



Les soudures et les brasures :

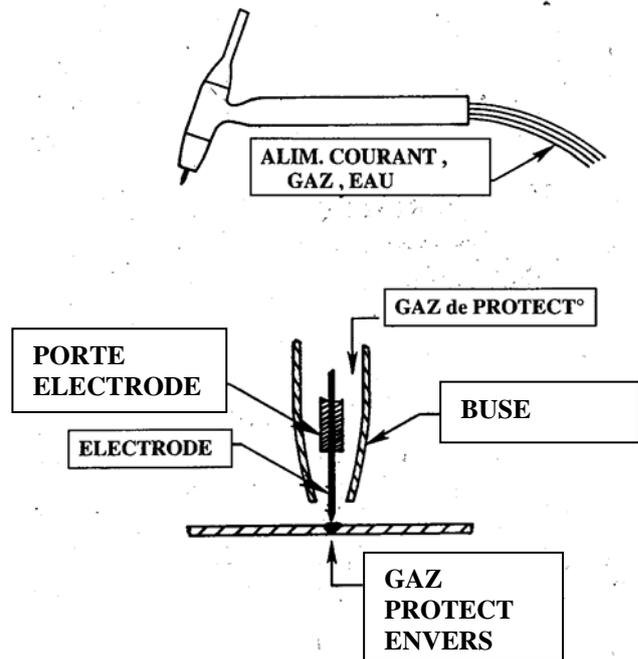
Il existe de nombreuses monographies spécialisées qui traitent de la brasure et de la soudure. Notre propos n'est pas d'entrer dans tous les détails de réalisation de ce type de liaisons. C'est là affaire de spécialistes. Nous nous proposons plutôt dans ce cours de porter un regard de vidiste sur ces techniques.

Nous ne considérerons que les procédés qui présentent des garanties suffisantes du point de vue de l'étanchéité. Il en existe notamment deux types :

- La soudure autogène qui réalise la fusion de deux pièces à souder (TIG, MIG, BE).
- La brasure qui par l'apport d'un métal fusible diffusant à la surface de chacune des pièces à relier, constitue un élément de liaison exceptionnel.

1. Soudage à l'arc électrique :

Dans ce procédé de soudage, les pièces à assembler sont rapprochées et fondues au niveau de leur jonction. On utilise pour cela l'effet d'un arc électrique qui est généré entre les pièces et une électrode (distance comprise entre 0,5 et 2,5 mm). Cette électrode est soit réfractaire (procédé TIG), soit consommable (procédé MIG). Le soudage doit être assuré sous une atmosphère protectrice d'un gaz inerte. L'envers de la soudure doit être protégé de la même façon. En effet, ceci évite l'oxydation excessive des pièces et dispense du traitement postopératoire obligatoire sans cette précaution. Alors qu'une décoloration de la zone de fonte est naturelle, une couche noire et spongieuse est prohibée. Une légère oxydation peut être éliminée très facilement par brossage tandis que la pièce est encore chaude, ce qui est impossible quelques jours plus tard. On devra utiliser une brosse métallique en acier inox. L'acier ordinaire laisse des dépôts qui peuvent être le siège d'oxydation future. Le procédé argon-arc (un mélange argon hydrogéné qq. % aide la chauffe mais est interdit pour l'aluminium) est retenu car il faut éviter les techniques qui mettent en œuvre de l'hélium. Il existe dans ce cas un risque d'occlusion de ce gaz qui rend problématique un éventuel test de fuite.



Déformation provoquée par la soudure :

Le soudage à l'arc, du point de vue du vide, donne d'excellents résultats. Cependant, le métal fondu, en se refroidissant, rétrécit entraînant fatalement *une déformation des pièces*. La soudure peut être pareillement le siège d'efforts internes qui peuvent occasionner, plus tard, des déformations lors du détensionnement. Aussi, le rétrécissement inhérent à la soudure doit-il être contrôlé par une conception préparatoire convenable qui permette de maintenir une Zone Affectée Thermiquement (ZAT) la plus petite possible. Si une précision très élevée est requise, un usinage après soudure peut être également envisagé.

Paramètres importants :

De nombreux paramètres interviennent dans la soudure TIG. Un certain nombre d'entre eux ont une influence déterminante sur la qualité de la soudure. Le courant de soudure, la vitesse de déplacement de la torche et la tension d'arc, définie par la distance de travail entre l'électrode et la pièce pour un gaz donné, déterminent l'énergie fournie à la zone de fusion. L'écoulement, la pureté du gaz de balayage entourant la fonte ainsi que la position de la buse de gaz et l'angle de la torche par rapport au travail influent sur le niveau d'oxydation

de la zone de fonte. Enfin, la forme de l'électrode de tungstène, sa distance au travail fixent la taille de la zone de chauffage de l'arc.

Défauts de soudure:

Certains, notamment ceux qui occasionnent des fuites, peuvent donc se présenter. Le « vidiste » doit être en mesure d'éviter ou, s'ils apparaissent, de diagnostiquer les problèmes de soudure.

- Un certain nombre d'anomalies est du à un **défaut d'apport d'énergie** à la zone de fonte. Un courant de soudure trop faible, une vitesse de déplacement de la torche trop élevée occasionnent *une pénétration incomplète*. Trop de courant, au contraire, pour une vitesse déterminée de soudure, génère *un cordon trop large avec les déformations inhérentes*. Ainsi, un déplacement de la torche de quelques vingtaines de millimètres par minutes est considéré comme une vitesse normale. Il faut savoir également que quelques pour-cent de variation de courant ont une incidence sur la pénétration.

Une pénétration non uniforme le long des soudures circulaires de petit diamètre (≤ 40 mm) est due à des changements de température au cours du travail. Il faut, en observant le magma et en réglant le courant, compenser ces effets afin d'obtenir une soudure régulière.

- *L'oxydation excessive* est due à un **manque d'atmosphère protectrice autour de la soudure**. Les accessoires de la torche sont prévus pour produire un écoulement laminaire du gaz de protection qui permet ainsi, en l'absence de turbulence, d'augmenter la distance entre la buse et le travail. Cependant, un écoulement insatisfaisant du gaz de protection, une buse mal dimensionnée pour le travail à réaliser ou trop éloignée de la zone de fonte provoquent une oxydation excessive. Une vitesse de déplacement trop importante de la torche provoquera les mêmes défauts. En effet, la soudure encore très chaude dans ce cas se trouvera hors du gaz de protection.

Une oxydation excessive au dos du travail est également possible. En effet, si le verso des soudures est incorrectement protégé, une oxydation très profonde peut en résulter. Pour les petits systèmes ou tubes fermés pour lesquels la soudure est extérieure, le procédé le plus simple consiste à remplir la chambre d'un gaz inerte. Dans ce cas, un orifice de purge est nécessaire et il faut accorder suffisamment de temps à l'écoulement de gaz pour purger complètement l'air de la chambre. De plus, il ne doit y avoir aucune surpression interne. Lorsque le remplissage de la pièce n'est pas possible, il faut réaliser localement un large balayage de gaz si possible en régime laminaire.

En dehors des problèmes d'esthétique, une oxydation excessive rend le nettoyage chimique difficile (état de surface et élimination des produits de nettoyage). Elle peut s'accompagner de défauts d'étanchéité.

- **Une préparation insuffisante ou une mauvaise conception de la soudure** peut générer un certain nombre de défauts.

Une jonction inachevée entre les deux bords supérieurs de la soudure (double bourrelet) est due aux forces d'adhérence du métal fondu sur les surfaces de bord. Lors de la réalisation de la jonction, une ouverture coté travail, une fermeture sur le coté opposé est possible. Ce défaut de géométrie peut provoquer ce type de problème. Il faut noter qu'une vitesse de déplacement de la torche trop importante et un courant trop faible ne permettent pas au métal de part et d'autre de fusionner ce qui aggrave encore ce problème. Pour éviter cela, il est conseillé de réaliser un « pointage » soigneux des deux pièces.

A ce propos, le « pointage » peut occasionner des fuites ponctuelles dans le cordon de soudure. Le « pointage doit être propre et léger. Il faut utiliser pour le réaliser un gaz de purge. Il faut brosser tous les oxydes avant d'exécuter le cordon définitif si l'on veut éviter que se développent des fuites sur les taches de « pointage ».

La solidification du métal en fusion dans sa phase peu mélangée peut générer *des criques en bord de fonte*. Ceci se produit en général lorsque le matériau a été mal choisi. Ainsi cet effet est rare avec l'acier inoxydable 304 mais il se produit parfois avec du 316. Si on utilise un matériau de remplissage, le choix de ce dernier est important. Des baguettes de 308 sont habituellement utilisées pour un travail avec du 304. Dans bien des cas la consultation d'un manuel ou d'un fournisseur est souhaitable.

Les matériaux et notamment les inox contiennent des impuretés (sulfures, oxydes et silicates). Ces impuretés peuvent être à l'origine de micro fissures que la chaleur de soudure tend à ouvrir. Il se produit dans ce cas des *fuites dans le métal vierge à l'immédiate proximité de la soudure*. Il est généralement impossible de les colmater, il faut jeter le matériel défectueux. Là encore, il s'agit d'un défaut du à un mauvais choix du matériau. Il est souvent souhaitable d'utiliser un matériau ayant subi un raffinage par refonte électrolytique du laitier afin de diminuer le nombre d'impuretés et d'avoir une distribution uniforme de celles-ci.

Les scories qui flottent sur la fonte peuvent être transportées le long du magma et se retrouver en quantité au recouvrement entre le départ et la fin du cordon. Si ce phénomène est important, il peut se produire une *fuite au chevauchement de soudure*.

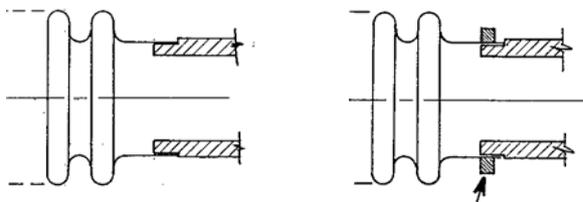
Des *fuites aléatoires dans le cordon de soudure* sont toujours possibles. Les graisses, les substances particulières peuvent occasionner des fuites ponctuelles dans le cordon de soudure. Pour cette raison, une liaison définitive doit toujours être réalisée sur des surfaces propres. Il faut également utiliser une électrode en parfait état car des morceaux de tungstène peuvent générer le même type de fuite.

- **Un mauvais mode opératoire** lors du soudage est la cause de certains défauts.

Ainsi des *trous brûlés* peuvent apparaître dans le travail au moment du déclenchement de l'arc ou en fin de parcours. Par conséquent, le courant doit être programmé pour monter progressivement. Un établissement trop brutal, une valeur trop importante peuvent en effet occasionner un percement du matériau. De même, il faut que le courant soit diminué progressivement en fin de travail. Un arrêt brutal génère habituellement une dépression ou un cratère poreux au lieu d'interruption.

Des *dépôts noirs autour de la soudure* se produisent lorsque l'électrode plonge dans la zone de fonte. Dans ce cas, le métal liquide monte sur le tungstène chaud, s'évapore et produit de la « suie » qui se dépose sur le travail et à l'intérieur de la buse de gaz. Il faut noter qu'en dehors de l'indésirable pollution des chambres, il résulte de cette fausse manœuvre un amorçage possible de l'arc au démarrage dans la buse de gaz et une descente de celui-ci en spirale à la pointe (nécessité de changer la buse).

Le soudage des **matériaux très minces** (qq. 1/10^e mm) réclame une attention toute particulière de l'opérateur.



Mauvaise préparation pour la soudure d'un soufflet. Bonne préparation avec un radiateur en Cu.

L'arc n'est jamais stable, il erre toujours un peu et - lorsque ce dernier s'écarte du chemin prévu - des *trous brûlés* peuvent se produire. L'utilisation d'attaches en cuivre à proximité de la soudure peut éviter les « affaissements thermiques » provoqués par les écarts d'arc.

La distance travail / électrode tungstène doit être faible (de 0,5 à 1mm) pour bien localiser la fonte. De plus, l'électrode, le plus souvent en tungstène thorié pour la soudure TIG (nota : le thorium qui aidait à la pénétration devrait être interdit ; ne pas

utilisé ces électrodes pour Aluminium), est elle-même importante. La pointe doit être fine et parfaitement symétrique. Après un certain temps d'utilisation, celle-ci se détériore, elle doit être, par conséquent, réaffûtée.

Les courants pour les soudures de parois minces sont nécessairement bas (de 1 à 5 A), l'alimentation pour ces valeurs doit donc être stable et adaptée - notamment pour les très faibles ampérages au démarrage. L'éclairage, dans les cas difficiles, de l'électrode avec une lampe UV ondes courtes peut, en ionisant les gaz, aider à la formation de l'arc au démarrage.

Enfin, en réalisant une soudure de bords sur des matériaux très minces, une série de *gouttelettes* peut se former. Une diminution du courant et du déplacement de la torche arrête habituellement ce phénomène. *Un fléchissement de la matière dû à la pesanteur* est également possible dans ce cas. Il faut là aussi diminuer le courant.

Conceptions :

Une bonne préparation et une conception convenable de la soudure facilitent le travail du soudeur, elles sont la garantie d'un résultat final correct.

- La soudure d'étanchéité doit être réalisée au plus près de la partie exposée au vide :

Il faut en effet éviter que les parties ajustées, qu'il est impossible de nettoyer et difficile de pomper par la suite, se trouvent en présence de l'ultra vide. Les soudures doivent être internes avec une pénétration suffisante qui permette la tenue mécanique. Dans le cas où on ne peut pas réaliser ce type de liaisons (ex. petit diamètre), une soudure externe peut être envisagée à condition qu'elle soit traversante, c'est à dire que sa pénétration soit de 100%.

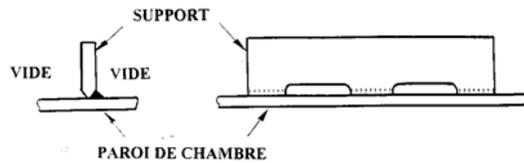
	BORD	RECOU- VREMENT	TE	ANGLE	ARÊTE
TYPE					
NON					
OUI					

Bonnes et mauvaises conceptions des types de base de soudures.

Les modèles de base de soudure, comme on peut le voir sur le tableau ci-dessus, sont ceux où les pièces sont mises bout à bout, ceux où il y a un recouvrement ; on peut avoir aussi à souder des pièces en coin, en Té ou des arêtes.

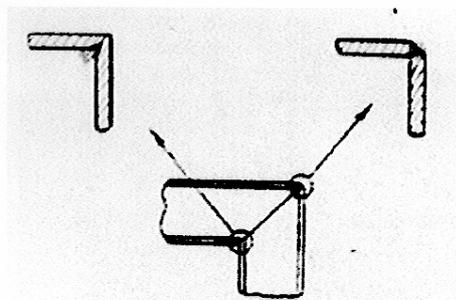
Les soudures bout à bout sont les plus communes. Pour l'acier inoxydable, lorsque les épaisseurs ne sont pas trop importantes, on peut réaliser des soudures de fusion sans métal d'apport. Dans le cas où les pièces sont épaisses ($\geq 3\text{mm}$), on peut pratiquer un chanfrein suffisant, réaliser une soudure de fusion et procéder à un remplissage après test d'étanchéité du premier cordon. Les soudures extérieures avec recouvrement des pièces créent de grands espaces internes étroits qui ne peuvent pas être nettoyés et qui agissent comme des fuites virtuelles. Les soudures d'arêtes emprisonnent aussi des volumes morts

pendant, lorsqu'elle se fait sur une collerette fine, il suffit de meuler celle-ci pour dissocier et réassocier éventuellement un nombre limité de fois les sous-ensembles. Les soudures de pièces en Té peuvent être faites avec du métal de remplissage dans les angles internes. Elles peuvent être parfois réalisées d'une façon excellente par fusion du bras supérieur dans la jambe.

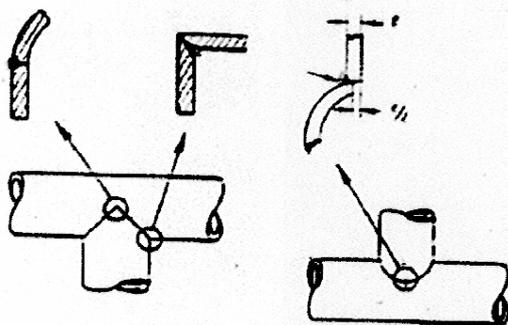


On peut également, sur les supports à l'intérieur des chambres à vide, chanfreiner des deux côtés de l'appui pour éviter les volumes morts.

La soudure des coins peut être réalisée de deux manières : les cotés se chevauchant, on effectue, soit une soudure interne, soit une soudure traversante ; les cotés étant mis bord à bord, on remplit le Vé externe avec de la baguette de soudure. Cette dernière technique est utilisée lorsque l'épaisseur des matériaux le permet (environ $\geq 3\text{mm}$).



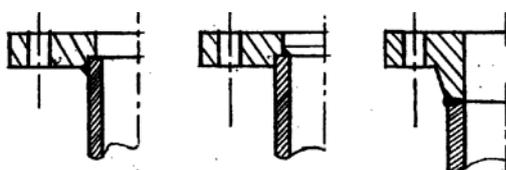
Coude taillé



Pièce en Té taillée

Branche de Té

La réalisation des soudures traversantes, sur les tubes formant des coudes ou des Tés, nécessite, pour les épaisseurs importantes de chambre, de chanfreiner les bords. Lorsque le diamètre de la branche du Té le permet, on peut également jouer sur la dimension de la crevée pour obtenir le même effet.



(1) Soudage extérieur (à éviter)

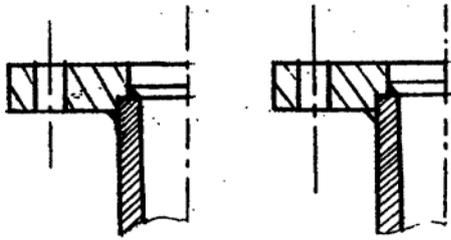
(2) Soudage à clin avec butée (conseillé)

(3) Soudage sur bride à collerette (conseillé)

Le raccordement des brides aux tubes s'effectue le plus souvent par soudure à l'arc. Il faut éviter, si cela est possible (dans le cas de petites brides (1) la liaison s'opère parfois par emboîtement et apport de métal extérieur) que les parties ajustées soient à l'intérieur de la chambre. Une butée du tube doit être prévue pour faciliter l'opération de soudage

(2). La soudure traversante sur bride à collerette (3) est une solution favorable au raccordement mais elle ne correspond pas à du matériel normalisé

- **La soudure doit être exempte de fuite virtuelle :**



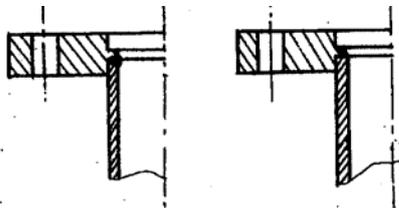
Double soudure
(à éviter)

Double soudure
Soudure ext. de
renfort discontinue
(conseillé).

Le soudage ne doit pas conduire à l'isolement d'un volume entre une soudure interne d'étanchéité et une soudure externe. Un tel système interdit en effet le contrôle d'étanchéité avec le risque de fuite virtuelle (volume de fuite vers l'intérieur, isolé de l'extérieur). Il est conseillé de procéder à l'exécution d'une soudure de renfort discontinue. Cette disposition interdit cependant un traitement chimique des pièces (capture de produits de nettoyage avec risques de corrosion).

- **Il est nécessaire d'obtenir le gauchement minimum ce qui signifie que la taille et la profondeur de fonte doivent correspondre à la résistance mécanique requise :**

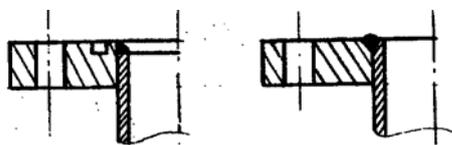
Il faut utiliser des techniques d'assemblage sûres. Il faut souder des épaisseurs comparables.



Soudure sur lèvres
latérale (conseillé).

Soudure sur lèvres pour
accès latéral difficile.

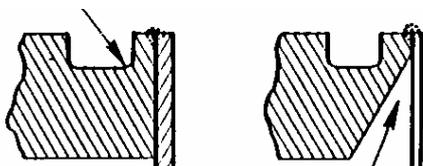
Une butée du tube doit être prévue pour faciliter l'opération de soudage. Le soudage sur lèvres latérale est le plus courant quand le diamètre est suffisant, ainsi que le soudage en clin sur butée bien que la liaison s'opère entre deux parties d'inégales épaisseurs. La rigidité d'assemblage dans ce cas est moyenne et on peut éventuellement envisager une soudure de renfort extérieure discontinue.



Soudage à clin
sans butée
(à éviter).

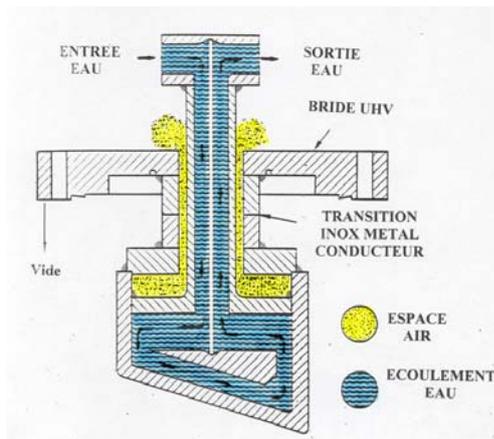
Soudage intérieur
direct (à éviter).

Le soudage ne doit pas nuire à la planéité des brides en les déformant. La liaison ne doit pas être réalisée à proximité de la portée de joint.



Pour les minces parois, en raison de leur fragilité, il est aussi souhaitable d'éviter l'emprisonnement des produits de nettoyage dans les volumes morts à l'extérieur de la chambre

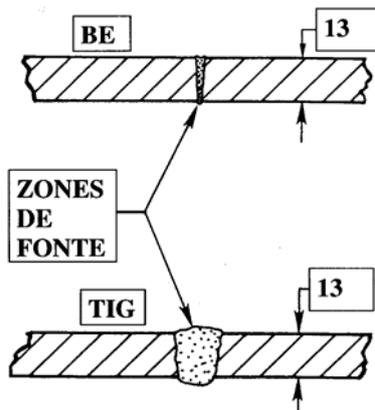
- Il ne doit y avoir si possible aucun contact entre l'eau et les soudures du vide :



Les soudures qui font l'étanchéité avec l'eau et celles qui assurent l'étanchéité au vide, ceci afin de minimiser les risques, doivent être différenciées (Ex. module refroidi ci-dessous).

Soudage par bombardement électronique (FE) :

Ce procédé utilise un canon à électron dans une chambre à vide ($p \leq 10^{-5}$ mbar). En général, la pièce à souder est mise dans cette chambre ce qui limite ses dimensions. Cependant, il existe des systèmes à usage industriel où le faisceau d'électrons sort dans une région à haute pression de gaz inerte dans laquelle s'effectue la soudure.



Comparaison de la zone de fonte sur de l'inox.

Le faisceau d'électrons peut être focalisé aux dimensions d'une tache de quelques centièmes de millimètres de diamètre. La tension et le courant du faisceau peuvent, en fonction des installations, varier respectivement de 30 à 100 kV et de 0 à 1 A. Les densités de puissance peuvent donc atteindre des valeurs beaucoup plus élevées qu'avec la soudure à l'arc (FE : 10^9 W/cm² ; TIG ou MIG : 10^6 W/cm² environ) bien que la gamme d'énergie des électrons dans le métal soit modeste (qq. centaines de keV). La production d'une colonne de vapeur de faible densité dans le travail permet une ouverture complète derrière le faisceau d'électrons. La caractéristique remarquable de ce type de soudure est sa grande pénétration (jusqu'à qq. cm) et sa zone très étroite de fonte et donc un retrait de soudure très faible (respect des tolérances dimensionnelles sévères).

Chambre à vide Onduleur CLIO
Coupe horizontale et verticale
d'une éprouvette



L'apport d'énergie à la zone de fonte est ainsi déterminé par les valeurs de courant et de tension du faisceau, la dimension de la tache et la vitesse de parcours. Les pénétrations, pour une vitesse de soudage de 2 m/s, avec un canon à électrons de puissance 15 kW, donnent les résultats suivants : alliage Al-Si (13%) : 38 mm ; inox : 19 mm ; cuivre : 10 mm. Le soudage par BE n'a que des avantages du point de vue de la technique du vide. La formation des oxydes dans ce cas est quasiment nulle et la plus grande partie des gaz occlus dans la zone de soudure est purgée. On obtient, de plus, une soudure de grande pénétration avec une localisation très fine qui limite les déformations. La

vitesse de soudage est importante. D'un point de vue mécanique, ce procédé permet toutes les soudures autogènes (même celles de matériaux réfractaires) et certaines soudures hétérogènes. Il peut, de plus, se pratiquer sur des pièces d'inégales épaisseurs sans déformation. Malgré tout, ce type d'équipement reste coûteux et demande une technicité importante de la part des opérateurs (réglage du faisceau, positionnement des pièces, etc.).

2. les brasures :

Les brasures fortes ou tendres réalisent des jonctions définitives de composants métalliques en utilisant un métal de liaison ayant un point de fusion plus bas que les pièces dont on veut réaliser l'assemblage.

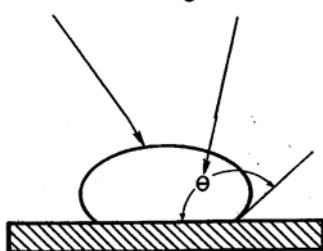
Les brasures fortes :

Ce procédé consiste à fondre à la jonction des pièces un métal à bas point de fusion, bas comparé à celui des pièces à braser mais cependant supérieur à 450° C pour une brasure forte. La liaison résulte de l'inter diffusion des atomes et de la formation d'une solution ou d'un alliage de la brasure avec le métal de base. Il faut donc remarquer que ceci change la nature de la brasure et particulièrement sa température de fusion. Tous ces mécanismes et par conséquent la qualité de la jonction dépendent des matériaux mis en jeu, du temps et de la température de brasage.

Les brasages au chalumeau sont, dans la mesure du possible, à éviter. Par contre, les liaisons par brasure forte, en atmosphère contrôlée ou mieux encore sous vide dans un four, sont recommandées en technique du vide. Les jonctions se font généralement par emboîtement avec un jeu de l'ordre de quelques centièmes. Ce jeu est fonction de la mouillabilité de la brasure sur la liaison, car le métal d'apport doit diffuser et être retenu à l'envers de la brasure par sa tension superficielle. Le ou les anneaux de brasure sont placés judicieusement pour faciliter la diffusion du métal d'apport (pesanteur, capillarité). Des angles vifs sont ménagés pour limiter l'écoulement de la brasure aux seuls plans de joints.

Écoulement et mouillage :

Goutte de brasure Angle de raccordement



La mouillabilité de la brasure sur les surfaces est régie par des forces d'adhérence du liquide sur le solide, forces d'origine atomique et moléculaire. L'angle θ sera d'autant plus petit que ces forces d'adhérence seront grandes devant les forces de cohésion du liquide (tension superficielle des liquides) et inversement ($\theta > 90^\circ$: le liquide ne mouille pas, $\theta < 90^\circ$: il y a mouillage). Il résulte du mouillage, de la pression due aux tensions superficielles des liquides et à la courbure des surfaces une diffusion de la brasure par capillarité qui dépend des jeux, des métaux de base et de leur nettoyage, de la nature de la brasure.

$$h = \frac{2 A \cos\theta}{r \rho g}$$

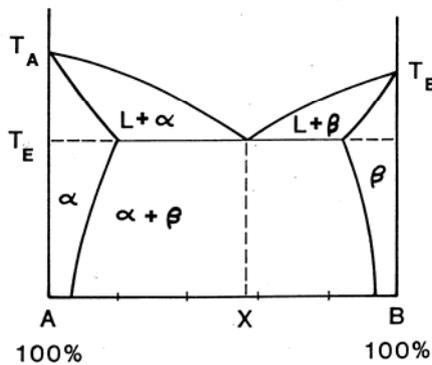
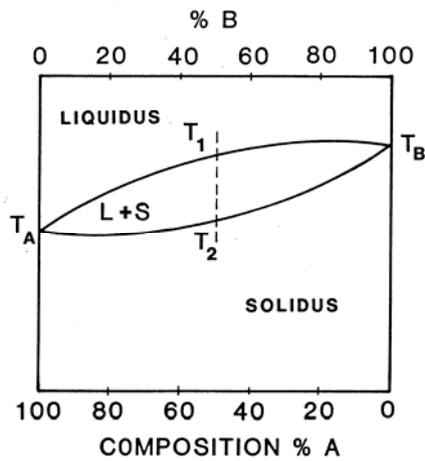
A : tension superficielle,
r : rayon du capillaire,
h : hauteur montée du liquide.
loi de JURIN

Caractéristiques des alliages de brasures :

Bien que des métaux purs tels que le cuivre, l'or, l'argent ou le molybdène soient parfois utilisés comme métal fusible, la plupart des brasures sont des alliages. Les caractéristiques de fusion des alliages sont complexes, elles influencent le résultat final des brasures (incidence sur le métal de base et le métal fusible).

Un métal pur a un point de fusion fixe. Le métal passe de l'état de solide à celui de liquide sans intervalle T de température.

Si l'on considère deux métaux solubles, à toutes les températures, dans toutes les proportions possibles, l'alliage peut être représenté par un « diagramme de phase » donnant la composition de l'alliage et son état en fonction de la température. A l'extrême gauche le matériau est composé de 100% de A, tandis qu'à l'extrême droite de 100% de B. La température est indiquée sur les ordonnées. Ainsi, T_A à gauche est le point de fusion de A pur tandis que T_B à droite est celui de B pur. Le diagramme indique la présence de trois phases : solidus, solidus liquidus mélangés et liquidus. Prenons l'exemple d'un alliage contenant 50% de A. Alors, pour une température supérieure à T_1 , l'alliage n'existe que sous forme liquide ; entre T_1 et T_2 il existe sous la forme d'un mélange solide liquide (bouillie) ; en dessous de T_2 c'est un solide.



Beaucoup de brasures sont constituées d'alliages binaires (Ex. : Cu / Ag, Pb /Zn) mais ces matériaux ne sont pas solubles l'un dans l'autre, sans interruption, dans toutes les proportions. Le « diagramme de phase » dans ce cas se présente sous une autre forme. A la composition X, l'alliage se comporte ainsi comme un métal pur. En ce point de composition dite eutectique, le passage du solide au liquide se fait sans phase mélangée en bouillie et sans intervalle de température. Cette valeur est appelée température eutectique de l'alliage. Les solutions solides $\alpha + \beta$ sont, de chaque côté du diagramme, marquées par deux limites de solubilité où l'alliage $\alpha\beta$ n'existe pas. Au-dessus d'une ligne horizontale T_E (solidus), il y a une phase mélangée en bouillie, à gauche de liquide et de solide α , à droite de liquide et de solide β . La courbe supérieure (liquidus) marque comme précédemment la limite entre phase mélangée et liquide. Si la brasure n'est pas un eutectique, donc avec deux températures différentes, il faudra passer rapidement de l'une à l'autre sinon le métal le plus fusible s'échappera du joint et le brasage sera mauvais.

Désoxydation :

Pour que la brasure puisse atteindre et adhérer sur les métaux de base de la jonction, il est primordial que ces derniers soient sans oxyde. Beaucoup de matériaux communs tels que les aciers inoxydables, l'aluminium, le titane ou le béryllium ont des oxydes très stables. Ces oxydes peuvent être libérés de différentes manières. Ils peuvent être réduits à l'aide d'un décapant fondu ou dans une atmosphère gazeuse telle que de l'hydrogène à température élevée. Ils peuvent à haute température diffuser dans le volume ou être dissociés (ex. : désorption du CuO_2 à 850°C sous $P < 10^{-4}$ mbar). La température et l'atmosphère environnant la jonction (oxygène et vapeur d'eau notamment) sont des facteurs importants intervenant

dans l'élimination de ces oxydes. Les brasures devront donc être choisies afin de permettre, à leur température de fusion, la réduction de ceux-ci.

Température (°C)	Pression finale (mbar)	Mouillage	Aspect
1150	10 ⁻⁴	Excellent	Brillant
1150	10 ⁻²	Bon	Vert olive
1150	1	Aucun	Oxyde épais
900	10 ⁻⁴	Bon	Brillant
900	10 ⁻³	Aucun	-----

Exemple de brasage d'inox 304L et de cuivre avec du cuivre pur.

La désoxydation par l'emploi d'un flux décapant dans le domaine du vide est déconseillée car il est souvent difficile d'éliminer complètement ce dernier. Certains flux sont directement enrobés autour des baguettes de brasage. Le flux dans ce cas doit disparaître complètement avant l'obtention du solidus ce qui rend son action de désoxydation souvent incomplète. Il faut enlever le dépôt vitreux par brossage à l'eau chaude ou au moyen de quelques solutions plus efficaces (acide sulfurique 10-15% pour les cuivreux ; acide chlorhydrique 10-15% pour les ferreux, 50% pour les inox). Enfin, les pièces doivent être rincées soigneusement puis étuvées. En effet, les résidus peuvent induire des actions chimiques (corrosion) se révélant des mois plus tard.

L'atmosphère d'hydrogène pose quelques problèmes et on préférera un brasage sous four sous vide pour éliminer les oxydes. A haute température, les impuretés d'oxydes du cuivre ordinaire réagissent avec l'hydrogène provoquant des micros éclatements qui fragilisent et rendent poreux ce matériau. Il est vrai qu'en UHV on utilise du cuivre OFHC. Autre problème, l'hydrogène réagit avec de nombreux métaux pour former des hydrides. Ainsi, le niobium et le tantale dans ces conditions se décomposent sous forme de poudre blanche. Enfin, il y a le problème plus général de l'hydrogène qui est dissous de façon importante dans de nombreux métaux et notamment dans l'inox et le cuivre. Les taux de dégazage sont alors excessifs et ne correspondent plus à une utilisation en UHV des composants ainsi traités.

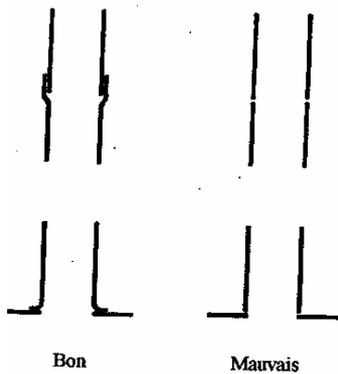
Techniques de brasage :

○ *Chalumeau :*

Une des techniques les plus simples mais par forcément l'une des plus souhaitables dans le domaine de l'UHV, est le brasage à la torche avec un métal d'apport (le plus souvent alliage d'argent). La mise en température des pièces se fait habituellement avec un chalumeau oxyacétylénique. Elles sont d'abord préchauffées à cœur avec une flamme. La flamme est ensuite réduite pour être appliquée sur la jonction elle-même. La flamme ne doit pas être trop oxydante (diminution de l'oxygène pour avoir un « dard » pas trop petit). La baguette ou le fil d'apport est présenté et le plus souvent la torche peut être partiellement retirée, la majeure partie de la chaleur provenant du travail. La réduction des oxydes au niveau de la jonction est assurée par l'emploi d'un flux décapant. L'endroit de la brasure en est enduit préalablement à moins que ce ne soit la baguette elle-même. Le métal d'apport et le flux sont spécifiques aux matériaux à assembler. Le brasage réalisé dans le domaine du vide, notamment celui de l'inox, ne peut s'effectuer avec les alliages habituels qui contiennent des composants à pressions de vapeurs saturantes élevées (le zinc, le cadmium) qui ne se sont pas compatibles avec l'UHV et qui réalisent le plus souvent des liaisons poreuses.

Il faut noter que les propriétés mécaniques de la brasure sont en général inférieures au métal de base. Un joint brasé a de meilleures caractéristiques mécaniques en cisaillement qu'en traction ou compression. Il faut en tenir compte pour déterminer les surfaces à braser. Le joint

de brasure doit permettre un contact raisonnable entre les pièces à assembler. Le brasage s'effectue de deux façons différentes, selon qu'il s'agit d'une jonction par emboîtement ou bord à bord. Dans le premier cas, un jeu suffisant mais sans plus doit être ménagé entre les deux pièces (0,05 à 0,1 mm fonction des métaux et) de façon que le métal d'apport puisse pénétrer entre les deux pièces par capillarité mais soit retenu à l'envers de la brasure par sa tension superficielle. La température doit permettre l'écoulement facile du métal liquide tout en restant la plus basse possible. Il ne doit subsister aucune crevasse non remplie par l'alliage.



Dans le cas des jonctions bord à bord, un chanfrein est ménagé à l'extrémité de chacune des pièces et le métal d'apport chargé progressivement. La température, extrêmement critique, est atteinte généralement lorsque le décapant fond. Toute surchauffe provoque un écoulement à l'envers des brasures. Les pièces présenteront, dans les deux cas, après brasage, une oxydation considérable qu'il faudra éliminer (décapage acide pas toujours possible).

○ *Four :*

Les brasages en atmosphère contrôlée ou mieux sous vide ($\sim 10^{-5}$ mbar) sont vivement souhaités dans les domaines qui nous concerne.

Un chauffage résistif permet de chauffer par rayonnement les pièces. L'émissivité des différents matériaux peut parfois réserver quelques surprise et rendre la modélisation du cycle de température complexe (Ex. du brasage du Cu et de l'inox) Une succession d'écrans à l'intérieur du four et une isolation thermique extérieure évitent les déperditions d'énergie. Le contrôle des températures de l'ensemble à braser se fait à l'aide de thermocouples. Le pompage est assuré par un groupe permettant d'obtenir au moins un vide industriel.



Les assemblages se font par emboîtement avec un jeu de l'ordre de quelques centièmes (cela dépend des métaux et des brasures utilisés). Plus simplement, ils peuvent être réalisés par simple contact. Ils sont dans tous les cas libres. Les pièces sont maintenues à l'aide de fils ou de pinces en molybdène qui conservent une certaine élasticité à haute température (utilisation unique). Lorsque cela est possible, on peut également employer des poids. Il faut absolument éviter les contacts métal /métal de ces supports et poids avec les pièces à braser car, sous vide et à fortiori à haute température, il y a transfert de matière et formation d'alliages par diffusion. On utilisera donc pour éviter ces adhésions systématiquement des céramiques.



Le métal d'apport préformé (le plus souvent il s'agit d'un fil de brasure d'environ 1 mm de diamètre) est positionné dans une gorge ou un chanfrein de manière à ce que les effets combinés de la pesanteur, de la capillarité et du mouillage permettent le remplissage complet du joint. Naturellement, la propreté des pièces à braser est absolument nécessaire et c'est une condition importante de la réussite ou non de la liaison. Il faut noter que pour la brasure comme pour une goutte d'eau glissant sur une plaque et parvenant à son bord, un angle vif l'arrête tandis qu'un arrondi provoque son écoulement sur son champ. Il faut par conséquent, lors de la conception, ménager avec soin des arrondis qui assurent la diffusion de la brasure dans le plan de joint et des angles vifs qui évitent son écoulement et son épuisement en dehors de ce plan



Le procédé sous four sous vide permet de brasier plusieurs joints d'un même ensemble cependant l'écoulement du métal fusible peut réserver quelques difficultés. Des essais pour déterminer le temps et la température de brasage ainsi que le montage et la position des différentes pièces sont généralement nécessaires.

Le brasage sous vide permet, lorsque la température est suffisante, la désoxydation des pièces (ex. du cuivre) et un taux de dégazage bas. Cependant, la nécessité dans laquelle on est de chauffer entièrement les ensembles peut provoquer un recuit mécanique pas toujours souhaitable.

Brasures tendres :

Ces brasures, à des températures inférieures à 450° C, sont généralement mal adaptées aux techniques du vide. En effet, le métal d'apport est le plus souvent constitué par un alliage de plomb et d'étain qui réalisent un assemblage de résistance mécanique médiocre (eutectique Pb Sn 183°C ; alliage Pb Sn parfois avec de petites additions d'Ag pour une résistance accrue ~200°C). De plus, la pénétration par diffusion ainsi que la mouillabilité de ce type de brasure sont souvent difficiles ce qui occasionne de fréquentes fuites réelles et virtuelles dans les joints. Il faut noter que le plomb a une pression de vapeur saturante relativement élevée ce qui est dommageable en UHV (10^{-8} mbar au point de fusion 327° C). Enfin, l'élimination du flux de décapage (mélange de chlorure de zinc et d'acide chlorhydrique ou chlorure d'ammonium sous forme de pâte) utilisé avant brasage est absolument nécessaire mais parfois complexe. L'utilisation de la brasure d'électricien est pour cette raison interdite car elle contient une pâte décapante (finol).

Cependant, les eutectiques étain /argent ne posent pas trop de problèmes en technique du vide. En effet, l'étain a un oxyde qui a la propriété d'être très stable sur les surfaces et par conséquent ce métal n'est pas trop « dangereux » dans les chambres à vide. Un mélange à 10% d'argent (300° C) autorise un brasage sous four sous vide. Un pourcentage plus faible, par contre, ne permet pas la diffusion du métal d'apport.

Les zones à souder sont décapées, les surfaces à joindre sont étamées puis nettoyées (eau chaude et séchage air chaud). Les pièces sont alors réunies puis portées à température à l'aide d'un fer à souder dans le cas des petites pièces, d'un chalumeau à gaz dans celui des plus grands ensembles. Aucun flux décapant n'est généralement nécessaire à ce stade. Lorsque la température de liaison est atteinte, de la brasure supplémentaire est ajoutée. Les matériaux ne possédant pas un film d'oxyde tenace sont les plus faciles à brasier par cette technique (Ex. : cuivre). Les aciers inoxydables, l'aluminium ou les alliages légers ne s'accrochent pas aisément des brasures tendres.

La brasure tendre a cependant certains avantages. Elle permet d'utiliser des moyens de chauffage simples et elle peut être employée lorsque des températures plus élevées endommageraient certaines parties de l'assemblage.

3. L'exemple de l'acier inoxydable :

Une grande quantité de chambres à vide est réalisée en acier inoxydable. Des soudures de qualité sont une caractéristique importante de ces chambres en UHV.

Les soudures doivent être régulières, continues, non poreuses et tous les efforts doivent être faits pour réduire la largeur de la région de transition le long de chaque côté du cordon. La pénétration totale est d'autre part essentielle pour deux raisons :

- Eviter les poches qui peuvent favoriser la rétention de gaz.
- Assurer une structure mécanique saine.

Avant toute soudure les pièces doivent être nettoyées comme indiqué précédemment dans le chapitre matériaux.

Une technique particulière n'est pas imposée. Cependant la soudure TIG est spécialement recommandée.

Les aciers de la série 300 à faible teneur de carbone (< 0,005 à 0,1 %) sont retenus. En effet à haute température le carbure de chrome est précipité le long des frontières de grain et il laisse des régions susceptibles de corrosion. Le 304 dans ce cas est généralement choisis. Il faut noter que si l'acier 316 se soude tout à fait bien, il peut présenter des fuites de criques près du bord de la zone de fonte. L'acier inox 303 qui contient du soufre pour faciliter l'usinage et augmenter la résistance au grippage, n'est ni approprié au vide, ni à la soudure (porosités dues à ce matériau).

Le procédé par F.E. pour beaucoup de *soudures épaisses (épaisseur de 5 à 8 mm)* est recommandé. Cette technique est également suggérée lorsque des tolérances mécaniques serrées doivent être respectées sur le produit fini. Pour *les soudures fines (épaisseur ≤ 5 mm)*.

Le procédé TIG avec projection très soignée d'argon est recommandé. La polarité de travail de l'électrode est normalement dans ce cas positive. L'utilisation d'un matériau de remplissage n'est pas souhaitée, mais si cela est absolument nécessaire (pièce relativement épaisse sur lesquelles il a fallu pratiquer un chanfrein par exemple), il sera constitué de bandes ou de baguettes de matière identique à celle soudée. Lors d'un soudage de 304, le 308 peut également être utilisé pour le remplissage. Enfin, les soudures terminées ne doivent pas être polies. On peut éventuellement les brosser avec une brosse inox propre.

4. L'exemple du cuivre :

Le soudage TIG en courant continu et polarité directe (Ex. :15V ;180A ; 2 passes pour une tôle de 3 mm) avec un gaz protecteur argon est utilisé pour des épaisseurs faibles jusqu'à 5 mm. Une baguette de faible diamètre (2 mm) de métal désoxydant pour le cuivre est employée.

Le soudage MIG pour les épaisseurs plus importantes nécessite un préchauffage qui est fonction de l'épaisseur (180 à 250°C). Une première passe pour assurer la pénétration et l'étanchéité est effectuée. le courant peut être pulsé, les intensités, sont de l'ordre de 200 à 400A. Le métal d'apport est un fil continu dont le diamètre est de 1 à 21 mm. Il faut employer un gaz de protection qui est en général un mélange Ar 30% / He 70%.

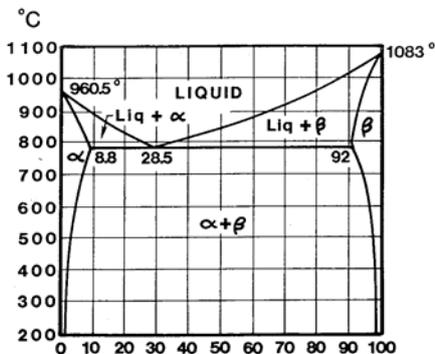
Le soudage par faisceau d'électrons (FE) constitue un procédé privilégié de soudage du cuivre par fusion. Il permet de souder bord à bord des épaisseurs jusqu'à 50 mm avec un canon à électrons de puissance 60KW. Les alliages techniques sont soudables par ce procédé (Glidcop par exemple).

5. L'exemple des liaisons hétérogènes avec le cuivre :

Le soudage F.E. permet de réaliser les assemblages suivants cuivre /nickel (ou alliage) ; cuivre /or ; cuivre /manganèse (ou alliage) ; cuivre /platine. Les liaisons cuivre /acier inoxydable par contre font apparaître, à l'observation micrographique, des structures suspectes qui sont liées à l'incompatibilité entre le fer et le cuivre.

Le brasage, du cuivre sur lui-même mais aussi du cuivre sur l'inox (304L, 316L ou 316LN pour les brides à couteaux en raison des hautes températures du four), sous vide ($P \leq 10^{-5}$ mbar), est le procédé le plus souhaitable. Son avantage est l'absence d'oxydation et de réaction avec le gaz libre ou le gaz du flux. Ainsi, le cuivre n'est pas fragilisé comme on l'observe lorsque l'on brase sous hydrogène. Il n'y a pas non plus sous vide de formation de CuO_2 de fragilisation. Dans ce cas, le remplissage par le mélange de brasure est meilleur et on évite les fuites virtuelles. De plus, le dégazage des pièces durant le brasage sous vide est favorable aux matériels destinés à l'ultravide.

Les oxydes de chrome sont extrêmement tenaces et durs, par conséquent il faut, si la température n'est pas suffisante, traiter l'inox pour permettre son brasage sous four sous vide. Il est recommandé de déposer sur l'inox du nickel (2,6 μm d'épaisseur) ou du cuivre OFHC (~5 μm avec une sous couche de fixation de nickel ; attention à ne pas déposer sur des surfaces qui devraient être soudées par la suite). Ces dépôts constituent des barrières de diffusion pour la brasure. Il faut remarquer que sur l'inox où les dépôts se font au tampon des problèmes de corrosion peuvent apparaître avec le temps.



On utilise pour ces brasures des alliages à base de nickel (par exemple Ni Palladium) ; Ag Cu (ex : Alliage 720 du comptoir Lyon-Allemand Louyot à 779° C - eutectique 72-28 à 780° C). Le système argent / cuivre est un des plus commun utilisés en brasure forte. Sur le « diagramme de phase » nous voyons que le point de fusion de l'argent pur est de 960,5°C et que celui du cuivre pur est de 1083°C. La température eutectique est elle de 779°C. Si l'eutectique est utilisé pour réaliser une brasure sur du cuivre alors que la température est sensiblement supérieure à celle de la fusion de l'alliage (aux environs de 830°C), de l'argent de la brasure migre dans le métal support tandis que du cuivre de la pièce à braser se dissout dans la fonte de la brasure. Ceci n'est pas sans conséquences, le point de fusion de la brasure s'élève et la migration du Cuivre peut être préjudiciable pour les composants très minces. Ce changement des matériaux dans la région de la jonction peut être évité en restant à T_E .

La brasure or nickel (Nioro 82-18 à 950°C) est également couramment employée et préférée, elle ne nécessite pas en effet de traitement préalable de l'inox. Elle est cependant chère et l'activation de l'or peut poser des problèmes.

Peuvent être également utilisés des alliages quaternaires renfermant de l'argent et du cuivre sans cadmium. Cela permet de faire sur un même ensemble plusieurs cycles de brasage en descendant en température : (1020 XFC Castolin à 560° C) ; Palcusil Ag-Cu-Pd (15 solidus 850- liquidus 900°C ; 10 solidus 824- liquidus 852°C ; 5 solidus 807- liquidus 810°C) ; alliage Au-Cu (50-50 à 955-970°C) ; alliage Au-Cu (65-35 à 990°C-1010°C) ; alliage Ti-Cu-Ni est

également utilisé. Par contre, l'alliage 1802 de Castolin n'est pas recommandé car le cadmium provoque des corrosions à long terme.

Dans le cas où un brasage au chalumeau a été malgré tout effectué, il faut supprimer le flux décapant utilisé par un brossage à l'eau chaude et un traitement dans une solution acide appropriée (cuivreux 10-15 % d'acide sulfurique ; acier inox : 50% d'acide chlorhydrique). Après cette opération, il faut éliminer de l'assemblage la couche d'oxydes par un traitement approprié (voir procédure chapitre matériaux).

Parfois le cuivre est « soudé » à l'acier inox mais il s'agit là d'un procédé où seul le cuivre est fondu pour mouiller l'inoxidable.

5. L'exemple de l'aluminium :

Le procédé TIG et le BE sont recommandés. Le soudage de l'aluminium n'est pas acquis à priori. En effet, il est difficile de souder un métal qui fond à 660° C enfermé dans une gaine d'alumine qui, elle, ne fond qu'à 2050° C (température proche de la température d'évaporation de l'aluminium). Il faut, avant soudure, procéder à un brossage et à un grattage très soigneux pour éliminer mécaniquement toute l'alumine. En cas de soudage en courant continu, on utilise l'effet de choc des électrons pour casser la couche d'alumine (intensité réduite et pièce au pôle négatif), cependant on soude le plus souvent en courant alternatif. Il faut savoir que la présence d'humidité (hydrogène provenant de l'eau) dans le cas de l'aluminium provoque des porosités de soudure qui rendent le nettoyage par la suite difficile. Par conséquent, il faut procéder dans tous les cas, sur des pièces et dans un milieu secs. L'avidité de l'aluminium pour l'oxygène pendant le soudage doit être bloqué par un balayage convenable d'argon.

Seulement quelques alliages d'aluminium sont soudables. Il est par ailleurs difficile de combiner convenablement les différentes nuances de l'aluminium pour soudage (Ex : diffusion du cuivre et fissuration). L'aluminium très pur type 1100 est peut être le meilleur. Le type 6061, le plus généralement utilisé lorsqu'il faut combiner des qualités d'usinabilité et de soudabilité, est acceptable. D'autre part, les soudures de l'aluminium altèrent les propriétés mécaniques de chaque côté du cordon, notamment lorsque certaines caractéristiques sont obtenues par traitement thermique (série 2000, 6000). Il faut donc prendre la précaution de placer les soudures dans des zones peu sollicitées. Un traitement thermique peut cependant être envisagé pour rétablir les caractéristiques mécaniques initiales. De toute manière, il y a toujours une zone thermiquement affectée, zone où les caractéristiques sont celles du recuit (augmentation de l'écroutissage).

En technique de brasage, *les brasures fortes* de l'aluminium ($T > 450^{\circ} \text{C}$) sous atmosphère contrôlée ou sous vide sont là encore conseillées. L'alliage d'apport a une température d'utilisation voisine de 600° C (4045, 4004, 4104). Les métaux de base sont ceux dont la température de fusion est supérieure à 620° C (1050, 1100, 1200, 3003, 3105, 6060, 6063).

En raison de la très grande compétence exigée pour réaliser des soudures étanches de l'aluminium, il est le plus souvent souhaitable d'éviter ces conceptions. On retiendra ce matériau lorsque le savoir-faire nécessaire est disponible et que les propriétés, par rapport à l'acier inox, le justifient (par ex, l'aluminium est employé dans les systèmes de vide associés aux accélérateurs ou aux réacteurs parce qu'il n'y a aucun isotope à vie longue de l'aluminium ; il a également des qualités évidentes de conductibilité et de légèreté, etc....).

6. Remarques sur les jonctions par éléments filetés à l'intérieur des enceintes à vide :

Dans le cas où un élément fileté doit être mis sous vide, il faut éviter les volumes morts difficiles à pomper. Le grippage sous vide (pénétration inter métallique), notamment pour les petits diamètres, nécessite que l'on réalise sur les vis un dépôt de quelques microns d'un métal ductile (argenture ou aurure) afin de permettre le démontage éventuel

