Document de support de la présentation :

**Démystifier la texture cristalline des alliages d’aluminium**

Contenu développé par :

Monsieur Philippe Bocher, professeur

École de technologie supérieure

# Diapositive 3

L’objectif de ce contenu est d’aider à la compréhension de ce qu’est la texture cristalline, en étudiant ce que signifie ce concept, comment est représentée la texture, comment elle est influençable et enfin, de présenter quelques cas industriels d’applications des variations et des impacts qu’elle peut avoir.

# Diapositive 5

Il serait possible de l’illustrer la notion de texture avec une métaphore, celle de la vision des parulines polyglottes femelles, qui voient des couleurs que l’œil humain ne peut pas voir, ce qui permet, par exemple, de poser des critères de sélection par rapport à la reproduction. Le filtre UV des yeux des femelles parulines permet donc de rajouter une dimension d’information par rapport à ce que voient les autres animaux. De même, la texture est en quelque sorte une dimension supplémentaire de la métallurgie physique; dimension qui donne des informations complémentaires sur la microstructure et qui est extrêmement importante à considérer pour optimiser les procédés.

# Diapositive 6

Par exemple, la microscopie optique d’un échantillon laminé permet de révéler les joints de grains et de mettre en évidence l’allongement des grains dans la direction de laminage, ce qui traduit une anisotropie morphologique. Cependant, l’ajout de couleurs correspondant à l’orientation cristalline, comme effectué en bas à droite, permet de mettre en évidence le changement d’orientation d’un grain à l’autre, ce que traduit la notion de texture cristalline. La texture permet donc de lier l'orientation des cristaux d’une pièce avec son orientation macroscopique.

# Diapositive 7

Ce quiz est à disposition en guise d’introduction pour que le lecteur soit capable, en fin de diaporama, de décrire les textures présentées ici. La question serait alors : « comment caractériser et comment décrire cette microstructure ? » Évidemment, les possibilités de réponse(s) allant de A à G, visibles à droite, peuvent paraître abstraites de prime abord, mais cette présentation devrait lever le doute sur leur signification.

# Diapositive 9

Il peut être possible de penser que la texture et ses représentations forment quelque chose d’abstrait et sujet à interprétation, par exemple avec le fait qu’une figure de pôle puisse ressembler à une figure du test de Rorschach, mais il n’en est rien et contrairement à cette dernière où il n’y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, les figures de représentation des textures sont descriptibles avec des principes établis.

# Diapositive 10

Pour donner un exemple, à voir sur la gauche de la diapositive, la texture cube est l’orientation cristalline la plus simple où les directions principales de la maille élémentaire sont parfaitement alignées avec les directions principales de la pièce observée, c’est-à-dire que les deux repères, cristallographique et macroscopique, sont exactement les mêmes. C'est une orientation qui apparaît préférentiellement dans les plaques laminées et/ou recristallisées.

# Diapositive 11

Aussi, une des difficultés liées aux textures est d’assimiler le vocabulaire qui y est lié, puisqu’il s’agit de décrire de nombreuses notions, dont est donné ici un aperçu.

# Diapositive 12

Une autre difficulté qui est illustrée sur cette diapositive, c’est d’appréhender la diversité des manières de représenter la texture, que cela soit avec des ODF, des cartes d’orientation, des figures de pôle, des figures de pôles inverses, etc.

# Diapositive 13

Les deux méthodes les plus couramment employées aujourd’hui pour mesurer des textures sont les suivantes :

- La mesure globale utilisant la diffraction de rayons X avec des goniomètres, qui permet d’obtenir des statistiques d'orientation des grains,

- La mesure locale utilisant la diffraction d’électrons, aussi appelée la méthode EBSD.

# Diapositive 14

Pour synthétiser cette partie, il est donc possible de dire qu'une texture cristalline est une statistique d'orientation, ou de désorientation, parce qu’elle correspond aux matrices de rotation qui permettent de passer du référentiel d’un cristal, au référentiel macroscopique de l'échantillon étudié, et elle est représentée par différentes méthodes.

# Diapositive 15

Pour avoir une idée de la portée que peut avoir la texture cristallographie sur les applications industrielles, voici au moins deux exemples simples et concrets

# Diapositive 16

Tout d’abord, voilà un aperçu de la réalisation de cannettes en aluminium : pour ce faire, la fabrication se fait par emboutissage de feuilles, ce qui mène à la formation d’oreilles, synonymes de matière excédentaire à évacuer et qu’il est nécessaire de limiter pour réduire le volume de déchets à recycler. Ces oreilles ne se forment pas de la même manière en fonction de la statistique d'orientation des cristaux contenus au sein de la feuille de départ. Par exemple, pour une plaque laminée à froid, les oreilles d'emboutissage apparaîtront typiquement autour de 45 degrés de la direction de laminage (à 90 degrés près), alors que pour une feuille dans un état recristallisé, elles seront présentes à 0 et 90 degrés. Il est alors nécessaire de jouer sur la composition chimique, sur les traitements thermiques et les laminages successifs pour optimiser le procédé et minimiser cet effet.

# Diapositive 17

Ensuite, dans le domaine de la fabrication des condensateurs à forte capacité, des feuilles très minces de 80 microns en aluminium pur sont utilisées. Pour obtenir une capacité optimale, il est préférable d’utiliser des pièces entièrement avec une texture cube, c'est-à-dire que tous les cristaux de la plaque seraient tous orientés de la même manière. Une attaque chimique sur ces surfaces va alors permettre de créer des piqûres qui augmentent « la surface spécifique », et donc de stocker plus d'énergie dans les condensateurs. De la même manière que précédemment, en jouant sur la composition initiale et sur la gamme de fabrication, il est possible d’obtenir quasiment 100% des grains avec une orientation cristalline alignée avec les directions principales des feuilles.

# Diapositive 18

Il existe de nombreuses techniques de représentation des textures et il est important de les maîtriser pour bien comprendre le concept même des textures, et c’est ce qui va être vu ici.

# Diapositive 19

La manière la plus ancienne de représenter les textures correspond à l’utilisation des indices de Miller. Ces indices correspondent aux unités de longueur de maille élémentaire à cumuler sur chaque axe pour obtenir l’orientation désirée. Pour un matériau avec des symétries cubiques, ils sont indiqués par six chiffres, les trois premiers correspondants aux trois directions de la normale aux plans de la maille élémentaire dans le repère macroscopique, et les trois suivants correspondent aux directions de la maille dans le même repère. Avec l'aluminium, le matériau a toujours une structure cristalline cubique à faces centrées, et les plans de glissement sont ceux de plus grande densité atomique, ayant pour normale la direction 111, la diagonale du cube s’inscrit dans des directions de glissement 110, qui sont les diagonales des faces. Pour reprendre l’exemple de la texture Cube vue précédemment, le plan 001 est parallèle à la surface et la direction 100 est alignée dans l'axe d'allongement. Ses indices de Miller sont donc {001}<100>.

# Diapositive 20

Les cartes d'orientations sont une manière alternative de représenter les textures. Ce sont des cartes colorées qui ont l'avantage de mettre en évidence les grains de la surface d’un polycristal ainsi que leur orientation. Il est toujours nécessaire préciser les directions cristallographiques par un code couleur, auquel est adjoint une direction de référence qui est généralement indiquée à proximité. Elle est essentielle puisqu’en regardant une représentation d’un même échantillon faite dans deux plans différents, la plupart des grains pourraient changer de couleur puisqu’une autre des directions principales du polycristal, macroscopique donc, pourrait avoir été prise comme référence. Pour des pièces extrudées, par exemple, il est possible d’observer sur de telles cartes une texture assez forte, c'est-à-dire que la grande majorité des grains ont la même orientation.

# Diapositive 21

Une autre méthode, plus ancienne, consiste à utiliser la diffraction de rayons X pour réaliser des figures de pôle, qui correspondent à une projection stéréographique des différentes orientations à l'intérieur du polycristal par le biais d’une étude statistique. Chaque cristal est bombardé par des rayons X qu’il va diffracter dans une certaine direction, et l’intensité de ces diffractions sera mesurée et répertoriée en fonction des directions. Ensuite, une projection des directions cristallographiques est réalisée, sur le plan équatorial d’une sphère. Pour ce faire, chaque direction, pour laquelle un pic d’intensité dû à la diffraction importante des rayons X a été mesuré, due à l'orientation du cristal, va être projetée sur le plan. Une nuance est cependant à apporter puisque ce n’est pas tout à fait la direction qui est projetée, mais plutôt le bipoint entre le pôle Sud et l'intersection entre la direction de la diffraction des rayons X et la sphère. L'intersection entre cet axe et le plan équatorial va donc donner les points liés à une orientation, et permet de dresser une représentation des orientations et suivant la direction cristallographique considérée, cela se traduira par des intensités dans différentes régions. À noter qu’il y a équivalence entre dire que c’est une projection des plans et une projection des directions, étant donné les symétries du cristal et qu'un plan est défini par sa normale. Une figure de pôle mesurée expérimentalement correspond donc à la projection stéréographique des résultats de diffraction des rayons X, et plus l'intensité sera élevée plus il sera dit que la texture sera « forte ». Cette méthode permet de définir des orientations de référence, c’est-à-dire des positions facilement identifiables et qui permettent de décrire aisément des textures. Lorsque cette méthode est mise en œuvre en faisant diffracter un faisceau d'électrons sur l'échantillon, elle est appelée « méthode EBSD », pour Electron Back Scattered Diffraction en anglais. Lors de la diffraction, des figures d'interférence se forment, appelées des figures de Kikuchi, et en les recueillant il est aisé de reconnaître l'orientation du cristal qui est illuminé. C’est en procédant de cette façon, point par point, qu’il est possible de mesurer une carte et de formuler une statistique.

# Diapositive 22

Une autre possibilité de représentation est d'utiliser les propriétés de symétrie du cristal et celles du procédé dans les figures de pôle, pour former des figures de pôle inverse. À cause de ces symétries, puisque les directions de toutes les diagonales du cube de la maille élémentaire sont équivalentes, il est possible de réduire la figure de pôle à seulement une petite section, en « pliant » l’espace, ce qui est, donc, appelé une figure de pôle inverse. Pour certains procédés, comme l'extrusion, ce mode de représentation est intéressant car il permet d’extraire plus facilement des informations que des figures de pôles, parce qu’il évite d’avoir à reconnaître et à gérer tout un espace. Là aussi, les intensités répertoriées sur ces figures représentent la densité de grains pointant dans une orientation donnée. À noter qu’il est admis que des orientations dans la direction 111 sont généralement issues de déformation, alors que celles dans la direction 001 proviennent de recristallisation, ce qui permet, en regardant les textures, d’avoir une idée de l'état dans lequel se trouve le matériau étudié.

# Diapositive 23

Une autre manière de représenter les textures est de la formaliser comme un objet mathématique qui serait la rotation qui existe entre le repère du cristal et le repère de l'échantillon. Leonhard Euler a montré qu'il est possible de décrire le passage d’un repère à l’autre par trois angles, couramment appelés angles d’Euler, et qui sont donc utilisés allègrement pour décrire des textures, malgré leurs limitations. Ils correspondent à trois rotations à faire subir au cristal pour l'orienter à partir d’une position alignée avec le repère de la pièce, donc en orientation cube, à celle dans laquelle il est dans la pièce. Par exemple, la texture Goss correspond à une rotation de 45 degrés dans l'axe Y, ou le S, qui est défini par des rotations d’angles 61, 34 puis 64 degrés, et qui représente une orientation typique d'une plaque déformée par laminage.

Cependant, en se déformant, les cristaux vont se déplacer et tourner dans l'espace, donnant lieu à la création de textures de déformations.

# Diapositive 24

À partir des trois angles d’Euler, un espace 3D peut être construit où chaque axe correspond à un des trois angles, c’est l'espace d’Euler, décrit par une fonction de distribution des orientations (ODF en anglais). Pour décrire une texture, des coupes à angle constant sont effectuées et permettent d’observer des densités d’orientations dans chaque cadran formant lesdites coupes. Cependant, cette représentation pose un problème qui est qu’à cause des symétries des angles d’Euler et des rotations équivalentes, certaines orientations se retrouvent sur plusieurs coupes. Par exemple, l'orientation cube est présente sur toutes, exhibant des points dans chaque coin, or il ferait préférable qu’elle ne soit visible qu'à un seul endroit pour ne pas surcharger les vues.

# Diapositive 25

Une solution pour y remédier est issue du fait que pour décrire des textures, il n’est pas nécessaire d’effectuer de nombreuses coupes, et il y en a principalement trois qui sont utilisées dans la littérature : à 0, 45 et 65 degrés, celle à 90 degrés étant identique à celle à 0 degrés. Pour ces trois coupes, les orientations typiques sont toutes présentes : le S est visible à 65 degrés, le cuivre, le goss, le laiton à 45, et le goss, le laiton et le cube tourné à 0 degré. Celle à 45 degrés contient généralement le plus d’informations et il est parfois possible de s’y restreindre uniquement, ce qui peut être valable pour l'aluminium, mais pas nécessairement pour d'autres matériaux. Pour réduire l'espace à ce petit cube, il faut utiliser les symétries du procédé et il arrive que dans certains cas, il ne soit pas possible de les utiliser. Enfin, pour repérer facilement des composantes sur des coupes et décrire efficacement une texture, il est préférable qu’une étude donne des cartes de référence mettant en valeur les composantes typiques, comme le cube, le goss, etc.

# Diapositive 26

Pour réduire l’espace d’Euler à des angles allant de 0 à 90 degrés, il a fallu utiliser les symétries induites sur les ODF par le procédé. Cependant, il peut arriver que certains procédés ne favorisent pas de symétrie et qu’il soit alors nécessaire d’utiliser tout le spectre de l’espace d’Euler. Avec le laminage croisé, où la direction de laminage d’une plaque est changée tous les X% de déformation, ce phénomène est visible et est comparé, en troisième ligne, à du laminage « classique » en deuxième ligne, où il est possible de se limiter à 0-90 pour décrire la texture, ce qui est impossible sans perte d’information pour le laminage croisé.

# Diapositive 27

Pour synthétiser cette partie, il est important de comprendre qu'il y a différentes manières de représenter les textures, qui ont toutes leur intérêt, et il est important de les maîtriser, de les observer et d'y être exposé pour s’y familiariser et les reconnaître. Ainsi, le fait de pouvoir appréhender les notions liées aux textures est notamment indissociable de la difficulté d’interpréter leurs diverses représentations.

# Diapositive 29

Au sein de l’espace d’Euler, il existe des « fibres » pour différents matériaux et c’est la fibre « bêta » qui est la plus fréquemment rencontrée pour l’aluminium. Cela signifie que la plupart des orientations de déformation se trouveront sur cette fibre, entre les textures cuivre (copper) et laiton (brass).

# Diapositive 30

Ici, un petit retour sur la texture cube qui est facile à reconnaître puisque ce sont des points centrés sur chaque cadran des figures de pôle, qui connait une variation en cube tourné (ou R-cube).

# Diapositive 31

Voilà deux orientations qui apparaissent dans des matériaux qui ont subi des déformations, les deux extrêmes de la fibre « bêta » vue précédemment soit les textures Cuivre et Laiton.

# Diapositive 32

Et entre les deux extrêmes présentés précédemment, il existe deux textures « intermédiaires », que sont le S et le Goss.

# Diapositive 33

Un résumé explicitant les représentations des textures développées précédemment est fourni ici et peut servir d’aide à la compréhension de figures plus complexes, comme celles qui seront étudiées par la suite.

# Diapositive 34

Une fois que les représentations des textures sont appréhendées, il est alors possible de s’intéresser à comment contrôler, c’est-à-dire modifier, les textures.

# Diapositive 35

Pour maîtriser expérimentalement la texture d’un alliage, il existe deux axes principaux sur lesquels travailler : soit au niveau du matériau, soit au niveau du procédé. Compte-tenu de la structure cristalline de l'aluminium, il est impossible de modifier le réseau cristallin, et lorsque les cristaux se déforment, ils tendent à s’aligner par rapport à une certaine direction d'étirement. Ceci entraîne une rotation cristalline, et cela va privilégier certaines orientations lors de la déformation, comme le cuivre et/ou le laiton.

# Diapositive 36

Une des possibilités pour influencer les textures est d’influencer la structure du matériau, c’est-à-dire de jouer sur la manière dont les dislocations se forment, ce qui permet de modifier l'énergie de défaut d'empilement. Pour l’aluminium qui cristallise toujours en maille cubique à faces centrées, il est impossible de modifier les cristaux; ce qui ne laisse que certaines possibilités pour que les cristaux se déforment. Ce sont ces quelques possibilités qui font que lorsque les cristaux se déforment certaines orientations sont privilégiées. Cependant, pour agir sur les dislocations et changer les textures, ce qui entraîne la modification des orientations, cela peut être obtenu en jouant sur la température lors de la déformation ou sur les états de départ. Par exemple, en effectuant des traitements thermiques, il est possible de changer l'orientation des grains et de changer la texture.

# Diapositive 37

Une des possibilités d’influencer les textures est de modifier la façon dont se forment les dislocations, et donc l’énergie de défaut d’empilement. En jouant sur la composition chimique du matériau, il est possible d’agir sur les dislocations et donc de changer les textures. Par exemple ici, en augmentant le pourcentage de magnésium, l’indice de texture du S passe de 13 à 8 puis à 6, pour des pourcentages de 0.5, 3 et 5 respectivement, ce qui signifie qu’il y a eu une diminution de l’énergie de défaut d’empilement qui a privilégié l’apparition du laiton.

# Diapositive 38

Cet effet se retrouve en jouant sur la température lors de la déformation ou sur les états de départ. Par exemple, en effectuant des traitements thermiques, il est possible de changer l'orientation des grains et de changer la texture. Il serait possible d’observer qu’à partir d'une pièce laminée en état T0, en faisant un traitement pour arriver à un état T6, cela aura comme conséquence de faire diminuer la quantité de laiton pour faire apparaître du cube.

# Diapositive 39

Pour ce qui concerne les procédés, il est possible d’observer qu’en changeant les paramètres de réalisation, il se produira un changement de texture. Pour un élément extrudé, une carte d’orientations peut mettre en évidence le fait qu’il y ait une différence de texture entre le cœur et la surface du profilé. De ce fait, le procédé a amené de la recristallisation en surface et créé des orientations différentes par rapport à l'orientation cube, généralement privilégiée.

# Diapositive 40

Autre exemple avec du laminage : les textures sont intensifiées en augmentant le taux de déformation, puisque les grains tendent à s’aligner avec la direction de déformation principale, ce qui se produit grâce au glissement des dislocations, entrainant la rotation des cristaux.

# Diapositive 41

À chaud, dans l'aluminium, c’est une orientation de type laiton qui apparaîtra, alors qu’à froid, ce seront plutôt des orientations de type cuivre ou S qui seront révélées. Cependant, cet aspect est encore une zone de manque dans la littérature, où une étude systématique de l'effet des textures de départ, du chemin de déformation, des températures et du mélange de différents procédés, serait utile à l’amélioration des connaissances sur l’évolution des textures.

# Diapositive 42

Pour un alliage d'aluminium contenant du magnésium et pour lequel entre en compte la recristallisation du matériau, il est possible de travailler à la fois sur la composition chimique, sur le matériau et sur le procédé, au cours duquel il y aura déformation et recristallisation. Pour ce type d’alliages, il existe un optimum en termes de composition, pour lequel un maximum de texture cube n’apparaît que pour un certain pourcentage de magnésium donné (3% en l’occurrence sur l’exemple présenté ici), sinon quoi elle est quasiment invisible.

# Diapositive 44

Un exemple permet d’illustrer la variation de texture au cours d’une extrusion, avec l’étude de la texture à différentes étapes de déformation, i.e. lors de l’avancée de la matière du lopin vers la filière, ici aux positions P1, P2, P3, P4, P5 et P6, cette dernière se trouvant dans la matière extrudée.

# Diapositive 45

Cette étude révèle qu’en se rapprochant de la filière d’extrusion, les grains se déforment et s'orientent. C’est-à-dire que morphologiquement ils prennent une forme très allongée, mais aussi leur déformation tend à homogénéiser leurs orientations, et ils donnent alors une texture de plus en plus forte. Ainsi, en sortie de filière, ils ont majoritairement la même orientation (visible ici en rouge en position P6), qui est typique de la recristallisation, alors qu’il en reste une minorité avec des orientations typiques de déformation.

# Diapositive 46

En parallèle, en augmentant la température d'extrusion, la fraction de matériau recristallisé augmente elle aussi : à basse température, il existe une composante de déformation dans la direction 111 qui disparaît progressivement jusqu'à être absente lorsque l’extrusion est réalisée à 520 degrés, ce qui va de pair avec un indice de texture beaucoup plus fort (32.69 alors qu’il était de 14.65 pour 400 degrés).

# Diapositive 47

Dans la même étude, les textures au centre et sur les bords du lopin avant extrusion sont analysées, et cela met en valeur le fait que sur les bords il y a des grains beaucoup plus gros et qui n’ont pas la même texture que du matériau recristallisé « cube », ce qui peut poser des problèmes afin d’effectuer une optimisation du procédé.

# Diapositive 49

Ce contenu a donc eu pour objectif de faire découvrir, voire de rappeler, quels sont les différents moyens de représenter des textures données, quelles sont les composantes typiques de référence pour décrire et comprendre les textures dans différents procédés classiques, comme le laminage et l’extrusion, ainsi que de donner quelques exemples pour observer comment il est possible de faire varier les textures en jouant sur le matériau, en jouant sur le procédé ou sur les deux à la fois, dans le but d’obtenir certaines microstructures données.

# Diapositive 50

Un premier quiz pour terminer : quelle est la texture de cette microstructure ? Il serait tentant de dire qu’elle est aléatoire puisqu’il y a de nombreuses couleurs sur la carte d’orientations, sauf qu’il manque une information pour conclure : la direction macroscopique de référence correspondant aux orientations à proximité de la figure de pôle inverse donnée à gauche. Ainsi, il est possible que dans une autre direction, tous les grains soient alignés et aient donc la même couleur. Il est donc impossible ici de dire quelle est la texture associée à cette microstructure.

# Diapositive 51

Un second quiz pour terminer, avec le premier qui a été vu au cours de cette présentation (en diapositive 6). En observant les coupes de l’ODF et les figures de références, par exemple celle à 45 degrés, il est possible de remarquer le point qui est typique de la texture cube, ce qui est aussi visible sur la carte à 65 degrés et à 90 degrés, avec une petite quantité de Goss, visible dans le coin en bas à droite de la coupe à 45, mais aussi sur celle à 90. La texture est donc en majorité cube avec une faible composante Goss.