

Segmentation des particules intermétalliques de l'alliage d'aluminium 5182

L'alliage d'aluminium 5182 comporte des particules intermétalliques de deux sortes $Al_x(Fe,Mn)$ (dont la composition exacte est $Al_3(Fe,Mn)$ et $Al_6(Fe,Mn)$) et Mg_2Si (magnésium et silicium), ainsi que des cavités. Ces intermétalliques créés au moment de la solidification de l'alliage d'aluminium sont de formes variées et complexes. Ce chapitre a pour objectif de présenter l'extraction des particules intermétalliques contenues dans l'alliage, à partir d'images obtenues par microtomographie aux rayons X et réalisées à l'ESRF.

Ce chapitre est divisé en trois parties qui correspondent chacune à une étape de l'extraction des particules, de l'obtention de l'image à la création d'une base de donnée où chaque particule est individualisée dans un fichier.

Tout d'abord, l'obtention des images est exposée. Les résultats obtenus par MEB-FEG sont présentés. Puis l'acquisition des images par microtomographie aux rayons X à l'ESRF est détaillée. Les paramètres d'acquisition et les choix qui ont été adoptés pour la résolution sont présentés.

Dans la seconde partie, nous présentons la méthode d'extraction des particules intermétalliques par analyse d'images. Les différentes techniques de segmentation envisagées puis testées sont tout d'abord exposées. Nous montrons leurs limites dans le cas de l'étude des images de l'alliage d'aluminium 5182. La démarche de segmentation multi classes mise en oeuvre dans le cadre de cette thèse, ses avantages et ses inconvénients sont ensuite présentés.

Enfin, la troisième partie montre l'extraction des intermétalliques dans une base de donnée. Les problèmes liés à la taille des images analysées sont abordés ($2048 \times 2048 \times 2048$ voxels).

En conclusion de ce chapitre, un bilan est réalisé sur l'extraction des

particules intermétalliques dans les alliages d'aluminium de type 5182 à partir d'images obtenues par la méthode de microtomographie aux rayons X.

3.1 Acquisition des images d'alliage léger l'aluminium de type 5182

L'acquisition d'images à partir d'échantillons d'alliage d'aluminium 5182 a été réalisée en utilisant différentes techniques d'observation (voir paragraphe 2.1) :

- des observations MEB-FEG après dissolution sélective de la matrice d'aluminium (à des taux de déformation variant de 0% à 200%)
- des observations MEB-FEG après un polissage de l'échantillon (à de grands taux de déformation supérieurs à 200%)
- des observations par microtomographie aux rayons X (aux faibles déformations inférieures à 125%).

Les résultats obtenus à ALCAN par observations des intermétalliques après dissolution sélective de la matrice d'aluminium par le procédé PATCH-PEEL sont d'abord présentés. Ils montrent notamment que l'étude de la forme des intermétalliques aux faibles déformations doit être réalisée avec une méthode d'observation tridimensionnelle de la matière. La méthode de microtomographie aux rayons X présentée au paragraphe 2.1.2 est ensuite détaillée dans le cas de l'étude du matériau AA5182. Tout d'abord les paramètres d'acquisition des images qui ont été retenus sont exposés, puis l'utilisation du contraste de phase est expliquée.

3.1.1 Acquisition des images par MEB-FEG après dissolution sélective de la matrice d'aluminium par PATCH-PEEL

Cette technique d'observation est réalisable à tous les stades de déformation du laminage de l'alliage d'aluminium. À l'état brut de coulée, deux morphologies caractéristiques des particules intermétalliques ont été identifiées, auxquelles des noms génériques qui décrivent leur forme ont été donnés : "trèfle" ou "choux fleur" (mais également "écaille de tortue", qui correspond à une particule de type "trèfle" dans un alliage réchauffé, de petites stries sont alors observées), et "bout de bois" voir figure 3.1 et le tableau récapitulatif 3.1.

Les formes des particules observées sont variées et complexes. Les études réalisées par MEB-FEG ont montré qu'une étude tridimensionnelle était né-

3.1. Acquisition des images d'alliage léger l'aluminium de type 5182

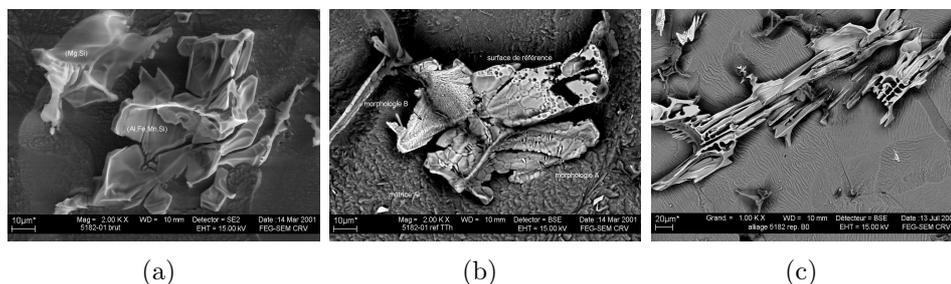


FIG. 3.1: Morphologie singulière de particules intermétalliques contenues dans les alliages AA5182 (a) "choux fleur" (b) "écaille de tortue" (c) "bout de bois"

cessaire pour appréhender le caractère tridimensionnel complexe des particules intermétalliques. Cette étude est réalisable par microtomographie aux rayons X sur de faibles états déformés, c'est à dire inférieurs à 150%, pour laquelle une résolution de l'ordre du micromètre est suffisante.

3.1.2 Acquisition des images par microtomographie aux rayons X à l'ESRF

Les conditions d'acquisition des images

Les conditions de manipulation à l'ESRF ont été réalisées par l'équipe de la ligne ID19 : Elodie Boller, Petra Pernot, et Eva Pereiro, ainsi que Eric Maire du GEMPPM de l'INSA de Lyon. Ils ont travaillé au cours de plusieurs campagnes de prises d'images sur le calage de façon empirique des conditions opératoires. Le travail de paramétrage des conditions d'acquisition des images pour les alliages d'aluminium a donné lieu à une publication [57].

Le choix d'une faible énergie du faisceau de rayons X de 20 keV correspond à un compromis entre pénétration et contraste d'absorption. En effet pour traverser des matériaux peu diffusants comme l'aluminium, et contenant des particules intermétalliques de coefficients d'absorption proches, une faible énergie doit être utilisée de manière à accentuer la différence de niveau de gris entre la matrice d'aluminium et les particules à observer.

Deux campagnes ont été menées sur un échantillon sélectionné (brut de coulée) afin de choisir la meilleure résolution à adopter pour l'analyse des images obtenues sur l'alliage 5182. Il est apparu que pour les alliages d'aluminium étudiés aux faibles états de déformation au cours du laminage à chaud, la résolution la mieux adaptée est $0,7 \mu m$. Elle correspond à un compromis entre la résolution et la taille du volume reconstruit. Une résolution inférieure

| Échantillons non déformés | | $Al_3(Fe,Mn)$ | $Al_6(Fe,Mn)$ | $Al_x(Fe,Mn)$ $x \neq \{3, 6\}$ |
|-------------------------------------|-------------|--|-------------------|------------------------------------|
| Brut de coulée | Morphologie | "Aiguilles et bout de bois" | | "Trèfle" et "bout de bois" |
| | Proportion | Majoritaire | Rare | Majoritaire |
| Brut de coulée traité thermiquement | Morphologie | "Ailes de raie" finement ciselée et "bout de bois" | Ecaille de tortue | "Bout de bois" |
| | Proportion | Majoritaire | Majoritaire | Rare |

TAB. 3.1: Phases au fer présentes dans l'alliage d'aluminium 5182 (terminologie proposée par Annabelle Bigot ALCAN)

de $0,28 \mu m$ a également été essayée, mais elle ne permet pas d'extraire d'information supplémentaire sur la forme (les détails observés en MEB-FEG, comme par exemple les microfissures des "écailles de tortue" sont trop fines pour être observées même à cette résolution). En outre, le champ d'investigation de l'échantillon qui est balayé est fortement réduit, et la population des intermétalliques extraits n'est plus statistiquement représentative.

Un recadrage a également été effectué, avec un passage du codage de 4 à 1 octet, les minima et les maxima ont été choisis assez resserrés, de façon à obtenir un bon contraste dans l'image à 256 niveaux de gris. Ce recadrage a pour effet de saturer l'image aux extrémités de l'échelle des niveaux de gris.

Les conditions opératoires retenues

- L'énergie du faisceau de rayons X utilisée est de 20 keV.
- Le temps de pause entre chaque rotation est 0,8 sec.
- Le nombre de prises de vue (rotations) par coupe est de 1500.
- La distance entre le capteur et l'échantillon est de 25 mm.
- La résolution des images utilisée est $0,7 \mu m$.
- La grille de l'image obtenue à partir de la caméra CCD de type Frelon est une maille cubique, la résolution est donc identique selon chacun des axes de l'image (aucune distorsion n'est introduite).
- La dimension des images acquises est typiquement de l'ordre de 5 Go

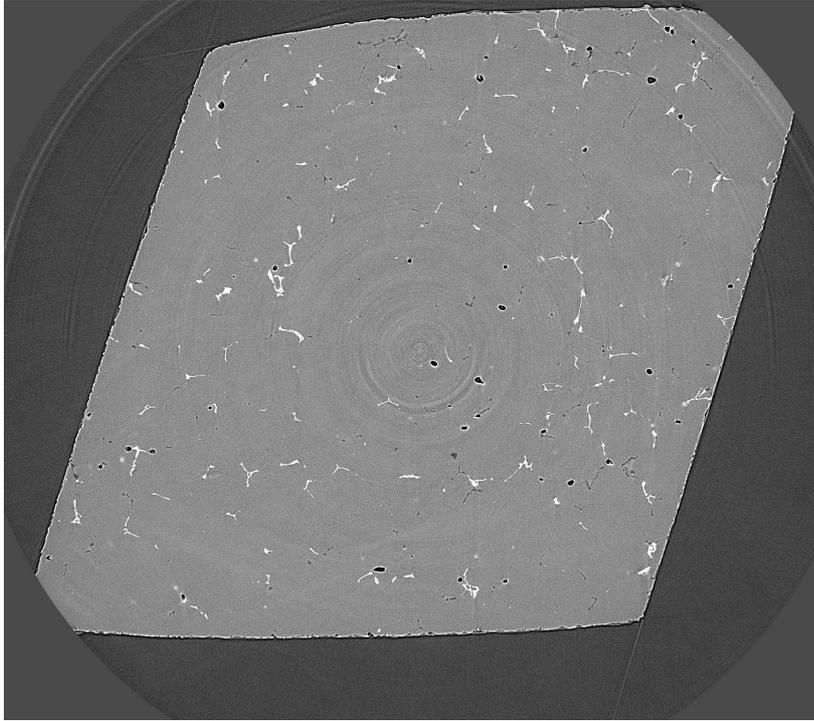


FIG. 3.2: Coupe obtenue par microtomographie aux rayons X de l'alliage d'aluminium 5182 déformé à 2% (blanc : phase au fer, gris clair : matrice d'aluminium, gris plus foncé : Mg_2Si , noir : cavités)

Utilisation du contraste de phase

Les images sont ensuite reconstruites en utilisant le contraste de phase. Le contraste de phase utilisé en tomographie provient du déphasage entre le faisceau de rayons X référence et le faisceau ayant traversé l'objet balayé [32]. Ce phénomène est modélisé grâce à un indice de réfraction complexe. La partie imaginaire représente le contraste d'atténuation et la partie réelle est liée au déphasage de l'onde. La modulation de la phase donne dans la plupart des cas un contraste supérieur à celui de l'atténuation. Cette technique est donc particulièrement intéressante pour l'étude de matériaux légers faiblement absorbants tels que les polymères, mais également pour les matériaux multiphasés dont les constituants absorbants ont un coefficient d'atténuation proche¹, tel que dans les alliages d'aluminium de type 5182.

¹Le coefficient d'atténuation dépend du niveau d'énergie des photons du faisceau de rayons X utilisé 20keV et du numéro atomique des constituants du matériau ; pour AA5182 on a : $Z_{Al}=13$, $Z_{Fe}=26$, $Z_{Mn}=25$, $Z_{Mg}=12$, $Z_{Si}=14$

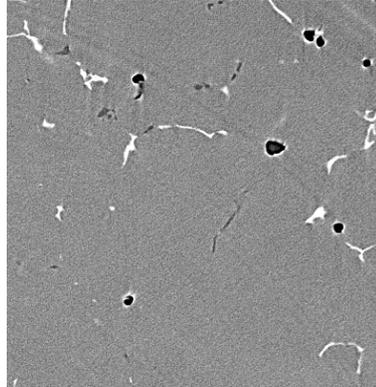


FIG. 3.3: Détail de la figure 3.2 , blanc : phase au fer, gris clair : matrice d'aluminium, gris plus foncé : Mg_2Si , noir : cavités.

Dans le cas de l'étude du matériau AA5182, il permet donc d'attribuer des niveaux de gris différents à la matrice d'aluminium, et aux particules intermétalliques $Al_x(Fe,Mn)$ et Mg_2Si .

Données disponibles

Les images qui ont été acquises à l'ESRF au cours de la thèse ont un format de données brut (de type raw), et des dimensions importantes supérieures à 5 Go. Différents échantillons prélevés au cours du laminage réversible ont été analysés à l'ESRF (voir annexe A). Les échantillons étudiés correspondent à des taux de déformation variant de 0% (matériau brut de coulée) à 123,5%. Ils ont été choisis en concertation avec l'ensemble des partenaires du projet Rhône Alpes, quatre faibles taux de déformation 0, 2, 10 et 12% puis quatre taux plus importants 19, 41, 82, et 123,5%.

3.2 La segmentation des images

La segmentation représente dans l'analyse d'images la partie la plus sensible. Elle permet en effet d'extraire une région voulue à partir des données acquises sur une image par différentes techniques. Dans le cadre de cette thèse, les objets qui sont segmentés sont les particules intermétalliques contenues dans le matériau AA5182. Une fois chaque région segmentée, il devient alors possible d'effectuer des mesures sur chacune. On comprend alors que la validité de ces mesures dépend étroitement de la qualité de la segmentation

appliquée. La segmentation des images demande donc une bonne connaissance du type d'images qui est analysé, et de ce que l'on veut en extraire.

Les observations des particules intermétalliques qui ont été réalisées à ALCAN-CRV par MEB-FEG après dissolution sélective de la matrice d'aluminium nous ont permis de nous forger une idée sur la morphologie des particules. En outre, la connaissance de la méthode d'acquisition des images nous renseigne sur la nature du bruit et des artefacts contenus dans les images.

La figure 3.2 montre une coupe de l'image tridimensionnelle de AA5182 étudiée par microtomographie aux rayons X. La figure 3.3 correspond à la visualisation des détails de l'image, les particules de type $\text{Al}_x(\text{Fe},\text{Mn})$ ont un niveau de gris très clair, les Mg_2Si ont un niveau de gris légèrement plus sombre que celui de la matrice d'aluminium, et les cavités ont un niveau de gris très faible qui se traduit par une couleur noire sur l'image.

Cette section est divisée en 3 parties. Les deux premières présentent les images obtenues sur l'alliage d'aluminium 5182 par microtomographie aux rayons X. Nous montrons tout d'abord les différents types d'artefacts présents sur les images, c'est à dire les phénomènes inhérents à l'utilisation du contraste de phase. L'obtention de l'histogramme à niveaux de gris est ensuite présentée et celui ci est interprété. Enfin, nous traitons la segmentation des images.

3.2.1 Artefacts dans les images obtenues par microtomographie aux rayons X

Les images obtenues sur le matériau AA5182 comportent un certain nombre de défauts. Ces défauts doivent être corrigés au moment de l'étape de segmentation pour ne pas introduire de biais dans les trois classes qui sont réalisées. Elles correspondent à un type d'intermétalliques : $\text{Al}_x(\text{Fe},\text{Mn})$, Mg_2Si ou aux cavités .

Les artefacts de type anneaux (ou rings artefacts)

Ils se traduisent sur les images par des anneaux de formes plus ou moins concentriques (figure 3.4). Ils résultent de défauts physiques du détecteur utilisé, retransmis ensuite sur l'image au moment de la rétroprojection. En effet, certains pixels ont une réponse non linéaire, nulle ou changeante au cours de l'enregistrement, ces pixels étant toujours à une distance identique du centre, le défaut est toujours localisé au même endroit sur le sinogramme. Ils donnent lieu à des mauvaises reconstructions sous forme d'anneaux concentriques. Ils sont généralement bien localisés sur des plans bidimensionnels et peu nombreux.

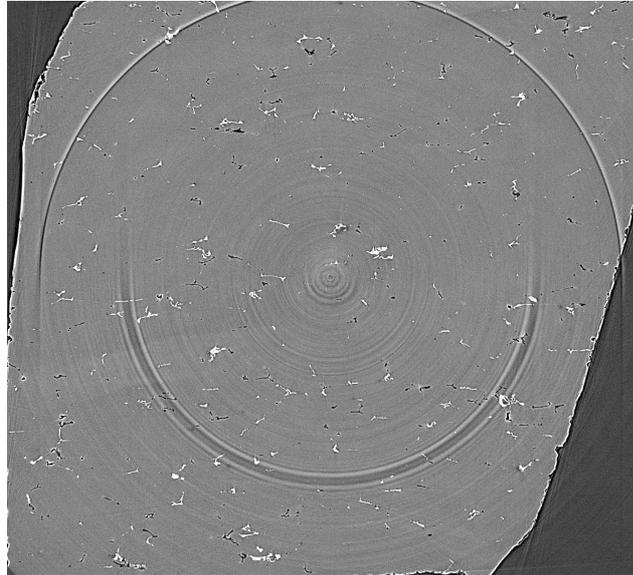


FIG. 3.4: Coupe de AA5182 déformé à 82% contenant des artefacts de type *anneaux*

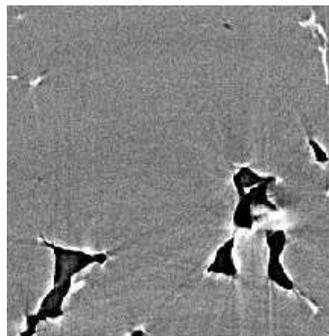


FIG. 3.5: Coupe de AA5182 déformé à 10% contenant des artefacts de type *contraste de phase*

Les anneaux se détectent facilement à l'oeil nu, leur forme en arc de cercle, et le niveau de gris des pixels (voxels) qui les compose, est différent de celui des pixels contenus dans leur voisinage immédiat. Néanmoins, ils sont très difficiles à supprimer sur les images obtenues sur AA5182 : leur niveau de gris est similaire à celui des intermétalliques (Mg_2Si et $Al_x(Fe,Mn)$), et ils sont parfois proches dans le plan z ; ce qui se traduit par l'extraction d'un même anneau sur une dizaine de plans et avec une épaisseur de un à plusieurs voxels. Leur taille est variable en fonction de leur localisation dans l'image (centrale ou externe par rapport au centre).

Les images contenant trop d'anneaux n'ont pas pu être exploitées, compte tenu de la difficulté de les segmenter séparément des phases intermétalliques. De plus, si les anneaux intersectent des intermétalliques sur une grande partie de l'image (comme c'est le cas sur la figure 3.4) alors une erreur importante sur la mesure des populations des particules touchées est engendrée.

Dans certaines images comme celle du matériau déformé à 123,5%, les anneaux se localisent à partir d'une profondeur donnée assez importante et l'image a donc pu être exploitée en partie. En général, les images comportant des anneaux centraux n'ont pas pu être exploitées, contrairement à celles présentant des anneaux périphériques. Le volume des anneaux périphériques étant beaucoup plus important que celui des intermétalliques, ils peuvent être extraits séparément.

Le contraste de phase

Il introduit du bruit sur les images en accentuant le contraste de la frontière des objets. En effet, le pourtour des phases au fer $Al_x(Fe,Mn)$ a un niveau de gris égal à celui des Mg_2Si . Inversement les pourtours des particules de type Mg_2Si et des cavités, possèdent un niveau de gris identique aux $Al_x(Fe,Mn)$ (figure 3.5).

3.2.2 Histogramme à niveaux de gris des images de AA5182 obtenues par microtomographie aux rayons X

Le choix de techniques de segmentation appropriées est fait en fonction de l'histogramme des niveaux des gris. Pour les histogrammes bimodaux par exemple, de nombreux algorithmes de détection automatique du seuil sont utilisables (seuillage par entropie, maximisation ou minimisation de la variance intra ou interclasse ...).

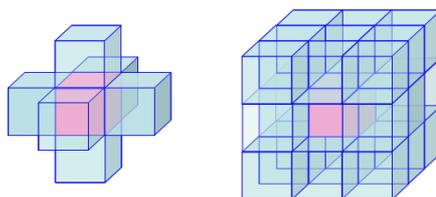


FIG. 3.6: Illustration des relations de voisinage tridimensionnelles en analyse d'images, à gauche un voisinage de type 6 autour du voxel rose est présenté, à droite il s'agit d'un voisinage de type 26.

Dans le cas d'une image tridimensionnelle, l'histogramme des niveaux de gris se calcule de façon similaire à celui d'une image bidimensionnelle. Ainsi pour une image de taille $x \times y \times z$, on calcule pour chaque plan ($x \times y$) l'histogramme à niveaux de gris. L'histogramme des niveaux de gris de l'image tridimensionnelle correspond à la somme des histogrammes des z plans de l'image.

La figure 3.7 représente l'histogramme des niveaux de gris de l'image obtenue par microtomographie X à l'ESRF sur AA5182 déformé à 10% (les histogrammes des images de l'alliage pris à des déformations différentes présentent le même aspect).

Sur cet histogramme, nous constatons que les niveaux de gris de l'image sont essentiellement dispersés entre les valeurs 40 et 255 et qu'il n'est pas possible d'observer les pics correspondant aux particules.

L'histogramme obtenu présente la forme d'une gaussienne. Il indique que le fond de l'image composé de la matrice d'aluminium présente un niveau de gris homogène. Néanmoins, même si l'histogramme est visualisé en échelle logarithmique il n'est pas possible d'extraire le fond pour faire ressortir des classes de particules.

Nous remarquons également deux pics autour des valeurs extrémales 0 et 255. Ils correspondent à la saturation de l'image aux extrema de l'échelle des niveaux de gris, réalisée afin d'accentuer le contraste entre les particules Mg_2Si et la matrice d'aluminium.

Les particules observées sur l'image du matériau déformé à 2% ont été identifiées avec l'aide d'une spécialiste du Centre d'Étude de Voreppe d'AL-CAN en analyse des alliages d'aluminium contenant des intermétalliques : Annabelle Bigot. Chaque type d'intermétalliques a été identifié, et la plage de niveaux de gris lui correspondant a été établie :

- les particules de la phase au fer possèdent un niveau de gris très clair compris entre 190 et 255
- les particules de type Mg_2Si ont un niveau de gris compris entre 56 et

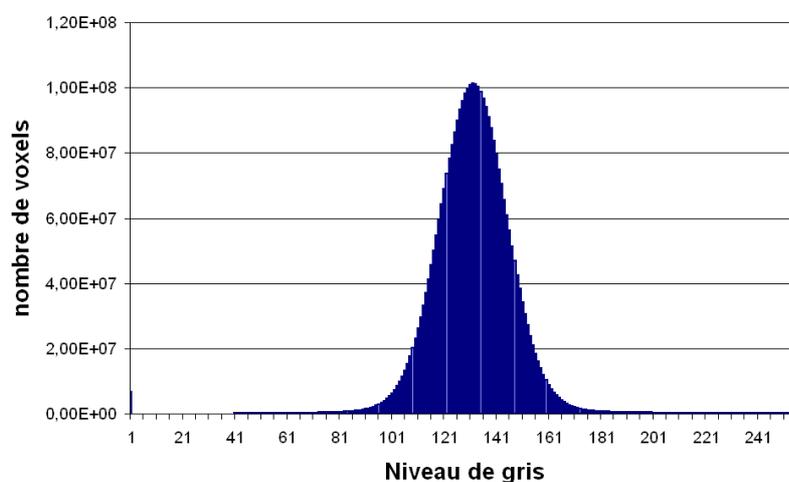


FIG. 3.7: Histogramme à niveaux de gris de l'image de AA5182 déformé à 10% obtenu par microtomographie aux rayons X.

118

- les cavités ont un niveau de gris très foncé compris entre 0 et 60.

On constate que les niveaux de gris des cavités et des intermétalliques Mg_2Si se chevauchent. Les deux groupes ne peuvent donc pas être segmentés de façon triviale. De plus, le bruit introduit par le contraste de phase sur le contour des particules possède également un niveau de gris similaire à celui des intermétalliques. Il est donc difficile de seuiller directement un des groupes d'objets à partir des informations fournies par l'histogramme des niveaux de gris.

Pour chaque état de déformation du matériau AA5182, les seuils des niveaux de gris des objets sur les images obtenues par microtomographie aux rayons X ont du être évalués. Ils dépendent en effet des conditions opératoires et varient en fonction des petites variations de la puissance du faisceau de photons, mais également en fonction de la microstructure du matériau.

3.2.3 Présentation de la méthode de segmentation multi classes

La segmentation des images obtenues par la méthode de microtomographie aux rayons X de l'alliage d'aluminium 5182 a représenté une des difficultés du travail réalisé au cours de la thèse. En effet, comme nous l'avons vu dans les deux paragraphes précédents les images comportent du bruit et

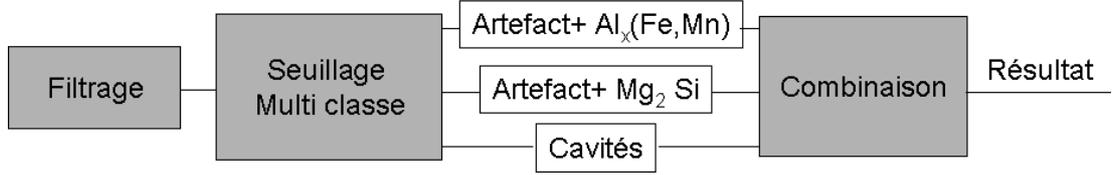


FIG. 3.8: Schématisation de la méthode de segmentation multi-classe

des artefacts. En outre les niveaux de gris entre les objets à extraire sont continus.

La segmentation multi classes se divise en trois étapes distinctes (voir figure 3.8) :

- Une étape de filtrage de manière à obtenir un signal lissé.
- Une étape de segmentation multi classe correspondant à une segmentation par seuil haut et seuil bas.
- Une étape de combinaison de l'information issue de l'étape précédente.

Dans cette section, nous développons chacune des étapes de la segmentation mise au point. Nous illustrons les résultats par la segmentation de AA5182 déformé à 2%.

Le filtrage des images

L'amélioration voulue de l'image doit être effectuée avec le moins de perte de qualité. Les petites fluctuations de niveaux de gris présentes sur l'image brute ne sont pas significatives.

Le filtrage de l'image par un filtre gaussien s'obtient par convolution de l'image à niveaux de gris avec un noyau de convolution (symétrique et normalisé) et correspondant à l'équation 3.1 [49][17].

Numériquement, la convolution de l'image est obtenue en prenant la moyenne pondérée par le noyau de convolution du voxel courant et de ses x voisins (si le noyau est de taille 3 alors le voisinage à considérer est de type 26). Le principal avantage de ce type de filtre est d'être adapté dans le cas de bruit blanc. La valeur de l'écart type de la gaussienne appliquée aux images du matériau déformé à 2% est $\sigma = \frac{3}{4}$.

$$h(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2 + y^2 + z^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

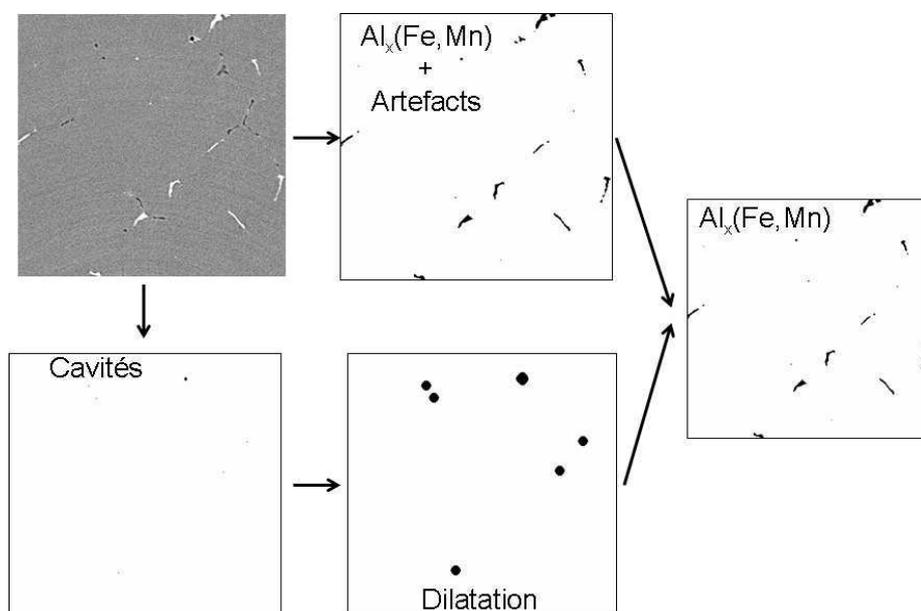


FIG. 3.9: Illustration des différentes étapes de la segmentation des particules de la phase au fer de AA5182 déformé à 2%

La segmentation multi classes

Seuillage manuel Chaque type de particule intermétallique est segmenté séparément par l'application d'un seuil bas et d'un seuil haut. Pour les particules de la phase au fer nous fixons s_1 et s_2 , pour les particules de type Mg_2Si nous fixons s_3 et s_4 . Pour le matériau déformé à 2% par exemple ces seuils ont été donnés au paragraphe 3.2.2.

Les seuils s_1 et s_2 , ainsi que les seuils s_3 et s_4 , sont choisis manuellement de façon à ce que la population de chaque type de particule intermétallique soit totalement incluse dans un des deux groupes intermédiaires définis.

À cette étape, les populations des phases au fer et des Mg_2Si ne sont pas correctement segmentées. Elles contiennent en effet des artefacts qui sont dus à l'acquisition de l'image. Par exemple, les halos résultant du procédé de contraste de phase sur le pourtour des particules de la phase au fer ont le même niveau de gris que les particules Mg_2Si . Inversement ceux situés au voisinage des cavités et des Mg_2Si ont le même niveau de gris que les particules de phase au fer $Al_x(Fe, Mn)$. Une combinaison de tous les résultats intermédiaires doit être appliquée aux images pour extraire les intermétalliques, indépendamment des halos caractéristiques de la méthode d'acquisition des images.

La segmentation par croissance de région Les cavités sont quant à elles segmentées par la méthode de segmentation par croissance de région.

Principe Les régions homogènes de l'image sont d'abord localisées, puis la croissance est étendue aux pixels voisins sur des critères de similarité. Le processus est continué jusqu'à ce que chaque voxel soit attribué à une région.

Cette méthode de segmentation nécessite donc la définition de marqueurs pour les objets à segmenter, mais également des critères d'agglomération (c'est à dire d'appartenance à la région de propagation en cours). Les objets doivent posséder des niveaux de gris assez homogènes, et les marqueurs doivent être définis de façon robuste.

Application aux images Cette technique de segmentation s'est révélée efficace sur les images pour la segmentation des cavités. Des marqueurs sont tout d'abord définis en choisissant une fourchette de niveaux de gris telle que chaque cavité soit marquée s_5 et s_6 , puis la croissance de la région est obtenue par agglomération des voxels voisins selon un critère de ressemblance. Le contraste de phase sur les images se traduit par un halo lumineux de niveaux de gris plus élevés sur le contour des cavités, et un critère d'agglomération par histogramme sur le voisinage est donc possible. Le niveau de gris des voxels dans le voisinage est comparé à la valeur du germe à l'origine de la région. Si la différence est inférieure ou égale à un seuil fixé s_7 , alors le voxel voisin est agrégé à la région courante.

Combinaison

Une combinaison des images intermédiaires est effectuée pour s'affranchir des artefacts sous forme de halo de chaque population intermédiaire. Considérons que la population à extraire soit constituée des particules de la phase au fer $Al_x(Fe,Mn)$. Le contraste de phase de même niveau de gris que les particules de la phase au fer se situe sur le pourtour de la population « Mg_2Si + cavités». Une dilatation morphologique tridimensionnelle de « Mg_2Si +cavités» (par un élément structurant isotrope de type octaédrique ou sphérique) élimine le halo. Un octaèdre de taille t est choisi comme élément structurant de manière à recouvrir par dilatation morphologique le halo lumineux caractéristique du contraste de phase (la taille du halo est propre à une image). Différents essais ont été menés pour trouver la taille idéale de la dilatation morphologique à appliquer.

Une fois la dilatation effectuée, l'union entre la population « $Al_x(Fe,Mn)$ + halo» et le complémentaire de la population « Mg_2Si + cavités» dilaté est

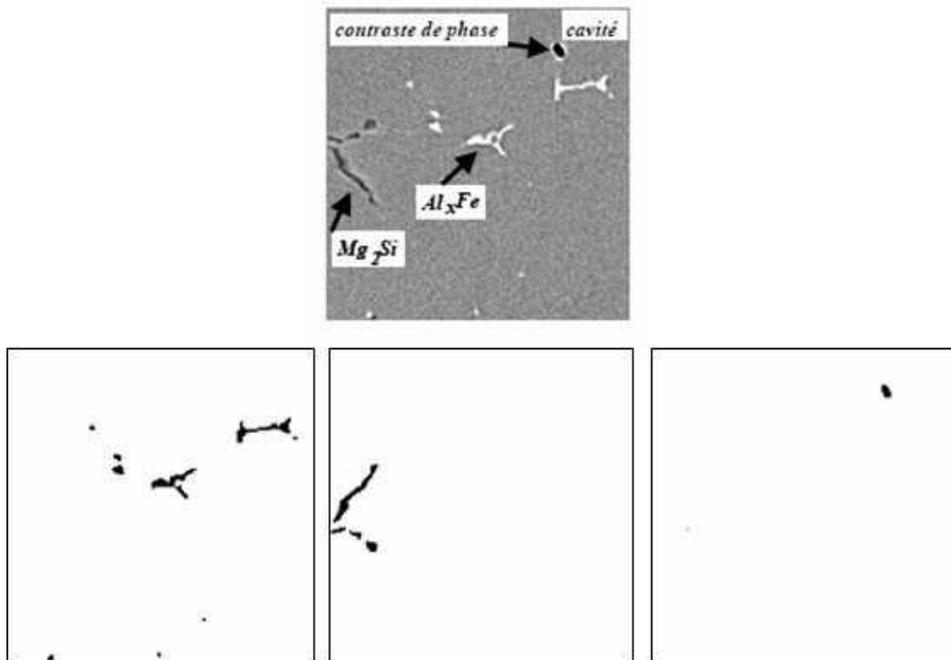


FIG. 3.10: Résultat de la segmentation multiclasse des particules intermétalliques sur une coupe du matériau AA5182 déformé à 2% ; au dessus de gauche à droite image brute, puis de gauche à droite extraction des particules de la phase au fer, extraction des Mg₂Si, extraction des cavités.

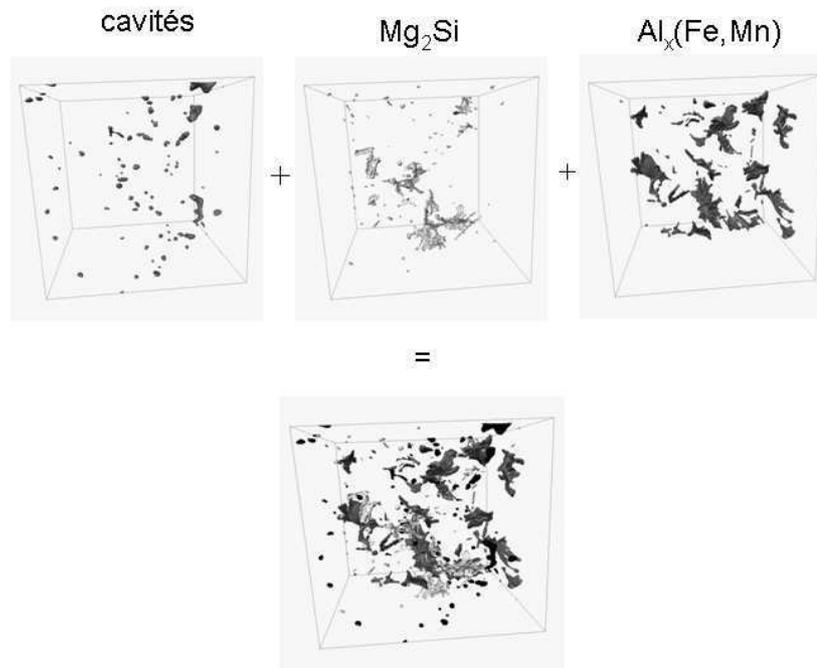


FIG. 3.11: Résultat de la segmentation multiclasse pour le matériau AA5182 déformé à 2% (taille de l'image : $1,4 \cdot 10^7 \mu\text{m}^3$, fractions volumiques : 0,411% de phase au fer, 0,15% de Mg_2Si , et 0,13% de cavités)

réalisée. Nous obtenons une segmentation correcte des particules intermétalliques Mg_2Si et $\text{Al}_x(\text{Fe}, \text{Mn})$ ainsi que des cavités. L'illustration des étapes nécessaires à l'extraction des particules de la phase au fer est présentée sur la figure 3.9. Les résultats de la segmentation sur le matériau déformé à 2% sont présentés sur les figures 3.10 et 3.11.

Algorithme complet

Soit I_1 l'image d'un échantillon d'alliage d'aluminium de type 5182. Cette image correspond à un sous volume de l'image acquise à l'ESRF. Nous proposons ci-dessous l'algorithme complet de segmentation multi classes servant à extraire les particules $\text{Al}_x(\text{Fe}, \text{Mn})$, Mg_2Si ainsi que les cavités :

1. $I_2 \leftarrow I_1 * (\text{masque gaussien de taille } 3^3)$
2. $I_3 \leftarrow \text{Seuillage}(I_2, s_1, s_2)$
3. $I_4 \leftarrow \text{Seuillage}(I_2, s_3, s_4)$
4. $I_5 \leftarrow \text{Seuillage}(I_2, s_5, s_6)$

5. $I_6 \leftarrow \text{Croissance de région}(I_5, s_7)$
6. $I_7 \leftarrow \text{Dilatation}(I_4, t)$
7. $I_8 \leftarrow \text{Inverse}(I_7)$
8. $I_9 \leftarrow I_3 + I_8$
9. $I_{10} \leftarrow I_4 - I_6$

L'image I_9 contient la segmentation des particules de la phase au fer. L'image I_{10} contient les particules de type Mg_2Si . L'image I_6 contient les cavités (voir résultat illustré sur la figure 3.11)

Validation

La méthode de segmentation multi classes a été mise au point au cours de cette thèse de façon à extraire les particules en se basant sur les connaissances a priori de l'image. Pour se faire, les différents partenaires du projet Rhône-Alpes se sont réunis afin de mettre en commun leurs compétences concernant la caractérisation des intermétalliques (par des méthodes d'observations MEB-FEG notamment).

Les seuils s_1 et s_2 , s_3 et s_4 , s_5 ont été fixés et validés par l'ensemble des partenaires pour le matériau déformé à 2%, ainsi que la taille t de dilatation nécessaire à couvrir le halo caractéristique du contraste de phase.

Pour les autres états de déformation, nous nous sommes basés sur ces connaissances pour fixer les nouveaux seuils et la taille de la dilatation adéquats.

Conclusion

La méthode de segmentation multi classes mise au point est efficace dans le cas de la segmentation des particules intermétalliques dans les alliages d'aluminium. Elle a été validée par les différents partenaires du projet.

Néanmoins cette technique présente de nombreux inconvénients que nous présentons ci-après :

- Les images doivent être de bonne qualité et ne pas présenter trop d'anneaux. En effet, il n'est pas possible par cette méthode d'extraire les anneaux, leurs niveaux de gris variant du niveau de gris des particules de la phase au fer à celui des Mg_2Si .
- Le contraste entre les Mg_2Si et la matrice d'aluminium doit être suffisant. Or, au cours des manipulations, nous avons constaté qu'il n'était pas toujours possible de l'obtenir même en utilisant le contraste de phase.

- Les paramètres de seuil sont fixés à la main, ainsi que l'estimation du pas de la dilatation nécessaire pour s'affranchir des halos lumineux sur les pourtours des objets. La qualité de la segmentation dépend donc en grande partie de la sensibilité de l'opérateur.

Seules les particules des phases au fer ont été étudiées dans la suite de ce travail de thèse. En effet, ces particules intermétalliques peuvent être extraites sur une grande partie des images réalisées à l'ESRF (si celles ci ne présentent pas trop d'anneaux). Il a été montré par Matthieu Feuerstein au cours de son travail de thèse [28], que ce sont les particules de la phase au fer $Al_x(Fe,Mn)$ qui sont à l'origine de points de fragilité dans l'alliage, ainsi que de son mauvais aspect de surface. Elles sont en effet moins ductiles que les particules de type Mg_2Si .

3.3 Constitution d'une base de données de particules segmentées

L'objectif de la segmentation des particules intermétalliques de l'alliage d'aluminium 5182 est d'obtenir une base de données pour chaque état de déformation contenant l'ensemble des particules contenues dans l'échantillon.

La méthode de microtomographie aux rayons X (réalisée à l'ESRF) utilisée pour l'étude par analyse d'images de AA5182 fournit une grande quantité de données à traiter. Les images à niveaux de gris qui sont obtenues sont de tailles importantes variant entre 2 Go et 7 Go (récapitulatif des tailles des échantillons après extraction de la zone d'intérêt dans le tableau A.1). L'image correspondant au balayage entier d'un échantillon est donc découpée en plusieurs fichiers de taille inférieure à 2,1Go (correspondant à la limite maximale de gestion des fichiers sur des plateformes de type 32 bits).

Ces images pour être traitées doivent encore être fractionnées de manière à pouvoir gérer une image courante et une image traitée en mémoire vive sur un ordinateur standard de bureau.

Dans cette section nous présentons la démarche utilisée pour extraire les données tridimensionnelles acquises par microtomographie X. Tout d'abord nous présentons la démarche utilisée pour déterminer la région d'intérêt (ROI) dans l'image et pour la découper. Ensuite nous expliquons la construction de la base de données. Enfin nous exposons la méthode de reconstruction des particules, mise au point au cours de la thèse.

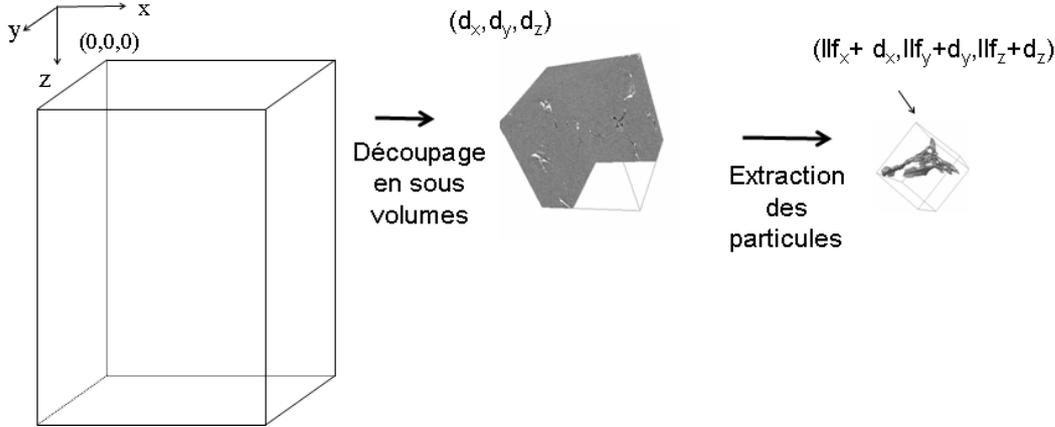


FIG. 3.12: Mise en place de la base de donnée. 1) Image tridimensionnelle initiale entre 2.5 et 7Go (2) Découpage d'un sous-volume et segmentation d'un type de particule $Al_x(Fe,Mn)$ (3) Extraction d'une particule 3D.

3.3.1 Région d'intérêt et découpage en sous volume d'étude

L'image tridimensionnelle obtenue figure 3.2 correspond à l'acquisition de l'échantillon de AA5182 centré dans le champ d'investigation du capteur. Une partie de l'image peut être coupée puisqu'elle ne fournit pas d'information sur le matériau. Ainsi, une région d'intérêt est déterminée de manière à ce que l'image obtenue contiennent uniquement des données sur l'alliage d'aluminium étudié (figure 3.13).

Les échantillons de matériau usinés par les doctorants de l'École Nationale des Mines de Saint-Étienne (Matthieu Feuerstein et Antoine Baldacci) ne sont pas parfaitement parallélépipédiques étant donné leurs faibles dimensions ($1 \times 1 \times 10mm^3$). Au cours de l'acquisition de l'image, l'axe de l'échantillon ne peut donc pas être placé suivant l'axe de rotation de la plateforme tournante du dispositif expérimental. La ROI choisie doit donc être convenablement extraite sur l'ensemble de la pile d'images.

La ROI permet donc de réduire la taille de l'image. Le tableau 3.2 présente les dimensions des régions extraites sur les échantillons étudiés. Ces échantillons correspondent à différentes étapes du début du processus de laminage à chaud, de 2% à 123,5% de déformation.

Ces images de dimensions encore trop importantes pour être analysées directement sont découpées en sous volumes d'étude par une routine écrite en C++.

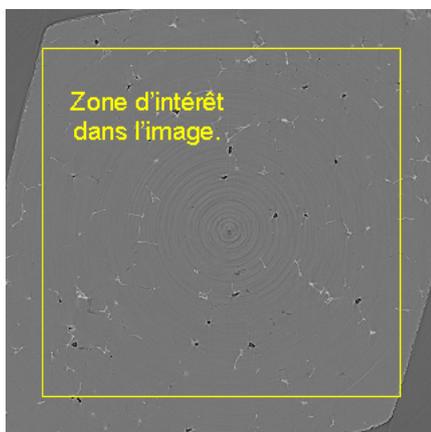


FIG. 3.13: Extraction d'une région d'intérêt sur une coupe du matériau AA5182 déformé à 2%.

3.3.2 Extraction des particules

La segmentation multi classes est appliquée à chaque sous volume de l'image à niveaux de gris découpé. Nous obtenons pour chaque sous volume trois images binaires qui correspondent chacune à la segmentation d'un type de particules ($Al_x(Fe,Mn)$, Mg_2Si , ou cavités). Les particules sont alors étiquetées, c'est à dire que chacune est identifiée par un label, un voisinage de type V6 étant utilisé (voir figure 3.6). Une boîte englobante dont les côtés sont parallèles à ceux de l'image de départ est attribuée à chaque particule, qui est extraite dans un fichier. Le fichier de particules créé est de type ".tks". C'est un type de données interne au logiciel Aphelion©. Il contient l'information sur la particule codée en format bitmap, ainsi que le volume et la position de la particule dans l'image dont elle est extraite (LLX,LLY,LLZ). Nous avons ajouté à ces informations la position du sous-volume (d_x, d_y, d_z) duquel sont extraites les particules dans l'image de départ (figure 3.12).

Deux types de fichier sont créés par image binaire. Le premier contient les particules entières. Le second contient les particules qui touchent les bords du sous volume. Un algorithme a donc été mis au point dans le but de reconstituer les particules intersectées par plusieurs sous-volumes. Nous le présentons dans le paragraphe suivant.

3.3.3 Problèmes de bords

Les particules qui intersectent les sous volumes sont nombreuses. Elles représentent pour les particules de la phase au fer 37% de la population

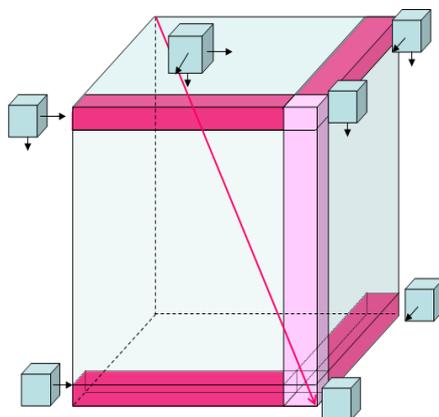


FIG. 3.14: Algorithme de reconstruction des particules qui touchent les bords, la flèche rose indique les sens de reconstruction des sous volumes, sur les cubes sont représentées par des flèches noires les faces des sous volumes étudiées, les bandes roses correspondent aux cas particuliers.

totale des échantillons déformés à 2, 10, et 20%, et 17% des échantillons déformés à 80 et 123,5%. Un algorithme de reconstruction utilisant une table d'équivalence a donc été mis au point. La table d'équivalence est initialisée en prenant l'étiquette de chaque élément.

L'algorithme est divisé en deux étapes indépendantes :

- identification des bouts de particules qui appartiennent à un même objet (défini par un voisinage 6) ; ces particules se voient attribuer la même étiquette qui correspond à l'étiquette la plus petite,
- reconstruction de chaque objet et création d'un nouveau fichier *.tks* de particules entières.

La figure 3.14 présente la première partie de l'algorithme. Les cubes correspondent aux sous volumes, et les flèches aux faces sur lesquelles les relations d'adjacences sont étudiées. Le cas général correspond au sous volume situé au coin supérieur gauche de l'image, les faces avant, droite et de dessous sont étudiées. Chaque face est parcourue. Dès qu'un voxel non égal à zéro est rencontré, on regarde dans le sous volume adjacent si un voxel non égal à zéro se trouve dans le voisinage 6. Si c'est le cas, la table d'équivalence est mise à jour. Sinon on continue. Lorsque les 3 faces ont été balayées, le sous volume adjacent dans le sens de lecture de l'image est parcouru (le sens de lecture correspond à la flèche dessinée en rose sur la figure 3.14). Six cas particuliers sont définis. Ils correspondent aux bords de l'image et les faces étudiées du sous volume correspondant sont indiquées sur la figure par des flèches.

| Sous-Volume | Déformation | taille de l'image | nombre de particules de la phase au fer |
|-------------|-------------|-------------------|---|
| 0.7 1B | 2% | 1035x1035x1725 | 4502 |
| 5B | 10% | 1280x1280x2048 | 4921 |
| 8B | 19% | 1252x1114x1920 | 3018 |
| 12B | 82% | 1024x1024x2048 | 13279 |
| 13B | 123,5% | 1310x1104x1624 | 17897 |

TAB. 3.2: Ce tableau présente les échantillons d'alliages d'aluminium étudiés

Résultats obtenus

Le tableau 3.2 présente, les échantillons d'alliages d'aluminium étudiés. Les noms génériques correspondants aux états de déformations sont donnés dans la colonne sous volume. Les dimensions de la zones d'intérêts extraites figurent dans la colonne taille de l'image. Le nombre de particules de la phase au fer extraites dans les bases de données pour chaque état de déformation est précisé.

3.4 Bilan

La segmentation multi classes mise au point est efficace dans le cas de l'étude des images obtenues à l'ESRF par la méthode de microtomographie aux rayons X des particules intermétalliques dispersées dans une matrice d'aluminium.

Le découpage des images en sous volumes de la région d'intérêt permet de traiter les images obtenues sur un ordinateur standard de bureau. Il permet également d'accélérer les traitements de segmentation.

En outre, la reconstruction des particules segmentées qui touchent les bords, permet d'obtenir une population de particules entières identiques à celle obtenue sur l'image de la ROI de départ. Le découpage en sous volume n'a donc pas d'incidence pour les mesures sur les populations d'intermétalliques qui seront introduites dans la suite de l'étude. Les fichiers tks qui sont créés permettent de reconstruire l'image binaire de la ROI entière pour chaque type d'intermétalliques, en conservant l'information sous une forme compressée sans perte. De plus, lors de l'étude morphologique des intermétalliques, chaque particule peut être reconstruite et étudiée indépendamment, permettant ainsi d'augmenter la rapidité des calculs. Il est également possible de créer à partir du fichier tks global de départ, des fichiers particuliers