous proposons deux types de transformations. Tout d'abord à partir du calcul de la fonction distance, ensuite par des transformations combinant les opérateurs de morphologie mathématique d'érosion et de dilatation : l'ouverture et la fermeture morphologique.

5.2.1 Le graphe des distances euclidiennes

Principe

Comme pour l'étude de l'histogramme des distances vu au chapitre 4, le graphe des distances euclidiennes est mesuré sur l'image à partir de la fonction distance section 4.1.1 [85]. La fonction distance D d'une image binaire I associée à chaque voxel x de l'objet égal à 1, la distance au voxel du fond y le plus proche dont la valeur est égale à zéro, elle est définie par l'équation

Demi Distance au fond en μm	0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5
Valeur de l'histogramme	0,94540	0,04898	0,00524	0,00036	$1,610^{-5}$	510^{-7}

TAB. 5.3: Moyennes des histogrammes des distances euclidiennes pour les particules de la phase au fer de AA5182

suivante :

$$[D(I)](x) = \min \{d(x, y) | I(y) = 0\}$$

La distance utilisée pour le calcul du graphe des distances est la distance euclidienne d_e définie par l'équation 5.18.

$$d_e [(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)] = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (5.18)$$

Mise en oeuvre et interprétations

L'histogramme des distances est réalisé avec Aphelion©. Chaque particule intermétallique est caractérisée par une courbe qui correspond à l'histogramme de la fonction distance euclidienne dans la particule.

L'origine du graphe correspond au pourcentage de voxels appartenant à la surface de l'objet. La valeur extrême atteinte par l'histogramme correspond à la demi épaisseur de l'objet étudié.

Dans le cas des particules intermétalliques de type $Al_x(Fe, Mn)$ contenues dans l'alliage d'aluminium 5182 cet histogramme est très particulier. En effet, le tableau 5.3 correspond à la moyenne pour chaque classe de distance, des graphes des distances obtenus sur environ 5000 particules de la phase au fer mesurées sur l'alliage déformé à 10%. Nous constatons que les particules intermétalliques sont toutes de très faibles épaisseurs inférieures à $8,4\mu m$. Ainsi les particules intermétalliques contenues dans AA5182 ont des formes, qui bien que complexes, représentent des enchevêtrements de *plans* caractéristiques de leur formation au niveau des joints de grains de l'aluminium au moment de la solidification de l'alliage.

Les particules intermétalliques, quelque soit leur dimension, ont une demi épaisseur qui reste quasi constante, comprise entre $0,7\mu m$ et $3,5\mu m$. La majorité d'entre elles sont des particules peu épaisses dont les voxels la constituant sont situés sur sa surface (94,5% des voxels constituant les phases au fer ont une distance comprise entre 0 et $0,7\mu m$).

5.2.2 Granulométrie

Dans la littérature, la granulométrie est utilisée pour la caractérisation de texture [4], ou comme descripteur de la forme d'objets [47]. Pour la caractérisation des particules intermétalliques de la phase au fer contenues dans les alliages légers d'aluminium, nous utilisons la deuxième approche en ajoutant une information complémentaire consistant à superposer le nombre de composantes connexes à la granulométrie obtenue par ouverture morphologique.

Nous rappelons tout d'abord la définition de la granulométrie, puis nous présentons les granulométries mises en oeuvre dans le cadre de la thèse.

Définition

La granulométrie d'un ensemble X , est définie comme une transformation morphologique T_λ de paramètre de taille λ satisfaisant les 3 axiomes suivants (définie par G.Matheron [59] [60]) :

- la transformation morphologique doit être anti-extensive :

$$T_\lambda(X) \subset X, \quad \forall \lambda > 0$$

- la transformation morphologique doit être croissante :

$$Y \subset X \Rightarrow T_\lambda(Y) \subset T_\lambda(X)$$

- Si deux transformations de l'image de paramètres λ_1 et λ_2 sont appliquées, le résultat doit être indépendant des opérations, il doit en outre être identique à celui obtenu après la transformation de l'image par le plus grand des 2 paramètres :

$$T_{\lambda_1}(T_{\lambda_2}(X)) = T_{\lambda_2}(T_{\lambda_1}(X)) = T_{\sup \lambda_1 \lambda_2}(X)$$

Mesure de la granulométrie et fonction de distribution

La granulométrie se calcule à l'aide d'une pyramide de filtres dont chaque élément est constitué par une transformation morphologique T de taille λ donnée [84] [18]. La taille correspond au facteur d'homothétie portant sur l'élément structurant mis en jeu. À la sortie de chaque filtre la mesure de Lebesgue de l'ensemble X est calculée. Pour une image tridimensionnelle la mesure de Lebesgue de X correspond à la mesure de son volume $V_\lambda(X)$. La fonction de distribution est alors définie par la quantité :

$$F_\lambda = 1 - \frac{V_\lambda(X)}{V_0(X)}$$

Le principal intérêt de l'utilisation de la granulométrie est d'obtenir une information sur la répartition de l'ensemble étudié, en utilisant un tamis de plus en plus fin (représenté par les opérations morphologiques).

Il existe différents types de granulométries en fonction des transformations morphologiques appliquées à l'image : granulométrie par ouverture, granulométrie par fermeture, pseudo-granulométrie par dilatation, et pseudo-granulométrie par érosion.

Dans le cas de l'analyse des particules intermétalliques de la phase au fer nous réalisons une granulométrie locale, c'est à dire que chaque particule est considérée comme un ensemble sur lequel nous appliquons une pyramide de transformations morphologiques. Les opérations morphologiques sont réalisées comme si la particule étudiée était seule dans une image de dimensions très grandes devant celles de sa boîte de Feret¹.

Granulométrie par ouverture

La granulométrie par ouverture consiste à appliquer à l'image des transformations à base d'ouvertures morphologiques [18] [85].

Nous présentons d'abord l'ouverture morphologique, ainsi que la mesure du nombre de composantes connexes. Puis nous analysons l'intérêt de la granulométrie par ouverture superposée à la mesure du nombre de composantes connexes.

Définition de l'opération d'ouverture morphologique L'opération d'ouverture morphologique consiste à dilater une image après qu'elle ait été érodée de manière à essayer de se rapprocher au mieux de l'image originale [84] [83].

L'ouverture γ d'une image I par un élément structurant B est notée $\gamma_B(I)$ (équation 5.19). Ainsi le résultat de l'ouverture de I par B dépend de l'origine de l'élément structurant.

$$\gamma_B(I) = \delta_{\tilde{B}}[\varepsilon_B(I)] \quad (5.19)$$

L'ouverture morphologique d'un ensemble X de I par un élément structurant B correspond à l'ensemble des positions que peut prendre B , tel que celui-ci reste totalement inclus dans X :

$$\gamma_B(X) = \cup \{B | B \subseteq X\}$$

¹La boîte de Feret correspond à la boîte englobante de la particule dont les faces sont parallèles à celles de l'image.

Nombre de composantes connexes L'ouverture morphologique d'un ensemble X se traduit par la suppression des structures de la forme ayant des dimensions inférieures à celle de l'élément structurant. L'ouverture morphologique permet également la séparation de l'ensemble X en plusieurs parties, lorsque celui-ci est composé de noeuds de taille inférieure à celle de l'élément structurant.

Au cours de la granulométrie par ouverture, il paraît donc intéressant de mesurer le nombre de sous ensembles créés par chaque opération d'ouverture. Le nombre de composantes connexes en fonction du pas d'ouverture nous permet d'évaluer le nombre de zones plus fragiles de la particule intermétallique et d'estimer le nombre de fragments susceptibles d'apparaître au cours du laminage.

Mise en oeuvre La mesure de la granulométrie par ouverture ainsi que la mesure du nombre de composantes connexes ont été implémentées sur Aphelion© en utilisant la fonction d'ouverture morphologique déjà implantée dans le logiciel.

Pour chaque particule de la base de donnée, une image I est créée de dimension égale à celle de sa boîte de Feret. Le volume de la particule et le nombre de sous ensembles connexes sont mesurés pour chaque opération d'ouverture de taille croissante, en utilisant au pas $\lambda + 1$ l'érosion de l'image obtenue au pas λ [85] (conservée en mémoire à chaque itération) :

$$\gamma_{(\lambda+1)B}(I) = \delta_{(\lambda+1)B} [\varepsilon_B (\varepsilon_{\lambda B} (I))]$$

Pour chaque pas, le nombre de composantes connexes est mesurée en utilisant un algorithme d'étiquetage avec gestion d'une table d'équivalence. Chaque ensemble de l'image est labélisé avec des étiquettes différentes. La relation de voisinage choisie pour agréger ou non deux sous ensembles est un voisinage de type V6.

Propriétés La granulométrie par ouverture possède des caractéristiques particulières : ainsi le point d'inflexion de la courbe correspond à la demi épaisseur moyenne de la particule étudiée. La forme de la courbe est caractéristique de la forme de l'objet (mais la réciproque n'est pas vraie).

Granulométrie par fermeture

La granulométrie par fermeture consiste à appliquer à l'image des transformations à base de fermeture morphologique.

Définition de l'opération de fermeture morphologique L'opération de fermeture morphologique consiste à éroder une image après qu'elle ait été dilatée de manière à essayer de se rapprocher au mieux de l'image originale [84] [83].

La fermeture morphologique ϕ d'une image I par un élément structurant B est notée $\phi_B(I)$. Elle est définie comme étant la dilatation de I par B suivie de l'érosion par le transposé de l'élément structurant \check{B} (équation 5.20). Ainsi le résultat de la fermeture de I par B dépend de l'origine de l'élément structurant.

$$\phi_B(I) = \varepsilon_{\check{B}} [\delta_B (I)] \quad (5.20)$$

La fermeture morphologique d'un ensemble X de I par un élément structurant B correspond à l'ensemble des positions que peut prendre B tel que celui-ci reste totalement inclus dans X^c :

$$\phi_B(X) = [\cup \{B | B \subseteq X^c\}]^c$$

Propriétés la granulométrie par fermeture La fermeture morphologique d'un objet par un élément structurant convexe de taille croissante, permet de remplir les concavités de la forme jusqu'à l'obtention de son enveloppe convexe. La granulométrie par fermeture est donc une fonction décroissante, qui présente des paliers correspondant au remplissage des concavités de dimension proportionnelle à celle du pas de fermeture. La granulométrie par fermeture atteint un palier stable dès que toutes les concavités ont été bouchées, et que l'enveloppe convexe a été atteinte. Plus la forme est convexe plus la granulométrie par fermeture atteint le palier rapidement. L'allure de la courbe obtenue est caractéristique de la forme étudiée.

Mise en oeuvre La mesure de la granulométrie par fermeture a été implémentée sous Aphelion© en utilisant la fonction de fermeture morphologique déjà implantée dans le logiciel.

Pour chaque particule de la base de donnée, une image I est créée de dimension égale à celle de sa boîte de Feret dilatée par l'élément structurant isotrope B (octaèdre de taille λ). Le volume de la particule est mesuré pour chaque opération de fermeture morphologique de taille croissante, en utilisant au pas $\lambda + 1$ l'image obtenue au pas λ .

5.3 Etude sur la courbure locale à la surface des particules

Les particules intermétalliques de la phase au fer contenues dans les alliages d'aluminium 5182 sont de formes complexes. L'étude de la courbure locale à la surface des particules semble intéressante pour appréhender les relations mécaniques à l'interface matrice particule.

En analyse d'images, l'étude de la courbure est utilisée pour mesurer les intégrales de la courbure totale qui présentent un caractère topologique, et les intégrales de la courbure moyenne qui présentent un caractère métrique. Leur calcul est estimé par des méthodes stéréologiques présentées dans l'ouvrage de Ohser et Mückilich au chapitre 4 pages 133-140 [70].

L'étude de la courbure trouve aussi de nombreuses applications en synthèse d'images. Les études menées tentent de caractériser des surfaces discrètes par la mesure de la courbure locale [9] [55] [86]. Ces méthodes sont basées sur un maillage triangulaire de la surface [52][79].

En métallurgie, les études menées par Mendoza, Alkemper et Voorhees [63] [64] sur l'étude des histogrammes des courbures locales pour suivre l'évolution des dendrites d'alliage au moment de la solidification sont très intéressantes. Une application de ces travaux à l'étude des particules intermétalliques semble appropriée.

Nous présentons dans ce paragraphe l'étude de la courbure locale à la surface des intermétalliques. Nous montrons tout d'abord les principes de calcul de la courbure en un point d'une surface. Nous définissons les mesures de courbure moyenne et de courbure totale. Puis nous présentons la mise en oeuvre de la mesure de la courbure à l'aide du logiciel de maillage Amira[®]. Enfin, nous présentons le graphe kmin-kmax ses propriétés et sa mise en oeuvre.

5.3.1 Principe théorique de calcul de la courbure

La courbure d'une surface

Soit une surface S définie dans l'espace \mathbb{R}^3 et un point x appartenant à S . On définit en x le vecteur normal \vec{n} à la surface S . Tout plan P contenant \vec{n} coupe S selon une courbe C . On calcule pour tout les plans P_i le rayon de courbure r_i des C_i en x . Parmi les rayons r_i , les rayons de courbure minimum R_{min} et maximum R_{max} sont choisis. Ils définissent les courbures (inverse du rayon) maximale k_{max} et minimale k_{min} appelées courbures principales.

La courbure moyenne

La courbure moyenne H_3 est définie comme la moyenne des courbures principales (équation 5.21). Elle présente un caractère métrique.

$$H_3(x) = \frac{1}{2} (k_{max} + k_{min}) \quad (5.21)$$

L'intégrale de la courbure moyenne consiste à calculer la courbure moyenne en tout point de la surface S d'un objet X , elle est définie par l'équation 5.22.

$$H = \int_S H_3(S) dS \quad (5.22)$$

La courbure totale

La courbure totale ou courbure de Gauss est définie comme le produit des courbures principales (équation 5.23).

$$K(x) = (k_{max} \times k_{min}) \quad (5.23)$$

L'intégrale de la courbure totale consiste à calculer la courbure totale en tout point de la surface S d'un objet X , elle est définie par l'équation 5.24. Elle présente un caractère topologique, c'est à dire qu'elle peut être reliée directement à la forme de l'objet. Par exemple un ensemble homéomorphe à une sphère possède une intégrale à la courbure de Gauss égale à 4π .

$$K = \int_S K(S) dS \quad (5.24)$$

5.3.2 Maillage et calcul de la courbure avec Amira[®]

Le calcul de la courbure locale a été effectué à l'aide du logiciel Amira[®]. Les courbures principales à la surface de la particule sont calculées à partir du maillage réalisé par le logiciel. Nous présentons tout d'abord la méthode de maillage appliquée par Amira[®], puis nous montrons le principe de calcul de la courbure, enfin nous montrons la mise en oeuvre des mesures des courbures principales à partir de la base de données au format tks.

Le maillage

Le maillage de la surface d'une image est couramment utilisé dans le domaine des matériaux, pour réaliser une analyse mécanique d'un objet directement à partir d'images tridimensionnelles. La difficulté du maillage réside

dans la technique choisie pour mailler la surface. L'ouvrage de Frey et Georges [30] présente une synthèse sur les problèmes de construction de triangulation et de maillage.

Les méthodes de maillage se classent en deux familles :

- Les méthodes de maillage structuré. Elles sont réalisables sur des domaines où la géométrie de l'objet est proche d'une géométrie simple à mailler par paramétrisation des coordonnées des noeuds. Le choix des éléments qui constituent le maillage (rectangles, triangles, polyèdres...) dépend de la géométrie du domaine à mailler. Cette méthode ne peut pas être appliquée pour mailler un domaine polygonal quelconque, comme celui des particules intermétalliques.
- Les méthodes de maillage non structuré. Elles sont réalisables sur des géométries complexes éloignées des géométries simples par l'utilisation d'un treillis régulier de points. On dénombre 3 catégories de méthodes de génération de maillage non structuré :
 - La décomposition spatiale.
 - Les méthodes frontales.
 - La triangulation de Delaunay [29].

Le maillage dans Amira[®]

La méthode utilisée dans le logiciel Amira[®] est la méthode frontale. L'idée des méthodes frontales est de mailler le domaine par itérations successives en faisant propager vers l'intérieur de la surface un front² initialisé sur la frontière du domaine, jusqu'à son recouvrement complet. L'algorithme des méthodes frontales est présenté ci dessous :

1. Initialisation du front sur la périphérie du domaine. Le front est constitué de segments en 2D et de triangles en 3D.
2. Mise en ordre du front.
3. Sélection du premier élément du front (élément candidat).
4. Calcul de la position du noeud idéal, c'est à dire sélection d'un point qui connecté au segment formerait un triangle correspondant aux critères de taille et de qualité choisis.
5. Recherche des noeuds proches de ce noeud idéal.
6. Classement des noeuds sélectionnés.
7. Création d'un élément valide avec le premier noeud qui le permet.
8. Mise à jour du front.

²Le front désigne la frontière entre la zone maillée et la zone non maillée.

9. Si le front n'est pas vide retour en 3.

La méthode de maillage non structuré utilisée est basée sur l'algorithme du *Marching Cube* [56]. À partir de l'image 3D, l'algorithme discrétise la surface de l'objet en triangles à mailler. Ensuite à partir de la surface discrétisée, le volume est maillé en tétraèdres linéaires en utilisant une méthode frontale implémentée dans Amira[®] [1]. Cette méthode permet de faire varier la taille des éléments dans le modèle sans créer de discontinuité. Le nombre d'éléments triangulaires définissant une surface va dépendre de sa complexité, et sera optimisé pour obtenir une bonne définition et un faible nombre de degrés de liberté.

L'algorithme de type marching cubes permet de réaliser un maillage géométrique triangulaire de la surface à partir d'un nuage de points de la surface et de calculer la normale à la surface en chaque sommet du triangle, il se déroule de la manière suivante :

1. Localisation de la surface dans un cube imaginaire composé de huit points.
2. Calcul de la normale.
3. Passage au cube suivant.

La localisation de la surface est obtenue à partir d'un index créé dans un tableau précalculé des 256 configurations de polygones possibles ($2^8 = 256$) dans le cube formé. Chaque sommet reçoit une valeur scalaire correspondant à un bit. Le cube est donc représenté par un octet. Si la valeur scalaire est supérieure à la valeur de l'isosurface c'est à dire que le sommet est situé à l'intérieur de la surface, alors le bit correspondant est mis à un, sinon il est prend la valeur zéro. La valeur finale obtenue pour le cube après le test des huit points est l'index de la bonne configuration polygonale dans le tableau précalculé.

Finalement, chaque sommet des polygones générés est placé à sa position finale le long de l'arête du cube, en interpolant linéairement les deux valeurs scalaires connectées par cette arête.

Les 256 valeurs du tableau de configuration des polygones sont calculées par réflexion et symétrie à partir de 15 cas possibles référencés sur la figure 5.4.

Algorithme de simplification de surface

Le raffinement du maillage est obtenue par un algorithme d'effondrement des arêtes proposé par Hope en 1993 [38][37] (illustré sur la figure 5.5). Cet algorithme consiste à fusionner les deux extrémités des arêtes en un point,

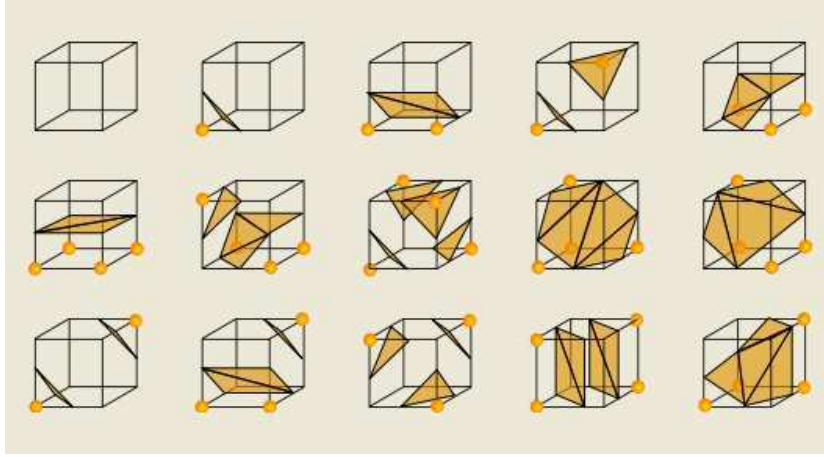


FIG. 5.4: Les 15 configurations possibles de triangles par application de l'algorithme des marching-cubes. Les points oranges représentent les sommets internes à la surface.

à partir d'un critère d'effondrement basé sur la minimisation de la fonction d'énergie. La fonction d'énergie prend en compte 2 paramètres :

- La distance du maillage simplifié au maillage original E_{dist} d'équation 5.25 où x_i représente les sommets du maillage original et S la surface du maillage simplifié et $d(x_i, S)$ la distance euclidienne de x_i à S .

$$E_{dist} = \sum d^2(x_i, S) \quad (5.25)$$

- L'amélioration éventuelle de la répartition spatiale des points E_{spring} d'équation 5.26, qui permet d'assurer que le maillage ne présente pas de fortes aspérités; (v_i, v_j) représente tous les couples de sommets du maillage simplifié.

$$E_{spring} = \sum d^2(v_i, v_j) \quad (5.26)$$

Paramètres de calcul de la courbure sous Amira[®]

Le calcul de la courbure dans Amira[®] est effectué à partir du maillage obtenu par la méthode du Marching-cubes. Ainsi les courbures principales vont être estimées soit pour chaque triangle de la surface, soit pour chaque noeud constituant le maillage. La méthode utilisée est présentée dans le manuel de Amira[®] aux pages 240-241 [1].

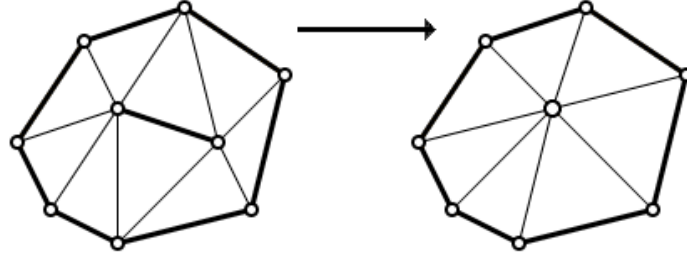


FIG. 5.5: Représentation de l’algorithme d’effondrement d’arêtes

L’algorithme consiste à approcher localement la surface par une forme quadratique. Les valeurs propres et les vecteurs propres de la forme quadratique correspondent aux valeurs des courbures principales ainsi qu’à leur direction.

Les paramètres de calcul de l’algorithme sont :

- Le nombre de voisins. Il détermine quels triangles sont considérés comme voisins du triangle sur lequel la courbure est calculée, ou quels noeuds sont considérés comme voisins du noeud considéré. Si le nombre de voisin est égal à un, alors seuls les triangles partageant une arête avec le triangle sur lequel est effectuée la mesure sont considérés comme voisins de ce triangle ou seuls les sommets directement reliés au noeuds courant sont pris en compte.
- Le nombre de couches. Il détermine combien de fois les valeurs de la courbure initiale, calculée pour un triangle ou un sommet sont moyennée par les valeurs des courbures des triangles voisins au premier ordre, ou des sommets. Plus la valeur du nombre de couche est importante plus la valeur de la courbure obtenue est lissée. Ce paramètre n’intervient qu’au niveau de la mesure de la valeur scalaire de la courbure et n’influe pas sur la direction des vecteurs de courbure.

Mise en oeuvre

À partir des particules contenues dans la base de données au format tks (propre au logiciel Aphelion©), il est possible de reconstituer les images binaires au format vtk de chaque intermétallique à l’aide d’une fonction écrite dans Aphelion©, puis de changer leur format en raw à l’aide d’un code écrit en C++.

Un code écrit par Nicolas Moulin [69], permet de générer automatiquement le calcul de la courbure sur un ensemble d’images de type raw contenues

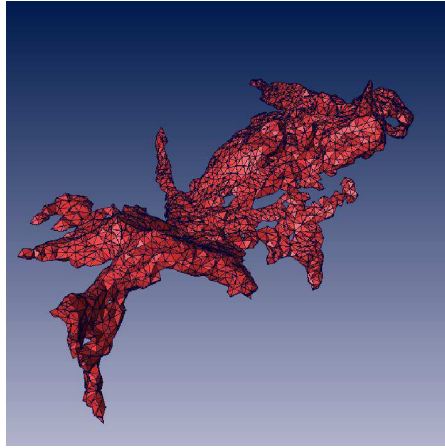


FIG. 5.6: Particule intermétallique 22 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% maillée avec Amira (Nicolas Moulin). Le nombre de facettes composant le maillage est égal à 8044.

dans un fichier, en sélectionnant les paramètres de calcul de la courbure.

Amira[®] fournit pour chaque facette de l'objet les coordonnées des trois noeuds composant le triangle, ainsi que les valeurs des courbures principales. Un programme de récupération des données écrit en C++ par Nicolas Moulin et moi même permet de récupérer pour chaque facette la surface du triangle ainsi que les courbures principales correspondantes dans un document de type texte.

Une étude sur des formes types de taille variable a été effectuée : cylindres, cylindre ayant subi une rotation de l'axe principal, sphères, ellipsoïdes, sur lesquels nous avons fait varier tous les paramètres : raffinement de maillage variant de $\{0; 1, 4; 2, 8\}$, nombre de voisins variant de $\{1; 6; 16\}$. Les paramètres finalement retenus sont un raffinement de maillage égal à 1, 4, un nombre de voisin de 6, et un nombre de couche est égal à 0 (figure 5.6).

Le temps nécessaire aux calculs de la courbure sur une base de données comportant 4921 images de particules au format raw est de 2h21 min. Les surfaces et volumes calculés pour les différentes valeurs de raffinement de maillage des sur objets numériques synthétisés et maillés, sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Cylindre	Cylindre tourné	Ellipsoïde	Tore
Aphelion©	volume	324109	324088	975733	1151976
	surface	26223,0	27452,9	53409,3	76637,6
raffinement :2,8	volume	328274	327698	989383	1168340
	surface	26928,6	26929,2	539323	77845
raffinement 2,0	volume	328520	328024	990032	1169135
	surface	26960,9	27142,1	54099	78073
raffinement 1,4	volume	328691	327890	990394	1169416
	surface	27572,4	27829,2	55620	79970
raffinement 0,0	volume	328918	328000	990371	1169213
	surface	28227,7	29818,8	58448	83872

On constate que le raffinement de maillage 1,4 permet d'approcher correctement les formes géométriques tout en ayant des temps de calcul raisonnables.

5.3.3 Le graphe k_{min} - k_{max}

Il est possible de quantifier les formes de l'interface objet-matrice en regardant les distributions des courbures à l'interface (k_{min} - k_{max}) pour différents objets. Les articles d'Alkemper Voorhes et Mendoza présentent l'utilisation de ce graphe pour la caractérisation de la croissance de dendrites au cours de la solidification d'un alliage cuivre aluminium [2] [87] [63] [64].

Propriétés et interprétations

Le graphe $k_{min} - k_{max}$ présenté dans l'article de référence de Besl et Jain en 1985 [9] présente les propriétés géométriques des portions d'interface (figure 5.7). La forme de l'interface peut être déterminée à partir des valeurs de k_{min} et de k_{max} (les exemples des différents types de géométries des portions d'interface sont illustrés sur les figures 5.8 et 5.9). Nous présentons ci-dessous les propriétés remarquables de ce graphe :

- Toutes les courbures doivent se situer à gauche de la droite correspondant à $k_{min} = k_{max}$. Toutes les portions d'interface qui appartiennent à cette droite ont une forme sphérique.
- Les portions d'interface planaires sont localisées à l'origine du graphe lorsque $k_{min} = k_{max} = 0$.
- Les portions d'interface cylindriques ont $k_{min} = 0$ ou $k_{max} = 0$ ($k_{min} = 0$ la portion prend la forme d'une vallée, si $k_{max} = 0$ elle prend la forme d'un pont).
- Les portions d'interface hyperboliques ou en forme de selle ont une valeur positive et l'autre négative de k_{min} et k_{max} .

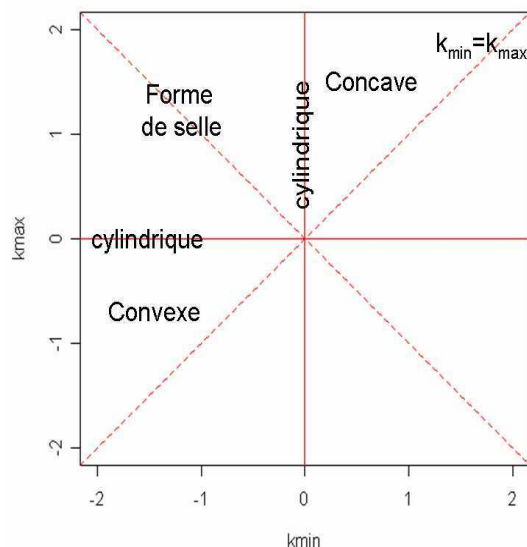


FIG. 5.7: Graphe de type k_{min} - k_{max} avec zone correspondant aux différents types de portion d'interface

- Si les deux courbures principales de l'interface sont positives, la portion d'interface est définie comme concave.
- Si les deux courbures principales sont négatives, la portion d'interface est convexe.

Mise en oeuvre : histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max}

Le graphe k_{min} - k_{max} représente chaque portion d'interface de l'objet comme un point. Dans le cas du maillage des particules intermétalliques le treillis obtenu comporte un grand nombre de facettes, de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers. Un histogramme bidimensionnel peut alors être utilisé pour exploiter correctement l'information.

Nous avons réalisé à partir des fichiers résultats (au format texte obtenus par Amira[®]) une fonction implémentée dans le logiciel R[©] réalisant d'une part le graphe k_{min} - k_{max} (voir illustration sur la figure 5.10), ainsi que l'histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} (figure 5.13). Nous avons ensuite créé une fonction dans R[©] pour établir successivement l'ensemble des histogrammes des particules intermétalliques.

Les intervalles des histogrammes bidimensionnels créés pour chaque particule intermétallique sont $[\min k_{min} - \max k_{min}]$ et $[\min k_{max} - \max k_{max}]$. Les valeurs $[\min k_{min} - \max k_{min}]$ et $[\min k_{max} - \max k_{max}]$ correspondent pour

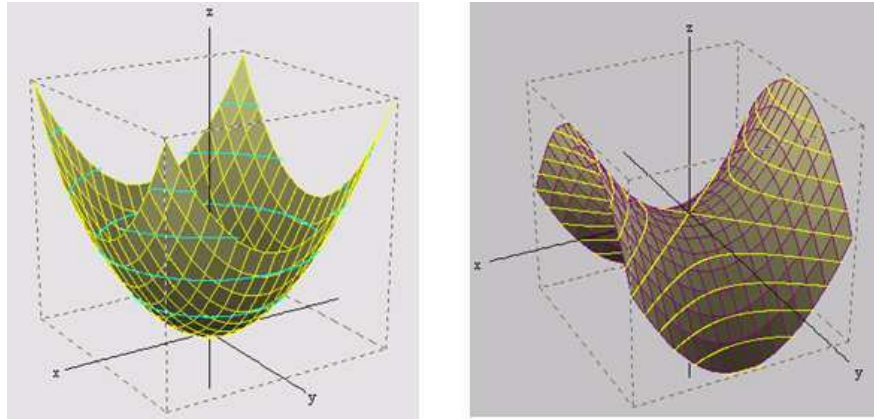


FIG. 5.8: Illustration des géométries d'interface en selle à droite et concave à gauche

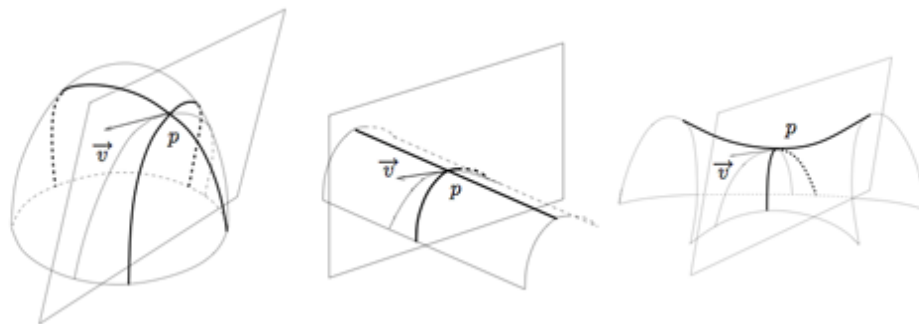


FIG. 5.9: Illustration des géométries d'interface typique au point p de l'interface.

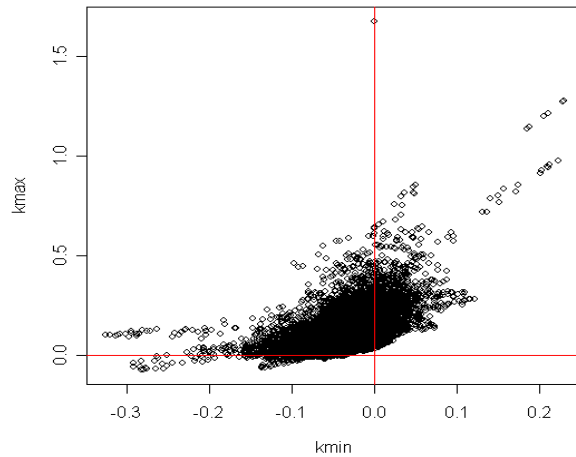


FIG. 5.10: Graphe k_{min} - k_{max} de la particule de la figure 5.6 .

l'ensemble de la population des intermétalliques aux maxima et minima des courbures principales. Les subdivisions n de l'abscisse et m de l'ordonnée du graphe sont fixées par l'utilisateur. Les résultats sont écrits dans un fichier texte pour chaque particule sous la forme d'une structure, comportant les valeurs prises par la matrice $m \times n$, et les bornes de l'histogramme.

Les histogrammes bidimensionnels calculés sont pondérés. Ainsi chaque facette est comptabilisée en fonction du pourcentage de la surface de l'objet qu'elle représente (voir illustration sur la figure 5.13).

Le temps nécessaire aux calculs de l'histogramme des courbures à partir des fichiers texte de 4921 images de particules au format raw est de 14 min.

5.4 Résultats

Nous présentons dans cette section les résultats de la caractérisation de la forme tridimensionnelle complexe de particules intermétalliques extraites de la base de données de la phase au fer de l'alliage d'aluminium 5182 déformé à 10%.

Nous avons choisi parmi les 4921 individus de la base de données 5 particules qui présentent des variations de forme intéressantes et pour lesquelles nous analysons successivement les résultats obtenus par :

- les caractérisations paramétriques reportées dans le tableau 5.4,

Mesures	V	S	I_s	I_c	L_g	IG_g	R_{max}	R_{norm}	λ_1	λ_2	θ	φ
n°22	17397	15238,9	0,010	0,005	150	101,6	1	0,0002	0,49	0,44	174,7	30,6
n°1448	2121	954,7	0,585	0,321	17	1,2	3	0,0533	0,47	0,36	81,9	8,4
n°3788	3484	2890,5	0,057	0,030	48	16,6	1	0,0012	0,49	0,27	80,5	36,5
n°4249	28619	21858,3	0,009	0,005	122	33,2	1	0,0002	0,40	0,35	136,7	43,5
n°4408	1290	1223,6	0,103	0,049	49	47,8	1	0,0033	0,50	0,49	172,0	38,8

TAB. 5.4: Résultats de la mesure des paramètres caractéristiques en voxels, sur différentes formes de particules intermétalliques de la phase au fer contenues dans AA5182

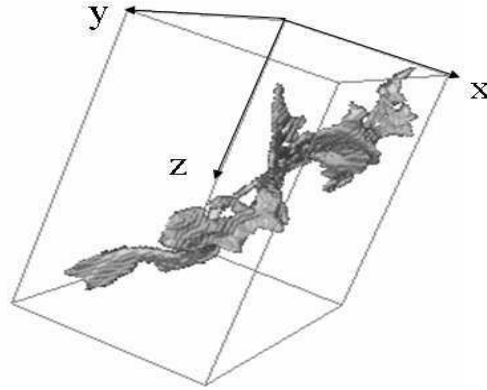


FIG. 5.11: Particule intermétallique 22 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% ($69 \times 145 \times 115 \mu m^3$ visualisée avec Aphelion©)

- les caractérisation spectrales illustrées par les figures 5.12, 5.15, 5.18, 5.21, 5.24
- ainsi que l'étude de l'histogramme bidimensionnel $k_{min}-k_{max}$ illustrées par les figures 5.13, 5.16, 5.19, 5.22, 5.25.

5.4.1 Particule n°22

Caractérisation paramétrique Les paramètres mesurés sur la particule 22 sont reportés dans le tableau 5.4.

Les très faibles valeurs des indices de forme I_c et I_s indiquent que la forme la particule 22 est très éloignée de la forme d'un cube ou d'une sphère. Nous remarquons également que les valeurs des indices de forme I_s et I_c sont très faibles, ce qui suggère que la particule 22 est essentiellement constituée en surface.

La forte valeur prise par IG_g supérieure à 100 montre que cette particule est très allongée, en outre les valeurs de λ_1 et λ_2 égales à 0,5 indiquent que la forme de la particule a une distribution de masse de type filaire.

Caractérisation spectrale La courbe de granulométrie par ouverture figure 5.12 présente un point d'inflexion pour un pas d'ouverture de 1,5 voxels soit $1,05\mu m$. L'épaisseur moyenne de la particule est donc égale à $2,1\mu m$ ce qui est très faible compte tenu du volume de la particule égal à $5967\mu m^3$, en effet la sphère qui présenterait un volume équivalent aurait un rayon égal à $11,25\mu m$. De plus, nous constatons que le nombre de composantes connexes augmente énormément au cours des pas ouverture (par un octaèdre de taille constante) de la particule 22. Il est égal à 9 pour un pas d'ouverture de 1, et à 15 pour un pas de 2. Ensuite il décroît progressivement. La particule est donc composée de plans qui sont déconnectés au fur et à mesure de la granulométrie.

La particule 22 est formée de plans d'épaisseurs variables présentant des zones plus fines (d'épaisseur inférieur à $1,4\mu m$). Physiquement, la particule 22 aura tendance à ce fragmenter au niveau de ces zones de fragilité.

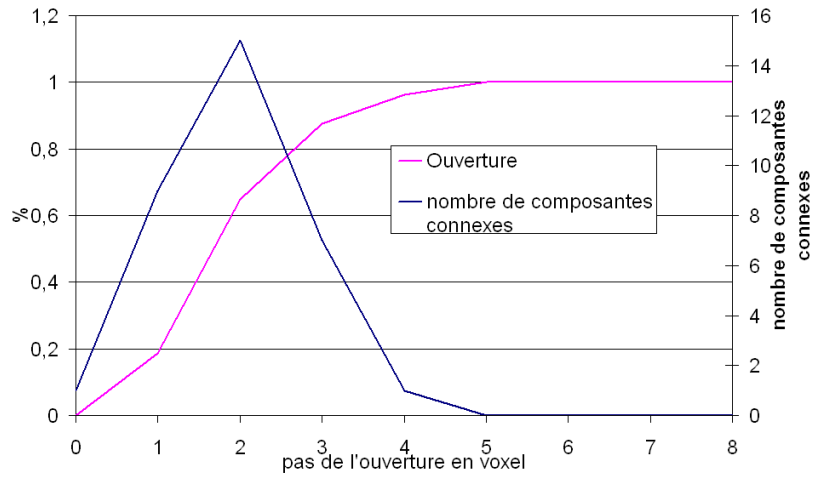
La courbe de granulométrie par fermeture est tout d'abord légèrement décroissante, ce qui suggère que la particule 22 n'a que de très faibles aspérités. À partir d'un pas de fermeture de 50 voxel, soit $35\mu m$, la courbe décroît beaucoup plus vite, indiquant qu'à cet échelle les concavités de la particule sont plus importantes. La particule 22 est donc composée d'un plan présentant un angle d'ouverture important.

Courbure locale L'histogramme de la courbure locale de la particule 22 présenté sur la figure 5.13 présente une concentration importante d'interfaces localisées : sur la droite $k_{max}=0$, sur la droite $k_{min}=0$, dans la zone des portions d'interface en selle, ainsi qu'un pic centré en zéro. Il suggère que la particule 22 possède un grand nombre d'interfaces cylindriques de type pont, ainsi qu'une part importante d'interfaces planaires. La particule est donc formée de plans et de branches présentant des intersections.

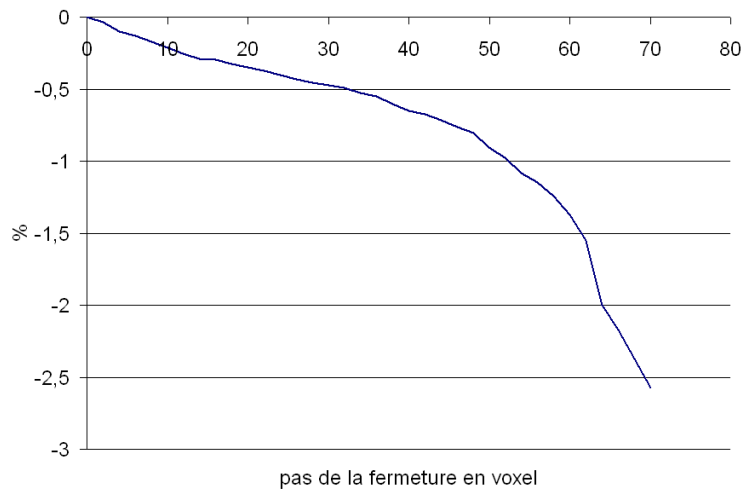
5.4.2 Particule n°1448

Caractérisation paramétrique Les paramètres mesurés sur la particule 1448 sont reportés dans le tableau 5.4.

Les faibles valeurs des indices de forme I_c et I_s indiquent que la forme de la particule 1448 est assez éloignée de la forme d'un cube ou d'une sphère.



(a)



(b)

FIG. 5.12: Analyse spectrale de la particule 22 extraite de la base de données des phases au fer de AA5182 à une déformation de 0.1 (a) Granulométrie par ouverture (b) Granulométrie par fermeture

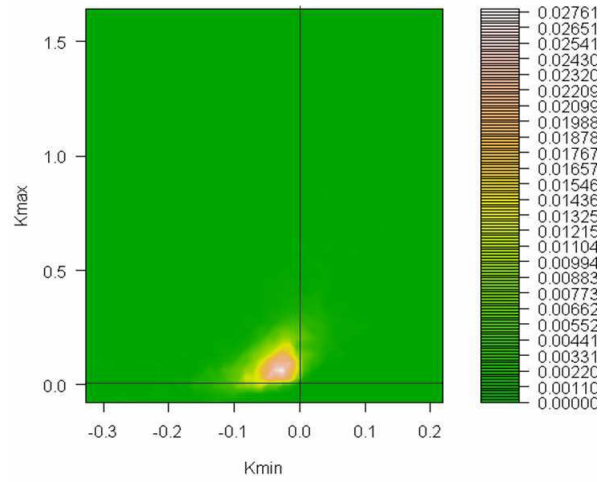


FIG. 5.13: Histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} de la particule 22.

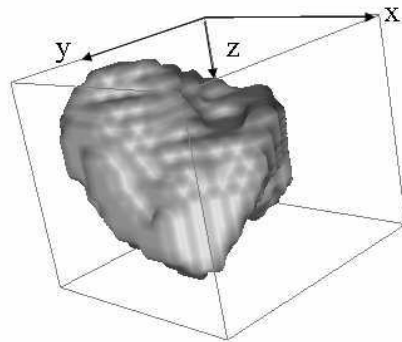


FIG. 5.14: Particule intermétallique 1448 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% (visualisée avec Aphelion©)

La particule est néanmoins compacte, les indices de formes ont une valeur relativement élevée.

La valeur relativement élevée de R_{max} égal à 3, indique que la particule est assez épaisse. En effet, une boule d'un rayon égal à 3 peut parcourir la particule 1448 en tout point de son pseudo squelette géodésique. Elle est donc constituée d'un coeur compact d'un volume au moins égal à 12 voxels.

La valeur de l'indice d'élongation IG_g égale à 1,2 montre que cette particule présente un très faible allongement, en outre les valeurs de $\lambda_1 = 0,47$ et $\lambda_2 \simeq 0,35$ indiquent que la forme de la particule a une distribution de masse de type ellipsoïde oblate.

Caractérisation spectrale La courbe de granulométrie par ouverture figure 5.15 présente un point d'inflexion pour un pas d'ouverture de 4 voxels soit $2,8\mu m$. L'épaisseur moyenne de la particule est donc égale à $5,6\mu m$. Elle est importante compte tenu du volume de la particule égal à $727,21\mu m^3$. En effet, la sphère qui présenterait un volume équivalent aurait un rayon égal à $8\mu m$. Nous constatons en outre, que le nombre de composantes connexes est constant. Il est égal à un quelque soit le pas de l'ouverture jusqu'à la disparition complète de celle-ci. La particule est donc composée par un ensemble presque convexe.

Physiquement, cette particule sera probablement plus difficile à fragmenter au cours du laminage.

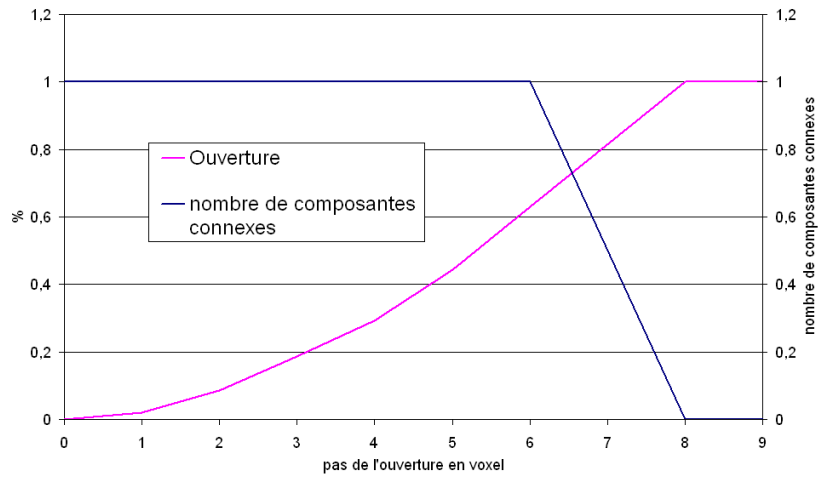
La courbe de granulométrie par fermeture est tout d'abord constante. Elle suggère que la particule 1448 est assez convexe. À partir d'un pas de fermeture de 40 voxels, soit $28\mu m$. La courbe décroît puis atteint un nouveau pallier. Elle présente donc une concavité d'angle d'ouverture important. La particule 1448 est donc compacte et en grande partie convexe.

Courbure locale L'histogramme de la courbure locale de la particule 1448, présenté sur la figure 5.16, suggère qu'elle possède quelques interfaces cylindriques de type vallée et de type en selle, ainsi qu'une part importante d'interface concave (vues par rapport à l'intérieur de l'enveloppe). La particule est donc majoritairement convexe.

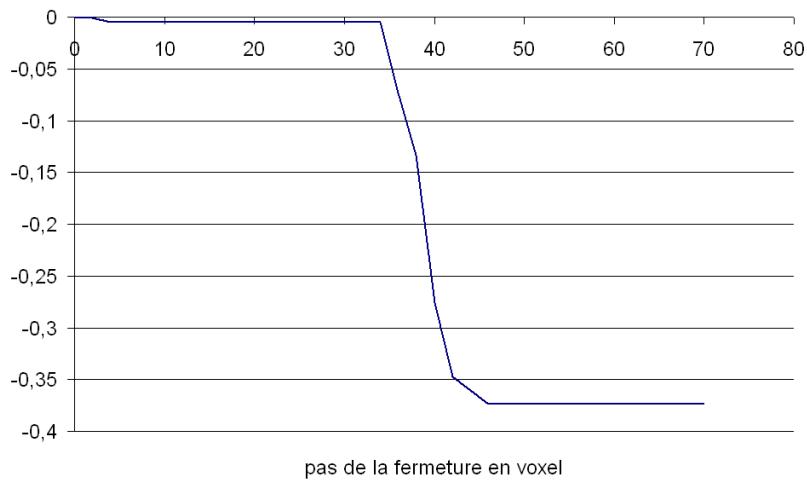
5.4.3 Particule n°3788

Caractérisation paramétrique Les paramètres mesurés sur la particule 3788 sont reportés dans le tableau 5.4.

Les très faibles valeurs des indices de forme I_c et I_s indiquent que la forme la particule 3788 est très éloignée de la forme d'un cube ou d'une sphère. Nous



(a)



(b)

FIG. 5.15: Analyse spectrale de la particule 1148 extraite de la base de données des phases au fer de AA5182 à une déformation de 0.1 (a) Granulométrie par ouverture (b) Granulométrie par fermeture

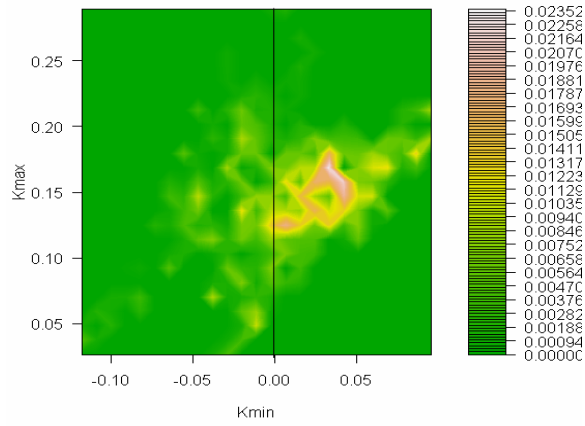


FIG. 5.16: Histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} de la particule 1448.

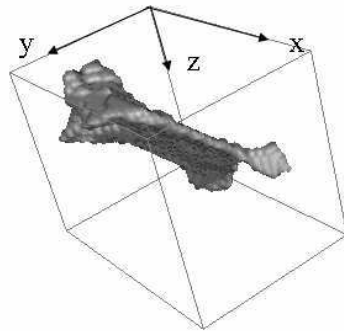


FIG. 5.17: Particule intermétallique 3788 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% (visualisée avec Aphelion©)

remarquons également que les valeurs des indices de forme I_s et I_c sont très faibles. La surface de la particule est donc importante en comparaison de son volume. La particule est constituée en surface. Elle est de faible épaisseur.

La valeur prise par IG_g égale à 16,6 montre que cette particule est allongée. En outre, les valeurs de $\lambda_1 = 0,49$ et $\lambda_2 \simeq 0,27$ indiquent que la forme de la particule a une distribution de masse de type plan.

Caractérisation spectrale La courbe de granulométrie par ouverture (figure 5.18) présente un point d'inflexion pour un pas d'ouverture de 1,5 voxels soit $1,05\mu m$. L'épaisseur moyenne de la particule est donc égale à environ $2\mu m$, ce qui est très faible compte tenu du volume de la particule égal à $1195\mu m^3$. En effet, la sphère qui présenterait un volume équivalent aurait un rayon égal à $6,6\mu m$. De plus, nous constatons que le nombre de composantes connexes augmente dans un premier temps. Il est égal à 2 pour un pas d'ouverture de 1, et à 4 pour un pas de 2. Ensuite, il décroît progressivement. La particule est donc composée de plans d'épaisseur variable, entre 2 et 4 voxels.

La courbe de granulométrie par fermeture décroît tout d'abord. Pour de faibles pas de fermeture les petites concavités sont donc bouchées. Puis, elle devient constante entre 15 et 35 voxels ce qui suggère que la particule ne possède pas de concavités d'angle d'ouverture moyen. À partir d'un pas de fermeture de 35 voxels, soit $24,5\mu m$, la courbe décroît. Elle possède donc une concavité importante présentant un grand angle d'ouverture qui n'est pas atteint par la courbe.

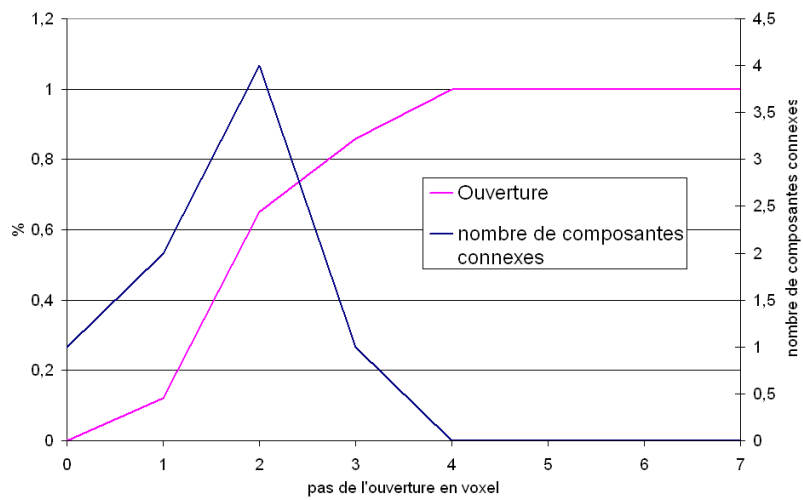
Courbure locale L'histogramme de la courbure locale de la particule 3788 (figure 5.19), présente un pic de densité important de portions d'interfaces au environs du point (0,0), ainsi que sur la droite $k_{min} = 0$. Il suggère que la particule 3788 possède quelques interfaces cylindriques de type vallée, ainsi qu'une part importante d'interfaces planes correspondant au pic de l'histogramme. La particule est donc majoritairement plane. Elle possède également des portions d'interface de type cylindrique.

5.4.4 Particule n°4249

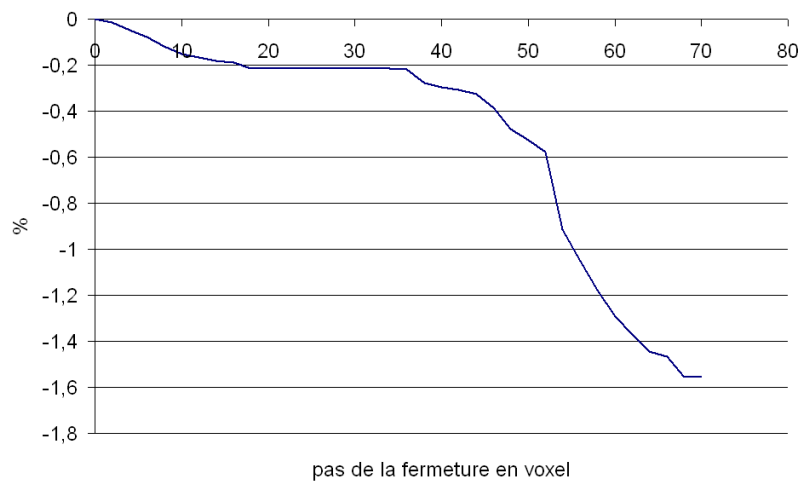
Caractérisation paramétrique

Les paramètres mesurés sur la particule 4249 sont reportés dans le tableau 5.4.

Les très faibles valeurs des indices de forme I_c et I_s indiquent que la forme la particule 4249 est très éloignée de la forme d'un cube ou d'une sphère. Nous remarquons également que les valeurs des indices de forme I_s et I_c , sont très



(a)



(b)

FIG. 5.18: Analyse spectrale de la particule 3788 extraite de la base de données des phases au fer de AA5182 à une déformation de 0.1 (a) Granulométrie par ouverture (b) Granulométrie par fermeture

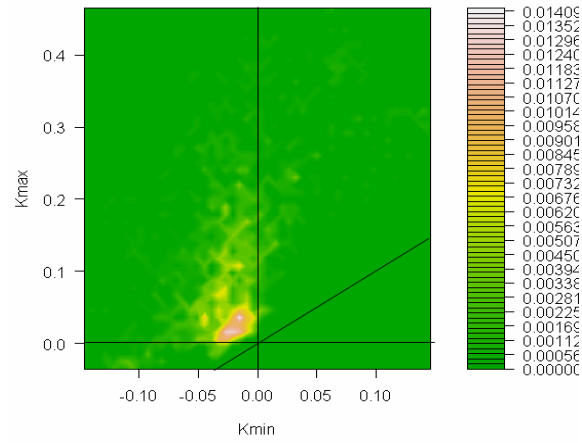


FIG. 5.19: Histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} de la particule 3788.

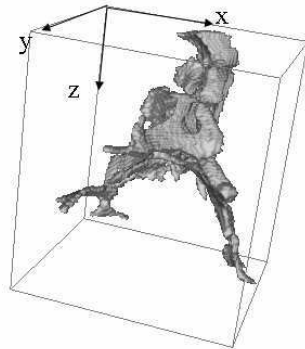


FIG. 5.20: Particule intermétallique 4249 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% (visualisée avec Aphelion©)

faibles. La surface de la particule est donc importante en comparaison de son volume. La particule est constituée en surface. Elle est de faible épaisseur

La valeur prise par IG_g égale à 33,2 montre que cette particule est assez allongée. De plus, les valeurs des valeurs propres normalisées sont : $\lambda_1 = 0,40$ et $\lambda_2 = 0,35$. La particule 4249 se situe au centre du triangle formé par le graphe λ_1 - λ_2 . Elle possède une distribution de masse particulière, éloignée des distributions de masse usuelles.

Caractérisation spectrale

La courbe de granulométrie par ouverture (figure 5.21), présente un point d'inflexion pour un pas d'ouverture de 1,5 voxels soit $1,05\mu m$. L'épaisseur moyenne de la particule est donc égale à $2\mu m$. Elle est très faible compte tenu du volume de la particule égal à $9816\mu m^3$. En effet, la sphère qui présenterait un volume équivalent aurait un rayon égal à $13,2\mu m$. De plus, nous constatons que le nombre de composantes connexes croît très vite pour de faible pas d'ouverture. Il est égal à 5 pour un pas d'ouverture de 1, et à 20 pour un pas de 2. Puis, il décroît progressivement. La particule est donc composée de parties qui sont déconnectées au fur et à mesure de la granulométrie. Ces parties sont reliées par des zones de faibles épaisseurs. Physiquement, cette particule présente de nombreuses zones de fragilité, notamment cinq zones particulièrement fines d'épaisseur inférieur à $0,7\mu m$.

La courbe de granulométrie par fermeture est décroissante. Elle suggère que la particule 4249 possède des concavités de différentes échelles remplies, au fur et à mesure, par les fermetures successives.

Courbure locale

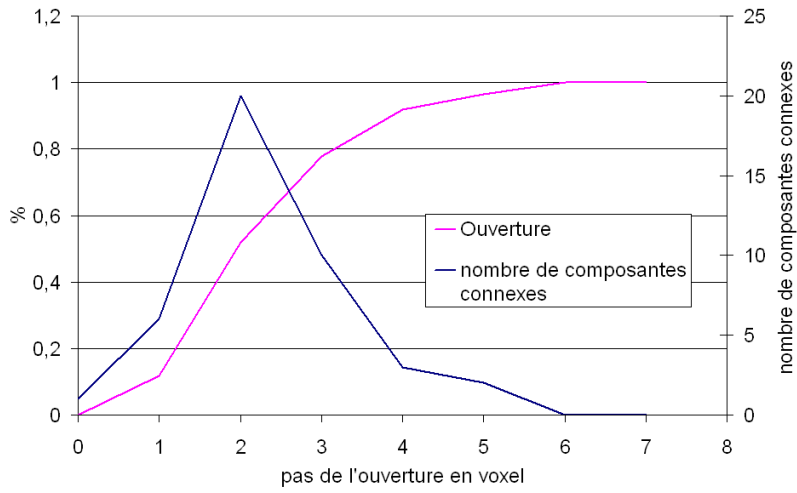
L'histogramme de la courbure locale (figure 5.19), suggère que la particule 4249 possède quelques interfaces cylindriques de type vallée et pont, et que les portions d'interface majoritaire ont une forme en selle. La particule 4249 est donc assez complexe. Elle est formée d'embranchements de plans et de branches, caractérisés par les portions d'interface en selle.

5.4.5 Particule n°4408

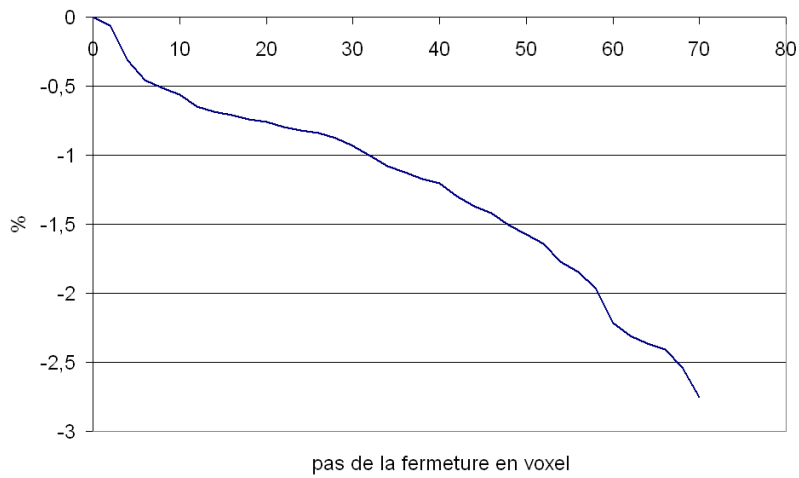
Caractérisation paramétrique

Les paramètres mesurés sur la particule 4408 sont reportés dans le tableau 5.4.

Les très faibles valeurs des indices de forme I_c et I_s indiquent que la forme la particule 4249 est très éloignée de la forme d'un cube ou d'une sphère.



(a)



(b)

FIG. 5.21: Analyse spectrale de la particule 4249 extraite de la base de données des phases au fer de AA5182 à une déformation de 0.1 (a) Granulométrie par ouverture (b) Granulométrie par fermeture

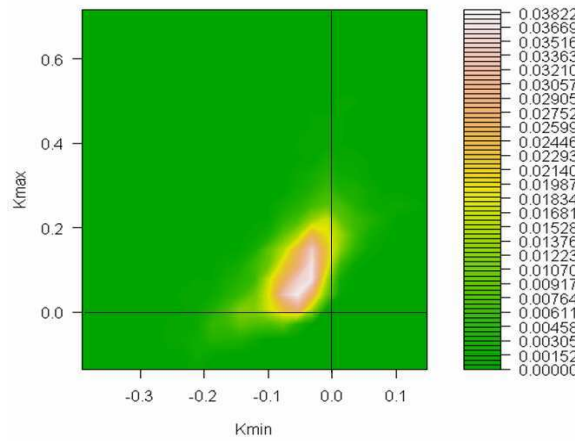


FIG. 5.22: Histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} de la particule 4249.

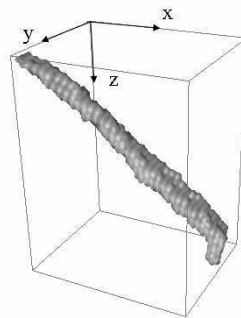


FIG. 5.23: Particule intermétallique 4408 (de la base de données) de la phase au fer contenue dans AA5182 déformé à 10% (visualisée avec Aphelion)

Nous remarquons également que les valeurs des indices de forme I_s et I_c sont faibles. La surface de la particule est donc importante en comparaison de son volume. La particule est constituée en surface. Elle est de faible épaisseur.

La valeur prise par IG_g égale à 47,8 montre que cette particule est allongée. Les valeurs de $\lambda_1 = 0,5$ et $\lambda_2 = 0,49$, indiquent que la particule 4408 possède une distribution de masse de type filaire.

Caractérisation spectrale

La courbe de granulométrie par ouverture (figure 5.24) présente un point d'inflexion pour un pas d'ouverture de 1,5 voxels soit $1,05\mu m$. L'épaisseur moyenne de la particule est donc égale à $2\mu m$ ce qui est très faible compte tenu du volume de la particule égal à $442\mu m^3$. De plus, nous constatons que le nombre de composantes connexes est constant et égal à 1 au cours de la granulométrie par ouverture de la particule. La particule est donc composée par un ensemble compact.

La courbe de granulométrie par fermeture décroît tout d'abord pour de très faibles pas de fermeture, les petites concavités sont donc bouchées. Puis elle devient constante entre 3 et 35 voxels ce qui suggère que la particule ne possède pas de concavités d'angles d'ouverture moyens. À partir d'un pas de fermeture de 35 voxels, soit $24,5\mu m$, la courbe décroît. Elle possède donc une concavité importante présentant un angle d'ouverture important qui n'est pas atteint par la courbe.

Courbure locale

L'histogramme de la courbure locale de la particule 4408 présenté sur la figure 5.25 suggère qu'elle possède majoritairement des interfaces cylindriques de type vallée, ainsi que quelques portions d'interfaces en selle et concaves (par rapport à l'intérieur de son enveloppe). La forme globale de la particule semble donc être cylindrique.

5.5 Conclusion

La caractérisation de la forme complexe des particules intermétalliques de type $Al_x(Fe,Mn)$ contenues dans les alliages d'aluminium 5182 a été abordées sous différents aspects : paramétrique, spectral, interfacique.

Les trois techniques utilisées se sont montrées complémentaires. Elles nous ont permis de mettre en évidence les caractéristiques particulières de la forme complexe des intermétalliques (faibles épaisseurs, forme de type "peau").

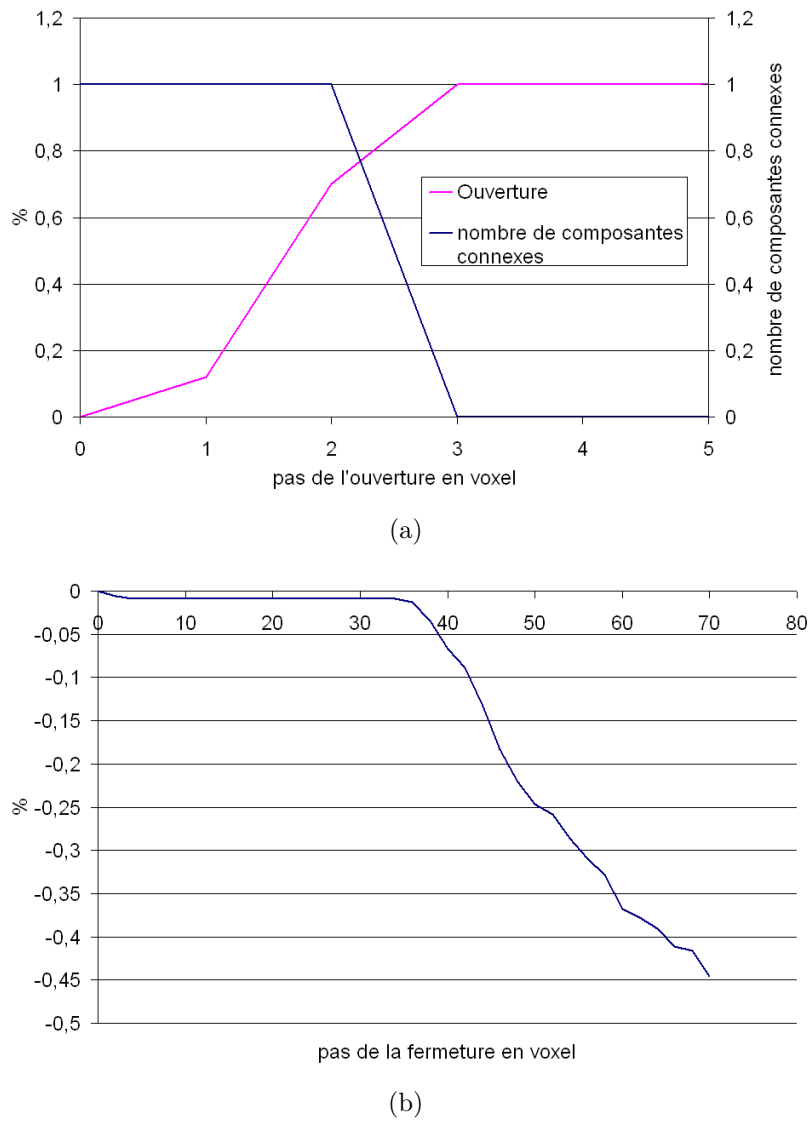


FIG. 5.24: Analyse spectrale de la particule 4408 extraite de la base de données des phases au fer de AA5182 à une déformation de 0.1 (a) Granulométrie par ouverture (b) Granulométrie par fermeture

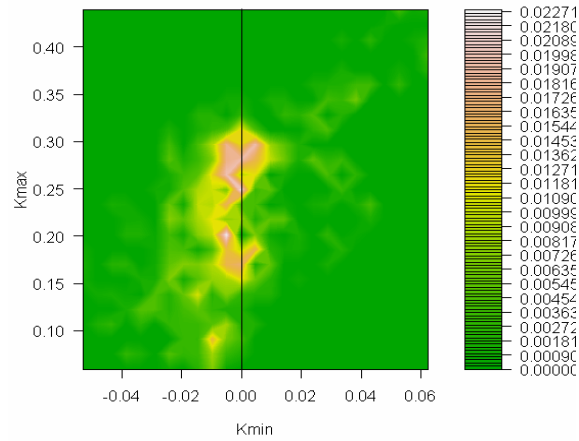


FIG. 5.25: Histogramme bidimensionnel k_{min} - k_{max} de la particule 4408.

L'étude paramétrique permet de mesurer des caractéristiques précises sur la forme des particules, à l'aide de paramètres morphologiques sélectionnés pour leur interprétation physique. L'étude spectrale présente quant à elle une information plus complexe sur la structure de la forme. Elle nous permet d'obtenir une signature spécifique à chaque particule. L'étude de la courbure à l'interface particule-matrice, permet de mettre en évidence les zones de la particule de géométrie singulière, qui seront le siège des contraintes pendant la sollicitation mécanique au cours du laminage industriel.

L'ensemble des mesures de caractérisation de la forme a été réalisé sur toutes les particules de la base de données. L'illustration des résultats sur cinq particules typiques, montre la pertinence des mesures effectuées par rapport aux types de formes observés. L'étude des résultats sur l'ensemble des particules de la base de données, nécessite l'utilisation de méthodes statistiques d'analyse des données, qui est présentée au chapitre 6.