



HAL
open science

Influence de la microstructure lors d'essais de fissuration à chaud d'alliage d'aluminium 6061 en soudage TIG

Aurélie Niel, Frédéric Deschaux-Beaume, Cyril Bordreuil, Gilles Fras

► To cite this version:

Aurélie Niel, Frédéric Deschaux-Beaume, Cyril Bordreuil, Gilles Fras. Influence de la microstructure lors d'essais de fissuration à chaud d'alliage d'aluminium 6061 en soudage TIG. *Matériaux* 2010, Oct 2010, Nantes, France. 12p. hal-00807897

HAL Id: hal-00807897

<https://hal.science/hal-00807897>

Submitted on 4 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence de la microstructure sur la fissuration à chaud d'un alliage d'aluminium 6061 en soudage TIG

Aurélie Niel^a, Frédéric Deschaux-Beaume^a, Cyril Bordreuil^a, Gilles Fras^a

^a *Laboratoire de Mécanique et Génie Civil - LMGC UMR 5508, Université de Montpellier II, 34095 MONTPELLIER cedex, France. aurelie.niel@iut-nimes.fr ;*

RESUME:

Dans le but de réduire la consommation d'énergie, les constructeurs travaillent sur l'emploi de matériaux légers, comme les alliages d'aluminium, pour diminuer le poids des véhicules. Ces modifications imposent une amélioration constante des procédés de fabrication, en particulier en soudage.

L'accroissement des vitesses de soudage sur les alliages d'aluminium provoque l'apparition de défauts tels que la fissuration à chaud. La compréhension de ce phénomène est un problème complexe faisant intervenir le procédé, le matériau et le chargement mécanique. Les méthodes expérimentales d'investigation de ce défaut sont nombreuses, mais ces essais s'avèrent souvent difficiles à interpréter. L'objectif de ce travail est d'étudier, au travers d'un essai simple, la relation entre la microstructure générée par l'opération de soudage et la sensibilité à la fissuration, afin d'améliorer les modes opératoires de soudage.

Un essai original a été développé consistant à appliquer une précontrainte de traction contrôlée dans la direction de soudage sur une tôle d'alliage d'aluminium 6061 de faible épaisseur, avant de réaliser une ligne de fusion avec le procédé TIG. Cet essai permet l'initiation de fissures en régime de soudage établi, au sein de la zone pâteuse où des mécanismes complexes de solidification sont mis en jeu.

La morphologie des grains joue un rôle crucial dans l'initiation de la fissure. Elle est fonction de l'intensité et de la vitesse de soudage, ainsi que de la géométrie de l'éprouvette. Elle se caractérise par la forme, la taille mais aussi la direction de croissance des grains qui influencent l'initiation de fissures. Des observations in situ, à l'aide d'une caméra rapide, et post mortem, à partir de macrographies et de micrographies, ont permis d'analyser la microstructure et les fissures éventuelles de chaque éprouvette. Un scénario d'initiation de fissures a ainsi pu être proposé, en fonction de la morphologie des grains. Les relations entre paramètres de soudage, morphologies de la structure de grains générée, et sensibilité à la fissuration à chaud ont été discutées.

Enfin, à partir de résultats expérimentaux, des solutions d'optimisation du procédé seront proposées en tenant compte des interactions procédé/ matériau.

MOTS-CLES : Fissuration à chaud, Soudage à l'arc, Alliage d'aluminium, Solidification.

Le soudage d'un matériau favorise l'apparition du phénomène de fissuration à chaud du fait du changement d'état liquide/solide. De nombreux paramètres sont à prendre en compte pour limiter les risques de fissuration. Ce phénomène complexe faisant intervenir des facteurs métallurgiques et mécaniques est étudié grâce à un nouvel essai. Les facteurs métallurgiques interviennent au travers de l'intervalle de solidification, de la taille et de la forme des grains, qui modifient la perméabilité de la zone pâteuse. Cette étude propose d'étudier l'interaction entre le procédé et le matériau vis à vis de la fissuration à chaud, à travers l'analyse des microstructures générées.

Ce papier présente tout d'abord le phénomène de fissuration à chaud en soudage. Ensuite, un essai original pour caractériser la fissuration à chaud en soudage est développé. Finalement, l'analyse de l'influence de la microstructure sur la sensibilité à la fissuration à chaud sera discutée dans le but de proposer des améliorations pour le procédé de soudage.

I. Problématique de la fissuration à chaud en soudage

Le procédé Tungsten Inert Gas (TIG), employé dans cette étude, également appelé Gaz Tungsten Arc Welding (GTAW), est un procédé de soudage créant un arc électrique entre une électrode réfractaire en tungstène et les pièces à assembler. L'arc ainsi créé provoque une fusion locale du métal. Un gaz inerte, l'argon en général, est injecté dans la buse de soudage et permet de protéger le métal contre l'oxydation.

Les défauts provoqués par une opération de soudage sont nombreux et peuvent être liés à des facteurs métallurgiques, aux paramètres de soudage ou aux conditions extérieures. Parmi les principaux défauts de soudure, les piqures, la fissuration à froid ou à chaud, les porosités peuvent être citées. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la fissuration à chaud en soudage à l'arc sur des tôles minces d'alliages d'aluminium. Ce défaut apparaît pendant le cycle de soudage, et affecte fortement la résistance mécanique des pièces assemblées.

Le phénomène de fissuration à chaud apparaît en fin de solidification d'un alliage, et est couramment observé en soudage. L'intervalle de solidification du matériau, associé au gradient thermique, donne l'étendue de la zone pâteuse où cohabitent les phases liquide et solide. Lors d'un refroidissement lent, les bornes de l'intervalle de solidification correspondent à la température de liquidus et de solidus du matériau.

La solidification se décompose en 4 étapes successives (figure 1) [1]. La germination est la première étape, des particules solides germent alors dans une grande quantité de liquide. Le matériau se comporte comme un fluide visqueux sans tenue en traction. Ensuite, les grains croissent. La fraction solide augmente progressivement et la température tend vers le solidus. En soudage, la vitesse de solidification étant élevée, le front de solidification (interface liquide-solide) est de type dendritique. La fraction solide de cohésion est ensuite atteinte. Les dendrites entrent en contact les unes avec les autres et forment un squelette solide cohérent. Une forte chute de la perméabilité est alors observée, du fait de la formation d'un réseau solide de plus en plus dense. De fins films liquides subsistent entre les grains solides et subissent de fortes déformations. Pour finir, le dernier stade correspond à la solidification des dernières poches de liquide, où la fraction solide tend vers un. Le réseau solide peut alors résister aux déformations. La contrainte et la déformation à rupture de la zone pâteuse augmentent rapidement.

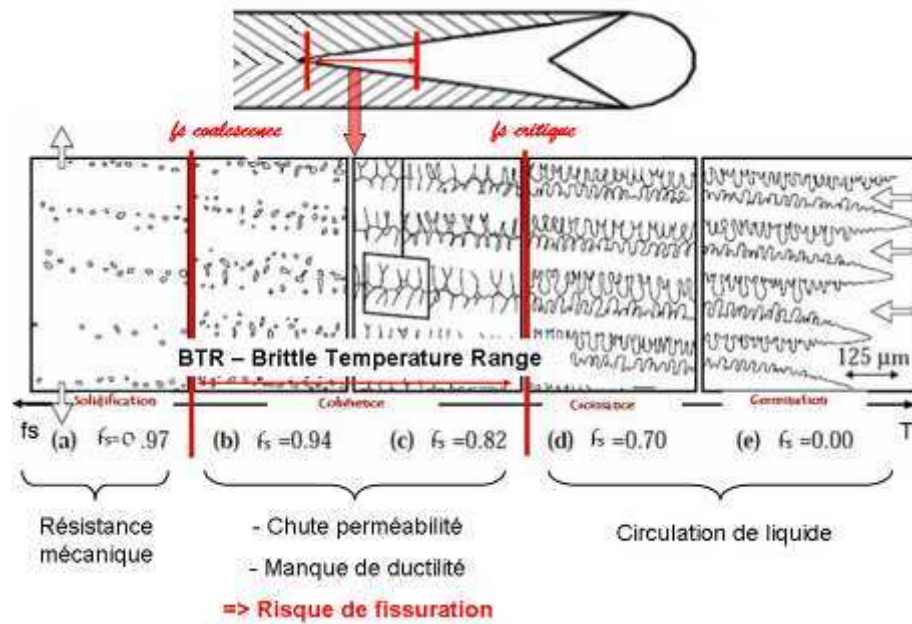


Fig. 1: Evolution de la fraction solide durant la solidification.

L'intervalle de fragilité (Brittle Temperature Range ou BTR) est défini comme étant l'intervalle de température correspondant aux fractions solides où la microstructure est en configuration critique. Les bornes du BTR correspondent respectivement à la température où la fraction de solide f_s est telle que le liquide ne peut plus circuler à cause de la perte de perméabilité (f_s critique) et à la température où la fraction de solide est suffisante pour que la résistance mécanique augmente grâce au nombre de ponts solides formés (au-delà de f_s coalescence mais inférieur à 1). L'alliage étudié (6061) a un intervalle de fragilité large, son BTR est compris entre 570°C et 600°C environ pour des vitesses de refroidissement rapide, représentatives de celles obtenues en soudage.

Pendant le soudage, la zone pâteuse subit, lors de la solidification, des sollicitations d'origines thermiques et mécaniques. Le cycle de chauffe-refroidissement lié à l'opération de soudage entraîne à la solidification une contraction liée au changement de phase, et une contraction thermique du squelette solide qui correspond au retrait. A ce chargement thermique s'ajoute un chargement mécanique extérieur du au bridage empêchant la distorsion naturelle des pièces. Toutes ces sollicitations peuvent entraîner la décohésion des films liquides et/ou la rupture de ponts solides entraînant l'initiation de fissure.

L'occurrence de la fissuration à chaud est fonction des paramètres procédés, tels que l'intensité de soudage et la vitesse de soudage, mais aussi de la composition du matériau utilisé. Les conditions de solidification jouent un rôle important sur la sensibilité à la fissuration à chaud.

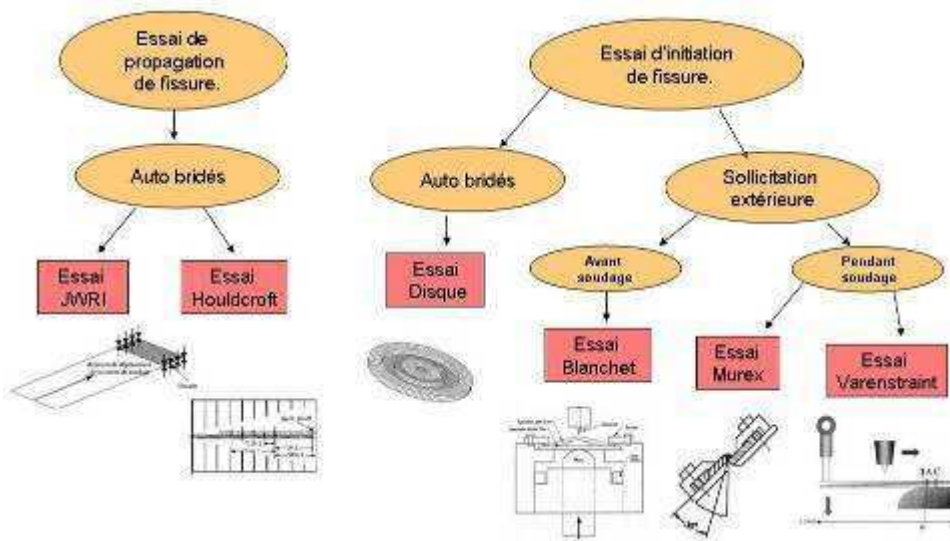


Fig.2 : Classification des essais de fissuration à chaud en soudage.

Pour évaluer la sensibilité à la fissuration à chaud d'un alliage, différents essais existent dans le domaine de la fonderie ainsi que dans celui du soudage [2]. Sur la figure 2, les essais existants ont été classés en deux catégories : les essais d'initiation de fissures (essai Varestraint) et les essais de propagation (type essai JWRI). La sollicitation appliquée peut être une contrainte mécanique extérieure à l'éprouvette ou produite par l'auto bridage de celle-ci. Ces essais restent cependant difficiles à interpréter et à mettre en œuvre dans un milieu industriel. De plus, il est compliqué de découpler les effets dus à la géométrie de l'échantillon et les effets liés au procédé, du fait des interactions complexes entre ces facteurs. Un nouvel essai de fissuration à chaud a donc été développé, pour pouvoir mieux appréhender l'influence des paramètres procédés sur la sensibilité à l'initiation de fissures.

II. Dispositif expérimental

1. Descriptif de l'essai développé

Dans notre étude, nous avons souhaité développer un nouvel essai, simple, d'initiation de fissure. Le but est d'imposer un chargement mécanique externe et contrôlé favorisant la fissuration, afin d'étudier l'influence du procédé et du matériau sur la sensibilité à la fissuration à chaud. Ce test doit permettre d'initier le phénomène dans des conditions expérimentales maîtrisées. En effet, le chargement mécanique contrôlé est défini comme une constante vis-à-vis du phénomène de fissuration à chaud.

L'originalité de cet essai est de promouvoir l'initiation de la fissure grâce à une sollicitation simple. Il consiste à appliquer une précontrainte de traction contrôlée dans la direction de soudage, avant de réaliser une ligne de fusion avec le procédé « TIG » (figure 3). L'opération de soudage est réalisée en pleine tôle sans métal d'apport, on parlera alors de la réalisation d'une ligne de fusion. Le banc d'essai de fissuration à chaud, figure 3a, est positionné sur une table à deux axes mobiles (X, Y). Lors des essais, la torche de soudage est fixe et le banc est en mouvement de translation longitudinale à vitesse constante. Les tôles sont de faible épaisseur (< 3mm) et les échantillons, découpés grâce à une machine jet d'eau, sont de dimensions 265x50mm².



Fig. 3 : a) Banc d'essai, b) Schéma de l'essai et de la sollicitation.

Six vitesses de soudage, comprises entre 5 mm/s et 20mm/s, ont été étudiées. Quatre essais ont été réalisés pour chaque vitesse en faisant varier l'intensité de soudage dans la gamme [130 A ; 260 A]. Le choix d'un courant alternatif est nécessaire en soudage TIG sur de l'aluminium. A chaque cycle, il y a une inversion de la polarité qui permet de briser la couche d'alumine formée en surface. Le rapport intensité/vitesse de soudage est défini pour avoir une pleine pénétration. Au total, 24 échantillons ont donc été étudiés avec des paramètres de soudage variables et une précontrainte fixe de 200 MPa (0,8 mm de déplacement initial imposé à l'extrémité de l'éprouvette). Des essais sans précontrainte ont été réalisés mais ne seront pas présentés dans cette étude. Les gammes de vitesse et d'intensité de soudage choisies pour cette étude sont élevées pour le procédé TIG.

Dans ce test, le contrôle de la microstructure est possible en ajustant l'intensité et la vitesse de soudage ainsi que les dimensions des échantillons. Dans cette étude, les dimensions et l'épaisseur de la tôle (3mm) sont constantes, seuls les paramètres de soudage varient. Le chargement mécanique est contrôlé par les paramètres de soudage et par la précontrainte appliquée.

Ces essais permettent l'initiation de fissure en régime quasi stationnaire, au sein de la zone pâteuse où des mécanismes complexes de solidification sont mis en jeu. L'initiation de la fissure se fait, pour toutes

les conditions testées, transversalement en bord de cordon, puis se propage longitudinalement le long de la ligne centrale (figure 4) .

Cet essai simple a pour but de tenter de dissocier l'effet de bridage externe et celui du procédé sur la fissuration. Rappelons que les facteurs les plus fréquemment cités comme influant sur la fissuration à chaud en soudage sont les paramètres procédés, principalement la vitesse et l'intensité de soudage, la composition du matériau et la sollicitation mécanique due au bridage. Les fissures sont ainsi à la fois liées à la métallurgie, à travers les natures, les tailles, les morphologies, l'orientation des grains générés et à l'état de contraintes résultant du cycle de soudage et du bridage. Nous nous intéresserons plus particulièrement dans cet article à la prise en compte de l'influence des morphologies induites lors de la solidification.

La figure 4 représente l'initiation puis la propagation de fissure obtenue durant une opération de soudage à l'arc sur un alliage d'aluminium 6061.



Fig. 4 : Fissuration obtenu en soudage à l'arc.

2. Dispositif de visualisation in situ

Lors de l'essai, un système optique permet de suivre l'évolution de la zone d'intérêt située à l'arrière du bain de fusion, en surface de l'éprouvette. Ce système est composé d'une caméra rapide prenant jusqu'à 10 000 images par seconde, de filtres et de systèmes d'éclairage. La camera est positionnée dans l'axe du cordon de soudure. Toutefois, certaines améliorations ont été nécessaires pour obtenir une image exploitable. En effet, en soudage, le rayonnement perçu par la caméra se décompose en un rayonnement thermique de la pièce, un rayonnement issu du dispositif d'éclairage mis en place, et d'un rayonnement réfléchi et diffusé par la surface de l'éprouvette. Un filtre, disposé devant l'objectif de la camera vidéo, permet d'ajuster chacune des contributions du rayonnement, ce qui permet la visualisation d'images nettes. D'autre part, l'oxydation de l'aluminium forme une couche superficielle qui masque la surface de la zone pâteuse. Un dispositif de protection gazeuse a donc été conçu pour limiter l'oxydation.

Sur la figure 5, deux images extraites de deux films sont présentées. Le bain de fusion est clairement visible en bas des images. On distingue aussi la largeur du cordon de soudure. Sur l'image de droite, l'initiation et la propagation d'une fissure sont clairement visibles. Ces images confirment que les fissures s'amorcent transversalement à la direction de soudage et à l'arrière du bain, puis se propagent le long de l'axe de symétrie de l'éprouvette. Actuellement il n'est pas possible, compte tenu de la précision des observations, d'identifier les limites exactes de la zone pâteuse afin d'y situer l'initiation de la fissure.

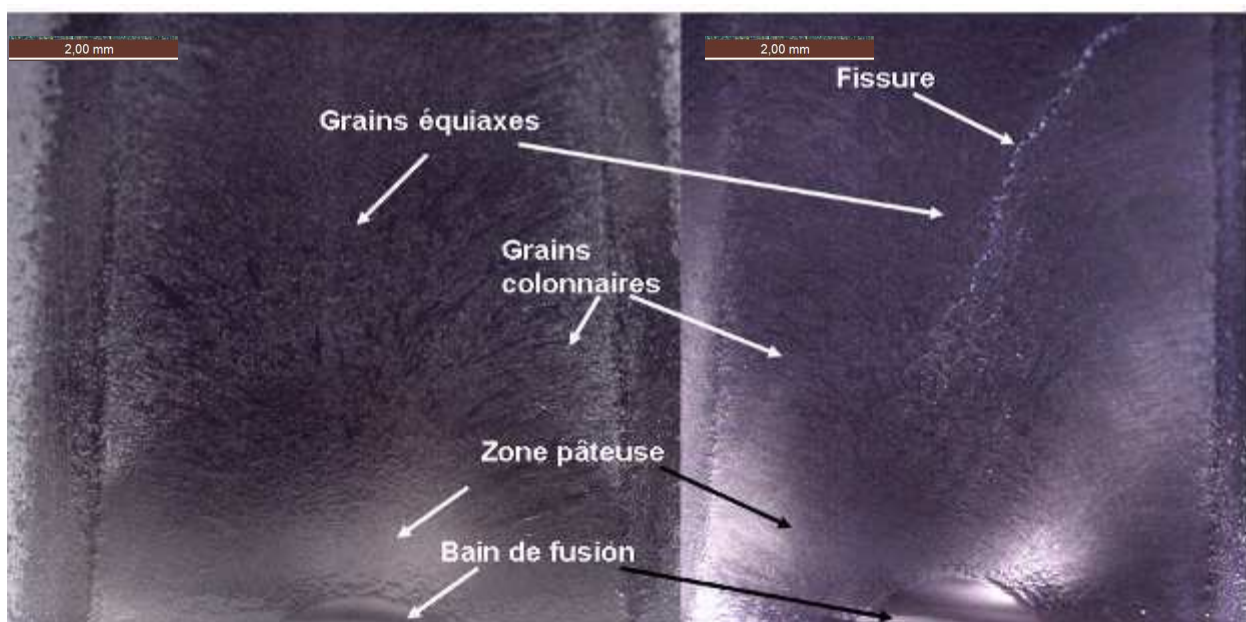


Fig. 5 : Visualisation in situ du cordon de soudure.

III. Résultats et discussion

1. Observations générales du cordon

Les résultats sont présentés pour l'alliage d'aluminium 6061. Après soudage, les échantillons sont découpés pour obtenir des vues de dessus et en coupe des fissures. La microstructure est étudiée en utilisant la combinaison de plusieurs techniques : microscope, macroscopie optique conventionnel et microscope électronique à balayage.

Sur la figure 6 est présentée une vue macrographique transversale d'un cordon de soudure. Trois zones sont distinguées : le métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF). Le cordon de soudure réalisé est entièrement pénétrant.

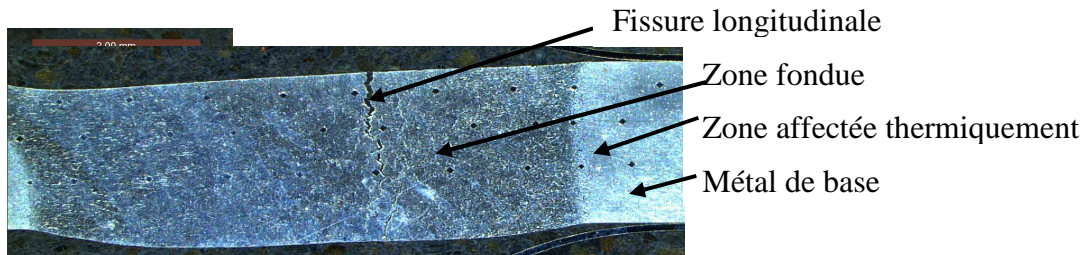


Fig. 6 : Cordon de soudure en coupe observé au microscope.

La zone fondue présente dans presque tous les cas une structure équiaxe à grains fins dans la zone centrale du cordon et une structure colonnaire dans les zones périphériques. Seule la largeur relative de ces zones varie en fonction des paramètres de soudage. On observe également une zone de fort grossissement de grain dans la ZAT au bord de la zone fondue. L'initiation des fissures se produit toujours au bord du cordon dans la zone des grains colonnaires, de manière transversale à la direction de soudage, et se propage ensuite dans la direction longitudinale au centre du cordon, dans la zone équiaxe (figure 7a).

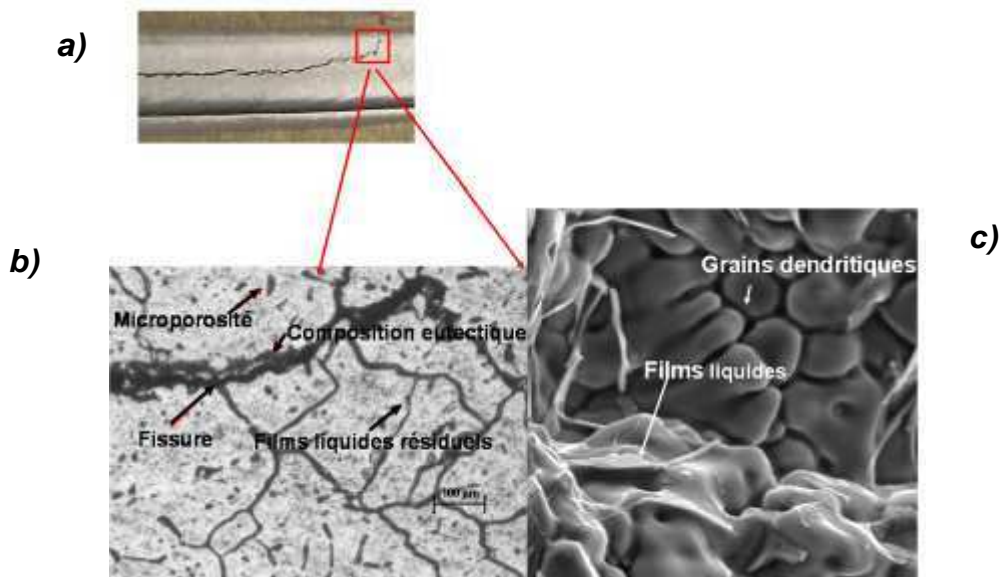


Fig. 7 : Observation des fissures : a) macrographie vue de dessus, b) micrographie en coupe transverse, c) faciès de rupture MEB.

Les observations des coupes au microscope, figure 7b), montrent bien que les fissures cheminent dans les zones inter-granulaires et sont le résultat d'une décohésion de films liquides. En effet, la fraction solide de coalescence, correspondant à la borne supérieure du BTR, est atteinte d'abord entre deux dendrites d'un même grain, et ensuite entre deux grains, ce qui favorise l'initiation de fissures inter-granulaires plutôt que intra-granulaires. La présence de films liquides en fin de solidification est visible sur les faciès de rupture étudiés au microscope électronique à balayage, figure 7c). Leur disposition inter

dendritique laisse penser qu'ils se forment tardivement lors du refroidissement. Il pourrait s'agir d'une phase eutectique.

Des analyses par ressuage ont été faites sur l'ensemble des échantillons et ont permis de dénombrer le nombre de fissures apparentes. Différents modes de ruptures ont pu être identifiés, et sont présentés sur la figure 8. Les essais à forte vitesse et forte intensité montrent une fissure transverse qui se propage rapidement en fissure longitudinale (de 6 mm de largeur en moyenne). Or, lorsque les vitesses sont moins élevées, on observe une succession de fines fissures transverses (moins de 30 µm de largeur) n'atteignant pas la zone équiaxe centrale.

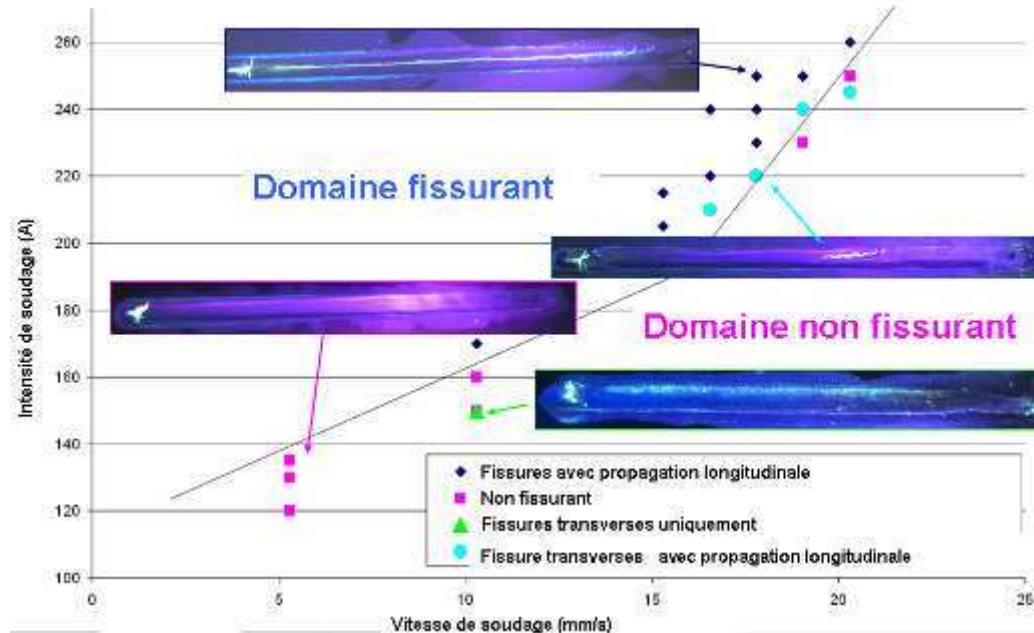
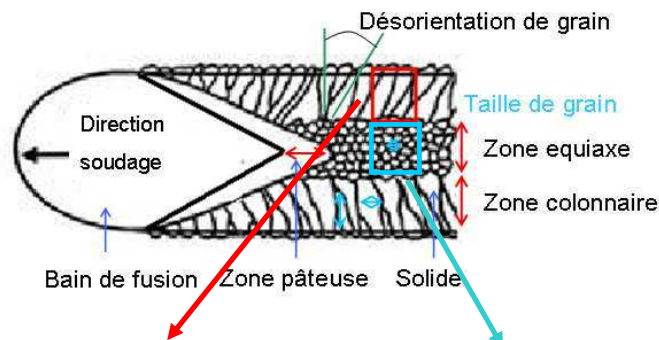


Fig. 8 : Cartographie des essais classés en fonction des paramètres de soudage et selon leur mode de fissuration.

2. Relation procédé/morphologie des grains/fissuration

L'observation de la microstructure a révélé une structure granulaire bien caractéristique, avec des zones périphériques de grains colonnaires, orientés selon une direction sensiblement perpendiculaire à la direction de soudage, et une zone centrale équiaxe. La largeur relative de ces zones varie en fonction des paramètres de soudage que nous avons fait varier, à savoir l'intensité et la vitesse.

La morphologie des grains a une influence significative sur la fissuration à chaud. Hunziker [3] a ainsi montré que les structures de grains dendritiques de type colonnaire étaient plus sensibles à l'initiation de fissure que celles de type équiaxe. Ceci peut se comprendre par le fait que la circulation du liquide entre des grains équiaxes est facilitée même en fin de solidification, de même que le phénomène de guérison des fissures par migration du liquide. Deux macrographies sont présentées en figure 9, ainsi qu'un schéma représentatif de la microstructure rencontrée. Celle de gauche est prise en bord de cordon où les grains colonnaires sont visibles. On notera ici qu'une fissure inter granulaire est visible sur la photo. L'image de droite est prise au centre du cordon où l'on voit les grains équiaxes. La forme et la géométrie de ces grains sont intéressantes.



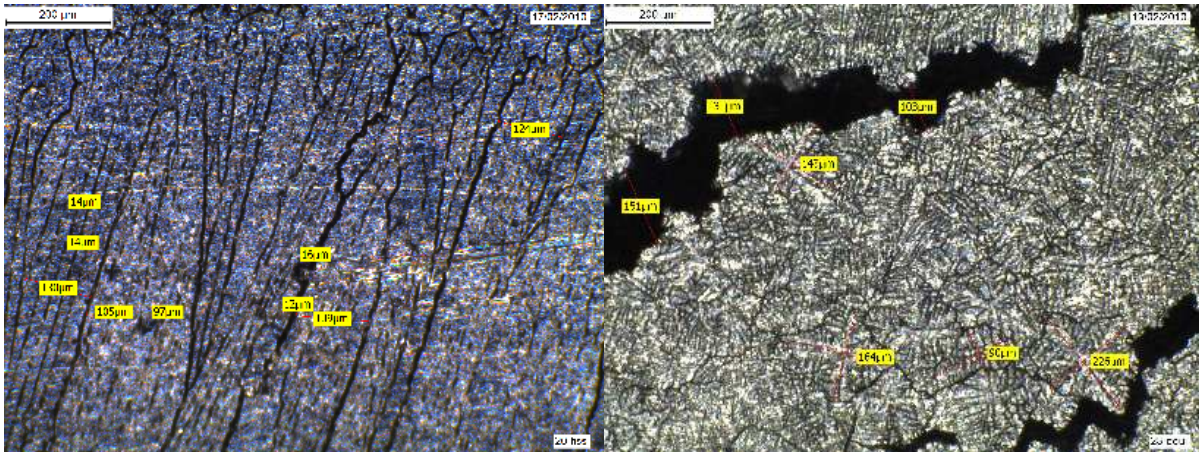


Fig. 9 : Taille et forme des grains : a) colonnaire, b) équiaxe.

Pour étudier l'effet de la morphologie de la zone fondue sur la fissuration, les largeurs des deux zones ont été mesurées à partir de macrographies sur l'ensemble des échantillons. Ces résultats ont ensuite été classés en fonction de leur sensibilité à la fissuration sur la figure 10. Lorsque la proportion de grains équiaxes augmente vis-à-vis des grains colonnaires, le risque d'initiation de fissure diminue. La largeur de la zone équiaxe est en moyenne égale dans les deux modes de fissuration. Toutefois, si la proportion de grains colonnaires est très supérieure à celle des grains équiaxes, de nombreuses fissures transverses apparaissent mais ne se propagent pas dans le domaine équiaxe situé au centre du cordon.

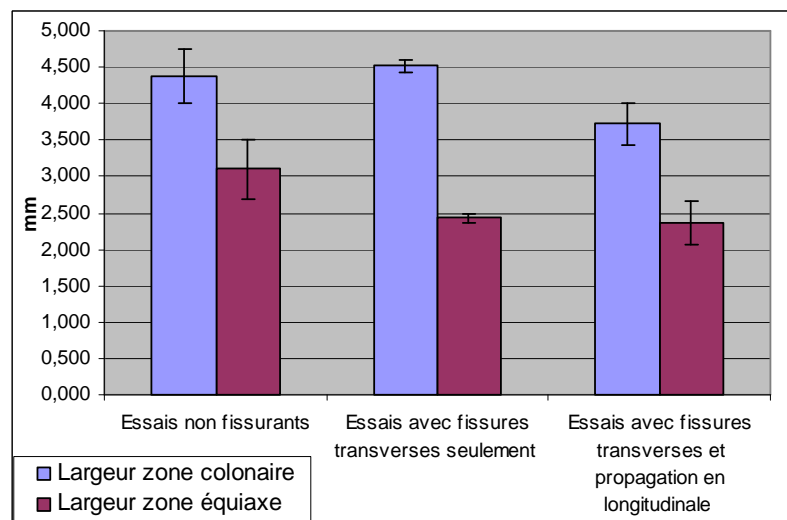


Fig. 10 : Largeur des zones selon leur sensibilité à la fissuration à chaud.

La nature colonnaire ou équiaxe des grains est fortement corrélée aux conditions de solidification, que déterminent les paramètres de soudage. En effet, lors du refroidissement du bain de fusion en cours de soudage, les grains solides, constitués de plusieurs dendrites orientées selon les mêmes directions cristallographiques, croissent dans un premier temps par « épitaxie » en prolongeant le réseau cristallin des grains partiellement fondus se trouvant sur la frontière de la zone fondue. Cette croissance se produit dans l'une des directions cristallographiques de croissance préférentielle, la plus proche de la direction du plus fort gradient thermique. Les grains ont ainsi une orientation moyenne qui correspond sensiblement à la direction perpendiculaire aux isothermes.

Pendant, lorsque la vitesse de déplacement des isothermes est élevée, le phénomène de ségrégation, qui se traduit par un enrichissement en soluté du liquide situé à la pointe des dendrites, et par une diminution de la température du liquidus, entraîne la diminution de la température de l'interface solide/liquide. Le liquide présent en avant de cette interface étant moins riche en soluté, sa température de début de solidification est plus élevée, et des germes solides d'orientation aléatoire peuvent alors se former au sein de ce liquide si sa température est inférieure à la température du liquidus. Ce sera le cas si le

gradient thermique à l'avant des têtes de dendrite est faible, on aura alors une zone de surfusion étendue dans le liquide, qui conduira à la germination de grains équiaxes au sein de cette zone [réf].

Si les conditions thermiques conduisant à la formation des différentes morphologies de grains sont bien connues, en revanche la relation entre les paramètres de soudage et la microstructure est moins bien expliquée, du fait de la complexité des relations entre ces paramètres et les champs de température générés.

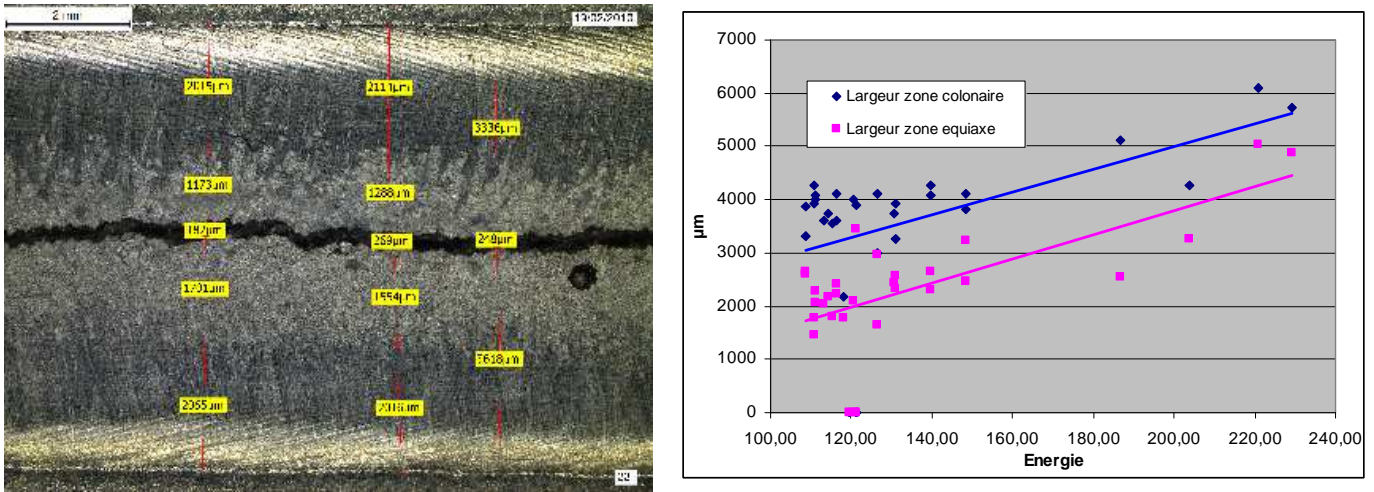


Fig. 11 : a) Cordon en vue de dessus avec mesure macro, b) Evolution de la largeur des zones en fonction de l'énergie de soudage.

En général, on observe que des vitesses de soudage faibles conduisent à la formation de dendrites colonnaires jusqu'au centre du cordon, alors que des vitesses de soudage élevées conduisent à la formation d'une zone équiaxe au centre [4]. Si l'on s'en tient à cette seule observation, l'augmentation des vitesses de soudage devrait favoriser la formation de structures plus résistantes à la fissuration à chaud.

Une analyse de l'ensemble des essais réalisés a été menée pour tenter de dégager des corrélations entre les paramètres procédés et les tailles respectives des zones colonnaires et équiaxes. La figure 11b montre l'évolution de la largeur de ces deux zones en fonction de l'énergie linéique de soudage (Puissance/vitesse), pour l'ensemble des essais de soudage réalisés dans cette étude. L'augmentation de l'énergie de soudage entraîne une augmentation de la largeur de deux zones. Notons que le domaine colonnaire est toujours plus large que la zone équiaxe centrale, pour nos conditions de soudage. Le rapport des largeurs zone équiaxe/zone colonnaire augmente aussi fortement lorsque l'énergie augmente.

Aucune tendance nette ne peut être dégagée quand à l'influence de la vitesse de soudage, à énergie constante, sur la largeur de ces 2 zones (figure 12). La relation entre paramètres de soudage et structure de zone fondue est en réalité complexe, car l'augmentation de la vitesse de soudage, à énergie constante, donc à volume de bain de fusion sensiblement constant, augmente globalement la vitesse de déplacement des isothermes et la vitesse de solidification, et donc le phénomène de ségrégation, mais aussi modifie les gradients, en les augmentant en périphérie, et en les diminuant au centre. Ainsi donc, même en favorisant la ségrégation, le très fort gradient en périphérie du cordon favorise toujours la formation des grains colonnaires, même si au centre les plus faibles gradients continuent de favoriser la formation de grains équiaxes.

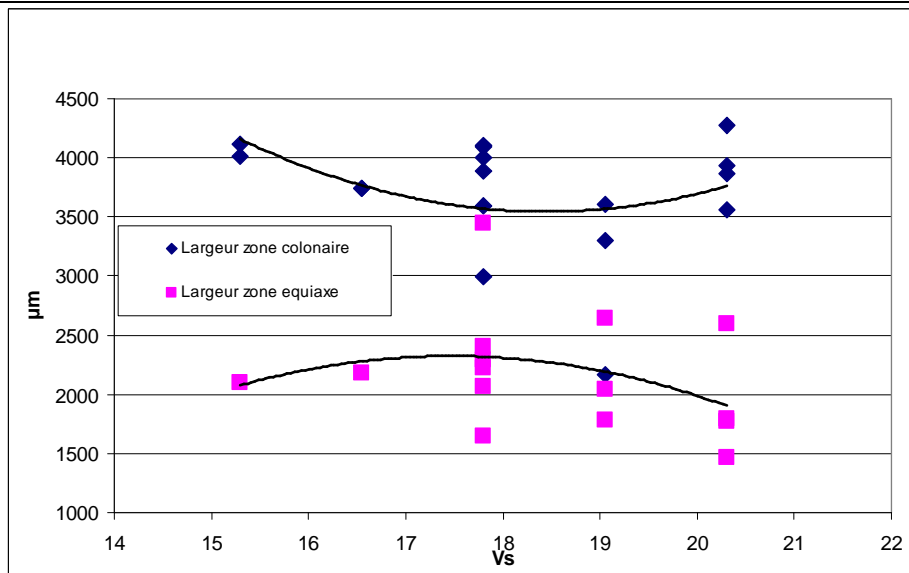


Figure 12: Influence de la vitesse de soudage sur la largeur des zones équiaxes et colonnaires, pour une énergie linéique de 120 J/mm environ

3. Relation procédé/orientation des grains/fissuration

La fissuration à chaud est un problème de manque de matière en fin de solidification. Or en soudage, le bain liquide sert d'alimentation continue au métal en cours de solidification. Toutefois, la circulation du liquide lorsque la fraction solide est élevée est difficile. La géométrie des grains a, nous l'avons dit, une grande importance, en jouant sur la perméabilité du milieu et donc sur la capacité à guérir les zones de manque de matière. L'orientation de croissance des grains peut cependant aussi conditionner l'alimentation en liquide en fin de solidification. En effet, on peut penser que la croissance de grains colonnaires perpendiculairement à l'avance du bain liquide aura tendance à limiter l'arrivée du liquide en pied de dendrites. La décohérence de deux grains ne pourra donc pas être guérie par une alimentation en liquide résiduel. Au cours de la solidification, les grains ont tendance à s'incurver en suivant l'interface solide/liquide en mouvement. Les grains les plus favorisés au départ, de part leur orientation cristallographique, cèdent le pas à d'autres grains dont l'orientation devient plus favorable compte tenu de la réorientation continue de la direction du gradient maximal de température.

La figure 13 montre l'évolution de l'orientation moyenne de croissance des grains en fonction de la vitesse de soudage.

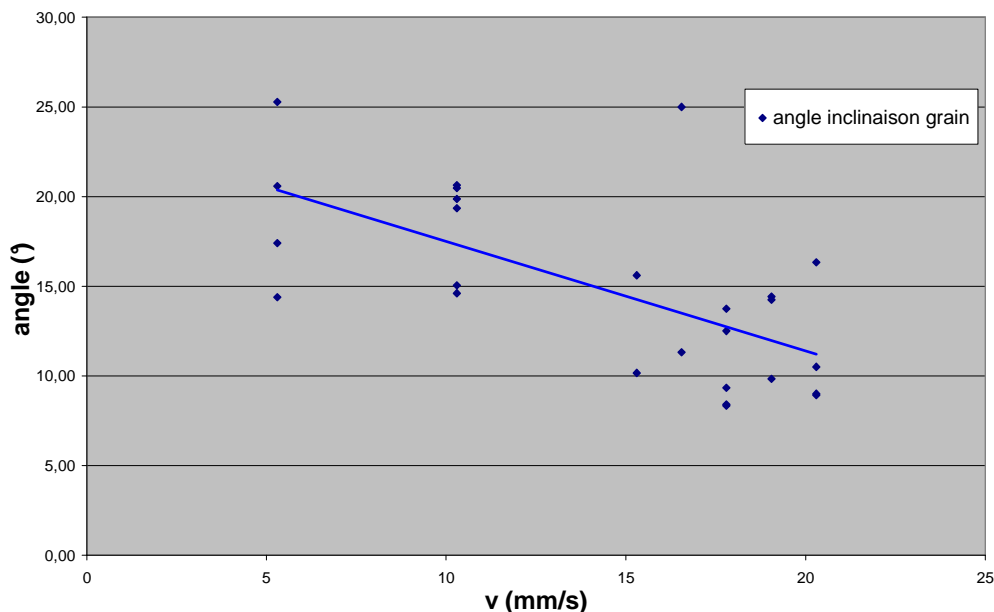


Fig. 13 : Evolution de l'orientation moyenne de croissance des grains colonnaires.

On peut voir que l'angle d'orientation de croissance des grains colonnaires (par rapport à la direction perpendiculaire à la direction de soudage) diminue avec l'augmentation de la vitesse de soudage. Les grains croissent donc plus perpendiculairement à l'avance de soudage. L'alimentation en liquide sera probablement plus difficile avec un angle d'orientation de croissance faible.

Ceci concorde avec les observations précédentes: la sensibilité à la fissuration à chaud augmente avec l'augmentation de la vitesse de soudage.

4. Influence de la fréquence de soudage

L'influence des différentes morphologies de grains sur l'initiation de fissures ont été discutées dans les paragraphes précédents. Le but de cette dernière partie est de proposer des pistes pour modifier la microstructure en agissant sur le procédé. L'influence de la fréquence du signal alternatif utilisé pour le cycle de soudage a été étudiée. Trois essais à vitesse et intensité de soudage constant ont été réalisés. Les fréquences testées sont 30Hz, 100Hz et 200Hz.

La proportion de chaque zone colonnaire/ équiaxe est sensiblement identique pour les essais à 30 et 100 Hz. Par contre, pour l'essai à 200 Hz, on note une disparition quasi-totale de la zone colonnaire observée habituellement au bord du cordon.

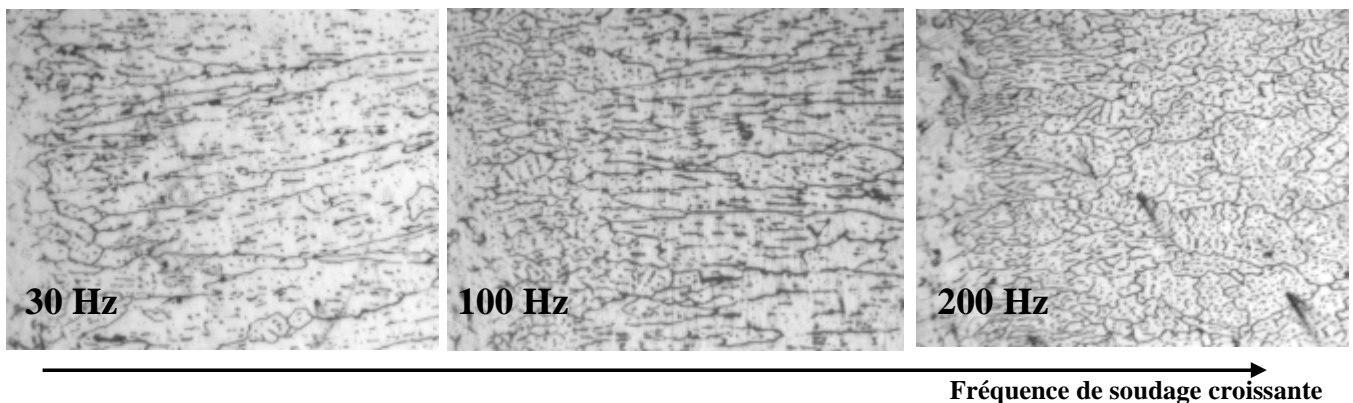


Fig. 13 : Evolution de la microstructure en fonction de la fréquence de soudage.

L'évolution de la morphologie des grains en bord de cordon est proposée en figure 13. Le métal de base se trouve à gauche de chaque image. La largeur des grains colonnaire diminue fortement lorsqu'on augmente la fréquence, jusqu'à perdre leur forme allongée pour une fréquence de 200 Hz. L'augmentation de la fréquence a tendance à « casser » les bras de dendrites pour former moins de grains colonnaires. Cette tendance pourra donc avoir une influence sur l'initiation de la fissuration à chaud car l'alimentation en liquide en fin de solidification pourra être facilitée par la formation de grain équiaxe en bord de cordon.

IV. Conclusion

D'une manière générale, le phénomène de fissuration à chaud apparaît au cours du soudage, à l'arrière du bain de fusion, dans la zone pâteuse. L'étude de la littérature met en évidence la complexité des phénomènes d'apparition de ce défaut, et surtout les fortes interactions entre le procédé, le matériau et le chargement mécanique de la structure.

Pour apprécier la sensibilité à la fissuration à chaud de l'alliage étudié, un essai simple et original a été développé. Cet essai crée l'initiation de fissures en régime établi de soudage. La connaissance du chargement mécanique imposé nous permet de travailler sur l'interaction entre le matériau et le procédé. Le but de ce travail était de mieux appréhender le phénomène de fissuration à chaud en solidification rapide en tenant compte de l'influence des paramètres de soudage.

Le phénomène de fissuration est le résultat de la concordance d'une microstructure sensible et d'un chargement mécanique critique. Ainsi, la fissuration s'amorce, pour l'ensemble des conditions de soudage que nous avons testées, dans la zone périphérique, qui présente une structure de grains colonnaires, alors que la zone centrale, de structure équiaxe, est plus résistante au phénomène.

Nous avons, à travers cette étude, tenté d'appréhender les relations complexes entre les paramètres procédés et la morphologie des grains de la zone fondue, de manière à tenter de prédire les conditions de soudage favorables à une microstructure résistante.

Nous avons ainsi pu montrer que l'augmentation de la vitesse de soudage, en favorisant la formation de grains perpendiculaires à la direction de soudage, favorisait la fissuration à chaud. En revanche, nous n'avons pu, en modifiant la vitesse de soudage, modifier significativement la taille de la zone équiaxe, qui est plus résistante à la fissuration.

Une fréquence élevée du courant alternatif élevée a cependant permis d'obtenir une structure de grains équiaxes sur l'ensemble de la zone fondue, ce qui est favorable pour limiter le risque de fissuration.

Référence:

[1] Rappaz, Drezet, Gremaud, «A new hot tearing criterion», Metallurgical and materials transactions A, 30A, 449, 1999.

[2] Cartaud, « Essais de fissuration à chaud », STC, vol. 49, No 9-10, 1995.

[3] Hunziker, «On formation of a centerline grain boundary during fusion welding». Acta mater. 48, 4191-4201, 2000.

[4] Norman, «Effect of welding parameters on the solidification microstructure of autogenous TIG welds in an Al-Cu-Mg-Mn alloy» , Materials Science and Engineering A259, p 53-64, 1999.