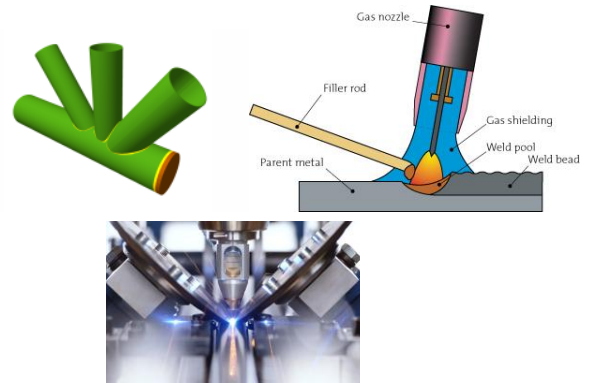


Cycle 2: Concevoir, étudier et réaliser des architectures et solutions technologiques

Chapitre 1 – Procédés d’obtention des assemblages durables

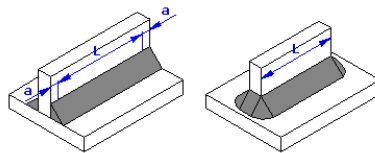
Quelles solution utilisent les industriels pour réaliser des assemblages durables (liaison encastrement non démontable) ?

Nous allons voir dans ce chapitre les techniques du soudage et ses règles de tracé, la technique du fretage et du collage.



Problématique

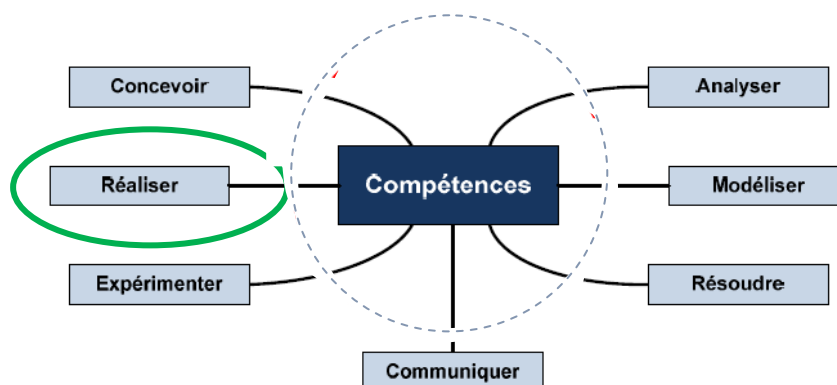
Quels sont les principaux procédés d’obtention des assemblages durables ? Comment les concevoir, quelles sont les règles de tracé ?



Savoir

F. Réaliser :

- Etudier l’incidence du procédé de soudage sur la conception des pièces
- Evaluer la capacité des procédés à réaliser les pièces
- Lire et justifier les étapes de réalisation d’un ensemble mécano-soudé





Procédés d'obtention des assemblages durables

Introduction

Les procédés de fabrication représentent l'ensemble des techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par **transformation de matière brute**. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la **construction mécanique**.

Voici les principaux procédés d'obtention par :

- **enlèvement de matière**
- **déformations plastiques**
- **fusion**

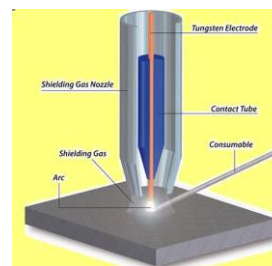
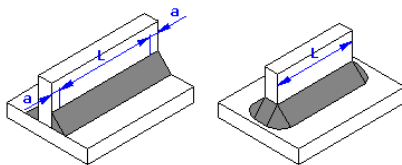
Les techniques d'assemblage ne font pas partie des procédés de fabrication, elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées.

L'assemblage est la technique permettant de lier, de **façon indémontable ou démontable**, 2 pièces entre elles. La liaison équivalente réalisée est un **liaison encastrement**.

On entend par liaison encastrement **indémontable**, une liaison que l'on ne peut pas démonter **sans détériorer des surfaces fonctionnelles au montage ou démontage**. La liaison indémontable est couramment répandue en aéronautique, navale, construction automobile, bref partout où l'on a besoin de réaliser **des assemblages durables**.

1. Le soudage

Souder, c'est réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage en assurant la continuité de la matière entre les parties à assembler. On vient assembler les éléments à l'aide **d'un métal d'apport** en fusion. Le soudage est dit **autogène** lorsque les pièces à assembler sont de même nature et participent à la réalisation du cordon sans métal d'apport.



Il existe beaucoup de procédés de soudage :

- **brasage,**
- **soudage oxyacétylénique (chalumeau),**
- **TIG (Tungstène Inert gaz),**
- **MIG-MAG (Metal Inert ou Active Gaz),**
- **électrode enrobée,**
- **laser....**

Procédés d'obtention des assemblages durables

1.1. Cycle thermique lors du soudage en phase liquide avec métal d'apport

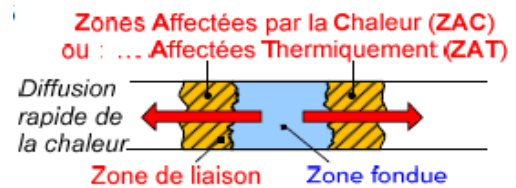


L'apport d'énergie nécessaire au soudage est très local et rapide. La température **croît très vite localement**, et la diffusion de chaleur dans le métal de base dépend du volume des pièces soudées, de leur géométrie, de la nature du métal...

La vitesse de refroidissement est telle que, selon les matériaux, on risque de **dépasser la vitesse critique de trempe** au début de la zone de liaison (**ZAC ou ZAT : zone affectée thermiquement**).

Le refroidissement donne un joint de soudure et une ZAC qui possède :

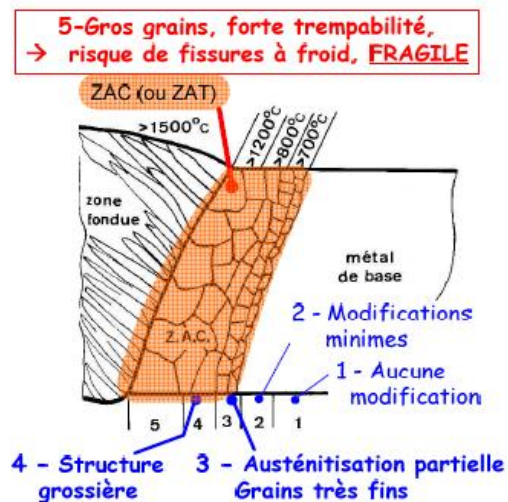
- un nouvel état cristallin
- une structure différente de celle du métal de base



1.2. Conséquences du cycle thermique rapide

1 : Modifications de structure du métal de la ZAC (mélange de MB et MA)

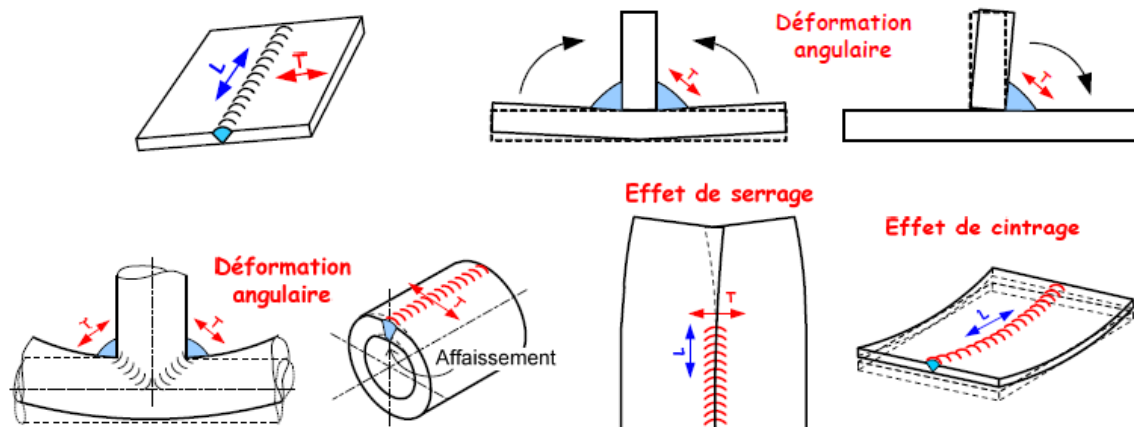
Ce cycle thermique rapide induit des modifications, principalement dans la ZAC.



2 : Dilatation et contraintes différentielles entre la zone soudée et le reste de la nouvelle pièce

→ apparition de tensions internes Longitudinales et Transversales

Exemples de déformations





Procédés d'obtention des assemblages durables

1.3. Soudabilité métallique

On considère qu'un **matériau métallique est soudable** s'il se prête, sous certaines conditions et précautions, à la **réalisation d'une construction**, en assurant la **continuité métallique** par la **constitution de joints soudés**.

Dans ce paragraphe est présenté uniquement un résumé sur la soudabilité des ACIER et FONTE, ALUMINIUM, CUIVRE.

ACIERS

⇒ **La trempabilité**

L'acier est le matériau le plus utilisé en soudage

Compte-tenu du cycle thermique, on conçoit que la **trempabilité du métal** de base est un paramètre important de soudabilité. La fragilité de la construction soudée en dépend (fissures, tensions internes...) La valeur du **taux de carbone devra être limité**.

⇒ **Le problème du carbone**

L'acier est un alliage Fer-Carbone et le carbone est très défavorable au soudage. Il crée une structure martensitique dans la ZAT composée de grains très durs et très fragiles (voir cours traitements thermiques).

Aciers **non alliés** : En général on se limite à : **C < 0,7 à 0,8 %**

Acier **alliés**

• Les éléments d'addition abaissent le taux de carbone compatible avec une bonne soudabilité.

⇒ **Les impuretés : soufre et phosphore**

Elles sont très défavorables à la soudure : **fragilité ↑ soufflures ↑ criques ↑**

FONTES

⇒ A cause du taux de carbone, l'**aptitude au soudage des fontes est MEDIOCRE**, car les fontes sont fragiles et hétérogènes. La ZAT devient très fragile.

⇒ Réserver le soudage des fontes pour le rechargement de pièces usées ou réparation

⇒ Mise en œuvre : effectuer un **pré-chauffage** puis un post-chauffage pour **limiter les écarts thermiques**

ALUMINIUM

⇒ L'aluminium a tendance à s'oxyder très vite en se recouvrant d'une couche d'alumine (Al_2O_3) qui fond à 2100° , rendant le **soudage très difficile** si on ne la détruit pas (décapage)

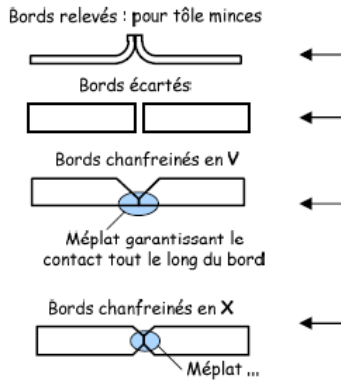
CUIVRE

⇒ Le cuivre étant très conducteur de la chaleur, cela nécessite une source de chaleur très puissante (**préchauffage**)

Procédés d'obtention des assemblages durables

1.4. Préparation de la forme du cordon

→ Soudure bord à bord



Il faut assurer une **bonne pénétration du métal d'apport** entre les bords en contact :

- ← dans le cas des tôles minces, la fusion des bords est meilleure en relevant ces bords
- ← dans le cas des tôles un peu plus épaisses l'écartement des bords peut suffire
- ← au delà il faut **chanfreiner les bords**
 - chanfrein d'un seul côté, mais les tensions sont dissymétriques d'une face à l'autre
 - chanfrein des 2 côtés à condition que le 2eme soit accessible (équilibre les tensions)

Sans préparation

→ Soudure par recouvrement

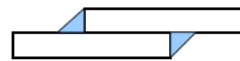
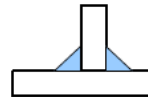


Fig 13

→ Soudure d'angle



Les **soudures bord à bord** avec chanfrein sont préférables aux soudures par recouvrement, car en flexion de l'assemblage, la soudure est sollicitée différemment :

- "bord à bord" : contrainte normale σ --> *meilleure résistance du matériau à σ qu'à τ*
- "recouvrement" : contrainte tangentielle τ

1.5. Les principaux procédés de soudage classés par apport d'énergie

Nature de l'énergie		Procédé de soudage
Thermochimique		<i>Aluminothermique (ex : soudage des rails de train)</i> <i>Oxyacétylénique (chalumeau)</i>
Electrique	Soudage à l'arc	<i>Manuel avec électrodes enrobées</i> <i>Sous protection gazeuse : électrode réfractaire (TIG)</i> <i>Plasma</i> <i>Sous protection gazeuse : électrode fusible (MIG et MAG)</i> <i>Sous flux solide (SAW = Submerged Arc Welding)</i>
	Soudage par résistance	<i>Par points</i> <i>Etincelage</i> <i>Induction</i>
Mécanique		<i>Friction</i>
Localisée (Flux de particules)		<i>Laser</i> <i>Bombardement électronique</i>

Procédés d'obtention des assemblages durables

Quelques détails techniques :

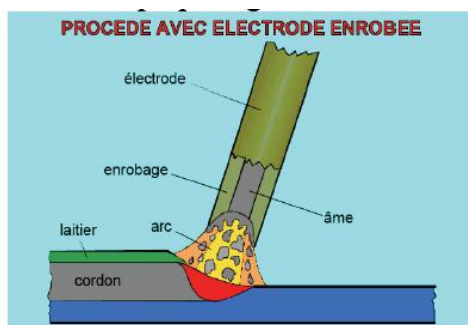
Soudage oxydoacétylénique : La chaleur nécessaire au soudage est fournie par la combustion d'un mélange d'oxygène et d'acétylène à l'extrémité d'un chalumeau. Le produit d'apport est une baguette nue.



https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=VfRQxxxLJuo
de 0:50 à 1:45



Electrode enrobée : La température de soudage est générée par l'**arc électrique entre deux électrodes** que constituent **la pièce à souder et la baguette de métal d'apport**. L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage. L'enrobage de l'électrode forme à la surface du cordon de soudure un laitier qui protège le bain de fusion.



https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=vetRusYduds
De 0:45 à 3:10

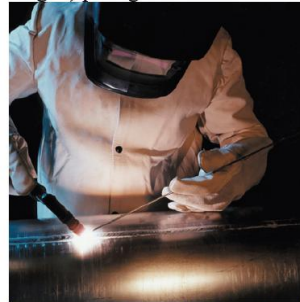
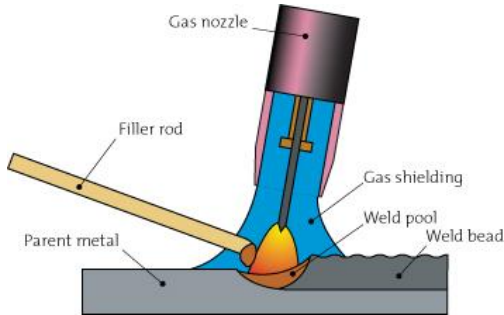
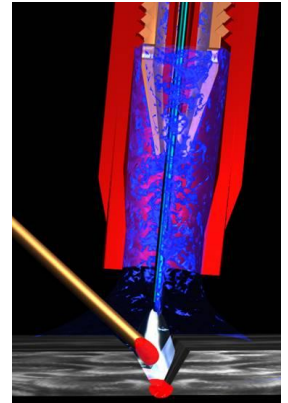


- réservé au soudage manuel
- rapidité de mise en œuvre, économique
- utilisation dans tous les milieux



Procédés d'obtention des assemblages durables

TIG : Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode réfractaire en tungstène (qui peut être en tungstène pur, thorié 1 % et 2 % ou en Zirconium mais celui-ci exclusivement pour le soudage de l'aluminium) et la pièce à souder, sous la protection d'un gaz inerte (argon, hélium ou mélange argon-hélium). Le métal d'apport est ajouté si nécessaire sous forme d'une baguette ou d'un feuillard placé dans l'arc électrique. Ce procédé peut s'automatiser voire se robotiser



https://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=ikZMH4mlWVg
De 0:05 à 0:43

Soudage sous protection gazeuse :

Electrode et métal d'apport distincts

[électrode (non fusible tungstène)]

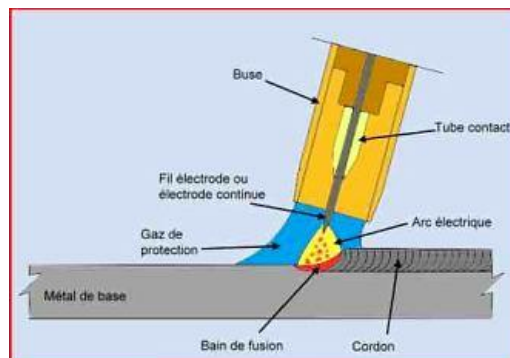
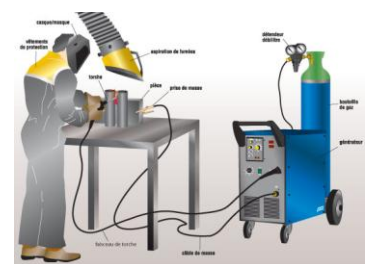
+ [métal d'apport éventuel]

+ [FLUX Argon ou Argon + Hélium]

**T.I.G.
(GTAW)**

- Soude presque tous les métaux
- précis, automatisable
- courant alternatif ou CC inversé pour aluminium, magnésium, cuivre
- ⇒ décapage de la couche d'oxyde

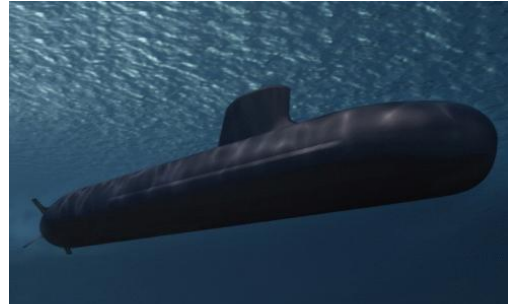
MIG-MAG : Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode consommable et la pièce à assembler, sous la protection d'un mélange gazeux dont la nature dépend du type de soudure réalisée. Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium), contrairement au procédé MAG (mélange d'argon avec du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en proportions variables selon les métaux à souder). L'électrode, amenée automatiquement de façon continue depuis un dévidoir, se présente sous la forme d'un fil massif ou fourré.





Procédés d'obtention des assemblages durables

Exemple: soudage coque SNLE Barracouda (DCN France) « Ainsi, les deux premiers anneaux formant la coque résistante du bâtiment ont été assemblés au terme d'une opération qui aura duré près de deux mois »



Soudage sous protection gazeuse : électrode fusible : **GMAW (Gas Metal Arc Welding)**

2 procédés : **M.I.G.** = Metal Inert Gaz [électrode] + [FLUX Argon, Hélium]

M.A.G. = Metal Activ Gaz [électrode] + [FLUX CO₂ ou mélange]

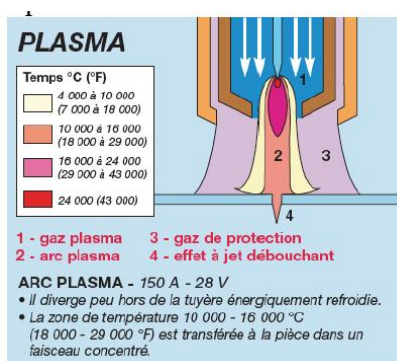
M.I.G.

→ Très bonne productivité (supérieure à T.I.G.)

M.A.G.

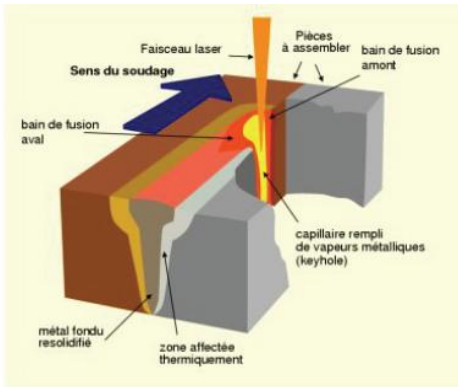
→ Très bonnes propriétés mécaniques et chimiques de la soudure

Soudage au plasma : En général le terme plasma s'applique aux milieux gazeux où il règne des températures supérieures à 3 000 °C à la pression atmosphérique. Dans l'échelle des températures, on peut considérer que c'est le quatrième état de la matière après les états solide, liquide et gazeux. Le soudage au plasma requiert, en plus du gaz central, un gaz extérieur. De même que pour le soudage TIG, l'arc électrique jaillit entre une électrode au tungstène non fusible et le matériau de base. Contrairement au soudage TIG, l'arc électrique est ici confiné de par la structure de la torche au moyen d'une buse en cuivre refroidie à l'eau, ce qui permet d'atteindre des densités d'énergie supérieures.

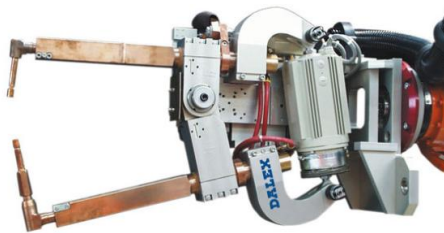


Soudage au laser : Le faisceau laser crée une source de **chaleur extrêmement concentrée** qui permet des soudages étroits, profonds, à une cadence rapide. Il apporte une très forte densité de puissance, de l'ordre du mégawatt par centimètre carré (MW/cm²), ce qui permet de n'avoir qu'une faible zone altérée par la chaleur tout en disposant d'une grande quantité de chaleur associée à une vitesse de refroidissement importante. Le diamètre du faisceau laser est de quelques 1/10 de mm. La profondeur de pénétration est proportionnelle à la puissance mise en oeuvre et dépend aussi de la position du point focal.

Procédés d'obtention des assemblages durables



Soudage par pression: Il regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en **général sans produit d'apport**, par application d'une pression suffisante pour obtenir une **déformation plastique des faces à souder**. Un chauffage localisé, obtenu à partir d'énergie électrique ou mécanique, permet ou facilite le processus. C'est l'effet Joule produit par un courant traversant l'assemblage qui permet le soudage par résistance. On distingue le « **soudage par points** », dans lequel la soudure est exécutée à l'endroit de la pièce située entre les électrodes, et le « **soudage à la molette** », dans lequel les pièces sont placées entre deux molettes exerçant un effort continu, le courant étant transmis par les molettes.



1.6. Les matériaux utilisés

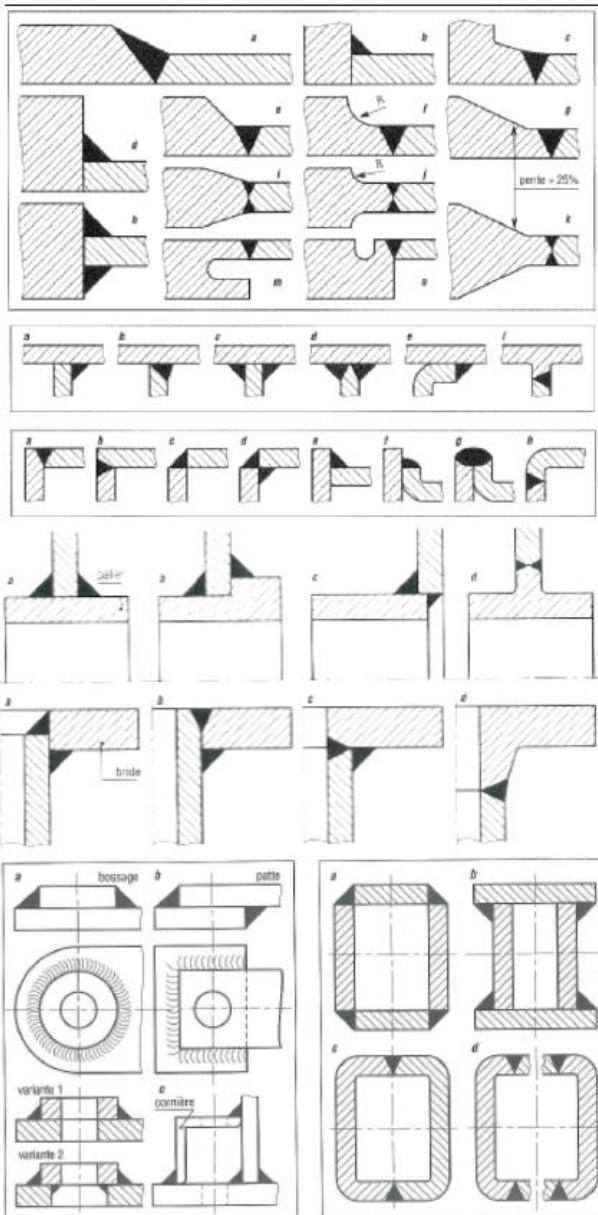
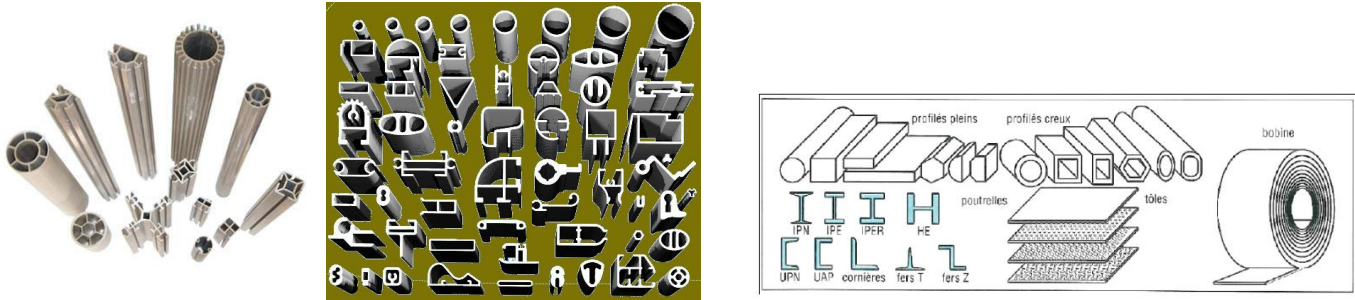
Matériaux d'application →	aciers		Alu et alliages	Cuivre et alliages	Fonte
	Alliés ou non alliés	Inoxydables			
Procédés de soudage à l'arc ↓					
Electrode enrobée	•	possible	possible	possible	possible
T.I.G. (GTAW)	•	•	•	•	
T.I.G. Plasma	•	•	•		
M.I.G. (GMAW)	•	•	• (délicat < 3 mm)	•	(MA =bronze au silicium)
M.A.G. (GMAW)	•		• (délicat < 3 mm)	•	(MA =bronze au silicium)



Procédés d'obtention des assemblages durables

2. Conception des pièces mécano soudées

Les pièces mécano-soudées sont obtenues à partir de **profilés soudés en eux**. Les profilés sont préalablement coupés et préparés (chanfreinés) avant l'opération d'assemblage par soudage.



Préparations et soudures usuelles entre pièces d'épaisseurs différentes.

Il faut s'efforcer de réduire les différences entre les épaisseurs.

Soudures en « T »

Soudures en « L »

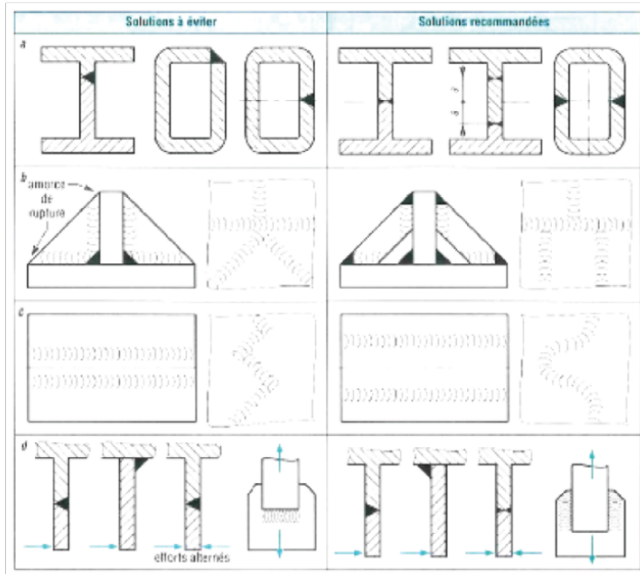
Soudures des paliers

Soudures des brides

Renforcements : les bâtis et structures peuvent être facilement renforcés en soudant divers profilés.

Les formes en caisson apportent une plus grande rigidité.

Procédés d'obtention des assemblages durables



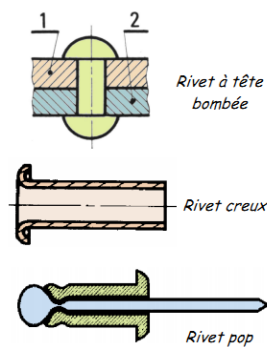
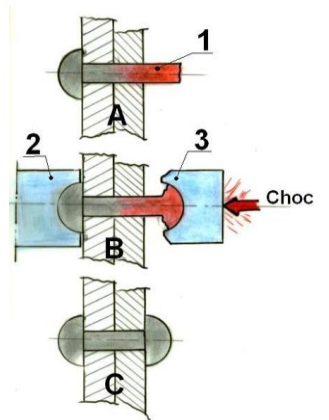
Recommandations :

- Disposer les cordons de soudure symétriquement pour éviter les déformations.
- Eviter les croisements de cordons ;
- Eviter les cordons trop rapprochés ;
- Disposer et choisir les cordons en fonctions des efforts exercés ;
- Eviter l'usinage des cordons ;
- Simplifier les solutions en utilisant le pliage (diminution du nombre d'éléments à souder) ;
- Préférer le boulonnage au soudage pour les éléments secondaires.

3. Le rivetage

Le **rivetage** est un assemblage de pièces à l'aide de **rivets**. C'est un assemblage définitif. Il permet un assemblage **très résistant et de faible encombrement**. On le trouve pour l'assemblage de chaudières, la construction en charpente métallique (bâtiments, ponts, ouvrages d'art,...), montage de grilles, portiques, rails. Les **structures d'avion** sont encore aujourd'hui quasiment toutes rivetées.

Ex : La tour Eiffel a été assemblée par 2 millions de rivets. Airbus A320 : 125000 rivets.





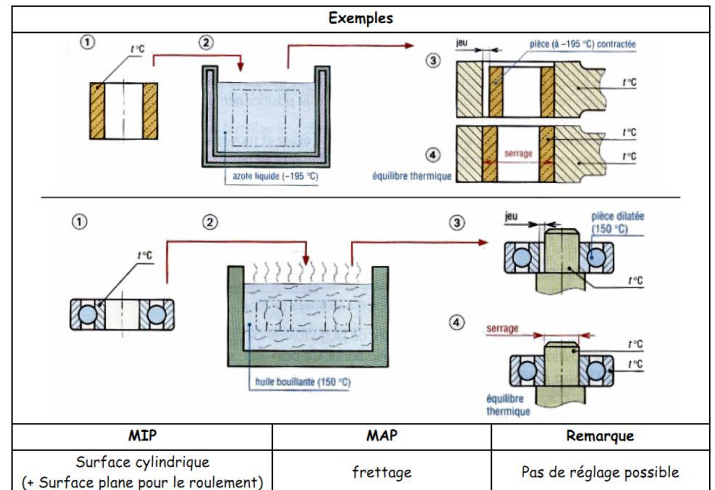
Procédés d'obtention des assemblages durables

4. Le frettage

Le **frettage** est l'assemblage de deux pièces grâce à un **ajustement serré (p6 mini)** sans complément de clavette ou goupille. La pièce extérieure est appelée « **frette** », la pièce intérieure est dite « **frettée** ».

L'assemblage est réalisé avec des **tolérances d'usinage serrées**. La solution la plus simple, quand elle est possible sans détérioration du matériau, est de **chauffer la frette** pour la dilater avant de l'enfiler sur l'élément qu'il faut fretter. *On peut à l'inverse refroidir l'élément intérieur à l'azote liquide ou à la glace carbonique pour le contracter et l'engager dans la frette, mais ces solutions sont plus onéreuses.*

La **pression du contact** allié au **coefficient de frottement** entre les 2 pièces crée des efforts tangentiels pouvant transmettre des couples importants.



5. Le collage

Le collage offre de **nombreux avantages** par rapport aux techniques d'assemblages précédentes et est désormais utilisé dans tous les secteurs de l'industrie. Le collage est parfaitement adapté à l'assemblage de **matériaux différents, minces ou fragiles**. Il faut pour réussir un bon assemblage collé, respecter de **bons états de surface** (préparation chimique), bien tenir compte des **coefficients de dilatation** des matériaux, et **choisir la colle adaptée**.

