

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing.

PAR
Félix TSOUNGUI

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES JOINTS
BRASÉS D'ALLIAGES AÉRONAUTIQUES AVEC DU BNI-2 COMME MÉTAL
D'APPORT

MONTRÉAL, LE 6 MAI 2010

© Tous droits réservés, Félix Tsoungui, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE

M. Philippe Bocher, directeur de recherche
Professeur au département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure

M. Jean-Luc Fihey, président du jury
Directeur du département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure

M. Daniel P. Turner, membre du jury
Ingénieur, Groupe de développement des procédés spéciaux, Pratt & Whitney Canada

M. Victor Songmene, membre du jury
Professeur au département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 MARS 2010

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été possible grâce au concours de personnes que je voudrais remercier ici.

Tout d'abord, je voudrais remercier M. Philippe Bocher, mon directeur de mémoire, pour toute la confiance qu'il m'a témoignée en me donnant l'opportunité d'effectuer une Maîtrise sous sa supervision. Je tiens à saluer son professionnalisme, ses qualités humaines hors normes, son esprit critique et son sens de l'humour qui m'ont vraiment fait apprécier le travail de recherche et développement sous sa supervision.

Je tiens ensuite à adresser toute ma gratitude à M. Daniel P. Turner pour toute la confiance qu'il m'a également témoignée en acceptant de s'occuper de mon encadrement chez Pratt & Whitney Canada. Ses conseils pratiques très riches d'enseignements, sa disponibilité, son professionnalisme et son humeur toujours très joviale ont grandement facilité mes travaux.

Je voudrais ensuite remercier Serge Plamondon, Radu Ramonica, Jean-Guy Gagnon, Florent Bridier et Pierre-Emmanuel Dupire de l'École de Technologie Supérieure, pour leur assistance technique lors des tests mécaniques, d'analyse métallographique et d'analyse des mécanismes de rupture au MEB. Mes remerciements vont également aux collègues de Pratt & Whitney Canada, particulièrement Marjolaine Côté et Michel Bélanger, de même que Raymond Ferron et Daniel Labrie, tout comme leurs collègues du centre de brasage et du laboratoire des matériaux, pour leur assistance technique, leur disponibilité, leur sympathie et leur joie de vivre. Je voudrais aussi adresser des remerciements à tous les collègues de Pratt & Whitney qui m'ont ponctuellement apporté leurs aide et recommandations, et à tous ceux qui, par leur compagnie et leur sympathie, ont su rendre mes années de Maîtrise très agréables, mais aussi très enrichissantes.

Je voudrais aussi remercier toute ma famille et autres proches qui m'ont aidé, soutenu et encouragé tout au long de mes études. Je me réjouis enfin de la naissance de Brendan, mon premier fils dont la naissance pendant ma Maîtrise fut un élément catalyseur et dynamisant.

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET MICROSTRUCTURALE DES JOINTS BRASÉS D'ALLIAGES AÉRONAUTIQUES AVEC DU BNI-2 COMME MÉTAL D'APPORT

Félix TSOUNGUI

RÉSUMÉ

Le présent projet a pour but d'établir une méthode robuste pour évaluer les propriétés mécaniques des joints brasés d'alliages aéronautiques en tension-cisaillement et d'en établir les mécanismes de rupture en fonction des caractéristiques physiques et les microstructures des joints. Les principaux facteurs étudiés sont : la longueur de recouvrement, l'épaisseur du joint brasé (aussi appelée gap), l'épaisseur du métal de base, le ratio du recouvrement par rapport à l'épaisseur du métal de base et les microstructures des joints (avec et sans eutectiques). Leurs effets sur les propriétés mécaniques et les mécanismes de rupture ont été analysés et mis en évidence. Le brasage a été effectué selon la spécification AMS 2675 en utilisant l'alliage AWS BNi-2 comme métal d'apport et l'Inconel 625 comme métal de base. Les tests de traction ont été conduits conformément à la norme ASTM E08-4 et les résultats ont été exploités selon la norme AWS C3.2 et suivant certains modèles analytiques.

Les résultats obtenus montrent que la présence d'eutectiques dans les joints brasés diminue considérablement leur résistance mécanique et leur ductilité. Pour des recouvrements typiques de production, voisins de 4 mm (0.150 pouce), les joints brasés sans eutectiques apparaissent nettement plus résistants que ceux avec eutectiques. L'on note une amélioration de l'ordre de 50% et 25% des joints avec des gaps respectivement large et petit. De plus, au delà d'un ratio de recouvrement par rapport à l'épaisseur de métal de base de 2, environ 90% des propriétés mécaniques du métal de base en tension pure sont atteintes.

Pour tous les joints testés, il a été observé que l'amorce de fissures se produisait toujours à la surface des filets, très précisément dans la zone eutectique. La propagation quant à elle semble ne dépendre que du recouvrement et de la présence ou non d'eutectiques. La présence d'une zone eutectique continue semble faciliter la propagation des fissures dans le joint sans plasticité, tandis qu'à l'opposée, la phase γ -nickel libre d'eutectiques semble ductile et non propice à la propagation de fissures, même pour des joints très courts. Ainsi, les joints sans eutectiques ont tendance à rompre dans le métal de base, en présentant un comportement ductile qui pourrait permettre une application structurelle.

Une étude complémentaire a été réalisée à la fin de ce projet. Elle a permis de comparer les propriétés mécaniques des joints brasés à celles du métal de base usiné en recouvrement simple. Les résultats obtenus montrent que les joints brasés totalement dépourvus d'eutectiques ont des propriétés mécaniques similaires à celles du métal de base. L'absence totale d'eutectique augmente la résistance mécanique et la ductilité d'un joint brasé de respectivement 40% et 60% par rapport au métal de base.

MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF AEROSPACE BRAZED JOINTS WITH THE BNI-2 AS FILLER METAL

Félix TSOUNGUI

ABSTRACT

The present project aims to evaluate the mechanical properties of nickel based brazed joints in tensile and shear, and to establish their fracture mechanism. The main factors studied are: the overlap length, the braze thickness, the base metal thickness, the ratio of overlap to the thickness of the base metal and as well the presence or not of the eutectic phases in the brazed joint. Their effects on mechanical properties and fracture mechanisms have been investigated. The brazing process has been carried out according to the AMS 2675 specification using the AWS BNi-2 (AMS 4777) filler metal. The base metal used was the Inconel 625 (AMS 5599). Tensile tests were carried out according to the ASTM E08-4 specification and results were analyzed based on the AWS C3.2M specification and some analytical models.

The results obtained show that the presence of eutectic phases in the brazed joints drastically decreases their strength. For typical overlap lengths near 4 mm (0.150 in), the brazed joints without eutectics are clearly stronger than those with eutectics. A difference of 50% has been observed for brazed joints with a larger gap and about 25% for those with a smaller gap. Moreover, with an overlap ratio of 2 and over, the brazed joints without eutectics exhibit about 90% of the pure base metal tensile strength.

For all joints tested, it has been observed that cracks always initiate at the surface of the fillet, in the eutectic zone. The propagation however depends on the overlap and the microstructure. The presence of a continuous eutectic zone throughout the joint seems to facilitate the crack propagation, while the γ -nickel phase free of eutectics seems more ductile and does not show any evidence of crack propagation, even for very short overlap lengths. Therefore, the brazed joints without eutectics exhibit ductile behavior and tend to fail in the base metal, this suggests a good potential for structural applications.

A complementary study has been carried out at the end of this project. The goal was to compare braze mechanical properties to the machined base metal in simple overlap configuration. The results obtained show that in absence of eutectics in the joint and at the fillets, the brazed joints have similar mechanical properties to that of the base metal. Concretely, the complete absence of eutectics increases braze mechanical strength and ductility respectively to 40 % and 60 % while compared to the pure base metal.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	9
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES TESTS MÉCANIQUES DES JOINTS BRASÉS : APPLICATION AUX JOINTS À RECOUVREMENT SIMPLE	11
1.1 Brasage : définitions, généralités et mise en contexte	11
1.2 Géométries des joints brasés	12
1.3 Propriétés mécaniques en traction-cisaillement des joints à recouvrement simple	13
1.3.1 Cas des joints brasés à recouvrement simple	13
1.3.2 Modèle simple de calcul des contraintes dans un joint à recouvrement	15
1.3.2.1 Définition des contraintes de tension et cisaillement	15
1.3.2.2 Définition d'une contrainte équivalente : critère de Von Misès	17
1.3.3 Modèles analytiques de calcul des contraintes dans un joint à recouvrement	19
1.3.3.1 Modèle analytique de Volkersen	19
1.3.3.2 Modèle prenant en compte l'angle de flexion	21
1.3.3.3 Modèle analytique de Goland et Reissner	24
1.3.4 Effets de divers paramètres sur les propriétés mécaniques des joints brasés	28
1.3.4.1 Effet de la longueur de recouvrement du joint	28
1.3.4.2 Effet des propriétés mécaniques des matériaux de base	29
1.3.4.3 Effet de l'écartement du joint	31
1.3.4.4 Effet de la température de brasage	31
1.3.4.5 Effet du temps de brasage	33
1.3.4.6 Effet des microstructures des joints brasés	33
1.4 Propriétés en fatigue des joints à recouvrement	34
1.5 Propriétés mécaniques des joints brasés en bout à bout	37
1.5.1 Résistance mécanique des joints en bout à bout : effet de l'écartement	37
1.5.2 Fatigue des joints brasés en bout à bout : effet de l'écartement	38
CHAPITRE 2 DESCRIPTION EXPERIMENTALE	39
2.1 Buts et objectifs	39
2.2 Procédures de fabrication des joints brasés	39
2.2.1 Les matériaux utilisés	39
2.2.2 Les paramètres géométriques de l'assemblage	40
2.2.3 Les microstructures des joints brasés	42
2.2.4 Matrice d'essais	42
2.2.5 Les recettes de brasage	43
2.3 Préparation de surface des matériaux	43
2.4 Procédure d'assemblage des échantillons	44
2.4.1 Pré-assemblage et préparation des joints brasés	44
2.4.2 Brasage final des échantillons en fournaise	46
2.5 Inspection et contrôle des échantillons testés	47

2.5.1	Inspection visuelle	48
2.5.2	Inspection par microscopie optique	48
2.6	Description des essais mécaniques	49
2.6.1	Géométrie des éprouvettes de traction	49
2.6.2	Procédure des tests mécaniques	50
	2.6.2.1 Procédures des tests de traction	50
	2.6.2.2 Mesure des angles de pivotement des joints	51
2.7	Comparaison des propriétés des joints brasés à celles du métal de base	52
2.8	Analyse fractographique	53
CHAPITRE 3 RÉSULTATS : ANALYSE ET INTERPRÉTATION		54
3.1	Résultats des essais préliminaires	54
3.1.1	Détermination des recettes de brasage	54
3.1.2	Contrôle du gap et de la longueur de recouvrement des joints	56
3.2	Résultats des tests mécaniques	57
3.2.1	Courbes de charge en fonction du déplacement axial	57
3.2.2	Analyse des contraintes de tension et cisaillement des joints brasés	60
	3.2.2.1 Exploitation du modèle simple (AWS C3.2)	60
	3.2.2.2 Résultats des tests de comparaison des joints brasés avec les joints monobloc de métal de base	66
	3.2.2.3 Exploitation des modèles analytiques	69
3.2.3	Analyse fractographique	72
	3.2.3.1 Définition du filet d'un joint brasé	72
	3.2.3.2 Les différents types de rupture des joints brasés	73
	3.2.3.3 Microscopie électronique à balayage	87
CHAPITRE 4 DISCUSSIONS		96
4.1	Définition des recettes de brasage	96
4.2	Contrôle des caractéristiques physiques des joints	97
4.3	Influence des paramètres expérimentaux investigués	97
4.3.1	Influence des microstructures	97
	4.3.1.1 Influence des microstructures sur les propriétés mécaniques	97
	4.3.1.2 Influence des microstructures sur les mécanismes de rupture	98
4.3.2	Influence du gap	99
	4.3.2.1 Influence du gap sur les propriétés mécaniques	99
	4.3.2.2 Influence du gap sur les mécanismes de rupture	100
4.3.3	Influence de l'épaisseur du métal de base	101
4.3.4	Propriétés des monoblocs usinés en comparaison avec celle des joints brasés sans eutectiques	101
4.3.5	Critère de rupture des joints brasés	102
4.3.6	Propriétés en fatigue des joints brasés	103
4.3.7	Exploitation des modèles analytiques	103
CONCLUSION		105
RECOMMANDATIONS		108

ANNEXE I	COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS	111
ANNEXE II	MATRICE DES ESSAIS.....	112
ANNEXE III	DÉTAILS DES RECETTES DE BRASAGE UTILISÉS	113
ANNEXE IV	DISTRIBUTION STATISTIQUE DES MESURES DE GAPS ET RECOUVREMENTS DES JOINTS BRASÉS UTILISÉS	115
ANNEXE V	PROCÉDURE DE FABRICATION DES MONOBLOCS DE MÉTAL DE BASE.....	118
ANNEXE VI	QUELQUES RÉSULTATS DES MODÈLES ANALYTIQUES EXPLOITÉS	120
ANNEXE VII	RÉCAPITULATIF DES MODES DE RUPTURE DES JOINTS BRASÉS D'INCONEL 625 EN TENSION-COMPRESSION.....	125
ANNEXE VIII	COURBES DE CHARGE EN FONCTION DU DÉPLACEMENT AXIAL DES JOINTS BRASÉS	126
ANNEXE IX	EXEMPLES DE MICROSTRUCTURES ET MESURES OBTENUES AVEC DIFFÉRENTS TEMPS DE BRASAGE DANS DES JOINTS BRASÉS DE 0.004 POUCE DE GAP	130
BIBLIOGRAPHIE.....		134

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Assemblage à recouvrement simple (adapté de Paroissien [3]).....	13
Figure 1.2	Illustration de l'hétérogénéité des contraintes de tension et cisaillement dans un joint à recouvrement simple [8].....	16
Figure 1.3	Représentation des contraintes de tension et cisaillement dans un joint brasé à recouvrement simple; les contraintes sont calculées suivant la norme AWS C3.2 qui ne tient pas compte du pivotement du joint: les points foncés indiquent une rupture dans le joint tandis que ceux clairs, indiquent une rupture dans le métal de base [16].	17
Figure 1.4	Calcul de la distribution des contraintes de Von Misès pour différents recouvrements (0.5T, 1T, 2T, 3T, 4T et 5T, T étant l'épaisseur du métal de base), dans un joint d'acier inox brasé avec de l'argent pur (adaptée de Flom et Wang [6]).	18
Figure 1.5	Distribution typique de la contrainte de cisaillement dans un joint adhésif à recouvrement selon Volkersen (adapté de Paroissien [3]).....	20
Figure 1.6	Illustration du processus d'endommagement des joints à recouvrement simple lors d'un essai de tension (adapté de Bredzs et Miller [5]).	21
Figure 1.7	Représentation d'un joint brasé déformé avec l'angle de flexion ϕ [8].	22
Figure 1.8	Représentation expérimentale des contraintes équivalentes de Von Misès dans les joints brasés en fonction du recouvrement (Le critère de Beltrami-Huber est une autre approche mais qui n'est pas discutée dans le présent travail) [8].	23
Figure 1.9	Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon Goland et Reissner dans un joint adhésif à simple recouvrement (adapté de Minghao Qin [13]).....	26
Figure 1.10	Représentations schématiques de la distribution de la contrainte de tension dans un joint collé à recouvrement simple, une modélisation obtenue en utilisant les modèles de Goland et Reissner (G&R) et un autre modèle proposé par Paroissien (adapté de Paroissien [3]).	27

Figure 1.11	Distribution de la contrainte de cisaillement dans un joint collé à recouvrement simple, une modélisation obtenue avec les modèles de Goland et Reissner (G&R) et un autre modèle proposé par Paroissien (adapté de Paroissien [3]).	27
Figure 1.12	Courbes des contraintes de rupture en tension et cisaillement dans un joint brasé à recouvrement simple (adapté de Bredzs et Miller [5]).	29
Figure 1.13	Influence des propriétés mécaniques du métal de base sur la résistance mécanique à la rupture en cisaillement des joints brasés (adapté de la référence de Bredzs et Miller [5]).	30
Figure 1.14	Influence de la température sur la résistance au cisaillement des joints brasés de 304 SS avec Ni-Cr-B (adapté de Bredzs et Miller [5]).	32
Figure 1.15	Évolution de la valeur de gap libre de phases eutectiques dans les joints brasés d'inconel 718 (AMS 5596) en fonction de la température de brasage, pour deux alliages de brasage, l'AWS BNi-2 et CPW 475 [1].	33
Figure 1.16	Microstructure d'un joint de AISI 347 brasé avec l'alliage AWS BNi-1a où l'on peut voir les phases eutectiques et quelques porosités au filet (adaptée de Aspden et Feduska [18]).	34
Figure 1.17	Résultats de fatigue en flexion pure des joints d'acier 347 brasés avec l'AWS BNi-1a à 1113°C (2035°F) pendant 10 min, le gap et le recouvrement sont respectivement de 0.025 et 3.175 mm (0.001 et 0,125 pouce), les tests de fatigue ont été effectués à température ambiante (graphique retracé à partir des données de Aspden et Feduska [18]).	35
Figure 1.18	Résultats de fatigue des joints d'acier AISI 347 brasés avec de l'AWS BNi-1a à 1113°C (2035°F) pendant 10 min, les tests de fatigue ont été effectués en flexion pure à 593°C (1100°F), le graphique a été retracé à partir des données obtenues de Aspden et Feduska [18]).	36
Figure 1.19	Résistance mécanique à la rupture d'un joint d'acier brasé en bout à bout en fonction de l'écartement du joint [2, 17].	37
Figure 1.20	Exemples de courbes de fatigue des joints brasés en bout à bout [20].	38
Figure 2.1	Joint en V utilisé pour évaluer les microstructures des joints en fonction de leur gap.	41

Figure 2.2	Aperçu des joints obtenus avec (a) et sans eutectiques (b).....	42
Figure 2.3	Nomenclature utilisée pour l'identification des différents joints testés.	43
Figure 2.4	Bains électrolytiques utilisés pour la préparation de surface des matériaux utilisés.....	44
Figure 2.5	Pré-assemblage de deux plaquettes avant introduction de la pâte à braser sur une extrémité du joint.....	45
Figure 2.6	Aperçu du filet à l'entrée d'un joint brasé.....	46
Figure 2.7	Fournaise sous vide utilisée pour le brasage des échantillons.	47
Figure 2.8	Exemples d'échantillons tels que brasés à la sortie de la fournaise.....	47
Figure 2.9	Dimensions (en pouces) des éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques, (ASTM E 08-4).	49
Figure 2.10	Éprouvette type de joint brasé utilisée pour les tests mécaniques (ASTM E 08-4).....	49
Figure 2.11	Machine MTS utilisée pour effectuer les tests mécaniques à l'école de technologie supérieure de Montréal.	50
Figure 2.12	Photographies de joints brasés après les tests de traction, on peut voir les points qui auraient dû permettre de suivre l'évolution de l'angle de pivotement au cours de l'essai de traction.....	52
Figure 2.13	Exemples de (a) binoculaire, (b) microscope optique et (c) microscope électronique à balayage utilisés pour les analyses métallurgiques et fractographiques.....	53
Figure 3.1	Largeur moyenne (en pourcentage par rapport au gap final du joint) de la zone eutectique dans les joints brasés en fonction du gap final du joint.....	55
Figure 3.2	Largeur moyenne (en pourcentage par rapport au gap final du joint) de la zone eutectique dans les joints brasés en fonction du gap final des joints.....	56
Figure 3.3	Courbes de chargement des joints brasés sans eutectiques et avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) pour différents recouvrements, la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.....	58

Figure 3.4	Courbes de chargement des joints brasés sans eutectiques et avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) pour différents recouvrements, la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.	58
Figure 3.5	Courbes de chargement des joints brasés avec eutectiques et avec un gap de 100 microns (0.004 pouce) pour différents recouvrements la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.	59
Figure 3.6	Courbes de chargement des joints brasés avec eutectiques et avec un gap de 100 microns (0.004 pouce) pour différents recouvrements la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.	59
Figure 3.7	Courbes de cisaillement dans les joints brasés avec eutectiques.	61
Figure 3.8	Courbes de cisaillement dans les joints brasés sans eutectiques.	61
Figure 3.9	Courbes de tension dans les joints brasés sans eutectiques.	62
Figure 3.10	Courbes de tension dans les joints brasés avec eutectiques.	63
Figure 3.11	Courbes de cisaillement des joints brasés ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce).	64
Figure 3.12	Courbes de cisaillement des joints brasés ayant un gap de 100 microns (0.004 pouce).	64
Figure 3.13	Courbes de tension des joints brasés ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce).	65
Figure 3.14	Courbes de tension des joints brasés ayant un gap de 100 microns (0.004 pouce).	65
Figure 3.15	Influence du rayon du filet dans un joint monobloc à recouvrement simple, les deux monoblocs ont des valeurs identiques de recouvrement (4.67 mm), de gap (25 microns), seuls leurs rayons de filets différent, le monobloc A a un rayon de filet de 880 microns contre 250 microns pour le monobloc B.	67
Figure 3.16	Influence du gap des joints monobloc à recouvrement simple, les deux monoblocs ont des valeurs identiques de recouvrement (4.67 mm), de rayon de filet (250 microns), seuls leurs gaps différent, le monobloc C a un rayon de filet de 25 microns contre 100 microns pour le monobloc D.	68

Figure 3.17	Comparaison des propriétés mécaniques d'un joint brasé sans eutectiques à celles de deux monoblocs d'Inconel 625, les trois joints ont un même recouvrement (4.67 mm), une même valeur de gap (25 microns), l'un des deux monoblocs contient un filet avec des phases eutectiques contrairement à l'autre.	69
Figure 3.18	Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon le modèle de Goland & Reissner, dans le joint brasé dont la référence est 184-1-W-C.	71
Figure 3.19	Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon le modèle de Goland & Reissner, dans le joint brasé dont la référence est 920-4-W-C.	71
Figure 3.20	Illustration des amorces de microfissures dans le filet d'un joint brasé.	73
Figure 3.21	Vues de profil des faciès de rupture des joints brasés et ayant un gap large 100 microns (0.004 pouce) et avec eutectiques.	74
Figure 3.22	Faciès de rupture typiques des joints possédant une zone eutectique continue pour différents recouvrements, respectivement 37, 69, 98, 184, 490 et 920 millièmes de pouce (0.94, 1.75, 2.50, 4.675, 12.45 et 23.37 pouces), la largeur du joint quant à elle est de 6.35 mm (0.25 pouce).	75
Figure 3.23	Exemple de joint brasé rempli de phases eutectiques et illustrant la facilité de réamorçage et de propagation de fissures dans la zone eutectique.	76
Figure 3.24	Vue de profil d'un faciès de rupture dans un joint contenant une zone eutectique continue.	77
Figure 3.25	Vues de profil de deux exemples de rupture dans le métal de base, dans les deux cas, les flèches indiquent les zones d'amorce de fissures.	78
Figure 3.26	Vues de face des faciès de rupture des joints brasés ayant rompu à travers le métal de base après une amorce dans le filet, les flèches en pointillé indiquent les sites d'amorces des fissures, les pleines indiquent quant à elles la zone de rupture finale.	78
Figure 3.27	Illustration du processus d'amorçage et propagation de fissures d'un joint brasé sans eutectiques, les flèches en pointillé indiquent le sens de propagation de la fissure principale à chacune des extrémités a) et b) du même joint brasé.	79
Figure 3.28	Exemples de joints brasés ayant rompu à travers le joint et le métal de base.	81

Figure 3.29	Micrographies illustrant la difficulté de la propagation de fissure dans un joint ne possédant pas une zone eutectique continue où l'on voit des fissures secondaires transversales, les flèches en pointillé indiquent le sens de la propagation.	82
Figure 3.30	Chemin de propagation de fissures dans un joint brasé avec eutectiques de 25 microns (0.001 pouce) de gap, les flèches en pointillé indiquent le sens de propagation.....	83
Figure 3.31	Illustration de la discontinuité de propagation des fissures dans un joint ayant un gap de 25 microns (0,001 pouce) et avec zone eutectique non parfaitement continue.	84
Figure 3.32	Illustration de la propagation de la fissure dans le métal de base, à l'extrémité de la zone de diffusion, lorsqu'il n'y a pas d'eutectiques dans le joint brasé.	84
Figure 3.33	Profil de propagation des fissures dans les joints courts sans eutectiques, exemples de joints de 0.584 mm (0.023 pouce) de recouvrement.....	85
Figure 3.34	Profil de propagation des fissures dans les joints courts sans eutectiques, exemple d'un joint de 1.75 mm (0.069 pouce) de recouvrement.....	86
Figure 3.35	Profil de propagation des fissures dans un joint court sans eutectiques, exemples d'un joint de 0.305 mm (0.012 pouce) de recouvrement.....	86
Figure 3.36	Faciès de rupture d'un joint de 25 microns (0.001 pouce) de gap avec des eutectiques, la flèche en bas du faciès indique les différentes zones investiguées.	88
Figure 3.37	Faciès de rupture dans le filet où l'on voit une abondance de phases eutectiques fragiles ayant rompu par clivage, l'image b) est un agrandissement d'une zone de l'image a) et les flèches indiquent le sens de propagation de la fissure principale.....	89
Figure 3.38	Faciès de rupture dans la zone eutectique située près du filet, l'on y voit de nombreuses fissures secondaires perpendiculaires à la direction de propagation, la figure b) est un agrandissement de la figure a) (zone 2 de la Figure 3.36).....	90
Figure 3.39	Faciès de rupture dans une zone eutectique très fine et entourée de phases γ -nickel, la figure b) est un agrandissement de la figure a) (zone 3 de la Figure 3.39).	90

Figure 3.40	Faciès de rupture dans le métal de base où l'on voit de nombreuses cupules caractéristiques d'un comportement ductile, la figure b) est un agrandissement de la figure a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.	91
Figure 3.41	Faciès de rupture d'un joint de petit recouvrement et sans eutectiques, les flèches pleines indiquent l'emplacement des sites d'amorce de fissures, la flèche en pointillé quant à elle indique le sens de propagation de la fissure principale.	92
Figure 3.42	Faciès de rupture au filet d'un joint court et sans eutectiques (zone 1 de la Figure 3.41). L'image b) est un agrandissement de la partie supérieure gauche de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.	93
Figure 3.43	Vue du faciès de rupture dans un joint de petit recouvrement sans eutectiques où l'on aperçoit de nombreuses cupules caractéristiques d'une surcharge dans une zone ductile du métal de base (zone 3 de la Figure 3.41).	94
Figure 3.44	Faciès de rupture dans le métal de base d'un joint court sans eutectiques (zone 5 de la Figure 3.36), l'image b) est un agrandissement du centre de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.	95
Figure 3.45	Faciès de rupture dans le métal de base dans un joint de petit recouvrement sans eutectiques (zone 6 de la Figure 3.36) l'image b) est un grandissement du centre de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.	95

LISTE DES SYMBOLES

L	longueur de recouvrement (mm)
O	origine du joint
b	largeur du joint (mm)
e_1	épaisseur du métal de base (mm)
e_2	épaisseur du métal de base (mm)
e	épaisseur du joint brasé, aussi appelé gap (mm)
F	Force appliquée au joint brasé (N)
σ	contrainte de tension appliquée au joints brasé (MPa)
σ_{moy}	contrainte moyenne de tension (MPa)
σ_{max}	contrainte maximale de tension de l'assemblage (MPa)
τ	contrainte de cisaillement appliquée au joint brasé (MPa)
τ_{moy}	contrainte moyenne de cisaillement (MPa)
τ_{max}	contrainte maximale de cisaillement de l'assemblage (MPa)
G	module de cisaillement du joint (MPa)
E	module d'élasticité du joint (MPa)
E_1	module d'élasticité du matériau de base (MPa)
φ	angle de pivotement des joints à recouvrement simple (°)
k	moment fléchissant appliqué au joint à recouvrement (Nm)
k'	facteur de force lié au moment fléchissant
M_0	moment de flexion (Nm)
V_0	effort tranchant
ν	coefficient de poisson du joint
x	Position donnée du joint le long du recouvrement (mm)
AISI	American Iron and steel Institute
AWS	American Welding Society
AMS	Aerospace Material Specifications
ASTM	American Society for Testing of Materials
CPW	Spécification interne de Pratt & Whitney Canada

INTRODUCTION

Une structure complexe telle un moteur d'avion est constituée de nombreuses pièces mécaniques assemblées les unes aux autres par divers procédés d'assemblage (Vissage, boulonnage, soudage, rivetage, brasage, collage, etc.). Chacun de ces procédés a des avantages et inconvénients, en termes de coût, de facilité de mise en œuvre, de limitations du procédé, de temps d'exécution, mais aussi et surtout, en fonction des propriétés mécaniques des assemblages produits. Pour certaines applications spécifiques à haute température, le soudage est le procédé d'assemblage de premier choix. Les propriétés mécaniques des joints soudés ont été longuement étudiées depuis des décennies, c'est ce qui justifie probablement son succès auprès des concepteurs mécaniques. Pourtant, le procédé a de nombreux inconvénients: il est coûteux, nécessite une main d'œuvre hautement qualifiée, affecte les microstructures et la qualité métallurgique des matériaux et requiert des traitements thermiques complémentaires susceptibles de provoquer d'importantes distorsions.

Le contexte économique actuel impose aux industriels de réduire leurs coûts de production tout en respectant des normes environnementales de plus en plus draconiennes. Dans un tel contexte, le brasage apparaît comme une solution alternative efficace face au soudage. Le procédé est peu coûteux et ne requiert pas nécessairement une main d'œuvre qualifiée. Le procédé se produit à basse température, les microstructures des matériaux sont par conséquent peu affectées, ce qui permet aux matériaux de conserver leur intégrité structurale. Cependant, les propriétés mécaniques des joints brasés restent peu connues. Si pour certaines applications, le brasage devait se substituer au soudage, il est important que les joints brasés aient des propriétés mécaniques et des mécanismes de rupture équivalents à ceux des joints soudés, aussi bien en mode statique qu'en fatigue. Des moyens de contrôle de la qualité des joints brasés doivent également être mis au point pour garantir leurs propriétés.

En étudiant les microstructures des joints brasés d'alliages aéronautiques, Turner [1], a permis d'améliorer et d'optimiser leurs conditions de brasage. Il est désormais possible de contrôler les microstructures de ces joints brasés et de produire des joints brasés libres

d'eutectiques. De part leur nature très fragile, ces phases eutectiques doivent nuire à la tenue mécanique des joints brasés. Le présent projet s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Il s'agit d'évaluer les propriétés mécaniques des joints brasés, de quantifier les effets des microstructures des joints et des caractéristiques physiques des assemblages. Les propriétés mécaniques des joints brasés seront comparées à celles des joints soudés afin d'apprécier leur potentiel pour les applications visées. Il sera également question d'analyser et comparer les mécanismes de rupture de ces joints dans différentes configurations expérimentales. Les objectifs sont d'optimiser les propriétés mécaniques des joints brasés, de mettre au point des moyens pour garantir leur robustesse et reproductibilité.

Dans le premier chapitre de ce document, en s'appuyant sur une recherche bibliographique exhaustive, nous aborderons les aspects théoriques et les problématiques liés aux propriétés mécaniques des assemblages à recouvrement simple. Nous présenterons différentes approches de calcul des résistances mécaniques des joints à recouvrement, celles-ci seront présentées et discutées. Nous présenterons également les effets de divers paramètres expérimentaux des joints brasés (caractéristiques géométriques et microstructures) sur les propriétés en tension-compression et en fatigue. Le deuxième chapitre sera consacré à la description expérimentale du présent travail. Il justifiera la configuration expérimentale choisie pour fabriquer les joints brasés de cette étude. Cette partie présentera les équipements utilisés et les moyens mis en œuvre pour obtenir des joints brasés conformément à une matrice d'expériences établie. Le troisième chapitre sera consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. Nous discuterons longuement de l'influence des paramètres expérimentaux investigués sur les propriétés mécaniques obtenues et les mécanismes de rupture des joints. Nous exploiterons également quelques uns des modèles analytiques présentés et les différents résultats seront comparés et discutés. Les mécanismes de rupture des joints brasés seront également présentés et discutés. Nous ferons enfin quelques recommandations au vue des travaux et discussions effectués.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES TESTS MÉCANIQUES DES JOINTS BRASÉS : APPLICATION AUX JOINTS À RECOUVREMENT SIMPLE

1.1 Brasage : définitions, généralités et mise en contexte

Le brasage est un procédé métallurgique qui permet d'assembler des matériaux à partir d'un métal d'apport à bas point de fusion. Le procédé se distingue des autres procédés par sa facilité de mise en œuvre. Dans le cas du soudage, les métaux de base et d'apport sont tous fondus localement et le joint soudé est constitué par solidification lors du refroidissement de l'ensemble des éléments. Dans le cas du brasage, seul le métal d'apport est fondu. Le métal d'apport liquéfié s'écoule par capillarité à travers le joint et, c'est en diffusant dans le métal de base certains de ses éléments d'alliage, le bore principalement, que le joint va se solidifier et permettre la formation d'une liaison métallique solide entre les matériaux assemblés. D'après Schwartz [2], on distingue deux types de brasage en fonction de la température de fusion du métal d'apport. Si celle-ci est inférieure à 450°C, on parle de brasage tendre et lorsqu'elle est supérieure à 450°C, on parle de brasage fort.

Grâce à ses nombreux avantages, le brasage est aujourd'hui très répandu, spécialement dans l'industrie aéronautique où il permet d'assembler nombreux composants pour moteurs et autres. Il se caractérise aussi par une absence de contraintes résiduelles dans les matériaux assemblés (toute la pièce est chauffée), des faibles coûts de production, une faible consommation d'énergie, une facilité et rapidité de mise en œuvre, une absence de traitements thermiques complémentaires après brasage, etc. Bien que de nombreuses études aient permis de mieux le comprendre et d'en améliorer la mise en œuvre, le brasage continue cependant de présenter des limites, en particulier lorsqu'il s'agit par exemple de braser certains alliages aéronautiques avec des métaux d'apport formant des eutectiques.

Dans un moteur d'avion, les sollicitations thermomécaniques subies par les pièces peuvent être extrêmement sévères. Seuls les alliages à base de nickel, de cobalt et autres alliages réfractaires sont capables de fonctionner dans de telles conditions. Ils possèdent en effet de bonnes propriétés thermomécaniques et une excellente résistance à la corrosion. Certaines de ces pièces assemblées par brasage se recouvrent naturellement d'une fine couche protectrice d'oxydes en surface (oxydes de Cr, Ti et Al). Cette couche très adhérente, lorsqu'elle n'est pas complètement supprimée par un procédé de préparation de surfaces, nuit au mouillage et à l'écoulement du métal d'apport en fusion, conduisant à de nombreux défauts (manque de brasage, porosités, présence de phases indésirables, etc.).

Outre ces problèmes de mouillabilité du métal d'apport, un autre problème majeur est à signaler, celui des phases eutectiques se formant dans le joint avec le BNi-2, le BNi-1, ou encore le Palnico 36M. Ces alliages de brasage au nickel contiennent du bore, du silicium et autres éléments qui leur confèrent généralement un bas point de fusion à une composition quasi eutectique; mais si les conditions de brasage ne sont pas adéquates, en particulier si les temps de brasage ne sont pas optimisés en fonction du gap des joints, une partie des phases eutectiques formées pendant le brasage restera après solidification du joint [1]. Les phases eutectiques formées sont constituées de phases fragiles, (des borures et siliciures essentiellement), des phases susceptibles de faciliter l'amorce de fissures dans le joint et provoquer un endommagement prématuré et non souhaitable de ce dernier.

1.2 Géométries des joints brasés

Les joints brasés peuvent exister sous différentes formes : en bout à bout, en forme de T, en recouvrement simple ou double, en tubes emboîtées l'une sur l'autre, etc. Mais en production, le recouvrement simple est la configuration la plus répandue, probablement pour des raisons de facilité de mise en œuvre. Afin de répondre aux besoins de production, nous ne considérerons que le recouvrement simple dans le cadre de cette étude.

La figure 1.1 présente un exemple typique de joint à recouvrement simple et permet de définir les dimensions permettant de décrire de tels joints.

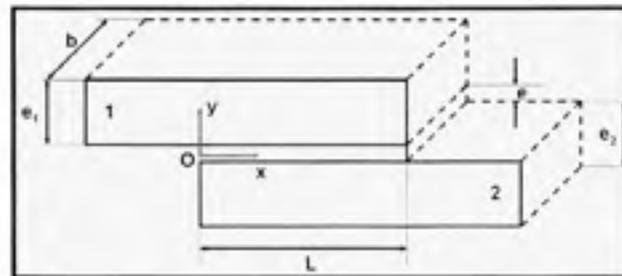


Figure 1.1 Assemblage à recouvrement simple (adapté de Paroissien [3]).

Dans cet assemblage, on retrouve un métal d'apport solidifié entre deux métaux de base. La longueur L , correspond au recouvrement du joint, l'épaisseur e du joint appelée ici gap, tandis que b et e_1 sont respectivement la largeur et l'épaisseur du métal de base.

1.3 Propriétés mécaniques en traction-cisaillement des joints à recouvrement simple

Les propriétés mécaniques d'un joint à recouvrement sont obtenues par un test de traction. Les joints les plus souvent testés de cette manière sont les joints adhésifs. Seuls quelques cas concernent les joints métalliques et, très souvent, ce ne sont que des travaux de simulations numériques et non pas des calculs analytiques.

1.3.1 Cas des joints brasés à recouvrement simple

Les configurations les plus répandues des joints brasés sont le recouvrement simple ou le recouvrement de deux tubes emboîtés l'un dans l'autre. La norme AWS C3.2 [4] définit un cadre réglementaire pour évaluer les propriétés mécaniques des joints à recouvrement simple.

Cette spécification définit comment calculer les résistances mécaniques en tension et en cisaillement moyens dans de tels joints. L'approche est très simple puisqu'elle ne tient pas compte du pivotement des joints lors des tests mécaniques [3, 5-14], mais elle est suffisante pour permettre de comparer les propriétés mécaniques des joints dans différentes configurations expérimentales. Comme le soulignent de nombreux auteurs, la configuration de recouvrement provoque un important désaxement du joint, ce qui rend difficile les calculs de résistance mécanique réelle du joint.

C'est précisément l'effet géométrique induit par le recouvrement qui est difficile à prendre en considération dans les calculs des contraintes appliquées dans le joint, ceci rend complexe l'évaluation des propriétés mécaniques réelles des assemblages à recouvrement simple.

De nombreux modèles analytiques [10-13] sont disponibles dans littérature, ils permettent de prendre en considération cet effet géométrique dans les calculs des contraintes et, d'obtenir des valeurs plus réalistes de résistances mécaniques en tension et en cisaillement des joints à recouvrement. Bien que ces modèles aient été développés avec de nombreuses hypothèses simplificatrices, il est intéressant d'appliquer ces modèles aux joints brasés et procéder à une comparaison avec le modèle simple qui est plus couramment utilisé dans l'industrie.

Dans les parties qui suivent, nous allons étudier en détail le modèle simple décrit dans la norme AWS C3.2 ainsi que quelques autres modèles analytiques et comprendre de quelle manière ils peuvent nous servir à évaluer et comparer les propriétés mécaniques des joints brasés.

1.3.2 Modèle simple de calcul des contraintes dans un joint à recouvrement

1.3.2.1 Définition des contraintes de tension et cisaillement

Un joint à recouvrement, soumis à un essai de traction, est soumis à deux types de contraintes : la tension (σ) et le cisaillement (τ). La spécification AWS C3.2 ne donne que les valeurs moyennes (σ_{moy} et τ_{moy}) à partir de F , la force de rupture du joint (en N) :

$$\sigma_{moy} = \frac{F}{b * e_1} \quad (1.1)$$

$$\tau_{moy} = \frac{F}{b * L} \quad (1.2)$$

En réalité, les contraintes sont complexes et peuvent difficilement être décrites par une valeur moyenne. La figure 1.2 illustre la distribution hétérogène de ces deux contraintes le long du joint [8]. En effet, si on considère un petit élément de volume au centre du joint, celui-ci n'est sollicité qu'en cisaillement, alors qu'un autre petit élément de volume situé au bord du joint, quant à lui, subit l'effet de deux contraintes, une contrainte de tension, l'autre de cisaillement. L'effet géométrique provoque également un effet de triaxialité qui rend encore plus complexe la description des contraintes. La superposition de ces deux contraintes aux bords du joint provoque une concentration de contrainte, laquelle tend à expliquer que les fissures y soient quasi systématiquement initiées [6, 7, 17,18].

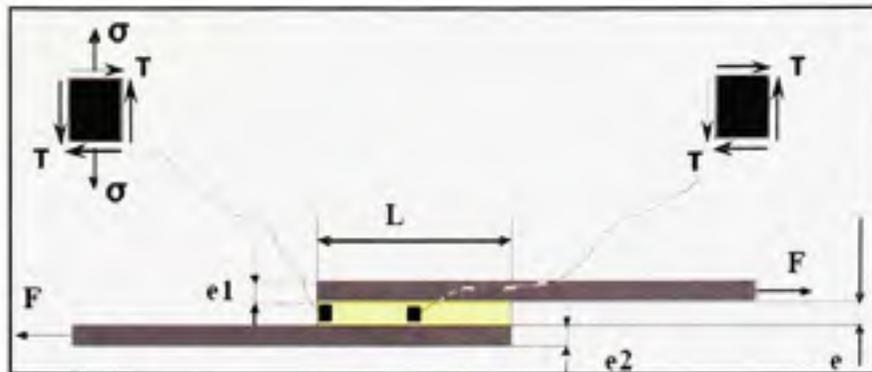


Figure 1.2 Illustration de l'hétérogénéité des contraintes de tension et cisaillement dans un joint à recouvrement simple [8].

Les courbes de contraintes de tension et cisaillement moyennes (figure 1.3) sont obtenues de façon classique en fonction du recouvrement ou plus exactement en fonction du ratio du recouvrement par rapport à l'épaisseur du métal de base. C'est une façon de normaliser et de s'affranchir de la géométrie de ces joints. Ce graphique met en évidence deux conditions de tests complètement différentes. Lorsque le recouvrement est grand, l'essai s'apparente à la tension pure du métal de base et le comportement du joint tend vers celui du métal de base. Pour des petits recouvrements, la rupture a tendance à se produire en cisaillement dans le joint. Pour des recouvrements intermédiaires, il se produit généralement des ruptures mixtes, à la fois dans le métal de base et dans le joint. Comme nous l'avons souligné, l'impact des microstructures sur les résistances mécaniques et les modes de ruptures des joints brasés n'est pas connu. D'où l'importance d'investiguer l'effet des phases eutectiques, en raison de leur fragilité, il pourrait drastiquement abaisser les résistances mécaniques de ces joints et par la même occasion, modifier leurs mécanismes de rupture.

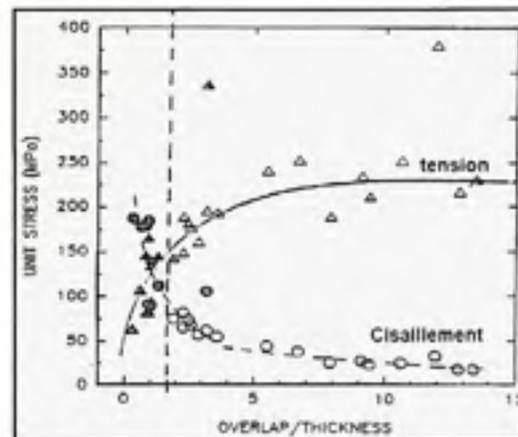


Figure 1.3 Représentation des contraintes de tension et cisaillement dans un joint brasé à recouvrement simple; les contraintes sont calculées suivant la norme AWS C3.2 qui ne tient pas compte du pivotement du joint: les points foncés indiquent une rupture dans le joint tandis que ceux clairs, indiquent une rupture dans le métal de base [16].

1.3.2.2 Définition d'une contrainte équivalente : critère de Von Misès

Flom et Wang [6] ont déterminé une contrainte équivalente de Von Misès pour définir un critère de rupture dans les joints brasés à recouvrement. En considérant un système élasto-plastique en déformation plane, ils ont obtenu par modélisation la distribution de la contrainte équivalente de Von Misès (figure 1.4) dans les joints d'aciers brasés avec de l'argent pur. Les joints qu'ils ont testés avaient des recouvrements variables (1.143 à 11.43 mm), une valeur de gap supposée constante (25 microns) et une épaisseur de métal de base de 2.3 mm. La figure 1.4 récapitule les résultats qu'ils ont obtenus par calcul analytique.

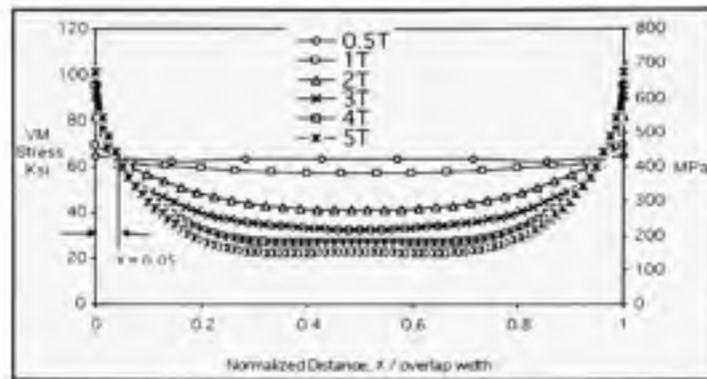


Figure 1.4 Calcul de la distribution des contraintes de Von Misès pour différents recouvrements (0.5T, 1T, 2T, 3T, 4T et 5T, T étant l'épaisseur du métal de base), dans un joint d'acier inox brasé avec de l'argent pur (adaptée de Flom et Wang [6]).

On voit en analysant les courbes (figure 1.4) obtenues pour différents recouvrements que la contrainte de Von Misès est quasiment constante et uniforme sur toute l'étendue des joints très courts (joints avec des recouvrements de 0.5T et 1T) alors que pour des joints plus longs, la contrainte de Von Misès demeure constante et uniforme au centre, mais augmente brutalement pour atteindre des valeurs maximales aux bords des joints. Le fait que les valeurs de contraintes soient maximales aux bords des joints expliquent pourquoi les fissures y sont toujours amorcées. Flom et Wang ont constaté que toutes les courbes de contrainte équivalente de Von Misès modélisées se croisaient en un même point. Sur une échelle normalisée (figure 1.4), ce point se situe à 5% de la longueur totale du joint à partir de chaque extrémité. Ils ont alors proposé la valeur de contrainte obtenue pour ce point comme valeur critique de rupture des joints brasés testés. S'il est validé, ce critère de défaillance pourrait s'appliquer à tous les joints quelles que soient leurs caractéristiques géométriques, mais ces hypothèses n'ont pas été validées par d'autres travaux. L'effet des microstructures reste inconnu, étant donné que les joints brasés testés par Flom et Wang étaient dépourvus de tous défauts (brasage à l'argent pur). L'influence de l'épaisseur du joint (gap) n'a pas non plus été étudiée, ni celle de la flexion des joints. La flexion a quand même été mentionnée, mais simplement pour signaler qu'elle se produisait au début des essais et qu'elle devenait négligeable par la suite.

1.3.3 Modèles analytiques de calcul des contraintes dans un joint à recouvrement

Le modèle de Volkersen [10] qui sera présenté par la suite donne l'expression des contraintes dans un joint à recouvrement en fonction des caractéristiques mécaniques de chaque matériau utilisé, mais il ne tient pas compte de la flexion des joints. C'est cependant le modèle de Goland et Reissner [12] qui est le plus complet en tenant compte de la flexion des joints et des caractéristiques élastiques de chacun des matériaux.

1.3.3.1 Modèle analytique de Volkersen

Paroissien [3] et Adams [9] rapportent les travaux de Volkersen [10] sur les joints adhésifs à recouvrement simple. Volkersen, dont les travaux ont été publiés en allemand en 1938, a analysé l'état des contraintes dans un joint collé à recouvrement simple en considérant l'adhésif et les substrats comme étant parfaitement élastiques et isotropes. Il néglige les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats, suppose alors travailler en contraintes planes, et, en s'intéressant à la distribution de contraintes de cisaillement dans la couche de colle, il obtient la distribution suivante (équation 3) dans un joint équilibré.

$$\tau(X) = \frac{\eta_v \cosh(\eta_v(L-X))}{2b \sinh\left(\frac{\eta_v L}{2}\right)} F \quad (1.3)$$

$$\eta_v = \sqrt{\frac{2G}{ee_1 E_1}} \quad (1.4)$$

Dans ces relations, E_1 est le module de Young des matériaux de base et G le module de cisaillement de l'adhésif, F est la force appliquée, b représente la profondeur du joint et X représente une position donnée le long du recouvrement.

Ce modèle de Volkersen montre que la contrainte de cisaillement est maximale au bord du joint et minimale au centre (figure 1.5). Dans l'optique de définir un critère de rupture des joints, par analogie au critère de rupture proposé par Flom et Wang, on pourrait considérer ici que la contrainte maximale τ_{\max} aux bords des joints comme étant la contrainte seuil à partir de laquelle la rupture des joints se produit. Elle peut être exprimée en fonction de la contrainte moyenne de cisaillement (équation 2) comme suit:

$$\tau_{\max} = \frac{\eta_v L}{2 \tanh(\eta_v L)} \tau_{\text{moy}} \quad (1.5)$$

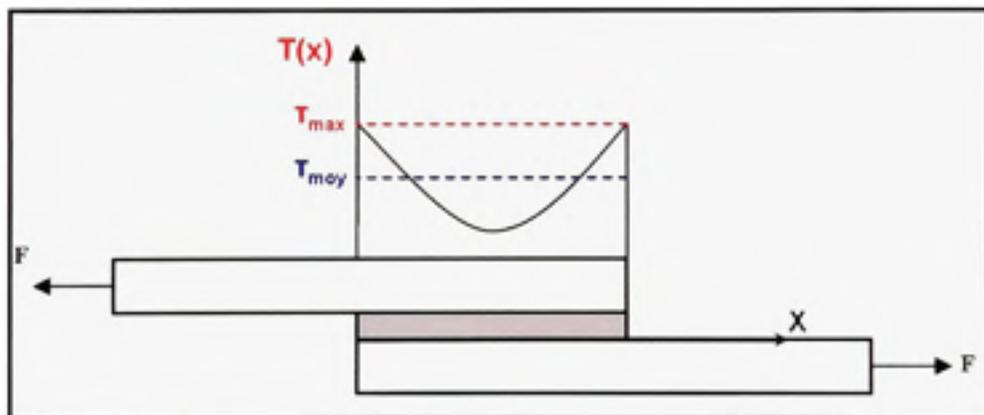


Figure 1.5 Distribution typique de la contrainte de cisaillement dans un joint adhésif à recouvrement selon Volkersen (adapté de Paroissien [3]).

1.3.3.2 Modèle prenant en compte l'angle de flexion

Mise en évidence du pivotement des joints brasés

De leur côté, Bredzs et Miller [5] cherchent à décrire ce qui se produit réellement lorsqu'un joint à recouvrement est soumis à une charge axiale. Selon eux, le comportement du joint brasé à recouvrement peut être résumé comme indiqué sur la figure 1.6.

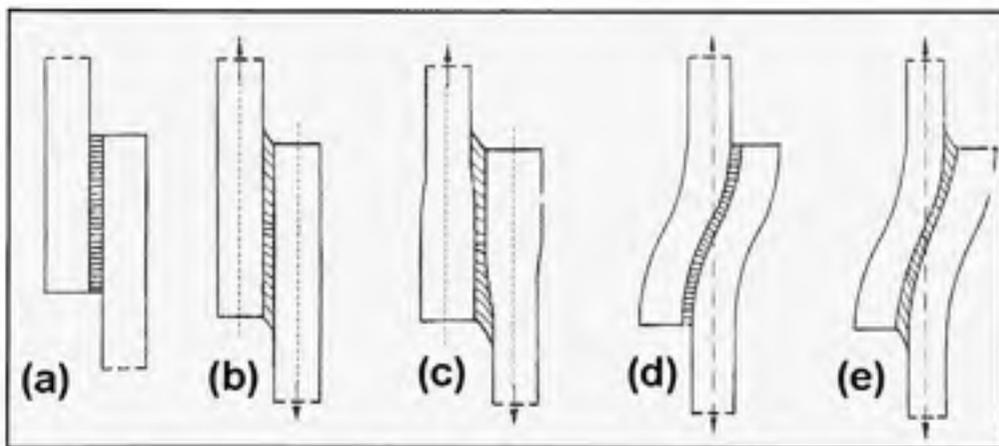


Figure 1.6 Illustration du processus d'endommagement des joints à recouvrement simple lors d'un essai de tension (adapté de Bredzs et Miller [5]).

Le premier cas (figure 1.6a) correspond à un échantillon avant sollicitation. Dans le deuxième cas (figure 1.6b), on observe une élongation du métal d'apport du fait du cisaillement dans le joint. Le troisième cas (figure 1.6c), est une distorsion du joint suite à la déformation du métal de base aux bords des joints. Le quatrième et dernier cas de distorsion (figure 1.6d) est dû au réalignement des forces sur le même axe. Le cas représenté sur la figure de droite (figure 1.6e) est une combinaison des trois cas b, c et d, elle correspond à un comportement final observé en pratique. À travers cette schématisation, on voit que la résistance mécanique des joints dépend des propriétés mécaniques des matériaux utilisés tant

dans le joint que dans le métal de base. Les caractéristiques microstructurales des matériaux utilisés doivent par conséquent faire l'objet d'une investigation.

Influence de l'angle de pivotement des joints

Plus précisément, Lugscheider et Reimann [8] ont établi une méthode pour calculer les contraintes de cisaillement et de traction dans un joint à simple recouvrement en tenant compte de l'angle de pivotement φ (figure 1.7). Ils ont ensuite calculé une contrainte de Von Mises (σ_{VM} .)

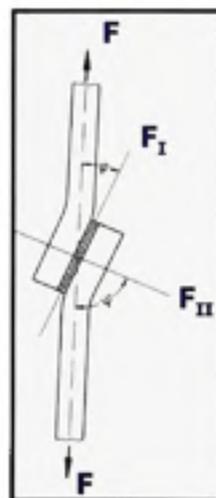


Figure 1.7 Représentation d'un joint brasé déformé avec l'angle de flexion φ [8].

Dans ce modèle, les contraintes de traction (σ) et de cisaillement (τ) (équations 1 et 2) sont adaptées de σ_{moy} et τ_{moy} en tenant compte de l'angle de flexion des joints mesuré.

$$\tau = \sigma_I = \frac{F \cos \varphi}{L * b} \quad \sigma = \sigma_{II} = \frac{F \sin \varphi}{L * b} \quad (1.6)$$

Les résultats de Lugscheider [8] montrent que les joints très courts et très longs ne subissent presque pas de pivotement. Le pivotement maximal est observé pour un recouvrement de l'ordre de 75% avec des angles de pivotement voisins de 26°. Les joints courts subissent essentiellement du cisaillement alors que les joints très longs possèdent un faible pourcentage de tension lors de la rupture. Les cas subissant une part importante de tension sont les joints ayant un ratio entre le recouvrement et l'épaisseur du métal de base proche de 0.75.

La contrainte équivalente de Von Misès prenant en compte la flexion peut être exprimée suivant l'équation 7

$$\sigma_{VM} = \sigma_{moy} \sqrt{1 - \sin \varphi * \cos \varphi} \quad (1.7)$$

σ_{moy} est la contrainte de cisaillement idéale (cas où $\varphi = 0$). En utilisant le ratio $\sigma_{VM} / \sigma_{moy}$, on visualise mieux l'écart existant entre le cisaillement pur et des cas plus complexes impliquant à la fois du cisaillement, de la tension et de la flexion. La figure 1.8 illustre cela dans le cadre de ces travaux ; on y voit la contrainte de Von Misès dans le cas d'un cisaillement pur et dans les autres cas, en fonction du rapport entre la longueur du joint et l'épaisseur du métal de base.

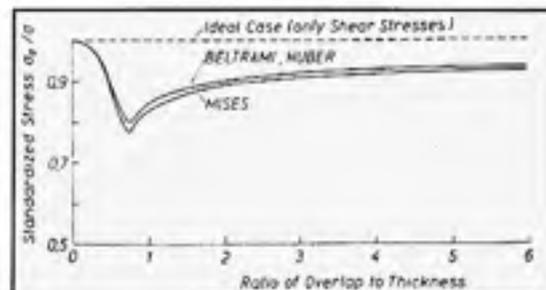


Figure 1.8 Représentation expérimentale des contraintes équivalentes de Von Misès dans les joints brasés en fonction du recouvrement (Le critère de Beltrami-Huber est une autre approche mais qui n'est pas discutée dans le présent travail) [8].

1.3.3.3 Modèle analytique de Goland et Reissner

À la différence de Volkersen, Goland et Reissner [12] tiennent compte du moment de flexion dans leur analyse, et raisonnent dans le cadre des plaques en flexion cylindrique. Ils supposent l'adhésif et les substrats parfaitement élastiques et la largeur du joint grande devant les épaisseurs des substrats, de sorte qu'ils considèrent un problème de déformation plane. Ils supposent de plus que la contrainte normale dans la colle est négligeable et que le cisaillement dans la colle ne varie pas dans l'épaisseur. Ils considèrent aussi les substrats et l'adhésif comme un seul bloc. Ils définissent un facteur de moment fléchissant k et un facteur de force k' qui relient respectivement le moment de flexion M_0 et l'effort tranchant V_0 en fin de recouvrement, à la charge de traction appliquée à l'assemblage, équilibrée ici, afin de tenir compte de la flexibilité des substrats et de l'adhésif.

Les équations sont les suivantes:

$$M_0 = 0.5ke_1F \quad (1.8)$$

$$V_0 = kF \sqrt{3(1-\nu_1^2)} \frac{F}{Ee_1b} = 2k' \frac{e_1}{L} F \quad (1.9)$$

Avec

$$k^{-1} = 1 + 2\sqrt{2} \tanh \left(1.5\sqrt{1-\nu_1^2} \frac{L}{2e_1} \sqrt{\frac{F}{E_1be_1}} \right) \quad (1.10)$$

Et

$$k' = 0.5 \frac{L}{e_1} \sqrt{\frac{3(1-\nu_1^2)}{E_1be_1}} k \quad (11)$$

Considérant un joint adhésif d'épaisseur négligeable, Goland et Reissner obtiennent les contraintes de cisaillement et de traction à une position X donnée dans le joint :

$$\tau(X) = -\frac{1}{4bL} \left[(1+3k) \frac{\beta L}{2e_1} \frac{\cosh\left(\frac{\beta\left(X-\frac{L}{2}\right)}{e_1}\right)}{\sinh\left(0.5\frac{\beta L}{e_1}\right)} + 3(1-k) \right] F \quad (1.12)$$

$$\sigma(x) = \frac{e_1}{4L^2 b \Delta} \left[\begin{aligned} & (0.5R_2 \lambda^2 k + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda)) \cosh\left(\lambda \frac{2\left(X-\frac{L}{2}\right)}{L}\right) \cos\left(\lambda \frac{2\left(X-\frac{L}{2}\right)}{L}\right) \\ & + (0.5R_1 \lambda^2 k + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda)) \sinh\left(\lambda \frac{2\left(X-\frac{L}{2}\right)}{L}\right) \sin\left(\lambda \frac{2\left(X-\frac{L}{2}\right)}{L}\right) \end{aligned} \right] F \quad (1.13)$$

$$\text{Avec } \beta^2 = 8 \frac{G}{E_1} \frac{e_1}{e} \quad (1.14)$$

$$\lambda = \gamma \frac{L}{2e_1} \quad (1.15)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E}{E_1} \frac{e_1}{e} \quad (1.16)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (1.17)$$

$$R_2 = \sinh(\lambda) \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \sin(\lambda) \quad (1.18)$$

$$\Delta = 0.5(\sinh(2\lambda) + \sin(2\lambda)) \quad (1.19)$$

On retrouve la même forme de distribution des contraintes, avec toujours des valeurs maximales aux bords des joints.

$$T_{\max} = \left(\frac{1+3k}{4} \eta_v L \coth(\eta L) + \frac{3(1-k)}{4} \right) T_{\text{moy}} \quad \text{car } \beta = 2e_1 \eta_v \quad (1.20)$$

$$S_{\max} = \frac{e_1}{bL^2 \Delta} \left(0.5 \lambda^2 k (\sinh(2\lambda) - \sin(\lambda)) - \lambda k' (\cosh(2\lambda) + \cos(2\lambda)) \right) \quad (1.21)$$

Les distributions typiques des contraintes de traction et de cisaillement en fonction de la distance de recouvrement sont montrées schématiquement aux figures 1.9 à 1.11. On retrouve bien la forme montrée sur les figures 1.4 et 1.5.

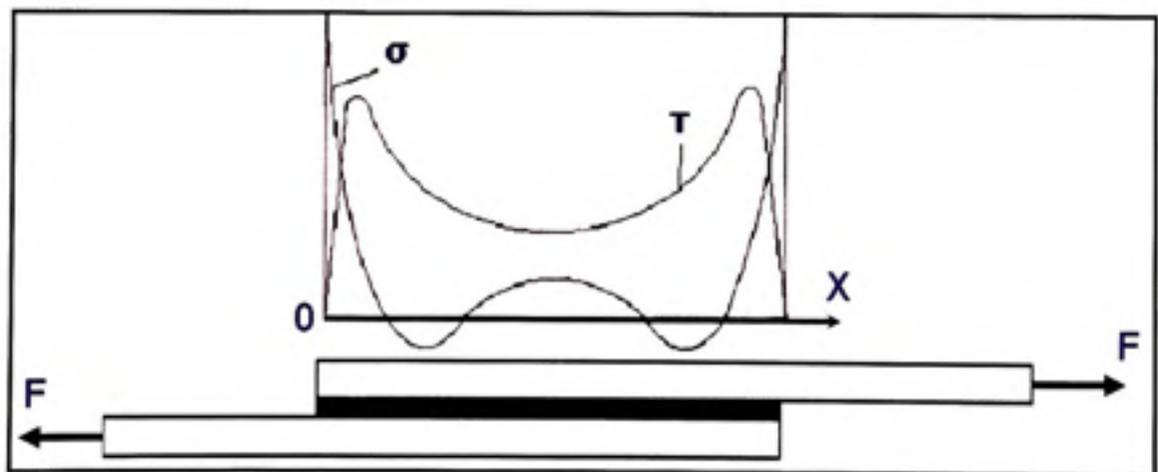


Figure 1.9 Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon Goland et Reissner dans un joint adhésif à simple recouvrement (adapté de Minghao Qin [13]).

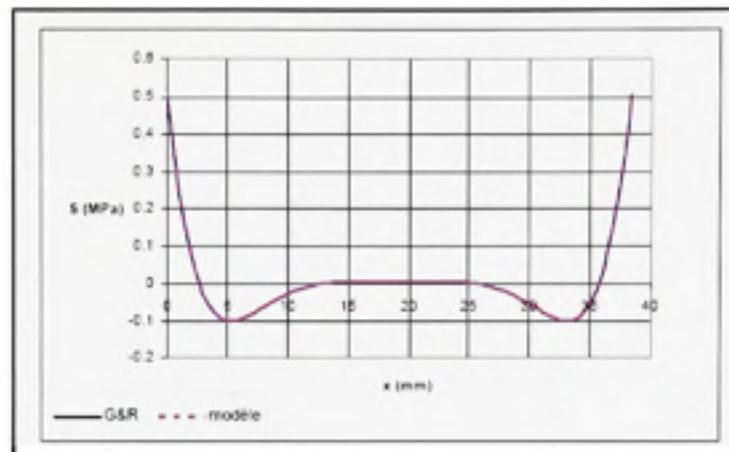


Figure 1.10 Représentations schématiques de la distribution de la contrainte de tension dans un joint collé à recouvrement simple, une modélisation obtenue en utilisant les modèles de Goland et Reissner (G&R) et un autre modèle proposé par Paroissien (adapté de Paroissien [3]).

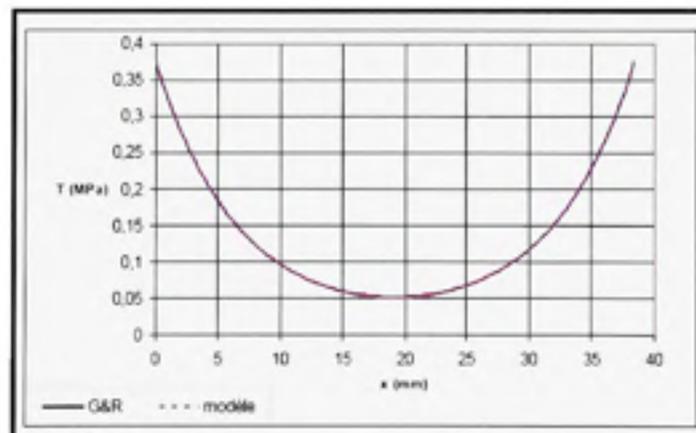


Figure 1.11 Distribution de la contrainte de cisaillement dans un joint collé à recouvrement simple, une modélisation obtenue avec les modèles de Goland et Reissner (G&R) et un autre modèle proposé par Paroissien (adapté de Paroissien [3]).

Il existe d'autres modèles analytiques sur les propriétés mécaniques des joints à recouvrement, presque tous ont été établis pour les joints collés. Le plus connu de ces modèles, parce qu'il est le plus souvent cité, est celui de Goland et Reissner. Ce modèle, comme tous les autres, donne simplement la distribution des contraintes dans un joint donné. Il n'indique nullement comment en déduire un critère de rupture.

1.3.4 Effets de divers paramètres sur les propriétés mécaniques des joints brasés

Dans cette rubrique, nous allons présenter quelques cas de propriétés mécaniques dans les joints brasés trouvés dans la littérature. Nous verrons notamment l'effet de divers paramètres, le recouvrement, le gap, les épaisseurs et propriétés mécaniques des matériaux, etc. Nous verrons aussi que la plupart de ces travaux ont souvent porté de l'intérêt à l'influence du recouvrement et presque pas, ou très peu, aux microstructures dans le joint, or il existe une relation très étroite entre les microstructures et les propriétés mécaniques des matériaux. Les courbes présentées dans ces publications que nous verrons plus loin ont été obtenues en utilisant les relations (1.1) et (1.2) proposées dans la spécification AWS C3.2 [4].

1.3.4.1 Effet de la longueur de recouvrement du joint

Le recouvrement est une des caractéristiques les plus importantes à prendre en compte pour déterminer les propriétés mécaniques des joints à recouvrement. Pratiquement tous les travaux portant sur les tests mécaniques des joints à recouvrement ont été effectués en faisant varier ce paramètre ou plus exactement le ratio entre le recouvrement et l'épaisseur du matériau de base. Ce ratio permet de prendre en compte l'effet dû à la géométrie de l'assemblage (comme la déformation dans le cas d'une éprouvette standard) et de s'affranchir de la taille absolue de l'échantillon. Bredzs et Miller [5] ont effectué des tests mécaniques à partir de joints brasés d'Hastelloy X (figure 1.12) et calculé les résistances mécaniques en tension et cisaillement à partir des relations (1) et (2) montrant des résultats semblables présentés sur la figure 1.3.

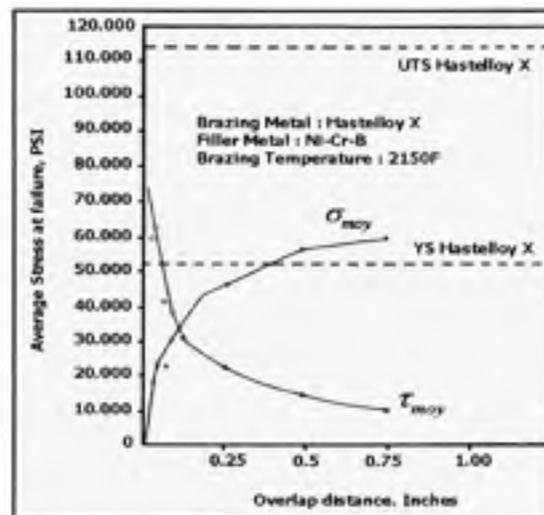


Figure 1.12 Courbes des contraintes de rupture en tension et cisaillement dans un joint brasé à recouvrement simple (adapté de Bredzs et Miller [5]).

Le métal d'apport utilisé est un alliage à base de nickel, de chrome et de bore, sa nature exacte n'est pas donnée, mais il pourrait bien s'agir de l'alliage AWS BNi-2 étant donné que le brasage a été effectué à 1175°C (2150°F) pendant 30 minutes. L'étude ne présente aucune investigation des microstructures obtenues car tous les joints ont été fabriqués dans les mêmes conditions, en supposant une même valeur de gap de 50 microns (0.002 pouce). Ces joints pourraient bien contenir des eutectiques ou d'autres phases fragiles tant il est difficile de garantir le contrôle du gap de ce type de joint.

1.3.4.2 Effet des propriétés mécaniques des matériaux de base

De toute évidence, les propriétés intrinsèques des matériaux de base ont une influence importante sur les propriétés mécaniques des joints constitués. Les travaux effectués par Bredzs et Miller [5] sur deux types de joints, les uns avec du Hastelloy X et les autres avec de l'acier AISI 304 comme métal de base, démontrent l'effet des propriétés mécaniques des métaux de base sur la résistance au cisaillement des joints brasés rigoureusement dans les mêmes conditions (figure 1.13).

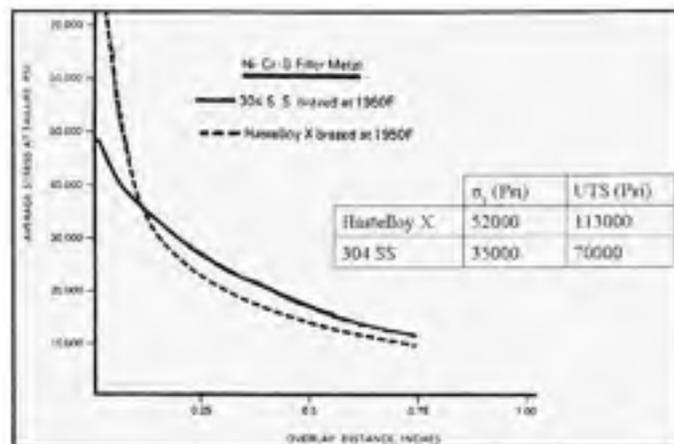


Figure 1.13 Influence des propriétés mécaniques du métal de base sur la résistance mécanique à la rupture en cisaillement des joints brasés (adapté de la référence de Bredtz et Miller [5]).

Les résultats montrent que pour des petits recouvrements, les joints d'Hastelloy X, ont une meilleure résistance mécanique. La différence de résistance mécanique qui est de 40% entre les deux métaux de base, entraîne une différence sur les résistances au cisaillement des joints brasés de l'ordre de 30%. Pour des grands recouvrements, en revanche, ce sont les joints faits avec l'acier 304 SS qui sont plus résistants au cisaillement, la différence est cependant moindre (20% seulement). Ces résultats sont assez surprenants, car en principe, pour des joints courts, c'est le métal d'apport qui devrait être le plus sollicité. On s'attendrait à des résultats similaires avec les deux joints puisqu'ils ont été brasés dans les mêmes conditions avec le même métal d'apport. Les métaux de base, l'acier 304 SS et le Hastelloy X semblent donc avoir des différences assez importantes en terme de diffusivité et, probablement que les joints de 304 SS contiennent moins ou pas d'eutectiques. Les résultats ne sont pas non plus cohérents pour les longs joints puisque les ruptures ont eu lieu dans le métal de base et logiquement, on s'attendrait à une plus grande résistance du Hastelloy X, celui-ci étant plus résistant que l'acier 304 SS. Il aurait fallu analyser les microstructures et les faciès de rupture des deux types de joints, cela aurait permis de comprendre les mécanismes de rupture et par la suite permis de mieux interpréter les différences observées. Il faut aussi signaler que les marges d'erreurs ne sont pas données, ni même la répétition des tests.

1.3.4.3 Effet de l'écartement du joint

Malgré une recherche bibliographique exhaustive, il n'a pas été possible de trouver des publications traitant de l'effet du gap sur les propriétés mécaniques des joints à recouvrement. Il est pourtant clair que les microstructures des joints brasés sont fortement liées à leur gap [1]. Dans le cas des métaux d'apport formant des eutectiques, plus le gap est grand, plus il est difficile de supprimer les phases eutectiques. Il existe des spécifications qui recommandent des valeurs de gap à utiliser en fonction des métaux d'apport. Mais, il semble que ces spécifications ne tiennent pas compte des microstructures, mais seulement de la mouillabilité des métaux d'apport et de leur capacité à remplir un joint donné. L'absence de travaux sur ce point est peut être lié à la difficulté de contrôler les gaps des joints brasés.

1.3.4.4 Effet de la température de brasage

La température est un paramètre très important en brasage. Son choix se fait en fonction des matériaux impliqués car il faut s'assurer de fondre le métal d'apport tout en évitant de modifier d'une manière significative les propriétés du métal de base à un état solide. En général, il est recommandé de braser à une température supérieure de 50°C (125°F) au liquidus du métal d'apport. Les travaux de Bredzs et Miller [5] permettent de comprendre l'effet de la température de brasage sur les propriétés mécaniques des joints brasés. En faisant varier le recouvrement, mais en utilisant un même alliage de brasage, ils ont obtenu deux catégories de joints brasés d'acier 304 SS. La première catégorie a été brasée à 1065°C (1950°F) et l'autre à 1175°C (2150°F). Les deux types ont subi des tests mécaniques conformément à la norme AWS C3.2 [4] et les courbes de résistance au cisaillement obtenues sont présentées sur la Figure 1.14 ci-dessous.

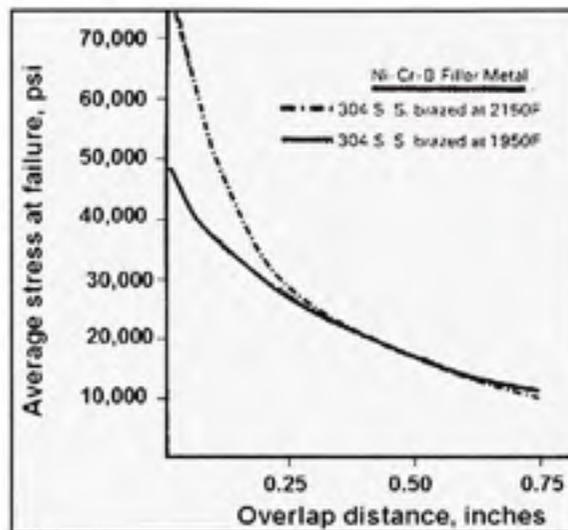


Figure 1.14 Influence de la température sur la résistance au cisaillement des joints brasés de 304 SS avec Ni-Cr-B (adapté de Bredzs et Miller [5]).

On constate qu'il existe un écart de l'ordre de 20% en faveur des joints brasés à (1175°C) 2150°F pour les très petits recouvrements. Pour des grands recouvrements, les deux courbes se superposent parfaitement. Les analyses métallographiques et fractographiques des joints auraient permis de mieux comprendre les résultats obtenus, notamment de savoir quels étaient les gaps réels et les microstructures des joints. Mais puisque le métal d'apport utilisé forme des eutectiques, les joints brasés à 1065°C (1950°F) devaient très probablement en contenir, mais pas ceux brasés à 1175°C (2150°F). Les phases eutectiques auraient alors fragilisé les joints conduisant à des faibles valeurs de résistance mécanique pour des petits recouvrements, conditions pour lesquelles le métal dans le joint est particulièrement sollicité. Pour les grands recouvrements, ces travaux semblent montrer que la présence de phases eutectiques ait moins d'incidence sur la résistance mécanique des joints.

1.3.4.5 Effet du temps de brasage

Turner [1] et Arafin [19] expliquent le rôle primordial de la diffusion sur le brasage. Ces phénomènes sont reliés à de nombreux paramètres thermodynamiques et cinétiques du brasage. Le temps de brasage est l'un des ces paramètres, son influence est mise en évidence sur la figure 1.15. Sur des joints brasés avec une ouverture en forme de V, Turner [1] a mesuré les valeurs d'écartement libres d'eutectiques et montré, pour un écartement donné et dans le cas des joints brasés avec des alliages formant des eutectiques, que la présence ou la disparition des phases eutectiques est étroitement liée au choix du temps de brasage.

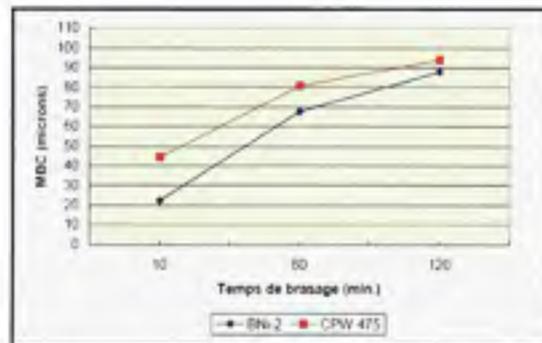


Figure 1.15 Évolution de la valeur de gap libre de phases eutectiques dans les joints brasés d'inconel 718 (AMS 5596) en fonction de la température de brasage, pour deux alliages de brasage, l'AWS BNi-2 et CPW 475 [1].

1.3.4.6 Effet des microstructures des joints brasés

Dans le cas des joints brasés, il n'existe pratiquement pas de travaux démontrant l'influence des microstructures des joints sur les propriétés mécaniques; la plupart des travaux ayant été faits soit en considérant des joints brasés dans les mêmes conditions, soit malheureusement sans mettre en évidence de façon explicite l'importance des microstructures.

1.4 Propriétés en fatigue des joints à recouvrement

Malgré une littérature très exhaustive, seule une publication sur la fatigue des joints brasés à recouvrement simple est disponible. Elle a été réalisée en 1958 par Aspden et Feduska [18]. Ils ont travaillé sur des joints d'acier AISI 347 brasés en recouvrement simple avec du BNi-1, un alliage formant des eutectiques et dont la composition chimique est voisine de celle du BNi-2. Les tests de fatigue ont été réalisés en flexion pure avec des échantillons brasés à 1113°C (2035°F) pendant 10 minutes. Le métal de base avait une épaisseur de 2.3 mm (0.090 pouce). Les joints avaient tous un gap de 25 microns (0.001 pouce), mais étaient séparés en deux catégories en fonction du recouvrement : 3.175 et 6.35 mm (1/8 et 1/4 de pouce, soient des rapports L/el respectivement de 1.4 et 2.8, très voisins des joints brasés de production). L'examen métallographique des joints brasés a été effectué et révèle la présence de phases eutectiques à l'entrée des joints, comme le montre la Figure 1.16 ci-dessous.

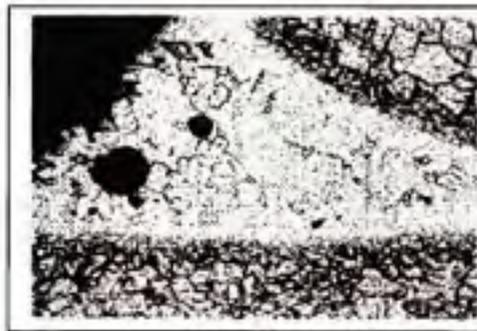


Figure 1.16 Microstructure d'un joint de AISI 347 brasé avec l'alliage AWS BNi-1a où l'on peut voir les phases eutectiques et quelques porosités au filet (adaptée de Aspden et Feduska [18]).

Les deux graphiques ci-dessous (figures 1.17 et 1.18) présentent les courbes de Wöhler obtenus lors des tests de fatigue, l'un à température ambiante et l'autre à 593°C (1100°F).

Ces courbes ont été retracées à partir des résultats fournis dans la publication (celles de la publication étant malheureusement trop floues et par conséquent difficilement lisibles). Le premier graphique (figure 1.17) permet de comparer la résistance à la fatigue du métal de base simple avec celle des joints brasés dont le recouvrement est de 6.35 mm (1/4 pouce). Elle rend compte qu'il n'existe pratiquement pas de différence entre le métal de base (AISI 347) et les joints brasés avec le BNi-1. Les deux courbes sont quasiment superposables et présentent toutes les deux une limite d'endurance de 220 MPa à 5.10^7 cycles (la contrainte appliquée étant déterminée par rapport à la section du métal de base). La Figure 1.18 compare les courbes de Wöhler du matériau de base et les deux types de joints brasés testés en fatigue par flexion pure à une température de 593°C (1100°F). À haute température, il est difficile de savoir lequel des joints brasés présentent une plus grande résistance à la fatigue. Par contre, les deux joints présentent une limite d'endurance à 5.10^7 cycles 10% moins élevée que celle obtenue pour le matériau de base.

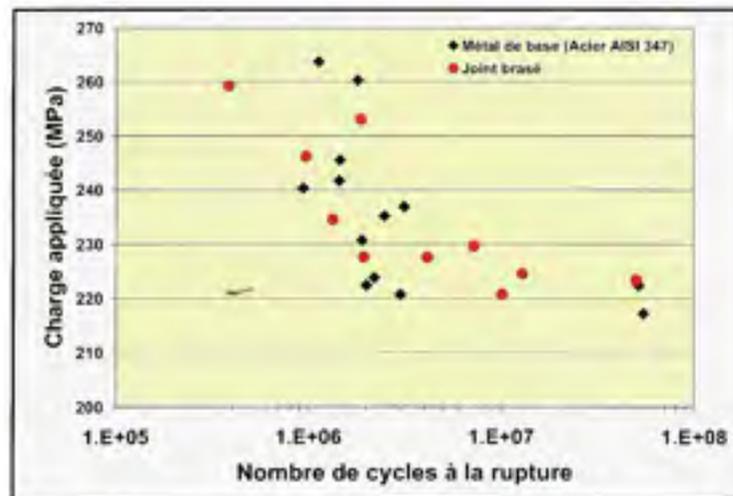


Figure 1.17 Résultats de fatigue en flexion pure des joints d'acier 347 brasés avec l'AWS BNi-1a à 1113°C (2035°F) pendant 10 min, le gap et le recouvrement sont respectivement de 0.025 et 3.175 mm (0.001 et 0,125 pouce), les tests de fatigue ont été effectués à température ambiante (graphique retracé à partir des données de Aspden et Feduska [18]).

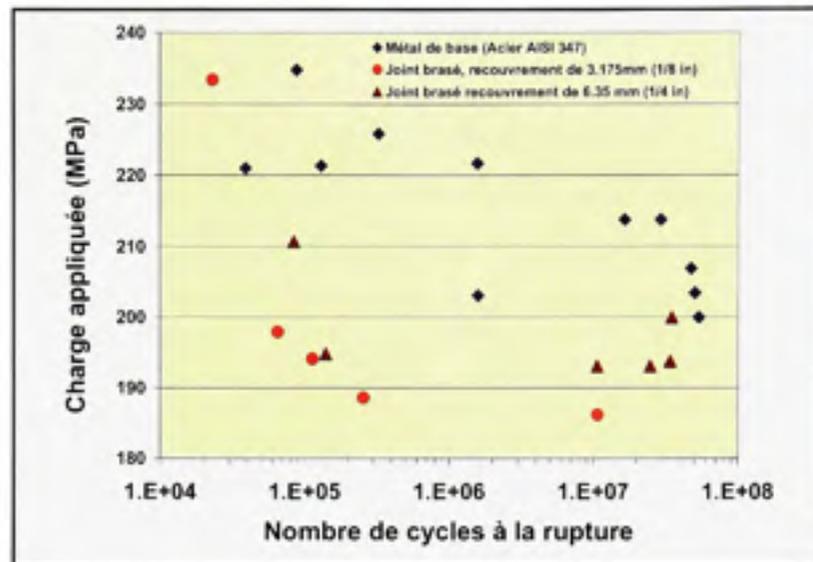


Figure 1.18 Résultats de fatigue des joints d'acier AISI 347 brasés avec de l'AWS BNi-1a à 1113°C (2035°F) pendant 10 min, les tests de fatigue ont été effectués en flexion pure à 593°C (1100°F), le graphique a été retracé à partir des données obtenues de Aspden et Feduska [18]).

La résistance à la fatigue dépend des matériaux testés, mais aussi des facteurs géométriques qui induisent ou non des concentrateurs de contraintes. En brasage, tous les paramètres évoqués précédemment (les caractéristiques géométriques et microstructurales des joints), doivent être pris en considération pour évaluer les propriétés en fatigue des joints brasés à recouvrement. La présence du filet dans les joints devraient également être investiguée tant elle contient beaucoup de phases eutectiques susceptible de faciliter l'amorce de fissures en surface.

1.5 Propriétés mécaniques des joints brasés en bout à bout

Bien que presque inexistant dans l'industrie du brasage, en raison de leur simplicité géométrique, les joints brasés en bout à bout ont été les plus largement étudiés. Dans cette rubrique, nous nous intéresserons seulement à l'effet de l'écartement sur la résistance en tension et en fatigue de ces joints brasés. Les observations faites pourraient être pertinentes et comparables à celles des joints à recouvrement.

1.5.1 Résistance mécanique des joints en bout à bout : effet de l'écartement

L'effet de l'écartement sur les propriétés mécaniques des joints brasés en bout à bout est connu depuis très longtemps. En 1952, Cox et Setapen [17] ont effectué des tests de traction pure sur des joints d'acier inox brasés avec de l'argent pur (donc sans la présence de phases fragiles), en faisant varier l'écartement du joint (figure 1.19). Ceux-ci montrent que dans leur cas, la résistance mécanique est maximale de 895 MPa (130Ksi) pour un écartement très petit, de l'ordre de 25 microns (0.001 pouce). La résistance mécanique chute ensuite très rapidement à mesure que l'écartement augmente, et atteint une valeur proche de 275 MPa (40 Ksi) pour des recouvrements très longs, autour de 600 microns (0.024 pouce).

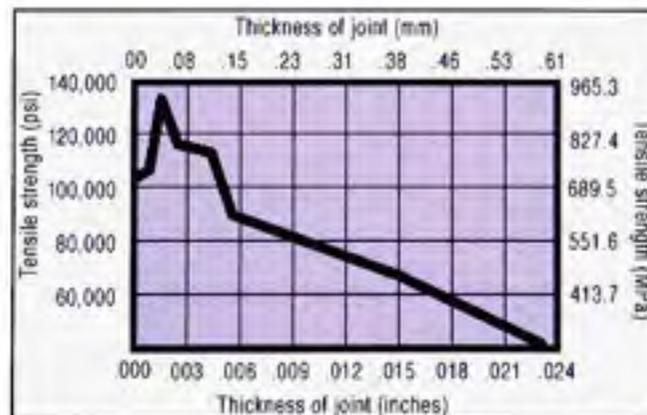


Figure 1.19 Résistance mécanique à la rupture d'un joint d'acier brasé en bout à bout en fonction de l'écartement du joint [2, 17].

1.5.2 Fatigue des joints brasés en bout à bout : effet de l'écartement

En fatigue, Sasabe [20] a effectué des tests en flexion rotative pour différents gaps. Il a brasé des aciers S25C avec du cuivre pur et montré (figure 1.20), que lorsque la valeur d'écartement est très faible, autour de 0,005 mm (0.00002 pouce), la résistance à la fatigue est nettement plus élevée (+ 80%) que celles des joints ayant des écartements plus grands, 0,07 et 0,20 mm (0.0275 et 0.0079 pouce).

À partir d'un certain écartement, les propriétés de fatigue des joints semblent faibles et indépendantes de la valeur de l'écartement. Les travaux de Suezawa [21] sur des joints d'acier SS41 brasés en bout à bout avec du BAg-8 (un alliage eutectique d'argent et de cuivre) confirment les résultats de Sasabe, particulièrement pour des grands écartements. On constate donc que la résistance à la fatigue en fonction de l'écartement des joints brasés en bout à bout évolue de la même façon que la résistance en tension. Il serait intéressant de voir si tel est également le cas pour les mécanismes de rupture.

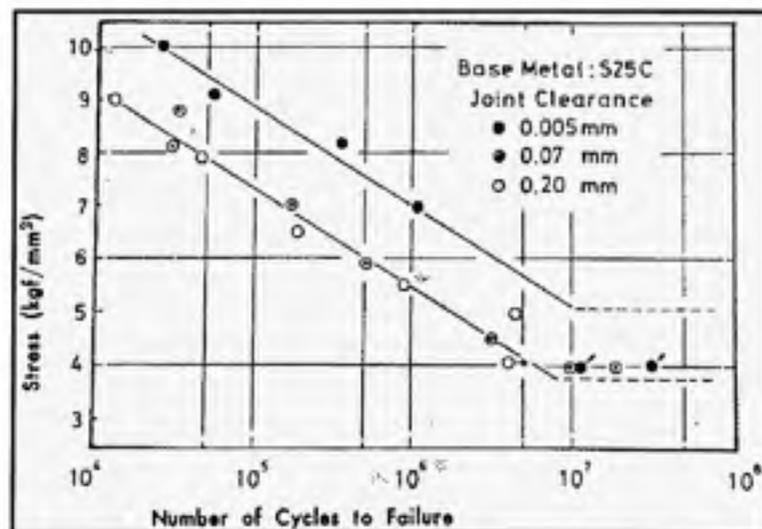


Figure 1.20 Exemples de courbes de fatigue des joints brasés en bout à bout [20].

CHAPITRE 2

DESCRIPTION EXPERIMENTALE

2.1 Buts et objectifs

Ce chapitre est consacré à la description des démarches et procédures expérimentales suivies dans le cadre de cette recherche. Il sera subdivisé en deux parties. La première partie sera consacrée aux étapes de fabrication des joints brasés. Le dispositif expérimental y est décrit de façon détaillée. Les moyens de caractérisation mis en place pour répondre aux besoins définis dans la matrice d'expériences sont décrits. La deuxième partie portera sur la description des tests mécaniques effectués. Il s'agit de présenter le choix des paramètres, la procédure des tests et les moyens mis en place pour analyser les faciès de rupture.

2.2 Procédures de fabrication des joints brasés

2.2.1 Les matériaux utilisés

Le choix des matériaux a été fait en fonction du coût, de la disponibilité et des besoins de pour la production. Pour le brasage, les matériaux utilisés étaient l'Inconel 625 pour la plupart des tests effectués. L'Inconel 718 a aussi été utilisé, simplement pour certains essais préliminaires (AMS 5599 et AMS 5596). Ces superalliages à base de nickel sont largement utilisés pour la fabrication de composants de moteurs d'avions. L'Inconel 718 (AMS 5596) contient de l'aluminium et du titane dans des proportions qui contribuent à favoriser la formation d'une couche réfractaire d'oxydes en surface. Il a été démontré [1] que cette couche d'oxydes nuit au mouillage et à l'étalement du métal d'apport en fusion pendant le brasage. Son utilisation requiert par conséquent des étapes de préparation de surface très spécifiques comme décrit par Turner [1]. L'Inconel 625 (AMS 5599) quant à lui contient peu d'oxydes en surface, ce qui réduit considérablement les opérations de préparation de surfaces avant brasage. Il est pertinent de préciser que le soudage de ces alliages ne requiert en revanche pas de traitements de surfaces préalables autres qu'un léger meulage de surface.

Le métal d'apport utilisé est l'alliage AWS BNi-2 (AMS 4777). Le choix de ce matériau a été fait en raison de son faible coût, de sa popularité dans l'industrie, mais aussi parce qu'il permet d'obtenir les microstructures que nous souhaitons étudier dans le cadre de ce projet. C'est un alliage parfaitement fluide à la température de brasage, ce qui lui confère une excellente mouillabilité au contact d'un très grand nombre d'alliages aéronautiques. Le bore et le silicium en sont des constituants essentiels ; ils forment des phases eutectiques, ce qui permet d'abaisser sa température de fusion et donc de brasage. Il a un intervalle de fusion assez restreint de 28°C (82°F), ce qui le rend quasi-eutectique ; un avantage considérable pour le brasage [1]. À la température de brasage qui est de 1050°C (1925°F), le BNi-2 s'appauvrit en bore par diffusion vers le métal de base et, au moment de la solidification, si les conditions de brasage sont adéquates, il se forme une solution solide γ -nickel dans le joint. La phase γ -nickel ayant un point de fusion nettement plus élevé que le métal d'apport initial, les joints correctement brasés avec du BNi-2 peuvent être utilisés jusqu'à 1350°C (2460°F) [22]. Les compositions chimiques des matériaux utilisés sont présentées à l'annexe I.

2.2.2 Les paramètres géométriques de l'assemblage

Les assemblages utilisés pour les essais mécaniques étaient des joints à recouvrement simple. Ce sont presque les seules configurations géométriques du joint utilisées pour la production des joints brasés industriels. Ils sont faciles à mettre en œuvre comparativement aux autres types d'assemblage. Les paramètres géométriques investigués sont ceux décrits à la figure 1.1 à savoir : le recouvrement, le gap, l'épaisseur du métal de base et le ratio entre le recouvrement et l'épaisseur du métal de base. Le tableau ci-dessous (tableau 2.1) donne un aperçu des paramètres géométriques typiques des pièces de production. Des joints en forme de V ont également été utilisés, il s'agissait alors d'établir les recettes de brasage permettant d'obtenir les paramètres de brasage pour les tests finaux. Avec un joint en forme de V comme présenté sur la figure 2.1, il est possible de définir, pour une condition de brasage donnée, la valeur de gap pour laquelle le joint est libre de phases eutectiques.

Cette valeur de gap, aussi appelée MBC (Maximum Brazing Clearance), permet d'ajuster le temps de brasage qui permettra d'obtenir ou non des eutectiques dans le joint brasé.

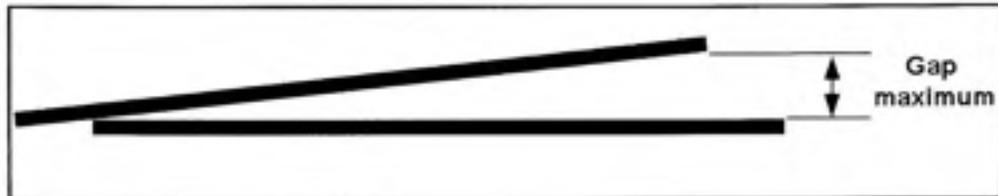


Figure 2.1 Joint en V utilisé pour évaluer les microstructures des joints en fonction de leur gap.

Tableau 2.1 Paramètres géométriques des joints brasés testés et typiques de production

	Recouvrement pouces, mm (pouce)	Gap du joint pouces, mm (pouce)	Largeur du joint pouces, mm (pouce)	Épaisseur du métal de base pouces, mm (pouce)
typiques	De 3 à 5 (0.120 à 0.200)	De 0.075 à 0.125 (0.003 à 0.005)	De 13 à 20 (0.500 à 0.80)	De 1 à 1.25 (0.040 à 0.050)
minimum	(3) 0.120	0.075 (0.003)	13 (0.050)	1 (0.040)
maximum	12 (0.470)	0.125 (0.005)	20 (0.800)	1.25 (0.050)
Utilisés pour les essais	De 0.3 à 23.4 (de 0.012 à 0.920)	De 0.25 à 0.1 (de 0.001 à 0.004)	6.35 (0.250)	De 0.12 à 22.9 (de 0.047 à 0.090)
commentaires	jusqu'à 18 mm (0.71)	N/A	Très variable	Très variable

2.2.3 Les microstructures des joints brasés

Comme le montre le chapitre 1, très peu de travaux sont disponibles sur l'effet des microstructures sur les propriétés mécaniques et les mécanismes de ruptures des joints brasés. Pour cette raison, nous avons décidé d'y consacrer une grande partie de ce travail. La présence ou non de phases eutectiques a été choisie comme paramètres expérimental lié à la microstructure, la présence ou non des phases eutectiques dans les joints brasés. La figure 2.2 donne un aperçu des joints obtenus respectivement avec et sans eutectiques.

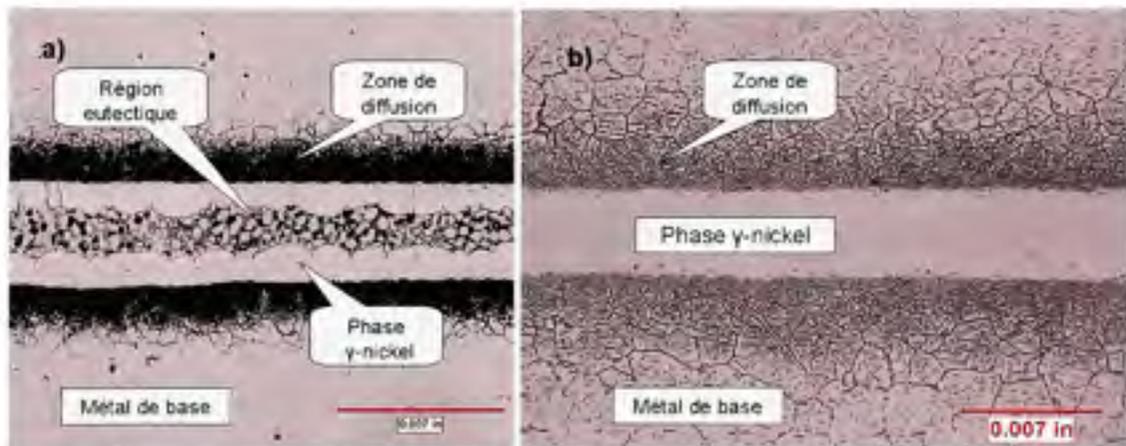


Figure 2.2 Aperçu des joints obtenus avec (a) et sans eutectiques (b).

2.2.4 Matrice d'essais

La matrice d'essais finale est constituée de 4 variables : 3 variables (l'épaisseur du métal de base, le gap du joint brasé et la microstructure) ont deux facteurs et le dernier (le rapport du recouvrement par rapport à l'épaisseur du métal de base) en dispose de 4. Le nombre total d'essais est de 32 facteurs. Les échantillons faits avec des gaps de 25 microns (0.001 pouce) ont été répétés 5 fois contre 3 pour ceux avec des gaps de 100 microns (0.004 pouce). La matrice d'essais détaillée est présentée en annexe II et ci-joint à la figure 2.3 est présentée la nomenclature utilisée pour identifier les différents échantillons.

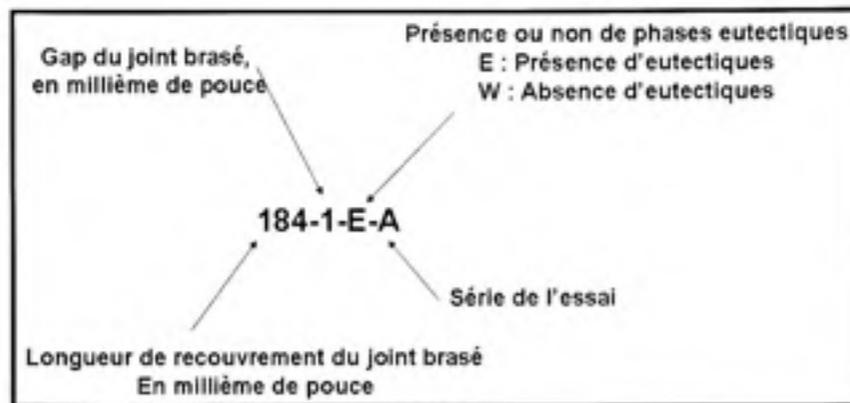


Figure 2.3 Nomenclature utilisée pour l'identification des différents joints testés.

2.2.5 Les recettes de brasage

Les recettes de brasage ont été définies par rapport aux températures et temps de maintien en fournaise, mais aussi en fonction des gaps des joints, de façon à obtenir les microstructures souhaitées.

2.3 Préparation de surface des matériaux

La préparation des surfaces est essentielle en brasage. Elle conditionne le mouillage, et donc l'écoulement et le remplissage des joints par le métal d'apport liquéfié. Sa mise en œuvre dépend des matériaux utilisés. Pour l'inconel 625 (AMS 5599), seul un nettoyage à l'acide (figure 2.4) est nécessaire. L'opération permet un dégraissage et un léger décapage chimique des surfaces avant le brasage. Quant à l'Inconel 718 (AMS 5596), la préparation de surface est un peu plus complexe, elle requiert un grenailage suivi d'un placage au nickel dans un bain électrolytique.



Figure 2.4 Bains électrolytiques utilisés pour la préparation de surface des matériaux utilisés.

2.4 Procédure d'assemblage des échantillons

Les échantillons à braser sont assemblés en deux étapes : le pré-assemblage par soudage par résistance et l'assemblage final par brasage en fournaise.

2.4.1 Pré-assemblage et préparation des joints brasés

La première étape est communément appelée « ball-tackage ». Des billes d'acier d'environ 12 mm (0.47 pouce) de diamètre sont soudées par résistance (figure 2.5) entre les extrémités des deux plaquettes à assembler entre lesquelles est préalablement insérée une fine lame d'acier dont l'épaisseur correspond au gap recherché. Il faut préciser que pour les gaps de 25 microns (0.001 pouce), la fine lame d'acier utilisée faisait 38 microns (0.0015 pouce), et il s'est avéré que le gap final obtenu après brasage était plus proche du gap recherché, probablement à cause d'un léger retrait pendant le brasage. L'opération permet de maintenir les plaquettes à braser au gap recherché avant application du métal d'apport. La fine lame d'acier est retirée manuellement après le pré-assemblage. Cette étape critique requiert une excellente dextérité de la part de l'opérateur puisque les valeurs ciblées sont de l'ordre du dixième de millimètre.

Les essais ont été répétés plusieurs fois par un même opérateur afin de réduire la dispersion des résultats. Une fois les plaquettes en position, le métal d'apport est appliqué sous forme de pâte à l'une des extrémités des joints, au moyen de seringues et aiguilles fines.



Figure 2.5 Pré-assemblage de deux plaquettes avant introduction de la pâte à braser sur une extrémité du joint.

Une quantité optimale de pâte est requise au risque de produire des manques de brasage. La pâte étant constituée d'environ 20% d'eau, il est en général recommandé d'appliquer 20% de pâte en excès étant donné que l'eau s'évapore pendant les premières étapes de chauffe en fournaise. Les manques de brasage sont généralement refusés en production, ce qui n'est pas le cas pour les excès de brasage. Pourtant, dans le cas des métaux d'apport formant des eutectiques, des excès de brasage peuvent s'avérer critiques car ils sont assimilables à des filets fragiles et, c'est précisément dans ces filets (figure 2.6) que des fissures peuvent s'amorcer.

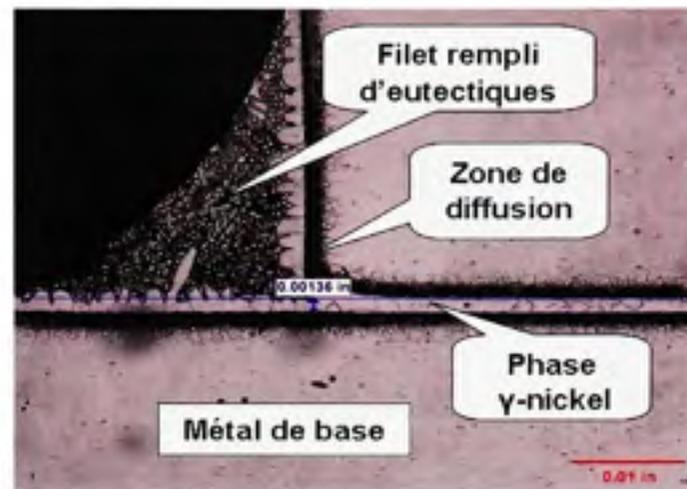


Figure 2.6 Aperçu du filet à l'entrée d'un joint brasé.

2.4.2 Brasage final des échantillons en fournaise

Afin de procéder au brasage final, les échantillons sont placés sur des plaques en graphite, lesquelles assurent une stabilité dimensionnelle des échantillons à haute température. Les plaques en graphite sont préalablement enduites d'une fine couche de peinture anti-mouillante afin d'éviter toute contamination de la brasure si celle-ci venait à couler. Une fois prêt, l'ensemble est placé dans une fournaise (figure 2.7) pour y être brasé. Les fournaises fonctionnent sous vide avec atmosphère inerte et une pression partielle d'argon. Des thermocouples disposés directement sur ou très près des pièces à braser permettent d'assurer un suivi et contrôler les températures pendant le cycle complet de brasage (des copies de cycles thermiques appliquées pour le brasage des joints testés sont disponibles à l'annexe III). La figure 2.8 montre deux échantillons brasés à la sortie des fournaises.



Figure 2.7 Fournaise sous vide utilisée pour le brasage des échantillons.



Figure 2.8 Exemples d'échantillons tels que brasés à la sortie de la fournaise.

2.5 Inspection et contrôle des échantillons testés

Les échantillons testés ont été systématiquement inspectés pour assurer le respect des tolérances et de la qualité métallurgique des joints.

2.5.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle constitue la première étape des contrôles applicables aux joints brasés. Les défauts détectables sont des porosités externes, des manques et/ou excès de brasure, l'érosion du métal de base, la présence de fissures, etc. Tous les joints brasés ont été inspectés visuellement pour ne pas fausser l'interprétation des résultats.

2.5.2 Inspection par microscopie optique

Des inspections par microscopie optique des échantillons brasés ont été faites en deux étapes : la première étape concernait les essais préliminaires pour développer les recettes de brasage, la deuxième concernait l'analyse des chutes d'éprouvettes ayant subies les tests mécaniques.

Dans le premier cas, il était question de valider les caractéristiques géométriques et microstructurales des joints fabriqués de façon à ajuster les recettes de brasage en conséquence. La deuxième étape quant à elle permettait de mesurer les valeurs réelles de recouvrement et gaps des joints et de valider les microstructures obtenues. Pour effectuer ces mesures, les joints ont été découpés perpendiculairement au joint à l'aide d'une tronçonneuse de marque « Leco CM15 ». Une fois découpés, les échantillons ont été enrobés à chaud avec des résines époxy et phénolique dans une presse « Simplinet 2000 ». Les échantillons enrobés ont ensuite été polis de façon standard avec divers papiers abrasifs en carbure de silicium. Les surfaces ainsi polies ont été attaquées avec le Kalling ou l'Adler afin de révéler les microstructures des joints brasés. L'observation métallographique a été faite par microscopie optique. Un logiciel d'interface (Clemex) permettait de mesurer les valeurs de recouvrement et de gap des joints. Plusieurs mesures ont été effectuées, différentes figures à l'annexe IV présentent la distribution statistique des mesures effectuées. On note une assez bonne reproductibilité des mesures, seuls quelques échantillons présentaient des recouvrements et gaps en dehors des tolérances fixées. Les tolérances fixées étaient de ± 0.0125 mm (0.0005 pouce) pour les valeurs de gaps et de $\pm 5\%$ pour la longueur de recouvrement.

2.6 Description des essais mécaniques

2.6.1 Géométrie des éprouvettes de traction

La géométrie des éprouvettes a été choisie conformément au standard ASTM E8-04, lequel réglemente les tests de traction des matériaux. Les échantillons ont été découpés par WEDM (Wire Electrical Discharge Machine), les dimensions des éprouvettes sont indiquées à la figure 2.9 alors que la figure 2.10 donne un aperçu des échantillons brasés prêts à subir des tests mécaniques.

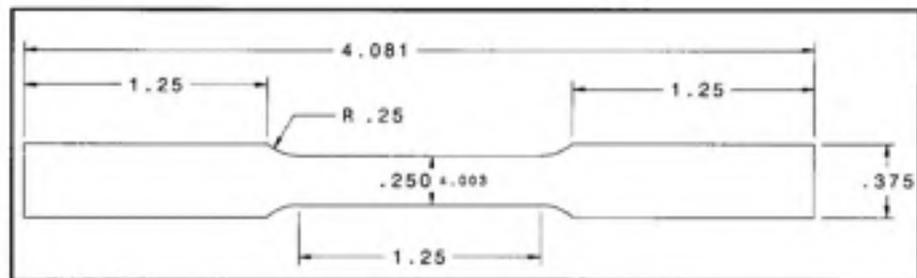


Figure 2.9 Dimensions (en pouces) des éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques, (ASTM E 08-4).



Figure 2.10 Éprouvette type de joint brasé utilisée pour les tests mécaniques (ASTM E 08-4).

La découpe par WEDM a été faite par fusion locale du matériau grâce à un arc électrique généré par une décharge électrique autour d'un fil en laiton. La fine zone affectée thermiquement générée par l'arc électrique au moment de la découpe est supprimée par un léger polissage mécanique des surfaces découpées. Le polissage permet également d'obtenir un fini de surface adéquat pour les tests mécaniques. Après polissage, des calles sont collées sur chaque extrémité des éprouvettes afin de minimiser leur pivotement lors des tests mécaniques. La colle utilisée est une résine à base d'époxy. Le collage a nécessité un grenailage des surfaces à coller avec des billes de sable, suivi d'un traitement thermique de durcissement de la colle dans un four standard pendant environ 2 heures à 125°C (257°F). Ces traitements n'affectent pas les propriétés des joints ni du métal de base.

2.6.2 Procédure des tests mécaniques

2.6.2.1 Procédures des tests de traction

Les essais de traction ont été effectués dans le laboratoire des essais mécaniques de l'École de technologie supérieure de Montréal. La machine de traction utilisée est une MTS de modèle 318.10 (figure 2.11 ci-dessous).



Figure 2.11 Machine MTS utilisée pour effectuer les tests mécaniques à l'école de technologie supérieure de Montréal.

La machine de traction est équipée d'une cellule de charge d'une capacité de 100 kN. Pour tous les échantillons testés, la charge a été appliquée jusqu'à la rupture, avec une vitesse de sollicitation de 635 microns (0.025 pouce) par min. Celle-ci a été fixée selon les spécifications internes de Pratt & Whitney Canada. La machine de traction est reliée à un ordinateur central, lequel est équipé d'un logiciel d'interface pour le lancement et l'acquisition des données. Une légère pré-charge d'environ 100 Newtons a été appliquée sur tous les échantillons afin d'éviter les fluctuations liées au désalignement et au serrage des mors lors du lancement des tests. Les données recueillies par la machine de traction étaient le déplacement axial des mors en fonction de la charge et du temps de sollicitation.

2.6.2.2 Mesure des angles de pivotement des joints

Lors des essais de traction, il a été constaté qu'il se produisait un pivotement des joints pendant les essais. Contrairement à ce que mentionnaient Flom et Wang [6], le pivotement des joints ne se produisait pas seulement au début des essais, il avait lieu pendant toute l'application de charge. De plus, son importance n'est pas seulement liée au recouvrement des joints, mais aussi et surtout à la présence ou non de phases eutectiques dans les joints. Il a donc été décidé de documenter ce pivotement en mesurant les angles de pivotement des échantillons en fonction de la charge appliquée. Une caméra extensométrique a été installée pour suivre l'évolution de cet angle en fonction du temps de sollicitation et de la charge appliquée. Concrètement, la caméra permet de suivre les positions en x et y de plusieurs points préalablement identifiés sur les échantillons. Comme présenté à la figure 2.12, les sections à observer sont peintes en blanc et, des petits points de repère sont peints en noir. La caméra est reliée à un système d'acquisition des données qui permet d'identifier chaque point de repère par contraste et fournir l'évolution des coordonnées x et y des points au cours de l'essai. Une section carrée est préalablement définie autour de chaque point pour permettre au logiciel de suivre le point dans cette section de l'image, il est important que chaque point demeure à l'intérieur de la section si non on risque de perdre sa trace au cours du test et ne plus pouvoir obtenir de données.



Figure 2.12 Photographies de joints brasés après les tests de traction, on peut voir les points qui auraient dû permettre de suivre l'évolution de l'angle de pivotement au cours de l'essai de traction.

Les éprouvettes testées avaient une section beaucoup trop petite et les fenêtres choisies tellement minimales, ce qui a fait que la plupart des points de repère sont sortis des sections délimitées. Il n'a malheureusement pas été possible d'obtenir les coordonnées x et y de chaque point en fonction de la charge appliquée. Nous avons simplement pu obtenir des photographies des échantillons avant et après les tests et observé le pivotement des échantillons après leur rupture sans pouvoir en obtenir une mesure précise des angles de pivotement pendant la rupture, ce qui aurait été plus pertinent. La mesure des angles de pivotement au moment de la rupture des échantillons aurait en effet permis un calcul plus réaliste des contraintes appliquées sur les joints à recouvrement simple.

2.7 Comparaison des propriétés des joints brasés à celles du métal de base

Pour compléter l'étude sur l'évaluation des propriétés mécaniques des joints brasés, il s'est avéré nécessaire, pour des fins de quantification, de comparer les propriétés mécaniques des joints brasés testés à celles du métal de base pur. Pour cela, des joints monobloc d'Inconel 625 ont été usinés en recouvrement simple et testés mécaniquement selon les mêmes procédures que celles décrites précédemment. Les détails des tests et comparaisons effectués dans cette étude complémentaire sont présentés à l'annexe V.

2.8 Analyse fractographique

L'analyse fractographique a été menée afin d'étudier et comprendre les mécanismes d'endommagement et de rupture des joints brasés survenus lors des tests mécaniques. L'analyse a été effectuée en trois étapes: à la binoculaire, au microscope optique et enfin au microscope électronique à balayage. Les échantillons ont été observés sur tous les plans, de profil et sur le faciès de rupture. Les microscopes utilisés pour l'analyse fractographique sont présentés ci-dessous (figure 2.13).



Figure 2.13 Exemples de (a) binoculaire, (b) microscope optique et (c) microscope électronique à balayage utilisés pour les analyses métallurgiques et fractographiques.

L'analyse fractographique à la binoculaire donne un aperçu global des mécanismes de rupture des joints. Elle correspond presque à une inspection visuelle en raison du faible grossissement permis. Pour la microscopie optique, certains faciès de rupture judicieusement choisis ont été découpés, enrobés puis polis de profil. Pour permettre d'observer le mode de propagation des fissures dans le joint et dans le métal de base, plusieurs grossissements ont été utilisés en fonction de l'importance des zones à observer. Quelques échantillons parmi ceux observés au microscope optique ont été observés au microscope électronique à balayage afin d'étudier le faciès de rupture proprement dit. Il s'agissait de localier les sites d'amorçage et les modes de propagation des fissures.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS : ANALYSE ET INTERPRÉTATION

Il est important, avant tout, de rappeler que ce projet vise à mettre au point une méthode robuste pour évaluer et comparer les propriétés mécaniques des joints brasés avec et sans eutectiques, pour différentes valeurs de gap, de recouvrement et d'épaisseur de métal de base. Les mécanismes de rupture des joints testés seront présentés et analysés dans tous les cas. Les résultats seront comparés, discutés et corrélés avec les effets des différents paramètres expérimentaux étudiés.

3.1 Résultats des essais préliminaires

3.1.1 Détermination des recettes de brasage

Les essais préliminaires ont été conduits afin d'établir les recettes de brasage adéquates pour le contrôle des microstructures dans les joints brasés. Ces essais préliminaires avaient également pour but d'assurer la robustesse et la reproductibilité de l'ensemble des étapes d'assemblage. Des mesures de gap, de recouvrement et de largeur de zones eutectiques ont été faites à cet effet. La figure 3.1 présente les largeurs des zones eutectiques dans les joints brasés en fonction du temps de brasage, et ce pour différents gaps. Il est important de préciser que les largeurs des zones eutectiques sont données en pourcentage par rapport au gap du joint sur lequel la mesure a été faite. Chaque point sur les courbes correspond à une moyenne sur plusieurs séries de mesures et les intervalles des résultats obtenus sont précisés par les barres d'erreur. Comme prédit dans la littérature, on constate que ces quatre courbes évoluent de la même façon, et montrent une diminution de la largeur des zones eutectiques à mesure que le temps de brasage augmente.

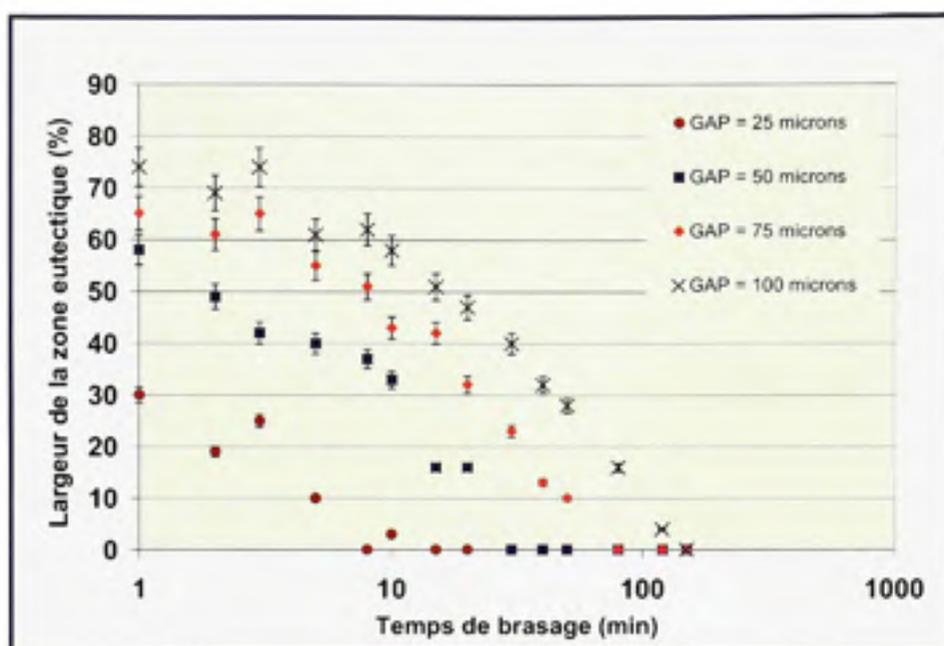


Figure 3.1 Largeur moyenne (en pourcentage par rapport au gap final du joint) de la zone eutectique dans les joints brasés en fonction du gap final du joint.

Pour un même temps de brasage, elle est d'autant plus large que le gap du joint correspondant est grand (figure 3.2). Ces résultats montrent qu'il est possible d'ajuster les temps de brasage en fonction du gap et produire des joints brasés avec les microstructures voulues. Ainsi, un temps de brasage d'une minute permet d'obtenir des eutectiques dans les joints de 25 microns de gap (0.001 pouce). À l'opposée, 150 minutes sont nécessaires pour supprimer totalement les eutectiques dans un joint de 100 microns de gap (0.004 pouce).

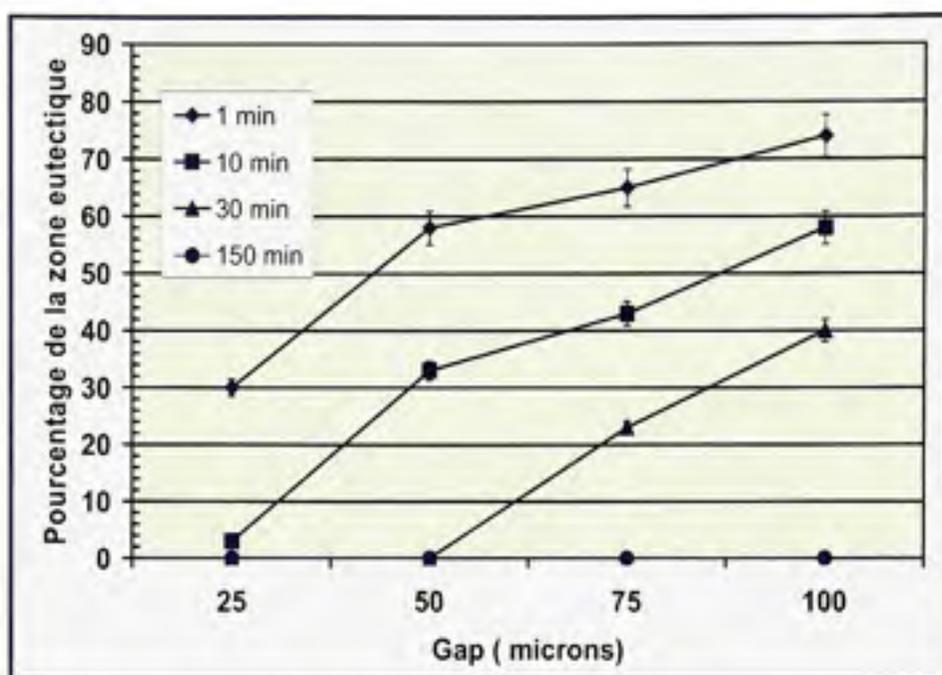


Figure 3.2 Largeur moyenne (en pourcentage par rapport au gap final du joint) de la zone eutectique dans les joints brasés en fonction du gap final des joints.

3.1.2 Contrôle du gap et de la longueur de recouvrement des joints

La présence ou non de phases eutectiques dans les joints brasés avec des métaux d'apport formant des eutectiques est très sensible aux variations du gap des joints. Nous nous devons par conséquent de garantir la robustesse et la reproductibilité du procédé, particulièrement lors de l'étape de contrôle du gap des joints brasés. Une distribution statistique (à l'annexe IV) des mesures de gap et recouvrement a été faite à partir des résultats obtenus, elle montre certes une certaine dispersion des résultats des mesures, mais celle-ci reste relativement faible. Nous pouvons toutefois signaler que les différentes étapes d'assemblage des joints brasés telles qu'elles ont été effectuées dans le cadre de cette étude, peuvent facilement être contrôlables, mais cela exige une extrême rigueur et une excellente dextérité des opérateurs car le procédé d'assemblage reste pour l'instant manuel.

3.2 Résultats des tests mécaniques

Le but premier des tests mécaniques a été d'évaluer les propriétés mécaniques des joints brasés. Il est aussi question de déterminer l'influence des microstructures (présence ou non des phases eutectiques dans les joints) et des différents paramètres physiques étudiés (le recouvrement et les épaisseurs du joint et des métaux de base) sur ces propriétés mécaniques, en tension et en cisaillement.

3.2.1 Courbes de charge en fonction du déplacement axial

Les données recueillies par la machine de traction permettent d'obtenir l'évolution de la force en fonction du déplacement axial. Bien qu'il ne s'agisse pas de courbes de traction standard, ces données peuvent être traitées comme telles en première approximation. Elles permettent d'effectuer un comparatif préliminaire des résistances mécaniques des joints brasés les uns par rapport aux autres.

Les figures 3.3 à 3.6 montrent l'évolution de la composante de tension en fonction du déplacement axial des éprouvettes pour différents recouvrements, mais pour des valeurs fixes de gap, de microstructures et épaisseur de métal de base. On comprend de l'observation rapide de ces courbes que les joints les plus résistants sont ceux qui ne contiennent pas d'eutectiques et, les résistances sont d'autant plus élevées que le recouvrement est grand. On s'aperçoit aussi que les joints ayant des métaux de base fins sont légèrement plus résistants que ceux faits avec des métaux de base plus épais.

De cette analyse sommaire, il apparaît clairement que les phases eutectiques sont responsables de la diminution de la résistance mécaniques et de la ductilité des joints brasés.

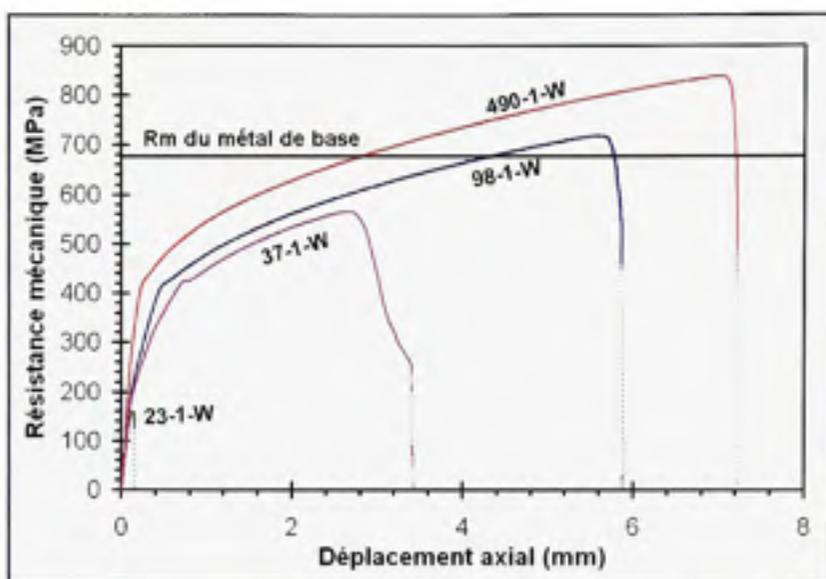


Figure 3.3 Courbes de chargement des joints brasés sans eutectiques et avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) pour différents recouvrements, la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.

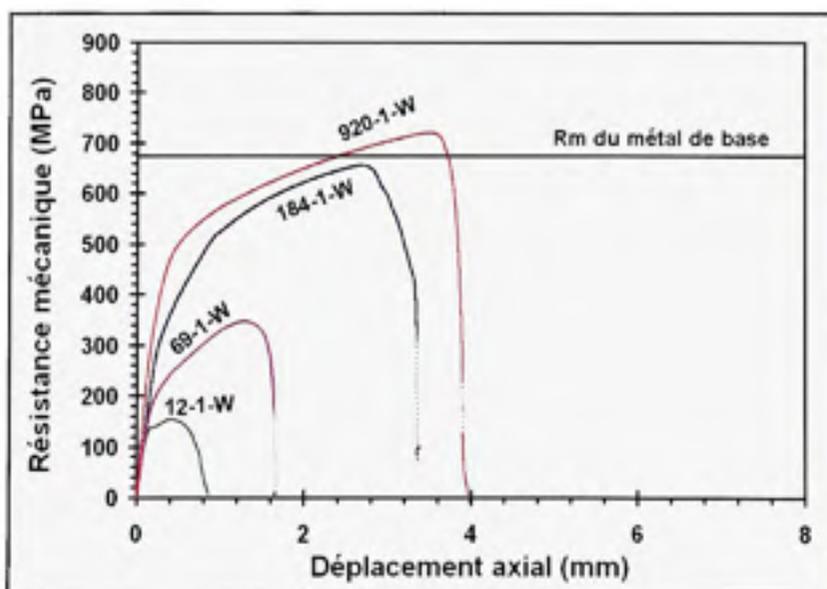


Figure 3.4 Courbes de chargement des joints brasés sans eutectiques et avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) pour différents recouvrements, la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.

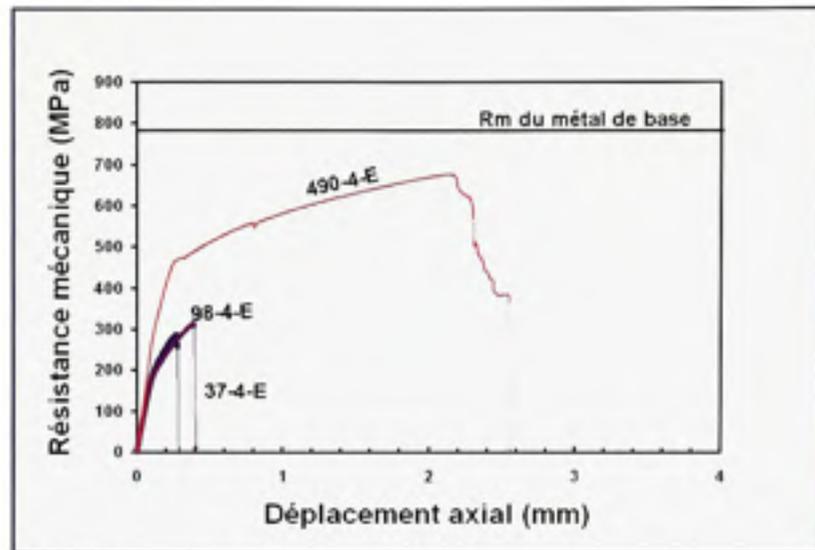


Figure 3.5 Courbes de chargement des joints brasés avec eutectiques et avec un gap de 100 microns (0.004 pouce) pour différents recouvrements la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.

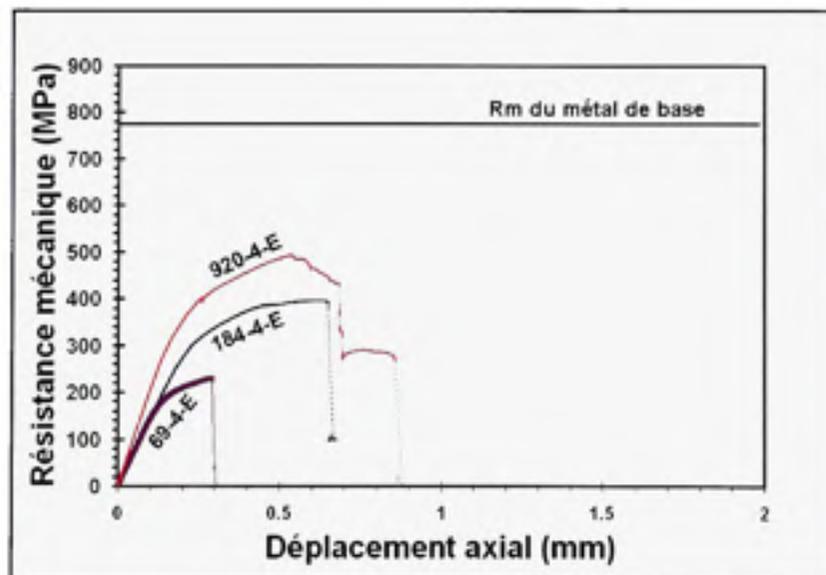


Figure 3.6 Courbes de chargement des joints brasés avec eutectiques et avec un gap de 100 microns (0.004 pouce) pour différents recouvrements la résistance mécanique du métal de base est tirée de la littérature et a été obtenue en tension pure.

3.2.2 Analyse des contraintes de tension et cisaillement des joints brasés

3.2.2.1 Exploitation du modèle simple (AWS C3.2)

Les sections qui suivent traitent de l'analyse des courbes de tension et cisaillement obtenues en exploitant le modèle simple (équations 1 et 2). Bien que grossier, ce modèle est très populaire. Il nous servira de référence pour les analyses. Dans les courbes qui suivent, chaque point représente une moyenne sur plusieurs joints testés avec un minimum de trois répétitions par test.

Effet du gap et du métal de base à microstructures comparables

Les figures 3.7 et 3.8 présentent respectivement les courbes de résistance au cisaillement des joints brasés avec et sans eutectiques. Sur l'ensemble de ces figures, la résistance mécanique du métal de base en tension pure est précisée simplement pour comparaison. Dans les deux cas, on obtient des résultats conformes à la littérature : la résistance au cisaillement diminue avec le rapport entre la longueur de recouvrement et l'épaisseur du métal de base. Pour des recouvrements avec un ratio de l'ordre de 10, la résistance au cisaillement ne semble pas être affectée par le gap et ni par l'épaisseur de métal de base. En revanche, lorsque le recouvrement est plus petit, à partir d'un ratio de 2 pour les échantillons avec eutectiques, l'influence du gap et l'épaisseur du métal de base devient significative. Les joints ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce) sont légèrement plus résistants (25%) que ceux ayant un gap de 100 microns (0.004 pouce), particulièrement pour des joints avec des métaux de base moins épais. En considérant les mêmes caractéristiques géométriques, les joints sans eutectiques sont nettement plus résistants que ceux avec des eutectiques.

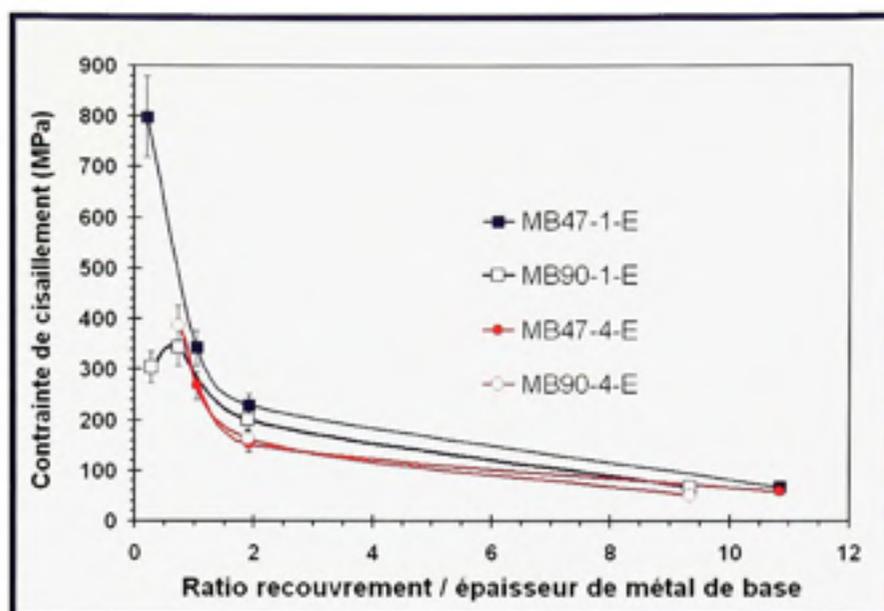


Figure 3.7 Courbes de cisaillement dans les joints brasés avec eutectiques.

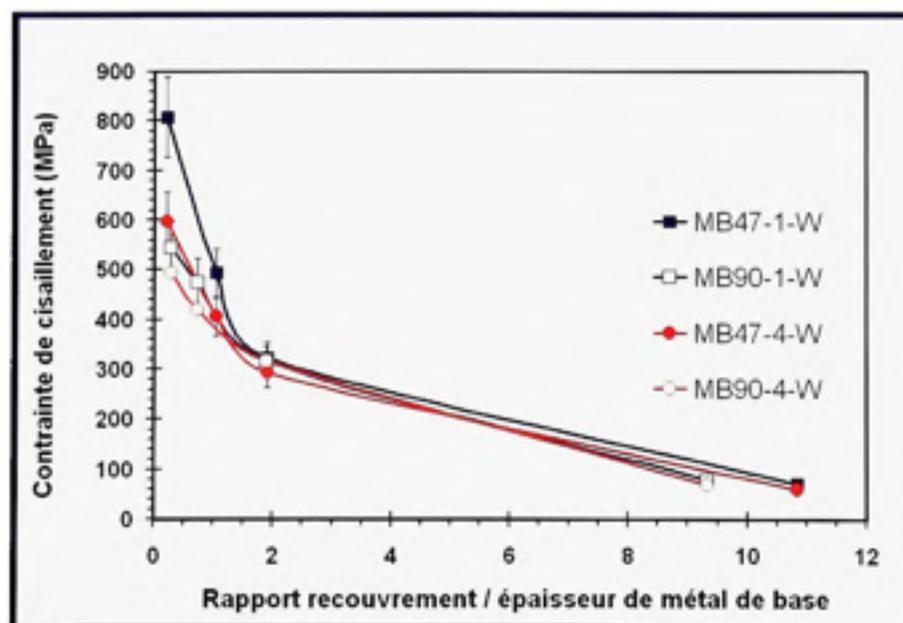


Figure 3.8 Courbes de cisaillement dans les joints brasés sans eutectiques.

Les courbes de tension représentées dans les figures 3.9 et 3.10 sont également conformes à la littérature, avec des contraintes qui augmentent progressivement avec le recouvrement pour ensuite se stabiliser et tendre vers la résistance du matériau de base pour des longs recouvrements.

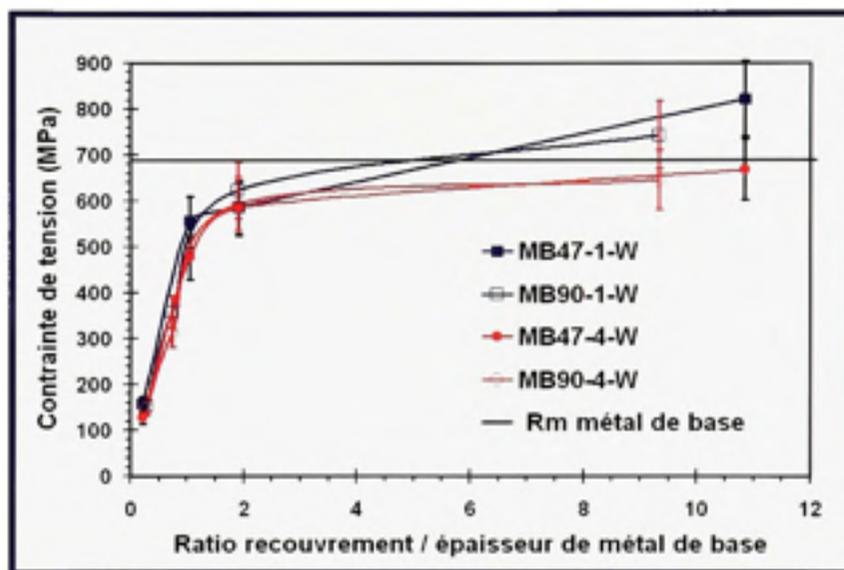


Figure 3.9 Courbes de tension dans les joints brasés sans eutectiques.

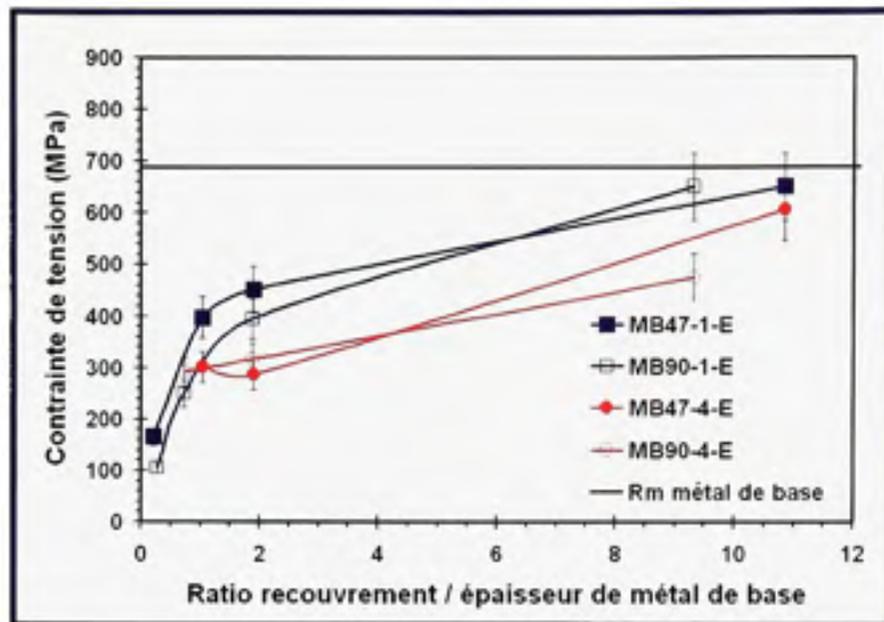


Figure 3.10 Courbes de tension dans les joints brasés avec eutectiques.

Effet de la microstructure et du métal de base pour des gaps comparables

Cette partie vise à faire la lumière sur l'effet des microstructures et de l'épaisseur du métal de base sur la résistance des joints brasés testés en fonction du gap. Les courbes de résistance au cisaillement sont représentées par les figures 3.11 et 3.12, celles de tension sont représentées par les figures 3.13 et 3.14.

Les joints avec des métaux de base moins épais sont les plus résistants, particulièrement s'ils ne présentent pas d'eutectiques. Les résultats confirment que systématiquement, la présence de phases eutectiques dans les joints tend à diminuer leur résistance mécanique. Ceci est particulièrement vrai pour les recouvrements intermédiaires.

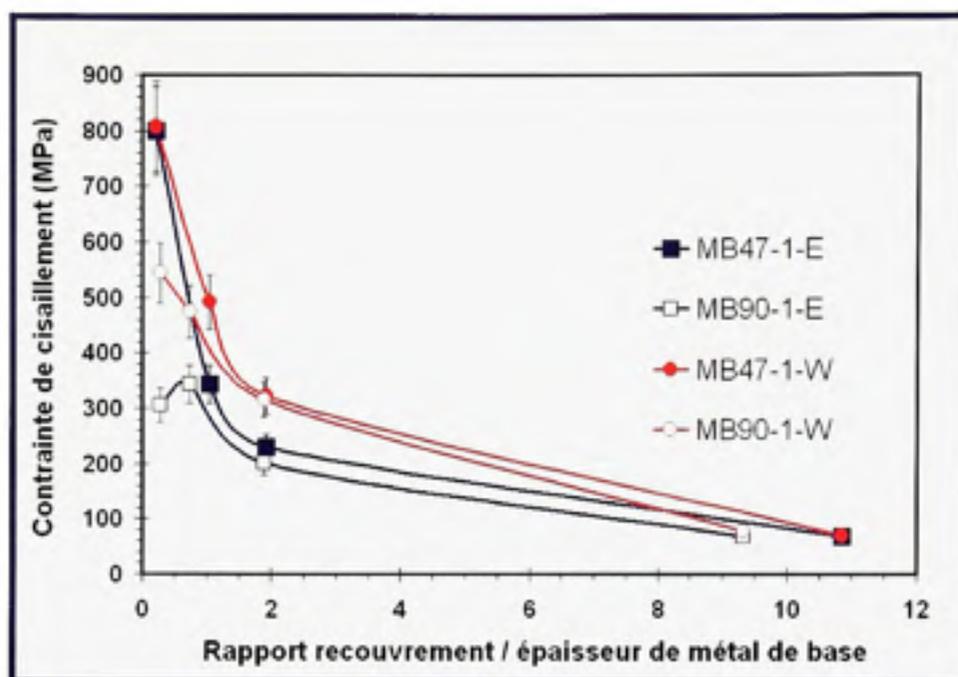


Figure 3.11 Courbes de cisaillement des joints brasés ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce).

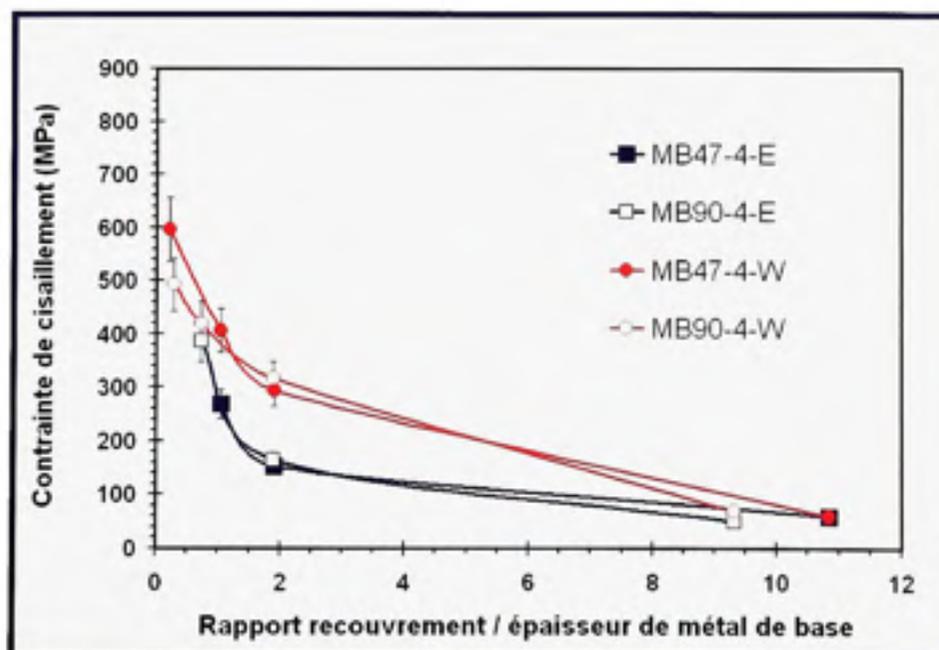


Figure 3.12 Courbes de cisaillement des joints brasés ayant un gap de 100 microns (0.004 pouce).

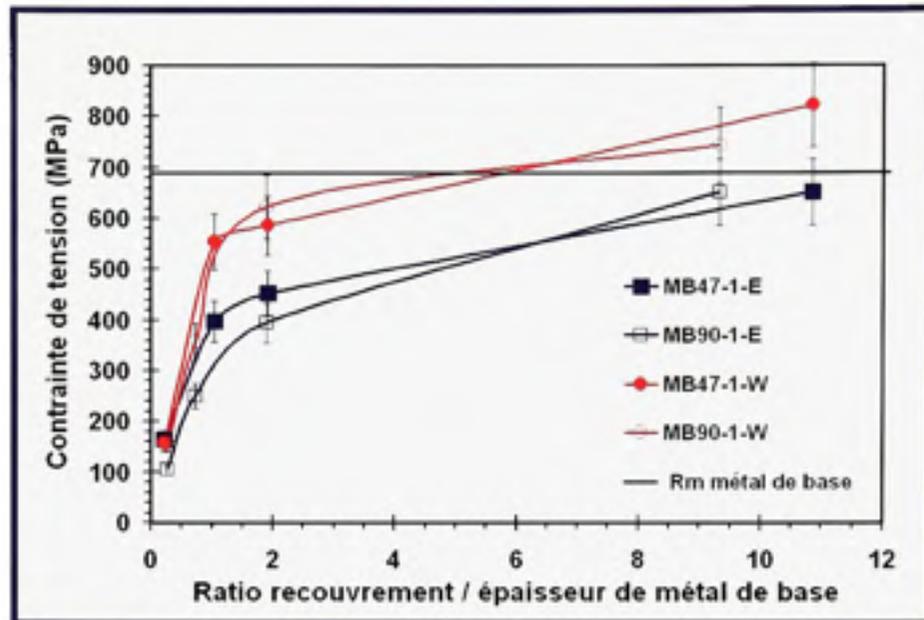


Figure 3.13 Courbes de tension des joints brasés ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce).

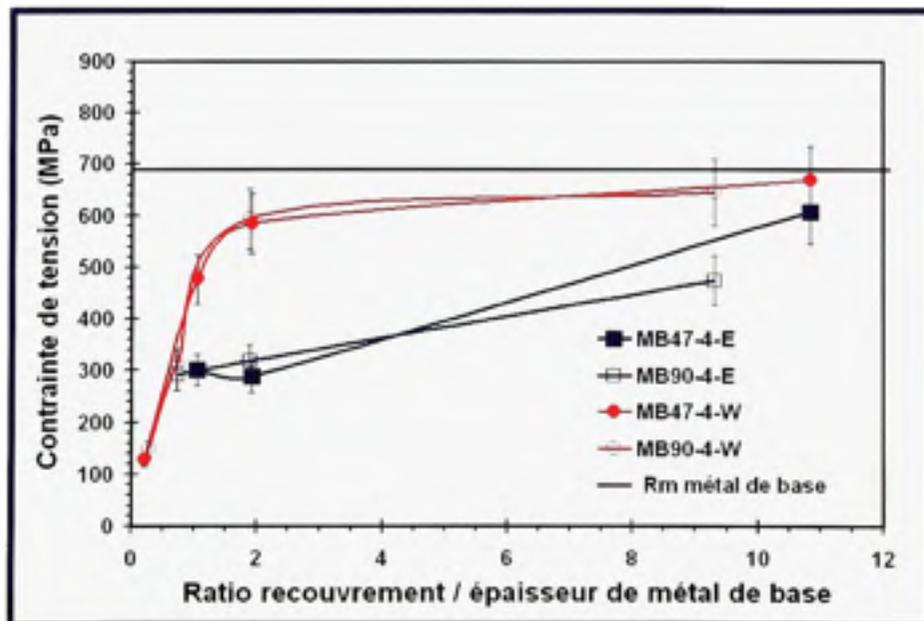


Figure 3.14 Courbes de tension des joints brasés ayant un gap de 100 microns (0.004 pouce).

Indépendamment de l'épaisseur du métal de base et du gap, la présence de phases eutectiques réduit considérablement (parfois de 50%) la résistance mécanique des joints brasés. Les écarts sont plus nets pour les joints à large gap (50%) et de l'ordre de 25% pour les joints avec des gaps moins larges. Nous reviendrons plus tard pour comprendre ces différences.

3.2.2.2 Résultats des tests de comparaison des joints brasés avec les joints monobloc de métal de base

Cette partie vise à quantifier l'influence de la présence ou non des filets contenant des phases eutectiques dans un assemblage monobloc de métal de base, tout comme l'effet du gap et du rayon des filets dans le cas d'une absence complète de phases eutectiques dans un assemblage à recouvrement simple. Il s'agit également de comparer les propriétés des joints brasés à celles d'un assemblage monobloc dans le cas d'un joint ayant un recouvrement de 4.67 mm (0.184 pouce).

La figure 3.15 permet de comparer deux catégories de joints monobloc de métal de base (Inconel 625). Les deux joints ont un recouvrement de 4.67 mm (0.184 pouce), un gap de 25 microns (0.001 pouce), seuls leurs rayons de filets qui sont dépourvus de phases eutectiques diffèrent. Le monobloc A possède un filet de rayon 880 microns (0.035 pouce) alors celui du monobloc B est de 250 microns (0.010 pouce). On constate que la résistance mécanique d'un joint monobloc ayant un grand filet est plus grande que celle d'un joint avec un filet plus petit. Il en est de même pour la ductilité qui est meilleure dans le cas du joint avec un plus grand filet. Ce résultat s'explique très bien car un rayon plus petit provoque un effet de concentration de contrainte locale qui a tendance à provoquer une rupture prématurée de l'assemblage.

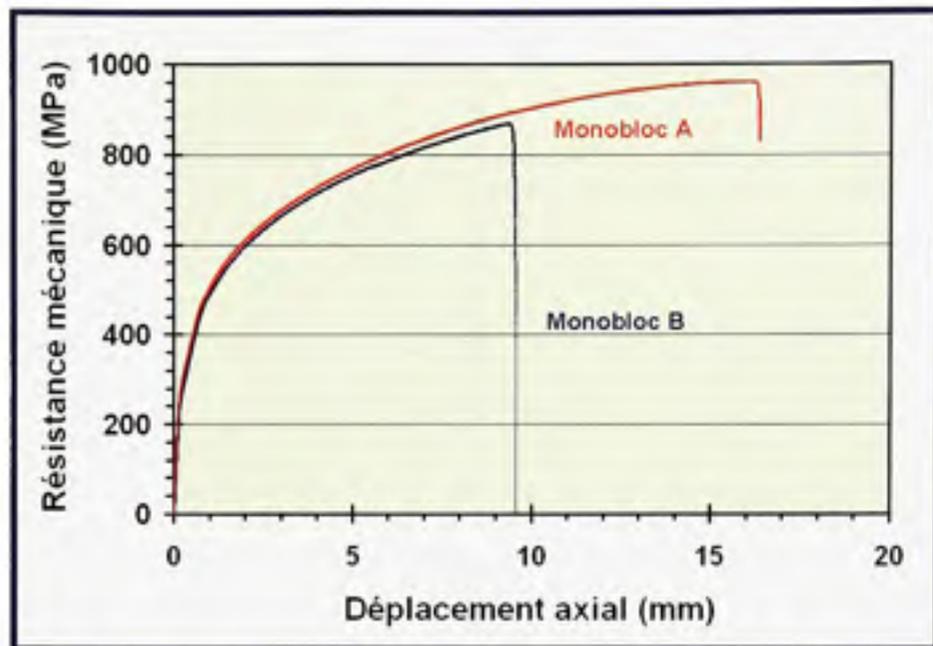


Figure 3.15 Influence du rayon du filet dans un joint monobloc à recouvrement simple, les deux monoblocs ont des valeurs identiques de recouvrement (4.67 mm), de gap (25 microns), seuls leurs rayons de filets diffèrent, le monobloc A a un rayon de filet de 880 microns contre 250 microns pour le monobloc B.

La figure 3.16 permet de comparer deux catégories de joints monobloc avec un même recouvrement, 4.67 mm (0.184 pouce), des rayons de filet identiques et sans eutectiques, 250 microns (0.010 pouce), mais avec des gaps de 25 microns et 100 microns (0.001 et 0.004 pouce) respectivement pour les monobloc C et D. On constate que les deux monoblocs ont quasiment les mêmes propriétés mécaniques. Ce qui permet de conclure qu'il n'y a pas presque de différence de comportement mécanique entre deux joints à recouvrement simple dont seule leur valeur de gap diffère. Il faudrait probablement éloigner les deux valeurs de gap pour qu'on puisse observer une différence significative sur leurs propriétés mécaniques.

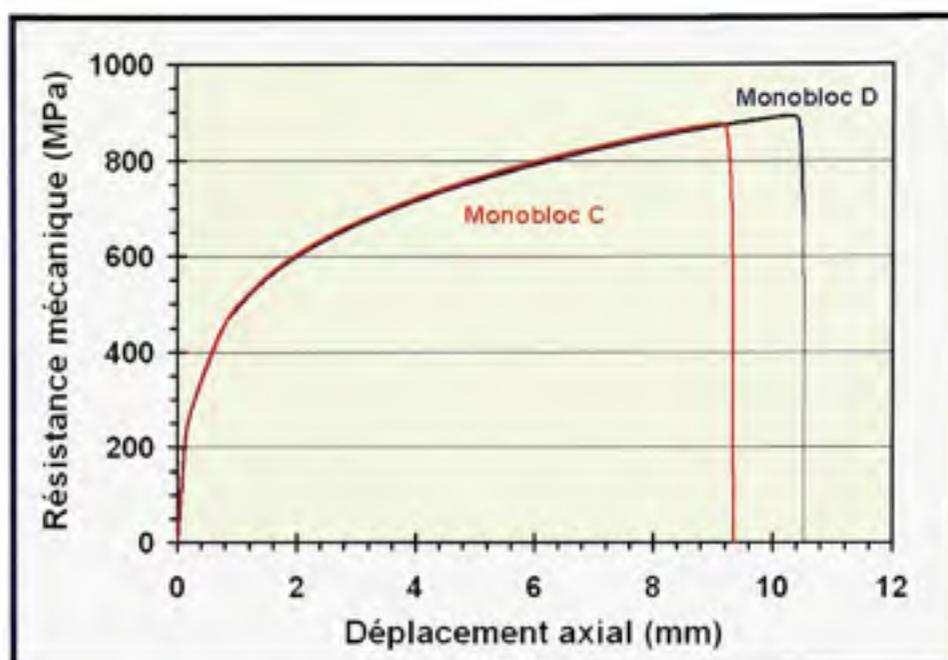


Figure 3.16 Influence du gap des joints monobloc à recouvrement simple, les deux monoblocs ont des valeurs identiques de recouvrement (4.67 mm), de rayon de filet (250 microns), seuls leurs gaps diffèrent, le monobloc C a un rayon de filet de 25 microns contre 100 microns pour le monobloc D.

La figure 3.17 permet de comparer les propriétés d'un joint brasé à celles de monoblocs avec et sans filets eutectiques. Les trois joints ont un même recouvrement et gap, respectivement 4.67 mm et 25 microns (0.184 et 0.001 pouce). Avant l'ajout d'un filet eutectique sur l'un des deux monoblocs, tous deux avaient un rayon de filet initial de 250 microns (0.010 pouce). On constate que la présence d'un filet eutectique diminue de près de 40 % la résistance mécanique des joints à recouvrement et de 60 % la valeur de ductilité. On s'aperçoit cependant que les propriétés d'un joint brasé sans eutectiques sont similaires à celles d'un monobloc contenant un filet eutectique. On peut donc penser qu'un joint brasé à recouvrement simple et sans eutectiques, aussi bien dans le joint qu'au niveau des filets, aura les mêmes propriétés mécaniques que le métal de base dans une configuration de recouvrement simple.

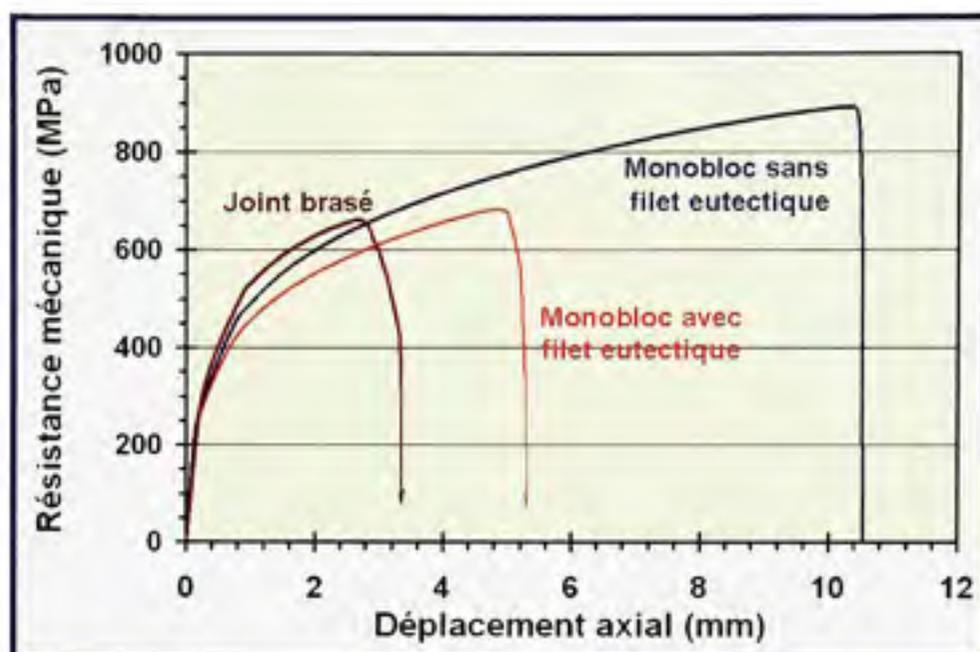


Figure 3.17 Comparaison des propriétés mécaniques d'un joint brasé sans eutectiques à celles de deux monoblocs d'Inconel 625, les trois joints ont un même recouvrement (4.67 mm), une même valeur de gap (25 microns), l'un des deux monoblocs contient un filet avec des phases eutectiques contrairement à l'autre.

3.2.2.3 Exploitation des modèles analytiques

Dans cette section, nous aurions aimé présenter et exploiter les résultats obtenus en appliquant les modèles analytiques de Volkersen et de Goland & Reissner. Mais en fin de compte, nous ne le ferons pas car l'analyse des résultats que nous avons obtenus s'est avérée très complexe. Une étude plus approfondie des équations régissant ces modèles mérite d'être conduite en utilisant des outils de modélisations par éléments finis. Les résultats obtenus semblent cohérents pour certains joints brasés et complètement aberrants pour d'autres, sans que nous puissions véritablement en comprendre les raisons. Rappelons tout de même que pour exploiter ces modèles analytiques, nous devons connaître les propriétés intrinsèques des différents matériaux (modules d'élasticité, module de cisaillement, etc.) et ceci n'était pas le cas. Nous avons fait des approximations sur les valeurs de ces paramètres par rapport à des informations disponibles dans la littérature. Nous avons observé une problématique

systematique de début d'endommagement des joints brasés au niveau des filets, une zone très fragile qui n'est pas prévue dans ces modèles analytiques exploités. Pour ces raisons principalement, nous ne présenterons que quelques résultats des calculs obtenus en exploitant le modèle de Goland & Reissner. Il s'agit simplement de présenter le travail qui a été accompli, et non pour tenter de tirer de quelconques conclusions. Des études plus poussées méritent d'être faites, probablement par des simulations par éléments finis pour mieux prédire de comportement des joints brasés des alliages avec eutectiques.

Si l'on considère par exemple les figures 3.18 et 3.19 ci-dessous, elles présentent les courbes de distribution de contraintes de tension et cisaillement dans un joint brasé conformément au modèle de Goland & Reissner. Les formes des courbes sont en effet conformes à celles disponibles dans la littérature, avec des contraintes maximales aux extrémités des joints et minimales au centre du joint. Cependant, les valeurs de contraintes sont beaucoup plus élevées, particulièrement aux bords des joints ce qui semblent complètement aberrant. Le cas de la figure 3.18 correspond à un joint de 4.67 mm (0.184 pouce) de long tandis que la figure 3.19 correspond à un joint d'une longueur de 23.37 (0.920 pouce). Dans le premier cas, les courbes de tension et cisaillement sont plus étendues et distincte. Dans le deuxième cas, les courbes sont pratiquement superposées.

D'autres courbes sont présentées à l'annexe VI. Il est très difficile de tirer une quelconque conclusion à partir de la lecture de ces graphiques. Pour cette raison, l'analyse de chaque courbe à l'annexe est laissée à l'interprétation de chaque lecteur. Nous n'avons aucune garantie sur la validité de ces valeurs puisqu'aucune comparaison avec des résultats du même type n'est possible dans la littérature. Nous pensons qu'une étude approfondie doit être effectuée pour mieux évaluer les caractéristiques mécaniques intrinsèques de chaque matériau et mieux évaluer comment ces modèles analytiques peuvent être applicables aux joints brasés avec des eutectiques.

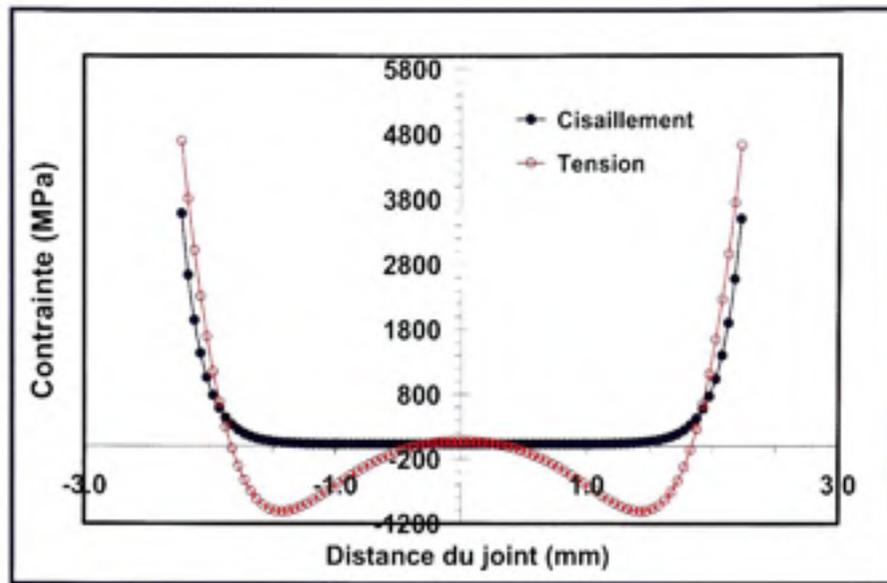


Figure 3.18 Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon le modèle de Goland & Reissner, dans le joint brasé dont la référence est 184-1-W-C.

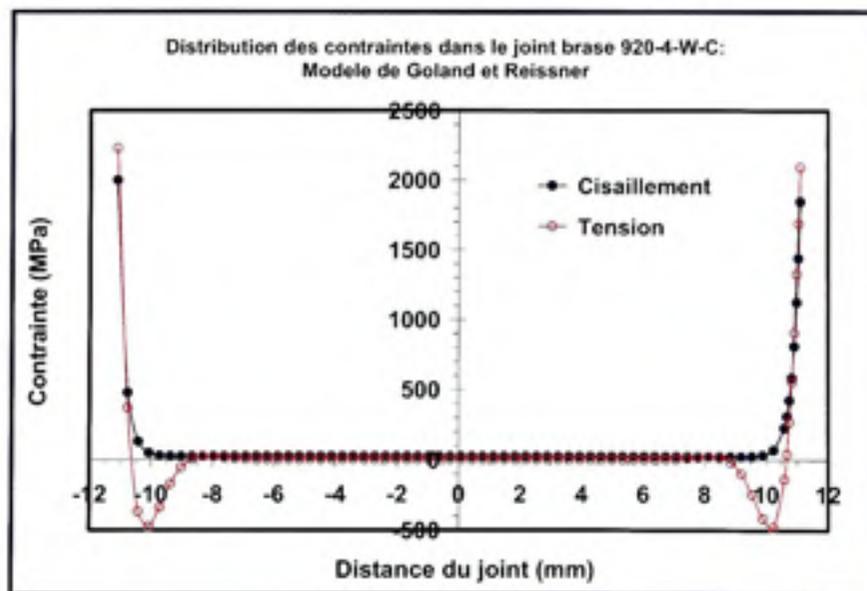


Figure 3.19 Distribution des contraintes de tension et cisaillement selon le modèle de Goland & Reissner, dans le joint brasé dont la référence est 920-4-W-C.

3.2.3 Analyse fractographique

L'analyse fractographique permettra d'étudier les mécanismes de ruptures des joints et de les corrélérer avec les propriétés mécaniques. L'ensemble des investigations faites a permis de mettre en évidence trois modes de rupture : la rupture à travers le joint brasé, la rupture à travers le métal de base et enfin la rupture mixte (à la fois à travers le métal de base et le joint brasé). Ces différents modes de ruptures sont récapitulés dans un tableau à l'annexe VII. L'analyse fractographique sera divisée en trois parties. La première partie traitera de l'amorçage des fissures puisqu'elle s'est avérée identique pour l'ensemble des joints brasés testés. Les autres parties traiteront des trois différents modes de rupture proprement dits, en s'appuyant sur des images de faciès prises à la binoculaire et au microscope optique et à l'aide d'une simple caméra. La dernière partie sera consacrée à l'investigation faite par microscopie électronique à balayage de certains cas spécifiques présentant des modes de rupture mixte.

3.2.3.1 Définition du filet d'un joint brasé

Avant d'expliquer le mécanisme d'amorce, il est important de rappeler la notion de filet dans un joint brasé. Comme le montre la figure 2.6, les joints brasés fabriqués et testés possédaient tous un filet à chaque extrémité. En raison de son volume, la présence de phases eutectiques y est inévitable et ce, quel que soit le temps de brasage appliqué. La taille de ce filet peut cependant varier d'un joint brasé à un autre, suivant la quantité de métal d'apport introduite, mais il y restera toujours une zone eutectique assez importante.

Pour tous les joints brasés testés, les fissures étaient amorcées à la surface des filets, bien que ceux-ci soient théoriquement considérés comme des géométries contribuant à limiter l'effet de concentration de contrainte. La figure 3.20 illustre l'amorçage de fissures dans un filet rempli de phases eutectiques. Il semble que cette présence d'eutectiques dans les filets facilite amplement l'amorçage des fissures en surface.

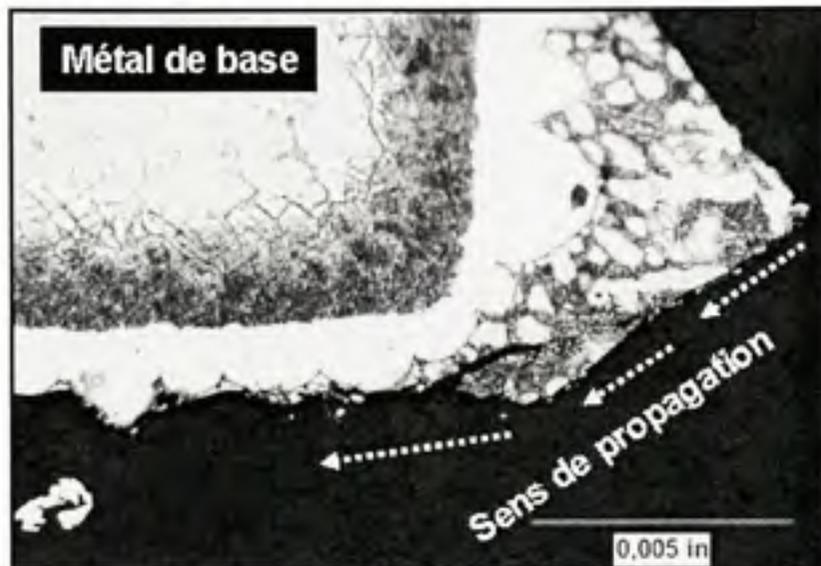


Figure 3.20 Illustration des amorces de microfissures dans le filet d'un joint brasé.

3.2.3.2 Les différents types de rupture des joints brasés

Rupture uniquement dans le joint brasé

Ce type de rupture (type I) est observé dans tous les joints avec un large gap, 100 microns (0.004 pouce) avec une zone eutectique continue. Il est indépendant du recouvrement, du gap et de l'épaisseur des métaux de base. Comme dans la section précédente, la fissure principale est amorcée à la surface du filet, du côté où a été déposée la pâte à braser. La fissure se propage ensuite le long du joint jusqu'à l'autre extrémité comme le montre les deux images de la figure 3.21. Puisque seule la présence de phases eutectiques caractérise les joints concernés par ce type de rupture, nous pouvons affirmer à ce stade de l'analyse que les eutectiques contribuent à fragiliser les joints en provoquant des ruptures fragiles à travers la partie centrale du joint.

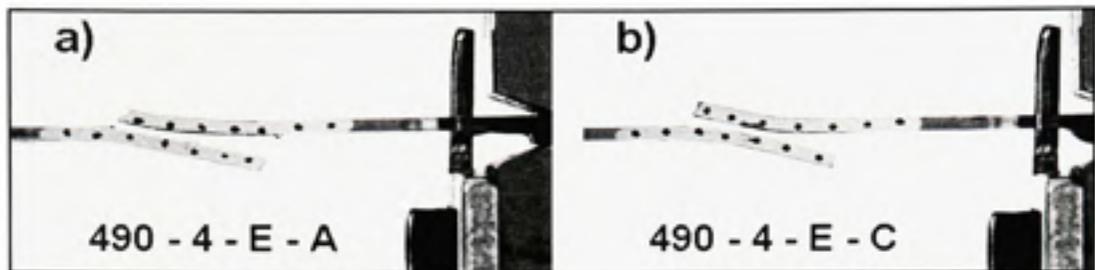


Figure 3.21 Vues de profil des faciès de rupture des joints brasés et ayant un gap large 100 microns (0.004 pouce) et avec eutectiques.

Sur la figure 3.22, on peut voir différents faciès de rupture des joints avec recouvrements mais possédant tous une zone eutectique continue. Tous ces joints ont rompu de la même façon : une amorce de fissure au filet suivie d'une propagation le long du joint jusqu'à l'autre extrémité. Pour les joints avec de très longs recouvrements (ratios du recouvrement par rapport à l'épaisseur du métal de base proches de 10), on observe une quasi absence de déformation plastique. L'angle de pivotement bien que non mesuré semble négligeable. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une rupture fragile.

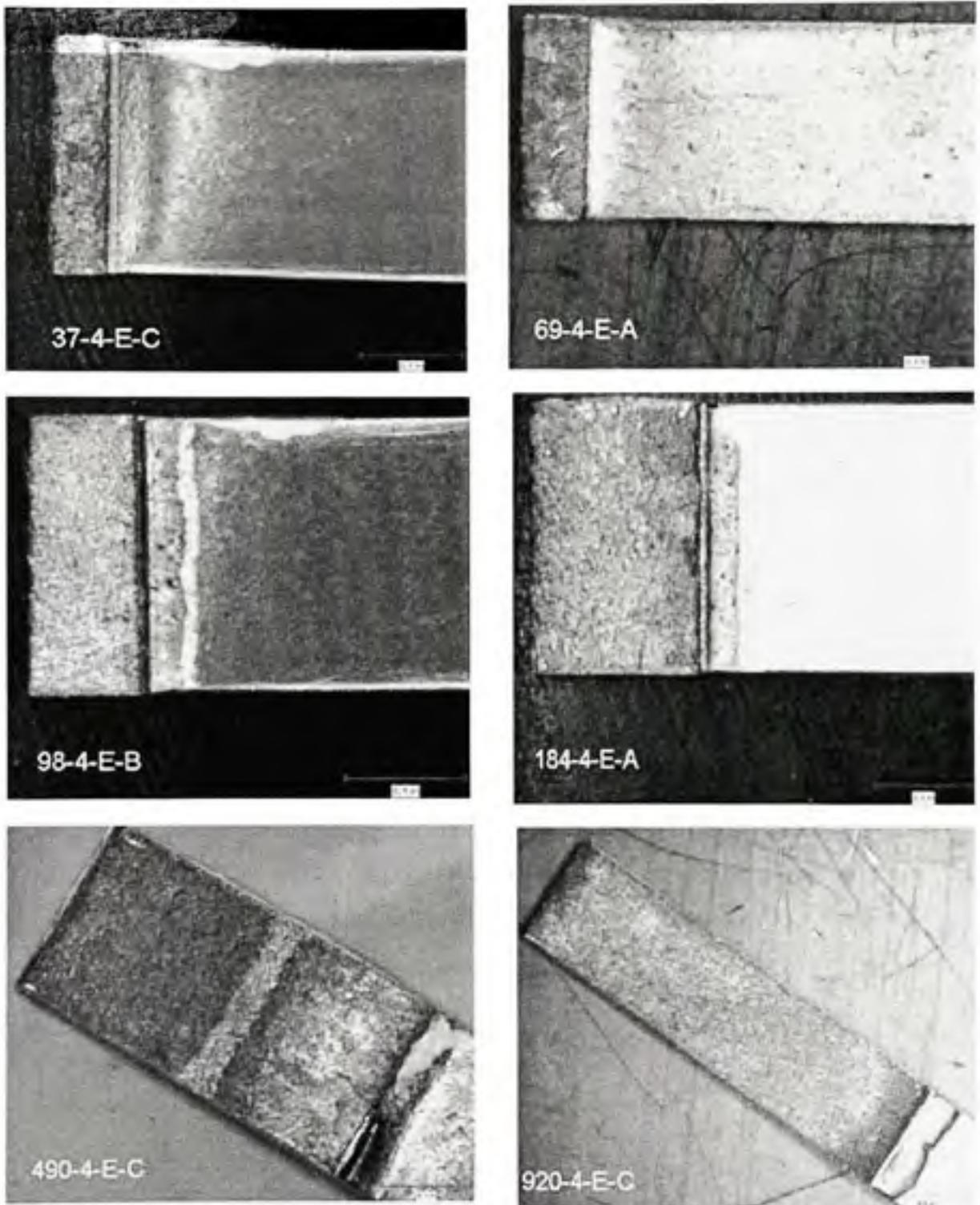


Figure 3.22 Faciès de rupture typiques des joints possédant une zone eutectique continue pour différents recouvrements, respectivement 37, 69, 98, 184, 490 et 920 millièmes de pouce (0.94, 1.75, 2.50, 4.675, 12.45 et 23.37 pouces), la largeur du joint quant à elle est de 6.35 mm (0.25 pouce).

La figure 3.23 est une métallographie d'un joint possédant une zone eutectique continue. On y voit une longue fissure au centre de la zone eutectique. Celle-ci a été provoquée de façon involontaire par une découpe un peu trop agressive de l'échantillon lors de sa préparation. Cette fissure témoigne de la facilité à générer des fissures dans la zone eutectique.

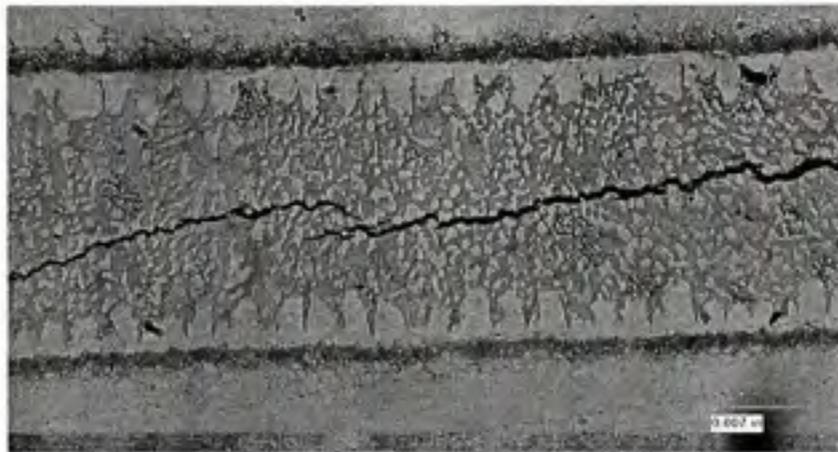


Figure 3.23 Exemple de joint brasé rempli de phases eutectiques et illustrant la facilité de réamorçage et de propagation de fissures dans la zone eutectique.

La figure 3.24 est une métallographie obtenue après polissage des profils des faciès de rupture avec une zone eutectique continue. Elle révèle de façon très caractéristique le chemin de propagation des fissures dans la zone eutectique et, corrobore l'observation faite à la figure 3.23, ce qui permet bien de confirmer que les phases eutectiques sont responsables des cas de rupture fragile.

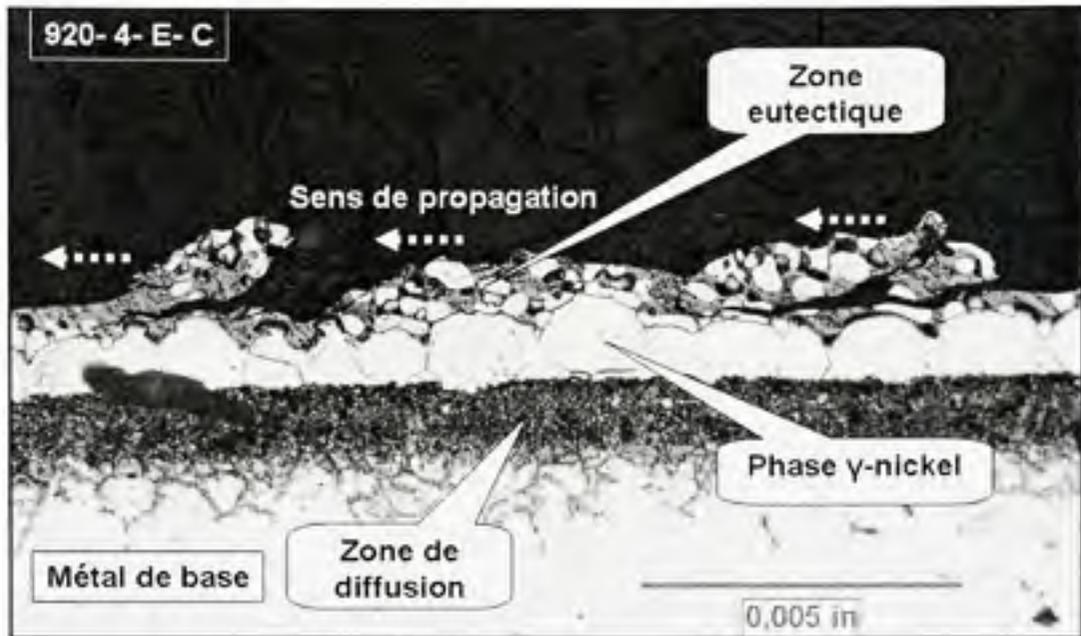


Figure 3.24 Vue de profil d'un faciès de rupture dans un joint contenant une zone eutectique continue.

Rupture entièrement dans le métal de base

Le deuxième type (type II) de rupture observé concerne les ruptures qui se produisent dans le métal de base. Bien qu'aucun enregistrement vidéo n'ait été fait pendant les essais de traction, une simple observation a largement suffi pour comprendre le processus de rupture dans ces cas. Comme dans les cas précédents, les fissures sont initiées aux filets, mais la propagation s'est poursuivie à travers le métal de base lequel fini par rompre totalement sans pratiquement altérer le joint brasé proprement dit. À cause de la forte plastification du métal de base et du fait que les mesures extensométriques, lors des essais n'aient pas correctement fonctionné, il est impossible de faire une estimation des valeurs des angles de pivotement à l'amorçage des fissures. Ce mode de rupture concerne les joints sans eutectiques, notamment ceux avec des recouvrements intermédiaires et grands. Les figures 3.25 et 3.26 rendent compte de ces cas de rupture dans le métal de base des joints brasés.

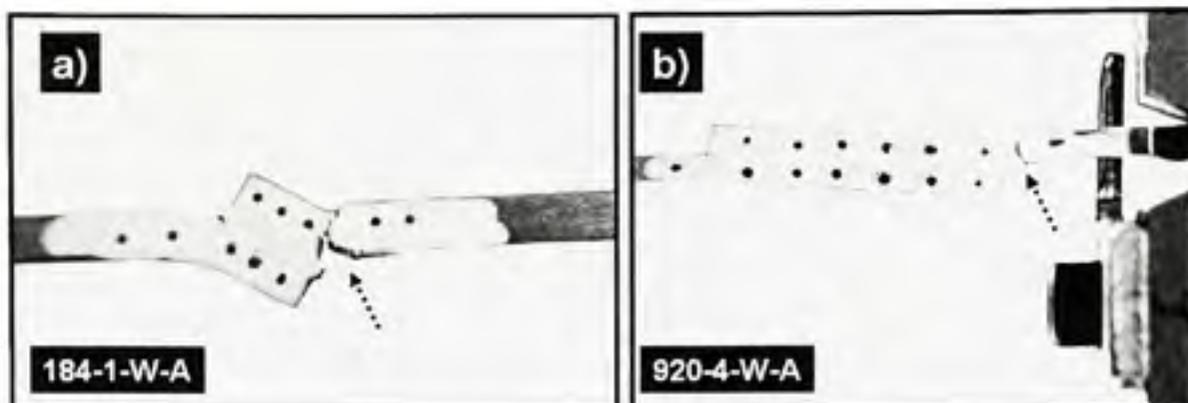


Figure 3.25 Vues de profil de deux exemples de rupture dans le métal de base, dans les deux cas, les flèches indiquent les zones d'amorce de fissures.

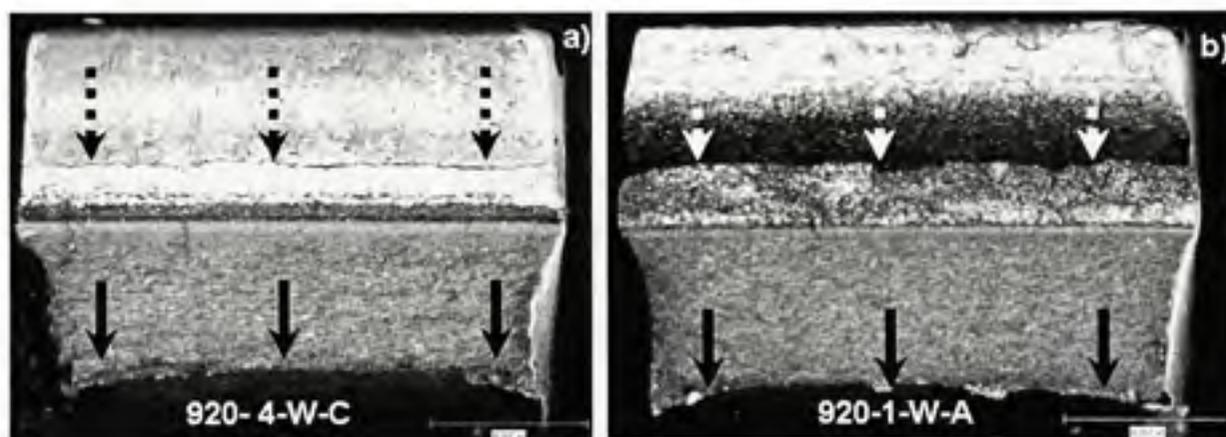


Figure 3.26 Vues de face des faciès de rupture des joints brasés ayant rompu à travers le métal de base après une amorce dans le filet, les flèches en pointillé indiquent les sites d'amorces des fissures, les pleines indiquent quant à elles la zone de rupture finale.

Pour ces échantillons, on note un important rétrécissement du fait de la striction dans le métal de base ainsi qu'une importante zone de déformation plastique. Ces éléments sont caractéristiques d'une rupture ductile. Puisque dans ces cas, la rupture a eu lieu dans le métal de base, il est logique de penser que la résistance mécanique de ces joints se rapproche de celle du métal de base.

Les valeurs de résistances de ces joints sont en effet d'autant plus proches de la valeur de la résistance mécanique du métal de base (700 MPa) que le recouvrement est grand. Comme dans le cas précédents les fissures sont initiées au niveau du filet, mais, plutôt que de continuer à se propager dans le joint brasé, elles se sont orientées vers le métal de base par des chemins de propagation assez complexes comme le montre par exemple la figure 3.27.

Sur les deux images de la figure 3.27, on peut voir 3 zones identifiées par des numéros allant de 1 à 3. La zone 1 représente le point d'amorce de la fissure principale, à la surface du filet rempli d'eutectiques. La zone 2 représente la fin de la propagation de la fissure principale dans le joint. Cette dernière correspond à la fin de présence de phases eutectiques, ce qui confirme qu'à l'intérieur du joint, les fissures ne se propagent que dans la région eutectique. La troisième zone permet de visualiser le chemin pris par la fissure dans le métal de base.

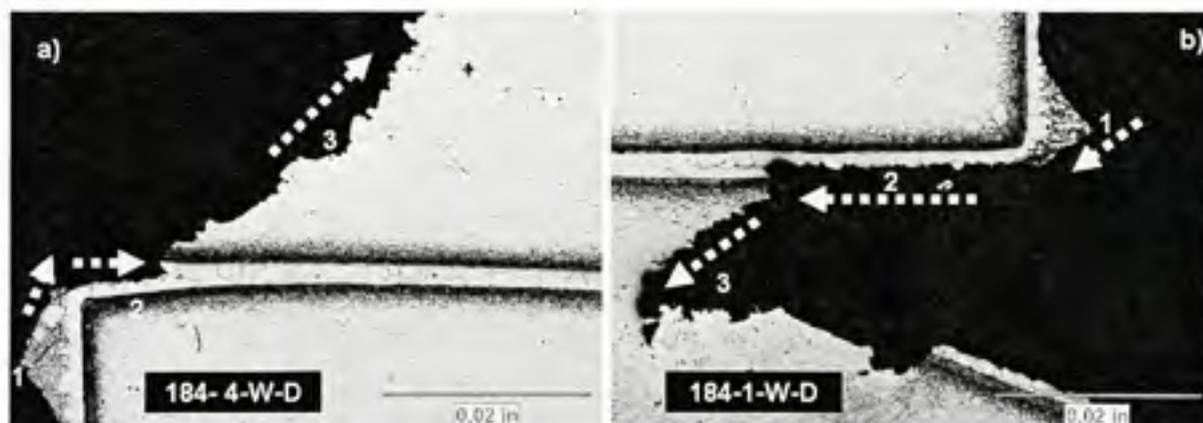


Figure 3.27 Illustration du processus d'amorçage et propagation de fissures d'un joint brasé sans eutectiques, les flèches en pointillé indiquent le sens de propagation de la fissure principale à chacune des extrémités a) et b) du même joint brasé.

Rupture mixte

Le dernier type (type III) de rupture est une rupture mixte comprenant les deux précédents types. C'est un type de rupture complexe car il implique une rupture à la fois dans le joint et dans le métal de base. Il peut être subdivisé en deux sous catégories. Le premier cas s'illustre par des propagations dans le joint et dans le métal de base. Ce cas peut s'apparenter au dernier type de rupture présenté, mais il se caractérise par un arrêt soudain de propagation dans le joint du fait la discontinuité de la zone eutectique. Les joints correspondants à ce premier sous type de rupture ont un faible gap de 25 microns (0.001 pouce) avec des longs recouvrements, 12,45 et 23,37 mm (0,490 et 0,920 pouces) et contiennent une zone eutectique fine et très discontinue. Le deuxième cas présente une propagation alternée dans le joint et le métal de base, parallèlement au joint brasé. Le deuxième sous type correspond aux joints avec des petits recouvrements et sans eutectiques.

Cas de rupture à travers le joint et le métal de base

Les images captées avec la camera extensométriques (figure 3.28) permettent de rendre compte de ce type de rupture. On voit clairement que l'ouverture des joints, à la manière d'une «boîte de sardines» avance progressivement depuis le filet à l'entrée du joint. Un des métaux de base est presque parfaitement plan tandis que l'autre s'est plastifié localement. Ces joints sont ceux qui ont le plus pivotés lors des essais. Par contre, là aussi, il n'est pas possible de donner des valeurs précises d'angles de pivotement pour lesquels l'amorce de fissure a eu lieu et seuls les angles finaux ont pu être mesurés après les tests de traction.

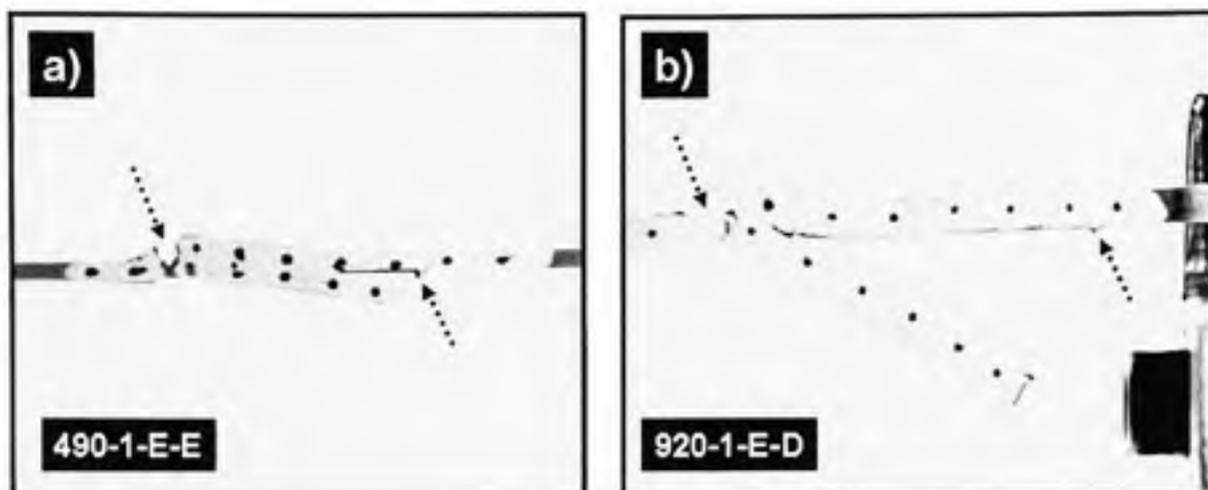


Figure 3.28 Exemples de joints brasés ayant rompu à travers le joint et le métal de base.

Des zones d'arrêt de la propagation des fissures dans le joint ont été observées au microscope optique après polissage. Pour ces échantillons (figure 3.29), la rupture finale s'est produite dans le métal de base, mais à partir d'une fissure qui s'était amorcée de l'autre côté du joint. En raison de la faible épaisseur et de la discontinuité de la zone eutectique dans ces joints, les fissures se sont propagées, tantôt dans zone eutectique, tantôt dans le métal de base quand aucune structure eutectique n'était présente dans le joint.

La figure 3.29 montre des changements de direction de propagation des fissures qui sont en toute évidence liés à la difficulté qu'ont les fissures à poursuivre la propagation si le joint brasé est dépourvu de phases eutectiques. Ceci a été observé sur tous les joints ayant des recouvrements de 23.37 mm (0.920 pouce). Dans le cas des joints de 12.45 mm (0,490 pouce) de recouvrement, la fissure a continué à se propager à travers le joint et jusqu'à l'extrémité opposée, et il s'est avéré que dans ces cas l'épaisseur et la continuité de la zone eutectique étaient plus favorables à une telle propagation. La figure 3.30 permet d'observer la propagation discontinue de la fissure dans la zone eutectique et parfois dans le métal de base.

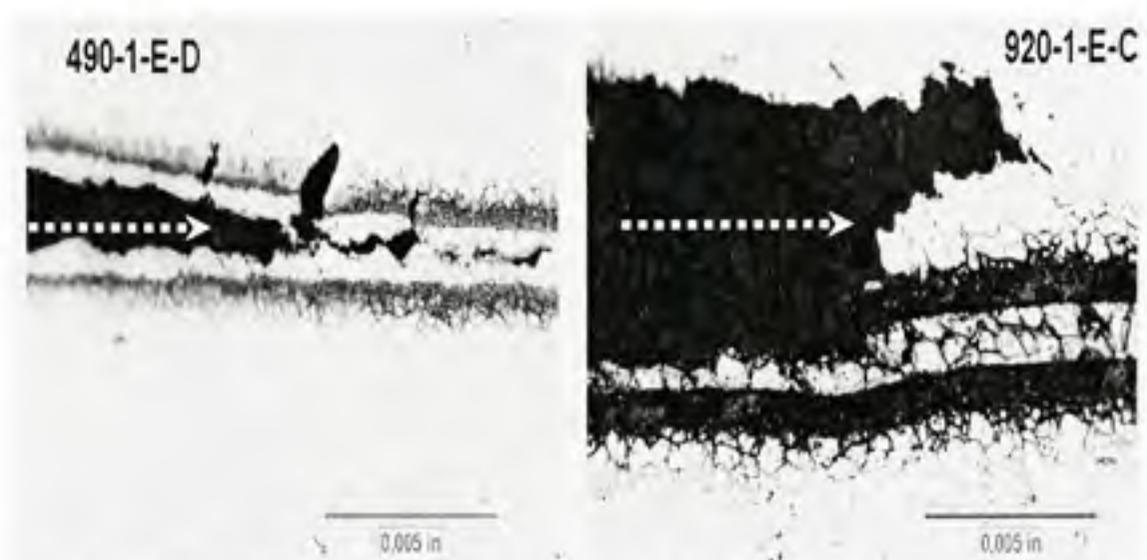


Figure 3.29 Micrographies illustrant la difficulté de la propagation de fissure dans un joint ne possédant pas une zone eutectique continue où l'on voit des fissures secondaires transversales, les flèches en pointillé indiquent le sens de la propagation.

La fissure sortira puis rentrera de nouveau dans le joint, ce qui donne des chemins de propagation assez complexes comme on peut le voir sur la figure 3.30. On y observe une faible présence de phases eutectiques, mais suffisamment continue pour faciliter la propagation des fissures à travers le joint brasé. La zone 1 correspond au filet du joint brasé rempli de phases eutectiques, la zone 2 correspond à la zone eutectique centrale, La zone 3 indique la discontinuité des phases eutectiques avec un changement de pente assez important dans le joint. Ce fléchissement traduit certainement une augmentation locale de la résistance mécanique du joint.

Dans la zone 4, on voit clairement que la fissure est sortie du joint pour se propager dans le métal de base, parallèlement au plan du joint. Un agrandissement de zones de rupture de ces catégories de joints permet de mieux visualiser les discontinuités de phases eutectiques (figure 3.31) qui induisent des changements de propagations des fissures à travers le joint.

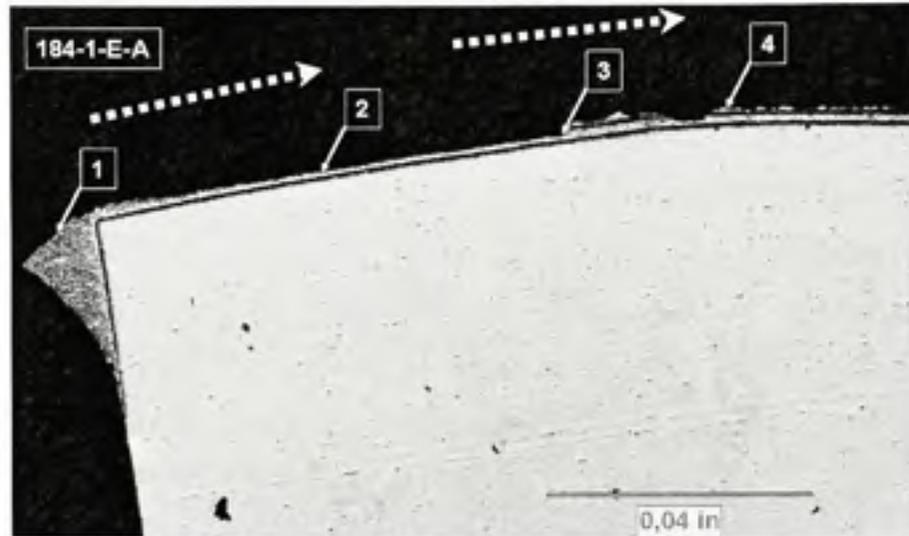


Figure 3.30 Chemin de propagation de fissures dans un joint brasé avec eutectiques de 25 microns (0.001 pouce) de gap, les flèches en pointillé indiquent le sens de propagation.

La non continuité des phases eutectiques dans ces joints sont à l'origine des oscillations observées sur certaines courbes de charges présentées à l'annexe VIII. À défaut de se propager dans la zone sans eutectique, les fissures continuent préférentiellement leur propagation le long du joint de grains ou vers le métal de base pour ensuite se propager dans le métal de base, tout juste en dessus de la zone de diffusion. La figure 3.32 montre que la propagation se produit pratiquement dans le métal de base au dessus de la zone de diffusion plutôt que dans la zone de diffusion proprement dite. C'est un point assez intéressant car on n'aurait pu s'attendre à ce que la zone de diffusion soit plus propice à la propagation étant donné la présence de nombreux petits précipités à cet endroit [1].

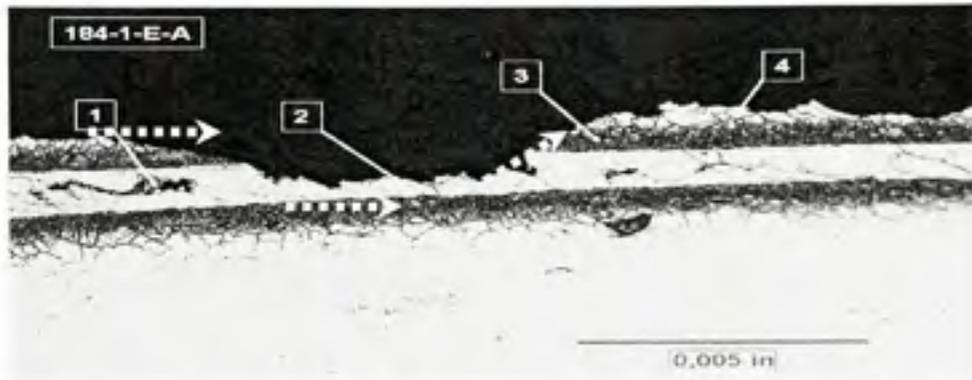


Figure 3.31 Illustration de la discontinuité de propagation des fissures dans un joint ayant un gap de 25 microns (0,001 pouce) et avec zone eutectique non parfaitement continue.

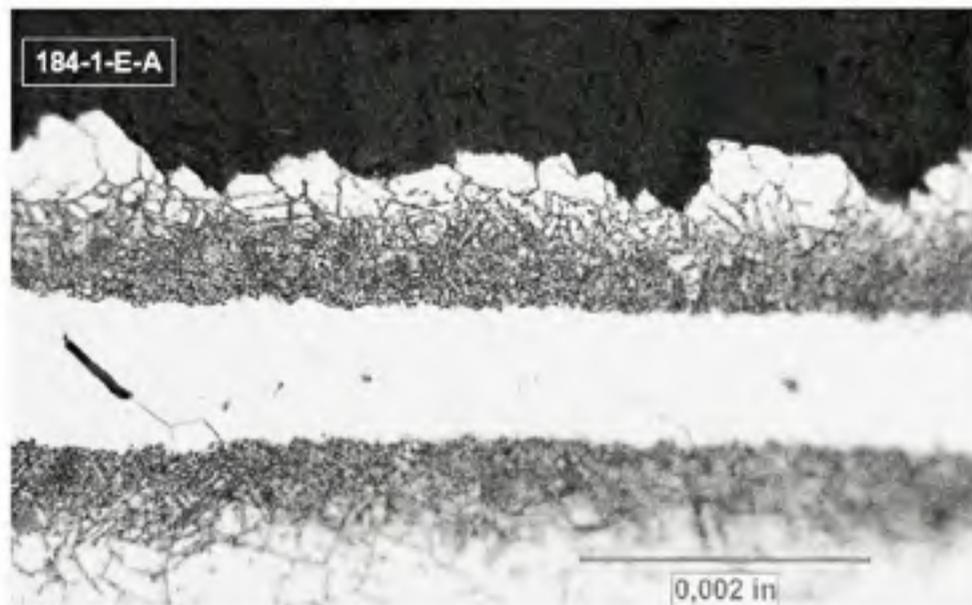


Figure 3.32 Illustration de la propagation de la fissure dans le métal de base, à l'extrémité de la zone de diffusion, lorsqu'il n'y a pas d'eutectiques dans le joint brasé.

Aucune fissure se propageant dans la zone du joint contenant la phase γ -nickel n'a été observée, ce qui permet d'expliquer les bonnes propriétés des joints libres d'eutectiques.

Cas de rupture dans le métal de base parallèlement au joint

Un second sous-type de rupture mixte est observé pour les joints de petit recouvrement et sans eutectiques où la propagation se fait bien dans le métal de base mais parallèlement au joint. En effet, si les joints longs et sans eutectiques ont tous rompu dans le métal de base, très exactement dans une zone proche de l'entrée du joint, les joints avec de petits recouvrements et la même microstructure (sans eutectiques), ont un mode de propagation complètement différent. Il a été observé dans ces cas, comme le montrent les figures 3.33 et 3.34, que les ruptures ont bien lieu majoritairement dans le métal de base, mais parallèlement au joint brasé, à l'extrémité de la zone de diffusion.

Les figures 3.33 et 3.34 illustrent ce type de rupture. On voit clairement que le joint, constitué de la phase solide γ -nickel est resté parfaitement intègre, aucune fissure n'a réussi à se propager dans cette phase qui semble très ductile.

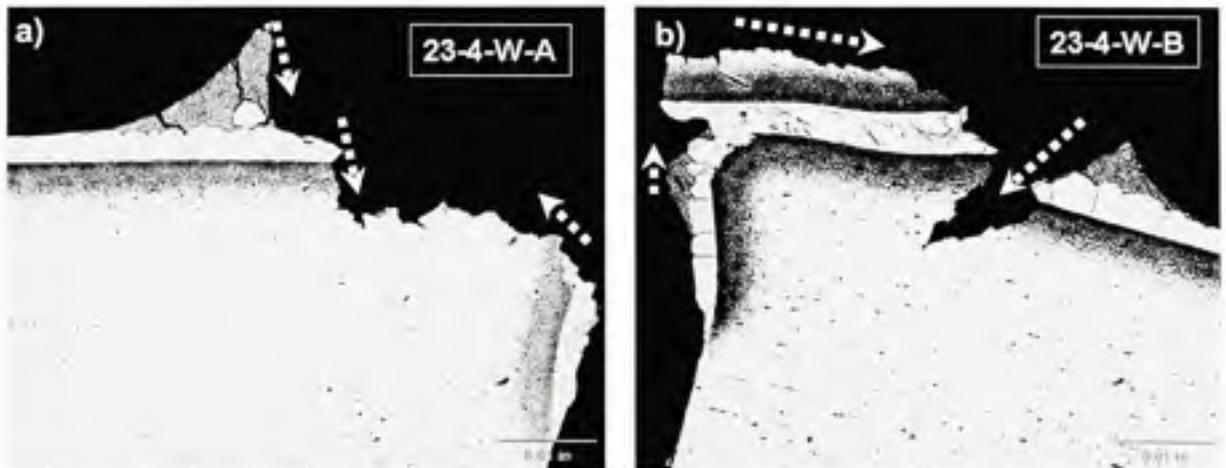


Figure 3.33 Profil de propagation des fissures dans les joints courts sans eutectiques, exemples de joints de 0.584 mm (0.023 pouce) de recouvrement.



Figure 3.34 Profil de propagation des fissures dans les joints courts sans eutectiques, exemple d'un joint de 1.75 mm (0.069 pouce) de recouvrement.

Même dans les joints les plus courts où l'on s'attendait à obtenir une rupture dans le joint, en l'absence de phases eutectiques, puisque le joint est demeuré intègre car ne présentant aucune preuve de fissuration (figure 3.35).

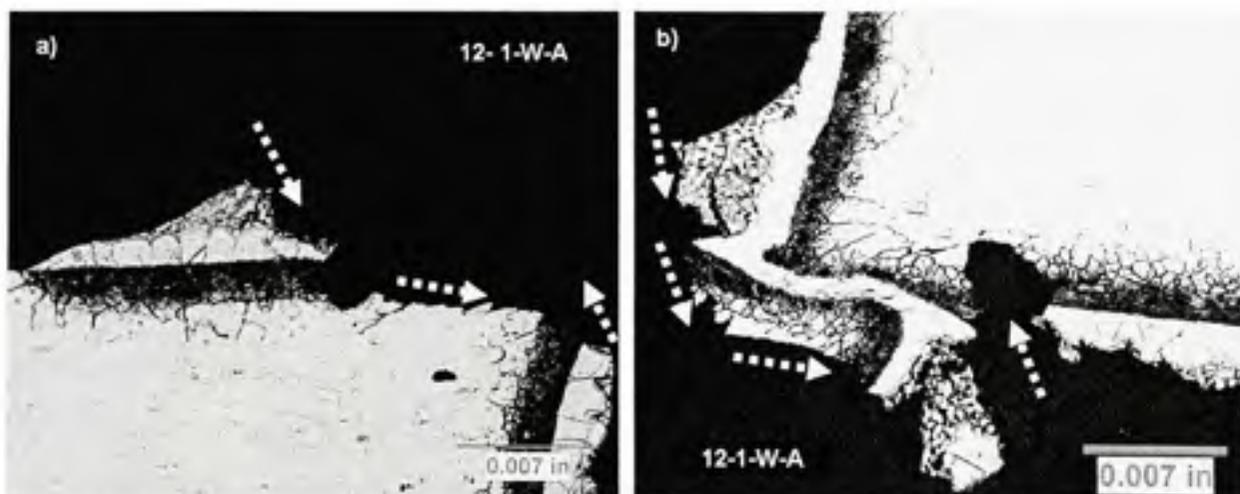


Figure 3.35 Profil de propagation des fissures dans un joint court sans eutectiques, exemples d'un joint de 0.305 mm (0.012 pouce) de recouvrement.

Les deux modes de rupture mixte que l'on vient d'étudier se sont avérés plus complexes que les deux autres modes de rupture présentés. L'un est dû à la discontinuité de la zone eutectique dans le joint, laquelle entraîne une propagation de fissure dans le joint en présence d'eutectiques ou alternativement dans le métal de base à l'extrémité de la zone de diffusion en absence d'eutectique dans le joint. L'autre est lié à l'absence d'eutectiques dans les joints courts, ce qui provoque une propagation exclusivement dans le métal de base, parallèlement au joint brasé à l'extrémité de la zone de diffusion. Dans tous ces cas, l'on a mis en évidence la ductilité de la phase γ -nickel.

3.2.3.3 Microscopie électronique à balayage

Dans cette section, nous allons procéder à une analyse détaillée des faciès de rupture au microscope électronique à balayage pour en déduire les mécanismes mis en jeu lors de la rupture des joints brasés et les corrélérer avec les observations au microscope optique et les résistances mécaniques obtenues. La compréhension des mécanismes de rupture sera faite sur deux types de joints : les joints sans eutectiques comportant des petits recouvrements et les joints avec eutectiques et possédant un gap de 25 microns (0.001 pouce) car ceux-ci présentent des types de rupture mixte

Exemple d'un joint avec zone eutectique non continue

Les modes de rupture mixte avec des propagations à la fois dans la zone eutectique et dans le métal de base sont particulièrement intéressants. Ils n'ont pourtant jamais été rapportés dans la littérature. La figure 3.36 montre un exemple de faciès de rupture qui a été préalablement étudié par microscopie optique (d'où la présence d'une large tâche blanchâtre à droite de l'image et qui correspond au reste de résine époxy utilisée pendant l'enrobage). L'échantillon en question est le joint de référence 184-1-E-A.

L'étude par microscopie optique montre un chemin de propagation des fissures avec des irrégularités qui traduisent une alternance de propagation dans la zone eutectique et dans le métal de base (figure 3.31). Afin de mieux évaluer les variations de morphologies et particulièrement les changements de plan de propagation dans chaque type de microstructures présentes dans ce joint, nous avons procédé à une analyse systématique de plusieurs régions suivant la flèche indiquée au bas de la figure 3.36.

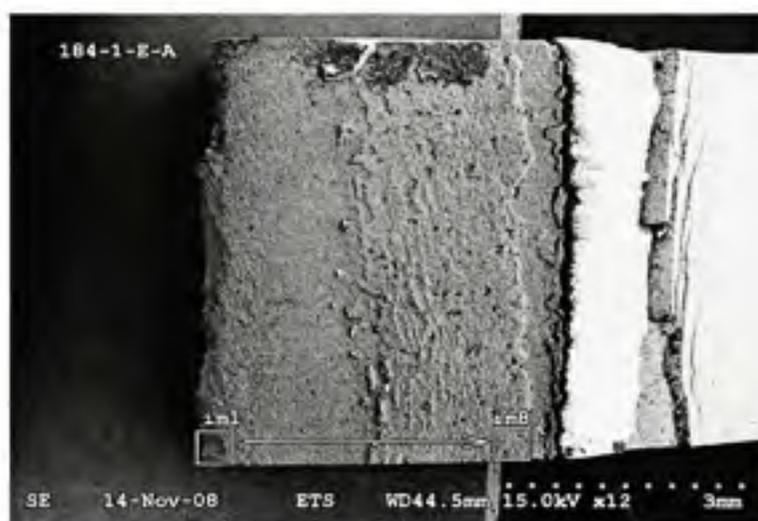


Figure 3.36 Faciès de rupture d'un joint de 25 microns (0.001 pouce) de gap avec des eutectiques, la flèche en bas du faciès indique les différentes zones investiguées.

La figure 3.37 présente des vues du faciès du filet de la zone I. À fort grossissement, on constate que certaines régions sont parfaitement lisses et des plans de clivages très nets peuvent être identifiés. Ceci est caractéristique d'un mode de rupture fragile. Ces régions correspondent aux zones eutectiques du filet comme présenté sur la zone 1 de la figure 3.30. Ces images semblent confirmer que les phases eutectiques sont à l'origine de l'amorce des fissures, d'où l'intérêt de les éliminer si l'on pense utiliser des joints brasés comme assemblages structuraux.

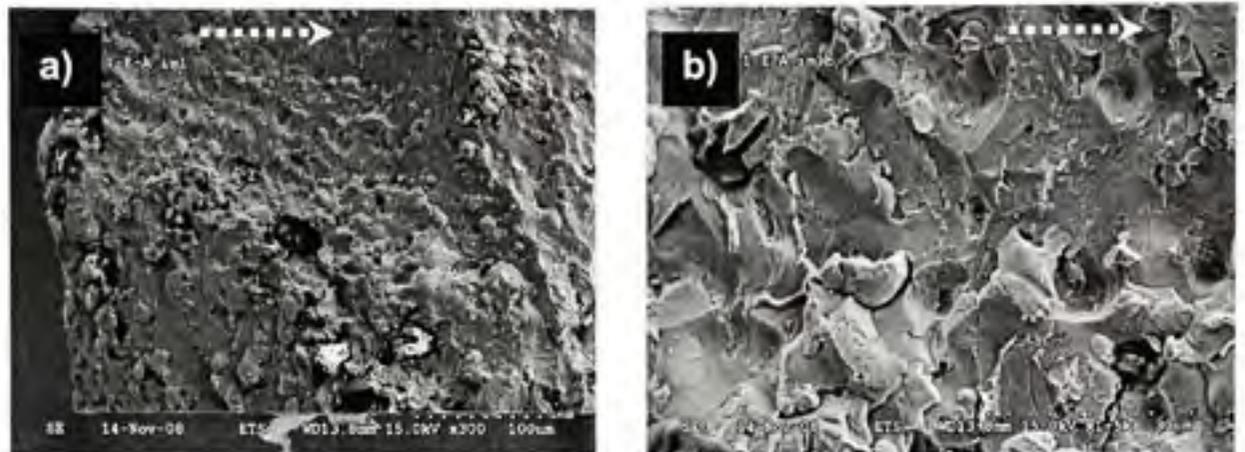


Figure 3.37 Faciès de rupture dans le filet où l'on voit une abondance de phases eutectiques fragiles ayant rompu par clivage, l'image b) est un agrandissement d'une zone de l'image a) et les flèches indiquent le sens de propagation de la fissure principale.

En continuant le chemin de propagation, la fissure arrive dans une zone contenant moins de phases eutectiques en raison de l'étroitesse du gap (les joints de 25 microns de gap (0.001 pouce) contiennent une zone eutectique beaucoup moins large que ceux de 100 microns (0.004). Dans cette région (figure 3.38), le mode de rupture est identique à celui observé dans le filet (figure 3.37) : on y voit des plans de clivage bien matérialisés avec des surfaces de rupture parfaitement lisses et nettes. De nombreuses fissures secondaires perpendiculaires sont visibles le long de la fissure principale. Celles-ci sont probablement dues à la décohésion des phases eutectiques dans le joint brasé et, il semble que ce processus de décohésion (d'arrachage ou encore de pelage) soit provoqué par le pivotement du joint à mesure que la fissure principale avance.

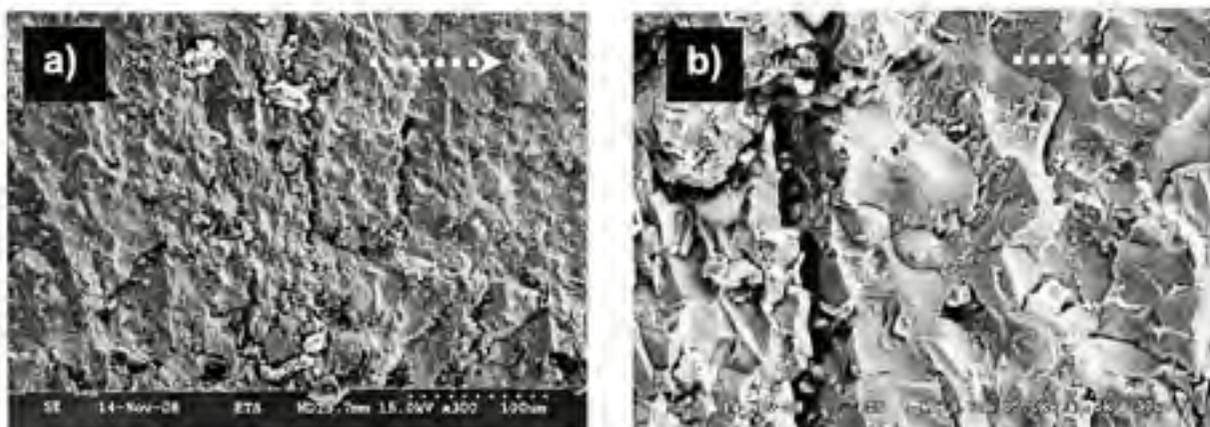


Figure 3.38 Faciès de rupture dans la zone eutectique située près du filet, l'on y voit de nombreuses fissures secondaires perpendiculaires à la direction de propagation, la figure b) est un agrandissement de la figure a) (zone 2 de la Figure 3.36).

Plus loin le long de la fissure, le faciès de rupture change d'aspect (figures 3.39a et b) avec des irrégularités de surface beaucoup plus marquées. On y aperçoit des plans de clivage. Celles-ci sont entourées d'une fine couche ductile qui correspond donc à la phase γ -nickel ayant été plastifiée. Cette zone correspond à la région du joint contenant une très fine zone eutectique comme on peut le voir sur le profil (figure 3.30).

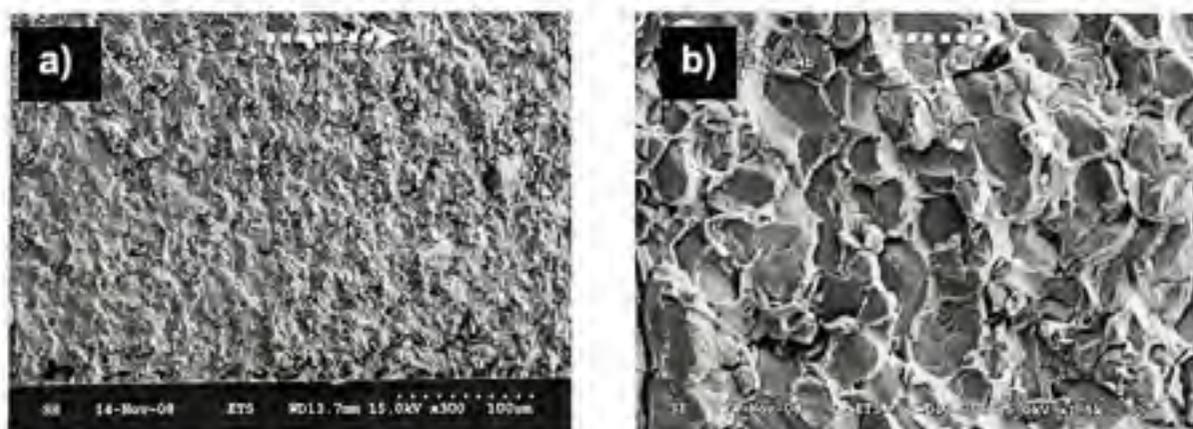


Figure 3.39 Faciès de rupture dans une zone eutectique très fine et entourée de phases γ -nickel, la figure b) est un agrandissement de la figure a) (zone 3 de la Figure 3.39).

La dernière image de cette série d'investigations du joint 184-1-E-A est celle présentée ci-dessous (figure 3.40). Le faciès de rupture est beaucoup plus irrégulier et sinueux, avec de nombreuses cupules caractéristiques d'une rupture ductile. Ceci vient confirmer qu'il s'agit d'un faciès du métal de base. Le fait que les cupules soient orientées démontre que l'échantillon a subi des efforts de cisaillement car en tension pure, les cupules auraient été orientées perpendiculairement à la direction de propagation de la fissure principale.

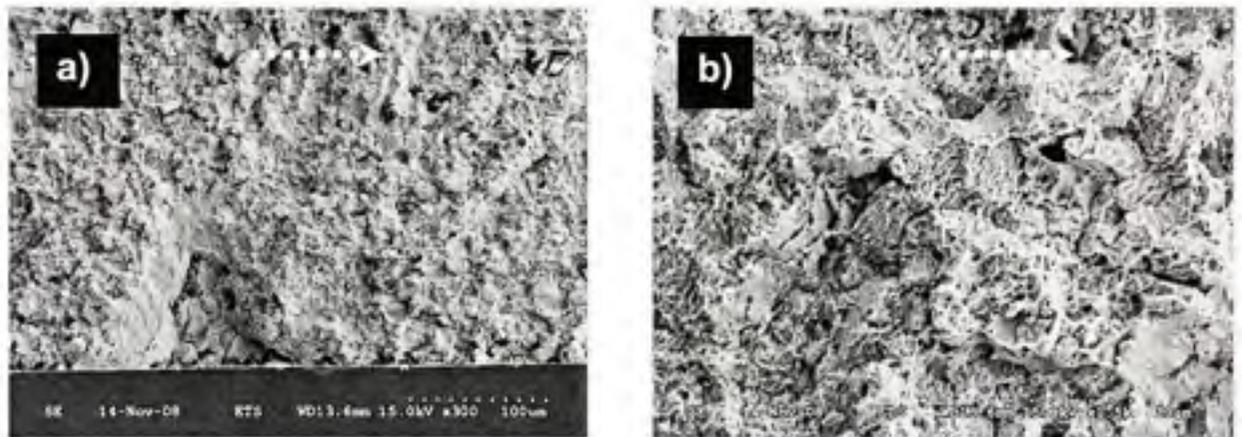


Figure 3.40 Faciès de rupture dans le métal de base où l'on voit de nombreuses cupules caractéristiques d'un comportement ductile, la figure b) est un agrandissement de la figure a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.

Exemple d'un joint sans eutectiques et avec un petit recouvrement

Les joints avec des petits recouvrements et sans eutectiques ont la particularité de présenter des ruptures plus complexes qu'une rupture simple dans le métal de base à l'entrée du joint.

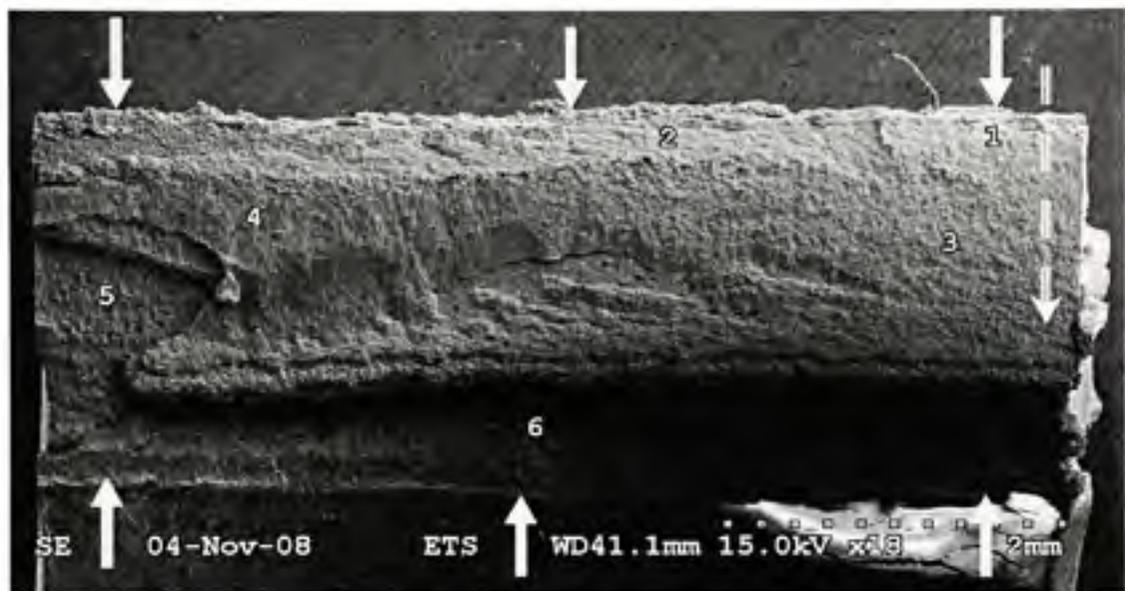


Figure 3.41 Faciès de rupture d'un joint de petit recouvrement et sans eutectiques, les flèches pleines indiquent l'emplacement des sites d'amorce de fissures, la flèche en pointillé quant à elle indique le sens de propagation de la fissure principale.

La figure 3.41 présente le faciès de rupture de l'échantillon 69-1-W-C. Les flèches continues situées aux deux extrémités du joint indiquent l'emplacement du filet et donc les sites d'amorce de fissures. La flèche en pointillé indique le sens de propagation de la fissure principale. La partie creuse sur le bas de la figure indique l'orientation de la fissure secondaire qui a dû s'orienter en direction du métal de base faute de pouvoir continuer la propagation dans la phase γ -nickel. En procédant à des grossissements dans certaines zones du faciès, on constate que comme dans les cas précédents la zone 1 proche de l'entrée du joint contient une forte densité de zones sombres, caractéristiques des zones de clivages des phases eutectiques (figure 3.42).

Dans la partie inférieure de la figure 3.43, on voit clairement un changement de faciès de rupture, ce qui témoigne de la fin de la présence de la phase eutectique dans le joint (échantillon sans eutectiques). La partie inférieure de l'image présente un faciès ondulé et caractéristique d'une rupture ductile, avec de nombreuses cupules semblables à celle observée sur la figure 3.40. Il s'agit vraisemblablement d'une zone du métal de base. La zone 2 présente les mêmes caractéristiques que la zone 1, ce sont toutes deux des régions du filet.

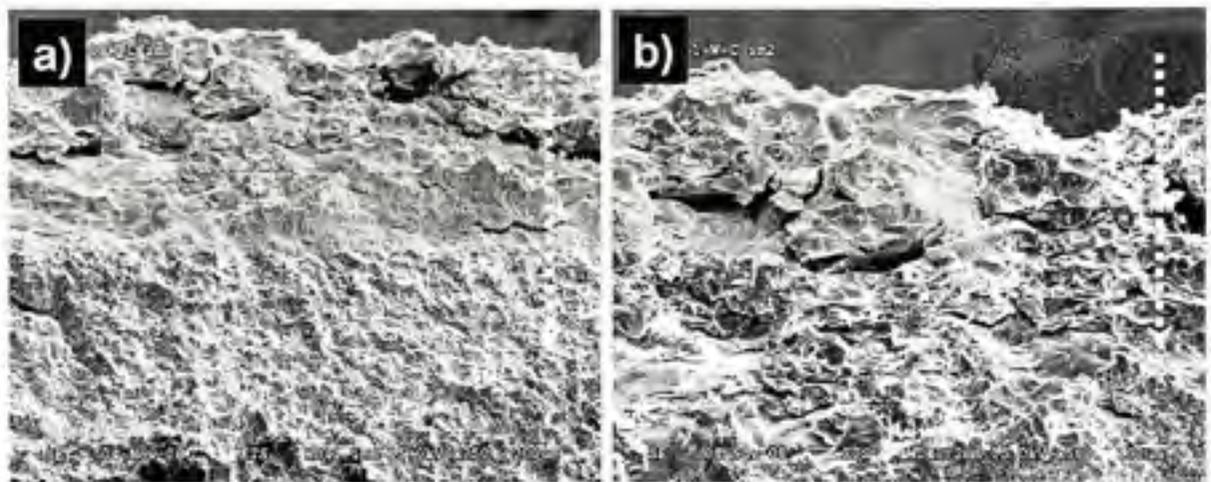


Figure 3.42 Faciès de rupture au filet d'un joint court et sans eutectiques (zone 1 de la Figure 3.41). L'image b) est un agrandissement de la partie supérieure gauche de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.

Il est intéressant de noter que les zones (3 et 4) se trouvent dans le métal de base situé d'un côté du joint tandis que la zone 5 se trouve dans le métal de base, mais de l'autre côté du joint. La fissure s'est propagée dans le métal de base, presque parallèlement au joint, ceci est corroboré par la microscopie optique faite précédemment (figure 3.34). On aperçoit des zones de surcharge et des faciès sinueux caractéristiques d'une rupture ductile.

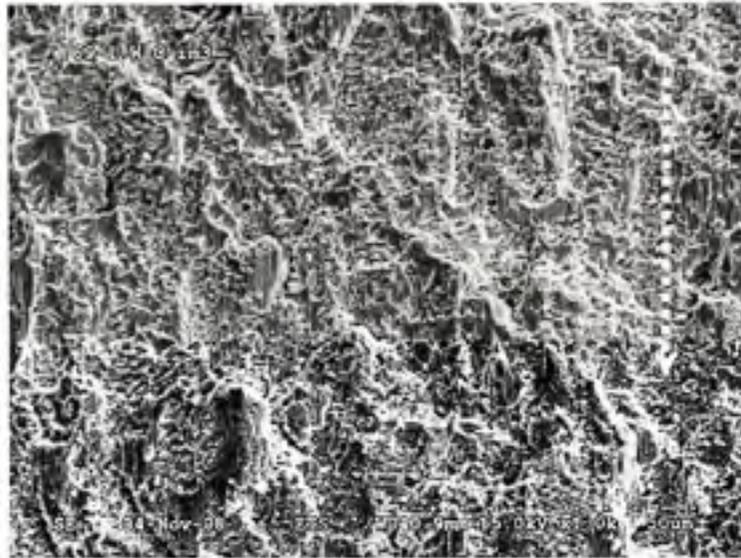


Figure 3.43 Vue du faciès de rupture dans un joint de petit recouvrement sans eutectiques où l'on aperçoit de nombreuses cupules caractéristiques d'une surcharge dans une zone ductile du métal de base (zone 3 de la Figure 3.41).

Dans la zone 5, on constate une absence totale de plans de clivage, aucun élément visible ne présente une rupture lisse et plane (figure 3.44). Le faciès est totalement sinueux et très dénivelé. Il s'agit en toute évidence d'une zone qui se trouve plus en profondeur dans le métal de base.

La zone 6 (figure 3.45) permet de voir la zone de propagation de la fissure amorcée de l'autre extrémité du joint et qui s'oriente en direction du métal de base à défaut de ne pouvoir continuer sa propagation dans le joint. L'on aperçoit une énorme crevasse qui est en réalité une fissure amorcée dans le métal de base, tout juste au niveau de la fin de la zone eutectique et qui a tendance à s'orienter perpendiculairement au joint.

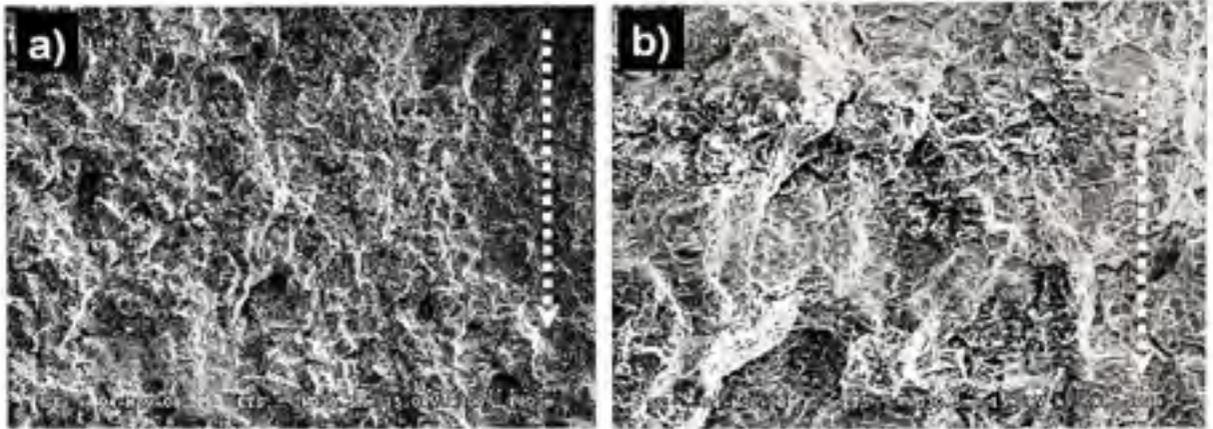


Figure 3.44 Faciès de rupture dans le métal de base d'un joint court sans eutectiques (zone 5 de la Figure 3.36), l'image b) est un agrandissement du centre de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.

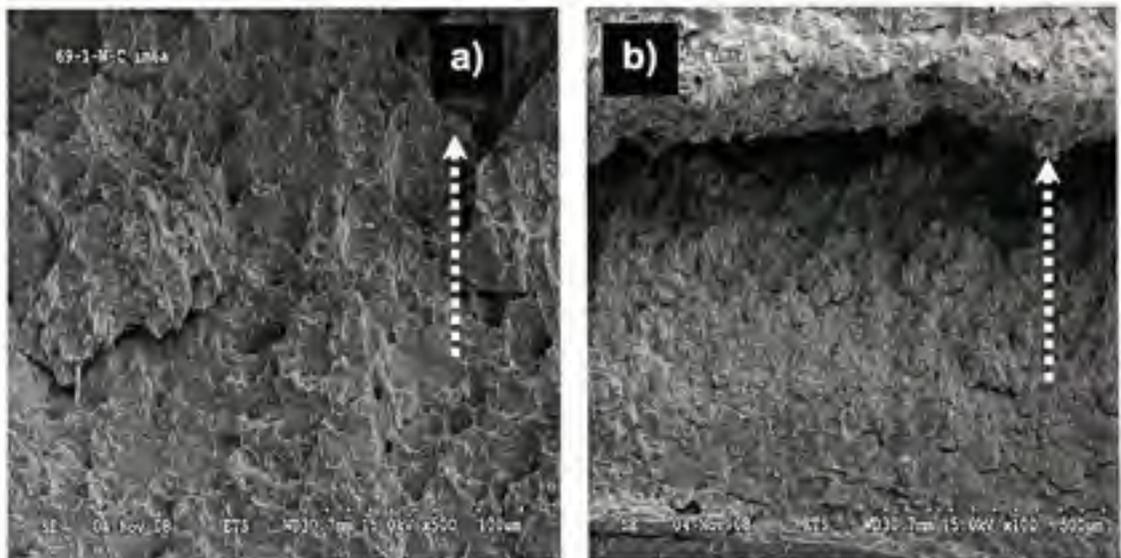


Figure 3.45 Faciès de rupture dans le métal de base dans un joint de petit recouvrement sans eutectiques (zone 6 de la Figure 3.36) l'image b) est un grandissement du centre de l'image a) et les flèches indiquent la direction de propagation de la fissure principale.

CHAPITRE 4

DISCUSSIONS

Il convient de rappeler avant tout que le but de ce projet était d'établir une méthode robuste pour évaluer les propriétés mécaniques des joints brasés à recouvrement simple et, d'en établir l'effet des paramètres géométriques et des microstructures en corrélation avec les mécanismes de rupture. Les tests mécaniques ont été effectués en tension et en cisaillement, les paramètres investigués étaient la longueur de recouvrement, le gap, la présence ou non de phases eutectiques dans les joints et l'épaisseur du métal de base. La partie qui suit traitera donc des discussions des résultats obtenus lors des différents essais effectués.

4.1 Définition des recettes de brasage

Cette étape du projet a été très difficile à mettre en œuvre car il fallait adapter les recettes de brasage en fonction des gaps choisis dans la matrice d'expériences. La campagne d'essais préliminaires a servi à trouver et valider les recettes de brasage tout en mettant en œuvre un moyen de contrôler la robustesse et la reproductibilité des différentes manœuvres de fabrication des assemblages. Les essais ont été conduits avec une assez bonne reproductibilité. Les temps de brasage optimaux alors trouvés étaient de 1, 10, 30 et 150 minutes pour obtenir respectivement des joints de types 1-E (gap de 25 microns (0.001 pouce) avec eutectiques), 4-E (gap de 100 microns (0.004 pouce) avec eutectiques), 1-W (gap de 25 microns (0.001 pouce) sans eutectiques) et 4-W (gap de 100 microns (0.004 pouce) sans eutectiques), avec le BNi-2 comme métal d'apport. Les premiers types comprennent deux zones très caractéristiques : une zone claire composée de la phase γ -nickel qui est une solution solide de nickel riche en chrome, fer et silicium. Elle forme le joint de chaque côté de la zone centrale. La deuxième zone est celle plus foncée et se trouve au centre du joint. C'est la zone dite eutectique. Celle-ci est plus complexe car elle est elle-même composée de plusieurs phases riches en borures de nickel (Ni_2B et Ni_3B) et siliciures de nickel (Ni_3Si) [1]. Les deuxièmes types de joints sont dépourvus de phases eutectiques, on y retrouve juste une zone claire composée de la solution solide γ -nickel dans tout le joint.

4.2 Contrôle des caractéristiques physiques des joints

Cette étape a été l'une des plus critiques du projet. Elle a été effectuée en parallèle avec l'étape de définition des recettes de brasage puisque celles-ci ont été définies en fonction des valeurs de gaps ciblées. Nous devons en effet garantir les valeurs de gaps et des autres paramètres géométriques. Nous sommes toutefois parvenus à fabriquer des joints brasés avec une assez bonne reproductibilité comme le témoignent les résultats des mesures effectuées et qui sont présentées à l'annexe IX.

4.3 Influence des paramètres expérimentaux investigués

La quantification de l'effet des paramètres investigués a été faite par rapport aux propriétés mécaniques obtenues et aux mécanismes de rupture observés. Pour les propriétés mécaniques, seuls trois modèles de calculs ont utilisés : le modèle simple, celui de Volkersen et enfin celui de Goland et Reissner. Parce qu'il est le plus connu et le plus répandu, le modèle simple nous a servi de référence, les deux autres modèles sont présentés certes, mais il n'a pas été possible d'attester de la validité des résultats obtenus puisqu'il n'existe pas de travaux dans la littérature pour ce type d'applications.

4.3.1 Influence des microstructures

L'influence des microstructures a également été évaluée en procédant à l'analyse des faciès de rupture par microscopies optique et électronique à balayage et en corrélation avec les valeurs de résistance mécanique.

4.3.1.1 Influence des microstructures sur les propriétés mécaniques

Les résultats des essais effectués ont permis de mettre en évidence l'influence prépondérante des phases eutectiques sur la résistance mécanique des joints brasés. En cisaillement pur, il y a une différence assez nette entre les joints sans eutectiques et les joints avec eutectiques et ce, quelles que soient les valeurs de gap et d'épaisseur du métal de base.

Il n'a pas été possible de tester les très petits recouvrements avec eutectiques dans les joints avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) parce qu'ils sont tous rompus pendant les étapes précédant les tests mécaniques (polissage, collage des inserts, etc.). Ceci traduit leur très faible résistance mécanique. Pour des recouvrements intermédiaires et grands, la différence est moins significative, la résistance au cisaillement de tous les joints semble alors converger vers une même valeur proche de 100 MPa (14.5 Ksi). L'effet est complètement opposé pour la résistance en tension. À très faible recouvrement tous les joints ont presque la même résistance mécanique, mais les joints sans eutectiques sont nettement plus résistants pour des recouvrements intermédiaires, avec des écarts proches de 50%. Les écarts se réduisent ensuite pour des grands recouvrements, il semble alors à ce moment que le recouvrement ait tendance à compenser l'effet néfaste des eutectiques.

4.3.1.2 Influence des microstructures sur les mécanismes de rupture

En se basant sur les analyses fractographiques, on comprend mieux l'importance de la présence des eutectiques sur l'amorçage et la propagation de fissures. Tous les joints testés possédant des eutectiques ont rompu à travers la zone eutectique centrale. Les fissures ont toujours été initiées au niveau du filet, une partie fortement riche en phases eutectiques. Plus le filet est volumineux, plus il en contiendra et plus facile se fera l'amorce des fissures lors d'une sollicitation mécanique. Les observations faites pendant les essais, mais qui n'ont pu être enregistrées ont révélé que les fissures sont toujours initiées dans les filets et très exactement au centre de la zone eutectique. Ensuite si le joint contient une zone eutectique continue comme c'est le cas pour les joints brasés pendant 10 minutes, les fissures vont se propager d'un bout à l'autre du joint, les phases eutectiques se comportant alors comme des autoroutes propices à la propagation des fissures. Si en revanche le joint contient des eutectiques mais de façon discontinue comme c'est le cas avec les joints étroits brasés pendant 1 minute, les fissures vont se propager d'une façon plus complexe. Elles vont suivre la trame de la zone eutectique, mais lorsqu'elles arrivent face à une zone dépourvue d'eutectiques, elles bifurquent en direction du métal de base en suivant les joints de grains dans la phase γ -nickel du joint.

La phase γ -nickel apparaît alors comme une structure ductile, tenace et particulièrement hostile à la propagation de fissures. Si le recouvrement du joint est grand, la rupture finale du joint a tendance à se produire perpendiculaire au métal de base à l'autre extrémité du joint alors que pour des petits recouvrements, la fissure va continuer à se propager parallèlement au joint en alternant entre le joint lorsqu'il y a des eutectiques et dans le métal de base, à l'extrémité de la zone de diffusion, lorsqu'il n'y a pas.

Lorsque les joints sont sans eutectiques et donc constitués que de la phase γ -nickel, aucune propagation ne se produit dans ces derniers qui demeurent alors parfaitement intègres. Pour des recouvrements longs ou moyens, la rupture totale du joint se produit directement dans le métal de base au niveau du bord du joint. Lorsque le recouvrement est très petit, la rupture est plus complexe, la rupture finale est plus due à l'effet d'arrachement du métal de base, mais le joint est parfois affecté parce que les phases eutectiques sont généralement assez présentes dans le joint.

4.3.2 Influence du gap

L'influence du gap sur les propriétés mécaniques des joints brasés n'est pas la même selon que l'on considère la présence ou non de phases eutectiques dans ceux-ci. Elle est évaluée seulement pour des joints ayant les mêmes microstructures.

4.3.2.1 Influence du gap sur les propriétés mécaniques

Dans les joints sans eutectiques, pour les recouvrements longs et intermédiaires, le gap ne semble globalement pas jouer un rôle important. Les valeurs de résistance sont du même ordre de grandeur pour les deux valeurs de gaps choisies. Pour de petits recouvrements, les joints avec un gap de 25 microns (0.001 pouce) sont légèrement plus résistants au cisaillement que les joints avec un gap de 100 microns (0.004 pouce), particulièrement lorsque l'épaisseur du métal de base est faible. En tension, la résistance des joints ayant un gap de 25 microns (0.001 pouce) est plus élevée que celles des joints avec un gap plus grand (la différence de l'ordre de 15%).

Dans les joints avec eutectiques, le gap ne semble pas non plus avoir d'effet sur la résistance mécanique que les recouvrements soient courts ou longs. Pour des recouvrements intermédiaires où le comportement mécanique est en réalité une combinaison de tension et cisaillement, il semble avoir un léger avantage pour les joints avec un faible gap.

4.3.2.2 Influence du gap sur les mécanismes de rupture

Pour les joints brasés sans eutectiques le gap ne semble pas avoir d'influence sur les mécanismes de rupture. Pour les joints intermédiaires et longs, indépendamment du gap, la rupture s'est produite dans le métal de base, à l'entrée du joint, après un amorçage classique dans le filet. Pour les recouvrements courts en revanche, la rupture a également lieu dans le métal de base, mais cette fois-ci, au-dessus de la zone de diffusion, laissant la phase γ -nickel parfaitement intègre.

Différents mécanismes de rupture ont cependant été observés pour les joints avec eutectiques. Dans le cas des joints de 100 microns (0.004 pouce) de gap, la continuité et l'abondance d'eutectiques dans le joint facilite la propagation des fissures. Les joints de 25 microns (0.001 pouce) de gap ne possédaient en réalité pas une zone eutectique parfaitement continue à travers les joints, ce qui a conduit à des mécanismes de propagation des fissures différents. Pour les longs recouvrements, c'est le type de rupture mixte qui a été observé : la fissure commence à se propager à partir de l'entrée du joint, le long de la fine zone eutectique, mais du fait de la discontinuité de celle-ci, les fissures bifurquent en direction du métal de base plutôt que de se propager dans la phase γ -nickel. Pendant ce temps, la fissure amorcée à l'autre extrémité du joint se propage en direction du métal de base. Ce cas précis de rupture démontre que dans les joints avec eutectiques, le gap n'a pas d'effet sur le mécanisme de rupture. C'est plutôt la continuité d'une zone eutectique qui va permettre la propagation ininterrompue des fissures amorcées dans le filet. Ceci nous amène naturellement à penser que des joints de différents gaps auraient le même mécanisme de rupture à condition qu'ils aient tous deux des phases eutectiques parfaitement continues.

4.3.3 Influence de l'épaisseur du métal de base

Pour mieux évaluer l'influence de l'épaisseur du métal de base, il aurait été préférable de comparer des joints avec les mêmes recouvrements. Ceci n'a pas réellement été fait parce qu'il a fallu se conformer à la façon conventionnelle de présenter les résultats de résistances des joints à recouvrement tel que suggéré dans de nombreuses publications, ce qui permet de justement de s'affranchir de l'effet de l'épaisseur du métal de base. Toutefois, les différences observées dans les résultats sont sans équivoque. Pour les mêmes caractéristiques, les joints avec le métal de base moins épais ont une résistance mécanique très légèrement supérieure à celle de joints faits à partir d'un métal de base plus épais. Il ne semble pas cependant avoir de d'effet de l'épaisseur du métal de base sur les mécanismes de rupture des joints brasés.

S'il faut considérer des joints avec exactement le même recouvrement, mais avec des épaisseurs de métal de base différentes, il est sans aucun doute que les joints ayant la plus petite épaisseur de métal de base seraient de loin les plus résistants, aussi bien en cisaillement qu'en traction. Ceci est lié au fait que lorsque les métaux de base ont de petites épaisseurs, le comportement des joints tend vers celui des métaux de base le joint dans son ensemble a alors la résistance mécanique qui tend sensiblement vers celle du métal de base. C'est explication semble aussi valable pour l'effet du gap.

4.3.4 Propriétés des monoblocs usinés en comparaison avec celle des joints brasés sans eutectiques

Les comparaisons effectuées entre les joints brasés et les monoblocs de métal de base ont permis de faire la lumière sur l'effet de la présence ou non d'un filet eutectique, l'influence du gap en absence de filet eutectique, l'influence de rayon du filet et les propriétés mécaniques des joints brasés par rapport à celles du métal de base pur dans un même état de sollicitation. Nous avons pu quantifier l'influence de la présence d'un filet dans les joints à recouvrement simple. En comparaison avec les propriétés du métal de base, la présence d'un filet contenant des phases eutectiques diminue de près de 40 % la résistance mécanique d'un joint à recouvrement simple et, d'environ 60 % sa ductilité.

L'influence du gap s'est avérée nulle. Ceci signifie qu'il n'y a pratiquement pas de différence de comportement mécanique entre deux joints à recouvrements identiques mais dont seuls les gaps sont différents et respectivement de 25 et 100 microns (0.001 et 0.004 pouce). L'étude de l'influence du rayon des filets sans eutectiques a permis de confirmer la notion de concentration locale de contrainte. Les résultats obtenus (figure 3.15) ont en effet démontré que les monoblocs avec un rayon de filet plus grand présentent une plus grande résistance mécanique en tension. Nous avons enfin noté que des monoblocs sur lesquels ont été ajoutés des filets contenant des phases eutectiques présentent la même résistance mécanique que des joints brasés de même recouvrement et sans eutectiques. Ceci nous amène à conclure que les joints brasés sans eutectiques (aussi bien dans le joint et dans les filets) auraient les mêmes propriétés mécaniques (résistance mécanique et ductilité) que celles des monoblocs de même recouvrement. Rien ne nous permet cependant d'envisager le même raisonnement si les joints étaient sollicités en tension pure (bout à bout pour les joints brasés)

4.3.5 Critère de rupture des joints brasés

Les analyses fractographiques effectuées ont permis de mettre en évidence plusieurs types de ruptures des joints brasés. Ces ruptures sont principalement liés à la présence ou non de phases eutectiques et au ratio entre le recouvrement du joint et l'épaisseur du métal de base. Il est évident que la présence de phases eutectiques dans les joints brasés conduit à un type de rupture fragile avec une quasi-absence de plasticité, ce qui n'est pas envisageable pour des applications structurelles. Le critère de rupture qui pourrait être défini ne concernerait alors que les joints sans eutectiques. On pourrait appliquer une restriction à ces joints par rapport à la résistance mécanique du métal de base. Cette dernière pourrait être de présenter au moins 90 % des propriétés du métal de base avec une importante plasticité lors de la rupture. Cette restriction correspondrait au critère de rupture qu'on pourrait autrement appeler critère d'acceptabilité des joints brasés. Dans ce cas, seuls les joints sans eutectiques présentant un ratio entre le recouvrement et l'épaisseur du métal de base supérieur à 2 seraient concernés. Il sera facile de prédire que ces joints auront un comportement ductile puisque la rupture du joint, bien qu'amorcée dans le filet, se fera dans le métal de base.

4.3.6 Propriétés en fatigue des joints brasés

Il faut souligner que jusqu'à présent nous n'avons pas parlé des propriétés en fatigue des joints brasés. Des essais de fatigue préliminaires ont toutefois été effectués dans le cadre de ce projet de Maîtrise. Ils ne sont évidemment pas suffisants pour permettre de tirer des conclusions significatives sur les propriétés en fatigue des joints brasés. On peut toutefois signaler que les résultats semblent prometteurs puisqu'il a été possible d'obtenir, dans certains cas, des durées de vie quasiment infinies en appliquant 50 % de la charge ultime de traction. Une campagne d'essais de fatigue plus large devrait être effectuée avec la même matrice d'essais que celle établie avec les essais de traction. Les charges à appliquer seront à définir, probablement voisines de 50 % de la charge ultime de traction de chaque catégorie d'échantillons. Le but est de mettre en évidence l'effet de chaque paramètre sur la résistance en fatigue des joints brasés mais aussi d'évaluer si les faiblesses des joints en tension sont les mêmes en fatigue.

4.3.7 Exploitation des modèles analytiques

Il a été décidé d'exploiter des modèles analytiques pour évaluer de façon plus réaliste les contraintes appliquées dans un joint à recouvrement. Nous avons exploité les modèles de Goland et Reissner et celui Volkersen parce qu'ils sont les plus mentionnés dans la littérature. Mais très curieusement, malgré une littérature très exhaustive, il n'a pas été possible de trouver de publications ayant appliqué ces modèles sur des essais réels. La question de la validité de ces modèles reste donc ouverte. Il faut savoir que ces modèles, bien que supposément plus réalistes, ont été développés à partir de nombreuses hypothèses très simplificatrices. Dans nos analyses, nous avons aussi fait des simplifications, notamment sur les valeurs des modules de Young et de cisaillement des matériaux testés.

L'ensemble de ces simplifications est très probablement à l'origine des résultats difficiles à interpréter que nous avons obtenus en exploitant ces modèles. Les seules informations intéressantes qu'il a été possible de tirer de l'exploitation de ces modèles sont les distributions des contraintes à travers les joints. Elles sont conformes aux prédictions et cohérents avec les mécanismes de rupture. En effet, ces modèles montrent clairement que les contraintes sont maximales aux bords des joints, ceci est cohérent avec le fait que les fissures soient toujours initiées aux bords des joints, à la surface des filets.

CONCLUSION

Au terme des essais effectués sur les joints d'Inconel 625 (AMS 5599) brasés avec l'alliage AWS BNi-2, et après analyse et interprétation complète des résultats, nous en sommes en mesure de tirer les conclusions qui suivent :

Tout d'abord, il est important de signaler que les joints brasés peuvent avoir de bonnes propriétés mécaniques. C'est un aspect positif qui était jusque là mal connu et qui mérite d'être souligné, soit la possibilité pour un joint brasé, de rompre dans le métal de base tel un joint soudé sans défauts. En effet, pour l'ensemble des joints brasés testés, il a été clairement constaté que les joints brasés libres d'eutectiques présentent une excellente résistance mécanique avec des ruptures dans le métal de base.

Pour des valeurs identiques de recouvrement et de gap, les joints brasés sans eutectiques se sont avérés nettement plus résistants que ceux ayant des phases eutectiques. Dans ces cas, des faibles gaps améliorent de 25% la résistance mécanique uniquement pour des recouvrements longs. Pour des recouvrements faibles, cet effet semble négligeable. L'amélioration de la résistance mécanique est par contre plus grande, soit de 50 % environ avec des gaps plus grands, particulièrement pour des longs recouvrements. Cet écart s'explique par le fait que dans les joints avec des petits gaps, la zone eutectique s'est avérée non parfaitement continue, contrairement aux joints avec des gaps plus grands où la zone eutectique parfaitement continue a grandement facilité la propagation des fissures. Dans tous ces cas, les fissures étaient systématiquement amorcées aux filets, une partie du joint qui contient toujours des phases eutectiques.

La condition défavorable est, en toute évidence, la présence de phases eutectiques dans les joints brasés. Celle-ci a un effet particulièrement néfaste sur la résistance mécanique des joints brasés. La présence de phases eutectiques (aussi bien dans le joint qu'au niveau des filets) s'est avérée responsable de la diminution de la résistance mécanique et de la ductilité des joints brasés.

Cette zone eutectique facilite l'amorçage des fissures aux filets et leur propagation à travers le joint brasé. Le phénomène a été observé pour tous les recouvrements et particulièrement pour les joints avec un gap de 100 microns (0.004 pouce) qui présentent une zone eutectique parfaitement continue. Il semble ainsi que ce soit précisément la présence d'une zone eutectique parfaitement continue dans les joints brasés qui soit néfaste pour la résistance mécanique de ces derniers. L'influence de la seule présence des filets avec eutectiques contribue à une perte de 40 % de la résistance mécanique et de 60 % de la ductilité par rapport à un monobloc de métal de base pur. S'il était possible de produire des joints à recouvrement sans eutectiques aussi bien dans les joints qu'au niveau des filets, nous aurions la certitude qu'ils présenteraient des propriétés mécaniques similaires à celles des monobloc purs. Par contre, nous ne disposons pas d'éléments nous permettant d'envisager un même raisonnement si les joints brasés étaient sollicités en tension pure. Des essais complémentaires devraient permettre de faire la lumière sur cet aspect.

Les mécanismes de rupture des joints brasés varient considérablement avec le recouvrement, mais aussi et surtout avec la présence ou non de phases eutectiques. Dans le cas des joints avec eutectiques, les fissures sont systématiquement amorcées aux filets, du fait de la forte abondance de phases eutectiques. Elles se propagent ensuite aisément dans le joint, dans la partie centrale formée par une zone eutectique parfaitement continue. Les faciès de rupture alors obtenus sont tous semblables et présentent de nombreux plans de clivage avec une absence très caractéristique de plasticité. Lorsque la zone eutectique n'est pas parfaitement continue, cas des joints avec un petit gap, les fissures se propagent en alternance dans la zone eutectique, ou parallèlement au joint dans le métal de base, à l'extrémité de la zone de diffusion, en l'absence de phases eutectiques.

Dans le cas des joints sans eutectiques, on note deux types de rupture bien que dans les deux cas, les fissures soient également amorcées à la surface du filet. Ces deux types de rupture sont indépendants de l'épaisseur du joint brasé et de l'épaisseur du métal de base. Dans les joints très courts, les fissures amorcées dans le filet se propagent dans le métal de base, parallèlement au joint et à l'extrémité de la zone de diffusion. Pour les autres joints, une fois la fissure amorcée dans le filet, plutôt que de propager dans la phase γ -nickel, elle bifurque perpendiculairement au joint en direction du métal de base. Les faciès de rupture comportent d'importantes zones de plasticité avec une forte présence de cupules, lorsque observés à fort grossissement.

La zone γ -nickel du joint semble par conséquent très ductile et tenace puisqu'elle ne semble pas propice à la propagation des fissures. La fissure n'a alors pas le choix que d'aller dans le métal de base.

Pour des microstructures comparables, les joints avec une épaisseur de métal de base de 1.195 mm (0,047 pouce) présentent une résistance mécanique légèrement supérieure à celle des joints avec une épaisseur plus grande, l'explication est moins évidente, cela est peut-être attribué à l'effet de triaxialité qui est malheureusement difficile à prendre en considération dans ces cas de figure.

RECOMMANDATIONS

L'analyse des tests effectués a démontré l'effet néfaste des phases eutectiques sur la résistance mécanique des joints brasés. Puisque la présence des phases eutectiques est principalement liée au gap des joints, nous recommandons fortement de mettre au point une méthode de contrôle de la valeur du gap des joints brasés en fonction des temps et/ou température de brasage fixés. Idéalement, il serait souhaitable de fixer une valeur seuil de gap à utiliser pour une application donnée et fixer une tolérance pour le temps de brasage afin de s'assurer l'absence totale des phases eutectiques dans les joints brasés tout en évitant d'altérer les propriétés intrinsèques des matériaux de base.

Nous avons constaté que les fissures s'étaient amorcées systématiquement au niveau des filets à cause de la présence de phases eutectiques. Il serait donc opportun de trouver un moyen de contrôler la microstructure du filet, par exemple en déterminant une quantité optimale de métal d'apport à appliquer dans les joints et éviter une accumulation excessive de pâte à braser aux filets. Il serait également pertinent de quantifier l'impact de la taille du filet sur l'amorçage des fissures et sur la résistance mécanique de façon générale des joints brasés.

Une étude approfondie de l'effet de l'épaisseur du métal de base pour une valeur donnée du recouvrement pourrait être menée, principalement pour les recouvrements intermédiaires qui sont de loin les plus utilisés en production. Dans ce même registre, puisque l'épaisseur de la zone de diffusion augmente avec le temps de brasage, il serait opportun d'étudier l'effet de la présence de cette zone de diffusion sur les propriétés mécaniques des joints brasés.

Il a été remarqué que pour des recouvrements longs, la résistance mécanique des joints devenait supérieure à celle du métal de base, en particulier dans les joints de 25 microns (0.001 pouce) de gap et sans eutectiques. Des études devraient être menées pour comprendre le mécanisme par lequel cela se produit en tentant si possible de prendre en considération l'effet de la triaxialité.

Des investigations devraient également être menées pour comprendre les processus de propagation des fissures dans les joints brasés lorsque les phases eutectiques sont discontinues. Nous saurions alors s'il s'agit d'un réamorçage ou de coalescence de fissures. Dans la même perspective, il serait opportun de mettre au point un moyen d'enregistrement du processus d'endommagement des joints brasés pendant les tests mécaniques afin de déterminer précisément la force appliquée sur ces joints au moment de l'amorçage des fissures. Il semble en effet logique de penser qu'une fois la fissure amorcée, le comportement du joint, particulièrement lorsqu'il y a un important pivotement devient très difficile à comprendre en raison de la complexité des contraintes alors mises en jeu.

Une modélisation du comportement des joints à recouvrement par éléments finis est fortement recommandée pour mieux comprendre la nature des contraintes en présence lors d'une sollicitation en tension-cisaillement dans un joint brasé. De la même façon, il serait opportun d'obtenir le comportement des joints brasés en tension et en cisaillement purs. Il serait donc intéressant de pouvoir fabriquer des joints pouvant permettre d'obtenir de telles données. Pour terminer, il faudrait parvenir à trouver une méthode qui permettrait d'établir un critère de rupture des joints à recouvrement, et prédire leur comportement mécanique en fonction de la géométrie et des microstructures des joints.

Pour d'éventuelles applications comme des assemblages de structures, il est fortement recommandé d'utiliser des joints complètement libres d'eutectiques. Ceci induit la réduction de la valeur du gap et l'augmentation du temps et/ou de la température de brasage.

En fin, il est important de signaler qu'actuellement, les joints brasés sont utilisés pour des applications n'ayant pas des sollicitations mécaniques élevées. Ces limitations sont probablement dues à un manque de données fiables sur les résistances mécaniques des joints brasés. Il serait opportun de comparer les propriétés des joints soudés qui sont largement utilisés dans les assemblages structuraux avec celles des joints brasés. Et pour enlever tout doute existant sur la valeur réelle de la résistance mécanique des joints brasés à recouvrement, il est nécessaire de fabriquer une pièce monobloc de métal de base avec la

configuration de recouvrement. Celle-ci devrait alors être testée dans les mêmes conditions que les joints brasés. Même si la méthode utilisée (AWS C3.2) de calcul de la résistance mécanique sur les joints à recouvrement semble approximative et simple, la comparaison entre le monobloc et les joints brasés devrait permettre de statuer sur le potentiel réel des joints brasés. Ceci permettrait aussi de connaître les restrictions qui pourraient être appliquées aux joints brasés en vue d'éventuelles applications structurelles.

ANNEXE I

COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Tableau A Composition chimique du métal d'apport BNi-2

Composition BNi-2(S) %					Intervalle de fusion °C (°F)	
Cr	B	Si	Fe	C	Solidus	Liquidus
6,0-8,0	2,75-3,50	4,0-5,0	2,5-3,5	0,06	970 (1780)	1000 (1830)

Tableau B Composition chimique de l'inconel 625 (AMS 5599)

Composition chimique de l'inconel 625 %								
Al	C	Cr	Co	Fe	Mo	Nb+Ta	Ti	Ni
0.04	0.10	21.00	1.00	5.00	9.00	3.50	0.04	62.00

ANNEXE II

MATRICE DES ESSAIS

Tableau C Matrice d'expériences récapitulant l'ensemble des paramètres physiques et microstructuraux utilisés

Gap du joint (in)	Épaisseur du métal de base (in)	Ratio du recouvrement/épaisseur métal de base	Longueur de recouvrement (in)	Microstructures	Référence échantillon #
0.001	0.049	0.25	0.012	E	12-1-E-A
0.001	0.049	0.75	0.037	E	37-1-E-A
0.001	0.049	2	0.098	E	98-1-E-A
0.001	0.049	10	0.49	E	490-1-E-A
0.001	0.049	0.25	0.012	W	12-1-W-A
0.001	0.049	0.75	0.037	W	37-1-W-A
0.001	0.049	2	0.098	W	98-1-W-A
0.001	0.049	10	0.49	W	490-1-W-A
0.001	0.092	0.25	0.023	E	23-1-E-A
0.001	0.092	0.75	0.069	E	69-1-E-A
0.001	0.092	2	0.184	E	184-1-E-A
0.001	0.092	10	0.92	E	920-1-E-B
0.001	0.092	0.25	0.023	W	23-1-W-A
0.001	0.092	0.75	0.069	W	69-1-W-A
0.001	0.092	2	0.184	W	184-1-W-A
0.001	0.092	10	0.92	W	920-1-W-A
0.004	0.049	0.25	0.012	E	12-4-E-A
0.004	0.049	0.75	0.037	E	37-4-E-A
0.004	0.049	2	0.098	E	98-4-E-A
0.004	0.049	10	0.49	E	490-4-E-A
0.004	0.049	0.25	0.012	W	12-4-W-A
0.004	0.049	0.75	0.037	W	37-4-W-A
0.004	0.049	2	0.098	W	98-4-W-A
0.004	0.049	10	0.49	W	490-4-W-A
0.004	0.092	0.25	0.023	E	23-4-E-A
0.004	0.092	0.75	0.069	E	69-4-E-A
0.004	0.092	2	0.184	E	184-4-E-A
0.004	0.092	10	0.92	E	920-4-E-A
0.004	0.092	0.25	0.023	W	23-4-W-A
0.004	0.092	0.75	0.069	W	69-4-W-A
0.004	0.092	2	0.184	W	184-4-W-A
0.004	0.092	10	0.92	W	920-4-W-A

ANNEXE III

DÉTAILS DES RECETTES DE BRASAGE UTILISÉS

```
.....
*                               Pratt & Whitney Canada                               *
*                               Heat Treat Process Control System                       *
*                               Recipe & Parts Report                                   *
*                               Sun Jul 27 15:24:21 2008                               *
*                               .....
Recipe No: BRAZE-ARG-AMS4777-1925-150
Notes:    1000 mica, Nov-07
Op. No:
Batch No: 635487
Parent Dept: MC
Badge Id: 18361
Part No:  TRST PCS
Part Qty: 48
Facility: VAC-18
Load TCS: 1

00 LEVEL max. -10.0000 MIC
01 LEAK TEST for 15 mins. max. of 30 Mics/hr.
02 PARTIAL PRESSURE ARGON at 1000 Mics above 100 deg.F
03 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
04 SOAK at 1200 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:15 hh:mm
05 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
06 SOAK at 1700 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:10 hh:mm
07 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
08 SOAK at 1925 deg.F +/- 25/25 deg.F for 02:30 hh:mm
09 STATIC COOL ARGON to 1000 deg.F
10 FORCED COOL ARGON to 150 deg.F
11 End Of Recipe
```

```
.....
*                               Pratt & Whitney Canada                               *
*                               Heat Treat Process Control System                       *
*                               Recipe & Parts Report                                   *
*                               Mon Jul 28 02:00:59 2008                               *
*                               .....
Recipe No: BRAZE-ARG-AMS4777-1925-10
Notes:
Op. No:    005
Batch No:  635487
Parent Dept: MED
Badge Id:  37159
Part No:   TEST PIECES
Part Qty:  48
Facility:  VAC-18
Load TCS:  3

00 LEVEL max. 0.5000 MIC
01 LEAK TEST for 15 mins. max. of 30 Mics/hr.
02 PARTIAL PRESSURE ARGON at 1000 Mics above 100 deg.F
03 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
04 SOAK at 1200 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:15 hh:mm
05 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
06 SOAK at 1700 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:10 hh:mm
07 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
08 SOAK at 1925 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:10 hh:mm
09 STATIC COOL ARGON to 1000 deg.F
10 FORCED COOL ARGON to 150 deg.F
11 End Of Recipe
```

```

.....
*                               Pratt & Whitney Canada                               *
*                               Heat Treat Process Control System                       *
*                               Recipe & Parts Report                                   *
*                               Sun Jul 27 09:47:53 2008                               *
.....

```

Recipe No: BRAZE-ARG-AMS4777-1925-30

Notes:

Op. No: 00
 Batch No: 635487
 Parent Dept:MC
 Badge Id: 18361
 Part No: TEST FCS
 Part Qty: 80
 Facility: VAC-18
 Load TCS: 3

```

00 LEVEL max. -10.0000 MIC
01 LEAK TEST for 15 mins. max. of 30 Mics/hr.
02 PARTIAL PRESSURE ARGON at 1000 Mics above 100 deg.F
03 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
04 SOAK at 1200 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:15 hh:mm
05 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
06 SOAK at 1700 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:10 hh:mm
07 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
08 SOAK at 1925 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:30 hh:mm
09 STATIC COOL ARGON to 1000 deg.F
10 FORCED COOL ARGON to 150 deg.F
11 End Of Recipe

```

```

.....
*                               Pratt & Whitney Canada                               *
*                               Heat Treat Process Control System                       *
*                               Recipe & Parts Report                                   *
*                               Sun Jul 27 22:13:43 2008                               *
.....

```

Recipe No: BRAZE-ARG-AMS4777-1925-01

Notes:

Op. No: 005
 Batch No: 635487
 Parent Dept:MC
 Badge Id: 25172
 Part No: TEST LAPJOINTS
 Part Qty: 80
 Facility: VAC-18
 Load TCS: 3

```

00 LEVEL max. -0.5000 MIC
01 LEAK TEST for 15 mins. max. of 30 Mics/hr.
02 PARTIAL PRESSURE ARGON at 1000 Mics above 100 deg.F
03 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
04 SOAK at 1200 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:15 hh:mm
05 RAMP at 30.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
06 SOAK at 1700 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:10 hh:mm
07 RAMP at 70.0 deg.F/min +/-15.0 deg.F/min
08 SOAK at 1925 deg.F +/- 25/25 deg.F for 00:01 hh:mm
09 FORCED COOL ARGON to 150 deg.F
10 End Of Recipe

```

ANNEXE IV

DISTRIBUTION STATISTIQUE DES MESURES DE GAPS ET RECOUVREMENTS DES JOINTS BRASÉS UTILISÉS

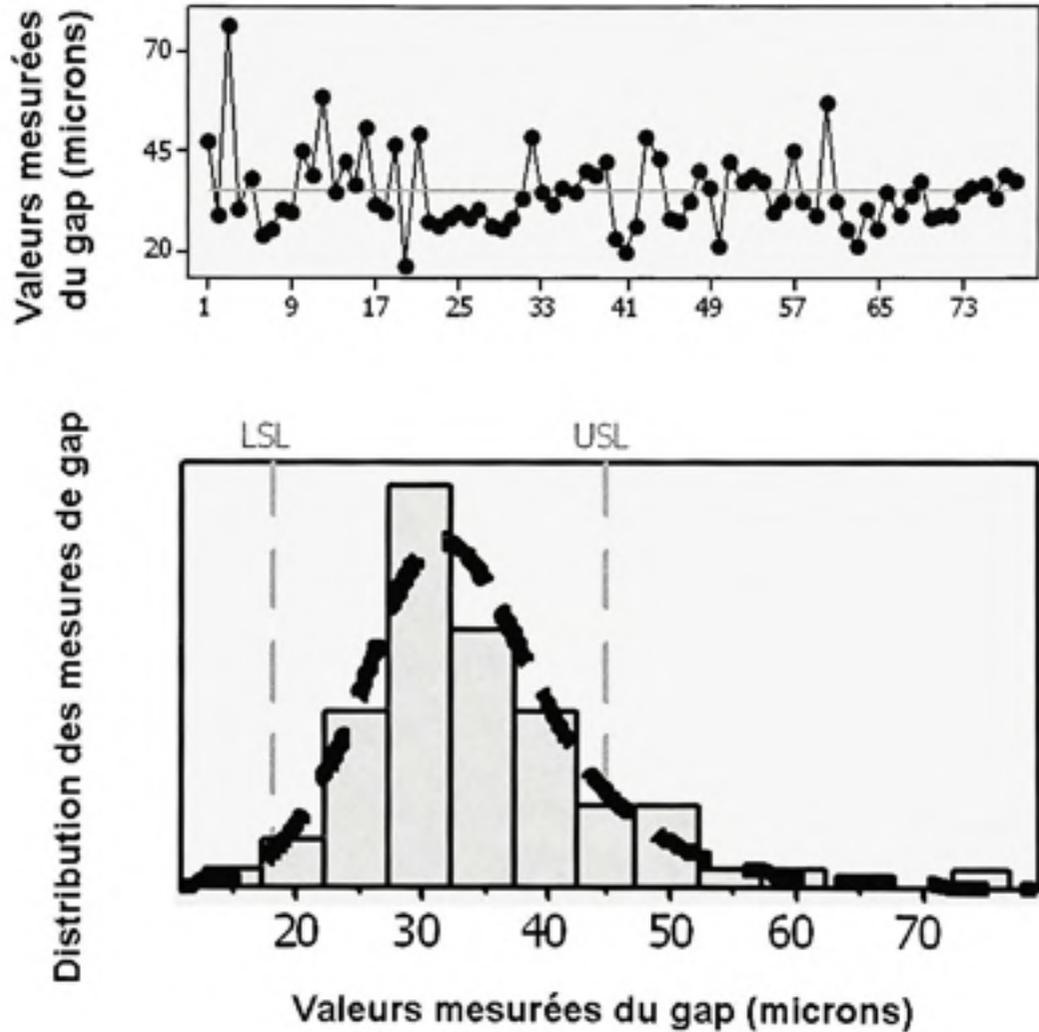


Figure-A IV-4.1 Distribution des valeurs de gap dans les joints brasés de 25 microns.

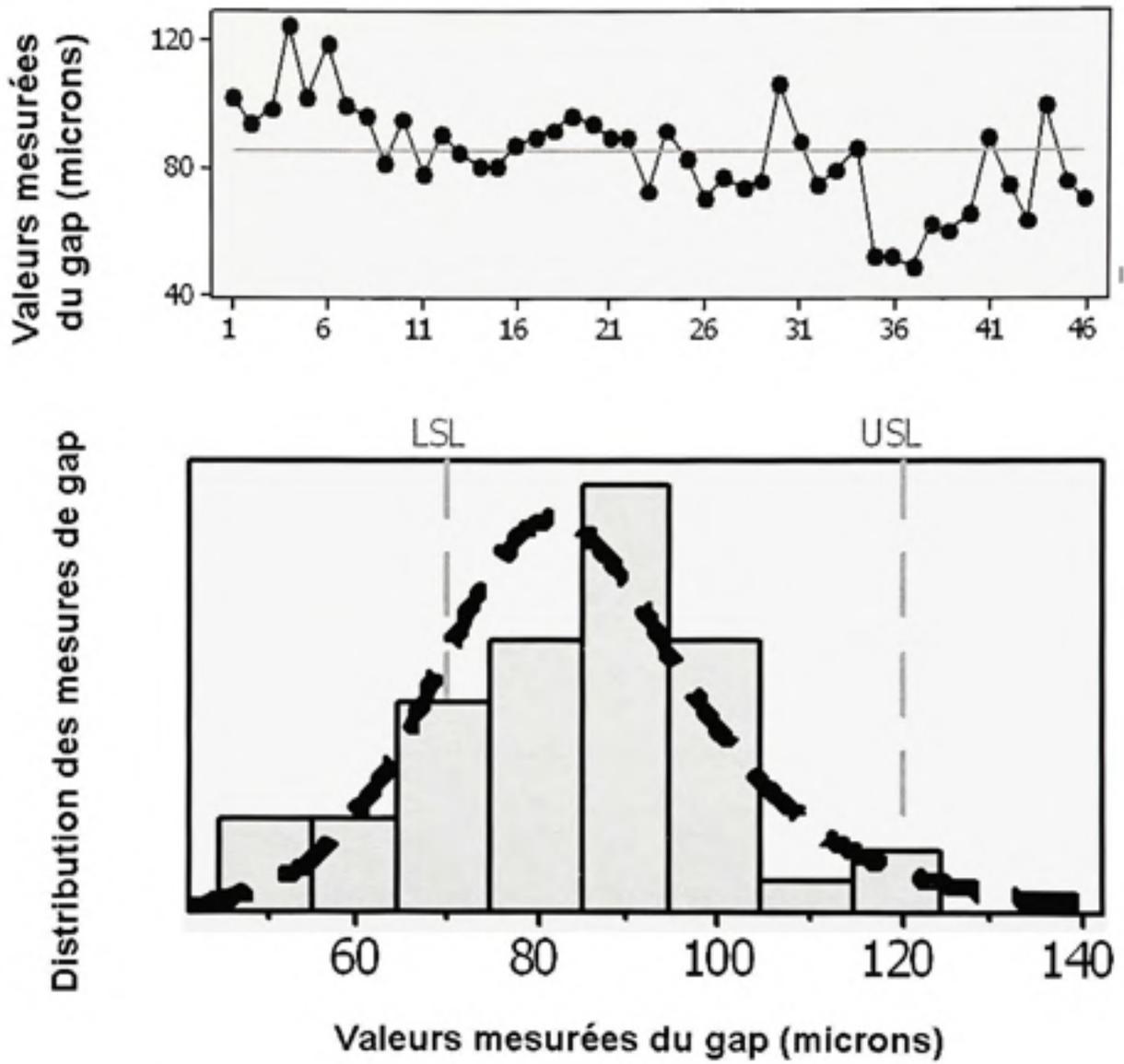


Figure-A IV-2 Distribution des valeurs de gap dans les joints brasés de 100 microns.

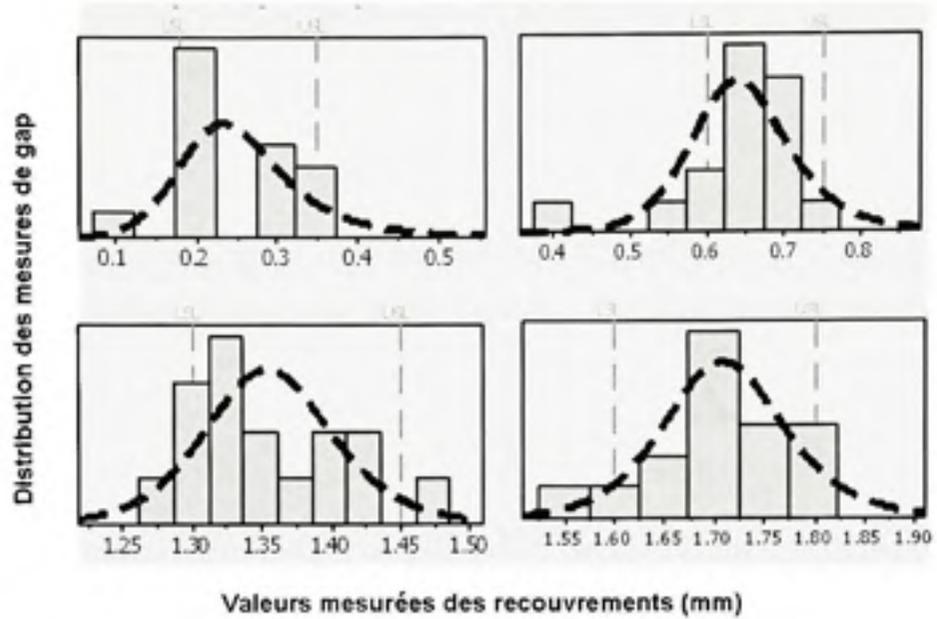


Figure-A IV-3 Distribution des recouvrements des quatre premières séries de joints testés.

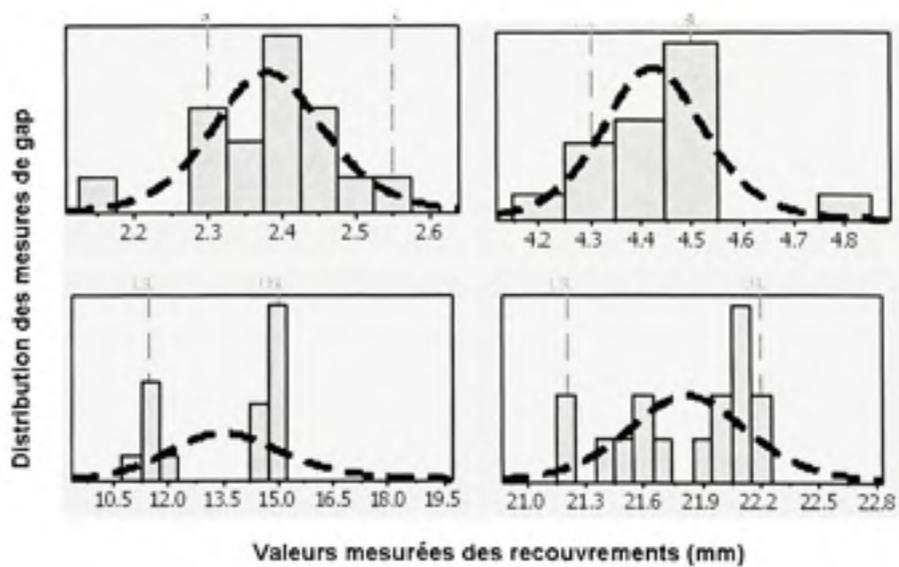


Figure-A IV-4 Distribution des recouvrements des quatre dernières séries de joints testés.

ANNEXE V

PROCÉDURE DE FABRICATION DES MONOBLOCS DE MÉTAL DE BASE

Afin de comparer les propriétés des joints brasés à celles du métal de base, des monoblocs d'Inconel 625 ont été découpés à recouvrement simple par WEDM, conformément à la norme ASTM E08. Les paramètres de contrôle pour ces monoblocs sont représentés sur la figure A V-1 ci-dessous. Ces paramètres sont : le recouvrement, le gap, le rayon de filet, la présence ou non d'un filet contenant des phases eutectiques au contact du filet, et l'épaisseur du métal de base. Pour se situer proche des données de production et pour limiter le nombre d'échantillons à tester, seuls le recouvrement et l'épaisseur de métal de base ont été maintenus fixes, respectivement 4.678 et 2.285 mm (0.184 et 0.090 pouces).

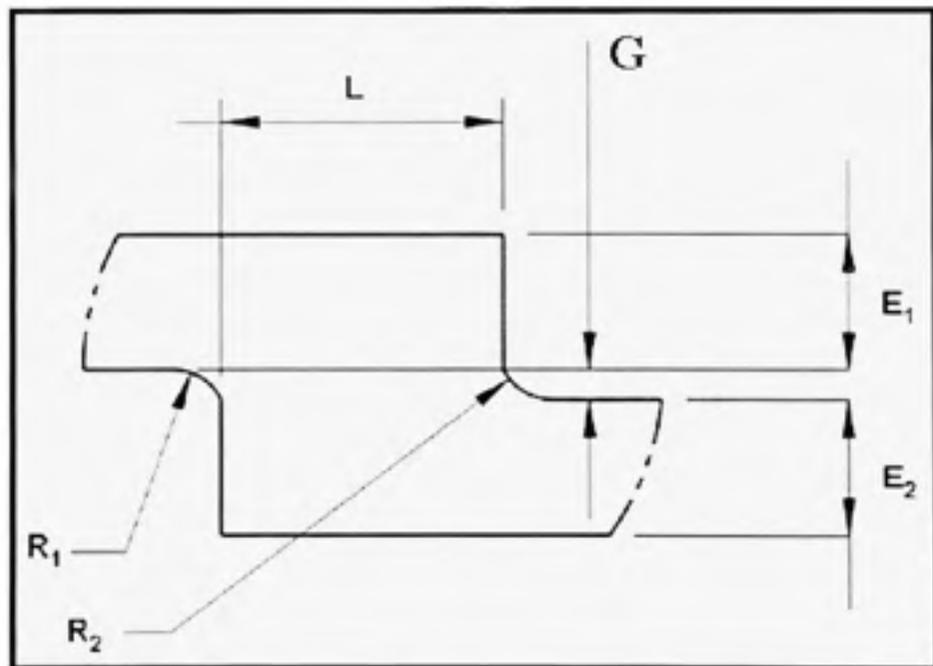


Figure-A V-1 Paramètres de contrôle pour la découpe des monoblocs par WEDM

Après découpe par WEDM, une fine quantité de pâte à braser a été déposée au contact des filets de certains monoblocs. L'ensemble a été brasé pendant une dizaine de minutes dans les mêmes conditions que les joints brasés. Ainsi, certains monoblocs étaient constitués de filets contenant des phases eutectiques, ce qui a permis de quantifier l'influence de la présence ou non des filets avec eutectiques sur les propriétés mécaniques des joints à recouvrement simple, en comparaison avec celles des joints brasées. L'ensemble des tests effectués avec les monoblocs est présentée dans le tableau ci-dessous. La matrice d'essai définie est représentée ci-dessous.

Table D Matrice d'essais définie pour les tests mécaniques des monoblocs d'Inconel 625, les joints correspondants aux lignes en italique n'ont pas été testés

Gap du joint, microns (pouce)	Rayon des filets sans eutectiques, microns (pouce)	Présence (AF) ou non (SF) d'un filet contenant des phases eutectiques	Référence échantillon
25 (0.001)	250 (0.010)	AF	G1R10-AF
25 (0.001)	250 (0.010)	SF	G1R10-SF
100 (0.004)	250 (0.0100)	AF	G4R10-AF
100 (0.004)	250 (0.010)	SF	G4R10-SF
<i>25 (0.001)</i>	<i>890 (0.035)</i>	<i>AF</i>	<i>G1R35-AF</i>
25 (0.001)	890 (0.035)	SF	G1R35-SF
<i>25 (0.004)</i>	<i>890 (0.035)</i>	<i>AF</i>	<i>G4R35-AF</i>
100 (0.004)	890 (0.035)	SF	G4R35-SF

ANNEXE VI

QUELQUES RÉSULTATS DES MODÈLES ANALYTIQUES EXPLOITÉS

Dans cette rubrique, sont présentées quelques courbes de distribution des contraintes de tension et cisaillement dans certains joints brasés testés, selon le modèle analytique de Goland & Reissner. Les échantillons présentés dans cette annexe ont été choisis de façon arbitraire parmi l'ensemble des échantillons testés. Les quatre premiers graphiques correspondent aux joints d'un recouvrement de 4.67 mm (0.184 pouce). On s'aperçoit pour ces quatre graphiques que les profils des courbes sont les mêmes, indépendamment du gap et des microstructures. En effet, les contraintes sont constantes et uniformes au centre des joints puis augmentent brutalement lorsqu'on s'approche des bords des joints pour atteindre des valeurs extrêmement élevées. Cependant, les contraintes aux bords des joints apparaissent d'autant plus élevées que le gap est petit. Et il ne semble pas y avoir de différence entre deux joints avec et sans eutectiques comme le témoignent les figures A-VI-3 et A-VI-4.

Sur les figures A-VI- 5, A-VI-6 et A-VI-7 on s'aperçoit que les distributions des contraintes ont des profils très différents de celles présentées sur les quatre premières figures. Ceci semble indiquer que, plus le recouvrement du joint est grand, plus la distribution des contraintes au centre est constante et uniforme. Et à l'inverse, plus le joint est court, moins la distribution de ses contraintes est uniforme sur toute l'étendue du recouvrement. Ceci semble se confirmer avec la figure A-VI-8 où l'on voit un joint long de recouvrement égal à 23.37 mm (0.920 pouce) avec une distribution très uniforme et constante sur une grande partie de l'étendue du recouvrement.

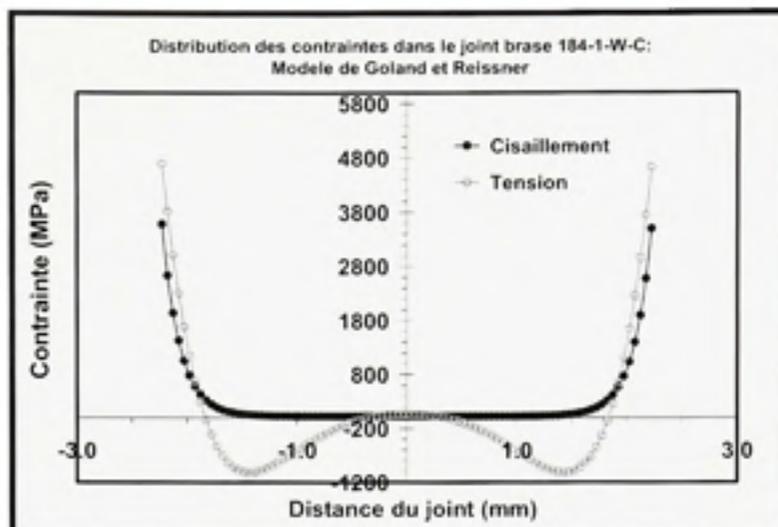


Figure-A VI-1 Distributions des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 184-1-W-C selon le modèle de Goland & Reissner.

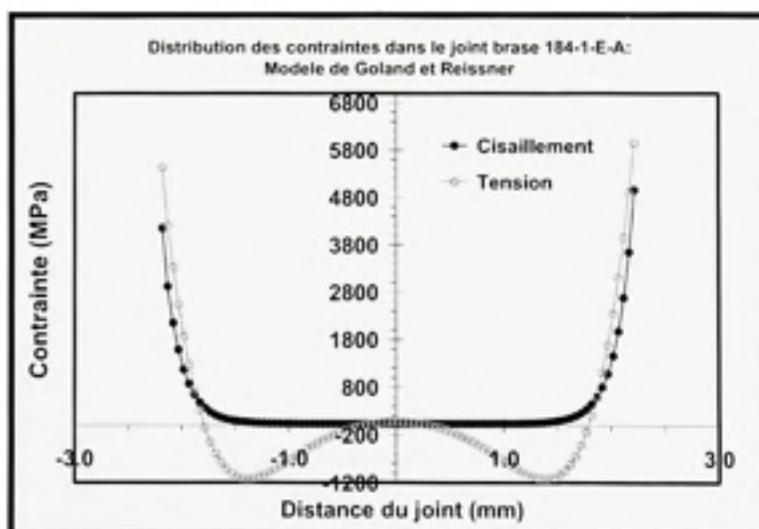


Figure-A VI-2 Distributions des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 184-1-E-A selon le modèle de Goland & Reissner.

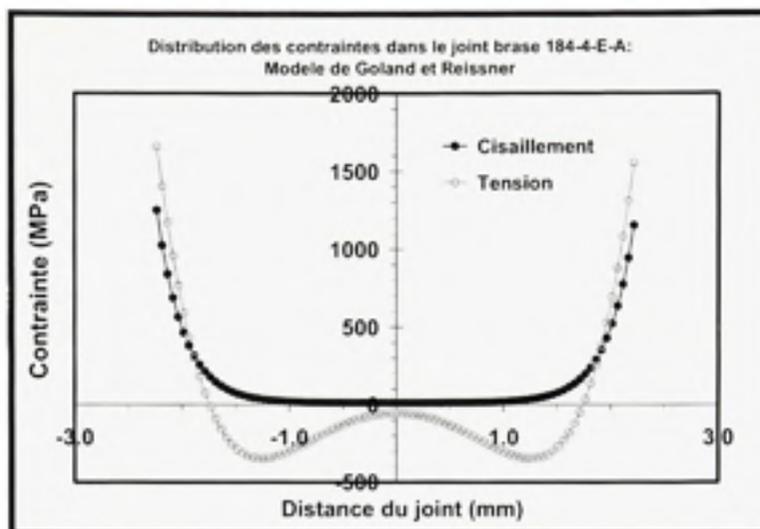


Figure-A VI-3 Distribution des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 184-4-E-A selon le modèle de Goland & Reissner.

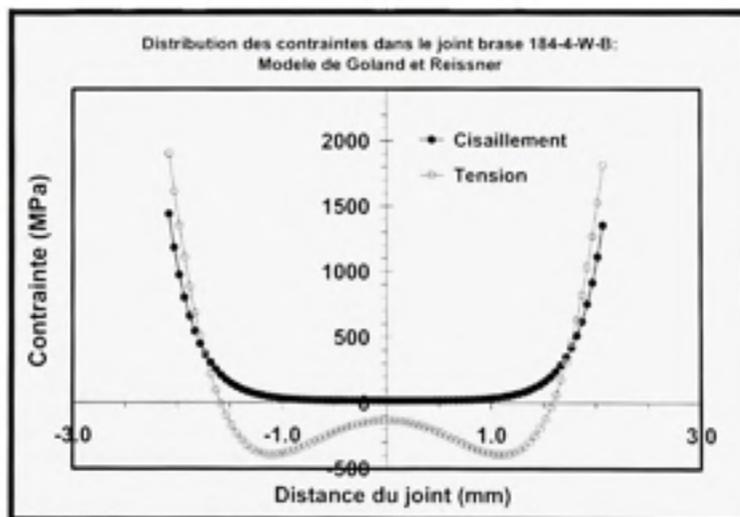


Figure-A VI-4 Distributions des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 184-4-W-B selon le modèle de Goland & Reissner.

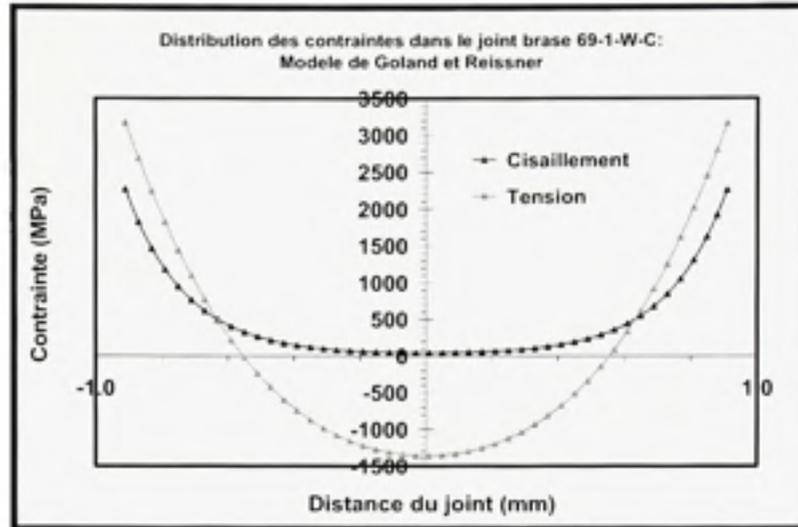


Figure-A VI-5 Distribution des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 69-1-W-C selon le modèle de Goland & Reissner.

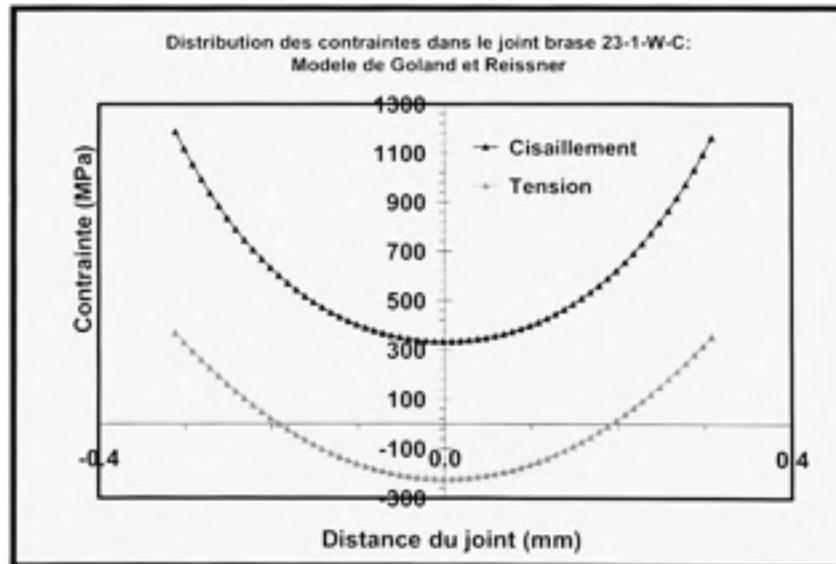


Figure-A VI-6 Distribution des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 23-1-W-C selon le modèle de Goland & Reissner.

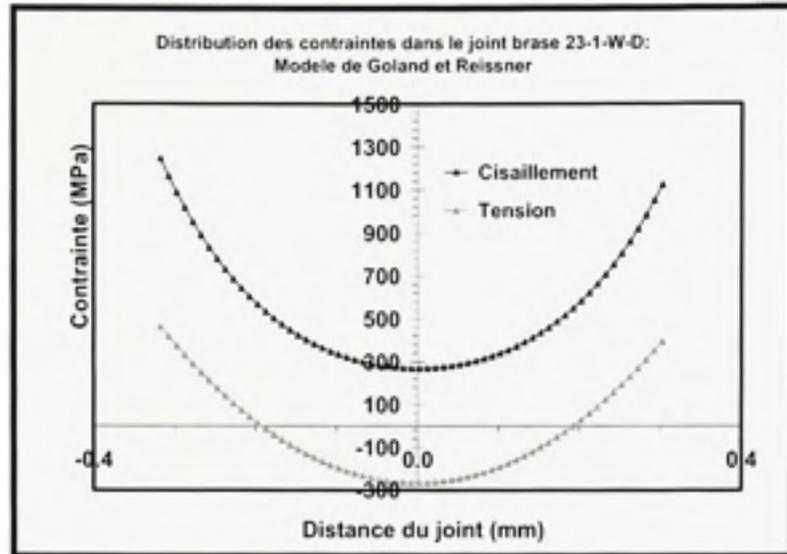


Figure-A VI-7 Distribution des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 23-1-W-D selon le modèle de Goland & Reissner.

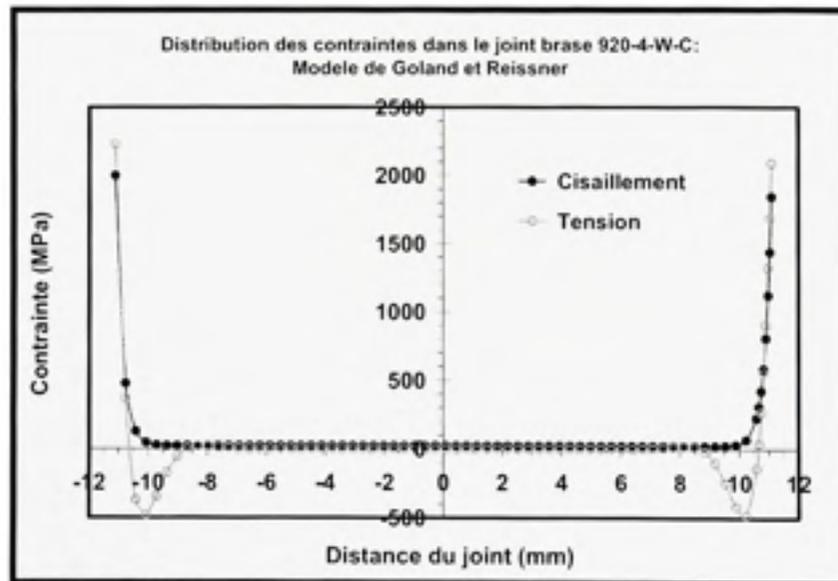


Figure-A VI-8 Distribution des contraintes de tension et cisaillement dans l'échantillon 920-4W-C selon le modèle de Goland & Reissner.

ANNEXE VII

RÉCAPITULATIF DES MODES DE RUPTURE DES JOINTS BRASÉS D'INCONEL 625 EN TENSION-COMPRESSION

Tableau E Récapitulatif des différents types de rupture observés dans les joints brasés après les tests mécaniques effectués

Référence test-pièce #	Mode de rupture			Remarques
	Zones d'initiation	Zones de propagation	Zone de rupture finale	
12-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
37-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
98-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
490-1-E	Fûlets	Joint + Métal de base	Métal de base	Propagation partielle dans l'eutectique et rupture du côté opposé du joint, dans le métal de base
12-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
37-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
98-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
490-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
23-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
69-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
184-1-E	Fûlets	Joint	Joint	Rupture le long de l'eutectique
920-1-E	Fûlets	Joint + Métal de base	Métal de base	Propagation partielle dans l'eutectique et rupture du côté opposé du joint, dans le métal de base
23-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
69-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
184-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base
920-1-W	Fûlets	Métal de base	Métal de base	Rupture dans le métal de base

ANNEXE VIII

COURBES DE CHARGE EN FONCTION DU DEPLACEMENT AXIAL DES JOINTS BRASÉS

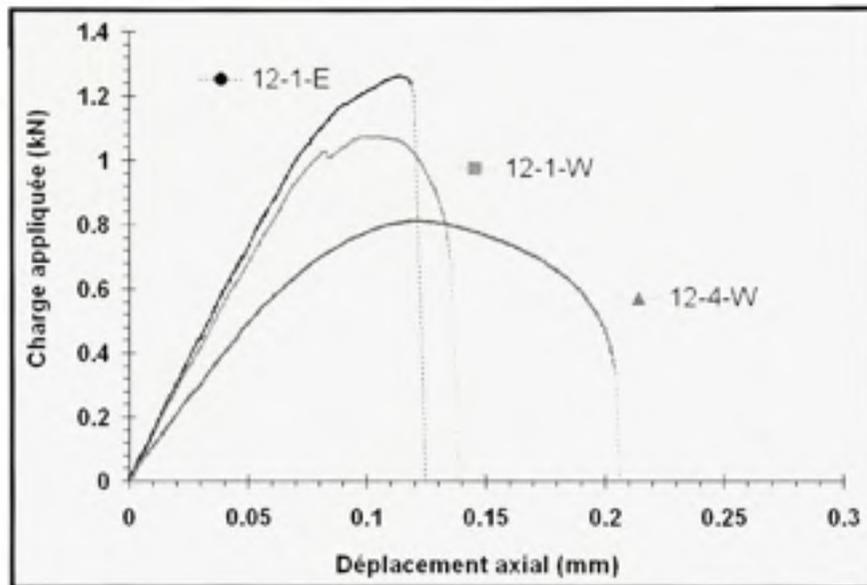


Figure-A VIII-1 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 0,30 mm (0,012 pouce).

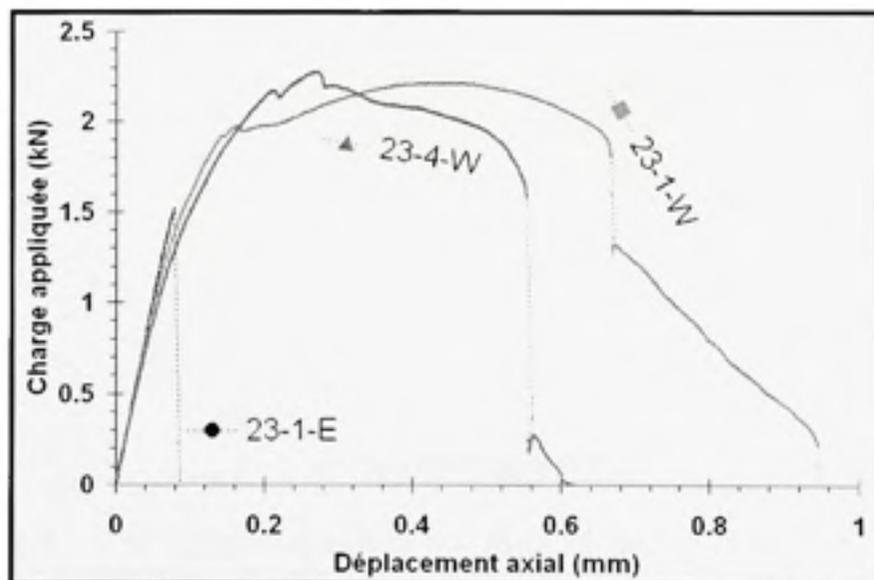


Figure-A VIII-2 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 0,58 mm (0,023 pouce).

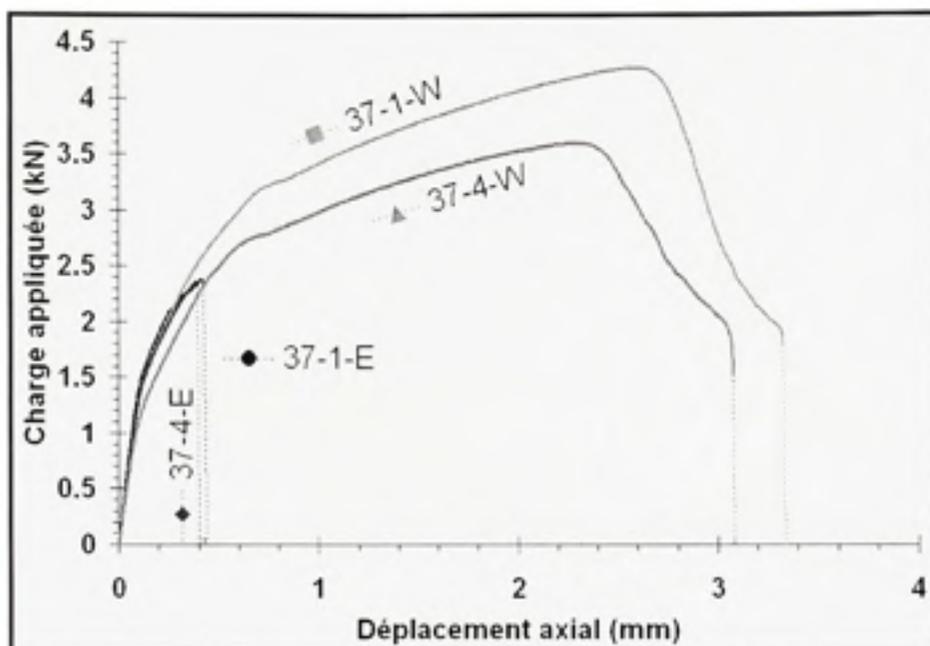


Figure-A VIII-3 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 0.94 mm (0,037 pouce).

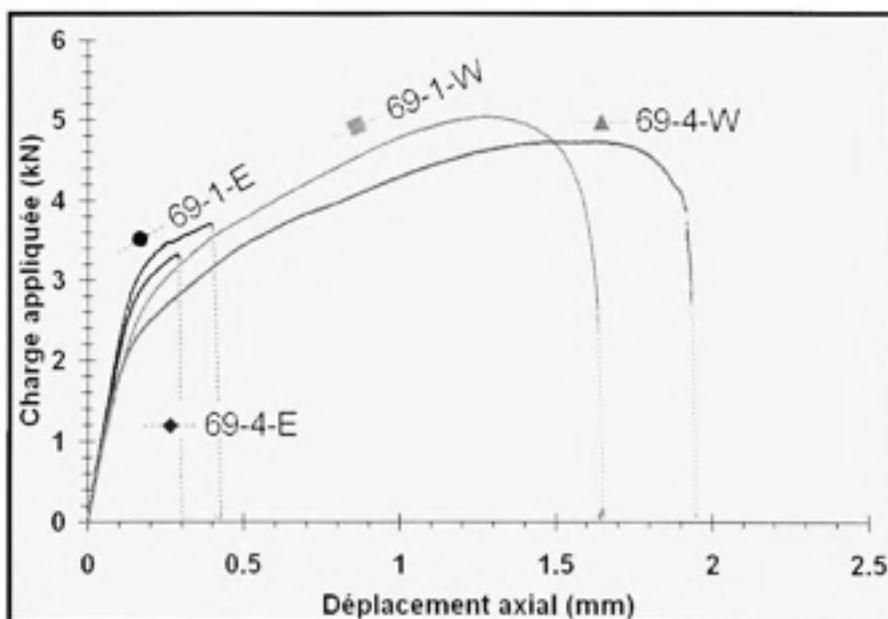


Figure-A VIII-4 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 1.75 mm (0,069 pouce).

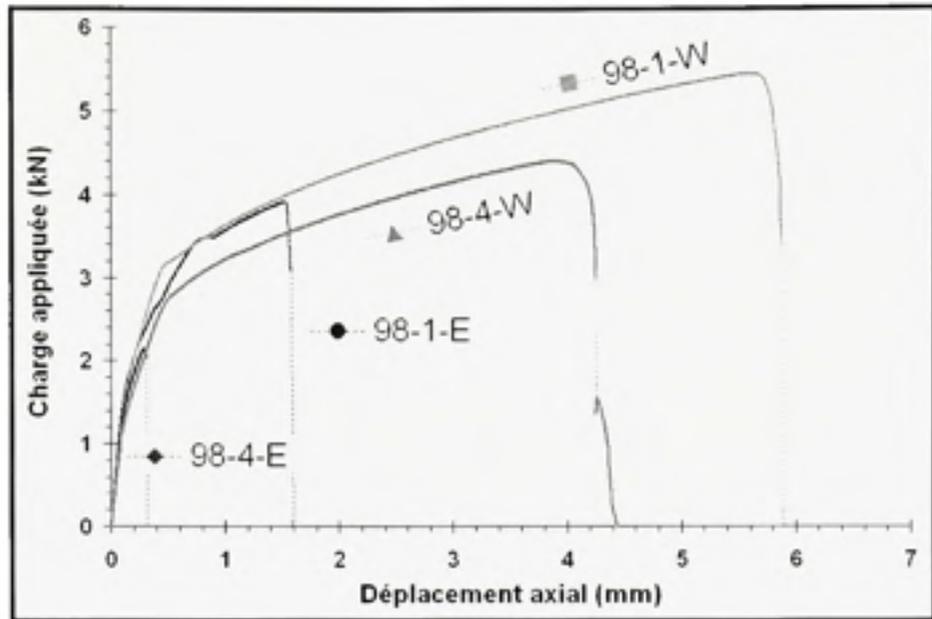


Figure-A VIII-5 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 2.50 mm (0,098 pouce).

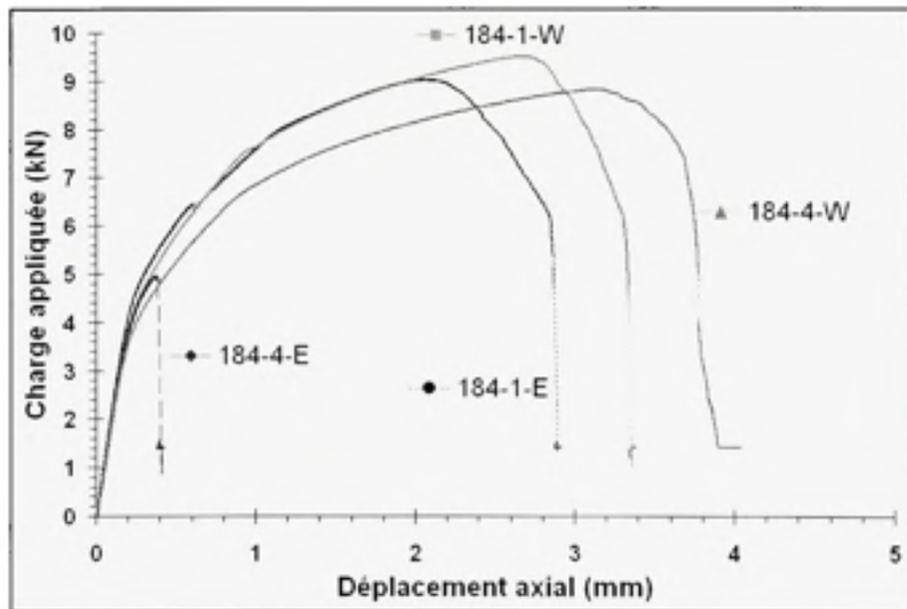


Figure-A VIII-6 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 4.64 mm (0,184 pouce).

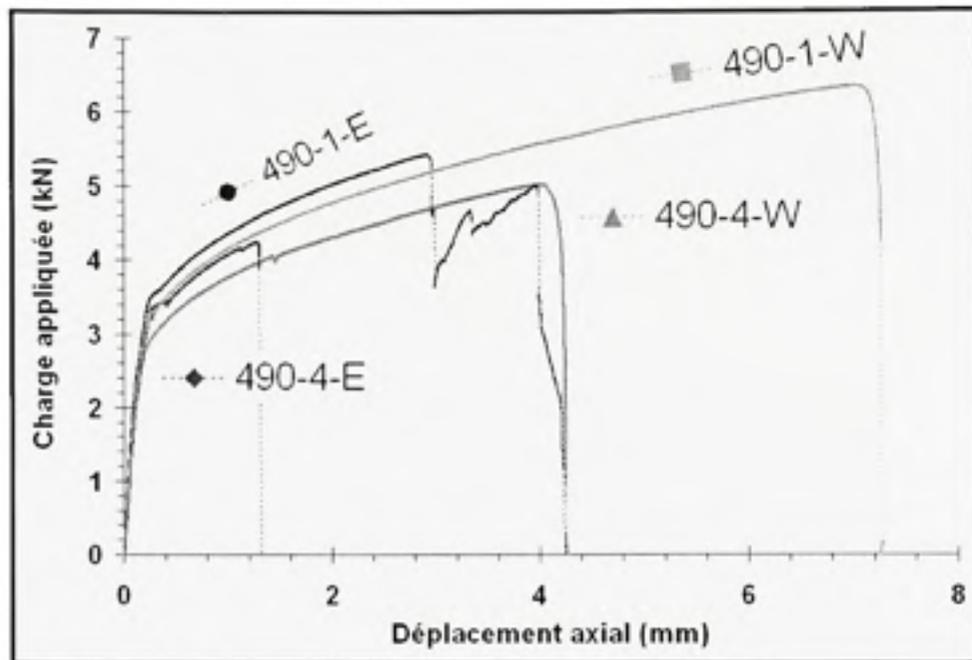


Figure-A VIII-7 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 12.45 mm (0,490 pouce).

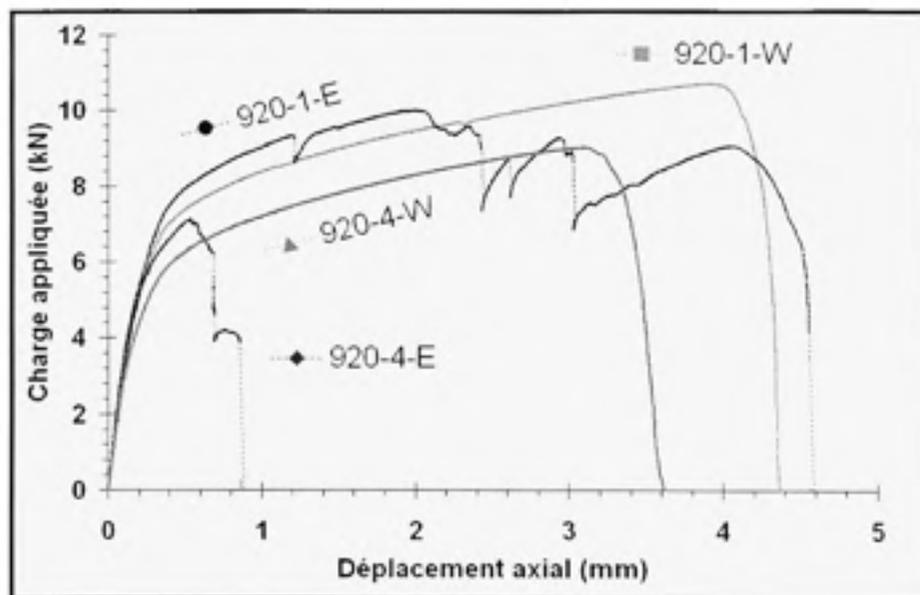


Figure-A VIII-8 Courbes de charge à la rupture en fonction du déplacement axial des joints brasés ayant un recouvrement de 23.37 mm (0,920 pouce).

ANNEXE IX

EXEMPLES DE MICROSTRUCTURES ET MESURES OBTENUES AVEC DIFFÉRENTS TEMPS DE BRASAGE DANS DES JOINTS BRASÉS DE 0.004 POUCE DE GAP

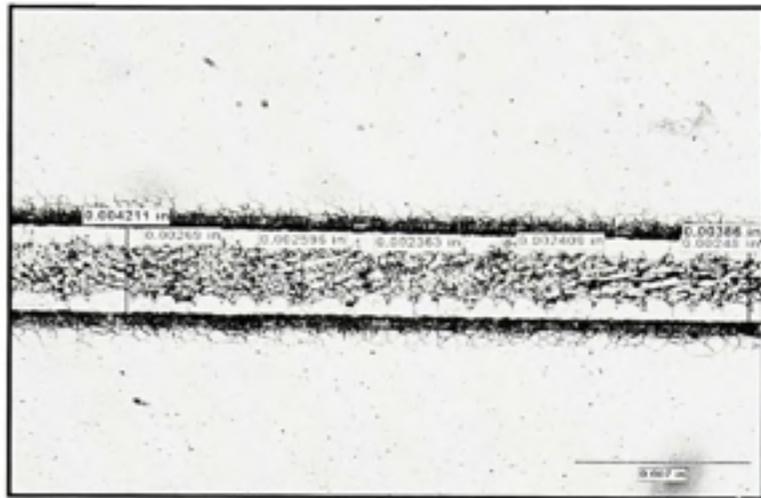


Figure-A IX-1 Microstructure d'un joint brasé obtenu pour un temps de brasage d'une minute, les mesures effectuées correspondent à la largeur de la zone eutectique.

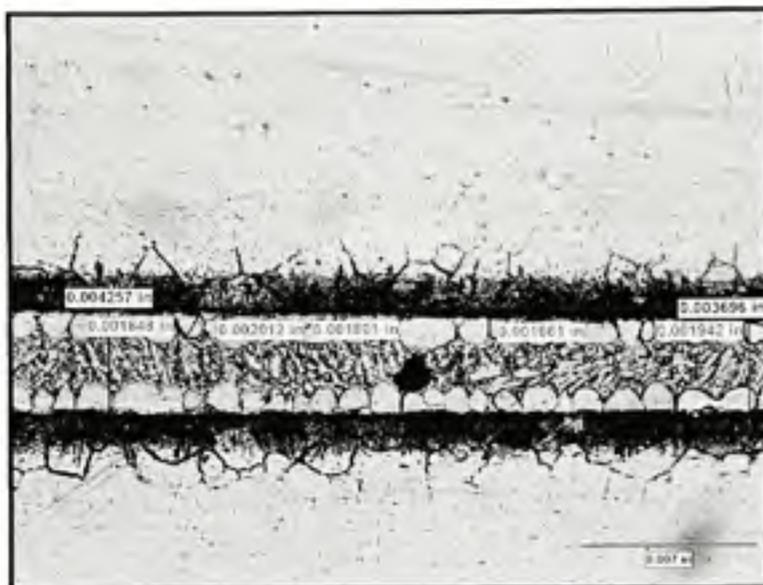


Figure-A IX-2 Microstructure d'un joint brasé obtenu pour un temps de brasage de 15 minutes, les mesures effectuées correspondent à la largeur de la zone eutectique.

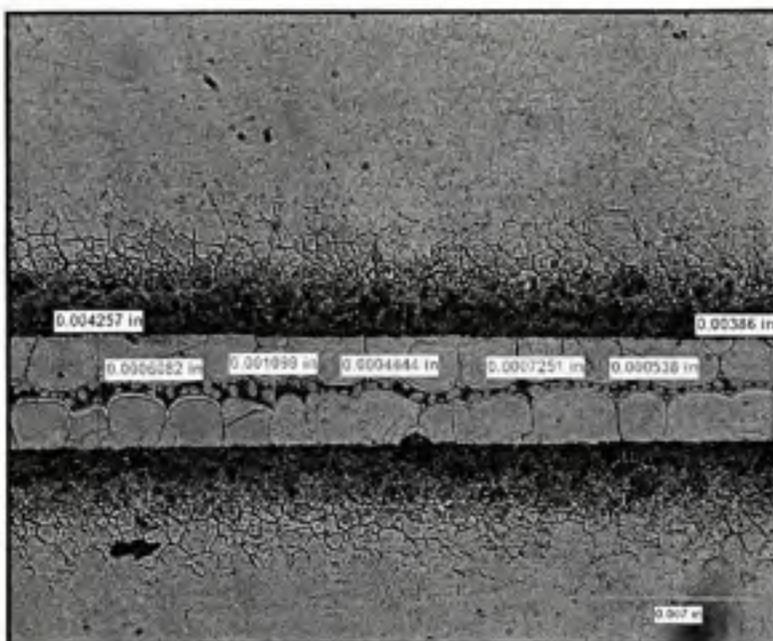


Figure-A IX-3 Microstructures d'un joint brasé de 100 microns de gap (0.004 pouce) obtenu pour un temps de brasage de 80 minutes, les mesures effectuées correspondent à la largeur de la zone eutectique.

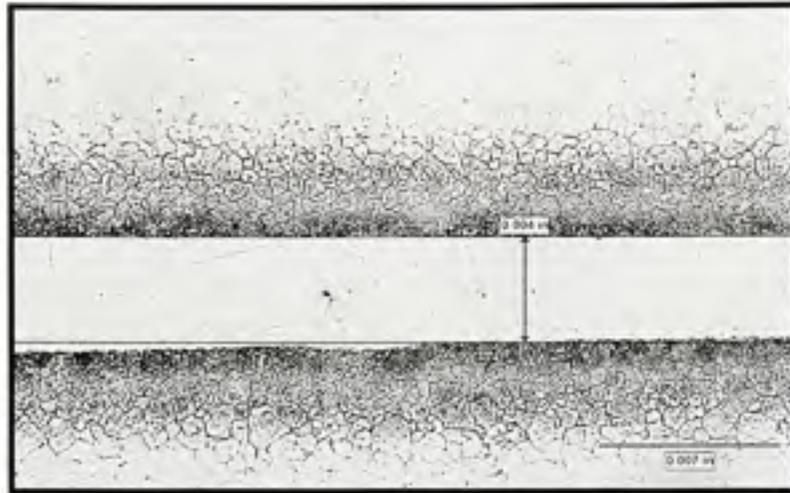


Figure-A IX-4 Microstructure d'un joint brasé 100 microns de gap (0.004 pouce) obtenu pour un temps de brasage de 150 minutes, la mesure effectuée correspond au gap du joint brasé.

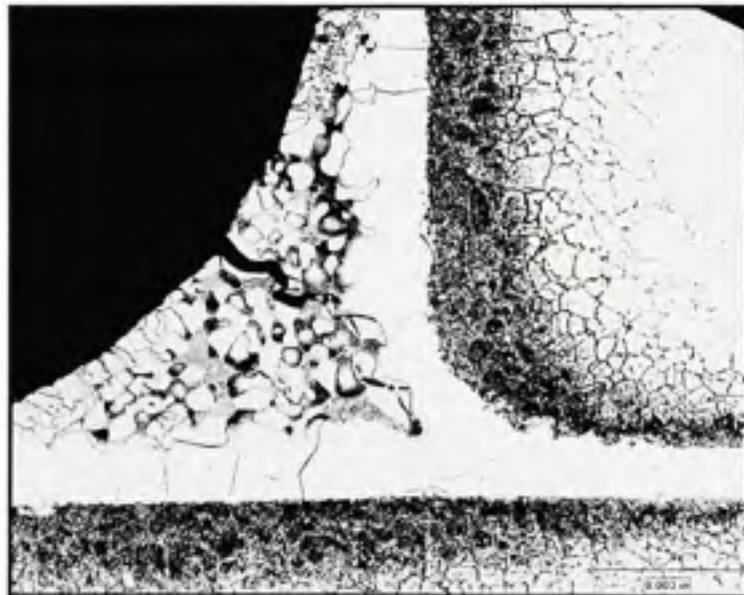


Figure-A IX-5 Mise en évidence de la présence de phases eutectiques dans le filet d'un joint brasé sans eutectiques.

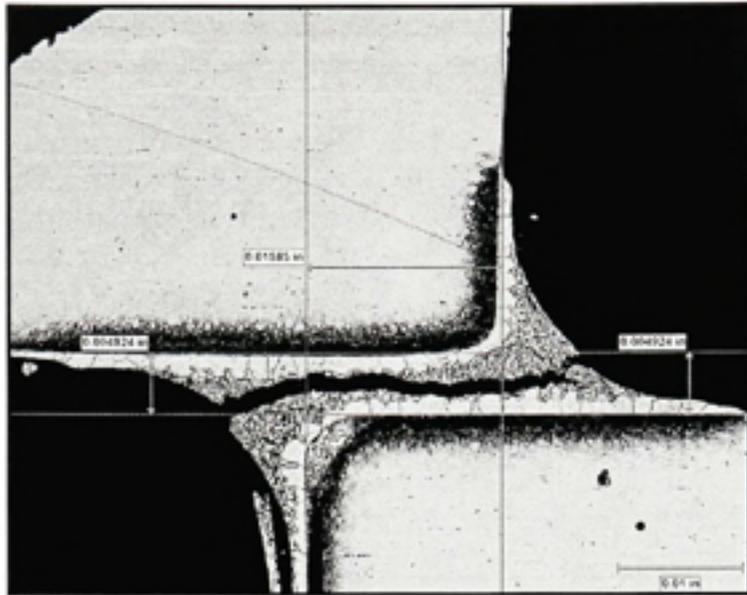


Figure-A IX-6 Micrographie d'un joint brasé où l'on peut voir une fissure ayant propagé dans la zone eutectique suite à un polissage un peu trop agressif.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Turner, D., "Évolution microstructurale des joints brasés sur l'inconel 718 avec les alliages BNi-2 et PALNICO 36M", Mémoire de Maîtrise de l'École de Technologie Supérieure, Université du Québec, Canada 2006, 179 pages.
- [2] Schwartz, M. M., "The brazing handbook, 2nd edition", 2003, 421 pages.
- [3] Paroissien, E., "Contribution aux assemblages hybrides boulonnés et collés : Application aux jonctions aéronautiques", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2006, 287 pages.
- [4] ANSI/AWS C3.2: 2008, "Standard method for evaluating the strength of brazed joints", Edition 2008, 44 pages.
- [5] Bredzs N. and Miller, F., "Use of the AWS standard shear test method for evaluating brazing parameters", Welding Journal Vol 47, N° 11, Nov 1968, pp 481-s to 496-s.
- [6] Flom, Y. and Wang, L., "Flaw tolerance in lap-shear brazed joints-Part 1", Welding Journal Vol 83, No 1, 2004, pp 32-s to 38-s.
- [7] Lucić, M.; Stoić, A. and Kopač, J., "Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol 47, No 11, March 2006, pp 481-s to 496-s.
- [8] Lugscheider, E.; Reimann, H. and Knotek, O., "Calculation of strength of single-lap shear specimen", Welding Journal, Vol 56, N° 6, 1977, pp 189-s to 192-s.
- [9] Adams, R. D., "The Mechanics of Bonded Joints", Institution of Mechanical Engineers, 1986, pp 17-24.
- [10]. Volkersen O., "Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstantenLaschenquerschnitten", Luftfahrtforschung, Vol. 15, 1938, pp 41-47.
- [11]. Demarkles L.R., "Investigation on the use of rubber analogue in the study of the stress distribution in riveted and cemented joint", NASA, TN N° 3413, 1955.
- [13]. Goland, M. and Reissner, E., "The stress in cemented joints", Journal of Applied Mechanics, Vol 11 N° 944, 1944, pp A17-A27.
- [14] Minghao Q., "Theoretical and experimental analysis of adhesive composite joints", Thèse de Doctorat de l'Université de Nebraska, États-Unis, Décembre 2003.

- [15] Nikitinskii, A. M.; Gerasimov, S. A. and Pigalov, S. A., "Examination of the strength of lap brazed joints", *Welding International*, Vol 19, N° 11, 2005, pp 897-901.
- [16] Chung-Kwang, L.; "The joining of alloys for fusion reactor applications", Thèse de Doctorat de l'Université d'Auburn, Alabama, États-Unis, 28 Août 1992, 186 pages.
- [17]. Coxe, C. D.; Setapen, A. M., "Strength of silver alloy brazed joints" *Welding Journal* Vol 28, N° 5, 1949, pp 462-466.
- [18] Aspden, R. G.; Feduska, W., "Fatigue characteristics of single-lap joints of AISI 347 brazed with Ni-Cr-B-C alloy", *Welding Journal*, Vol 37, N° 3, 1958, pp 125s-128s.
- [19] Muhammad A., "TLP bonding of Ni superalloys and stainless steels: Modeling and experimental investigations ", Thèse de Maîtrise de l'Université Concordia, Canada 2006, 108 pages.
- [20] Sasabe, K. and Okane, I., "Fatigue strength of brazed joint under shear stress", *Transactions of National Research Institute for Metals*, Vol 28, N° 2, 1986, pp 151-156.
- [21] Suezawa, Y., "Effects of surface roughness on the fatigue strength of brazed joint", *Transactions of the Japan Welding Society*, Vol 7, N° 2, Sept 1976, pp 25-31.
- [22] Peaslee, R. L., Questions and answers, *American Welding Society*, Déc.08 vol 87 No12.
- [23] Sloboda, M. H., "Design and strength of brazed joints", *Welding and Metal Fabrication*, Vol 29, N° 7, 1961, pp 291-296.
- [24] Myazaki, K.; Fujii, T.; Amijima, S.; Okubo, Y. and Nejigaki, K. "Fatigue properties of single lap joints using rubber toughened epoxy adhesive, Effect of adhesive thickness on fatigue life", *Journal of Japan Society for Composite Materials*, Vol 18, N° 4, 1992, pp 151-157.
- [25] Chung-Kwang, L.; Chin, B. A.; Zinkle S. J. and Wilcox, R. C., "Mechanical properties of induction brazed Glidcop Al-15", 16th International Symposium, ASTM ETP 1175, Philadelphia, 1993.
- [26] Izui, H. and Suezawa, Y., "Mechanical properties of Inconel 600 brazed joints with Pd-Ni-Co Alloys", 28th International SAMPLE Technical Conference, Nov 4-7, 1996.
- [27]. Kavishe, F.P.L., "Influence of joint gap width on strength and fracture toughness of copper steels", *Materials Science and Technology*, Vol 6, N° 2, 1990, pp 176-181.
- [28] He, P.; Feng.; and Xu, W. "Mechanical property of induction brazing TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo using AgCuTi filler metal", *Materials Science and Engineering*, Vol 418, N° 1, Nov 2006, pp 45-52.

- [29] Hattori S. and Okada T., "Fatigue strength of silver brazed joints in nickel-copper alloys", *Journal of the Society of Materials Sciences*, Vol 40, N° 457, 1968, pp 1330-1335.