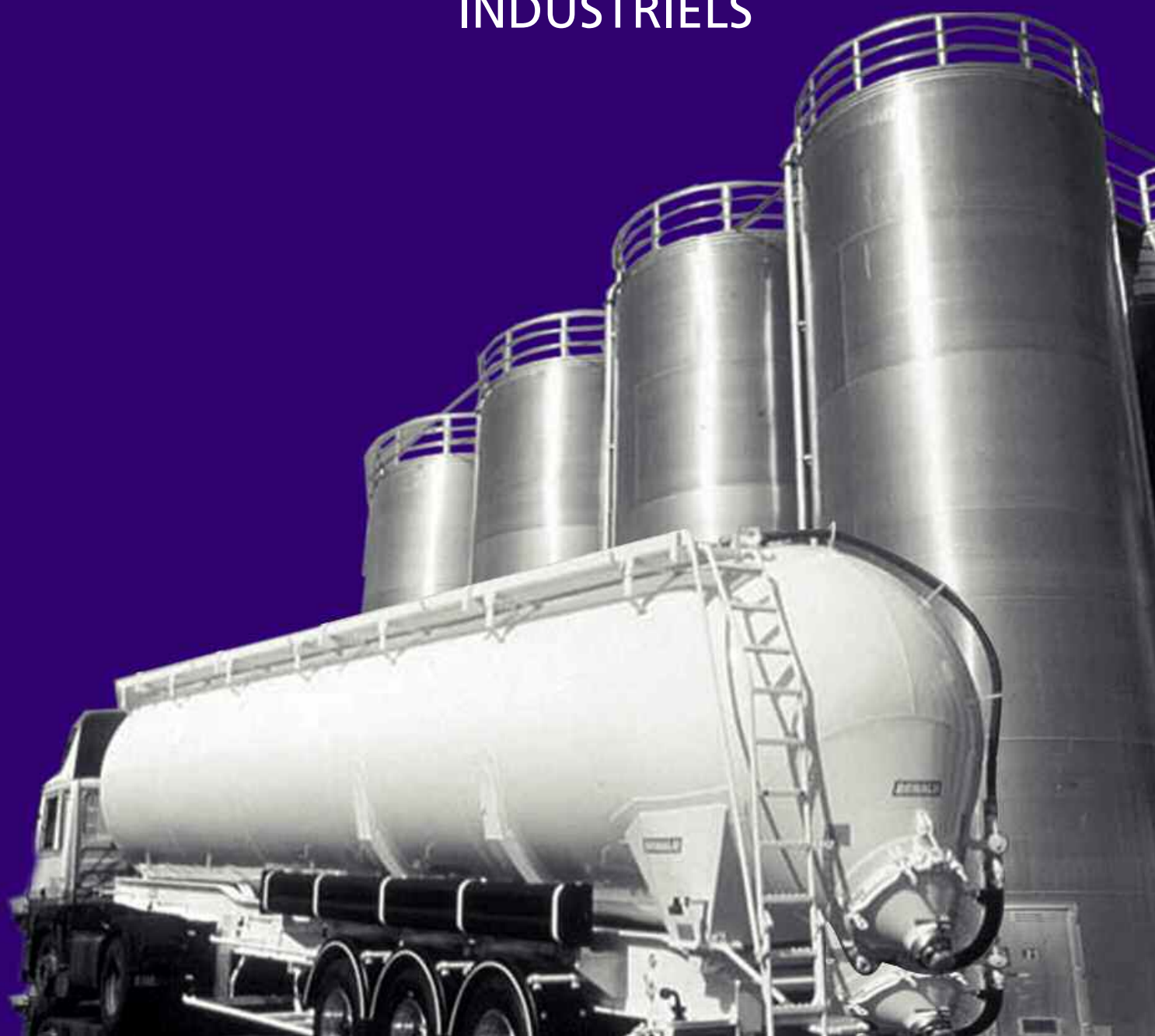




L'ALUMINIUM DANS LES VÉHICULES INDUSTRIELS





AVANT-PROPOS

L'aluminium dans les véhicules industriels est rédigé par l'European Aluminium Association (EAA) pour répondre aux besoins des fabricants et des utilisateurs de véhicules industriels. C'est un recueil d'informations de base sur certains aspects de l'aluminium, notamment :

- Les arguments en faveur de l'utilisation de l'aluminium dans cette application
- Les principaux alliages de laminage, de filage et de moulage à la disposition des fabricants de véhicules industriels : leurs propriétés, leurs caractéristiques mécaniques, etc.
- La conception et le calcul de structures, la tenue en fatigue, le comportement en collision
- La mise en œuvre des demi produits : fabrication, soudage et autres techniques d'assemblage
- La résistance à la corrosion des alliages d'aluminium dans les conditions de service des véhicules industriels
- Les traitements de surface
- Le nettoyage et la réparation

Ce document présente un intérêt particulier pour les ingénieurs de conception et de fabrication, pour les responsables de la maintenance et de la réparation et, plus généralement, pour tous ceux qui portent un intérêt aux applications et au développement de l'aluminium dans le transport routier.

Etant donné les limites évidentes d'un tel ouvrage, il n'est pas possible de traiter dans le détail de tous les aspects du sujet. Nous avons choisi de présenter ce que nous considérons comme étant les concepts les plus récents. Nous avons indiqué les normes les plus pertinentes auxquelles le lecteur peut se reporter pour une information plus complète.

Les informations dans cette publication sont données à titre indicatif et ne sont pas utilisables pour une application directe à un projet spécifique technique ou scientifique. **L'European Aluminium Association** ne peut être tenue pour responsable d'un quelconque dommage, coût ou dépense résultant de l'usage des informations contenues dans cette publication. Pour une information complémentaire, le lecteur est invité à prendre contact avec son fournisseur d'aluminium.



SOMMAIRE

| | | |
|------|--|----|
| I. | AVANT-PROPOS | 3 |
| II. | L'ALUMINIUM DANS LES TRANSPORTS | 7 |
| 1. | Un siècle d'applications de l'aluminium dans les transports .. | 8 |
| 2. | L'évolution des véhicules industriels | 12 |
| 3. | Les applications de l'aluminium, exemples d'allègement .. | 13 |
| 4. | Les préoccupations actuelles | 13 |
| III. | RETOUR RAPIDE SUR INVESTISSEMENT ... | 15 |
| 1. | Retour rapide sur investissement | 16 |
| 2. | Les propriétés de l'aluminium | 18 |
| 3. | La protection de l'environnement et la sécurité routière .. | 22 |
| 4. | Sur la route et en service | 25 |
| IV. | QUESTIONS FRÉQUENTES CONCERNANT L'ALUMINIUM DANS LES VÉHICULES INDUSTRIELS | 29 |
| 1. | L'aluminium | 30 |
| 2. | Les châssis en aluminium | 32 |
| 3. | Les bennes basculantes en aluminium | 35 |
| 4. | Les citernes en aluminium | 37 |
| V. | LES ALLIAGES D'ALUMINIUM POUR LES VÉHICULES INDUSTRIELS | 39 |
| 1. | Avant-propos | 40 |
| 2. | Désignations internationales des alliages d'aluminium ... | 41 |
| 3. | Désignations des états métallurgiques de base | 42 |
| 4. | Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage (états H) ... | 42 |
| 5. | Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium à durcissement structural (états T) | 43 |
| 6. | Les alliages usuels pour la construction des véhicules industriels | 44 |
| 7. | Influence de la température sur les propriétés mécaniques .. | 50 |
| 8. | Influence de la mise en œuvre sur les propriétés des alliages | 52 |
| 9. | Liste des normes | 55 |
| VI. | CONCEPTION ET CALCUL | 57 |
| 1. | Introduction | 58 |
| 2. | Les atouts de l'aluminium | 58 |
| 3. | Les symboles | 58 |
| 4. | Comparaison de l'aluminium avec l'acier | 59 |
| 5. | Calculs aux états limites | 62 |
| 6. | L'état limite de service | 64 |
| 7. | Conception aux états limites ultimes | 64 |
| 8. | La fatigue | 76 |
| 9. | Cas particuliers | 86 |
| 10. | Références | 89 |



| | |
|--|-----|
| VII. LA MISE EN ŒUVRE | 91 |
| 1. Introduction | 92 |
| 2. Mise en œuvre des demi produits laminés | 93 |
| 3. Mise en œuvre des demi produits filés | 98 |
| 4. Le perçage | 102 |
| 5. Le taraudage | 103 |
| 6. L'emboutissage profond | 104 |
| 7. Le repoussage | 105 |

| | |
|--|-----|
| VIII. LE SOUDAGE | 107 |
| 1. Avant-propos | 108 |
| 2. Le soudage TIG (tungsten inert gas) | 109 |
| 3. Le soudage MIG (metal inert gas) | 110 |
| 4. Le soudage plasma MIG | 118 |
| 5. Le soudage au laser | 118 |
| 6. le soudage mixte MIG laser | 119 |
| 7. Le soudage par résistance | 120 |
| 8. Le soudage par friction FSW (Friction Stir Welding) | 120 |
| 9. Préparation de surface avant soudage | 122 |
| 10. Le contrôle de qualité | 123 |
| 11. Calcul et prévention des déformations | 126 |

| | |
|--|-----|
| IX. LES AUTRES MODES D'ASSEMBLAGE | 129 |
| 1. Le collage | 130 |
| 2. Le vissage et boulonnage | 133 |
| 3. Le rivetage | 133 |
| 4. Le clippage | 135 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| X. DÉCORATION ET FINITION | 137 |
| 1. Avant-propos | 138 |
| 2. Les protections de l'aluminium | 138 |
| 3. Les finitions mécaniques | 139 |
| 4. Les décorations chimiques | 141 |

| | |
|---|-----|
| XI. LA RÉSISTANCE À LA CORROSION | 145 |
| 1. Définition de la corrosion | 146 |
| 2. La corrosion de l'aluminium | 146 |

| | |
|--|-----|
| XII. LE NETTOYAGE DES VÉHICULES INDUSTRIELS | 153 |
| 1. Introduction | 154 |
| 2. La nature des saletés | 154 |
| 3. Le choix des détergents | 155 |
| 4. L'application des détergents | 155 |

| | |
|---|-----|
| XIII. LA RÉPARATION DES VÉHICULES INDUSTRIELS EN ALUMINIUM | 157 |
| 1. Avant-propos | 158 |
| 2. L'exécution de la réparation | 159 |
| 3. La réparation des châssis en aluminium | 159 |
| 4. La réparation des soudures TIG et MIG | 160 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| Liste des auteurs et crédits photos | 162 |
|-------------------------------------|-----|



CHAPITRE II

L'ALUMINIUM DANS LES TRANSPORTS

| | |
|--|----|
| 1. UN SIÈCLE D'APPLICATIONS DE L'ALUMINIUM DANS LES TRANSPORTS | 8 |
| 2. L'ÉVOLUTION DES VÉHICULES INDUSTRIELS | 12 |
| 3. LES APPLICATIONS DE L'ALUMINIUM, QUELQUES EXEMPLES D'ALLÈGEMENT | 13 |
| 4. LES PRÉOCCUPATIONS ACTUELLES | 13 |

1. Un siècle d'applications de l'aluminium dans les transports



Airbus A380

En 1903, les frères Wright écrivent une page de l'histoire de l'aviation en réalisant le premier vol mondial propulsé par un moteur allégé à l'aide d'éléments en aluminium.

Aujourd'hui, l'aluminium joue un rôle essentiel dans l'industrie aéronautique. Il représente plus de 60% du poids structurel de l'Airbus A380, et jusqu'à 80% pour les appareils destinés aux courts et moyens-courriers.

C'est dans les années 1920 que les applications marines de l'aluminium ont commencé à se répandre grâce au développement de nouveaux alliages pour ce marché.

Bateau de croisière avec superstructure en aluminium



Aujourd'hui, plus de 1 000 navires à grande vitesse sont en service. La coque de la plupart d'entre eux est en aluminium, les superstructures sont toujours en aluminium.

Les superstructures des paquebots de croisière sont généralement en aluminium, et plus de la moitié des yachts de luxe ont leurs coques en aluminium.

Ces navires tirent pleinement profit de la légèreté et de la résistance mécanique de l'aluminium,

Catamaran UAI50 (Babcock)



TGV Duplex (Alstom-SNCF)



ainsi que de sa tenue à la corrosion, propriété indispensable dans les environnements marins.

Dans les années 1980, l'aluminium devient le métal de prédilection pour réduire les coûts d'utilisation et augmenter l'accélération des métros, des tram-

ways, des trains inter-urbains (TER) et des trains à grande vitesse (TGV).

En 1996, la SNCF met en service le TGV Duplex. Il permet de transporter 40% de passagers supplémentaires et, grâce à sa structure en aluminium, il pèse

12% de moins que la version en acier à un seul étage.

Aujourd'hui, des métros et des tramways en aluminium sont en service dans la plupart des capitales européennes et des trains en aluminium sont utilisés dans toute l'Europe.



Capot de voiture en aluminium

En 1899, une petite voiture de sport montée sur châssis en aluminium est présentée à l'exposition automobile internationale de Berlin. En 1948, Land Rover commence à utiliser des tôles en aluminium pour ses carrosseries.

Aujourd'hui, à côté de voitures haut de gamme où il y a beaucoup d'aluminium – telles que l'Audi A8, nombreuses sont celles qui en contiennent des quantités importantes.

La quantité moyenne d'aluminium utilisée dans les voitures particulières s'élevait déjà à 130 kg en 2005. La même année, une voiture sur quatre, construite en Europe, était dotée d'un capot en aluminium et près d'un tiers des voitures européennes étaient déjà équipées de pare-chocs en aluminium.

Pare-chocs en aluminium préparé pour crash test



2. L'évolution des véhicules industriels

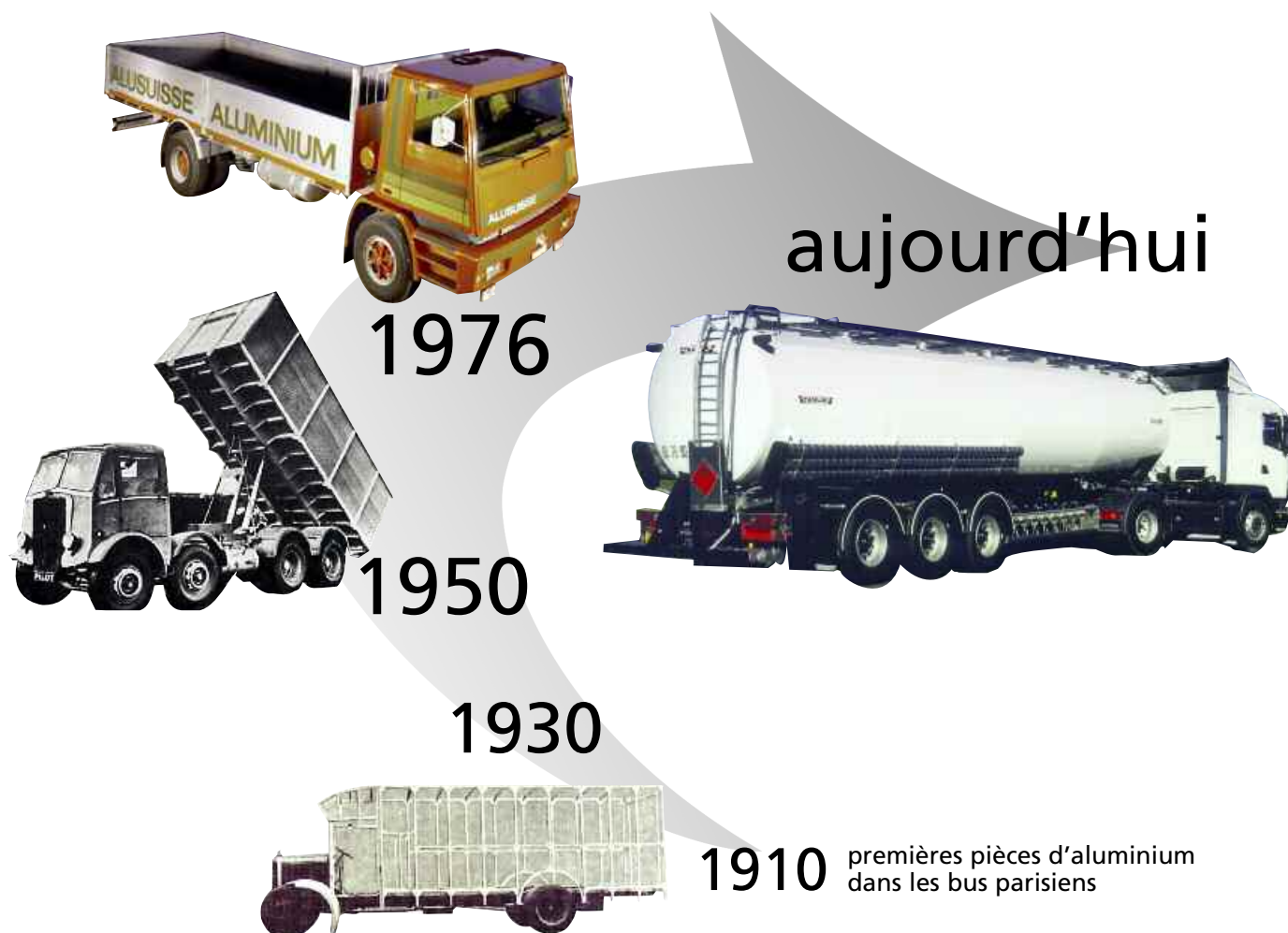
Utilisé pour la première fois en 1910 dans les autobus parisiens, l'aluminium entre dans la construction des véhicules industriels dans les années 1930. Les premières citernes, fourgons et bennes en aluminium sont mises

en service dans la décennie 1950.

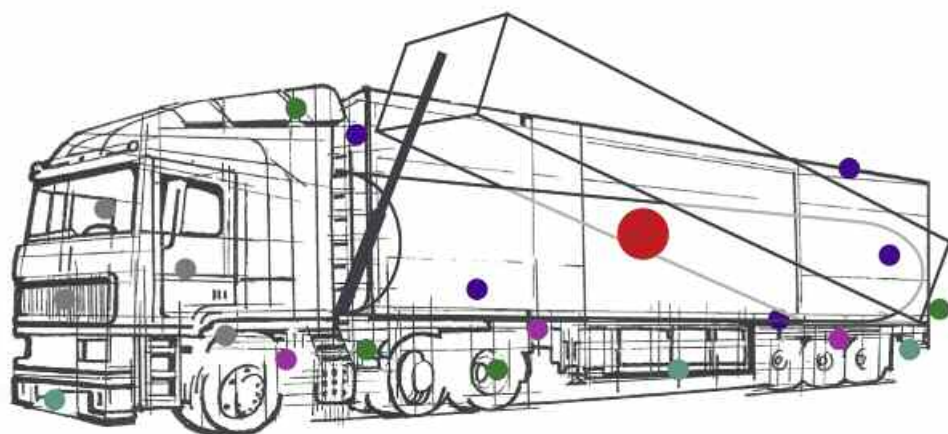
Aujourd'hui, la plupart des semi-remorques, silos et citernes sont entièrement construits en aluminium. Ce dernier est aussi fréquemment utilisé pour les fourgons, les

bennes, les fonds mouvants, et une multitude de pièces.

Dans le parc actuel des véhicules industriels européens, l'emploi de l'aluminium permet d'économiser en moyenne 800 kg par véhicule.



3. Les applications de l'aluminium, quelques exemples d'allègement



- Composants pour tracteurs & camions rigides
 - cabine & portes : -200 kg
 - châssis : -350 kg
 - pièces moteur et transmission : -125 kg
 - pièces de suspension : -110 kg

- Superstructures complètes
 - fourgon rigide : 90 m² = -800 kg
 - benne : -800 à -2000 kg
 - citerne hydrocarbures : 43000 l = -1100 kg
 - fonds mouvant
 - silo

- Composants pour superstructures
 - coulisses pour bâches : 2x13.5 m = -100 kg
 - face avant : -85 kg
 - porte arrière : -85 kg
 - ridelles : 600 mm = -240 kg
 - ranchers : 10x600 mm = -50 kg
 - plancher pour véhicule frigorifique

- Pièces de sécurité
 - pare-choc avant : -15 kg
 - pare-choc arrière : -15 kg
 - pare-chocs latéraux : -20 kg
 - systèmes anti-encastrément avant et arrière

- Structures de semi-remorques
 - châssis : 13.5 m = -700 kg
 - châssis : 6 m = -300 kg
 - châssis+plancher : 13,5 m = -1100 kg
 - béquilles : -35 kg

- Accessoires
 - bouteilles d'air comprimé : 6x60 l = -54 kg
 - réservoir à carburant : 600 l = -35 kg
 - boîte à outils : -15 kg
 - hayon élévateur : -150 kg
 - roues : 14 jantes = -300 kg

4. Les préoccupations actuelles

La rentabilité est la préoccupation majeure des transporteurs. L'augmentation du prix du gazole et le coût de l'investissement dans les nouvelles technologies des moteurs accroissent les coûts d'exploitation alors qu'il est très difficile de répercuter ces hausses de prix à la clientèle du fait de la concurrence très vive entre les transporteurs. Il en résulte que le retour sur investissement doit être très court. Par conséquent, les constructeurs de véhicules industriels doivent améliorer les performances de leur matériel à moindre coût. Le choix d'un matériau dépend de son prix, de ses propriétés mécaniques et de son impact sur le coût final de production du véhicule industriel.

Du point de vue politique, l'efficacité énergétique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la sécurité routière viennent en tête de liste des priorités des autorités de l'Union Européenne.

Le but du chapitre suivant est de montrer comment l'aluminium contribue à répondre à ces défis.



POURQUOI UTILISER L'ALUMINIUM ?

| | |
|---|----|
| 1. RETOUR RAPIDE SUR INVESTISSEMENT | 16 |
| 1.1. Charge utile accrue + Valeur résiduelle plus élevée = Revenus supplémentaires | 16 |
| 1.2. Economie de carburant + Longue vie + Entretien réduit = Réduction des coûts | 16 |
| 1.3. Faites vos comptes | 16 |
| 1.4. Les péages routiers | 17 |
| 1.5. Réduction des risques d'accident du travail | 17 |
| 2. LES PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM | 18 |
| 2.1. Rapports "Résistance/Poids" et "Rigidité/Poids" élevés | 18 |
| 2.2. Durabilité | 19 |
| 2.3. Stabilité | 20 |
| 2.4. Diversité et fonctionnalité des demi produits, des produits forgés et moulés | 20 |
| 2.5. Facilité de mise en œuvre | 21 |
| 3. LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE | 22 |
| 3.1. L'aluminium réduit les émissions de CO ₂ | 22 |
| 3.2. L'aluminium et les normes EURO IV & EURO V | 22 |
| 3.3. L'aluminium contribue à la sécurité routière | 23 |
| 3.4. L'aluminium se recycle facilement et économiquement | 24 |
| 4. SUR LA ROUTE ET EN SERVICE | 25 |
| 4.1. Un aspect soigné durable | 25 |
| 4.2. L'aluminium est facile à réparer | 26 |

1. Retour rapide sur investissement

1.1. Charge utile accrue + Valeur résiduelle plus élevée = Revenus supplémentaires

L'aluminium réduit le poids mort du véhicule. Avec les marchandises lourdes, qui saturent généralement le poids total autorisé en charge (PTAC), les alliages d'aluminium permettent de charger davantage de marchandises, ce qui se traduit par des revenus supplémentaires et/ou une compétitivité accrue.

En outre, les véhicules d'occasion en aluminium ont beaucoup de succès sur le marché de seconde, et même de troisième main, où ils sont généralement vendus à très bon prix. Enfin, lorsqu'ils atteignent la fin de leur durée de service, les véhicules industriels en aluminium

conservent encore une valeur résiduelle élevée. Cette situation est due au fait que l'aluminium se recycle facilement, sans perdre ses qualités et en économisant 95% de l'énergie qui serait nécessaire pour son obtention à partir de minerai.

1.2. Economie de carburant + Longue vie + Entretien réduit = Réduction des coûts

Une étude menée par l'IFEU¹ en coopération avec TU-Graz² a abouti à la conclusion qu'une tonne économisée sur le poids total d'un véhicule industriel permet de réaliser une économie de carburant de 0,6 litres/100 km. Cette économie est réalisable lorsque le poids total du véhicule est inférieur au PTAC, c'est-à-dire lors du transport de marchandises volumineuses, ou lors des

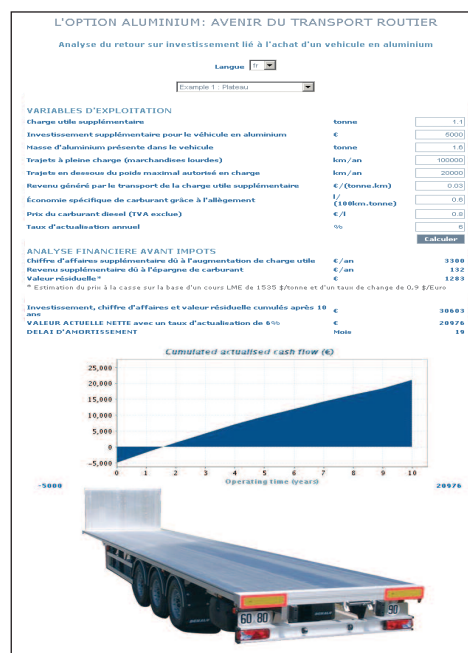
retours à vide ou des tournées partiellement chargées. La très bonne résistance à la corrosion de l'aluminium constitue un atout évident dans le transport routier. Elle contribue à une longue durée de vie, en particulier pour les véhicules en service dans des conditions et des milieux agressifs (atmosphère marine, ambiance industrielle, etc.) Aucune protection, peinture ou traitement de surface, n'est indis-

pensable. Le nettoyage est facile. L'entretien des véhicules industriels en aluminium est donc réduit au minimum.

1.3. Faites vos comptes

www.alutransport.eu vous aide à calculer vous-même le retour sur investissement avec un véhicule

industriel en aluminium, selon l'exemple ci-contre.



1. Institut für Energie und Umwelt Forschung, Heidelberg, Allemagne

2. Université Technique de Graz, Autriche



Barrière de péage

1.4. Péages routiers

Conformément au principe “utilisateur-payeur”, un nombre croissant de pays européens appliquent des péages routiers. Ils augmentent le coût du transport au kilomètre. Accroître la charge utile en recourant à l'aluminium permet de répartir le coût du péage sur un tonnage de fret plus élevé.

Dans les pays où le péage routier ne s'applique qu'au dessus d'un PTAC déterminé, des “mini semi remorques” allégées, grâce à l'emploi de l'aluminium, permettent au transporteur de conserver une bonne charge utile tout en restant au dessous du seuil de PTAC payant.

1.5. Réduction des risques d'accident du travail

Les pièces mobiles qui sont manipulées lors de chaque livraison, telles que les ridelles et les portes, sont plus légères à déplacer lorsqu'elles sont en aluminium. Les conducteurs économisent ainsi beaucoup d'efforts. Le risque de blessure en est réduit.

L'usage de profilés aux angles arrondis ou de tôles formées pour les planchers et les carrosseries réduit les risques d'écorchure.

Mini fourgon (Tang Fahrzeugbau)



2. Les propriétés de l'aluminium

2.1. Rapports "Résistance/Poids" et "Rigidité/Poids" élevés

Les alliages d'aluminium employés dans la construction des véhicules industriels ont un rapport résistance/poids et rigidité/poids comparable à la plupart des métaux et alliages performants tels que les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) et le titane.

Ces propriétés, parmi de nombreuses autres, sont prises en compte lors de la conception d'un véhicule.

Transposer purement et simplement

une solution aluminium à partir d'une conception acier ne permet pas d'optimiser l'allègement.

Les conceptions optimisées avec l'aluminium sont basées sur des sections tenant compte du module d'élasticité de l'aluminium (70 GPa), les longerons sont de 20 à 40% plus hauts que ne le seraient leurs équivalents acier.

En ménageant des transitions douces et en utilisant des modes d'assemblage adéquats, il est

tout à fait possible de gagner 40 à 60% en poids par rapport aux métaux concurrents, comme cela est expliqué ci-dessous.

Le calcul de structure dont les résultats sont indiqués ci-après, suivant chacun des deux critères : "égale résistance" et "égale rigidité" par rapport à une poutre de référence en acier courant, donne une idée des gains minimum et maximum de poids réalisables avec l'aluminium.

Comparaison de poutres de légèreté optimisée, avec 3 métaux différents et selon deux critères de conception

| DEFINITIONS | | | | | | |
|---------------------------|-----------|--|-----------|--|---------------------|--|
| | Acier E35 | | Acier HLE | | Alliage d'aluminium | |
| Limite d'élasticité (MPa) | 350 | | 760 | | 250 | |
| Module d'élasticité (MPa) | 210000 | | 210000 | | 70000 | |
| Densité (kg/m³) | 7800 | | 7800 | | 2700 | |

| À RÉSISTANCE ÉGALE | | | | À RIGIDITÉ ÉGALE | | | |
|----------------------|-----------|-----------|---------------------|----------------------|-----------|-----------|---------------------|
| | Acier E35 | Acier HLE | Alliage d'aluminium | | Acier E35 | Acier HLE | Alliage d'aluminium |
| Résistance | 1 | = 1 | = 1 | Résistance | 1 | < 2.17 | > 1.54 |
| Rigidité | 1 | > 0.30 | < 0.56 | Rigidité | 1 | = 1 | = 1 |
| Poids | 1 | > 0.71 | > 0.42 | Poids | 1 | = 1 | > 0.55 |
| Hauteur de la poutre | 1 | > 0.65 | < 1.18 | Hauteur de la poutre | 1 | = 1 | < 1.40 |

Comparaison inéquitable!

Patrouilleur américain en aluminium
non revêtu



A résistance égale :

- La poutre en aluminium est la plus légère, mais elle est moins rigide que la poutre en acier courant.
- La poutre en acier à haute limite élastique (HLE) se classe en second en termes de légèreté, néanmoins sa rigidité est la plus faible
- La solution en aluminium est à peu près 60% plus légère que la solution en acier traditionnel (0,42 contre 1). Elle est encore 40% plus légère que la solution en acier HLE (0,42 contre 0,71).

A rigidité égale :

- La poutre en aluminium est la plus légère et elle procure un gain de poids de 45% (0,55 contre 1).
- La poutre en acier HLE a le même poids que la poutre en acier traditionnel parce que les deux matériaux ont le même module d'élasticité, à savoir, celui de l'acier ordinaire,
- Par rapport à la poutre en acier courant, celle en aluminium est d'environ 50% plus résistante, et la poutre en acier HLE, d'environ 120%.

Comparer une poutre en aluminium de même rigidité qu'une poutre en acier ordinaire à une poutre en acier HLE de même résistance qu'une poutre en acier ordinaire, montre qu'avec l'aluminium, le gain de poids est très faible 0,55 contre 0,71. Mais cette comparai-

son n'est pas équitable, étant donné que la poutre en aluminium sera beaucoup plus résistante (1,54 contre 1) et plus rigide (1 contre 0,30).

Enfin et surtout, il convient de souligner que le poids peut être davantage optimisé avec l'aluminium parce que :

- La comparaison ci-dessus est basée sur une poutre standard, appelée « double T »,
- La modélisation par le calcul aux éléments finis permet une définition précise de la géométrie de section la plus favorable,
- Ces sections, même si elles sont très complexes, peuvent être facilement réalisées avec des profilés en aluminium,
- Pour les pièces dont la résistance est le critère dominant, il existe des alliages d'aluminium à haute limite d'élasticité en mesure de procurer davantage d'allègement.

2.2. Durabilité

Il faut rappeler aux transporteurs qui craignent encore les problèmes liés aux châssis de semi-remorques en aluminium dans des conditions d'utilisation sévères, que la durée de vie d'un véhicule ne dépend pas du matériau si la conception du véhicule est appropriée.

Les constructeurs expérimentés optimisent la conception en fonction du matériau utilisé. Ils sont capables de produire des châssis en aluminium offrant une durée de vie équivalente, voire plus longue, mais à un poids sensiblement inférieur à celui de modèles conventionnels.

Il est également important de rappeler que les véhicules industriels en aluminium opèrent dans des segments de transport où les facteurs de charge sont les plus élevés (vrac solide et liquide, travaux publics, etc.).

En d'autres termes, ils sont utilisés de manière beaucoup plus intensive que les véhicules conventionnels et ce paramètre est pris en compte dans la conception des véhicules en aluminium.

Correctement mis en œuvre, les alliages d'aluminium offrent une résistance optimale à la corrosion dans tous les environnements. Un seul exemple pour illustrer ce propos : l'utilisation très répandue d'aluminium non peint dans les applications marines.

2.3. Stabilité

Atteindre la Classe A³ de stabilité au bennage selon les critères de l'IRTE⁴ ne pose pas de problème pour un châssis en aluminium, comme l'ont confirmé les tests effectués en Angleterre au cours de l'été 2002.

En effet, un véhicule tout aluminium, sensiblement plus léger que les autres, a réussi le test IRTE Classe A, à 44 tonnes avec son châssis standard, montrant ainsi qu'un design approprié est tout à fait en mesure d'allier légèreté et rigidité.

3. La Classe A indique qu'un véhicule dont la benne est pleinement chargée et levée peut se pencher latéralement de 7° sans se renverser.

4. Institute of Road Transport Engineers, Royaume Uni.



Test de stabilité au bennage (STAS)

2.4. Diversité et fonctionnalité des demi produits, des produits forgés et moulés

Les bureaux d'étude et les fabricants de véhicules industriels ont un large éventail de demi produits en alliages d'aluminium dans lequel ils peuvent choisir :

- En demi produits laminés : des tôles, des tôles relief, des tôles pré laquées

- En extrudés : des profilés tubulaires ou pleins, standards ou personnalisés
- Des produits forgés et des produits moulés

Divers demi produits en aluminium



La diversité des demi produits, la possibilité d'utiliser des profilés, des pièces moulées ou des produits forgés de forme complexe facilite :

- Le design des éléments de structure avec des fonctions complémentaires telles que chanfreins pour les têtes de vis, des circuits hydrauliques, des masses d'inertie, des assemblages autobloquants, de bords pour le soudage,
- La diminution du temps et du coût d'assemblage et de finition. Elle peut compenser le surcoût des fournitures en alliages d'aluminium par rapport à leurs équivalents en acier,
- La diminution des contraintes dues au soudage en plaçant des pièces moulées aux nœuds d'as-

semblages ou en utilisant des profilés spéciaux pour écarter les contraintes de soudage vers des zones moins sollicitées de la structure soudée.

2.5. Facilité de mise en œuvre

Les alliages d'aluminium utilisés dans la construction des véhicules industriels et de leurs accessoires sont tous faciles à mettre en œuvre. Ils se prêtent facilement à toute sorte de mise en forme et de modes d'assemblage qui sont passés en revue aux chapitres VII, VIII et IX.

C'est ainsi que l'aluminium peut être facilement

- découpé à la scie, à la cisaille, au jet d'eau, au laser ou au plasma
- usiné, fraisé, percé
- courbé
- assemblé par soudage, collage, boulonnage et rivetage

De plus, étant léger, l'aluminium est facile à manipuler en atelier.

3. La protection de l'environnement et la sécurité routière

3.1. L'aluminium réduit les émissions de CO₂

Pour réduire les émissions de CO₂, il ne suffit pas de développer des moteurs moins polluants, mais aussi de les utiliser de la manière la plus rationnelle qui soit. Alléger avec l'aluminium est une bonne manière d'atteindre cet objectif.

L'aluminium contribue à réduire les émissions de CO₂ provenant du transport routier de la manière suivante :

- Avec les marchandises lourdes, il est possible de transporter davantage de marchandises, donc d'améliorer la performance du transport. Dans ce cas, une tonne gagnée sur le poids mort d'un ensemble tracteur et semi-remorque permet d'économiser 1 500 litres de gazole par 100 000 km parcourus.
- Avec les marchandises peu denses et volumineuses, l'aluminium réduit le poids total et la consommation de carburant au kilomètre. Dans ce cas, une tonne gagnée sur le poids mort d'un ensemble tracteur et semi-remorque permet d'économiser 600 litres de gazole par 100 000 km parcourus.

- Pour le transport de passagers, l'aluminium réduit le poids total et la consommation de carburant. Une tonne gagnée sur un autobus urbain permet d'économiser entre 1 700 et 1 900 litres de gazole par 100 000 km parcourus.

Si l'on analyse l'ensemble du cycle de l'aluminium : production, exploitation du véhicule, recyclage, on obtient les résultats suivants :

- Chaque kilogramme d'aluminium en service sur un véhicule industriel assure une économie moyenne de 28 kg de CO₂.
- Chaque kilogramme d'aluminium placé dans un autobus urbain permet généralement d'économiser de 40 à 45 kg de CO₂.

3.2. L'aluminium et les normes EURO IV et EURO V

Les directives environnementales européennes applicables aux poids lourds remontent à 1988, alors que la première norme limitant les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules en suspension (PM) des moteurs diesel industriels est apparue au début des années 1990.

Les normes EURO IV et EURO V imposent une réduction sensible des émissions de NO_x et des particules en suspension PM. Cependant, ces normes imposent aussi de nouveaux processus de combustion et de nouvelles techniques de post-traitement des gaz d'échappement dont l'appareillage représente une surcharge pondérale pouvant aller jusqu'à 300 kg.

L'utilisation d'un plus grand nombre de composants en aluminium permet au fabricant de compenser ce handicap. La charge utile peut donc être conservée et même augmentée.

Tracteur équipé d'un module de collision



3.3. L'aluminium contribue à la sécurité routière

Dans le cadre de son « Programme d'action pour la sécurité routière », la Commission Européenne a prévu l'introduction de systèmes d'absorption d'énergie pour les poids lourds, en cas d'accident.

L'industrie de l'aluminium a déjà élaboré plusieurs solutions pour les secteurs automobile et ferroviaire et elle est prête à relever ce défi pour les véhicules industriels.

Si l'on considère les modes de déformation que subissent les pièces de sécurité, les systèmes en aluminium permettent d'absorber sensiblement plus d'énergie par unité de poids que les systèmes traditionnels. Un allègement dépassant 40% est tout à fait réaliste.

Pour cette raison, l'aluminium est parfaitement adapté aux pare-chocs avant, arrière et latéraux.

Les éléments en aluminium peuvent également être utilisés pour améliorer le potentiel d'absorption d'énergie des systèmes anti-encastrement avant et arrière actuels. Il serait tout à fait possible d'équiper les poids lourds de nez déformables en aluminium.

Enfin et surtout, l'ajout de dispositifs de sécurité se traduit toujours par un poids supplémentaire. Il peut être compensé par le remplacement de matériaux lourds par l'aluminium.

L'aluminium est facilement et économiquement recyclé (Galloo Recycling)



3.4. L'aluminium se recycle facilement et économiquement

Contrairement aux véhicules traditionnels qui sont exportés pour finir leur vie loin de l'Europe, les semi-remorques en aluminium passent généralement toute leur vie sur notre continent où ils sont finalement démontés et recyclés⁵. Eu égard à la valeur résiduelle élevée de l'aluminium, les sociétés de recyclage sont parties prenantes.

Les véhicules en aluminium en fin de vie sont donc revendus à bon prix et ils ne finissent jamais en décharge.

L'aluminium recyclé ne perd aucune de ses qualités et économise 95% de l'énergie qui serait nécessaire pour son élaboration à partir du minerai.

En d'autres termes, l'énergie

requis pour élaborer l'aluminium primaire n'est donc jamais perdue : elle est "stockée" dans le métal.

5. *The Fate of Aluminium from End-of-Life Commercial Vehicles* - Université de Technologie de Troyes



Réutilisation d'une benne basculante en aluminium de 8 ans sur un nouveau camion

4. Sur la route et en service

4.1. Un aspect soigné durable

Les véhicules industriels actuels n'échappent pas à la pression de l'esthétique industrielle. Les transporteurs veulent que leurs véhicules présentent un bel aspect avec des lignes nettes et agréables, toutes choses que les demi produits en aluminium sont à même de produire.

Par exemple, l'utilisation de profilés fonctionnels, de tôles nues ou pré laquées faciles à mettre

en forme, est un moyen très simple de produire des fourgons aux formes arrondies à l'intérieur comme à l'extérieur.

Avec les bennes basculantes et les fourgons à fond mouvant, l'aluminium permet un déchargement fluide et un nettoyage plus facile. De plus, l'utilisation de profilés à doubles parois assure le maintien dans le temps de l'aspect de la surface extérieure du véhicule industriel,

aspect auquel les transporteurs sont très attachés.

Les roues en aluminium sont les plus légères, les plus solides et les plus esthétiques.

Enfin et surtout, un impact sur des éléments en aluminium ne provoque pas de corrosion. L'image des opérateurs est valorisée par l'aspect général des véhicules industriels en aluminium.



Profils tubulaires pour parois latérales d'une benne basculante

4.2. L'aluminium est facile à réparer

Peu de gens savent que les carrosseries des Land Rover étaient en aluminium depuis 1948 et que personne en 50 ans n'a eu à déplorer de problèmes de réparation.

Cette expérience illustre le fait que les réparations de structures en aluminium sont tout à fait possible mais que les techniques de réparation sont sans aucun doute différentes de celles mise en œuvre pour l'acier.

Les grands fabricants européens de semi-remorques ont mis en place un réseau de revendeurs

capables d'offrir un service efficace de réparation.

Roue forgée en aluminium





Réparation d'une benne
basculante en aluminium
(Benalu)



QUESTIONS FRÉQUENTES CONCERNANT L'ALUMINIUM DANS LES VÉHICULES INDUSTRIELS

| | |
|---|----|
| 1. L'ALUMINIUM | 30 |
| 1.1. Quels sont les avantages d'un véhicule industriel en aluminium ? | 30 |
| 1.2. Quel est le surcoût d'un véhicule industriel en aluminium ? | 30 |
| 1.3. Quel est le principal avantage pour l'environnement ? | 30 |
| 1.4. Faut-il peindre les véhicules industriels en aluminium ? | 31 |
| 1.5. Est-il possible de réparer un véhicule industriel en aluminium ? | 31 |
| 1.6. L'aluminium brûle-t-il ? | 31 |
| 2. LES CHÂSSIS EN ALUMINIUM | 32 |
| 2.1. Comment les châssis en aluminium sont-ils conçus et quel allègement offrent-ils ? .. | 32 |
| 2.2. Existe-t-il différents concepts de châssis en aluminium ? | 33 |
| 2.3. La durée de vie d'un châssis en aluminium est-elle plus courte que celle d'un châssis en acier ? | 34 |
| 2.4. Comparaison de l'aluminium avec les aciers HLE | 34 |
| 3. LES BENNES BASCULANTES EN ALUMINIUM | 35 |
| 3.1. Existe-t-il différents concepts de caisses de bennes en aluminium ? | 35 |
| 3.2. Que sait-on de la résistance à l'usure des fonds de bennes en aluminium ? | 35 |
| 3.3. Choix de types de chassis | 36 |
| 3.4. Qu'en est-il de la stabilité lors du bennage ? | 36 |
| 4. LES CITERNES EN ALUMINIUM | 37 |
| 4.1. Le transport des matières dangereuses (ADR) est-il possible dans des citernes en aluminium ? | 37 |
| 4.2. Quels sont les alliages appropriés pour les citernes ADR ? | 37 |



Fourgon carrossé en aluminium

1. L'aluminium

1.1. Quels sont les avantages d'un véhicule industriel en aluminium ?

Les transporteurs tirent un avantage d'une meilleure performance de leur flotte de véhicules industriels.

L'augmentation significative de la charge utile rend la flotte de véhicules industriels bien plus rentable.

L'autre facteur d'économie provient d'une flotte plus réduite donc avec moins de personnel, moins de consommation de gazole et également moins de péages.

Les loueurs peuvent offrir aux transporteurs des semi-remorques

plus performantes. Grâce à une charge utile accrue, à une durée de vie prolongée et à la valeur résiduelle plus élevée de l'équipement, ces entreprises peuvent générer davantage de bénéfices en utilisant du matériel de pointe.

1.2. Quel est le surcoût d'un véhicule industriel en aluminium ?

Un véhicule industriel en aluminium présente un léger surcoût par rapport à un véhicule industriel comparable en acier.

Quand on examine les différences dans le détail, on peut constater que lorsque des marchandises lourdes sont transportées, le surcoût de l'in-

vestissement est amorti en moins de deux années de service.

Il est possible de le calculer en ligne sur www.alutransport.eu.

1.3. Quel est le principal avantage pour l'environnement ?

L'aluminium contribue à la réduction des émissions de CO₂ des transports routiers de la manière suivante :

- Avec les marchandises lourdes, il est possible de transporter davantage de marchandises, donc d'améliorer la performance du transport. Dans ce cas, une tonne gagnée sur le poids mort d'un ensemble tracteur et semi-remorque permet d'économiser 1 500 litres de gazole par 100 000 km parcourus.

- Avec les marchandises peu denses et volumineuses, l'aluminium réduit le poids total et la consommation de carburant au kilomètre. Dans ce cas, une tonne gagnée sur le poids mort d'un ensemble tracteur et semi-remorque permet d'économiser 600 litres de gazole par 100 000 km parcourus.

- En tenant compte de l'énergie d'élaboration de l'aluminium et de celle de son recyclage en fin de service, la réduction d'émission est de 28 kg CO₂ par kg

d'aluminium embarqué sur ensemble tracteur et semi-remorque¹.

1. Voir *CO₂ Reduction Potential of Aluminium for Articulated Trucks*. EAA (European Aluminium Association) 2005



Réparation d'une benne en aluminium (Stas)

1.4. Faut-il peindre les véhicules industriels en aluminium?

Non, pas du tout. Le film d'oxyde naturel "l'alumine" de formule Al_2O_3 , constitue une excellente protection du métal.

Le choix de peindre qui représente une dépense supplémentaire (et aussi du poids supplémentaire) répond au souhait

d'un transporteur d'afficher sa marque sur ses véhicules.

1.5. Est-il possible de réparer un véhicule industriel en aluminium ?

Il se dit souvent qu'un véhicule industriel ne peut être réparé. C'est totalement faux.

Peu de monde sait que les Land Rover ont une carrosserie en aluminium et cela depuis la fin de la seconde guerre mondiale et que depuis 50 ans, personne

ne s'est jamais plaint de ne pouvoir les réparer.

Cet exemple illustre parfaitement que l'aluminium est réparable comme tous les autres matériaux. Cependant, les techniques de réparations de l'aluminium sont différentes de celles de l'acier.

Le lecteur est invité à se référer aux données détaillées du chapitre XIII.

Les principaux fabricants européens de châssis en aluminium ont organisé un réseau de revendeurs qui proposent un service efficace de réparation.

1.6. L'aluminium brûle-t-il ?

Non, dans les conditions atmosphériques normales l'aluminium et ses alliages sont totalement

incombustibles et ne contribuent pas à la propagation de l'incendie. La fusion de l'aluminium et ses

alliages qui a lieu autour de $650^{\circ}C$ ne s'accompagne d'aucune émission de gaz nocifs.

2. Les châssis en aluminium

2.1. Comment les châssis en aluminium sont-ils conçus et quel allègement offrent-ils ?

Les grands constructeurs européens de semi-remorques utilisent les critères de résistance, rigidité et durabilité.

Aucun gain de poids ne peut être obtenu avec l'aluminium si la conception est simplement copiée de l'acier. Les conceptions optimisées pour l'aluminium sont basées sur des sections spécifiques (pou-

tres de 20 à 40% plus hautes), des transitions douces et des assemblages intelligents, qui permettent normalement de réaliser une économie de poids de 40 à 60% par rapport aux métaux concurrents (voir Chapitre III), comme expliqué ci-après.

1) Une semi-remorque allégée doit être aussi robuste qu'un modèle traditionnel. Si c'était le seul critère retenu, le gain de poids obtenu avec l'aluminium serait optimisé (environ 60%) et les solutions en acier à haute limite élastique (HLE) permettraient de réaliser environ la moitié de l'économie de poids réalisée avec l'aluminium (environ 30%).

Châssis en aluminium pour benne basculante (Benalu)



Châssis en aluminium pour benne basculante (Leciñena)



2) En règle générale, une rigidité minimale est requise.

- Si cette rigidité doit être égale aux modèles en acier standard, l'économie de poids obtenue avec l'aluminium s'élèvera à environ 45% avec une résistance supérieure, alors que l'acier HLE ne permet aucun allègement.
- Si la rigidité minimale requise est inférieure à celle des modèles en acier standard, l'allègement obtenu avec l'aluminium se situera entre 45 & 60% et la réduction de poids obtenue avec de l'acier HLE se situera quelque part entre zéro et la moitié de ce qui peut être obtenu avec l'aluminium.

3) La durabilité des véhicules doit être garantie. Etant donné que les véhicules en aluminium sont utilisés de manière beaucoup plus intense que les véhicules conventionnels, leur résistance à la fatigue doit être plus élevée. Ce résultat est obtenu avec un "design" approprié. Les sections plus hautes, les transitions douces et les assemblages intelligents font partie des éléments essentiels au succès.

2.2. Existe-t-il différents concepts de châssis en aluminium ?

Chaque fabricant a sa conception propre, laquelle dépend beaucoup des conditions de service auxquelles le véhicule industriel est destiné et de l'expérience particulière de la réalisation du châssis. Par exemple, certains préfèrent des châssis entièrement soudés, tandis que d'autres préfèrent les assemblages mixtes : soudage et boulonnage. Il est également important de souligner que les véhicules industriels en aluminium sont utilisés de façon beaucoup plus intensive que ceux en acier et cela doit être pris en compte dans leur conception. A part cela, il y a deux écoles dominantes dans la conception des châssis :

- Dans les pays comme l'Italie, où il semble que l'isorigidité avec l'acier soit un impératif, la flexion est le principal critère.

Les véhicules industriels en aluminium ont généralement une durée de vie plus longue que leur équivalent en acier, tout en étant bien plus légers.

- Dans d'autres pays, le principal critère est que la durée de service soit égale à celle du véhicule industriel équivalent en acier. Une bonne conception conduit, au moins, à une durée de service équivalente, à une rigidité conforme aux spécifications (bien qu'elle puisse être légèrement moindre que la structure en acier équivalente, mais le gain de poids est maximisé).

De toute manière, les châssis en aluminium sont plus solides que ceux en acier et le risque de début d'une déformation plastique due à une surcharge statique est plus faible sur les châssis en aluminium.



Châssis en aluminium boulonné
pour benne basculante

2.3. La durée de vie d'un châssis en aluminium est-elle plus courte que celle d'un châssis en acier ?

La durée de vie d'un châssis est une question de conception mais n'est pas une question de matériau. Les châssis en aluminium sont

essentiellement utilisés dans des segments de transport où le facteur de charge est le plus élevé (vrac solide et liquide, bennes

basculantes). Malgré tout, des véhicules industriels en aluminium, bien étudiés, peuvent durer 20 ans.

2.4. Comparaison de l'aluminium avec les aciers HLE

Il faut distinguer l'aluminium non allié de ses alliages. L'aluminium non allié n'est jamais utilisé dans la construction des véhicules industriels. Il existe une grande variété d'alliages d'aluminium dont ceux à haute résistance.

Ce qui est rarement dit, c'est que tous les alliages d'un même métal de base ont un module d'élasticité très proche.

Cela veut dire que les aciers HLE ne sont pas une alternative à l'acier pour alléger les châssis, puisqu'ils ont le même module d'élasticité que l'acier ordinaire. La seule solution est de passer à l'aluminium (voir chapitre III).

3. Les bennes basculantes en aluminium

3.1. Existe-t-il différents concepts de caisses de bennes en aluminium ?

Oui, il existe une multitude de concepts et tous peuvent être exécutés en aluminium en utilisant les demi-produits spécialement conçus à cette fin. De plus,

ces derniers offrent aux constructeurs une productivité élevée ainsi qu'une charge utile accrue, de faibles coûts d'exploitation et une excellente image pour les

transporteurs. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le chapitre VI.

3.2. Que sait-on de la résistance à l'usure des fonds de bennes en aluminium ?

Les conditions d'usure peuvent énormément varier d'une charge à l'autre. Par conséquent, il n'est pas toujours possible de relier la dureté réelle d'un alliage à sa résistance à l'usure.

Il a été établi que, dans une large mesure, le type de chargement est un critère décisif.

De nos jours, le choix du matériau pour la construction de bennes basculantes est le plus souvent une question d'expérience, de disponibilité de matériau et du savoir faire spécifique des fabricants de bennes.

Les tôles de fond des bennes sont classiquement en :

- 5083 H32, H321, H34
- 5086 H24
- 5383 H34
- 5454 H22, H24
- 5456 H34

voire dans d'autres alliages spécifiques.

Les épaisseurs typiques pour les tôles de fond des bennes sont les suivantes :

- 6 mm pour des chargements légèrement abrasifs, tels que les produits agricoles, le charbon ou le sable,
- 8 mm pour des chargements moyennement abrasifs, tels que des déchets divers à recycler,
- 10 mm pour les chargements fortement abrasifs, tels que le gravier,
- Jusqu'à 12 mm pour les cas extrêmes.



Test IRTE de stabilité lors du bennage (Stas)

3.3. Choix de types de châssis

Certains transporteurs doutent toujours de la résistance des châssis en aluminium pour les applications sévères. Ils devraient savoir que la résistance, tout

comme la rigidité et la durée de vie, ne sont que des critères de conception. Les constructeurs expérimentés conçoivent des châssis en aluminium bien plus

légers, mais offrant les mêmes performances que les modèles conventionnels.

3.4. Qu'en est-il de la stabilité lors du bennage ?

Atteindre la Classe A de stabilité au bennage selon les critères de l'IRTE² n'est pas un problème pour un châssis en aluminium, comme l'ont confirmé les tests effectués en Angleterre au cours de l'été 2002.

En effet, un véhicule tout aluminium, sensiblement plus léger que les autres, a réussi le test IRTE Classe A³ à 44 tonnes avec son châssis standard, rappelant ainsi à chacun qu'un "design" approprié allie légèreté et rigidité.

2. IRTE = British Institute of Road Transport Engineers.

3. Le test de stabilité IRTE Class A pour benne basculante prévoit qu'une benne basculante à pleine charge relevée doit être en mesure de tenir sans défaillance sur un sol incliné à 7°

4. Les citernes en aluminium

4.1. Le transport des matières dangereuses (ADR) est-il possible dans des citernes en aluminium ?

Les citernes affectées au transport des matières dangereuses doivent être construites selon les règles définies, en conformité avec les règlements et normes suivants :

- ADR "Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route"⁴
- Norme EN 13094 "Citernes destinées au transport de matières dangereuses. – Citernes

métalliques ayant une pression de service inférieure ou égale à 0,5 bar. – Conception et construction"

- Norme EN 14025 "Citernes pour le transport des matières dangereuses – Réservoir sous pression - Calcul et réalisation"

Pour plus de détail, le lecteur est invité à se reporter au chapitre VI.

4.2. Quels sont les alliages appropriés pour les citernes ADR ?

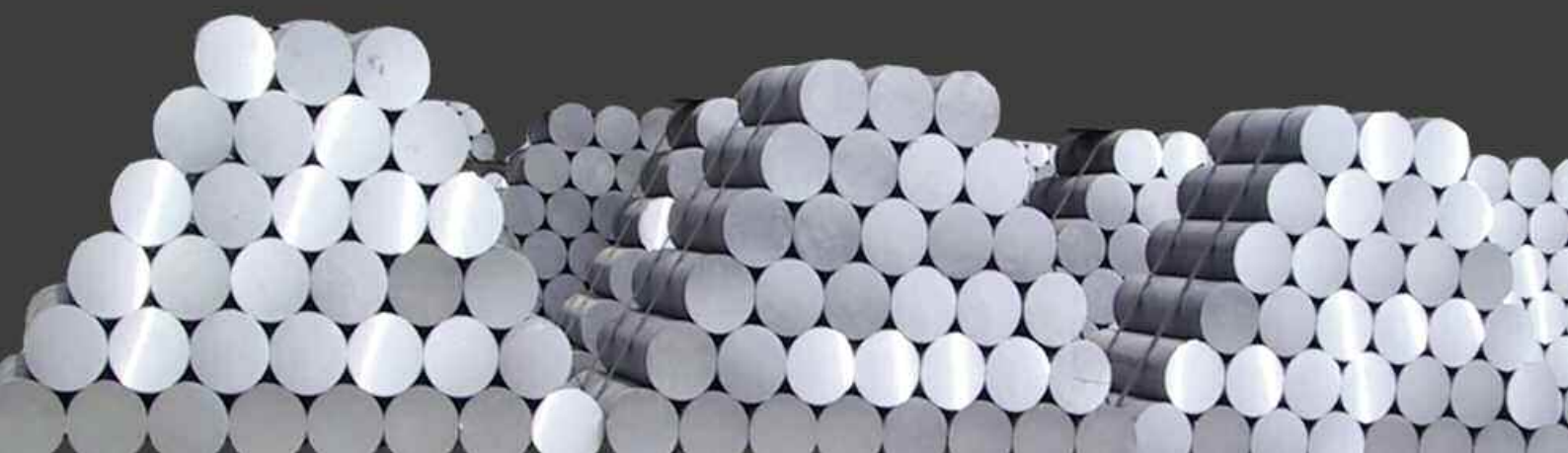
La liste des alliages d'aluminium autorisés pour cette application est indiquée dans la norme EN 14286 "Aluminium et alliages d'aluminium - Produits laminés soudables pour réservoirs de stockage et de transport des matières dangereuses"

La liste des fournisseurs d'aluminium est disponible sur le site www.alutransport.eu

4. Voir ADR, Annexe A, Partie 6, Chapitre 6.8 : <http://www.unece.org/trans/danger/danger.htm>

Citerne routière en aluminium (Schrader)





LES ALLIAGES D'ALUMINIUM POUR LES VÉHICULES INDUSTRIELS

| | |
|---|-----------|
| 1. AVANT-PROPOS | 40 |
| 2. DÉSIGNATIONS INTERNATIONALES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM | 41 |
| 3. DÉSIGNATIONS DES ÉTATS MÉTALLURGIQUES DE BASE | 42 |
| 4. DÉSIGNATIONS DES ÉTATS MÉTALLURGIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM À DURCISSEMENT PAR ÉCROUISSAGE (ÉTATS H) | 42 |
| 5. DÉSIGNATIONS DES ÉTATS MÉTALLURGIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM À DURCISSEMENT STRUCTURAL (ÉTATS T) | 43 |
| 6. LES ALLIAGES USUELS POUR LA CONSTRUCTION DES VÉHICULES INDUSTRIELS | 44 |
| 6.1. Demi produits laminés | 45 |
| 6.2. Demi produits extrudés et forgés | 46 |
| 6.3. Produits moulés | 48 |
| 6.4. Guide indicatif du choix des alliages | 49 |
| 7. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES | 50 |
| 7.1. Températures élevées | 51 |
| 7.2. Basses et très basses températures | 51 |
| 8. INFLUENCE DE LA MISE EN ŒUVRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES | 52 |
| 8.1. Ecrouissage des alliages à durcissement par écrouissage | 52 |
| 8.2. Adoucissement par recuit et par revenu | 52 |
| 8.3. Les alliages à durcissement structural | 53 |
| 8.4. Les produits moulés | 54 |
| 9. LISTE DES NORMES | 55 |

1. Avant-propos

L'aluminium non allié, techniquement pur, est un métal très mou et n'est donc pas fait pour des applications structurales. Grâce à des additions d'éléments d'alliage tels que du cuivre, du manganèse, du magnésium, du zinc, etc. et grâce à des gammes de transformation

adaptées, les propriétés physiques et mécaniques peuvent varier dans une large étendue au point qu'on dispose littéralement d'alliages d'aluminium pour une foule d'applications. L'industrie de l'aluminium est mondiale. De ce fait, la désignation des alliages et des états

métallurgiques est la même presque partout, ce qui est une chance. Les désignations commerciales des transformateurs et distributeurs sont généralement complétées par les désignations normalisées.

Toutes les normes utiles sont indiquées à la fin de ce chapitre.

Train de laminoir d'aluminium



2. Désignations internationales des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium de corroyage sont désignés par un nombre à quatre chiffres suivant la norme NF EN 573-1 et les alliages de moulage sont désignés par un nombre à cinq chiffres¹ suivant la norme NF EN 1780-1.

La liste des alliages d'aluminium de corroyage normalisés par le CEN² ainsi que leur composition sont indiqués dans la norme NF EN 573-3. La liste internationale des alliages d'aluminium de corroyage est disponible dans le document "Teal Sheets"³.

La norme EN 1706 concerne les alliages d'aluminium destinés au moulage.

Une sélection des alliages d'aluminium pour la construction des véhicules industriels est présentée, ci-après, au paragraphe 6.

Le premier chiffre de la désignation d'un alliage indique la nature de l'élément d'alliage dominant. Les trois chiffres suivant n'ont pas de signification particulière (tableau 5.1). Une exception cependant, dans le cas de l'aluminium non allié (série 1000), les deux derniers chiffres indiquent le titre du métal. Par exemple : 1070 signifie que l'aluminium titre 99,7 % et qu'il n'y a pas plus de 0,30 % d'impureté⁴.

TABLEAU V.1

FAMILLES D'ALLIAGES D'ALUMINIUM

| Élément d'alliage dominant | Alliage de corroyage | Alliage de moulage |
|--|----------------------|--------------------|
| Aucun (aluminium « pur ») | 1xxx | |
| Cuivre | 2xxx | 2xxxx |
| Manganèse | 3xxx | |
| Silicium | 4xxx | 4xxxx |
| Magnésium | 5xxx | 5xxxx |
| Magnésium + Silicium | 6xxx | |
| Zinc + Magnésium (avec ou sans cuivre) | 7xxx | 7xxxx |
| Autres éléments (Fer, etc.) | 8xxx | |

Parmi les 8 familles d'alliages d'aluminium de corroyage, trois sont à durcissement structural : 2XXX, 6XXX et 7XXX, les autres sont à durcissement par écrouissage : 1XXX, 3XXX, 5XXX, en ce sens leurs propriétés mécaniques dépendent de la gamme de fabrication (voir paragraphe 8).

Les alliages dont la désignation est suivie de X sont des alliages expérimentaux et ceux dont la désignation est suivie de A ou B sont des variantes nationales de l'alliage de base.

Les propriétés physiques et mécaniques des demi produits dépen-

dent non seulement de la composition chimique de l'alliage, mais aussi dans une large mesure de leur gamme de transformation y compris celle des traitements thermiques. Les gammes de transformation aboutissent à des états métallurgiques qui correspondent à des niveaux de propriétés mécaniques bien définis. Leur désignation est également normalisée et celle-ci est accolée à celle de l'alliage, par exemple 5754 H111.

L'utilisateur est ainsi renseigné sur la nature de l'alliage et sur ses propriétés mécaniques garanties.

1. Dans tous les cas, les quatre ou cinq chiffres sont toujours accolés, par exemple 5754, 44200

2. CEN = comité Européen de normalisation

3. La dernière version du document "Teal Sheets" est téléchargeable gratuitement à partir du site www.eaa.net/en/about-aluminium/standards/international-registration/

4. Fer et Silicium pour l'essentiel

3. Désignations des états métallurgiques de base

- **F – Brut de fabrication**, il concerne les produits fabriqués par déformation plastique sans que soient particulièrement maîtrisés les taux de durcissement ou d'adoucissement par déformation ou par traitement thermique éventuel.
- **O – Etat recuit**, c'est l'état le plus ductile. Il est obtenu par le traitement dit de recuit, ce

traitement n'étant suivi d'aucun écrouissage, même par pliage ou par dressage.

- **H – Etat écroui**, et éventuellement partiellement adouci. Il concerne les produits durcis par déformation, avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel du métal

- **T – Etat durci par traitement thermique**, les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu avec application éventuelle de déformations plastiques.

4. Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage (états h)

Le premier chiffre après H correspond à la combinaison spécifique des opérations de base.

- **H1X, écroui seulement**, cette désignation correspond à des produits qui sont écrouis en vue d'obtenir la résistance mécanique sans traitement thermique supplémentaire.
- **H2X, écroui et partiellement recuit**, cette désignation s'applique aux produits qui sont écrouis à un taux supérieur pour la résistance mécanique visée. Celle-ci est ramenée au niveau voulu par un recuit partiel.

- **H3X, écroui et stabilisé**, cette désignation s'applique aux produits qui sont écrouis et dont les propriétés mécaniques sont stabilisées soit par un traitement thermique à basse température ou par un échauffement en cours de transformation⁵.

Le second chiffre suivant la lettre H indique le taux d'écrouissage caractérisé par une valeur minimale de résistance à la traction.

- 8 désigne le taux d'écrouissage maximum
- Les états métallurgiques compris entre l'état O (recuit) et HX8 sont

désignés par les chiffres de 1 à 7

- **HX4**, cette désignation s'applique à des états métallurgiques dont la résistance à la traction est approximativement à mi chemin entre l'état O et l'état HX8
- **H2X** cette désignation s'applique à des états métallurgiques dont la résistance à la traction est approximativement à mi chemin entre l'état O et l'état HX4
- **H6X** est approximativement à mi chemin entre l'état HX4 et l'état HX8
- **HX1, HX3, HX5, HX7** ces désignations s'appliquent à des états

5. Pour plus de détails, il faut se référer à la norme EN 515.



Presse à filer

métallurgiques dont la résistance à la traction est intermédiaire entre les états définis ci-dessus⁶

- **HX11**, cette désignation s'applique à des produits qui présentent un écrouissage suffisant après le recuit final tel qu'ils ne soient pas considérés à l'état recuit mais insuffisamment écrouis pour être à l'état HX1
- **H112**, cette désignation s'applique à des produits dont le

niveau de résistance mécanique est acquis par transformation à chaud ou par déformation à froid limitée

- **H116**, cette désignation s'applique à des produits de la famille 5000 dont la teneur en magnésium est supérieure à 3 % (5083, 5086, etc.). Ces produits ont subi un écrouissage à la dernière opération de leur transformation (laminage) pour améliorer

leur caractéristiques mécaniques jusqu'au niveau spécifié. Ils ont été soumis à des tests accélérés de résistance à la corrosion. Ces tests concernent la sensibilité à la corrosion intergranulaire et à la corrosion feuilletante. Dans cet état métallurgique, les produits sont aptes à être utilisés en service à des températures supérieures à 65 °C.

5. Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium à durcissement structural (états T)

Le premier chiffre suivant la lettre T sert à identifier les séquences des traitements thermiques de base du durcissement structural. La signification des chiffres de 1 à 10 est la suivante :

- **T1**, cette désignation s'applique à des produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme et muris dans des conditions stables
- **T2**, cette désignation s'applique à des produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme, écrouis à froid et

muris dans des conditions stables

- **T3**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution, écrouis et muris dans des conditions stables
- **T4**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution et muris dans des conditions stables
- **T5**, cette désignation s'applique à des produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme (filage par exemple) et revenus
- **T6**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution, trempés et revenus

- **T7**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution, trempés et sur revenus

- **T8**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution, écrouis et revenus
- **T9**, cette désignation s'applique à des produits mis en solution, revenus et écrouis
- **T10**, cette désignation s'applique à des produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme, écrouis et revenus⁷.

6. Ces désignations ne font pas partie de la norme EN 515. Leurs propriétés mécaniques sont définies par un accord entre fournisseur et client

7. Pour plus de détails, il faut se référer à la norme EN 515.

6. Les alliages usuels pour la construction des véhicules industriels

Parmi les très nombreux alliages d'aluminium recensés dans la norme NF EN 573-3 et dans les "Teal Sheets", seuls quelques uns sont importants pour la construction des véhicules industriels.

Les critères de choix de ces alliages sont :

- disponibilité des demi produits
- propriétés mécaniques
- propriétés physiques
- facilité de mise en œuvre
- aptitude au soudage
- résistance à la corrosion

Les propriétés des alliages les plus utilisées dans la construction des véhicules industriels sont indiquées dans les tableaux des pages suivantes.

Bobines d'aluminium



Brames d'aluminium avant laminage



6.1. Demi produits laminés

Dans les véhicules industriels, les demi produits laminés les plus utilisés sont dans les alliages suivants :
3003, 5005, 5059, 5083, 5086, 5088, 5182, 5186, 5383, 5454, 5456, 5754, 6061 et 6082.

Les propriétés mécaniques des demi produits laminés de ces alliages sont indiquées dans les normes répertoriées dans le tableau V.2 et les propriétés d'usage (ou de mise en œuvre) au tableau V.3.

| TABLEAU V.2 | |
|---|---------------------|
| RÉFÉRENCE DES NORMES POUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES DEMI PRODUITS LAMINÉS | |
| Alliage | Norme ⁸ |
| 3003 | EN 485-2 |
| 5005 | EN 485-2 |
| 5059 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5083 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5086 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5088 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5182 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5186 | EN14286 |
| 5383 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5454 | EN 485-2 et EN14286 |
| 5754 | EN 485-2 et EN14286 |
| 6061 | EN 485-2 |
| 6082 | EN 485-2 |

8. L'intitulé des normes est indiqué à la fin de ce chapitre, au paragraphe 9

TABLEAU V.3
PROPRIÉTÉS DE MISE EN ŒUVRE DES
DEMI PRODUITS LAMINÉS POUR LA CONSTRUCTION DES VÉHICULES INDUSTRIELS

| Alliage | Etat métallurgique | Mise en forme | Soudage | Anodisation | Résistance à la corrosion |
|---------|-----------------------|------------------|---------|-------------|------------------------------|
| 3003 | H14,H24,H16 | B | A | A | A |
| 5005 | H14,H24 | B | A | A | A |
| 5059 | O, H111 | B | A | A | A |
| 5083 | O,H111 | A | A | A | A |
| | H116,H22,H24, H34 | C | A | A | A |
| 5086 | O,H111 | A | A | A | A |
| | H116,H22,H24 | C | A | A | A |
| 5088 | O, H111 | A | A | A | A |
| 5182 | O, H111 | A | A | A | A |
| 5186 | O, H111 | A | A | A | A |
| 5383 | H22, H32 | B | A | A | A |
| 5454 | O,H111 | A | A | A | A |
| | H22,H24 | B | A | A | A |
| 5456 | H34 | C | A | A | A |
| 5754 | O,H111 | A | A | A | A |
| | H22,H24 | B | A | A | A |
| 6061 | T4 | C | A | A | A |
| | T6 | D | A | A | A |
| 6082 | T4 | C | A | A | A |
| | T6 | D | A | A | A |

A = très bon ; B = bon ; C = faible ; D = à éviter

Billetes en aluminium avant filage



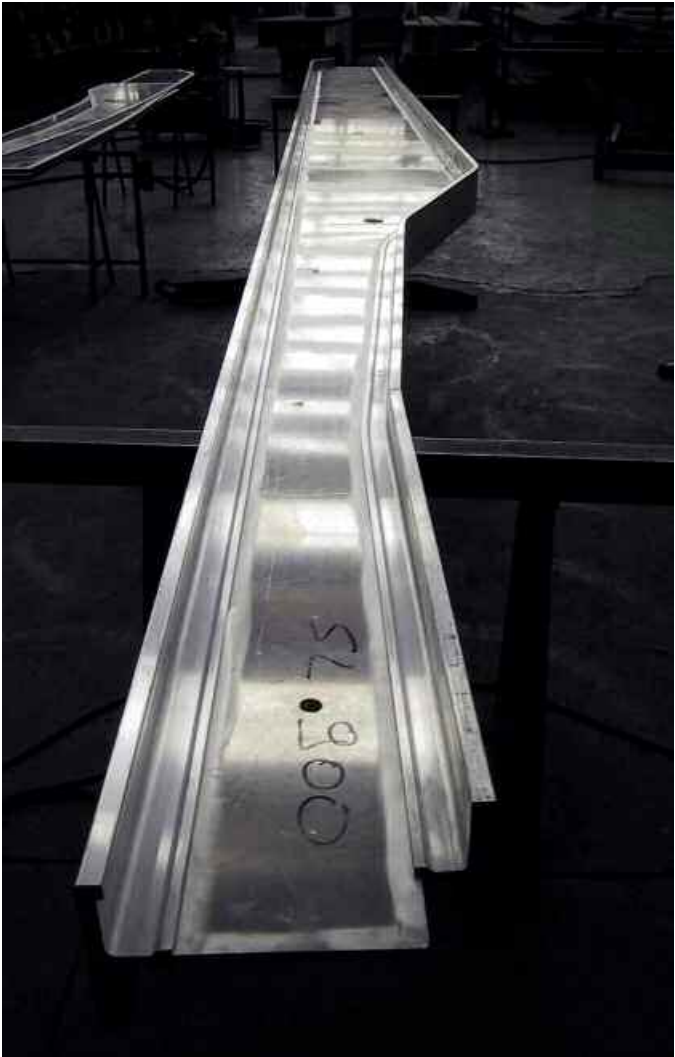
6.2. Demi produits extrudés et forgés

Dans les véhicules industriels, les demi produits extrudés les plus utilisés sont dans les alliages suivants : 6060, 6005A, 6008, 6106, 6082, 6061 et 7020.

Les propriétés mécaniques des demi produits extrudés de ces alliages sont indiquées dans la norme NF EN 785-2 et les propriétés de mise en œuvre au tableau V.4.

| TABLEAU V.4 | | | | |
|---|--------------------|---------|-------------|---------------------------|
| PROPRIÉTÉS DE MISE EN ŒUVRE DES DEMI PRODUITS EXTRUDÉS POUR LA CONSTRUCTION DES VÉHICULES INDUSTRIELS | | | | |
| Alliage | État métallurgique | Soudage | Anodisation | Résistance à la corrosion |
| 6060 | tous | A | A | A |
| 6005A | tous | A | A | A |
| 6008 | tous | A | A | A |
| 6106 | tous | A | A | A |
| 6082 | tous | A | A | A |
| 6061 | tous | A | A | A |
| 7020 | T6 | A | A | C |
| 7003 | T6/T7 | A | A | B |
| 7108 | T6/T7 | A | A | B |

A = très bon ; B = bon ; C = faible ; D = à éviter



Longeron de châssis de semi remorque constituée de deux profilés et d'une tôle



Rail extrudé pour rideau coulissant

6.3. Produits moulés

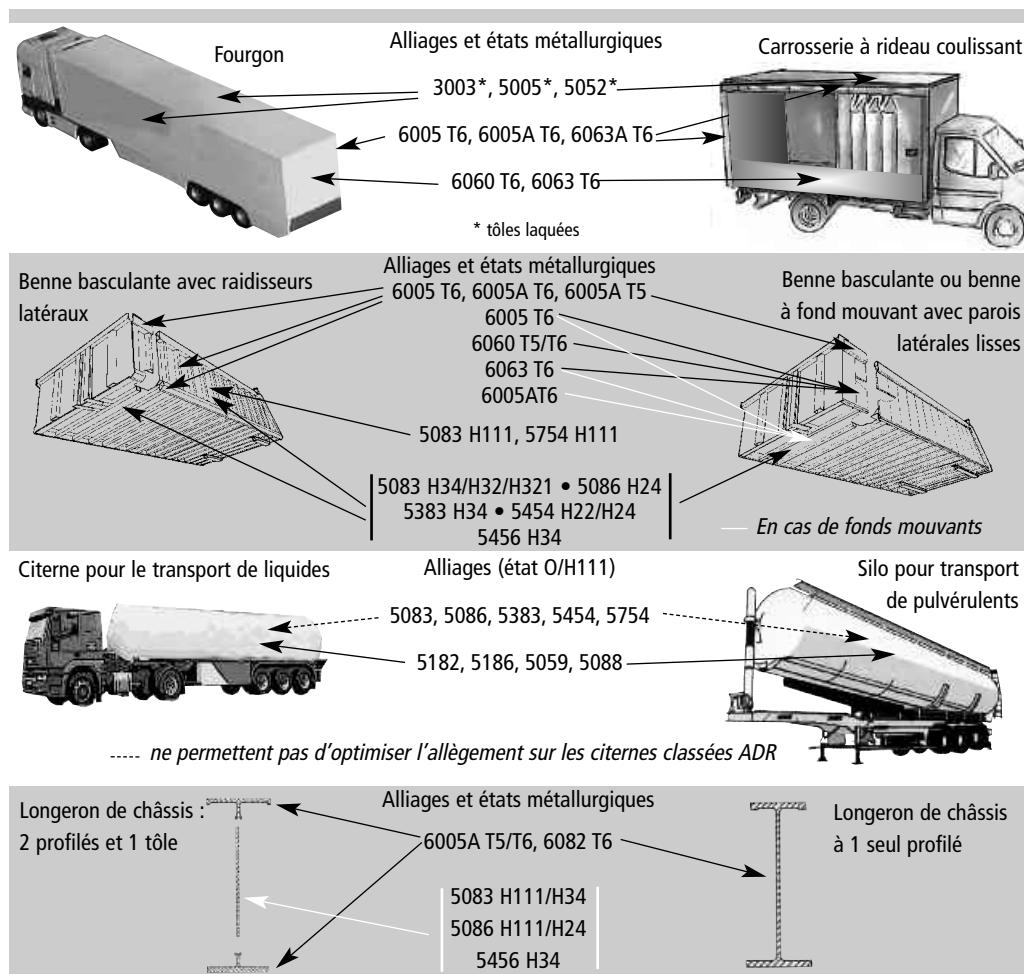
Dans les véhicules industriels, les produits moulés les plus utilisés sont dans les alliages suivants : 21100, 42000,42100, 43000 et 44000.

Leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques sont indiquées dans la norme NF EN 1706 et leurs propriétés de mise en œuvre au tableau V.5.

| TABLEAU V.5 | | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------------------|------------|-------------|---------------------------|
| PROPRIÉTÉS D'USAGE PRODUITS MOULÉS | | | | | |
| Alliage | Coulabilité | Résistance à la crique | Etanchéité | Usinabilité | Résistance à la corrosion |
| 21100 | C | D | D | A | D |
| 42000 | B | A | B | B | B/C |
| 42100 | B | A | B | B | B |
| 43000 | A | A | B | B | B |
| 44000 | A | A | A | C | B |

A = très bon ; B = bon ; C = faible ; D = à éviter

6.4. Guide indicatif du choix des alliages



AUTRES APPLICATIONS

| | | | |
|---|------------------|--|--------------|
| Roues | 6061, 6082 | Suspensions | 21100 |
| Réservoir gazole | 5052, 5754 | Composants structuraux & supports de charnières | 42000, 42100 |
| Hayon élévateur | 6005A | Pièces aux formes complexes subissant des contraintes moyennes | 43000 |
| Plancher | 6082, 5086, 5754 | Pièces aux formes très complexes sans fonction structurales | 44000 |
| Cadres pour autobus | 6060, 6005A | | |
| Parois latérales et toits pour autobus | 3003, 5005 | | |
| Modules anticollision | 6008 | | |
| Parechocs, boîtier anti collision, protection anti retournement | 7003, 7108 | | |

En plus des alliages mentionnés ci-dessus, il est possible de développer des solutions "sur mesure", en collaboration avec les fournisseurs d'aluminium, permettant d'optimiser les performances d'un produit en fonction du type d'application.

7. Influence de la température sur les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium évoluent avec la température dès que celle-ci s'écarte dans un sens et dans l'autre de la température ambiante.

Les tableaux V.6 et V.7 illustrent l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température pour le 5086 O (graphique pour cet alliage en figure V.1) et le 6082 T6 après 10 000 heures de maintien en température.

TABLEAU V.6
EVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU 5086 O
APRÈS UN MAINTIEN DE 10 000 H EN TEMPÉRATURE

| Température °C | Caractéristiques mécaniques (*) | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------|----|
| | Rm (MPa) | Rp _{0,2} (MPa) | A% |
| -196 | 390 | 140 | 34 |
| -80 | 280 | 120 | 26 |
| -28 | 270 | 120 | 24 |
| +20 | 270 | 120 | 22 |
| +100 | 270 | 120 | 26 |
| +150 | 210 | 110 | 35 |
| +200 | 155 | 105 | 45 |

TABLEAU V.7
EVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU 6082 T6
APRÈS UN MAINTIEN DE 10 000 H EN TEMPÉRATURE

| Température °C | Caractéristiques mécaniques (*) | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------|----|
| | Rm (MPa) | Rp _{0,2} (MPa) | A% |
| -196 | 380 | 330 | 16 |
| -80 | 330 | 295 | 13 |
| -28 | 330 | 285 | 12 |
| +20 | 320 | 285 | 12 |
| +100 | 300 | 265 | 15 |
| +150 | 240 | 220 | 18 |
| +200 | 130 | 105 | 28 |

(*) Valeurs moyennes – Les mesures de caractéristiques mécaniques ont été faites à la température de maintien.

7.1. Températures élevées

La baisse de la résistance mécanique aux températures supérieures à la température ambiante est négligeable jusqu'à 100 °C pour un maintien de courte durée ou jusqu'à 80 °C pour un maintien de longue durée.

Même après une exposition à de plus hautes températures, les pertes de propriétés mécaniques sont modérées pour les alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage, à l'état O/H111 et aux états T1 et T4 pour les alliages d'aluminium à durcissement structural.

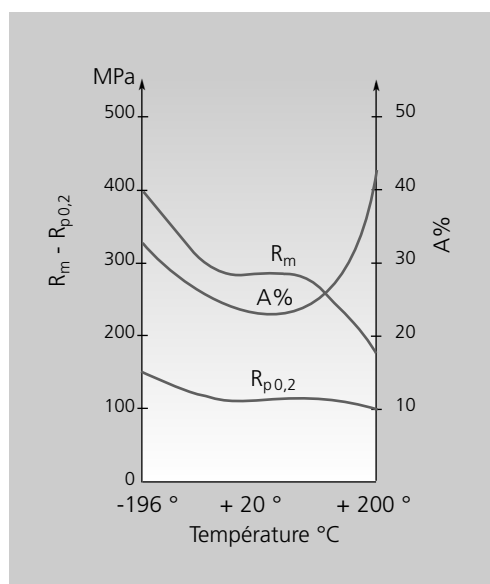
La diminution des caractéristiques mécaniques aux températures supérieures à 100 °C est beaucoup plus importante pour les alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage aux états H12 et H16 et aux états T5 et T6 pour les alliages d'aluminium à durcissement structural.

7.2. Basses et très basses températures

Contrairement aux autres métaux et alliages d'usage courant, les caractéristiques mécaniques augmentent à basse température, particulièrement l'allongement. Cette propriété fait de l'aluminium le métal idéal en régions très froides, en hiver et également pour des applications cryogéniques (Cf figure V.1).

D'autres exemples sont cités dans la norme NF EN 12392 "Aluminium et alliages d'aluminium – Produits corroyés – Exigences particulières pour les produits destinés à la fabrication des appareils à pression."

FIGURE V.1
EVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU 5086 O
EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE



8. Influence de la mise en œuvre sur les propriétés des alliages

8.1. Ecouissage des alliages à durcissement par écouissage

Le durcissement est réalisé par une déformation à froid, c'est l'écrouissage. Il augmente les caractéristiques mécaniques et la dureté du métal. L'écrouissage réduit aussi la capacité du métal à la déformation et la ductilité (figure V.2).

L'effet de la déformation est d'autant plus marqué qu'elle est importante. Il en est de même du taux d'écrouissage.

La composition du métal est un paramètre important. Par exemple, le 5083, qui contient entre 4 et 4,9 % de magnésium, acquiert une dureté élevée, mais sa capacité de déformation est moindre que celle du 5754 qui titre entre 2,6 et 3,6 % de magnésium.

D'une manière générale, l'écrouissage est un phénomène qui se produit quel que soit le mode de déformation : laminage, emboutissage profond, pliage, martelage, cintrage, matriçage.

Cela signifie que le métal subit un écouissage pendant la mise en œuvre en atelier.

8.2. Adoucissement par recuit et par revenu

Il est possible de restaurer la ductilité d'un métal écroui par un traitement thermique de recuit (partiel ou total). Lors de ce traitement de recuit, qui est fait entre 150 et 350 °C, la dureté et les caractéristiques mécaniques commencent à décroître lentement. C'est la phase de restauration {A-B} (figure V.3).

Lorsque le recuit est fait à basse température, le métal récupère des caractéristiques mécaniques moyennes. Ensuite, elles chutent rapidement à haute température au dessus de 280 °C pendant la phase de recristallisation {B-C} et atteignent éventuellement leurs valeurs minima qui correspondent à celle d'un métal complètement recuit (C-D).

La restauration et le recuit s'accompagnent d'une modification de la texture et de la dimension des grains du métal observés au microscope optique sous un grossissement de 50. La texture peut évoluer d'une structure fibreuse à un état complètement recristallisé (figure V.3).

Le gain peut grossir pendant la recristallisation et le recuit. On le constate à l'aspect rugueux, dit *peau d'orange*, que prend la surface du métal lors d'une mise en forme postérieure au traitement thermique, par exemple un pliage. La croissance de la taille du grain, au dessus de 100 micromètres, réduit l'aptitude à la déformation des alliages d'aluminium à durcissement par écouissage.

FIGURE V.2
COURBE D'ÉCROUissage DU 5083

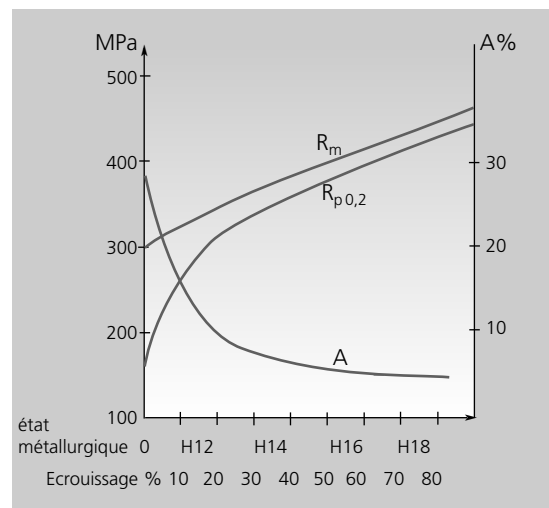
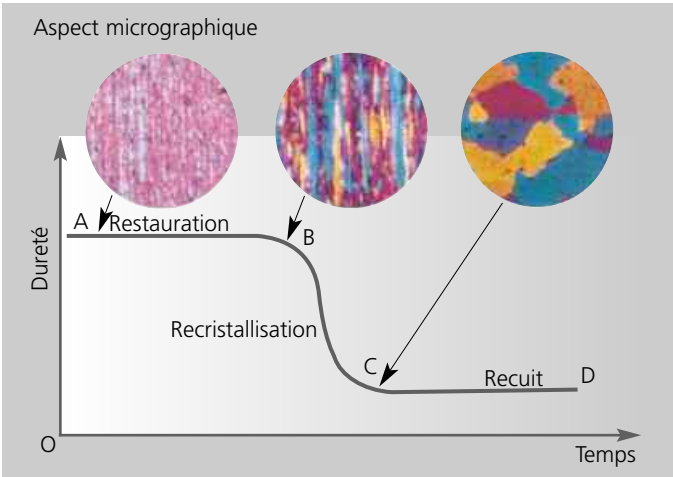


FIGURE V.3
EVOLUTION DE LA DURETÉ AU COURS DU RECUIT



Pour éviter le grossissement de grain lors d'un recuit, il faut que :

- Le métal ait subi un taux de déformation suffisant correspondant à une réduction de section d'au moins 15 %. C'est l'écrouissage critique. Si cette condition n'est pas remplie, le recuit doit être limité à une simple restauration sans recristallisation,
- une montée en température rapide de 20 à 60° C par heure,
- les températures limites de recuit à ne pas dépasser : 350 à 380 ° C,
- le temps de maintien limité à 2 heures au maximum.

Le recuit des alliages de la famille 5000 est fait habituellement entre 320 et 380 °C pendant 30 à 120 minutes.

Remarque : Les caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage, aux états recuits (O et H111), ne peuvent être augmentées que par écrouissage.

TABLEAU V.8
CONDITIONS DE REVENU TYPQUES DES 6000

| Alliage | Etat initial | Revenu | Etat final * |
|---------|--------------|---|--------------|
| 6060 | T1 - T4 | 6 h à 185°C ou 8 h à 175°C | T5 - T6 |
| 6005 | T1 - T4 | 8 h à 175°C | T5 - T6 |
| 6106 | T1 - T4 | 8 h à 175°C | T5 - T6 |
| 6061 | T4 | 8 h à 175°C | T6 |
| 6082 | T1 - T4 | 16 h à 165°C ou 10 h à 170°C ou 8 h à 175°C | T5 - T6 |

* T5 pour un état initial T1 et T6 pour un état initial T4.

8.3. Les alliages à durcissement structural

Les alliages d'aluminium à durcissement structural ne peuvent subir de déformation plastique que dans l'état T4 pour deux raisons :

- L'état T4 supporte une déformation plus importante que l'état T6.

- Dans cet état T4, une déformation a peu d'effet d'écrouissage. On peut être amené à faire un revenu sur des pièces finies en 6000, par exemple un profilé en 6000, mis en forme à l'état T4 (cintrage, filage). Les conditions de revenu des principaux alliages de la famille 6000 sont indiquées au tableau V.8.

Carter de volant de moteur de camion
(Brabant Alucast)



8.4. Les produits moulés

Le moulage est la voie la plus courte pour aller du métal liquide au produit fini. Il est particulièrement recommandé pour des pièces de forme géométrique complexe. Il est souhaitable de prévoir des pièces moulées au stade de la conception au Bureau d'Etudes.

Les fondeurs peuvent être d'une aide précieuse et devraient être consultés dès la phase de conception du projet. En effet, ils connaissent bien les équipements des fonderies, l'écoulement du métal dans le moule, le refroidissement et le retrait du métal lors de la solidification.

Quand la conception de la pièce moulée est optimisée en vue de sa production, le fondeur est en mesure de garantir, dans la plupart des cas, des propriétés mécaniques bien supérieures, en particulier pour l'allongement, à celles de la norme EN 1706.

Le tableau V.5 (paragraphe 6.3) mérite quelques explications :

- L'alliage 21100 exige une conception très soignée des pièces et une mise en œuvre en fonderie tout aussi soignée. En particulier, le dégazage du métal liquide doit être très poussé pour éviter les microporosités.
- Les indices B et C dans la colonne usinabilité se justifient

par le fait que le silicium contenu dans ces alliages est un facteur d'usure des outils de coupe.

- La résistance à la corrosion des surfaces "brutes de fonderie" des pièces moulées est toujours meilleure que celle des surfaces usinées et c'est toujours vrai sur une même pièce. Cela tient à la qualité (épaisseur, etc.) du film d'oxyde de la "peau de fonderie".

LA CONCEPTION DES PIÈCES MOULÉES

D'une manière générale, avant le développement d'une nouvelle pièce de moulage, lors de la conception de celle-ci, il est important d'en connaître les possibilités de fabrication, dont les techniques de moulage, de déterminer le choix de l'alliage le plus adapté à l'application envisagée. Le Bureau d'Etude doit suivre plusieurs règles de base :

- Les sections doivent rester constantes et les transitions d'épaisseur doivent être progressives pour éviter une accumulation de métal aux intersections de manière à éviter le risque de retassure et de porosité pendant la coulée.

- Pour les mêmes raisons, il faut éviter les bossages isolés et les épaisseurs doivent être correctement dimensionnées pour faciliter l'écoulement du métal liquide.

- Il doit y avoir un congé pour éviter la fissuration pendant la coulée. Ceci est particulièrement important pour le 21100.

- La conception du système d'alimentation doit être quelque peu asymétrique pour assurer le contrôle de la solidification et une alimentation uniforme.

- Le nombre d'intersections et de contre dépouilles doit être limité au minimum parce qu'elles compliquent l'usinage et les opérations de fonderie. Elles augmentent donc le coût des pièces. C'est également vrai pour les opérations d'ébarbage.

- Le niveau des tolérances dimensionnelles doit être compatible avec les opérations de moulage et ne pas introduire de risque de déformation lors des séquences des traitements thermiques : la mise en solution et la trempe.

9. Liste des normes

- NF EN 485 : Aluminium et alliages d'aluminium - Tôles, bandes et tôles épaisses
 - Partie 1 : Conditions techniques et contrôle de livraison
 - Partie 2 : Caractéristiques mécaniques
 - Partie 3 : Tolérances sur dimensions et forme des produits laminés à chaud
 - Partie 4 : Tolérances sur dimensions et forme des produits laminés à froid
- NF EN 515 : Aluminium et alliages d'aluminium – Produits corroyés – Désignation des états métallurgiques
- NF EN 573 : Aluminium et alliages d'aluminium – Composition chimique et forme des produits corroyés
 - Partie 1 : Système de désignation numérique
 - Partie 2 : Système de désignation fondé sur les symboles chimiques
 - Partie 3 : Composition chimique
 - Partie 4 : Forme des produits
- NF EN 755 : Aluminium et alliages d'aluminium – Barres, tubes et profilés filés
 - Partie 1 : Conditions techniques de contrôle de livraison
 - Partie 2 : Caractéristiques mécaniques
 - Partie 3 : Barres rondes, tolérances sur dimensions et forme
 - Partie 4 : Barres carrées, tolérances sur dimensions et forme
- NF EN 1706 : Aluminium et alliages d'aluminium – Pièces moulées – Composition chimique et caractéristiques mécaniques
- NF EN 12392 : Aluminium et alliages d'aluminium – Produits corroyés – Exigences particulières pour les produits destinés à la fabrication des appareils à pression.
- NF EN 14286 : Aluminium et alliages d'aluminium – Produits laminés soudables pour réservoirs de stockage et de transport des matières dangereuses

Le registre des alliages de corroyage "*Teal Sheets ; International alloy designation and chemical composition limits for wrought aluminium alloys*" est téléchargeable librement sur le site de l'EAA à l'adresse suivante : <http://www.eaa.net/en/about-aluminium/standards/international-registration/>



CONCEPTION ET CALCUL

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCTION | 57 |
| 2. LES ATOUTS DE L'ALUMINIUM | 58 |
| 3. LES SYMBOLES | 58 |
| 4. COMPARAISON DE L'ALUMINIUM AVEC L'ACIER | 58 |
| 5. CALCUL AUX ÉTATS LIMITES | 62 |
| 5.1. Philosophie | 62 |
| 5.2. Qu'est ce que l'état limite ultime ? | 62 |
| 5.3. Qu'est ce que l'état limite de service ? | 64 |
| 6. L'ETAT LIMITE DE SERVICE | 63 |
| 7. CONCEPTION AUX ÉTATS LIMITES ULTIMES | 64 |
| 7.1. Classes de sections transversales | 64 |
| 7.2. Résistance des sections transversales | 64 |
| 7.3. Les joints soudés | 69 |
| 7.4. Assemblages boulonnés | 73 |
| 8. LA FATIGUE | 76 |
| 8.1. La théorie | 76 |
| 8.2. Application pratique : comparaisons des durées de vie entre les bonnes et mauvaises conceptions de châssis | 82 |
| 9. CAS PARTICULIERS | 86 |
| 9.1. Citernes pour le transport des matières dangereuses (ADR) | 86 |
| 9.2. Bennes basculantes | 87 |
| 10. RÉFÉRENCES | 89 |

1. Introduction

Toutes les données de ce chapitre sont entièrement conformes au nouveau code de conception des structures en aluminium NF EN 1999 Eurocode 9 : *Calcul des structures en aluminium*

Partie-1-1 Règles générales

Partie-1-2 Calcul du comportement au feu

Partie-1-3 Structures sensibles à la fatigue

Partie-1-4 Tôles de structure formées à froid

Partie-1-5 Coques

La partie 1.1 est destinée aux calculs en statique tandis que la partie 1.3 est destinée aux calculs en fatigue, développés dans ce chapitre au paragraphe 8.

Une nouvelle norme européenne pour la mise en œuvre des structures en aluminium est disponible. Il s'agit de la norme EN 1090-3 : *Exécution des structures en acier et des structures en aluminium* – Partie 3 : Exigences techniques pour l'exécution des structures en aluminium.

Il est recommandé de se conformer aux règles de cette norme pour la construction des véhicules industriels en aluminium.

2. Les atouts de l'aluminium

La conception de structures en aluminium présente plusieurs avantages :

- Rapport élevé "résistance mécanique / poids"
- Facilité de créer son propre profil produit par extrusion
- Facilité de mise en œuvre
- Réparation facile
- Bonne résistance à la corrosion
- Longue durée de vie des véhicules industriels

Comparé à l'acier ou aux autres métaux usuels, l'utilisation de profilés sur mesure est un atout important de l'aluminium. Avec les profilés, il est possible et facile d'optimiser le tracé et les épaisseurs en fonction des contraintes. Il est tout aussi aisé de disposer sur les profilés des fonctionnalités facilitant la construction et l'assemblage des divers composants du produit.

3. Les symboles

Les symboles les plus utilisés sont définis ci-après

f_o Limite d'élasticité à 0,2 %

f_u Charge de rupture R_m

f_{ub} Charge de rupture R_m du boulon

E Module d'élasticité

d Diamètre du boulon

d_o Diamètre de l'alésage

t Epaisseur

A Surface de la section transversale

W Module élastique de la section

γ_M Coefficient partiel de sécurité des sections (voir la définition dans la section 5.2 de la norme NF EN 1999-1-1.)

L'indice $_{Ed}$ concerne le facteur de charge. Ce peut être une force axiale (N_{Ed}), un moment de flexion (M_{Ed}), un effort de cisaillement (V_{Ed}), une torsion (T_{Ed}) et des forces résultant des assemblages boulonnés ($F_{v,Ed}$ pour la force de cisaillement et $F_{t,Ed}$ pour la force de tension).

4. Comparaison de l'aluminium avec l'acier

L'acier et l'aluminium sont des métaux ayant tous les deux une résistance mécanique relativement élevée. Ils sont tous les deux incombustibles et ils ne contribuent pas à la "charge de l'incendie".

Dans les applications structurales, les principales différences sont :

L'élasticité : Le module d'élasticité, E , de l'aluminium est le tiers de celui de l'acier. Cela signifie qu'une poutre en aluminium de même section et supportant la même charge qu'une poutre en acier aura un fléchissement trois fois plus important que celui de la poutre en acier.

Le poids : La masse spécifique de l'aluminium est le tiers de celle de l'acier. Cela signifie que le poids d'une poutre en acier sera trois fois celui d'une poutre en aluminium de même section.

Le soudage : Lors du soudage, la zone de part et d'autre du cordon de soudure, la "Zone affectée thermiquement" ou ZAT en abrégé¹, subit un recuit dû à la chaleur dégagée. Les caractéristiques mécaniques de la ZAT se

trouvent diminuées du fait de cet effet de recuit. Cette diminution dépend de l'alliage, de son état métallurgique, du type de produit et de l'exécution de la soudure. L'acier ne subit habituellement pas ce phénomène.

Le coefficient de dilatation : Celui de l'aluminium est le double de celui de l'acier. Cela signifie qu'une pièce en aluminium va s'allonger deux fois plus que la pièce équivalente en acier dans le même intervalle de température. Le module d'élasticité de l'aluminium étant le tiers de celui de l'acier, la contrainte dans une pièce bloquée en aluminium sera égale aux deux tiers de celle de la pièce équivalente en acier.

La plupart des alliages d'aluminium à usage structural ont un ratio "résistance mécanique/module d'élasticité" relativement élevé. Cela est particulièrement vrai pour les alliages d'aluminium à l'état écroui ou à l'état revenu.

Ces alliages ont un ratio "résistance mécanique/module d'élasticité" de l'ordre de deux fois celui de l'acier ordinaire.

Toutefois, si cette comparaison est faite avec les aciers HLE, les alliages d'aluminium ont à peu près le même ratio que ceux-ci.

On doit aussi noter que le module d'élasticité d'un alliage dépend pour l'essentiel du métal de base. En d'autres termes, tous les alliages d'aluminium ont le même module d'élasticité et, bien évidemment, ceci est également vrai pour les aciers.

En conséquence, le module d'élasticité des aciers HLE est similaire à celui de l'acier traditionnel. Souvent, les bureaux d'étude qui conçoivent des structures en acier prennent la résistance mécanique comme critère de base du calcul et vérifient ensuite si le fléchissement reste dans les limites prévues.

Le fléchissement est le critère déterminant quand on calcule une structure en aluminium. C'est pour cela que le calcul de structure débute par le fléchissement et que l'on vérifie ensuite si la contrainte (ou la résistance mécanique) est dans les limites prévues.

Le fléchissement d'une pièce sous une charge de flexion dépend du module d'élasticité (E), du moment d'inertie (I), de la charge et de la portée. Pour une même portée et une même charge, le produit $E \times I$ déterminera le fléchissement.

1. HAZ en anglais (Heat Affected Zone) 2. Université Technique de Graz, Autriche

Pour avoir le même fléchissement en flexion sur une poutre en aluminium que sur une poutre en acier, le moment d'inertie de la poutre en aluminium doit être égal à trois fois celui de l'acier.

En ne jouant que sur l'augmentation des épaisseurs des constituants de la poutre en aluminium, celle-ci aura le même poids que la poutre en acier. Pour économiser du poids, la poutre en aluminium en flexion doit être plus haute ainsi que l'illustre le calcul suivant.

Une poutre en aluminium doit avoir le même fléchissement qu'une poutre IPE 240 en acier. Le moment d'inertie et la masse de cette poutre IPE 240 en acier valent :

$$I = 38.9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4.$$

$$\text{Poids} = 30.7 \text{ kg/m}.$$

Pour avoir le même fléchissement, la poutre en aluminium doit avoir un moment d'inertie de $(38,9 \times 3)$

$$I = 116.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Pour une poutre en aluminium de 240 mm de hauteur, cela est possible avec une poutre en I de $240 \times 240 \times 12 \times 18,3$, dont le moment d'inertie et la masse valent respectivement :

$$I = 116.6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Poids} = 30.3 \text{ kg/m}$$

Pour une poutre en aluminium de 300 mm de hauteur, le critère de fléchissement sera satisfait avec une poutre en I de $300 \times 200 \times 6 \times 12,9$, dont le moment d'inertie et

la masse valent respectivement :

$$I = 116.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Poids} = 18.4 \text{ kg/m}$$

Soit un gain de poids de 40 %.

Une poutre en I en aluminium de $330 \times 200 \times 6 \times 10$ mm a un moment d'inertie et une masse de :

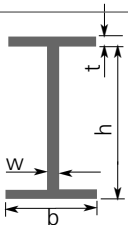

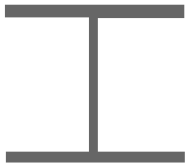
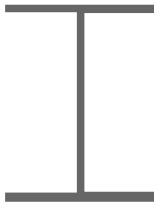
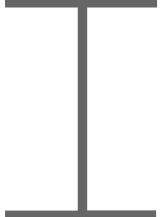
$$I = 117.3 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Soit un gain de poids de 49 % par rapport à son équivalente en acier.

Ces trois poutres en aluminium de section différente ont le même fléchissement qu'une poutre en acier IPE 240. C'est la forme et la stabilité qui déterminent le poids de la poutre.

Le tableau VI.1 donne quelques exemples de poutres et les gains de poids associés.

TABLEAU VI.1

| | Acier | Aluminium | Aluminium | Aluminium |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| Moment d'inertie en mm^4 | $38.9 \cdot 10^6$ | $116.6 \cdot 10^6$ | $116.7 \cdot 10^6$ | $117.3 \cdot 10^6$ |
| $E \times I$ (N/mm^2) | $8.17 \cdot 10^{12}$ | $8.16 \cdot 10^{12}$ | $8.17 \cdot 10^{12}$ | $8.21 \cdot 10^{12}$ |
| h (mm) | 240 | 240 | 300 | 330 |
| b (mm) | 120 | 240 | 200 | 200 |
| w (mm) | 6.2 | 12 | 6 | 6 |
| t (mm) | 9.8 | 18.3 | 12.9 | 10 |
| Masse unitaire (kg/m) | 30.7 | 30.3 | 18.4 | 15.8 |
| Masse en % de la poutre en acier | 100 % | 99 % | 60 % | 51 % |

La contrainte dans une structure en aluminium, calculée selon le critère de fléchissement, est très souvent faible. Dans l'exemple suivant, une poutre IPE 240 en acier est comparée à une poutre en aluminium en I de 330 x 200 x 6 x 10 mm (les schémas de ces deux poutres sont portés sur le tableau VI.1).

Le critère de fléchissement est 1/250 de la portée, soit 24 mm pour 6 000 mm de portée et la charge est de 11,6 kN/m.

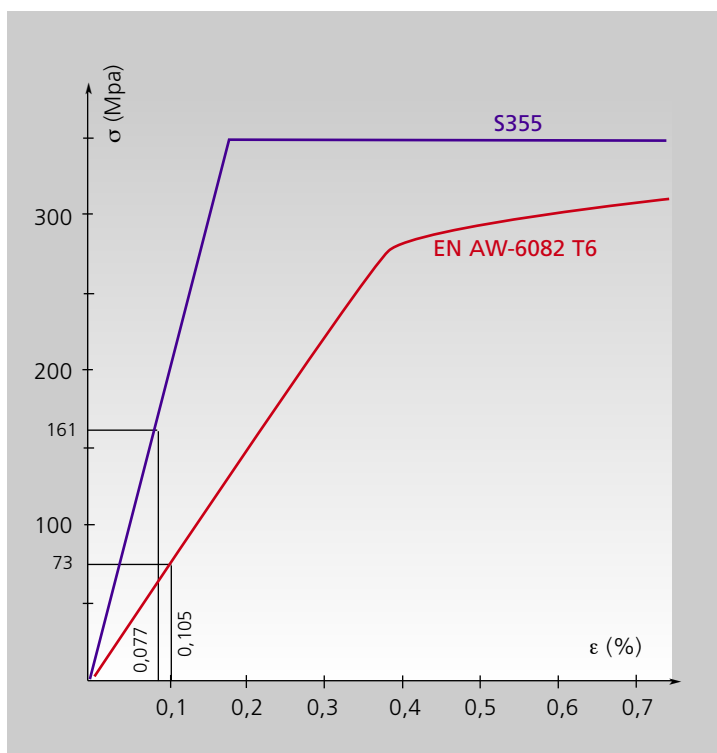
Ainsi que le montrent les courbes "déformation/contrainte" de l'acier S355 et celle de l'alliage d'aluminium 6082 T6 (figure VI.1), avec :

- le même fléchissement
- la même charge
- la même portée

la poutre en acier subit une contrainte de fléchissement de 161 MPa tandis que celle en aluminium ne subit que 73 MPa. C'est la contrainte maximum quand le fléchissement est de 24 mm.

FIGURE VI.1

COMPARAISON DE LA CONTRAINTE D'UNE POUTRE EN ACIER ET D'UNE POUTRE EN ALUMINIUM



Le lecteur trouvera au chapitre III, paragraphe 2.1 d'autres comparaisons de poutres optimisées en masse.

5. Calcul aux états limites

5.1. Philosophie

Les nouvelles méthodes de conception sont basées sur le calcul aux états limites et sur les coefficients de sécurité (ou de pondération). En Europe, les normes EN19XX sont les bases de références pour les constructions en génie civil. Pour les structures en aluminium, les normes à appliquer sont les suivantes :

Eurocode - EN 1990 : Base de calcul des structures

Eurocode 1 – EN 1991 : Action sur les structures

Eurocode 9 – EN 1999 : Calcul des structures en aluminium

L'Eurocode EN 1990 traite des coefficients de sécurité partiels des charges et les règles de combinaison de celles-ci pour établir les effets de l'action des différentes charges.

L'Eurocode EN 1991 indique les charges dans le bâtiment et les structures telles que leur propre poids, les charges variables, les charges dues à la neige, les charges transportées, etc.

L'Eurocode EN 1999 traite des règles de calcul des structures en aluminium.

5.2. Qu'est-ce que l'état limite ultime ?

L'état limite ultime est la condition pour laquelle le calcul de structure satisfait à la sécurité de la structure qui ne doit subir aucune destruction (collapse). Ce mode de calcul aux états limites ultimes est fait pour éviter la ruine de la structure.

Le coefficient partiel de sécurité de résistance (γ_M) doit prendre en compte la dispersion des propriétés

mécaniques et la géométrie de la section transversale. Le coefficient partiel de sécurité des assemblages doit, de plus, tenir compte des facteurs d'incertitude sur la soudure et sur la configuration de l'assemblage par boulons.

Le coefficient partiel de sécurité de l'effet de charge (γ_F) doit prendre en compte la dispersion de la détermination des charges et de la probabilité de leur interaction. Ce coefficient dépend du type de charge, de leur existence et de la manière dont elles interagissent.

Le poids mort (c'est-à-dire le poids propre de la structure) a un faible coefficient partiel de sécurité alors que la charge variable (c'est-à-dire toutes les forces qui varient au cours du transport, par exemple poids des marchandises, vibrations dues à la route) a un fort coefficient partiel de sécurité

La condition à remplir est :

$$\frac{R_k}{\gamma_M} \geq \gamma_F \cdot E_k$$

avec :

R_k valeur caractéristique de la résistance mécanique qui peut être une contrainte axiale ou de compression, un moment de flexion, un effort de cisaillement ou une charge complexe,

E_k valeur caractéristique des effets de charge qui peut être une contrainte axiale ou de compression, un moment de flexion, un effort de cisaillement ou une charge complexe appliquée à une section transversale ou à une liaison entre deux éléments.

γ_M coefficient partiel de sécurité (ou de pondération) pour les contraintes, également souvent appelé coefficient du matériau.

γ_F coefficient partiel de sécurité pour les effets de chargement, souvent appelé coefficient de chargement.

La relation entre ces quatre coefficients est illustrée sur la figure VI-2.

sionnement, la réalisation des assemblages sont presque toujours semblables dans toutes les constructions en aluminium.

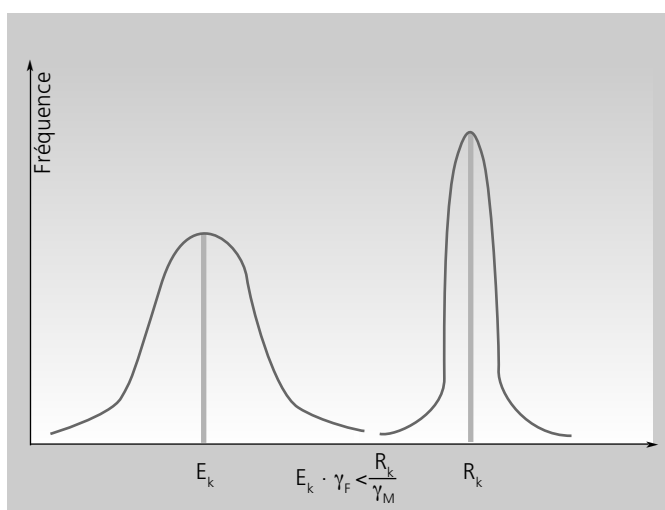
Les valeurs typiques du coefficient de chargement en construction et en génie civil sont de 1,2 pour le poids mort et 1,5

pour les charges variables. Les coefficients suivants :

- Poids mort : 1,1
- Charge variable : 1,5

peuvent être appliqués pour le calcul des composants des véhicules industriels.

FIGURE VI.2



Les valeurs typiques des coefficients partiels de sécurité pour la résistance mécanique sont de 1,10 (γ_{M1}) pour les pièces et 1,25 (γ_{M2} et γ_{Mw}) pour les assemblages par boulon, rivets et soudures. Ce sont des valeurs pour la construction et le génie civil, mais elles peuvent être utilisées pour tous les calculs de structure parce que le matériau, le dimen-

5.3. Qu'est ce que l'état limite de service ?

L'état limite de service est la condition pour laquelle le critère de service doit être satisfait. La plupart des critères concernent :

- Les limites de fléchissement dans toutes les directions
- Les efforts dynamiques, tels que les vibrations

Dans l'état limite de service, les deux coefficients partiels de sécurité : γ_M pour les contraintes, et γ_F pour les effets de charge, sont tous deux égaux à 1,0.

6. L'état limite de service

Dans l'état limite de service, tous les calculs sont faits sur le mode élastique. Les déformations élastiques sont calculées et comparées aux limites de fléchissement. L'amplitude des vibrations doit être calculée de la même manière. Si les vibrations ont une fréquence importante, la tenue en fatigue des pièces et des assemblages doit être vérifiée.

En principe, les calculs de fléchissements élastiques sont basés sur les moments d'inertie pour les sections transversales brutes des pièces. Pour celles dont la section transversale est de classe 4², il faut réduire le moment d'inertie si la part de la contrainte de compression de la section transversale est plus élevée que la contrainte de flambage.

Le moment d'inertie pour le calcul du fléchissement de la section droite en classe 4 des pièces est égal à :

$$I_{ser} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{f_o} (I_{gr} - I_{eff})$$

avec :

σ_{gr} contrainte maximale de flexion par compression à l'état

limite de service en fonction de la section transversale brute (positive dans la formule)

I_{gr} moment d'inertie de la section transversale brute

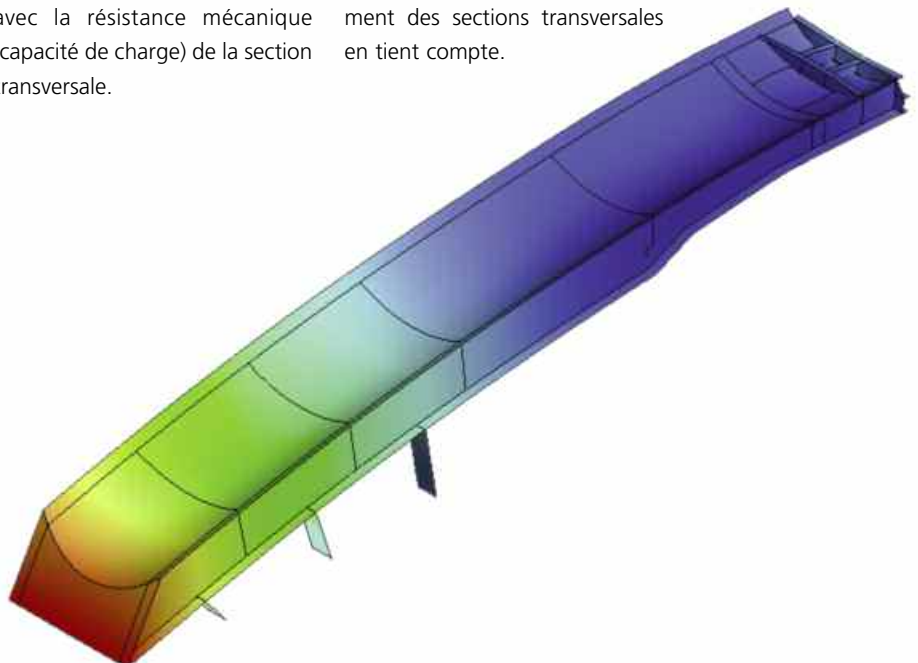
I_{eff} moment d'inertie de la section transversale effective à l'état limite de service avec possibilité de flambement local.

7. Conception aux états limites ultimes

7.1. Classes de sections transversales

Il y a quatre classes de sections transversales dont le comportement en compression et en flexion est indiqué au tableau VI-2. Ces classements ont un lien avec la résistance mécanique (capacité de charge) de la section transversale.

Les parties minces d'une section transversale peuvent flamber sous une faible contrainte réduisant ainsi la résistance mécanique de cette section. Le classement des sections transversales en tient compte.



2. Voir la section 7.2.4 de l'Eurocode NF EN 1999-1-1

TABLEAU VI.2

| Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 |
|---|--|---|---|
| Les sections transversales de classe 1 sont celles qui peuvent former une rotule plastique avec la capacité de rotation nécessaire à l'analyse plastique sans réduction de résistance. | Les sections transversales de classe 2 sont celles qui peuvent développer leur moment résistant plastique mais dont la capacité de rotation est limitée en raison du voilement local. | Les sections transversales de classe 3 sont celles où la contrainte calculée dans la fibre de compression extrême de la pièce en aluminium peut atteindre sa contrainte garantie. | Les sections transversales de classe 4 sont celles où le voilement local a lieu avant que la limite d'élasticité apparente dans un ou plusieurs éléments de la section transversale ne soit atteinte. |
| La résistance peut être calculée sur la base du comportement dans le domaine plastique en tenant compte de l'effet de durcissement du matériau. L'annexe F de l'Eurocode 1999-1-1 indique les règles de calcul. | La résistance peut être calculée sur la base du comportement parfaitement élastique en prenant comme valeur limite la limite d'élasticité conventionnelle. L'Eurocode 1999-1-1 indique les règles de calcul. | Annexe F. La résistance peut être calculée sur la base du calcul élastique. | La résistance peut être calculée sur la base de la section transversale effective. Les règles de calcul de cette section transversale effective sont indiquées dans l'Eurocode 1999-1-1, 6.1.5. |

Le chapitre 6.1.4. de l'Eurocode 1999-1-1 donne les règles de classement des sections transversales. Une valeur β proportionnelle au ratio "largeur / épaisseur", est calculée de la manière suivante :

$$\beta = \eta \cdot \frac{b}{t}$$

avec :

b , la largeur de la section transversale
 t , l'épaisseur correspondante
 η est une valeur dépendant de la contrainte locale et si la partie considérée fait partie ou non de la section transversale.
 Il existe des valeurs limites de β pour les différentes classes et pour des structures soudées ou

non soudées internes ou externes à la section transversale.

La plupart des structures en aluminium des véhicules industriels seront optimisées par rapport au poids. Le calcul dans le domaine élastique des classes 3 et 4 sera le cas le plus fréquent. Les sections transversales de classes 1 et 2 y seront rares.

7.2. Résistance des sections transversales

La valeur de calcul d'un effet d'action dans chaque section transversale ne doit pas dépasser la résistance de calcul correspondante et, si plusieurs effets agissent

simultanément, l'effet combiné ne doit pas dépasser la résistance pour cette combinaison. L'Eurocode 1999-1-1 donne les règles pour le calcul de la résistance

à la charge pour plusieurs types de pièces exposées à différents effets de chargement. Dans le tableau VI-3 sont indiquées quelques règles et quelques références.

TABLEAU VI.3

| Contrainte | Ref. EN 1999-1-1 | Résistance |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Traction | 6.2.3 | <p>Il faut que la résistance à la traction de la section transversale $N_{t,Rd}$ soit prise égale à la valeur la moins élevée de :</p> $N_{o,Rd} = \frac{A_g \cdot f_o}{\gamma_{M1}}, N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \text{ ou } N_{u,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>$N_{o,Rd}$ est le calcul de la résistance plastique $N_{u,Rd}$ est le calcul de la rupture locale sur une section avec trous pour boulons ou la section effective sur zone soudée A_g section transversale brute. • A_{net} section transversale nette A_{eff} section transversale effective tenant compte de la zone affectée thermiquement (ZAT)</p> |
| Compression (sans flambement) | 6.2.4 | <p>Il faut que la force de compression de la section transversale $N_{t,Rd}$ soit prise égale à la valeur la moins élevée de :</p> $N_{u,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}, N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}}$ <p>$N_{u,Rd}$ dans les sections à trous vides • $N_{c,Rd}$ est le calcul de la force de compression axiale de chaque section transversale • A_{net} est l'aire de la section nette avec déduction des trous vides et l'adoucissement de la zone affectée thermiquement (ZAT), s'il y a lieu • A_{eff} est l'aire de la section efficace basée sur l'épaisseur réduite tenant compte du voilement local et de l'adoucissement de la zone affectée thermiquement (ZAT)</p> |
| Moment fléchissant | 6.2.5 6.2.5.2 6.2.5.1 | <p>Il faut que la force du moment fléchissant de la section nette soit égale à :</p> $M_{u,Rd} = \frac{W_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>et dans chaque section transversale :</p> $M_{c,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el} \cdot f_o}{\gamma_{M1}}$ <p>W_{net} module élastique de la section nette tenant compte des trous et de l'adoucissement de la zone affectée thermiquement, s'il y a lieu W_{el} module d'élasticité de la section brute. α facteur de forme.</p> |
| Cisaillement | 6.2.6 6.7.4 6.7.5 6.7.6 | <p>Il faut que la force de cisaillement de la section non élancée soit égale à :</p> $V_{Rd} = \frac{A_v \cdot f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$ <p>A_v surface de cisaillement Les règles de calcul des âmes élancées et des âmes raidies, relève de celui des poutres à âmes pleines (flambage des poutres)</p> |

| Contrainte | Ref. EN 1999-1-1 | Résistance |
|--|--|--|
| Torsion | 6.2.7 6.2.7.2 6.2.7.3 | <p>Le calcul du moment résistant de torsion de St Venant sans gauchissement est :</p> $T_{Rd} = \frac{W_{t,pl} \cdot f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$ <p>$W_{t,pl}$ module de torsion plastique</p> <p>La torsion avec gauchissement est la somme de deux effets internes.</p> <p>Pour une sollicitation combinée de cisaillement et de torsion, la capacité est égale à la capacité réduite du cisaillement.</p> |
| Flexion et cisaillement | 6.2.8 | L'effort tranchant réduit la force du moment fléchissant. Si l'effort tranchant est inférieur à la moitié de la force du moment fléchissant, l'effet de la force du moment fléchissant peut être négligé. |
| Flexion et effort normal | 6.2.9 6.2.9.1 6.2.9.2 6.2.9.3 | <p>Il existe des formules pour les effets combinés d'un effort normal et des moments de flexion sur un ou deux axes pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sections transversales ouvertes • Sections creuses et sections pleines • Eléments avec soudure localisée |
| Flexion, effort tranchant et effort normal | 6.2.10 | L'effort tranchant réduit l'effet combiné de l'effort normal et de la force du moment fléchissant. Si la valeur de calcul de l'effort tranchant est inférieure à la moitié de la résistance au cisaillement, elle peut être négligée. |
| Support d'âme | 6.2.11 | Cette disposition concerne la conception d'âmes soumises à des forces localisées causées par des charges concentrées ou des réactions appliquées à une poutre. |
| Compression (résistance au flambement) | 6.3 | <p>Les pièces soumises à une compression axiale peuvent subir une rupture de trois manières possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Par flexion • Par torsion ou torsion flexion • Par écrasement local <p>Le calcul de la résistance au flambement d'une pièce en compression est :</p> $N_{b,Rd} = \frac{\kappa \cdot \chi \cdot A_{eff} \cdot f_o}{\gamma_{M1}}$ <p>κ facteur tenant compte des effets de la zone affectée thermiquement de la soudure</p> <p>χ facteur de réduction pour le mode de flambement considéré</p> <p>A_{eff} est l'aire de la section efficace. C'est la section brute pour les sections transversales de classe 1, 2 et 3 et pour celle de la classe 4, elle est diminuée des effets dus au flambement local.</p> |

| Contrainte | Ref. EN 1999-1-1 | Résistance |
|---|---|--|
| Pièces en flexion et compression axiale | <p>6.3.3</p> <p>6.3.3.1</p> <p>6.3.3.2</p> <p>6.3.3.3</p> <p>6.3.3.4</p> <p>6.3.3.5</p> | <p>Les pièces sensibles à la flexion et à la compression axiale peuvent subir une rupture de deux manières possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flambement par flexion • Flambement par torsion latérale <p>Il existe des formules combinées pour les pièces qui sont soumises à une compression axiale en combinaison avec une flexion sur un ou deux axes et qui subissent une rupture en flambement par flexion. Ces formules sont données pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Section transversale ouverte à doublement symétrique • Section transversale pleine • Section transversale creuse et tube • Section transversale ouverte à simple symétrie <p>Il existe des formules combinées pour les pièces à section transversale ouverte symétrique par rapport à l'axe principal, à section transversale à symétrie centrale ou doublement symétrique soumises à flambement par torsion latérale. Ces formules permettent aussi de calculer les effets suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pièces comportant des soudures localisées • Pièces ayant une section localement réduite • Moments d'extrémités inégaux et/ou charges latérales |
| Poutre à âme pleine | <p>6.7</p> <p>6.7.2 & 6.7.3</p> <p>6.7.4 & 6.8</p> <p>6.7.6</p> <p>6.7.5</p> <p>6.7.7</p> <p>6.1.5</p> <p>6.3.2</p> | <p>Une poutre à âme pleine est une poutre profonde comportant une semelle en traction, une semelle en compression et une âme en tôle épaisse. L'âme a en général une dimension élancée et peut être renforcée transversalement par des raidisseurs.</p> <p>Les âmes se voilent en cisaillement à des charges appliquées relativement faibles mais il est possible de mobiliser une résistance de post flambement considérable en raison de l'action de la zone de traction.</p> <p>Les poutres à âme pleine sont parfois fabriquées avec un renforcement transversal de l'âme en forme de nervures de renforcement ou de raidisseurs transversaux (en profilés) faiblement espacés.</p> <p>Les poutres à âme pleine peuvent être sollicitées par une action combinée de moments, d'efforts tranchants et d'efforts normaux et par des charges locales sur les semelles. En raison de leur dimensions élancées, elles peuvent être soumises au déversement, à moins qu'elles ne soient correctement soutenues sur leur longueur.</p> <p>Les modes de rupture en flambement peuvent être :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flambement d'âme par contrainte de compression • Voilement par cisaillement • Interaction entre effort tranchant et moment fléchissant • Flambement d'âme à cause de charge locale sur les semelles • Flambement d'âme induit par la semelle • Flambement en torsion de la semelle (flambement local) • Flambement par torsion latérale |

7.3. Les joints soudés

7.3.1. Généralités

Les règles de l'Eurocode 1999-1-1, paragraphe 8.6, s'appliquent aux structures soudées MIG ou TIG et celles de la norme NF EN 1090-3 concernent la qualité des soudures. Il est vivement recommandé de certifier les soudeurs. Les règles concernant les « consommables » sont rappelées dans le chapitre VIII, section 3.8 de cette brochure et dans l'Eurocode 1999-1-1, section 3.3.4 et dans la norme NF EN 1011-4.

Lors du soudage, les alliages d'aluminium à durcissement structural subissent un adoucissement dans la zone affectée thermiquement "ZAT"

Dans un joint soudé, il peut y avoir 3 niveaux de résistance mécanique :

- celui du métal de base (f_o)
- celui de la zone affectée thermiquement ($f_{o,ZAT}$)
- celui de la soudure (f_w)

Normalement, il faut connaître la résistance mécanique de la zone affectée thermiquement et celle de la soudure.

La résistance mécanique de la zone affectée thermiquement dépend de l'alliage, de son état métallurgique, du type de produit et la méthode de soudage. Le tableau 3.2 de l'Eurocode 1999-1-1 indique les valeurs du "facteur

HAZ" et f_o en fonction des alliages et de leurs états métallurgiques.

La résistance dans la soudure (f_w) en fonction du métal d'apport 5356 ou 4043A et des alliages du métal de base est indiquée dans le tableau 8-8 de cet Eurocode.

Sur l'aluminium, il est pratiquement impossible de réaliser des soudures bout à bout d'un seul coté sans latte support. Si on ne peut éviter de telles soudures, l'épaisseur effective de la soudure doit être comptée comme étant égale à :

- La profondeur de préparation du joint pour les soudures de type J et U
- La profondeur de préparation du joint, moins 3 mm ou moins 25 %, le plus petit des deux, pour une soudure en V ou avec chanfrein.

De plus, pour les soudures bout à bout exécutées d'un seul coté, une soudure d'angle peut compenser la faible pénétration de la soudure bout à bout.

Lors de la conception d'un joint soudé, il faut appliquer quelques règles pratiques :

- Faciliter l'accès au joint soudé. La torche de l'équipement utilisé pour le soudage de l'aluminium est généralement large, de sorte qu'il faut plus d'espace autour du joint soudé.
- Faciliter le contrôle visuel du joint soudé en laissant un large accès. Toutes les soudures doi-

vent subir un contrôle visuel à 100 % en plus des contrôles non destructifs prévus.

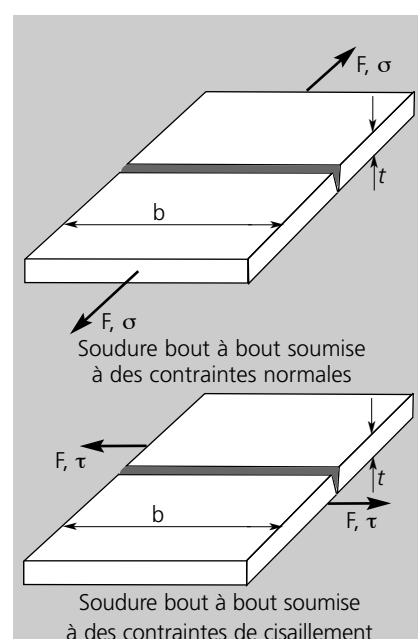
- Ménager une latte support sans laquelle aucune pénétration complète n'est possible sur les soudures bout à bout exécutées d'un seul coté.

- Positionner autant que possible les soudures dans des zones où les contraintes sont faibles.

7.3.2. Soudures bout à bout

Il est nécessaire que la soudure des éléments porteurs soudés bout à bout, soit faite avec pénétration complète.

FIGURE VI.3



L'épaisseur efficace d'une soudure bout à bout avec pénétration complète doit être prise égale à la plus grande épaisseur des éléments assemblés. La longueur efficace doit être prise égale à la longueur totale de la soudure si on utilise des plaques de départ et d'arrêt. Dans le cas contraire, la longueur totale doit être réduite de deux fois l'épaisseur t (figure VI.3).

Pour les contraintes de calcul, il faut appliquer les équations suivantes :

- Contrainte normale, en traction ou en compression, perpendiculaire à l'axe de la soudure :

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

- Contrainte de cisaillement :

$$\tau \leq 0,6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

- Effet combiné des contraintes normales et de cisaillement :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau^2} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

7.3.3. Soudures d'angle

Une soudure d'angle est caractérisée par la section de la gorge « a », exprimée en mm. La figure VI.4 indique comment mesurer l'épaisseur de cette gorge.

La longueur efficace doit être prise égale à la longueur totale de la soudure si :

FIGURE VI.4
SOUDURE D'ANGLE

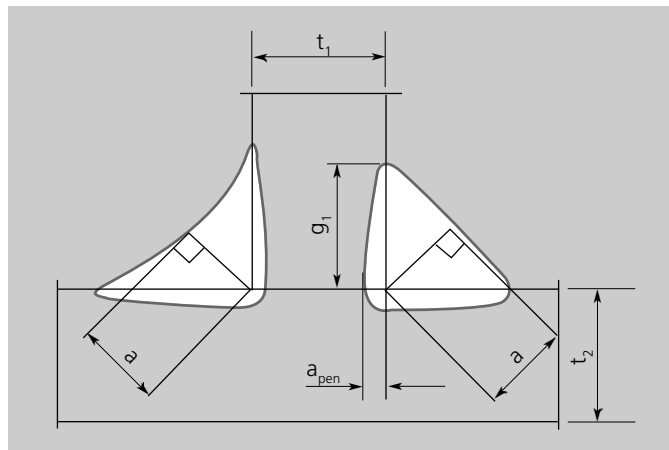


FIGURE VI.5
EXEMPLE DE RÉPARTITION UNIFORME DE CONTRAINTES

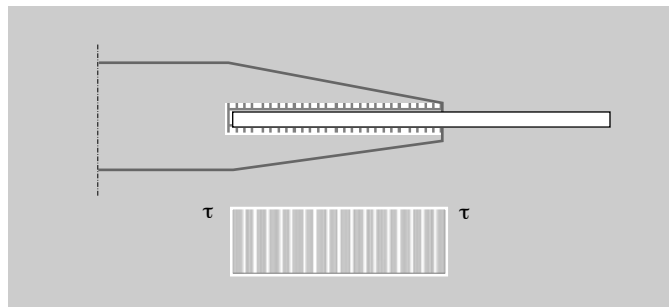
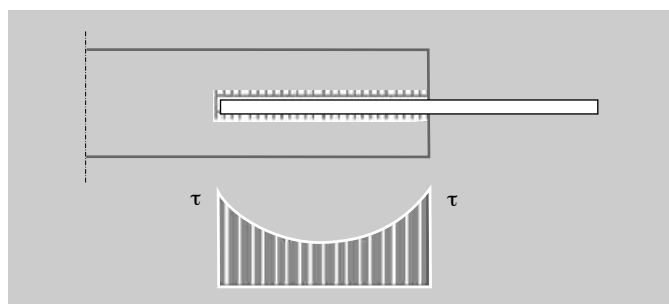


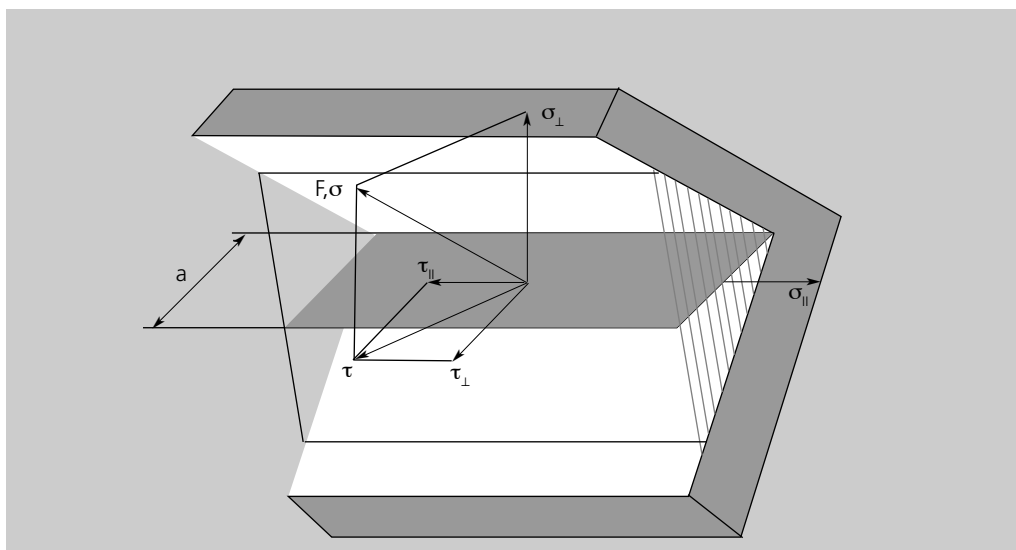
FIGURE VI.6
EXEMPLE DE RÉPARTITION NON UNIFORME DE CONTRAINTES



- La longueur de la soudure est égale à au moins 8 fois l'épaisseur de la gorge
 - La longueur de la soudure ne dépasse pas 100 fois l'épaisseur de la gorge avec une distribution de contrainte non uniforme
 - La répartition des contraintes sur la longueur de la soudure est constante.
- Les forces agissant sur une soudure d'angle doivent être résolues en composantes de contraintes par rapport à la section de la gorge (figure VI.7). Ces composantes sont :
- Une contrainte normale σ_{\perp} , perpendiculaire à la section de la gorge
 - Une contrainte normale σ_{\parallel} , parallèle à l'axe d'une soudure
 - Une contrainte de cisaillement τ agissant sur la section de la gorge, perpendiculaire à l'axe de la soudure
 - Une contrainte de cisaillement τ_{\parallel} agissant sur la section de la gorge, parallèle à l'axe de la soudure

FIGURE VI.7

CONTRAINTES AGISSANT SUR LA SECTION DE GORGE D'UNE SOUDURE D'ANGLE



La résistance de calcul d'une soudure d'angle doit satisfaire à l'équation suivante :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

7.3.4. La zone affectée thermiquement (ZAT)

La contrainte de la zone affectée thermiquement doit être vérifiée. La contrainte est calculée par rapport au plus petit plan de rupture

pour les soudures bout à bout et les soudures d'angle.

Les schémas ci-dessous (ref BS 8118) indiquent le plan de rupture pour quelques types de soudure (Figures VI.8, VI.9, VI.10, VI.11) :

W : cordon de soudure, mesure du cordon de soudure

F : zone affectée thermiquement, contrôle de la fusion du joint

T : zone affectée thermiquement, contrôle de la section transversale

FIGURE VI.8
SOUDURE BOUT À BOUT

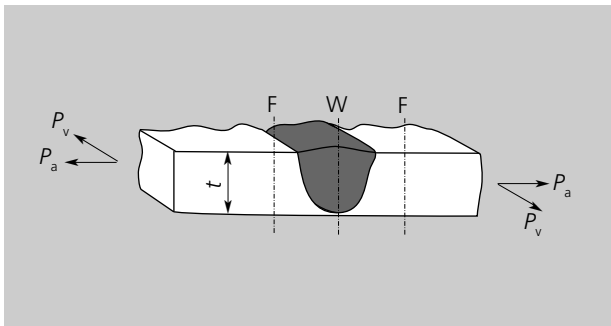


FIGURE VI.9
SOUDURE D'ANGLE

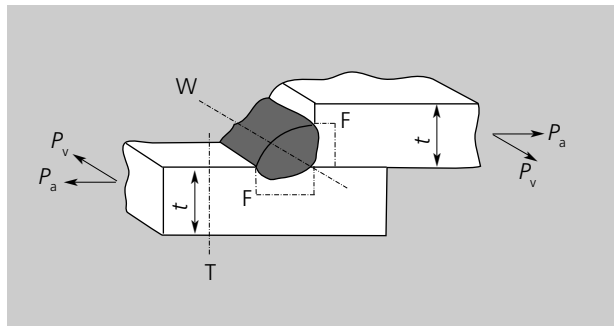


FIGURE VI.10
SOUDURE BOUT À BOUT EN T

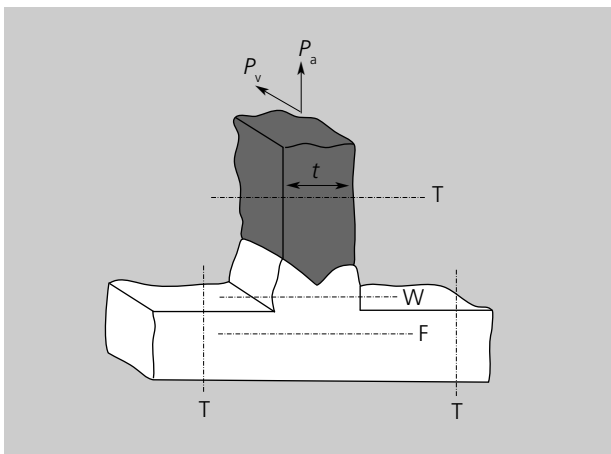
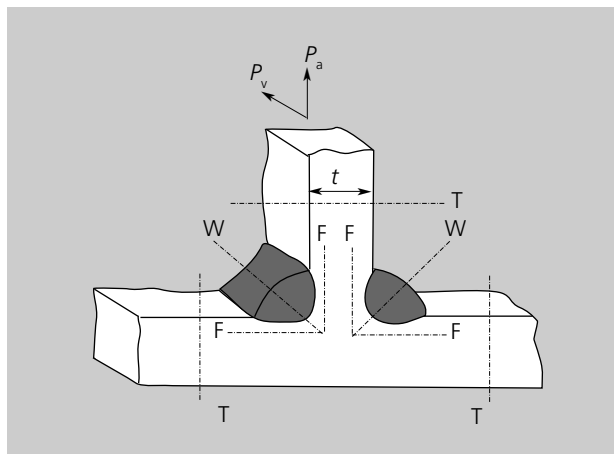


FIGURE VI.11
SOUDURE D'ANGLE DOUBLE



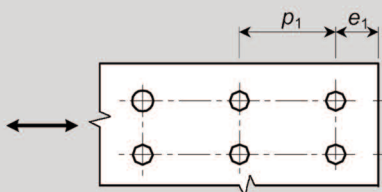
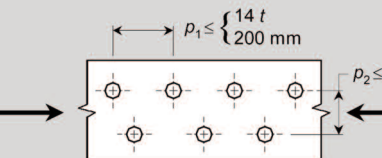
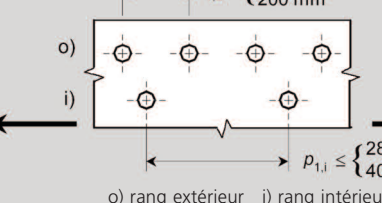
7.4. Assemblages boulonnés

Les règles de calcul des assemblages boulonnés sont données à la section 8-5 de l'Eurocode 1999-1-1.

Les distances minimales et maximales d'espacement et de distance par rapport aux bords des boulons sont indiquées au tableau VI.4.

Le jeu maximum pour les boulons ajustés est de 0,3 mm et 1,0 mm pour les non ajustés.

TABLEAU VI.4

| | Distance minimum | Espace régulier | Distance maximum |
|--|--|--|--|
|  | $e_1 = 1.2 \cdot d_0$ $e_2 = 1.2 \cdot d_0$ $p_1 = 2.2 \cdot d_0$ $p_2 = 2.2 \cdot d_0$ | $e_1 = 2.0 \cdot d_0$ $e_2 = 1.5 \cdot d_0$ $p_1 = 2.5 \cdot d_0$ $p_2 = 3.0 \cdot d_0$ | $e_1 = 4 \cdot t + 40mm$ $e_2 = 4 \cdot t + 40mm$ $p_1 \leq \begin{cases} 14 \cdot t \\ 200mm \end{cases}$ $p_2 \leq \begin{cases} 14 \cdot t \\ 200mm \end{cases}$ |
|  | $p_1 = 2.2 \cdot d_0$ $p_2 = 2.4 \cdot d_0$ | $p_1 = 2.5 \cdot d_0$ $p_2 = 3.0 \cdot d_0$ | $p_1 \leq \begin{cases} 14 \cdot t \\ 200mm \end{cases}$ $p_2 \leq \begin{cases} 14 \cdot t \\ 200mm \end{cases}$ |
|  <p>o) rang extérieur i) rang intérieur</p> | $p_1 = 2.2 \cdot d_0$ | $p_1 = 2.5 \cdot d_0$ | Rang extérieur: $p_1 \leq \begin{cases} 14 \cdot t \\ 200mm \end{cases}$ Rangs intérieurs: $p_1 \leq \begin{cases} 28 \cdot t \\ 400mm \end{cases}$ |

d_0 est le diamètre du trou et t est l'épaisseur de la tôle

TABLEAU VI.5

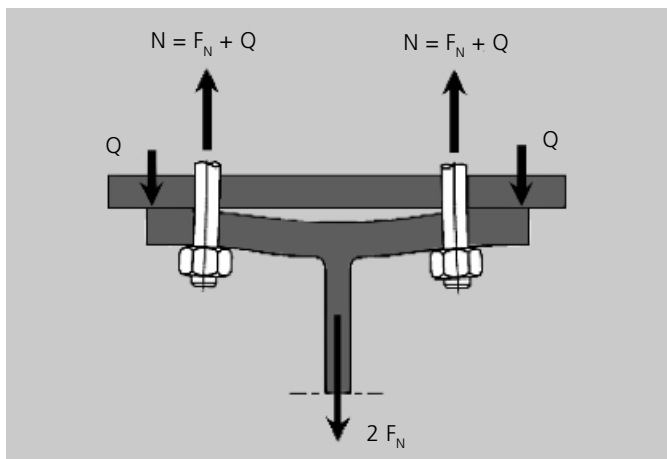
| Mode de rupture | Formule | Paramètres |
|---|---|---|
| Résistance au cisaillement par plan de cisaillement | $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$ | $\alpha_v = 0,6$ pour les boulons en acier de classe 4.6, 5.6, et 8.8 $\alpha_v = 0,5$ pour les boulons en acier de classe 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 $\alpha_v = 0,5$ pour les boulons en acier inoxydable et en aluminium A est la surface section transversale du boulon au plan de cisaillement |
| Résistance en pression diamétrale | $F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ | $k_1 = \text{le plus petit de } \begin{cases} 2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \\ 2.5 \end{cases}$ pour les boulons de la rangée du bord $k_1 = \text{le plus petit de } \begin{cases} 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \\ 2.5 \end{cases}$ pour les boulons des rangées intérieures $\alpha_b = \text{le plus petit de } \begin{cases} \alpha_d \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1.0 \end{cases}$ $\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$ pour les boulons d'extrémité $\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$ pour les boulons des rangées internes |
| Résistance à la traction | $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ | $k_2 = 0,9$ pour les boulons en acier $k_2 = 0,5$ pour les boulons en aluminium $k_2 = 0,63$ pour les boulons en acier à tête fraisée A _s est la surface du boulon soumise à la contrainte de traction |
| Résistance au poinçonnement | $B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ | d _m est la moyenne entre surangle et surplat de la tête du boulon ou de l'écrou ou le diamètre extérieur de la rondelle t _p est l'épaisseur de la plaque sous la tête du boulon ou de l'écrou |
| Effet combiné de cisaillement et de traction | $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$ | F _{v,Ed} est la contrainte de cisaillement F _{t,Ed} est la contrainte de traction |

Les modes de rupture pour les assemblages boulonnés peuvent être :

- L'arrachement en bloc qui consiste en une rupture en cisaillement au niveau de la rangée de boulons le long de la partie en cisaillement du groupe de trous, accompagnée d'une rupture par traction de la ligne de trous de boulons sur la partie en traction du groupe de boulons
- Rupture en cisaillement dans le boulon
- Fissure dans le trou de fixation du boulon
- Rupture sous tension du boulon
- Poinçonnage autour de la tête du boulon ou de l'écrou
- Combinaison de rupture par cisaillement et par tension.

Il faut tenir compte également des forces de traction qui ne transitent pas par les boulons. Ces contraintes, appelées forces de levier (Q), peuvent être très importantes (Figure VI.12)

FIGURE VI.12
FORCES DE LEVIER



Fourgon pour le transport de boissons

8. La fatigue

8.1. La théorie

Les structures soumises à des charges répétées peuvent être sensibles à la fatigue quand le nombre de cycles est élevé et, ceci, même si les charges provoquent de faibles contraintes sur la structure.

Les ruptures en fatigue se produisent à partir de fissures initiées sur les zones de concentration de contraintes.

Sous l'effet de charges répétées, les fissures se propagent en provoquant une strie à chaque cycle de chargement qui sera visible sur les surfaces de rupture.

La distance entre stries dépend du niveau de contrainte et elle donne une indication sur la vitesse de propagation des fissures.

Le niveau de contrainte est défini comme étant la différence algébrique entre le pic de contrainte et le creux de celle-ci lors d'un cycle. A de faibles niveaux de contraintes, la vitesse de propagation des fissures est faible alors qu'à de forts niveaux, la vitesse est élevée (Figure VI.13).

Banc d'essai de tenue en fatigue (Benalu)

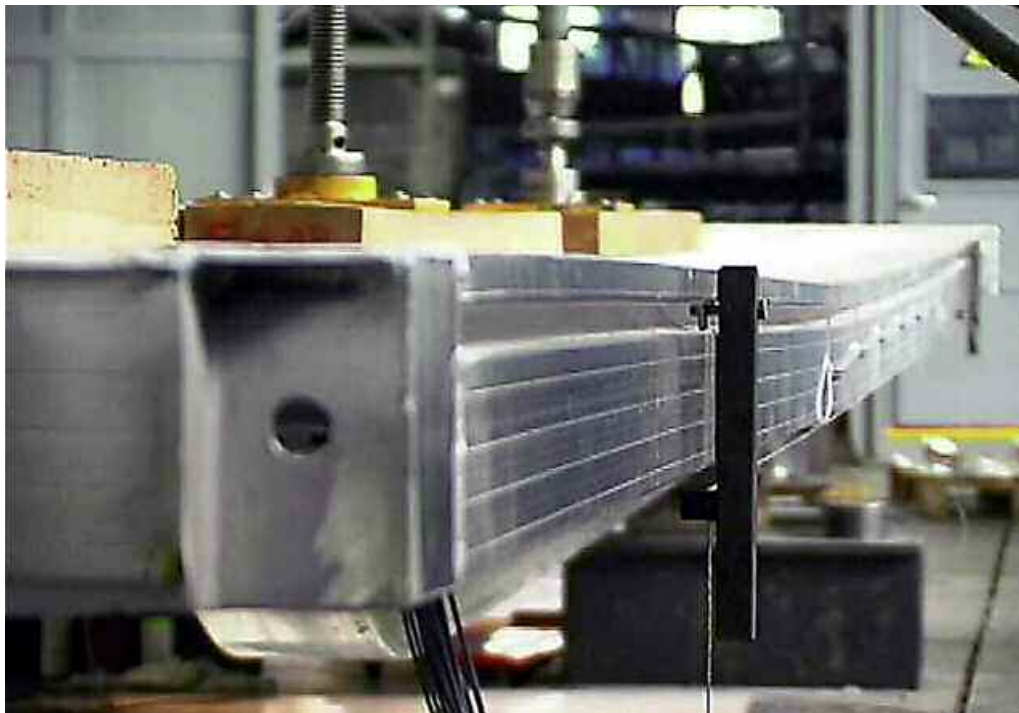
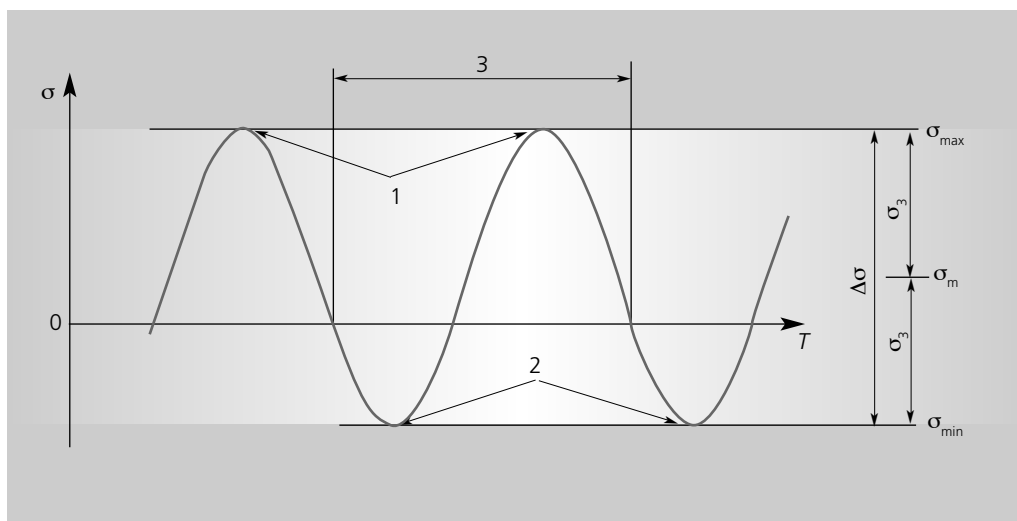


FIGURE VI.13



1. Maximum de contrainte
(crête de contrainte)

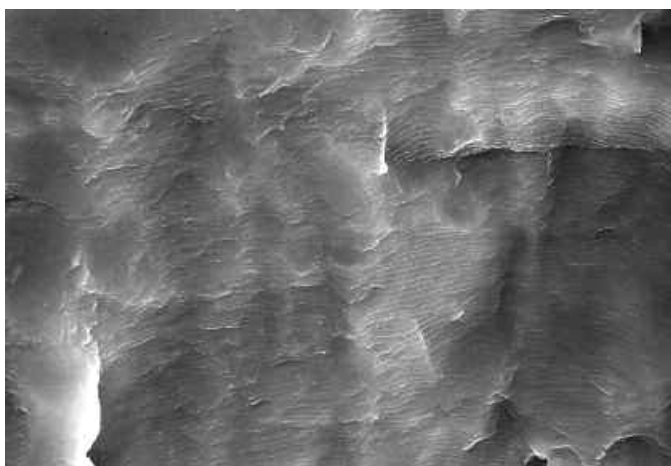
2. Minimum de contrainte
(creux de contrainte)
3. Cycle de contrainte

$\Delta\sigma$ Etendue de la contrainte
 σ_3 Amplitude de la contrainte

La norme EN 1999-1-3 donne les règles de calcul en fatigue. Ces règles sont basées sur les niveaux de qualité définis dans les normes EN 1999-1-3 et EN 1090-3. La résistance à la fatigue dépend de :

- La géométrie au point considéré
- Niveau de contrainte
- Nombre de cycles
- Rapport de contraintes
- Qualité de la fabrication

Aspect caractéristique des stries d'une rupture en fatigue d'un tube en aluminium



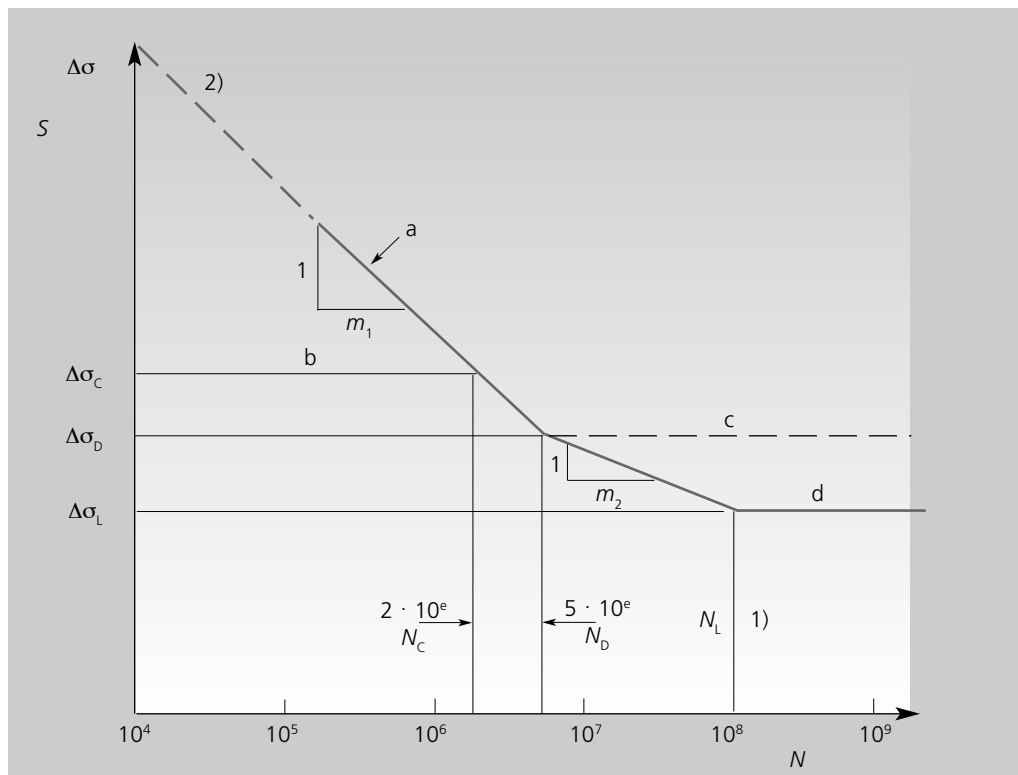
Les propriétés du métal de base ont une faible influence sur la tenue en fatigue des structures et de leurs éléments. Elles n'ont aucune influence sur la tenue en fatigue des assemblages.

Pour une tôle ou un extrudé non usiné ou uniquement percé ou avec encoche, le standard dévie entre le 7020 et d'autres alliages structurels.

La résistance à la fatigue est donnée sous forme de courbe S/N

pour différents détails constructifs. Tous les détails constructifs envisagés par la norme EN 1999-1-3 ont leur propre courbe S/N dont un exemple typique est représenté sur la figure VI.14.

FIGURE VI.14



a. courbe de résistance à la fatigue b. résistance de référence à la fatigue
c. limite de fatigue sous amplitude constante d. limite de troncature

1) 10^9 est le nombre ultime de cycles envisagés

2) Pour les faibles cycles de fatigue, la partie de cette courbe peut être incorrecte. L'annexe F de la norme EN 1999-1-3 pro-

pose d'autres modes de calcul. Il faut alors vérifier que la contrainte maximum calculée n'excède pas l'état limite ultime.

Le ratio de contrainte R est égal au rapport de la contrainte minimale divisé par la contrainte maximale dans un historique de contraintes d’amplitude constant ou dans un cycle faisant partie d’un historique de contraintes d’amplitude variable.

Un ratio favorable augmente la résistance à la fatigue de la plupart des détails constructifs par rapport aux valeurs indiquées dans les normes. De même, un ratio favorable pour $R < + 0,5$ a pour effet de réduire l’influence des sites d’initiation dans le

métal de base assemblé. Il a le même effet pour $R < - 0,25$ sur les sites d’initiation aux soudures ou aux assemblages boulonnés sans ajustage quand les contraintes résiduelles sont connues.

Il n’y a rien de changé par rapport aux valeurs normalisées pour les autres cas.

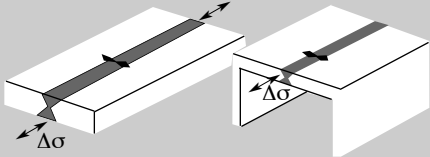
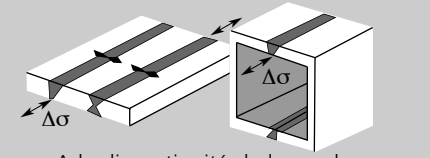
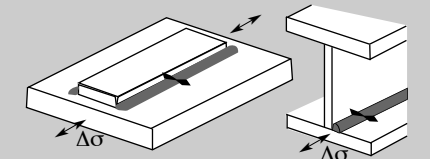
Quelques détails constructifs typiques sont illustrés au tableau VI.6 où figure dans

- la première colonne, le type de détail constructif
- la seconde colonne, la caté-

gorie du détail constructif

- la troisième colonne, le site d’initiation et la direction de la contrainte
- la quatrième colonne, le type de soudure
- la cinquième colonne, les paramètres de contrainte
- la sixième colonne, le mode de soudage
- la septième colonne, le niveau de qualité des soudures
- la huitième colonne, le niveau de qualité de la surface et de la géométrie

TABLEAU VI.6

| | | | | | | | |
|-----|--------|---|--|---|--|---|---|
| 5.1 | 63-4,3 |  | Soudure bout à bout à pénétration complète Sur épaisseurs de soudure arasée par meulage | Tension nominale sur le site d'initiation | Soudage automatique continu | B | C |
| 5.2 | 56-4,3 | A la discontinuité de la soudure | | | | C | C |
| 5.3 | 45-4,3 |  | Soudure bout à bout à pénétration complète | | Toute latte support doit être continue | C | D |
| 5.4 | 45-4,3 |  | Soudure d'angle continue | | | B | C |
| 5.5 | 40-4,3 | A la discontinuité de la soudure | | | | C | D |

Les critères des niveaux de qualité sont indiqués dans la norme EN ISO 10042 et EN 1090-3.

Les types de détails constructifs 5.4 et 5.5 (tableau VI.6) sont des exemples de détails constructifs pouvant avoir plusieurs résistances à la fatigue dépendant de la qualité de la soudure.

Les courbes S/N correspondant à ces détails constructifs sont reproduites sur la figure VI.15 et les valeurs numériques correspondantes sont indiquées au tableau VI.7.

FIGURE VI.15
INFLUENCE DE LA QUALITÉ DE LA SOUDURE SUR LA RÉSISTANCE À LA FATIGUE

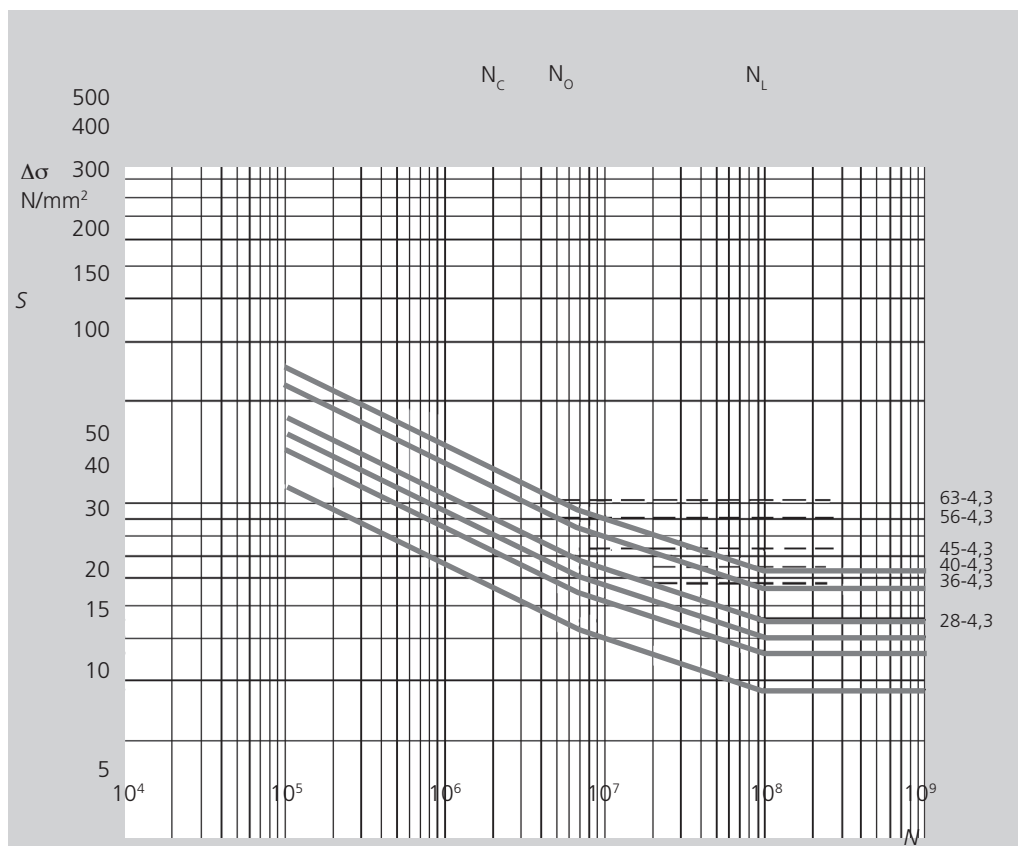


TABLEAU VI.7

| PENTE | | Cycles <i>N</i> | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>m</i> ₁ | <i>m</i> ₂ | 1E+05 | 1E-06 | 2E+06 | 5E+06 | 1E+07 | 1E+08 | 1E+09 |
| 4.3 | 6.3 | 126.4 | 74.0 | 63.0 | 50.9 | 45.6 | 31.6 | 31.6 |
| 4.3 | 6.3 | 112.4 | 65.8 | 56.0 | 45.3 | 40.5 | 28.1 | 28.1 |
| 4.3 | 6.3 | 90.3 | 52.9 | 45.0 | 36.4 | 32.6 | 22.6 | 22.6 |
| 4.3 | 6.3 | 80.3 | 47.0 | 40.0 | 32.3 | 29.0 | 20.1 | 20.1 |
| 4.3 | 6.3 | 72.3 | 42.3 | 36.0 | 29.1 | 26.1 | 18.1 | 18.1 |
| 4.3 | 6.3 | 56.2 | 32.9 | 28.0 | 22.6 | 20.3 | 14.1 | 14.1 |

Essai en fatigue sur route (Benalu)



8.2. Application pratique : comparaison des durées de vies entre bonnes et mauvaises conceptions de châssis

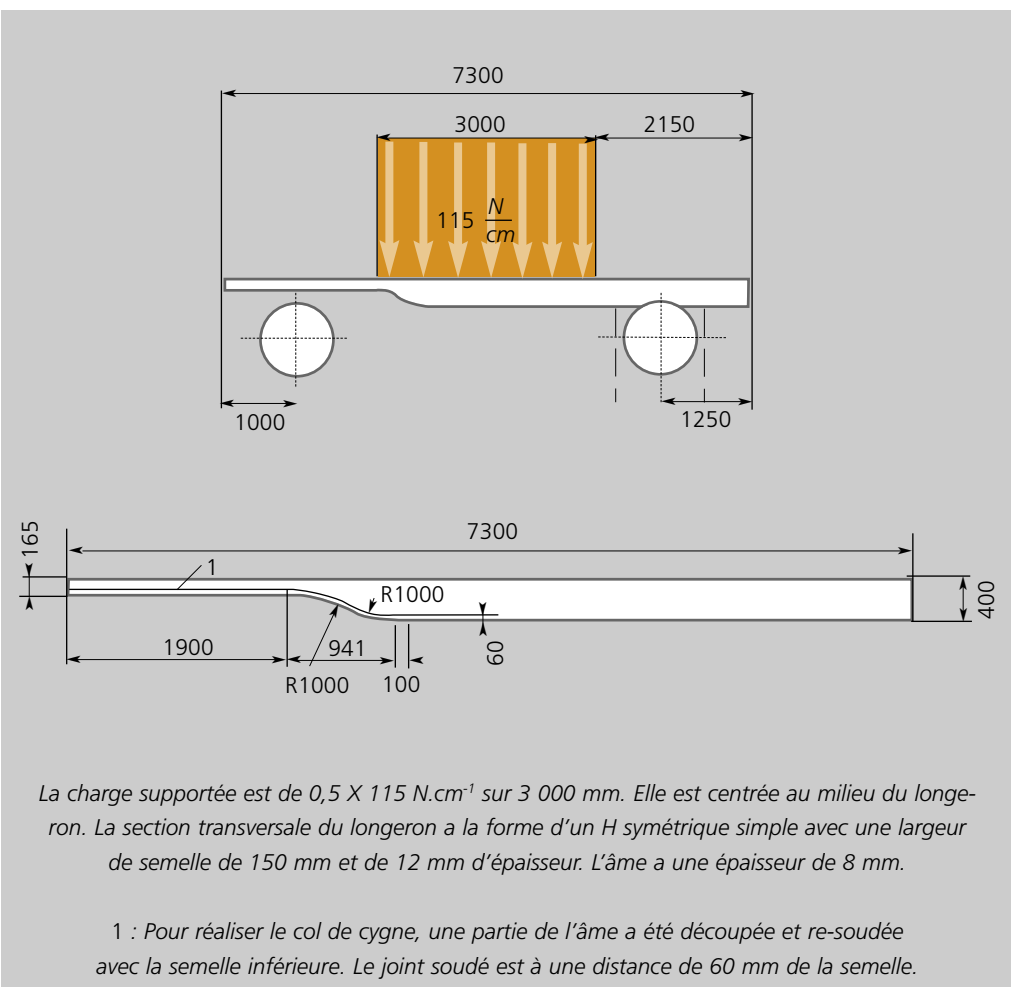
Dans ce chapitre, il est établi une comparaison des durées de vies en fatigue en fonction de la

conception (bonne ou mauvaise) d'un châssis en aluminium.

L'élément de comparaison est un châssis dont les caractéristiques sont décrites figure VI.16.

FIGURE VI.16

CONDITIONS LIMITES ET GÉOMÉTRIE DU LONGERON OBJET DES ANALYSES PAR ÉLÉMENTS FINIS



8.2.1. Le col de cygne

La zone du col de cygne d'un longeron est la partie soumise aux plus fortes contraintes et doit donc être traitée avec beaucoup de précautions telles que :

- éviter toute soudure ou traitement thermique est extrêmement important dans cette zone et spécialement sur les semelles ou à proximité de celles-ci
- exclure tout boulonnage sur les semelles ou à proximité de celles-ci
- éviter toute fixation aux longerons
- laisser la zone des longerons sans renforts
- éviter toute variation brusque des épaisseurs ou des propriétés des matériaux dans cette zone.

Il faut obligatoirement surveiller la fabrication ou contrôler les plans d'atelier, les manuels de conception, les procédures de soudage, les procédures d'assurance qualité et les instructions des concepteurs pendant tout le processus de fabrication.

Les figures VI.17, VI.18 et VI.19 montrent quelques exemples de durée de vie en fonction de la géométrie du col de cygne (c'est-à-dire l'angle de courbure).

On constate que le niveau de contrainte s'élève de 70% et que

FIGURE VI.17
LONGERON DE CHÂSSIS, R = 1000 mm ($\sigma_{\max} = 43 \text{ MPa}$, $\delta = 5.3 \text{ mm}$)

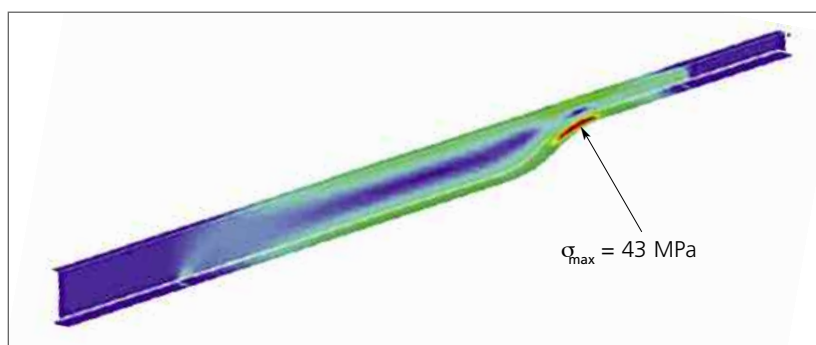


FIGURE VI.18
LONGERON DE CHÂSSIS, R = 450 mm ($\sigma_{\max} = 73 \text{ MPa}$, $\delta = 6.9 \text{ mm}$)

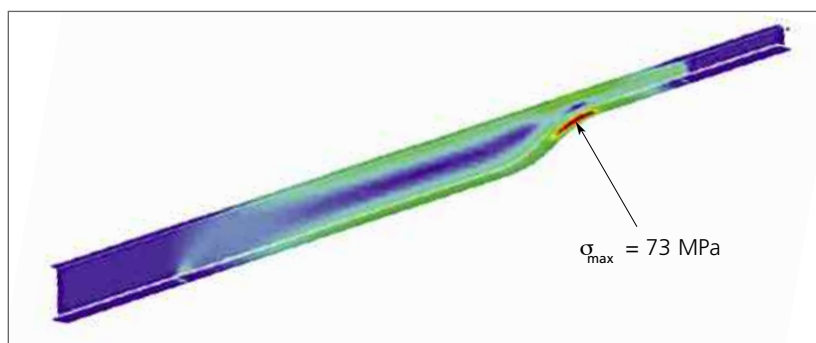
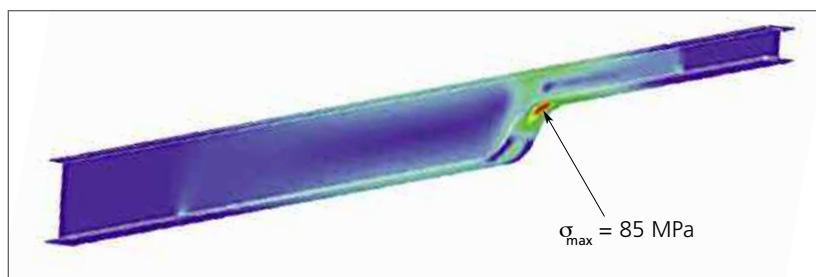


FIGURE VI.19
LONGERON DE CHÂSSIS, R = 300 mm ($\sigma_{\max} = 85 \text{ MPa}$, $\delta = 7.5 \text{ mm}$)



la flexion augmente d'environ 23% lorsque le rayon de courbure passe de 1000 à 450 mm.

En réduisant le rayon de courbure habituel de 450 mm à 350 mm, on diminue la durée de vie de 50 %.

Comme le montre l'illustration, un rayon plus important, de 1000 mm, aboutit à des contraintes très faibles et illustre encore les bienfaits des transitions douces.

8.2.2. Fixation des bécquilles

La fixation des bécquilles aux longerons du châssis est inévitablement située à proximité du col de cygne, c'est-à-dire dans la zone soumise aux plus fortes contraintes. Il faut donc s'arranger pour éviter toute perforation ou soudage de la semelle inférieure, c'est-à-dire privilégier les fixations au niveau de l'âme des longerons.

Les figures VI.20 et VI.21 comparent les conséquences d'une perforation dans la semelle par rapport à une perforation dans l'âme dans la zone du col de cygne.

La réduction de la durée de vie relative pourra atteindre jusqu'à plus de 80% en raison de la concentration de contraintes dans la zone perforée de la semelle.

La perforation de l'âme ne réduit pas la durée de vie. Les deux exemples montrent que l'éloignement par rapport à la zone la plus sollicitée du longeron est important.

S'il est impossible d'éviter une perforation de la semelle, sa localisation doit être aussi proche que possible du bord de la semelle (aussi loin que possible de l'âme).

FIGURE VI.20
PERFORATION DANS LA SEMELLE DU LONGERON, ($\varnothing = 20$ mm) : $\sigma_{\max} = 102$ MPa

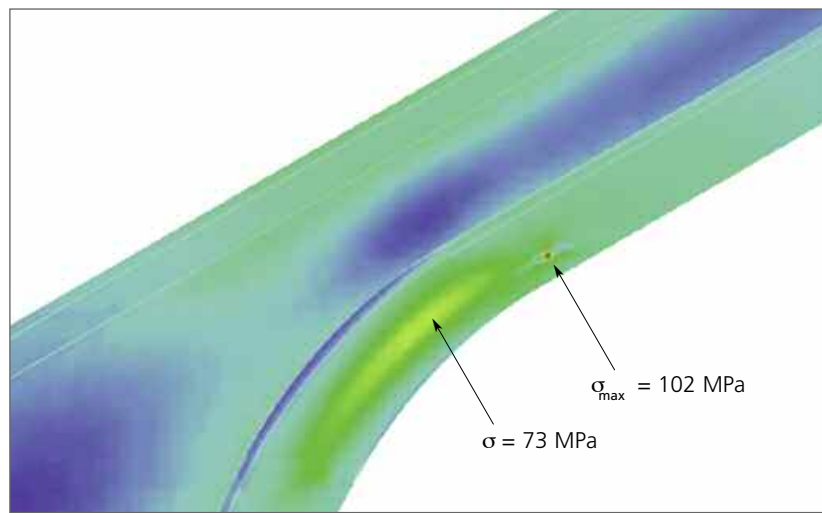
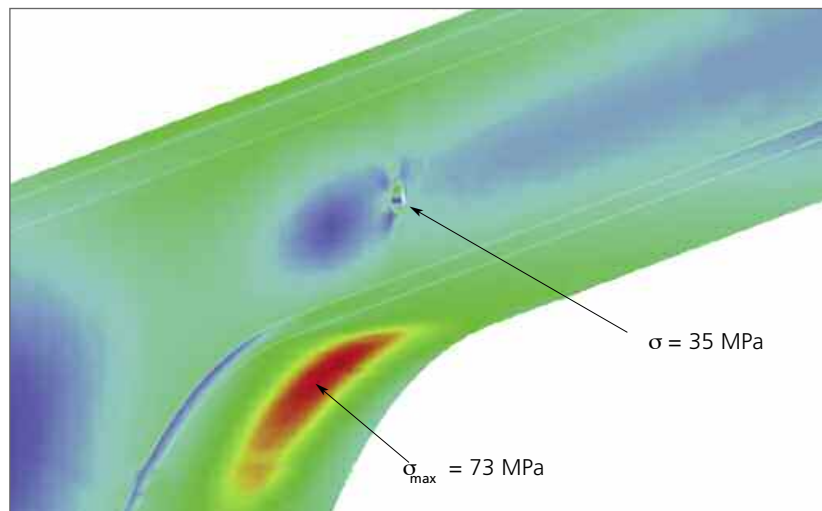


FIGURE VI.21
PERFORATION DANS LA SEMELLE DU LONGERON, ($\varnothing = 20$ mm) : $\sigma_{\max} = 73$ MPa (sur la semelle)



Il est à noter que, d'après les normes actuelles, la distance minimale requise à partir du bord devrait normalement être de $1,5 \varnothing - 2,0 \varnothing$ en fonction de la direction de la charge, etc.

Il faut également noter que la capacité de flexion de la semelle doit être vérifiée en fonction de la localisation réelle.

8.2.3 Le soudage

En guise d'alternative au boulonnage, on recourt souvent à une fixation par soudage dans la zone de l'âme du longeron.

C'est une solution parfaitement acceptable pour autant que l'on évite de souder dans l'âme ou à proximité de celle-ci (c'est-à-dire dans la zone du longeron soumise aux plus fortes contraintes). Les Figures VI.22 et VI.23 illustrent les conséquences d'une soudure sur la semelle et sur l'âme.

La réduction de la durée de vie pourra atteindre jusqu'à plus de 90% en raison de l'effet de la concentration de contrainte dans la zone soudée de la semelle et de la diminution des propriétés du matériau du fait de l'échauffement (effet zone affectée thermiquement).

Le soudage dans la zone de l'âme n'aura aucun effet sur la durée de vie.

Dans les deux cas, on suppose que la soudure est géométriquement parfaite. Dans la réalité, les imperfections sont fréquentes et il faut donc veiller à la qualité de l'exécution et envisager un traitement ultérieur des soudures.

FIGURE VI.22

SOUDURE SUR LA SEMELLE DU LONGERON : $\sigma_{\max} = 97 \text{ MPa}$

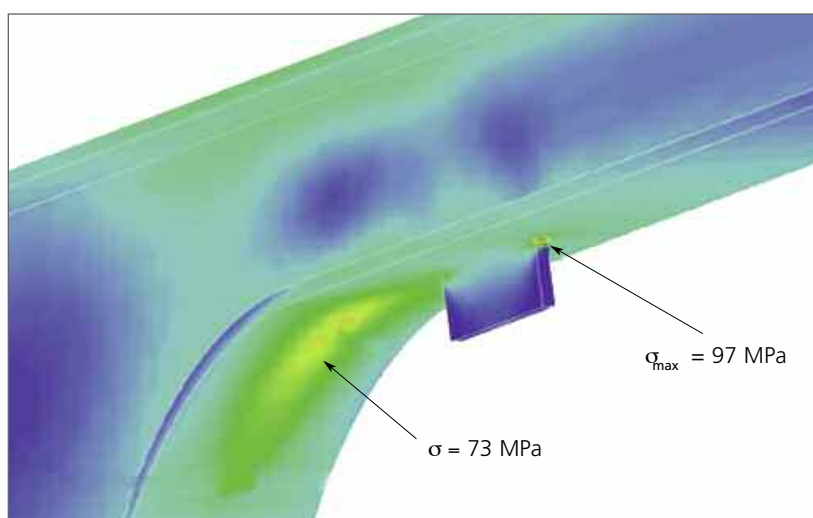
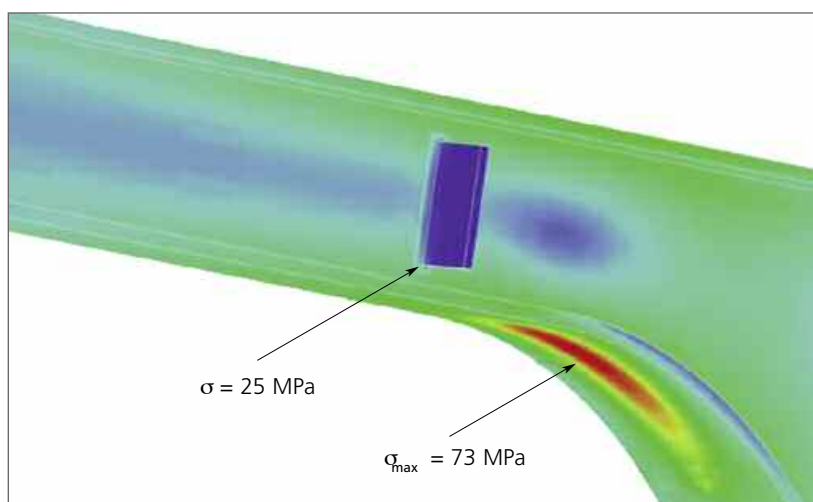


FIGURE VI.23

SOUDURE SUR L'ÂME DU LONGERON : $\sigma_{\max} = 73 \text{ MPa}$ (sur la semelle)





Citerne routière en aluminium (Schrader)

9. Cas particuliers

9.1. Citerne pour le transport des matières dangereuses (ADR)

Les citernes pour le transport des matières dangereuses doivent être construites suivant des règles définies dans les règlements et normes suivantes :

- ADR : Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route³
 - NF EN 13094 : Citerne destinées au transport de matières dangereuses. – Citerne métalliques ayant une pression de service inférieure ou égale à 0,5 bar. – Conception et construction
 - NF EN 14025 : Citerne destinées au transport de matières dangereuses. – Citerne métalliques sous pression. – Conception et fabrication
- En particulier, l'épaisseur e de l'enve-

loppe est déterminée par la formule d'équivalence ou e_0 est l'épaisseur minimum de l'enveloppe en acier doux et R_m et A , la charge de rupture et l'allongement du métal choisi :

$$e = \frac{e_0 \times 464}{\sqrt[3]{(R_m \times A)^2}}$$

Pour les citernes possédant une protection contre l'endommagement dû à un choc latéral ou à un renversement :

- Pour celles ayant une section transversale circulaire $\leq 1,80$ m
 $e_0 = 3$ mm
 e ne peut être inférieur à 4 mm pour les alliages d'aluminium⁴
- Pour celles ayant une section transversale circulaire $> 1,80$ m
 $e_0 = 4$ mm
 e ne peut être inférieur à 5 mm pour les alliages d'aluminium⁴

Pour les autres citernes :

- $e_0 = 5$ mm celles ayant une section transversale circulaire $\leq 1,80$ m
- $e_0 = 6$ mm celles ayant une section transversale circulaire $> 1,80$ m

3. Voir ADR – Annexe A – partie 6 – Chapitre 6.8, <http://www.unece.org/trans/danger/danger.htm>

4. Quel que soit le résultat de la formule d'équivalence

En plus, une épaisseur minimum de l'enveloppe est imposée. Elle dépend du type de citerne, de la dimension de l'enveloppe et du matériau.

Les alliages d'aluminium appropriés pour cette application sont répertoriés dans la norme NF EN 14286 "Aluminium et alliages d'aluminium. - Produits laminés soudables pour réservoirs de stockage et de transport des matières dangereuses". Consulter également le chapitre V, section 6.4 de cette brochure.

Pour les citernes possédant une protection contre l'endommagement dû à un choc latéral ou à un renversement, plusieurs alliages sont répertoriés dans la norme NF EN 14286 pour construire des citernes d'épaisseur $e = 5,3 \text{ mm}$ (correspondant au produit $R_m \times A = 6\,600$) et même $5,0 \text{ mm}$ (pour lesquels $R_m \times A = 7\,152$).

9.2. Bennes basculantes

9.2.1. Fabrication

Les caisses de bennes basculantes peuvent être réalisées selon deux philosophies.

- Assemblage de tôles et de raidisseurs extrudés (c'est la technique la plus courante) pour le fond et les flancs de la caisse
- Usage exclusif de profilés encastrés et/ou soudés pour les flancs, tôles et raidisseurs pour le fond de la caisse

D'autres solutions mixtes sont apparues ces dernières années : le plancher est en tôle d'acier sur les bords duquel sont boulonnés les flancs en alliages d'aluminium.

On distingue deux types de bennes :

- Les bennes rectangulaires
- Les bennes semi circulaires

Indépendamment du type de benne, toutes les sections efficaces des profilés et les épaisseurs des tôles sont calculées par rapport à :

- La charge réelle (en compression / traction)
- Les contraintes de flexion (statique et pendant les opérations de bennage)
- Les autres contraintes telles que le cisaillement, le fléchissement, le flambage.

De plus, lors de la conception de la benne, il faut aussi tenir compte du type de produits transportés

Caisses de bennes basculantes (Stas)





Production de caisses de bennes basculantes (Schmitz)

parce que la charge peut être concentrée localement sur une surface réduite ou au contraire répartie uniformément sur toute la surface du plancher de la benne.

9.2.2. La résistance à l'usure

L'usure (ou l'abrasion) est l'aspect le plus discuté quand il s'agit de fabriquer une benne basculante en aluminium. Beaucoup d'incertitudes sur la résistance à l'abrasion de l'aluminium ainsi que la grande variété de types de chargements possibles rendent presque impossible de trouver une solution parfaite pour chaque type de produit transporté.

La résistance à l'usure doit non seulement être prise en compte lors du calcul de l'épaisseur des tôles ou des profilés, particulièrement pour le fond de la benne, mais également dans le choix de l'alliage.

Définition de l'usure

Le mécanisme de l'usure est très complexe. L'usure intervient généralement quand une surface (d'habi-

tude plus dure que l'autre) est capable de rayer l'autre, moins dure.

La zone de contact entre les deux surfaces est ainsi très petite et concentrée sur les aspérités.

L'effort tranchant est transféré au travers de ces points de contacts et de ce fait les forces ainsi concentrées peuvent être très intenses.

Les abrasifs peuvent agir dans un processus de meulage dans lequel l'abrasif est en position fixe par rapport à une surface ou dans un processus de rodage dans lequel l'abrasif « tourbillonne » et produit une série d'indentations.

Paramètres de l'usure

Les conditions d'usure peuvent énormément varier d'un chargement à l'autre. Il n'est donc pas toujours possible d'établir une relation entre la dureté d'un alliage à durcissement par écrouissage et sa résistance à l'usure⁵. On constate que le type de chargement est un paramètre

très important et discriminant.

Des produits mous comme les pommes de terre, les fruits, les betteraves ou les autres denrées agricoles sont beaucoup moins abrasives que les produits minéraux.

Pour ces derniers, tels que des graviers, des poudres, du ciment, de la chaux, etc., la dimension, la forme (dont leurs arêtes tranchantes), la dureté du matériau sont de loin les critères les plus importants concernant l'abrasion. Des essais de laboratoire ont montré que certaines qualités de sable ont une capacité d'abrasion supérieure de 35 % par rapport à d'autres variétés de sable.

Même les résidus de l'abrasion peuvent constituer à eux seuls une cause d'usure.

Il faut donc prendre en compte le nombre de bennages. L'abrasion intervient d'autant plus rapidement que leur nombre est élevé. La masse des tôles d'aluminium consommée par abrasion est en relation directe avec le nombre de bennages.

5. Abrasive Wear of Aluminium Alloys Rubbed against Sand. K. Ellucchi, S. Mezlini, N. Guermazi, Ph. Kapsa. Wear 261 (2006)1316-1321

Très souvent, les bennes basculantes sont utilisées par les transporteurs pour d'autres produits que ceux pour lesquels la benne a été initialement prévue. Il en résulte qu'il est alors difficile d'estimer la durée de vie du plancher de la benne.

Les alliages typiques pour les planchers sont les suivants :

- 5083 H32, H321, H34
- 5086 H24
- 5353 H34
- 5454 H22, H24
- 5456 H34
- autres alliages spéciaux de laminage.

9.2.3. Le choix des alliages d'aluminium pour les tôles de fond des bennes

Le choix des alliages d'aluminium pour les tôles de fond des bennes basculantes est maintenant très souvent une question d'expérience, de disponibilité de matériau et de procédé de production utilisé par le fabricant de bennes.

10. Références

- NF EN 1999-1-1 : Eurocode 9, *Calcul des structures en aluminium* - Eurocode 9 - Partie 1-1 : règles générales
- NF EN 1999-1-3 : Eurocode 9 : *Calcul des structures en aluminium* - Partie 1-3 : structures sensibles à la fatigue

- NF EN 1090-3 : Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 3 : exigences techniques pour l'exécution des structures en aluminium
- EN ISO 10042 : Soudage -- Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudés à l'arc -- Niveaux de qualité par rapport aux défauts
- BS 8118 : Structural Use of Aluminium, Part 1 Code of practice for design
- ADR : Agrément pour le transport sur la route des matières dangereuses⁶
- NF EN 13094 : Citernes destinées au transport de matières dangereuses. – Citernes métalliques ayant une pression de service inférieure ou égale à 0,5 bar. – Conception et construction
- NF EN 14025 : Citernes destinées au transport de matières dangereuses. – Citernes métalliques sous pression. – Conception et fabrication
- NF EN 14286 Aluminium et alliages d'aluminium. - Produits laminés soudables pour réservoirs de stockage et de transport des matières dangereuses

Benne basculante entièrement en aluminium (Menci)



6. Voir ADR – Annexe A – partie 6 – Chapitre 6.8, <http://www.unce.org/trans/danger/danger.htm>



LA MISE EN ŒUVRE

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUCTION | 92 |
| 1.1. La famille des aluminium-magnesium (série 5000) | 92 |
| 1.2. La famille des aluminium-magnesium-silicium (série 6000) | 92 |
| 1.3. La famille des aluminium-zinc-magnesium (série 7000) | 93 |
| 2. MISE EN ŒUVRE DES DEMI PRODUITS LAMINÉS | 93 |
| 2.1. Stockage | 93 |
| 2.2. Traçage | 94 |
| 2.3. Découpe | 94 |
| 2.4. Roulage | 97 |
| 2.5. Pliage | 97 |
| 2.6. Les surfaces non développables | 97 |
| 3. MISE EN ŒUVRE DES DEMI PRODUITS FILÉS | 98 |
| 3.1. Stockage | 98 |
| 3.2. Découpe | 98 |
| 3.3. Cintrage | 98 |
| 4. LE PERÇAGE | 102 |
| 4.1. Le perçage classique | 102 |
| 4.2. Le foret à goujures droites | 102 |
| 4.3. Le foret à carotter | 102 |
| 4.4. Le foret à demi rond et le foret à trois quarts de rond | 102 |
| 5. LE TARAUDAGE | 103 |
| 5.1. Taraudage par enlèvement de copeaux | 103 |
| 5.2. Taraudage par refoulement | 104 |
| 5.3. Les filets rapportés | 104 |
| 6. L'EMBOUTISSAGE PROFOND | 104 |
| 7. LE REPOUSSAGE | 105 |
| 7.1. Avantages du repoussage | 105 |
| 7.2. Diamètres des disques de repoussage | 105 |

1. Introduction

Les opérations de mise en forme utilisées dans les ateliers de construction des véhicules industriels sont nombreuses et variées. Il faut couper, plier, rouler et cintrer des demi produits en tôles ou en extrudés pour fabriquer des véhicules industriels ou leurs accessoires.

Ces opérations, dont certaines comme le découpage ou le perçage peuvent être maintenant programmées et automatisées, sont conduites selon des règles qui sont résumées dans ce chapitre. Dans certains cas, et dans certains pays, elles font également l'objet de normes qui sont citées quand elles existent.

Dans tous les cas, il est très important d'utiliser des équipements dédiés à l'aluminium.

La plupart des alliages d'aluminium utilisés dans la construction des véhicules industriels appartiennent à la famille des aluminium – magnésium (série 5000) pour les tôles, ou à la famille des aluminium – magnésium – silicium (série 6000) pour les demi produits extrudés.

1.1. La famille des aluminium-magnésium (série 5000)

A l'état recuit, les alliages de cette famille ont une excellente aptitude à la mise en forme du fait de l'écart important entre la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ et la charge de rupture R_m ainsi que de la valeur de l'allongement¹.

Quand le métal est écroui par une mise en forme à froid, il peut être nécessaire de restaurer la ductilité pour poursuivre celle-ci à la main ou à la machine.

Un recuit s'impose, traitement thermique facile à faire soit en four soit avec une torche de soudage². On se servira du suif comme indicateur de température, il vire au brun à 340 °C. De la craie ou des sticks pyrométriques sont également disponibles.

Si cela est nécessaire, plusieurs recuits intermédiaires peuvent être répétés entre les passes de mise en forme. Il y a cependant une règle en or à respecter : on ne fait un recuit que si le métal devient difficile à travailler, en d'autres termes quand le taux d'écrouissage est plus grand ou au moins égal à ce qu'on appelle l'écrouissage critique.

1.2. La famille des aluminium-magnésium-silicium (série 6000)

Ils sont essentiellement utilisés sous forme de profilés. Les deux éléments d'alliage sont le silicium et le magnésium.

Ce sont des alliages à durcissement structural commercialisés à l'état T6 ou T5 plus rarement dans les états T4 et T1³.

D'une manière générale, l'aptitude à la mise en forme de cette famille d'alliages dans les états revenus T6 ou T5 est faible.

Néanmoins, leur mise en forme exécutée à froid ou à chaud dans ces états réduit considérablement leur résistance mécanique, de l'ordre de 40%.

Les mises en forme plus compliquées doivent être faites sur des états métallurgiques T1 ou T4, avant le revenu qui leur confère la dureté maximum des états T5 et T6. Dans ce cas, il est recommandé de faire la mise en forme au plus

1. Cf norme NF EN 485-2.

2. Le recuit des 5000 contenant plus de 3 % de magnésium doit être fait avec précaution pour éviter une sensibilisation à la corrosion intercrystalline. Cf aussi chapitre XI, paragraphe 2.2.6.

3. Voir la signification de ces états métallurgiques au chapitre V, paragraphe 5.

tard dans les quelques jours qui suivent la trempe sur chaleur de presse (état T1) ou la trempe après mise en solution en four (état T4). Pendant cette courte période, le phénomène de « maturation » à la température ambiante n'a pas ou très peu débuté.

1.3. La famille des aluminium–zinc–magnésium (série 7000)

Alliages à hautes caractéristiques mécaniques, ils sont essentiellement utilisés sous forme de profilés dans la construction des véhicules industriels. Le zinc et le magnésium sont les deux principaux éléments d'alliage.

Les demi produits extrudés sont utilisés dans les états métallurgiques T5, T6 ou T7X, qui est l'état sur-revenu. La mise en forme intervient aux états T1 ou T4 avant le revenu.

Les mises en forme plus compliquées sont faites sur état T4, peu de temps après la trempe et avant le revenu (états T6 ou T7). Du fait de leur sensibilité à la corrosion, il est fortement recommandé de consulter le distributeur sur l'opportunité d'utiliser ces alliages.

2. Mise en œuvre des demi produits laminés

Les méthodes générales de mise en forme des alliages d'aluminium et les machines utilisées à cet effet ne sont pas très différentes de ce qui se fait pour l'acier. L'aluminium est facile à mettre en œuvre.

Toutefois, il faut tenir compte du fait que l'aluminium est plutôt mou. Il est donc essentiel d'utiliser des outils qui ne blessent pas sa surface. Il faut éviter la contamination superficielle par des traces de limaille (ou copeaux) d'acier et d'alliages cuivreux. Ces particules peuvent provoquer une corrosion superficielle des demi produits en aluminium. Il est donc important de travailler l'aluminium dans des ateliers où de tels risques sont réduits.

2.1. Stockage

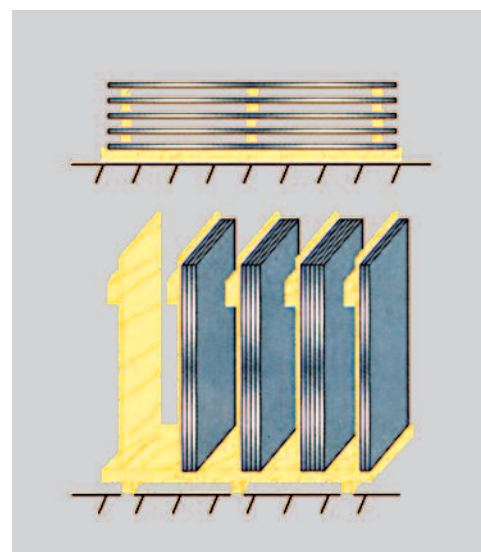
Les tôles sont classées par alliage et stockées à la verticale ainsi que l'illustre la figure VII.1. Les tôles minces de moins 0,8 mm d'épaisseur sont stockées à plat.

En aucun cas, les tôles en aluminium ne doivent reposer à même le sol, y compris si celui-ci est en

béton. Elles doivent être mises à l'abri des milieux agressifs, des éclaboussures d'eau ou d'autres liquides, et des condensations.

Les tôles doivent être stockées dans un local couvert et ventilé, et séparées les unes des autres par des cales en bois pour éviter les taches de condensation.

FIGURE VII.1
STOCKAGE



2.2. Traçage

Il ne faut pas utiliser de pointe à tracer. Si leurs empreintes restent sur la pièce finie, elles peuvent constituer des amorces de fissures quand les pièces sont soumises à des contraintes élevées.

Cette précaution est inutile quand le tracé marque une ligne de découpe.

En règle générale, il est recommandé d'utiliser un crayon dur (par exemple 5H) dont la trace est plus facile à voir et aussi plus facile à effacer en cas d'erreur.

2.3. Découpe

Pour les coupes droites, les cisailles ou les cisailles crocodile conviennent bien. A épaisseur égale, les cisailles utilisées pour les aciers non alliés, à bas carbone, conviennent très bien pour l'aluminium.

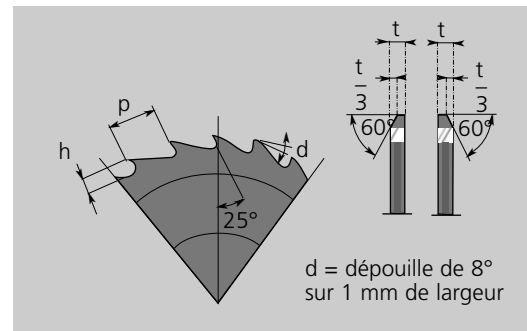
Le sciage est l'un des procédés courants de découpe et il est d'un faible coût de mise en œuvre pour la découpe de l'aluminium.

2.3.1. Scie à ruban

C'est la scie la plus classique qui peut être une simple scie à bois dont la lame est spécialement prévue pour évacuer les copeaux entre les dents de la scie.

On l'obtient par alternance (ou avoyage) des dents et par l'angle de dégagement défini sur la figure VII.2.

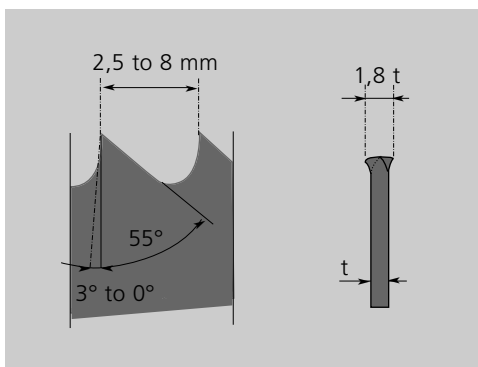
FIGURE VII.3
SCIE CIRCULAIRE



2.3.2. Scie circulaire

Comme pour la scie à ruban, l'écart entre les dents varie avec l'épaisseur ou la section à couper. Le processus de coupe qui est fonction des caractéristiques de la machine est très proche de celui du fraisage (Figure VII-3)

FIGURE VII.2
SCIE À RUBAN



LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE BANDE DE SCIE POUR ALUMINIUM
SONT LES SUIVANTES

- E (épaisseur) = Diamètre du volant / 1 000
- Largeur = 10 à 30 mm
- Pas de la denture = 2,5 à 8 mm, l'essentiel étant d'avoir toujours deux dents en action
- Lubrifiant utilisé = suif ou huile soluble

Wasserstrahlschneiden (SAG)



2.3.3. Découpe au jet d'eau

Il est possible de découper les métaux (dont l'aluminium) au jet d'eau sous pression. Le jet d'eau contenant des particules d'abrasif (procédé PASER), est projeté à haute pression 3 000 bars et

plus. Les particules sont constituées de grenat de corindon ou d'autres matières minérales très dures.

L'avantage de ce procédé est qu'il n'affecte pas l'état métallurgique de l'alliage et qu'il est très souple.

Ses performances sont remarquables, on peut découper des demi produits de 1 à 100 mm d'épaisseur à la vitesse de 3 500 mm/min et jusqu'à 30 mm/min pour les demi produits les plus épais.

2.3.4. Découpe au plasma

Il y a deux techniques de plasma pour la découpe (Figure VII.4)

- Le plasma traditionnel, avec une dépouille de 6° environ,
- Le plasma sous Vortex d'eau, avec une très faible dépouille de l'ordre de 2°

Par rapport au plasma traditionnel, le plasma sous Vortex d'eau permet des vitesses de coupes plus grandes et réduit les nuisances telles que les fumées, le bruit et les émissions d'ozone. Ce procédé nécessite de disposer d'une forte puissance électrique.

Le plasma est formé dans une torche spéciale dans laquelle un gaz

inerte (habituellement de l'argon ou de l'azote), insufflé à grande vitesse, est dissocié à l'état de plasma sous l'effet de l'arc électrique.

Grace à sa grande vitesse de découpe (plusieurs mètres par minute) la qualité et la précision de la coupe, son aptitude à l'automatisation, une machine de découpe au plasma peut se révéler être un investissement très rentable même pour de petites productions.

FIGURE VII.4
TECHNIQUES DE PLASMA

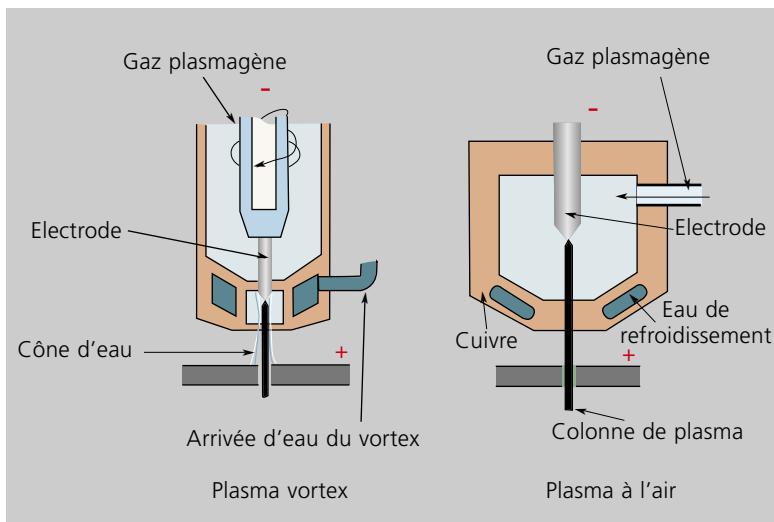
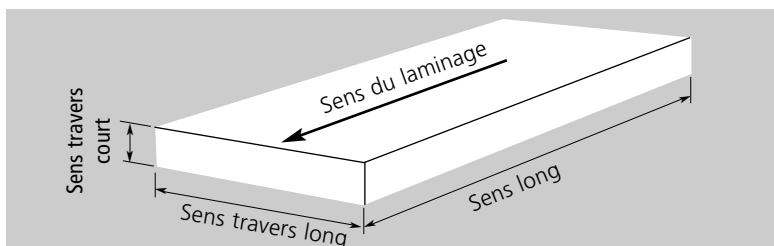


FIGURE VII.5
ORIENTATION PAR RAPPORT AU SENS DU LAMINAGE



2.3.5. Découpe au laser

Ce procédé de découpe est principalement utilisé dans la construction automobile. Pour plus d'information, le lecteur est invité à consulter le site de l'EAA *Aluminium Automotive Manual* www.eaa.net/aam

Remarque :

La largeur de la zone affectée thermiquement (ZAT) est inférieure à 1 mm quel que soit l'alliage et quelle que soit l'épaisseur. Cependant, des criques sont quelque fois observées dans le sens travers court (Figure VII.5). Elles peuvent atteindre environ 2 mm de profondeur.

Quelle que soit l'épaisseur du produit, un fraisage de 2 mm élimine ce risque de fissuration et restaure la qualité de la découpe. Il va de soi que cet usinage est inutile si les pièces découpées sont ensuite soudées.

2.4. Roulage

Cette technique de mise en forme ne nécessite pas d'équipement spécial pour l'aluminium. Les cylindres doivent être naturellement propres et avoir une surface lisse.

2.5. Pliage

Lors de pliages multiples, les intersections des lignes de pliage doivent être percées d'un trou pour éviter des fissures lors des pliages successifs.

L'aluminium n'exige pas d'outils de pliage spécifique. Les machines traditionnelles : tables plieuses, ou presses plieuses conviennent parfaitement pourvu que le matériel ne présente pas d'irrégularités de surface inacceptables.

Les rayons de pliage dépendent de l'épaisseur et des états métallurgiques de l'alliage qui sont indiqués dans la norme NF EN 485-2.

2.6. Les surfaces non développables

Comme pour le pliage, une précaution utile s'impose, il faut éliminer les nombreuses marques sur les bords causées par la découpe afin d'éviter la formation d'amorces de fissures lors des mises en forme importantes.

La mise en forme des demi produits en 5754, 5086 et 5083 (et les autres alliages de cette famille) est faite sur état recuit O ou H111. Dans certains cas, des recuits intermédiaires peuvent être pratiqués pendant la mise en forme⁴. Ils doivent être faits comme indiqué précédemment avec une torche et du suif comme indicateur de température.

Ces recuits intermédiaires peuvent être répétés plusieurs fois au cours des opérations de mise en forme. Cependant, on doit prendre soin d'éviter de faire des recuits sur du métal faiblement écroui afin d'éviter le grossissement de grain.

Machine de découpe au plasma (Benalu)



4. Le recuit des 5000 contenant plus de 3 % de magnésium doit être fait avec précaution pour éviter une sensibilisation à la corrosion intergranulaire. Cf aussi chapitre XI, paragraphe 2.2.6

3. Mise en forme des demi produits filés

Les profilés sont généralement protégés chacun dans les caisses pour éviter des problèmes tel que le fretting pendant le transport.

3.1. Stockage

Il est préférable de laisser les profilés dans leur caisse jusqu'au moment de leur utilisation. Comme pour les tôles, ils ne doivent jamais être déposés sur le sol, même bétonné. Ils doivent être

mis hors de portée d'éclaboussures d'eau ou d'autres liquides, ne pas être en contact avec des condensations et avec un milieu agressif pour éviter toute corrosion pendant le stockage.

3.2. Découpe

Le découpage à la scie, tel que décrit précédemment est valable pour les profilés.

3.3. Cintrage

Le cintrage des profilés à l'échelle industrielle est possible par plusieurs procédés décrits à la page suivante.

Presse 3 points à cintrer (Benalu)



3.3.1. Cintrage à la presse à cintrer 3 points

Cette méthode est valable quand le rayon de courbure est petit par rapport à la hauteur du profilé et quand la précision (et le retour élastique) aussi bien que l'aspect de surface ne sont pas très importants.

3.3.2. Cintrage à la presse à cintrer 3 points à galets rotatifs

Ce procédé est typiquement utilisé sur presse ou sur machine à cintrer. Du fait du glissement entre les galets et la pièce à cintrer, ceux-ci peuvent être entraînés par le profilé selon la méthode décrite au paragraphe 3.3.1.

3.3.3. Cintrage à la presse

Un chariot porte outil oblige le profilé à suivre une matrice circulaire. Le profilé est fixe dans le sens de la longueur par rapport à la matrice.





Cintrage sur galets rotatifs

3.3.4. Cintrage par compression et profilage

Ce procédé est identique au précédent à ceci près que le porte outil est remplacé par une roue en rotation.

3.3.5. Cintrage par enroulement tension

Il est principalement utilisé dans les machines à cintrer les tubes.

3.3.6. Cintrage par allongement sur un outil fixe (sur bras oscillant)

Les extrémités du profilé sont serrées sur l'outil qui a la forme du produit fini. Dans de nombreux cas, cette matrice peut être composée de rayons de courbures multiples.

Presque toute la section du profilé peut être le siège d'une contrainte supérieure à la limite d'élasticité qui va se répercuter sur toute la longueur du profilé. Cela signifie que le retour élastique sera faible, constant et prévisible.

Quand un profilé plein est mis en forme de cette manière, la paroi extérieure peut s'affaisser. Ce phénomène peut se produire sur des profilés de base dont la paroi extérieure est bombée ou sur laquelle est collée un matériau élastique (par exemple du caoutchouc).

La mise en forme peut être faite sur des outils dédiés sur une presse ou sur une machine de cintrage par allongement.

3.3.7. Cintrage par cylindres rotatifs

Dans ce procédé, le profilé est serré à ses extrémités et cintré sur un ou deux (normalement deux) cylindres rotatifs dont le contour correspond à la forme finale du produit.

Le cintrage se produit lors de la rotation des cylindres et peut être contrôlé par la position des axes de rotation

A l'inverse de ce qui se passe lors du cintrage par la méthode classique, (3.3.6), il débute à l'extrémité et se propage vers le centre du profilé. Le début du cintrage est provoqué par la rotation des cylindres et il demeure constant le long de la pièce à cintrer.

Cette méthode est caractérisée par la très faible contrainte transversale et donc aussi par de faibles forces de contact entre le profilé et les cylindres.

3.3.8. Cintrage tri-dimensionnel

Sur machine à galets fixes ou rotatifs, le profilé est serré à ses extrémités et cintré dans les trois dimensions. Ceci peut être fait avec des outils dont les mouvements sont mécaniquement programmés sur des machines numériques.

3.3.9. Cintrage sur la section transversale

Il est réalisé par pression et par indentation avec un outillage spécial monté sur une presse.

3.3.10. Calibrage mécanique sur profilé

Habituellement fait par compression – étirement ou expansion – étirement sur un outillage spécialisé monté sur une presse.

3.3.11. Rayon de cintrage tolérable

Le rayon de cintrage acceptable des profilés est difficile à prévoir. Il dépend de leur géométrie. Il est donc conseillé de faire des tests préalables sur des échantillons.

Dans le tableau VII-1 sont indiqués les rayons de cintrage pour des tubes circulaires. Si de plus petits rayons de cintrage sont nécessaires, il est recommandé de remplir le tube avec du sable avant d'effectuer le cintrage.

TABLEAU VII.1

CINTRAGE DE TUBES CREUX ($D \leq 90$ MM) LE RAYON DE CINTRAGE EST FONCTION DU RAPPORT D/e

| Alliage | État métallurgique | Rapport D/e | | | | | |
|---------|--------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 5754 | H111 | 1 à 1.5 D | 2.5 à 3 D | 3.5 à 4 D | 4.5 à 5 D | 6 à 7 D | 8 à 9 D |
| 6060 | O | 1 à 1.5 D | 2.5 à 3 D | 3.5 à 4 D | 4.5 à 5 D | 5 à 6 D | 7 à 9 D |
| | T5 | 2 à 2.5 D | 3 à 4 D | 4 à 5 D | 6 à 7 D | 8 à 10 D | 12 à 15 D |

D : diamètre extérieur

e : épaisseur

4. Le perçage

Le perçage des alliages d'aluminium est une opération simple, mais qui doit être effectuée avec des mèches bien affûtées du fait de la faible dureté des alliages d'aluminium utilisés dans la construction des véhicules industriels.

Si l'affutage n'est pas adapté, les mèches risquent d'être tordues ou voilées, le métal subira des arrachements autour du trou foré.

Les modes de perçage suivants sont utilisés pour forer les alliages d'aluminium :

- Le perçage classique, le plus courant,
- Le foret à goujures droites
- Le foret à carotter
- Le foret demi rond et le foret trois quart rond

4.1. Le perçage classique

Pour avoir un gradient suffisant d'affutage, l'angle de l'hélice doit être de 40 ° tandis que l'angle de pointe varie de 120 à 140° suivant la forme des gorges, avec un angle de dépouille de 8°. Les autres caractéristiques du perçage sont les suivantes :

- La vitesse de perçage, 30 à 80 m/min, dépend de la précision désirée. Pour une très bonne précision des perçages, la vitesse idéale est de 30 m/min.
- La vitesse de pénétration est déterminée par le diamètre du foret : 0,05 mm/tour pour 2 mm de diamètre et jusqu'à 0,30 mm/tour pour 30 mm de diamètre
- L'huile soluble de refroidissement
- Hauteur du cône, celui-ci doit être supérieur à l'épaisseur du produit à percer

4.2. Le foret à goujures droites

En facilitant l'élimination rapide des copeaux, ce foret est plus efficace pour les alliages d'aluminium de dureté moyenne que le perçage classique. Les quatre témoins cylindriques évitent la « triangulation » du perçage et le guident.

4.3. Le foret à carotter

Ce mode de perçage est excellent pour de gros diamètres, 20 mm et plus, et pour percer des tôles empilées en tas. Les conditions d'usage sont les mêmes que pour le perçage classique.

4.4. Le foret demi rond et le foret trois quarts rond

Ces forets sont utilisés principalement dans les opérations d'alésage. La précision du diamètre de l'alésage réalisé avec ces outils est de l'ordre de 0,02 mm,

- La vitesse de coupe va de 10 à 15 m/min
- La vitesse d'avance est de 0,05 mm/tour
- Le refroidissement est assuré par l'huile de coupe

5. Le taraudage

Les filets rapportés peuvent être utilisés pour l'aluminium quand les autres modes d'assemblage ne sont pas applicables⁵. Si le filetage est taraudé dans l'aluminium, il faut veiller à ce que sa longueur soit suffisante par rapport aux charges appliquées. La longueur du filetage doit être entre 1 et 2 fois le diamètre maximum des filets et dépend de l'application, de l'alliage et de l'état métallurgique du matériau.

5. Il faut rappeler que si le mode d'assemblage est continu sur la structure, par exemple l'assemblage par soudage ou le collage, il n'est pas nécessaire de rajouter un autre mode d'assemblage. Les filetages dans l'aluminium ne doivent être utilisés que lorsqu'aucune autre possibilité n'existe et si la limite d'élasticité du métal dépasse 200 N/m². La longueur de la portée de la vis doit être égale à 1,5 fois le diamètre de la vis. Quand les vis sont fréquemment serrées et desserrées, il faut utiliser des inserts, par exemple des filets hélicoïls. Par exemple, la longueur utile du filetage d'un alliage de la famille 6000 à l'état T6 peut être de 1,2 fois le diamètre du filet principal. Inversement, un alliage plus doux nécessite une plus grande longueur de filet. Il y a deux méthodes de taraudage :

- Par enlèvement de copeaux
- Par refoulement

| TABLEAU VII.2 | | | | | | | | | | |
|--|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| DIAMÈTRE DE PERÇAGE DES AVANT TROUS DE TARAUDAGE | | | | | | | | | | |
| Ø nominal | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Pas | 0.70 | 0.80 | 1 | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 |
| Diamètre | 3.2 | 4.2 | 4.9 | 6.6 | 8.3 | 10 | 11.7 | 13.7 | 15 | 17 |

5.1. Taraudage par enlèvement de copeaux

Pour éviter de gripper le métal sur les flancs, seuls les tarauds à filets rectifiés peuvent être utilisés. Dans le tableau VII.2 sont indiqués les diamètres de perçage des avant trous pour le taraudage des alliages d'aluminium des familles 5000 et 6000. Sur ces alliages à l'état recuit, les avant trous doivent être de 3 à 5 % plus large que ce qui est indiqué au tableau VII.3 et de 2 % plus petit pour les alliages de moulage au silicium en contenant 12 % et plus. La vitesse de coupe varie de 10 à 50 m/min en fonction de la machine et de la méthode de serrage du taraud, flottant ou en pince. Le refroidissement est assuré par l'huile de coupe.

5.2. Taraudage par refoulement

Le filetage est réalisé par une déformation plastique du métal en utilisant un taraud à section polygonale arrondie sans arête coupante.

Le diamètre de l'avant trou dépend de la profondeur visée du taraudage. Il doit être percé avec précision. La vitesse du taraudage par refoulement peut atteindre 50 m/min et le refroidissement est assuré par l'huile de coupe.

Le taraudage par refoulement offre un nombre appréciable d'avantages avec les alliages d'aluminium :

- Le taraud dure longtemps
- Il augmente la dureté du filetage, sa résistance à l'arrachement et la tenue en fatigue
- Il n'y a pas de copeaux.

5.3. Les filets rapportés

Il est courant d'utiliser des filets rapportés – disponibles dans les diamètres M2 à M68 (figure VII.9) – quand les assemblages en aluminium doivent être fréquemment démontés. Ces filets qui ont la forme de ressort, sont fabriqués à partir d'un fil roulé

ou une section en pointe de diamant quand ils sont en acier inoxydable.

Il est possible d'utiliser des filets rapportés à freinage interne. Ils ont une ou deux spires qui provoquent un serrage important sur les flancs des filets de la vis. Ils s'opposent donc au desserrage de celle-ci qui pourrait être provoqué par des sollicitations dynamiques, par des vibrations ou par des chocs thermiques.

Le perçage est fait avec un foret standard, mais le filetage doit être exécuté avec un taraud spécial. Tous les copeaux et l'huile de coupe doivent être enlevés avant la pose du filet rapporté.

Les filets rapportés sont mis en place avec un outil manuel pneumatique qui les dépose automatiquement à l'extrémité supérieure du filetage. Ils peuvent se détacher après leur mise en place.

Les filets rapportés peuvent servir à réparer un filetage défectueux dans l'aluminium.

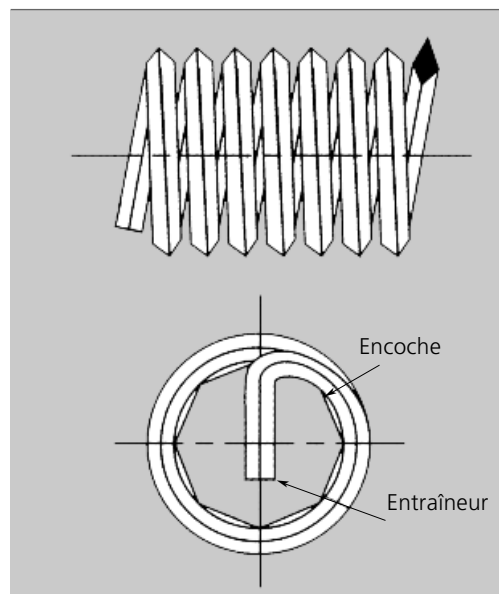
6. L'emboutissage profond

L'emboutissage profond est surtout utilisé en construction automobile.

Pour plus d'information sur cette technique, le lecteur est invité à consulter le site :

Aluminium Automotive Manual
www.eaa.net/aam/

BILD VII.9
FILET RAPPORTÉ HÉLICOIL



Mise en forme par repoussage d'un fond de citerne en aluminium (Köning)

7. Le repoussage

Le repoussage est une technique de mise en forme utilisée dans l'industrie du véhicule industriel pour fabriquer quelques composants dont les fonds de citerne.

7.1. Avantages du repoussage

L'outillage pour faire du repoussage est très simple, la forme intérieure suffit. Toutefois la cadence de production peut être de 20 fois inférieure à celle de l'emboutissage profond.

La combinaison des coûts de production et ceux de l'outillage, montre que cette technique convient pour de petites séries.



7.2. Diamètre des disques de repoussage

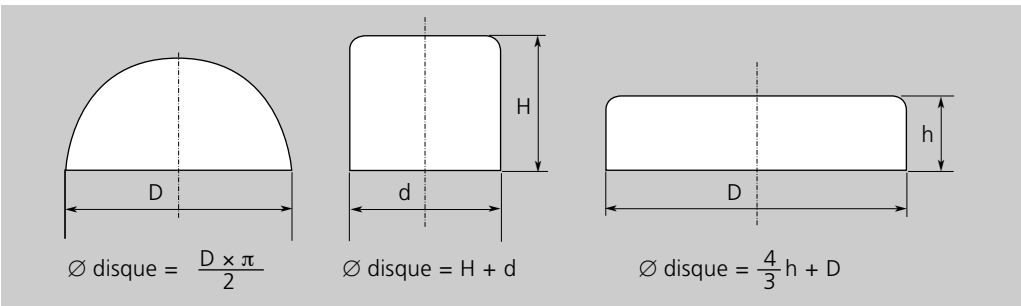
On utilise trois formules pour déterminer rapidement le diamètre des disques pour les formes les plus communes (figure VII.10). On notera que le diamètre est

une valeur moins critique pour la réussite des pièces qu'il ne l'est en emboutissage profond.

C'est uniquement le coût de la matière qui pousse à optimiser le diamètre du disque ébauche. On peut se contenter d'un calcul simplifié pour des prototypes

FIGURE VII.10

DIAMÈTRE DES DISQUES POUR REPOUSSAGE





LE SOUDAGE

| | |
|---|-----|
| 1. AVANT-PROPOS | 108 |
| 2. LE SOUDAGE TIG - TUNGSTEN INERT GAS | 109 |
| 2.1. Procédé TIG manuel | 110 |
| 2.2. Procédé TIG automatique | 110 |
| 2.3. Procédé TIG à courant alternatif | 111 |
| 2.4. Procédé TIG à courant continu, avec polarité inversée | 111 |
| 2.5. Préparation des bords avant soudage TIG | 111 |
| 2.6. Choix du métal d'apport : fil ou baguette | 111 |
| 2.7. Choix du procédé de soudage | 111 |
| 3. LE SOUDAGE MIG - METAL INERT GAS | 112 |
| 3.1. MIG manuel | 112 |
| 3.2. MIG automatique | 113 |
| 3.3. MIG à courant lisse | 113 |
| 3.4. MIG à courant pulsé | 114 |
| 3.5. Pulsation du fil d'apport | 114 |
| 3.6. CMT Transfert à froid de métal | 114 |
| 3.7. Préparation des bords pour le soudage MIG | 115 |
| 3.8. Fil ou baguette de soudure | 117 |
| 3.9. Choix du mode de soudage | 119 |
| 4. LE SOUDAGE PLASMA MIG | 118 |
| 5. LE SOUDAGE AU LASER | 118 |
| 6. LE SOUDAGE MIXTE MIG LASER | 119 |
| 7. LE SOUDAGE PAR RÉSISTANCE | 120 |
| 8. LE SOUDAGE PAR FRICTION FSW (FRICTION STIR WELDING) | 120 |
| 9. LA PRÉPARATION DE SURFACE AVANT SOUDAGE | 122 |
| 10. LE CONTRÔLE QUALITÉ | 123 |
| 10.1. Procédures d'approbation | 123 |
| 10.2. Inspection des joints soudés | 123 |
| 10.3. Défauts de soudure et critères d'acceptation | 124 |
| 11. CALCUL ET PRÉVENTION DES DÉFORMATIONS | 126 |
| 11.1. Causes des déformations | 126 |
| 11.2. Remèdes | 126 |



Soudeur (STAS)

1. Avant-propos

Le soudage est la méthode d'assemblage la plus utilisée dans la fabrication des éléments des véhicules industriels : citernes, bennes, bennes basculantes, châssis, etc.

Du fait de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques différentes de celles de l'acier, l'aluminium a un comportement spécifique lors du soudage.

Dès que l'aluminium, à l'état liquide ou solide, est en présence d'air contenant de l'oxygène, le métal se recouvre instantanément d'un film d'oxyde solide-ment accroché à la surface.

Cette couche d'oxyde a un point de fusion de l'ordre de 2 000 °C alors que celui de l'alu-

minium n'est que de 660 °C. Pour avoir une soudure de qualité, il faut absolument éliminer la couche d'oxyde ou à tout le moins la disloquer.

Bien que le point de fusion de l'aluminium soit beaucoup plus bas que celui de l'acier non allié, la conductivité thermique très élevée et la chaleur de fusion de l'aluminium font que la puissance des postes à souder l'aluminium est la même que pour l'acier.

Le fort coefficient de dilatation thermique de l'aluminium (le double de celui de l'acier), le retrait important dans le bain de fusion pendant la solidification du cordon de soudure font que

le joint soudé peut être déformé si aucune mesure n'est prise pour l'éviter. L'un des moyens de limiter les déformations est de choisir des modes de soudage adaptés à l'aluminium qui minimisent l'apport énergétique.

Les procédés TIG et MIG sont les modes de soudage les plus utilisés dans la construction des véhicules industriels.

Les progrès des autres techniques de soudage telles que le plasma, le laser, le soudage par résistance ou par friction (FSW) contribuent à leur développement progressif dans la construction des véhicules industriels où elles sont néanmoins encore peu répandues.

2. Le soudage TIG - Tungsten Inert Gas¹

Dans ce procédé, l'arc électrique s'amorce entre une électrode réfractaire en tungstène et la pièce à souder tandis qu'un jet de gaz inerte, en général de l'argon, recouvre l'électrode et protège le bain de métal fondu contre l'oxydation.

Ce procédé fonctionne avec une source de courant alternatif stabilisé. Le film d'oxyde est éliminé pendant l'alternance négative

tandis que l'alternance positive assure la pénétration et le refroidissement de l'électrode. Le procédé TIG est valable pour des soudures sur du métal relativement mince, entre 1 et 6 mm.

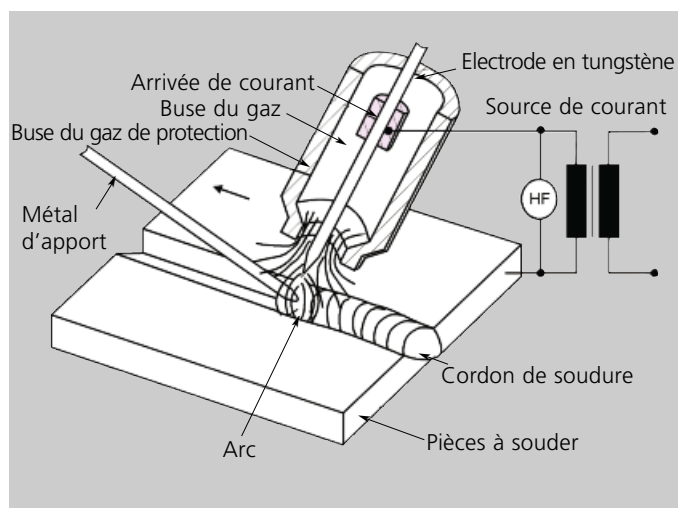
Dans le procédé TIG, l'hélium peut remplacer l'argon. Ce gaz permet de monter en température dans l'arc électrique. Ce procédé fonctionne sous courant continu avec polarité directe.

Le film d'oxyde est faiblement décapé, mais la puissance de soudage est plus élevée qu'avec l'argon et il est possible de souder des épaisseurs de 10 à 12 mm en une seule passe.

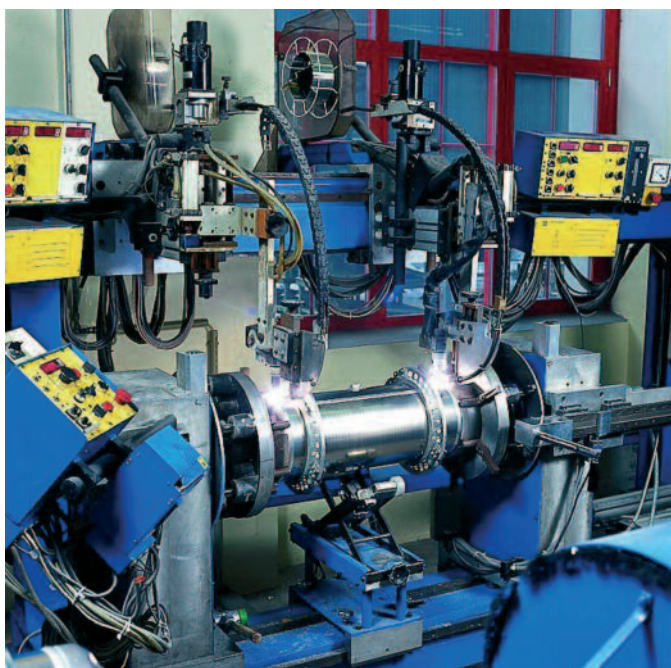
Toutefois, du fait de la difficulté à contrôler la hauteur de l'arc, à moins de 0,5 mm, ce procédé est entièrement automatique.

FIGURE VIII.1

PRINCIPE DU PROCÉDÉ TIG



1. WIG en allemand



Soudage TIG d'un réservoir d'air comprimé (SAG)

2.1. Procédé TIG manuel

Dans ce procédé, le métal d'apport, sous forme de baguette tenue à la main, alimente le bain de métal liquide. Ce procédé

manuel est utilisé principalement pour des soudures courtes, des soudures circulaires et sur des produits relativement minces.

2.2. Procédé TIG automatique

Dans ce procédé, la torche est automatiquement guidée. S'il y a un métal d'apport, il est alimenté automatiquement à partir d'une bobine.

Le TIG automatique est intéressant pour de grandes séries et plus particulièrement quand on n'a pas accès au côté envers de la soudure.

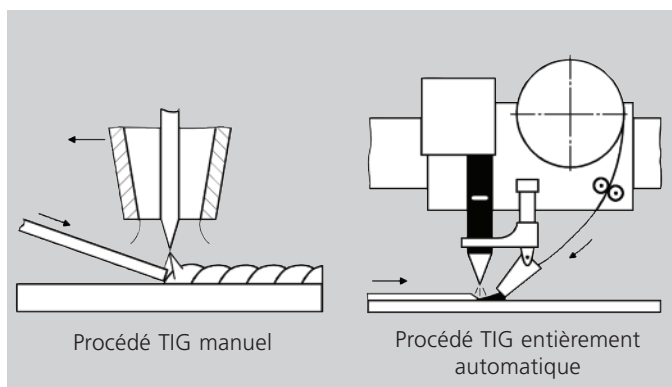
La fabrication de réservoirs d'air comprimé est un bon exemple d'utilisation du TIG automatique. Ces réservoirs sont constitués de tôles roulées et soudées pour former la partie centrale cylindrique aux extrémités de laquelle sont soudés deux fonds emboutis.

Le TIG automatique peut être utilisé pour souder bout à bout les fonds au corps central cylindrique sans latte support, et ce, pour éviter les problèmes dus aux rétentions d'humidité.

Il est également possible de soutenir le bain de métal en insufflant de l'argon à l'intérieur du réservoir.

FIGURE VIII. 2

PROCÉDÉ TIG MANUEL ET AUTOMATIQUE



2.3. Procédé TIG à courant alternatif

Ce procédé convient bien pour les soudures bout à bout et les soudures en coin sur des pièces d'épaisseur de 1 à 6 mm. La pénétration de la soudure est possible sans avoir besoin de lattes support.

Les soudures de pointage ne doivent pas être retirées avant le soudage. Les changements de direction sont faciles à suivre avec la torche et ne nécessitent aucun redressage.

Ce procédé est utilisable pour aplanir la surface d'un cordon de soudure MIG.

La vitesse de soudage est plus faible qu'avec le MIG et pour des pièces de plus de 6 mm d'épaisseur, un préchauffage est nécessaire.

Avec une vitesse lente de soudage, la zone affectée thermiquement est plus large et les déformations sont plus importantes.

Les soudures d'angles nécessitent beaucoup de soin² pour réaliser une pleine pénétration sans manque de fusion à la racine.

Pour la fabrication de citernes et de silos, les soudures double face TIG ou en bout à bout ou en position verticale montante sont d'excellente qualité pourvu que le processus soit bien contrôlé par deux opérateurs.

2.4. Procédé TIG à courant continu, à polarité inversée

Dans ce procédé, la longueur de l'arc électrique est inférieure à 1 mm, elle est de préférence de 0,5 mm. Il est donc essentiellement automatique. En manuel, on ne peut pratiquement que faire de courtes soudures, par exemple le pointage des pièces à assembler avant soudure.

La faible section de ces pointages fait qu'ils sont entièrement refondus lors de la première passe en MIG. Il n'est pas nécessaire de les réduire par un moyen mécanique, le meulage par exemple.

L'élimination du film d'oxyde est faible avec ce procédé, il faut donc réduire l'épaisseur de ce film avant soudage par action mécanique, un brossage par exemple.

2.5. Préparation des bords avant soudage TIG

La norme ISO EN 9692-3² donne une information détaillée sur cette étape de sorte que nous nous limiterons à n'indiquer que quelques exemples au tableau VIII.1 (p. 115) de joints soudés typiques rencontrés dans la fabrication des véhicules industriels.

Pour éviter des entailles, en particulier à la racine du cordon de soudure, les bords doivent être soigneusement ébavurés avant soudage. On évitera les disques abrasifs qui laissent des résidus de meulage sur la surface pouvant provoquer des porosités dans la soudure. On utilisera de préférence des outils à fraiser.

2.6. Choix du métal d'apport : fil ou baguette

Voir paragraphe 3.8

2.7. Choix du procédé de soudage

Voir paragraphe 3.9

2. NF EN ISO 9692-3/A1. - Soudage et techniques connexes. - Recommandations pour la préparation de joints. - Partie 3 : Soudage MIG et TIG de l'aluminium et de ses alliages

3. Le soudage MIG - Metal Inert Gas

Dans le procédé MIG, le fil d'alliage d'aluminium est à la fois l'électrode et le métal d'apport. Le fil se dévide automatiquement à partir de sa bobine jusqu'à l'outil de soudage (torche ou lance) où il est utilisé.

La source d'énergie est en courant continu (courant lisse). Les connexions sont inversées en ce sens que la pièce à souder est branchée au pôle négatif pour assurer le décapage du film d'oxyde et en même temps la fusion du fil d'apport.

Il existe plusieurs procédés MIG.

3.1. MIG manuel

Dans sa version manuelle, le MIG est certainement le procédé le plus utilisé dans les ateliers de fabrication des véhicules industriels. Avec le MIG, les soudures sont de très bonne qualité et le ratio qualité/coût est favorable.

Quand au fil du métal d'apport, qui est une électrode consommable, il est toujours alimenté automatiquement à partir d'une bobine. C'est la raison pour laquelle le MIG manuel est souvent

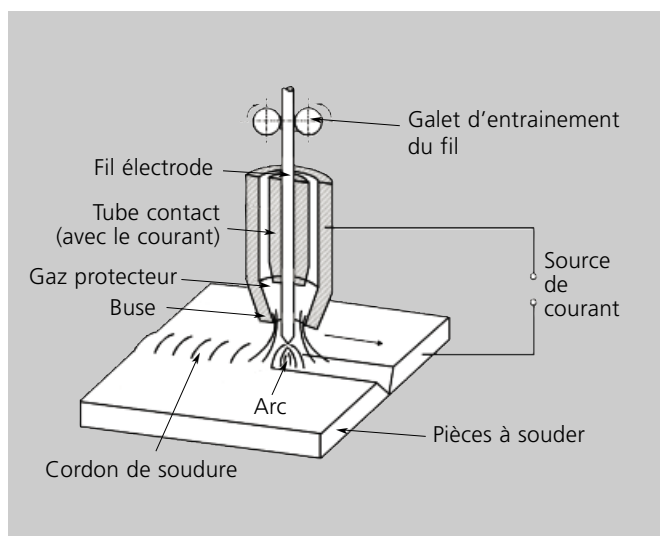
désigné sous l'appellation « Soudage MIG semi automatique ».

Le MIG manuel est utilisé pour toutes les soudures de nature compliquée sur des demi produits dont les dimensions et l'épaisseur sont compatibles avec ce procédé et là où le MIG automatique n'est pas rentable.

Si on prend en exemple une citerne faite en tôles roulées et soudées, pour constituer des sections cylindriques, le MIG automatique est très bien adapté aux soudures longitudinales alors que les liaisons des tronçons cylindriques sont faites en MIG manuel en rotation en deux passes opposées.

Le choix entre MIG automatique et MIG manuel dépend aussi largement de l'accessibilité des soudures à faire.

FIGURE VIII.4
PRINCIPE DU PROCÉDÉ MIG



Soudage des panneaux latéraux
d'une benne basculante (Menci)



3.2. MIG automatique

Dans ce procédé, la torche est guidée automatiquement. Il est habituellement utilisé et il est le plus rentable lors de soudures très longues et rectilignes.

Exemple : la fabrication des longerons de châssis constitués de deux profilés en "T" entre lesquels est soudée une tôle pour former l'âme du longeron reconstitué. Les deux soudures doivent normalement être exécutées en automatique en même temps pour éviter les déformations.

Le soudage automatique est préférable quand on souhaite un matériel ayant un bel aspect, c'est le cas des raidisseurs en "U" soudés sur les parois latérales des bennes.

Dans ce cas l'aspect et la dimension du cordon de soudure est répétitif pour présenter l'impression d'une bonne uniformité.

3.3. MIG à courant lisse

Ce procédé rapide et économique permet de déposer une grande quantité de métal par unité de temps. La puissance disponible est telle que les soudures bout à bout ne peuvent être faites que sur latte support. Cette dernière est soit intégrée dans le profilé ou constituée par un support provisoire en acier inoxydable, en acier, en cuivre et même en aluminium.

Du fait de la vitesse relativement élevée, la zone affectée thermiquement³ est plus étroite qu'avec le TIG et donc les déformations sont moindres.

Les demi produits minces de moins de 3 mm d'épaisseur sont difficiles à souder avec ce pro-

cédé à cause du niveau élevé de la puissance de l'arc. S'il n'y a pas d'autres équipements de soudage disponibles, on doit utiliser un fil de petit diamètre ou réduire la puissance. Mais alors l'alimentation en fil peut provoquer une instabilité de fonctionnement même avec un système pousser-tirer.

Si le pré-assemblage des structures est fait en MIG par pointage, ces soudures doivent avoir la même section que la première passe du cordon de soudure et avoir 100 mm de longueur pour être mécaniquement résistantes.

Avant de commencer le soudage proprement dit, la section de ces pointages doit être réduite par un moyen mécanique (à l'exclusion d'un disque abrasif) de sorte qu'ils puissent fondre à la première passe, lors du passage de la torche, pour ne pas laisser de défaut à la racine du cordon de soudure.

3. L'étendue de la zone affectée thermiquement et les caractéristiques mécaniques dans cette zone sont normalisées NF EN 1999.1.1.



Soudage des panneaux latéraux d'une benne basculante (Menci)

3.4. MIG à courant pulsé

La superposition d'un courant pulsé sur le courant principal est une amélioration importante du procédé MIG qui permet de maintenir un niveau moyen de puissance sans sacrifier la stabilité de l'arc électrique.

Le métal d'apport est transféré au bain liquide chaque fois que la puissance est au maximum (c'est-à-dire une goutte de métal par pulsation). Pendant les "périodes froides" quand la puissance est au plus bas, la stabilité de l'arc électrique est maintenue.

Il y a trois modes opératoires :

- Le mode synergique : seule la vitesse de dévidage du fil est réglée. La tension et la fréquence sont réglées par l'électronique de la machine
- Le mode manuel : tous les paramètres de soudage sont réglables
- Le mode programmable, en fonction du type de soudage.

Le mode MIG pulsé est limité à des demi produits minces dont l'épaisseur est comprise entre 2 et 5 mm et à la soudure montante ou en corniche.

Avec ce procédé, il est possible de souder des produits minces avec du fil d'apport standard.

Quand le bain de métal liquide est bien contrôlé, il est possible de faire des soudures bout à bout sans latte support. De plus, ce procédé est pratique pour les soudures verticales et au plafond.

Le réglage des postes MIG pulsé est plus pointu que celui d'un MIG standard car il y a plus de paramètres à définir.

La largeur de la zone affectée thermiquement est comparable à celle du procédé standard et il en est de même pour les déformations des pièces soudées.

Pour le soudage sur les pointages, le lecteur est invité à se reporter à la note de bas de page 3, page précédente.

3.5. Pulsation du fil d'apport

Pour les épaisseurs comprises entre 1 et 3 mm, il existe une option complémentaire qui consiste à ajouter une pulsation du fil d'apport à la pulsation du courant pour stabiliser l'arc électrique. Ce procédé induit une double pulsation au courant et par conséquent sur l'apport de chaleur.

Pour le soudage des "T" où il y a des différences d'épaisseur, le niveau de puissance disponible est difficile à maintenir constant avec le procédé classique à courant pulsé.

La double pulsation du courant assure la concentration de puissance (apport de chaleur) disponible au bon endroit de la soudure.

3.6. CMT Transfert à froid de métal


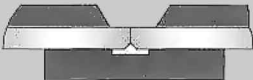

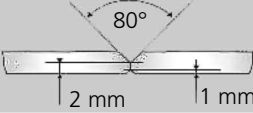

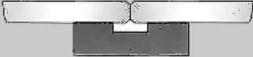
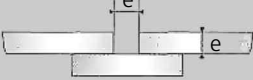
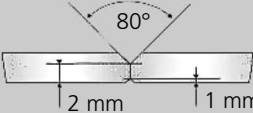

Pour souder au MIG les demi produits minces de moins de 1 mm d'épaisseur, le procédé CMT (Cold Metal Transfer) peut être utilisé.

Quand il détecte un court circuit, ce procédé escamote le fil pour faciliter le détachement de la goutte. L'apport de chaleur est immédiatement réduit et le court circuit maintenu à un niveau très bas.

3.7. Préparation des bords pour le soudage MIG

Les cas les plus fréquents sont détaillés dans le tableau VIII.1. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter la norme NF EN 9692-3.

TABEAU VIII.1
PRÉPARATION DES BORDS AVANT SOUDAGE

| Procédé | Position de soudage | Exécution des soudures | Epaisseur (mm) | Préparation | Remarque |
|---------|---------------------|------------------------------------|-----------------|--|--|
| TIG | Toutes positions | Un seul coté | $0.8 < e < 1.5$ |  | Un léger toit formé par les bords limite les déformations |
| TIG | À plat | Un seul coté | $0.8 < e < 5$ |  | Carte abattue, support inox, soudure bridée |
| TIG | Toutes positions | Un seul coté avec reprise possible | $1.5 < e < 5$ |  | Bords libres pointés |
| TIG | Toutes positions | Un seul coté | $4 < e < 6$ |  | Bords libres pointés Corniche même principe mais il y a intérêt à déséquilibrer le chanfrein |
| MIG | Toutes positions | Un seul coté avec reprise envers | $2.5 < e < 6$ |  | Reprise à l'envers nécessaire après gougeage atteignant le fond du premier cordon |
| MIG | Toutes positions | Un seul coté | $2.5 < e < 6$ |  | Support inox |
| MIG | Toutes positions | Un seul coté | $2.5 < e < 6$ |  | |
| MIG | À plat et plafond* | Un seul coté avec reprise envers | $6 < e < 25$ |  | Reprise à l'envers nécessaire après gougeage atteignant le fond du premier cordon. Jeu maximum : 1,5 mm |
| MIG | Plat vertical* | Un seul coté | $4 < e < 25$ |  | Support inox nervuré |

* Les chanfreins en X seront préférés pour les produits $6 < e < 25$ afin de limiter les déformations dues au soudage

TABLEAU VIII.2
CHOIX DU MÉTAL D'APPORT

Pour chaque combinaison, trois choix sont possibles selon le critère retenu, indiqués à l'intersection des lignes :
Propriétés mécaniques optimales : chiffre de la première ligne – Résistance à la corrosion optimale : chiffre de la deuxième ligne – Soudabilité optimale : chiffre de la troisième ligne
Le métal d'apport indiqué est : 4 : famille 4xxx → 4043A, 4045, 4047A – 5 : famille 5xxx → 5356, 5183, 5556

| Alliage A | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Corroyés Famille 5000 Mg < 3% | 5 5 (a) 4 - 5 (b) | | | | |
| Corroyés Famille 5000 Mg > 3% (a) | 5 5 5 | 5 5 5 | | | |
| Corroyés Famille 6000 | 5 - 4 5 4 | 5 - 4 5 4 | 5 - 4 5 4 | | |
| Corroyés Famille 7000 Sans cuivre | 5 - 4 5 4 | 5 - 4 5 4 | 5 - 4 5 4 | 5 - 4 | |
| Moulés Si > 7% (c) | 4 (e) 4 4 | 5 - 4 (e) 5 4 | 4 4 4 | 4 | 4 (d) 4 4 |
| Alliage B | Corroyés Famille 5000 Mg < 3% | Corroyés Famille 5000 Mg > 3% | Corroyés Famille 6000 | Corroyés Famille 7000 Sans cuivre | Moulés Si > 7% (c) |

(a) Les alliages de la famille 5000 contenant plus de 3,5 % de Mg sont sensibles à la corrosion intergranulaire lorsqu'ils sont exposés à des températures supérieures à 65°C et qu'ils travaillent dans certaines conditions agressives⁴

(b) Les alliages de la famille 5000 contenant moins de 3 % de magnésium ainsi que les alliages de la famille 3000 contenant du magnésium peuvent être sensibles à la fissuration à chaud.

(c) Les performances mécaniques de la soudure sont dépendantes de la santé interne des pièces moulées. Les matériaux gazés et les pièces moulées par injection sont considérés comme non soudables.

(d) La teneur en silicium du fil d'apport doit être la plus proche possible de celle de la pièce moulée.

(e) Le soudage de pièces moulées en aluminium silicium (famille 4000) sur des alliages de la famille 5000 doit être autant que possible évité parce qu'il se forme dans le joint soudé des intermétalliques Mg₂Si qui fragilisent l'assemblage

4. Cf chapitre 11, paragraphe 10-2.

3.8. Fil ou baguettes de soudure

La plupart des alliages d'aluminium cités au chapitre V sont soudables ainsi que leur combinaison deux à deux.

Le métal d'apport n'a jamais la même composition chimique que le (ou les) métaux de base à assembler.

Ce sont des alliages des familles 4XXX et 5XXX qui se présentent sous forme de fil ou de baguettes. Les principaux alliages d'apport sont⁵ 4043A, 4045, 4047A, 5183, 5356, 5556A

Le tableau VIII.2 indique le choix du métal d'apport en fonction des alliages de base et de trois

critères : propriétés mécaniques, aptitude au soudage et résistance à la corrosion.

Le choix doit être fait en fonction de l'importance relative de ces trois critères.

Les bobines (ou les baguettes) de métal d'apport doivent être stockées dans leur emballage fermé.

A l'ouverture de leur emballage, ces produits doivent être conservés dans une atmosphère sèche.

La condensation d'humidité à la surface du métal d'apport est dissociée dans l'arc électrique lors du soudage en oxygène et en

hydrogène. Ce gaz absolument insoluble dans l'aluminium à l'état solide provoque des porosités dans le cordon de soudure.

Si les emballages doivent rester ouverts pendant une longue période (des mois) à l'air ambiant de l'atelier, il est recommandé de les sécher en étuve à 80 °C pendant une nuit avant utilisation.

5. Voir également la norme ISO 18273 : Welding Consumables – Wire electrodes, wires and rods for welding of aluminium and aluminium alloys – Classification

3.9. Choix du mode de soudage

TABLEAU VIII.3
CHOIX DU MODE DE SOUDAGE

| Mode de soudage | TIG | | MIG | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------|-------------|------------|-------------------|------------|
| Atmosphère | Inerte | | Inerte | | | |
| Electrode | Réfractaire | | Consommable | | | |
| Courant | Alternatif | Continu | Lisse | Pulsé | Pulsé | Pulsé |
| Procédé spécial | | | | | Pulsation du fil | CMT |
| Critères | | | | | | |
| Epaisseur | $0.8 \leq e \leq 5$ | $0.2 \leq e \leq 10$ | $3 \leq t$ | $2 \leq t$ | $1 \leq e \leq 5$ | $e \leq 1$ |
| Manuel | oui | non | oui | oui | difficile | non |
| Automatique | oui | oui | oui | oui | oui | oui |
| Robotisable | non | non | oui | oui | oui | oui |

4. Le soudage plasma MIG

Ce procédé combine la forte capacité de fusion du MIG avec le profil presque idéal de l'arc électrique et sa très bonne protection du bain de fusion par le gaz.

Le résultat est une très grande qualité de soudure, particulièrement l'absence de porosité.

L'arc plasma est maintenu entre la tuyère de la torche et la pièce

à souder. L'arc du MIG est au centre de celui du plasma. Les deux arcs ont la même polarité et l'énergie cinétique de l'arc du plasma chasse le film d'oxyde de la surface du métal.

Avec ce procédé, il n'est pas indispensable de faire avant soudage un brossage mécanique des abords de la soudure.

Ce procédé est bien adapté pour des applications exigeant une bonne étanchéité et un bel aspect de surface. Il est possible de faire des soudures bout à bout jusqu'à 10 mm d'épaisseur en une passe après préparation de surface en V. La vitesse de soudage est plus élevée qu'avec le MIG classique.

5. Le soudage au laser

Le développement du soudage de l'aluminium au laser a été rapide et concomitant à celui de la puissance des lasers.

D'un côté, il y a les lasers CO₂ jusqu'à 20 KW et plus, et d'autre part les lasers Nd YAG de 6 KW et plus.

Avec les lasers CO₂, l'orientation du faisceau est limitée tandis qu'avec les lasers Nd YAG les fibres optiques permettent d'amener le faisceau juste sur la zone à souder. Cette disposition apporte une grande flexibilité, en particulier pour la robotisation du matériel.

Le fort pouvoir réfléchissant de l'aluminium impose d'installer l'équipement laser dans une salle séparée où pendant le fonctionnement de la machine personne ne peut rentrer sans protection adéquate des yeux.

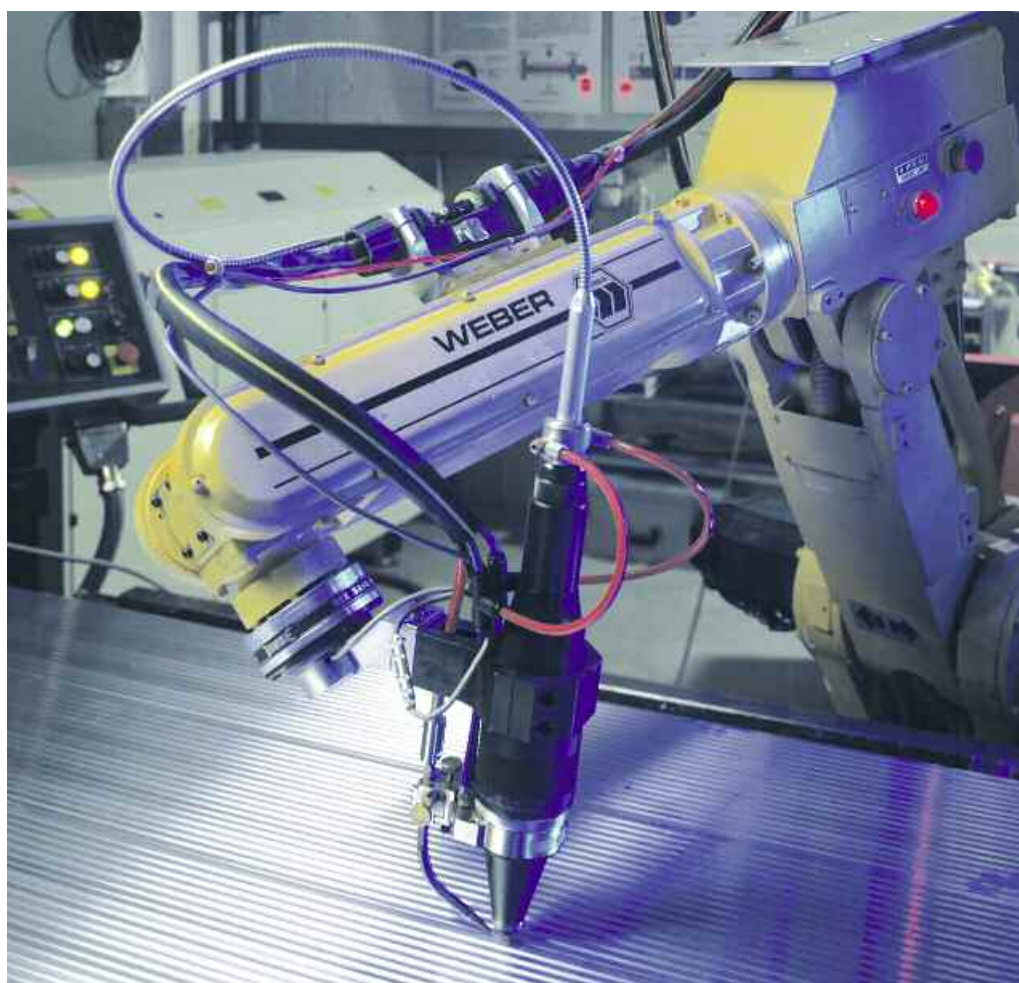
Le détecteur qui suit le mouvement du faisceau laser doit être protégé pour éviter d'être perturbé par les réflexions parasites.

Ce procédé est principalement utilisé pour les demi produits minces (1 à 4 mm). Les pièces à assembler doivent être découpées avec précision comme c'est le cas de la production en série de flancs pour l'automobile.

La vitesse de soudage peut atteindre jusqu'à 12 m/min pour des épaisseurs autour de 1 mm et encore 1 à 3 m/min pour des épaisseurs de 1,5 à 3 mm.

Comparé au MIG classique, ce procédé permet une production de composants avec des déformations géométriques réduites ainsi que des contraintes résiduelles faibles, une zone affectée thermiquement plus étroite. C'est la conséquence directe de la grande vitesse de soudage et du faible apport de chaleur.

Pour l'aluminium, le métal d'apport est toujours sous forme de fil.



Soudage au laser

6. Le soudage mixte MIG laser

La combinaison d'un arc électrique standard avec le soudage au laser apporte le bénéfice cumulé des avantages des deux procédés. Ce sont : bonne stabilité, grande vitesse de soudage, et un accroissement de la capacité d'assemblage.

Le faisceau laser jaillit en avant de l'arc électrique mais tous deux convergent au même point de la surface du métal. Le gaz protecteur (de préférence un mélange hélium 70 % - argon 30%) provient de la torche MIG.

Ce procédé est idéal pour souder en automatique et en continu,

en une passe, des demi produits jusqu'à 10 mm d'épaisseur. Il convient bien aux pièces pour lesquelles les performances demandées sont moindres que pour celles soudées au laser.

Il faut appliquer les mêmes mesures de sécurité que pour le soudage au laser.

7. Le soudage par résistance

C'est une technique très courante dans l'industrie automobile mais peu répandue dans celle des véhicules industriels.

C'est la raison pour laquelle on ne traite pas cette question dans cette brochure.

Les lecteurs intéressés pourront consulter l'Aluminium Automotive Manual www.eaa.net/aam.

8. Le soudage par friction FSW (Friction Stir Welding)



Soudage au laser

avance en rotation dans le métal à une vitesse bien définie, le long de la ligne de contact entre les deux parties à assembler.

La friction de l'outil dans le métal fournit l'énergie suffisante pour chauffer la zone dans laquelle l'outil avance.

Sous l'effet des mouvements de rotation et de translation de l'outil, la déformation plastique du métal crée le joint de soudure.

Ce procédé peut être utilisé pour le soudage bout à bout, par recouvrement, les T-section et les soudures d'angle.

Chacun de ces types de soudure nécessite un outil spécifique. Ce procédé fonctionne dans toutes les positions : horizontale, verticale, en plafond et en orbital.

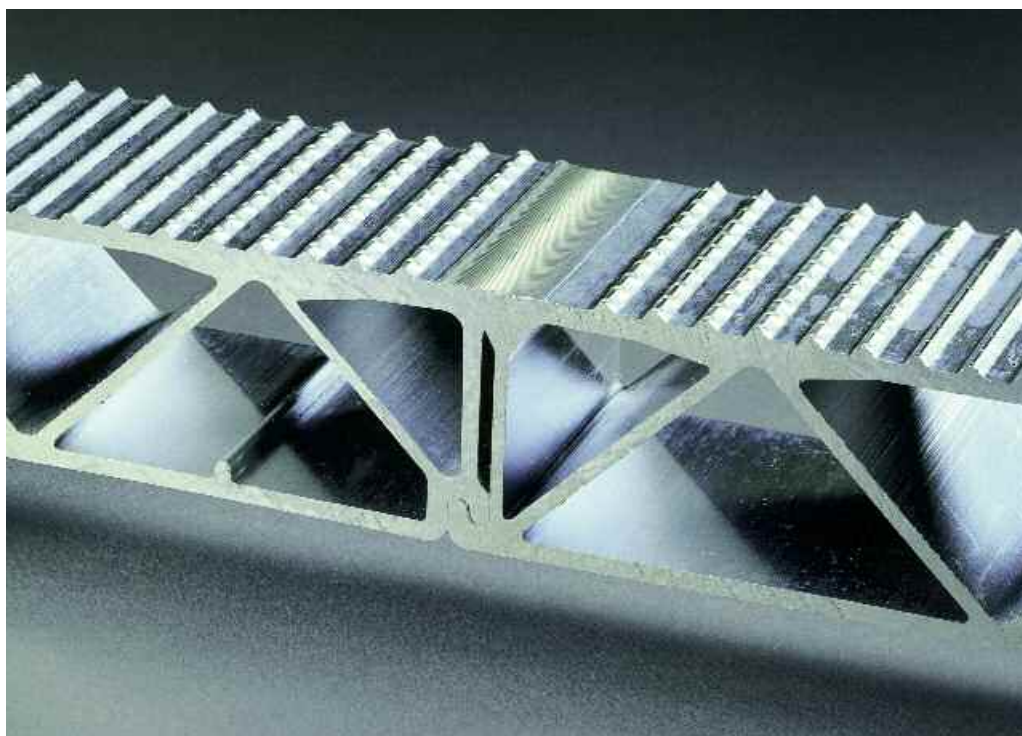
Le soudage par friction peut souder des épaisseurs allant jusqu'à 50 mm, et 100 mm avec un outil de chaque côté.

Cette technique de soudage présente plusieurs **avantages** :

- Forte productivité, donc coûts potentiellement très bas,
- Peu de déformations même le long de la soudure,
- Excellentes propriétés mécaniques comme l'ont montré les tests de pliage, la mesure des caractéristiques mécaniques et les essais de tenue en fatigue,
- Pas de fumées
- Pas de porosité
- Pas de projections
- Pas de retrait
- Possibilités de souder dans toutes les positions
- Performance énergétique.
- Peu d'usure d'outil : un outil peut servir jusqu'à 1 000 mètres

C'est un procédé nouveau qui est développé par le TWI Ltd (The Welding Institute) et protégé par des brevets en Europe, aux USA et en Australie. Tous ceux qui utilisent ce procédé doivent acheter une licence au TWI.

Ce procédé fonctionne dans l'état solide, à une température au dessous du point de fusion du métal. Un outil en forme de doigt avec un épaulement



Soudage par friction d'un profilé de hayon arrière

de soudure dans les alliages de la famille 6000

- Pas de métal d'apport
- Pas de gaz de protection
- Pas de certification des soudeurs
- Tolérance d'une préparation sommaire avant soudage de fines couches d'oxydes
- Pas de meulage, de brossage ou de décapage sur les grandes séries

Les **limites** du soudage par friction FSW se réduisent constamment du fait des efforts de recherche et de développement. Toutefois, les principaux obstacles au développement de ce procédé sont actuellement :

- Le coût élevé de l'investissement qui appelle en conséquence une forte charge des machines pour rentabiliser l'investissement et atteindre le faible coût potentiel promis

- Les pièces à assembler doivent être solidement fixées sur le bâti de la machine
- Les lattes support sont obligatoires sauf dans le cas où deux outils travaillent de part et d'autre de la pièce à assembler
- Zone de dégagement de l'outil à la fin de chaque soudure
- Pas de métal d'apport pour la soudure.

A ce jour, les machines les plus grandes ont une capacité jusqu'à 20 mètres en longueur.

9. La préparation de surface avant soudage

Pour obtenir une bonne qualité des joints soudés, il est recommandé de préparer les bords des tôles à souder (voir chapitre 3.7) après leur découpe au plasma, au laser ou sous jet d'eau.

Cette préparation consiste à éliminer la surface rendue rugueuse par une épaisse couche d'oxyde et des microfissures, afin d'éviter des fissures ou des inclusions d'oxyde dans le cordon de soudure.

Le même traitement doit être fait sur les tôles de plus de 10 mm d'épaisseur qui ont été cisailées. Pour éviter le risque de fissures dans le sens travers court, il faut éliminer par fraisage ou détournage une largeur de 2 mm sur les bords découpés.

Le métal à souder doit être sec et sans avoir été contaminé par de la graisse ou d'autres produits capables de se volatiliser dans l'arc électrique. Pour avoir une surface propre, il faut que les pièces à souder soient entreposées au moins deux jours avant soudage. Ceci permet aux condensations, qui peuvent se déposer sur les pièces si la température du lieu de stockage est plus basse que celle de l'atelier, de sécher.

Immédiatement avant soudage, les bords à souder et la surface à proximité de ceux-ci doivent être dégraissés avec un solvant tel que l'acétone ou l'alcool dénaturé. Il faut éviter le trichloréthylène dont les vapeurs se transforment dans l'arc électrique en phosgène (qui est un gaz toxique).

Après évaporation des solvants ayant servi à dégraisser, il est recommandé de brosser la surface proche du bord avec une brosse rotative à fil en acier inoxydable.

Le soudage en extérieur (à l'air libre, hors atelier) n'est pas envisageable. Si on ne peut faire autrement, il faut alors protéger la zone de soudage avec un rideau coulissant de manière à éviter que le vent ne disperse l'argon injecté par la torche.

10. Le contrôle qualité

Le contrôle qualité donne la possibilité aux constructeurs de juger la qualité des produits qu'ils fabriquent et plus spécialement de situer le niveau de qualité des joints soudés par rapport à un degré d'acceptation des défauts de soudure.

Le niveau d'acceptation des défauts est déterminé par :

- Le type et la direction de la charge (contrainte)
- Le niveau et l'amplitude des variations de contraintes
- Les risques possibles pour le personnel
- L'impact technique et financier de la ruine d'une structure soudée
- La possibilité de contrôle et d'inspections de routine.

Soudage d'une benne (Schmitz)



10.1. Procédures d'approbation

Ces procédures sont soit contractuelles entre client et fournisseur, soit par le constructeur lui-même.

Les soudeurs doivent être certifiés et qualifiés conformément à la norme EN ISO 9606-2⁶.

Les spécifications concernant les procédures de soudage doivent être conformes aux normes

NF EN ISO 15609-1⁷, NF EN ISO 15612⁸, NF EN ISO 15613⁹, NF EN ISO 15614-2¹⁰.

6. Norme NF EN ISO 9606-2. - Epreuve de qualification des soudeurs. - Soudage par fusion. - Partie 2 : aluminium et alliages d'aluminium

7. Norme NF EN ISO 15609-1. - Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques - Partie 1 : Soudage à l'arc

8. NF EN ISO 15612 - Qualification par référence à un mode opératoire de soudage standard - Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques

9. NF EN ISO 15613 - Qualification sur la base d'un assemblage soudé de pré-production - Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques

10. NF EN ISO 15614-2. - Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques. - Epreuve de qualification d'un mode opératoire de soudage. - Partie 2 : soudage à l'arc de l'aluminium et de ses alliages

Les éprouvettes d'essais doivent subir les tests de caractéristiques mécaniques et le test de pliage. Les tests de pliage sont importants parce que :

- ils détectent les phénomènes de collage difficiles à identifier par des tests non destructifs
- ils aident à établir un bon équilibre des paramètres en vue de prévenir ces défauts.

10.2. Inspection des joints soudés

Le type d'inspection fait sur les joints soudés dépendra naturellement de la vitesse d'exécution des soudures.

En atelier, en plus du contrôle visuel, il est possible de procéder aux tests non destructifs suivants :

- le ressuage pour détecter les fuites et les fissures émergentes
- la forme du cordon de soudure (géométrie)
- les radiographies pour détecter les défauts internes dans les soudures bout à bout : porosités, fissures, inclusions
- les tests ultrasons

Par précaution, on peut aussi procéder à quelques tests destructifs sur des échantillons représentatifs.

Un plan d'inspection doit être établi comportant :

- la portée de l'inspection avant soudage
- l'étendue de l'inspection et les tests non destructifs
- les critères d'acceptation (niveau de qualité) en accord avec la norme NF EN ISO 10042¹¹.

10.3. Défauts de soudage et critères d'acceptation

La liste des défauts de soudage et les niveaux de qualité sont indiqués dans la norme NF EN 10042. La marche à suivre pour le choix du niveau de qualité est indiqué dans la norme NF EN 1090-3¹².

11. NF EN ISO 10042. - Soudage. - Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudés à l'arc. - Niveaux de qualité par rapport aux défauts

12. NF EN 1090-3. - Exécution des structures en acier et aluminium. - Partie 3 : exécution des structures en aluminium

Une nomenclature internationale des défauts a été établie et codifiée dans la norme NF EN ISO 6520-1¹³ où ils sont classés en six groupes :

- Le groupe 100 : les fissures
- Le groupe 200 : les cavités et les soufflures


- Le groupe 300 : les inclusions solides
- Le groupe 400 : les manques de fusion et de pénétration
- Le groupe 500 : les défauts de forme

- Le groupe 600 : les défauts divers.

13. Norme NF EN ISO 6520-1 : soudage et techniques connexes, classification des défauts géométriques dans les soudures Partie 1 : soudage par fusion

TABLEAU VIII.4
LES DÉFAUTS DE SOUDURE FRÉQUENTS

| N° | Type de défaut | Cause probable | Photo type du défaut |
|------|----------------------|---|----------------------|
| 101 | Fissures | Mauvais choix du métal d'apport Addition de métal d'apport insuffisante Bridage excessif Bridage excessif Mauvais choix du mode de soudage | Défaut 101 |
| 104 | Fissures de cratère | Coupure brutale de l'arc en fin de cordon | |
| 2012 | Soufflures réparties | Mauvais dégraissage des pièces Pièce et/ou fil d'apport souillé ou humide Protection insuffisante par le gaz inerte (débit trop faible ou fuite sur le réseau) Démarrage du cordon sur pièce froide Hauteur d'arc trop élevée Refroidissement du joint soudé trop rapide | |
| 2014 | Soufflures alignées | Manque de pénétration (cas double passe) Gradient de température trop brutal entre la latte support et les pièces à souder Jeu excessif entre les bords à souder | Défaut 104 |
| 300 | Inclusions solides | Métal souillé (oxydes, poils de brosse) | |
| 303 | Inclusions d'oxyde | Mauvaise protection gazeuse Métal stocké dans de mauvaises conditions Pièces moulées | |

| N° | Type de défaut | Cause probable | Photo type du défaut |
|------|--------------------------------|---|--|
| 3041 | Inclusions de tungstène (TIG) | Diamètre de l'électrode trop faible Mauvaise manipulation du soudeur Densité de courant excessive Mauvaise qualité de l'électrode de tungstène |  <p>Défaut 300</p> |
| 402 | Manque de pénétration | Nettoyage insuffisant (présence d'oxyde) Préparation des chanfreins incorrecte sur produits épais (trop fermé, talon excessif) Jeu d'écartement trop faible (ou non constant) entre pièces Intensité trop faible, notamment en début de cordon de soudure Vitesse de soudage trop élevée Hauteur d'arc trop importante | |
| 4011 | Manque de fusion sur les bords | Hauteur d'arc trop importante Intensité trop faible, notamment en début de cordon de soudure Pièce trop froide (différence d'épaisseur entre matériaux à souder) |  <p>Défaut 402</p> |
| 502 | Surépaisseur | Mauvais réglage de la puissance (couple UI mal adapté) Vitesse de soudage trop lente Mauvaise préparation des bords sur produits épais Surintensité de démarrage trop faible | |
| 507 | Défaut d'alignement | Mauvais positionnement des pièces Mauvais séquençement des soudures |  <p>Défaut 502</p> |
| 508 | Défaut angulaire | Energie de soudage trop grande Mauvais séquençement des soudures | |
| 509 | Effondrement | Vitesse de fil trop grande Vitesse de torche trop lente Mauvaise orientation de la torche | |
| 602 | Projections (ou perles) | Régime d'arc non adapté Problème de contact électrique à la masse |  <p>Défaut 507</p> |

11. Calcul et prévention des déformations

11.1. Causes des déformations

Lors du soudage, les causes des déformations sont :

- La direction du soudage
- L'effet de poinçonnage

11.1.1. La direction du soudage

Il est bien connu que le cordon de soudure se rétracte plus en fin de soudage ; c'est la raison pour laquelle les déformations les plus importantes se produisent à la fin du soudage.

Autant que possible, il est donc essentiel d'orienter le soudage vers l'extérieur de la pièce de sorte que les contraintes soient relaxées au maximum. Dans le cas inverse, si le cordon de soudure est orienté vers le centre de la pièce, la contrainte de rétreint est "piégée" et le résultat sera une déformation plus importante.

La fin du cordon de soudure doit être parachevée pour éviter tout risque de fissure à cet endroit.

11.1.2. L'effet de poinçonnage

Cet effet est habituellement dû aux erreurs de conception. Si on prend pour exemple une cloison intérieure d'une citerne, il est indispensable que cette cloison qui est emboutie ou repoussée ait un "bord tombé" venant s'appuyer sur la virole de la citerne.

En procédant de la sorte, on évite l'effet de poinçonnage dû au retrait de la soudure et on minimise les déformations (figure VIII.4).

De même, quand on place des renforts sur le corps de la citerne, il est essentiel d'intercaler entre le support et la surface une semelle pour éviter les déformations par effet de poinçonnage dû au retrait des soudures (figure VIII.5). En l'absence de semelle, la citerne subit une déformation sous l'effet des contraintes dynamiques.

11.2. Remèdes

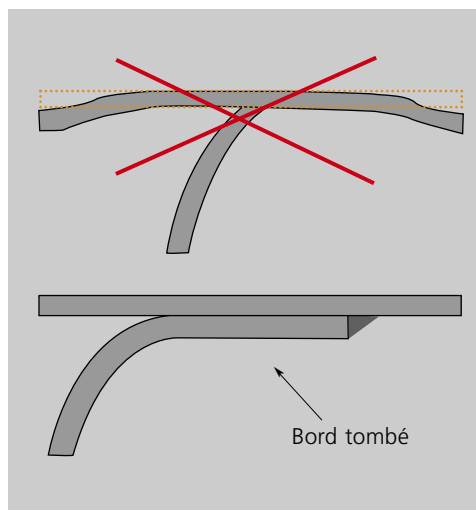
Il y a plusieurs solutions aux problèmes décrits ci-dessus.

11.2.1. Utilisation de profilés extrudés

Cela vaut la peine d'utiliser des profilés dans la construction d'un châssis ; ils vont apporter les solutions suivantes :

- Positionnement des soudures dans les zones les moins sollicitées
- Elimination des déformations

FIGURE VIII.4
SOUDURE À BORD TOMBÉ



Les deux longerons du châssis sont fabriqués à partir de deux profilées qui forment les deux semelles du longeron et la tôle forme l'âme de celui-ci.

L'assemblage illustré par la figure VIII.6 peut être soudé en MIG automatique avec deux torches opérant simultanément de part et d'autre.

Deux méthodes de soudage en bout à bout sont possibles, c'est-à-dire avec le longeron posé verticalement ou horizontalement. Le choix de la position sera dicté principalement par la conception du banc de soudage. Si le longe-

ron est positionné à l'horizontale, il est nécessaire de prévoir une contre déformation pour s'opposer à la déformation angulaire.

11.2.2. Blocage des extrémités

Les extrémités doivent être positionnées de telle sorte que l'allongement soit possible pendant le soudage.

11.2.3. Pré déformation

Des déformations pendant le soudage peuvent être évitées par une pré déformation de la surface à souder de telle façon qu'elles soient neutralisées par celles provoquées par le soudage.

Si le métal est seulement pré déformé dans le domaine élastique déformé par bridage, le résultat risque d'être très aléatoire. Il est donc recommandé de pré déformer le métal par pliage dans le domaine plastique. Dans ces conditions, les résultats sont assurés et reproductibles.

FIGURE VIII.5
SOUDAGE AVEC PLAQUE DE RENFORT

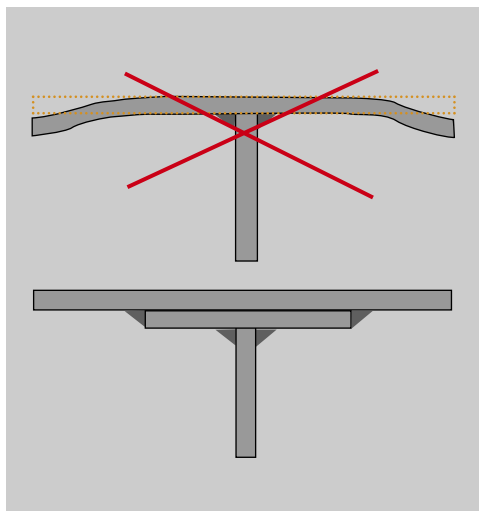
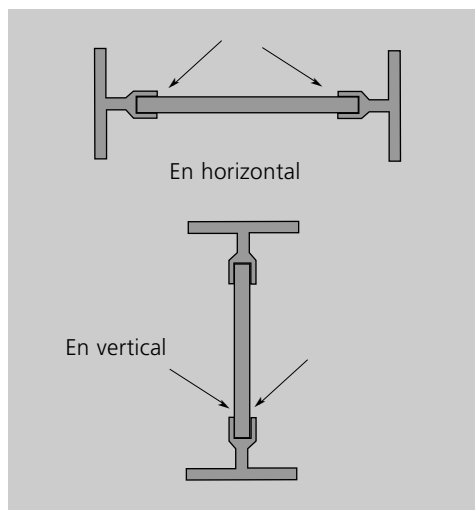
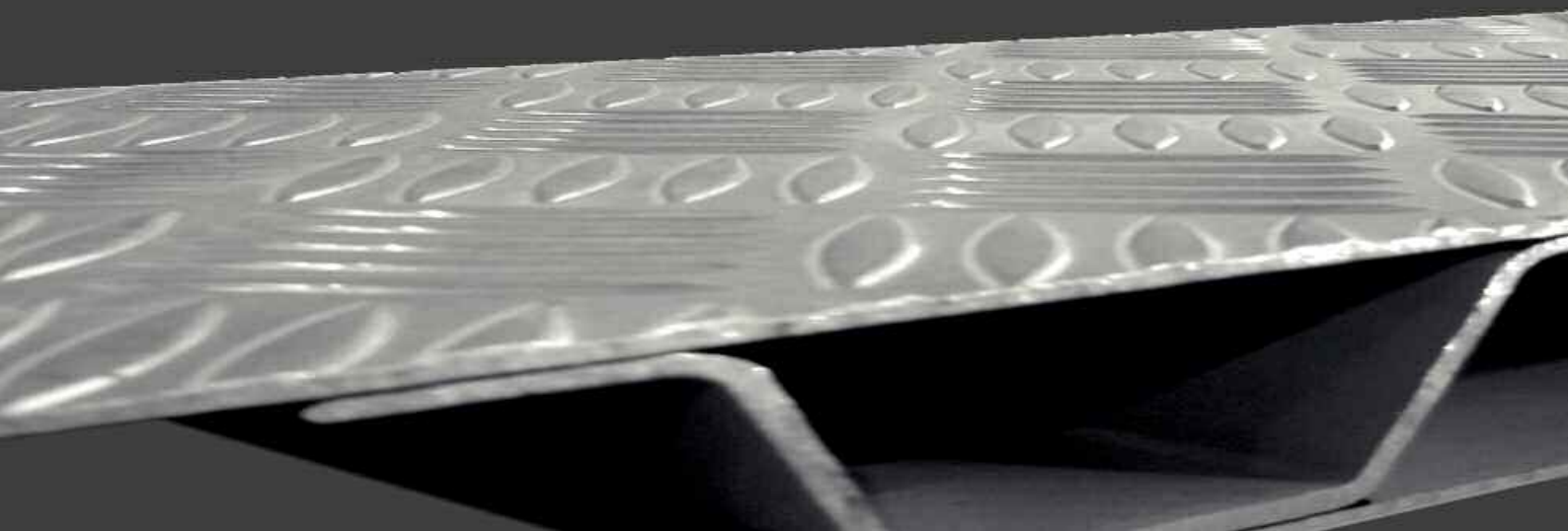


FIGURE VIII.6
RÉALISATION D'UN LONGERON





LES AUTRES MODES D'ASSEMBLAGE

| | |
|---|-----|
| 1. LE COLLAGE | 130 |
| 1.1. Définition | 130 |
| 1.2. Avantages et inconvénients du collage | 131 |
| 1.3. Types d'adhésifs | 131 |
| 1.4. Applications des adhésifs | 132 |
| 1.5. Fluage et vieillissement | 133 |
| 2. LE VISSAGE ET LE BOULONNAGE | 133 |
| 3. LE RIVETAGE | 133 |
| 4. LE CLIPPAGE | 135 |

1. Le collage

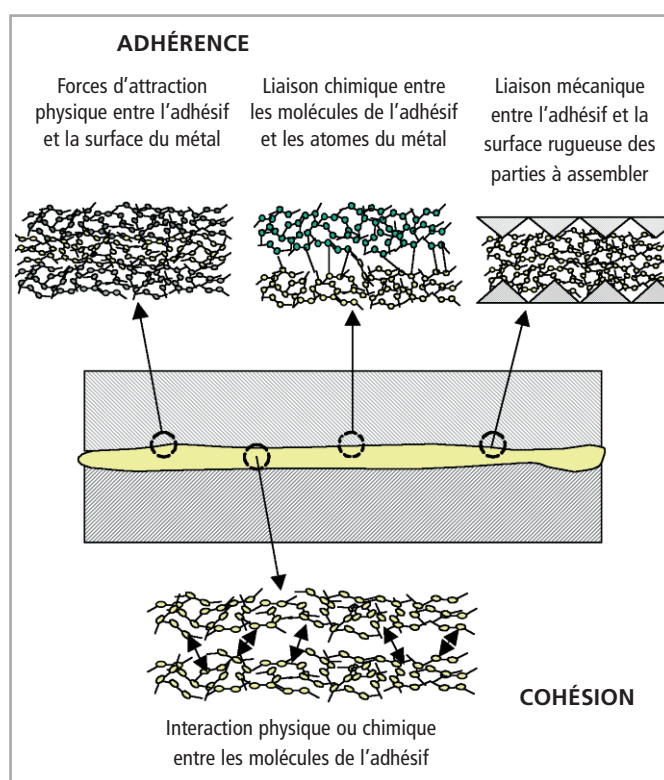
1.1. Définition

Le collage se définit comme un procédé d'assemblage par une substance non métallique (l'adhésif) qui subit un durcissement physique ou chimique qui lie les parties par des forces superficielles (adhésion) ou des forces internes (cohésion).

L'adhérence peut être due à une attraction entre l'adhésif et la surface du métal ou bien une véritable liaison chimique entre les molécules de l'adhésif et les atomes du métal ou bien une liaison mécanique entre l'adhésif et la surface rugueuse du métal.

FIGURE IX.1

PRINCIPE DU COLLAGE



Source: Talat

1.2. Avantages et inconvénients du collage

Le collage assisté, c'est-à-dire la combinaison du collage avec des assemblages mécaniques (rivetage, boulonnage), peut neutraliser les inconvénients indiqués ci-dessous.

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| 1. La charge est répartie uniformément perpendiculairement à sa direction | 1. Influence du temps sur les propriétés du processus |
| 2. Microstructure du métal non modifiée | 2. Prétraitement obligatoire des surfaces avant collage |
| 3. Pas de déformation du joint collé | 3. Stabilité des formes limitée |
| 4. Assemblage possible de matériaux de nature différente (aluminium – verre...) | 4. Les paramètres du procédé doivent être étroitement contrôlés |
| 5. Possibilité d'assembler des produits très minces | 5. Evolution des propriétés du joint collé dans le temps (vieillissement des adhésifs) |
| 6. Gain de poids | 6. Contrôle de la mise en œuvre difficile |
| 7. Les matériaux sensibles à l'échauffement peuvent être collés | 7. Faible tenue au pelage |
| 8. Collage possible de métaux de nature différente, pas de risque de corrosion galvanique (la colle joue le rôle d'isolant) | 8. La faible résistance mécanique des joints collés impose des joints de grande surface |
| 9. Possibilité d'avoir des assemblages à forte résistance mécanique grâce au collage assisté par boulonnage, soudage, etc. | 9. Possibilités limitées de réparation |
| 10. Très bonne résistance en fatigue et bon amortissement des vibrations | 10. Calcul de résistance difficile |

Source: Talat

1.3. Types d'adhésifs

On peut ranger dans trois familles les adhésifs en fonction de leur mode de polymérisation et de leur réaction :

- Polymérisation : c'est une réaction exothermique au cours de laquelle les molécules du monomère se lient entre elles pour former une macromolécule (le polymère). Les thermoplastiques tels

que les méthacrylates, les acétates polyvinyliques et les caoutchoucs appartiennent à ce groupe.

- Polycondensation : cette réaction s'accompagne de la formation d'eau. Les thermoplastiques tels que les polyamides et les polysulfones aussi bien que les duramères comme les résines phénol formaldéhyde, les résines

urée - formol, les résines mélamines et polyamides sont produites par polycondensation.

- Polyaddition : durant cette réaction les atomes d'hydrogène se réarrangent. Des adhésifs très courants pour coller les métaux tels que les résines époxy et les polyuréthanes sont produits par polyaddition.

Prototype d'une section de plancher réalisée par collage de tôle damier et de profilés



Breveté par Alcan

1.4. Application des adhésifs

Le mode d'action d'un adhésif est de mettre en jeu des forces superficielles. Les pré requis pour un bon fonctionnement d'un joint collé sont :

- a) la bonne combinaison entre le choix de l'adhésif et le matériau à coller
- b) l'existence d'une surface appropriée au collage.

Une surface appropriée, cela veut dire que la surface disponible pour le collage doit être assez grande pour transmettre les efforts et qu'elle est en capacité d'assurer un collage correct. Ceci est réalisable par un pré traitement adapté.

Tout reste de saoullure comme de l'humidité par exemple doit être éliminé avant l'application de l'adhésif. Ceci peut être fait par des moyens chimiques (détergents, dégraissants, décapants) ou mécanique par meulage.

Dans tous les cas, la surface doit être absolument propre avant collage. Il est même recommandé de passer un primaire pour avoir un meilleur mouillage de la surface par l'adhésif.

La réalisation du joint doit être en rapport avec le mode d'adhésion et ses conditions quant à l'étendue des surfaces à encoller. Il faut éviter les contraintes de pelage et de clivage et celles de pliage doivent être réduites au minimum.

L'adhésif peut être appliqué manuellement (par exemple à l'aide de cartouches) ou automatiquement pour les grandes surfaces. Le collage doit toujours avoir lieu dans un atelier sec et bien ventilé et à l'abri des poussières.

Le collage doit être réalisé en plein accord avec les préconisations du fournisseur. Les paramètres de production tels le ratio résine/dureté, la durée et la pression appliquée sur les composants pendant le séchage de l'adhésif, la température de séchage, etc. doivent être strictement contrôlés.

1.5. Fluage et vieillissement

La durabilité d'un joint collé dépend de facteurs tels que la qualité du pré traitement, de la composition chimique des adhésifs et des conditions de service comme la contrainte, l'humidité, l'exposition aux rayons ultraviolets. Il est bien connu que les polymères sont sensibles à ce type de radiations qui affectent leurs propriétés mécaniques.

Le vieillissement des joints collés peut être causé par le fluage sous l'effet de la contrainte supportée par le joint¹.

Les joints collés doivent donc être inspectés régulièrement pour prévenir les dommages éventuels et pour pouvoir les réparer avant qu'une rupture ne se produise.

1. Le fluage est l'allongement qui se produit dans le temps sous l'effet d'une contrainte à charge constante.

2. Le vissage et le boulonnage

Avec le boulonnage, il est possible de démonter et de remonter un assemblage autant de fois que nécessaire. Avec le soudage, l'assemblage mécanique est la méthode la plus classique pour la liaison entre pièces métalliques.

Contrairement au soudage, il est possible d'assembler des métaux de nature différente. Dans les véhicules industriels, c'est le moyen

d'assemblage le plus utilisé pour réaliser les assemblages entre l'aluminium et l'acier. C'est le cas, par exemple, de la liaison entre le châssis et la citerne ou le châssis et la benne basculante. Des précautions spéciales doivent être prises pour éviter la corrosion galvanique².

Le choix des dispositifs de fixation dépendra de la détermination des contraintes subies par l'assemblage.

Pour éviter le risque de corrosion galvanique entre la visserie en acier et les éléments en aluminium, il faut envisager d'interposer des joints isolants les contacts entre la visserie en acier et la structure en aluminium.

2. Voir le chapitre XI.

3. Le rivetage

Le rivetage est aujourd'hui un mode d'assemblage largement répandu dans de nombreux secteurs de l'industrie dont celle des véhicules industriels.

S'agissant d'une méthode facile d'application et sûre, le rivetage est devenu un mode d'assemblage courant dans la construction des carrosseries des semi-remorques.

Le rivetage mécanique présente beaucoup d'avantages :

- rapidité, qui permet de grandes cadences grâce à l'usage d'outils pneumatiques ou hydrauliques

- contrôle facile de la force de serrage qui est toujours garantie par l'outillage à un niveau inférieur à celui de la rupture du rivet

- esthétique, le rivetage mécanique peut être couplé avec la mise en place d'une coiffe décorative en matière plastique

- exécution possible avec une main d'œuvre non qualifiée
- des assemblages hétérogènes sont possibles entre métaux différents, métaux et polymères, réalisation de sandwich, de structures en nid d'abeille

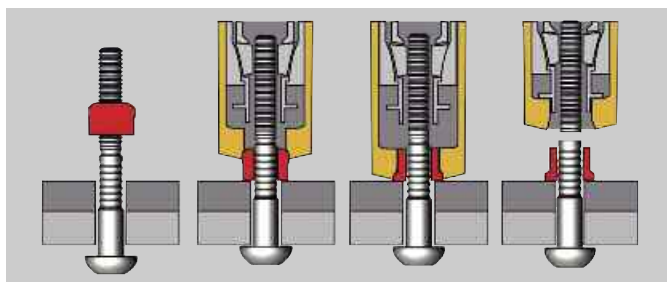
Les rivets peuvent être classés en deux groupes : les rivets auto-poinçonneurs et ceux qui nécessitent le forage d'un trou avant de riveter.

Il y a trois familles de rivetage conventionnel :

Les boulons à sertir qui, à première vue, créent le même type de liaison qu'un boulon classique mais sont différents des écrous et des boulons conventionnels. En effet, ils ne peuvent pas être desserrés même sous l'effet de fortes vibrations. Ils ne sont utilisables que si les deux cotés de l'ouvrage sont accessibles.

FIGURE IX.2

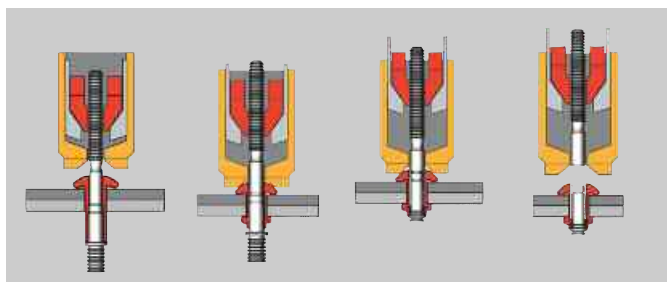
BOULON À SERTIR



Un boulon à sertir est constitué d'une tige terminée par une tête plate ou arrondie qui est introduite dans l'orifice et d'un collier qui est placé sur la tige du côté opposé à la tête de celle-ci.

FIGURE IX.3

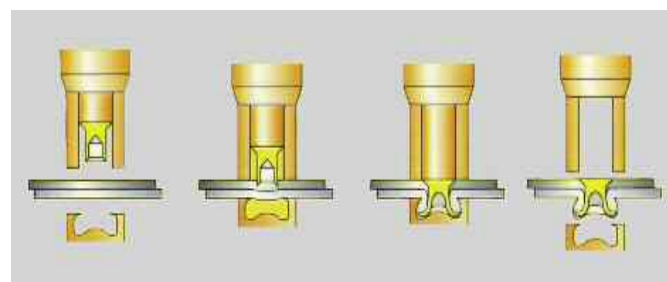
RIVET AVEUGLE



En tirant sur la tige filetée, l'outil de fixation, placé au dessus de l'écrou, plaque la tête du boulon d'un côté et pousse le collier de l'autre. Enfin l'outil sertit le collier sur la tige, laquelle est sectionnée juste au dessus de la tête du collier (figure IX-2)

FIGURE IX.4

RIVET AUTO POINÇONNEUR



Une des caractéristiques de ce système est que la force de serrage est prédéterminée par celle qui est nécessaire à la rupture de la partie calibrée de la tige au ras de la tête du collier. L'outil de fixation a une double action : tirer sur la tige et bloquer le collier par rétreint autour de celle-ci, juste avant la rupture.

La force de cisaillement des boulons à sertir varie selon les propriétés mécaniques du matériau dont ils sont faits et le diamètre minimum de la tige. Pour accroître la force de cisaillement, il suffit d'augmenter le diamètre de la tige ou de choisir un alliage plus résistant mécaniquement.

La résistance à la traction des

boulons à sertir dépend de la force de cisaillement du métal du collier et de sa géométrie.

Les rivets aveugles, ils ne sont utilisables que lorsqu'un seul côté est accessible. Ils sont caractérisés par la rupture de la tige du rivet après sertissage par déformation du rivet (figure IX-3).

Les rivets auto poinçonneurs ne nécessitent pas de perçage préalable. La tôle supérieure est poinçonnée par le rivet au moment de la pose et il est ensuite déformé sur une bouterolle par pression hydraulique (figure IX-4).

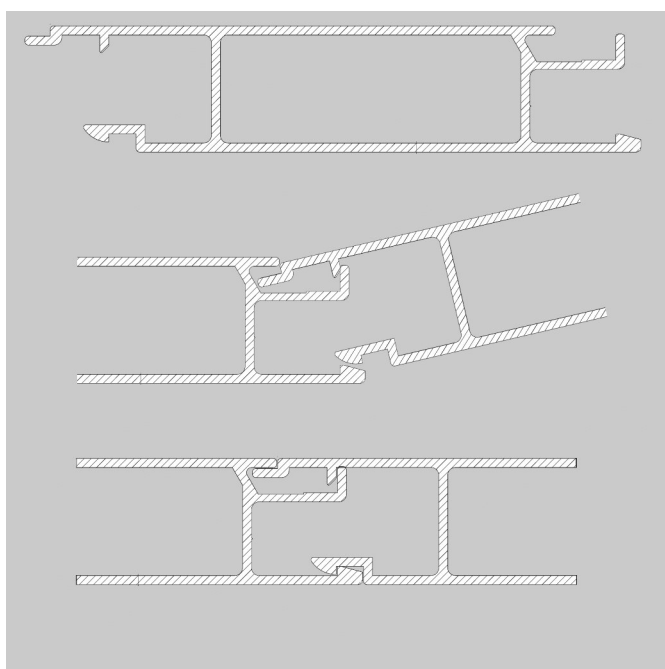
4. Le clippage

Le clippage est un procédé d'assemblage de composants rainurés qui s'emboîtent les uns dans les autres pour former un assemblage facile et rapide (figure IX-5).

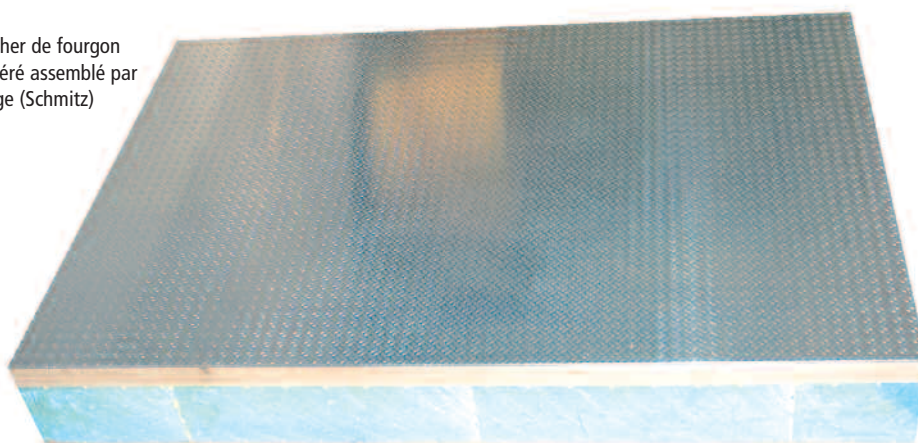
Avec ce mode d'assemblage, il est possible de monter des cloisons encochées sur place sans avoir besoin de les fixer par un moyen quelconque.

Les contraintes sont réparties uniformément sur toute la longueur du profil et pas du tout concentrées sur les points de fixation, ce qui confère une bonne rigidité à la structure.

FIGURE IX.5
PRINCIPE DU CLIPPAGE



Plancher de fourgon
réfrigéré assemblé par
collage (Schmitz)





DÉCORATION ET FINITION

| | |
|--|-----|
| 1. AVANT-PROPOS | 138 |
| 2. LES PROTECTIONS DE L'ALUMINIUM | 138 |
| 3. LES FINITIONS MÉCANIQUES | 139 |
| 3.1. Brossage | 139 |
| 3.2. Polissage et avivage | 139 |
| 4. LES DÉCORATIONS CHIMIQUES | 141 |
| 4.1. L'anodisation | 141 |
| 4.2. La peinture | 141 |

1. Avant-propos

L'expérience montre qu'il n'est pas indispensable de protéger l'aluminium. En effet, les véhicules industriels en aluminium conservent leur bel état de surface initial pen-

dant toute leur durée de service. Néanmoins, il est fréquent d'appliquer des traitements de surface sur les véhicules industriels en aluminium pour améliorer leur attrait et

leur aspect, les protéger contre les effets éventuels des atmosphères agressives et, enfin, afficher la marque des transporteurs, voire y placer des annonces publicitaires.



Citerne en aluminium (Trailer)

2. Les protections de l'aluminium

Il y a plusieurs procédés de décoration et de finition d'une surface en aluminium. Bien que tous les procédés applicables aux autres métaux le soient pour l'aluminium, il faut porter une attention particulière aux spécificités de l'aluminium.

Pour chaque cas, il est nécessaire de prendre en compte la faible dureté de surface de l'aluminium et la présence du film d'oxyde naturel.

Il y a deux catégories principales de traitements de surface de l'aluminium :

- Les finitions mécaniques : broyage et polissage
- Les finitions chimiques : anodisation et peinture.

Aujourd'hui, la peinture est la plus utilisée pour décorer les véhicules industriels en aluminium.

3. Les finitions mécaniques

3.1. Brossage

Le brossage est très rarement utilisé comme procédé de décoration des véhicules industriels en aluminium. Il est surtout appliqué sur les citernes pour le transport des liquides alimentaires. Tout comme le polissage, le brossage s'obtient par abrasion de la surface en aluminium par celle de la brosse. Du fait que la brosse soit plus dure que la surface de l'aluminium, celle-ci subit un effet d'abrasion superficiel. Le brossage est réalisé généralement avec des brosses rotatives. Normalement, le brossage est fait « à sec » sans aucun apport de produit lustrant ou chimique. Comme pour tous les traitements de surface de l'aluminium, la partie à brosser doit être dégraissée soigneusement avant brossage. Le nettoyage a pour but d'éliminer la poussière, la saleté, l'huile, les émulsions et autres résidus de transformation (laminage, filage) et de mise en forme pour éviter que des particules de ces résidus ne laissent des marques sur la surface du métal lors du brossage. Pour s'assurer d'une surface d'aspect uniforme, il est recommandé d'utiliser plusieurs têtes de brosses montées sur un appareillage unique

pour que leurs mouvements soient simultanément contrôlés.

3.2. Polissage et avivage

Le polissage ou l'avivage sont des modes de finition de surface très courants sur le marché nord américain pour obtenir un état de surface décoratif.

Il y a trois voies possibles :

- Utiliser des tôles polies miroir au laminage
- Polir ou aviver les tôles brutes de laminage pour avoir l'aspect de surface désiré
- Faire un polissage manuel

L'utilisation de tôles déjà polies présente l'avantage de réduire le travail de polissage en atelier aux seuls joints soudés ou aux parties dont l'état de surface de livraison a été endommagé lors de la fabrication. Cependant, il faut prendre beaucoup de soin pendant les manutentions et la fabrication pour éviter de marquer les surfaces des tôles qu'il faut ensuite polir manuellement pour les effacer.

Les tôles d'aspect poli miroir sont laminées sur des laminoirs équipés de cylindres spéciaux dont la surface est presque sans rugosité. Cette qualité de surface suppose des conditions de lami-

nage très strictes et beaucoup de soin pour obtenir des produits de qualité fiable et constante.

Le polissage des tôles épaisses est fait sur des lignes automatiques où la surface est polie sur toute la largeur avec polisseuses rotatives dont les brosses sont munies de tampons en feutre qui polissent la surface avec des pâtes spéciales à polir l'aluminium.

Ces pâtes à polir fonctionnent comme des abrasifs doux qui éliminent la couche superficielle du métal sur une épaisseur du même ordre que la rugosité produite par le laminage.

Le résultat d'un tel polissage est très dépendant du type d'alliage et de l'état métallurgique, de la dureté de surface, de la qualité de la pâte à polir et des conditions de polissage (telles que vitesse de rotation, pression et nature du tampon). C'est une méthode par approches successives pour trouver les bonnes conditions appropriées à chaque cas.

Dans tous cas, les tôles en aluminium doivent être dégraissées et nettoyées pour éliminer toute sorte de poussière et de saleté afin d'éviter le marquage de la surface des tôles par l'abrasion dues aux particules.



Citerne en aluminium (LAG)



Benne basculante en aluminium (Benalu)

Les mêmes règles s'appliquent au polissage manuel. Cette technique est difficile à mettre en œuvre. Il faut une solide expérience pour atteindre un résultat reproductible et satisfaisant. Après avoir éliminé de la surface la saleté et le gras, le polissage manuel à la brosse rotative commence avec une pâte de dégrossissage.

La tête de la polisseuse doit être en feutre. La vitesse de la polisseuse doit être contrôlée pour éviter de trop échauffer la surface et donc de brûler la pâte à polir.

Les mouvements de la polisseuse doivent aller d'avant en arrière et de haut en bas pour avoir une abrasion uniforme de la surface. Quand le tampon dérape soudainement (causé par des résidus de polissage, par exemple), il faut régulariser avec grand soin l'état de surface ou changer de tampon.

Après le premier polissage de dégrossissage, la pâte doit être remplacée par une pâte moins abrasive.

Avant de faire la dernière passe de polissage, il est recommandé

de nettoyer de nouveau la surface pour éliminer les résidus noirs qui peuvent s'être incrustés. L'aspect final d'une surface polie manuellement devrait être un poli miroir, uniforme, sans rayures, sans taches noires et sans scintillement.

Pour conserver longtemps le poli miroir, il faut appliquer un revêtement organique transparent (un vernis, par exemple) pour éviter le ternissement (ou le blanchiment) que subit toute surface en aluminium exposée à l'atmosphère normale.

4. Les décorations chimiques

4.1. L'anodisation

L'anodisation est un procédé électro-chimique qui renforce le film d'oxyde naturel recouvrant la surface du métal.

L'anodisation est faite en bain sulfurique sous une certaine intensité. L'épaisseur du film d'oxyde naturel croît et atteint une épaisseur de l'ordre

de 1 000 fois supérieure à celle du film naturel.

L'anodisation ne confère pas seulement une surface mate de couleur argentée mais en même temps elle accroît la dureté superficielle, la résistance à la corrosion et la résistance à l'abrasion.

Ce procédé est appliqué d'une manière discontinue sur les produits moulés et profilés ou en continu, au déroulé, sur des bobines de métal.

La structure de la couche d'anodisation est déterminée par les paramètres du procédé (type du bain, tension appliquée, etc.) et est formée de cellules hexagonales (figure X.1).

Au centre des cellules se trouve un micro pore dont le diamètre est de l'ordre du nanomètre. Les pores doivent être colmatés pour les obturer et donc assurer une bonne résistance à la corrosion. Le colmatage est fait dans l'eau bouillante avec des additifs éventuels.

4.2. La peinture

4.2.1. Préambule

La peinture est le meilleur moyen pour décorer les véhicules industriels. Du fait de la présence du film d'oxyde naturel en surface de l'aluminium, il est essentiel pour avoir un revêtement bien adhérent et durable d'appliquer une préparation de surface efficace.

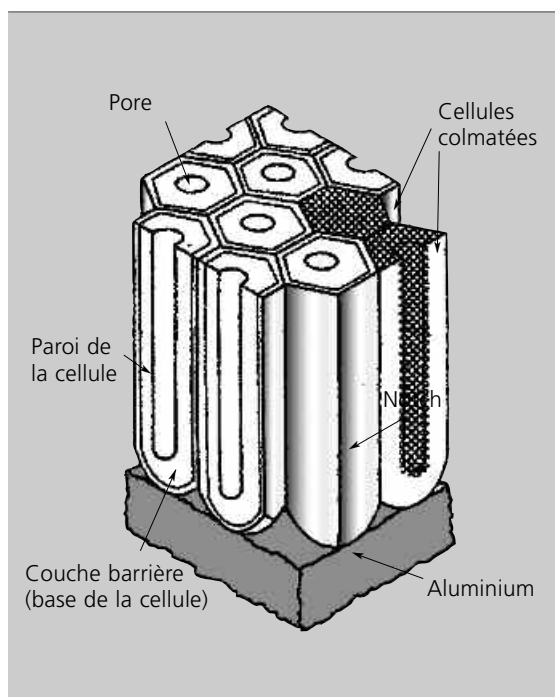
Il n'est donc pas suffisant de nettoyer et de dégraisser la surface de l'aluminium avant peinture. Il faut aussi éliminer le film d'oxyde naturel qui compromet l'adhérence du système de revêtement. Ce traitement préliminaire peut être fait de deux manières :

Prétraitement chimique par décapage, après dégraissage
Combinaison de dégraissage et de décapage

Le dégraissage de la surface en aluminium peut être effectué avec des solvants dégraissants liquides proposés, par exemple, par les fabricants de peinture. Les buts du nettoyage et du dégraissage sont :

- Éliminer à la surface du métal toute sorte de résidus de graisse ou d'huile et toutes traces de saletés et de poussières

FIGURE X.1
STRUCTURE DE LA COUCHE D'ANODISATION





Nettoyage avant peinture (LAG)

- Empêcher l'accumulation de charges électriques en surface. Pour appliquer correctement un solvant, il est nécessaire d'essuyer au préalable la surface du métal avec un chiffon humide et ensuite d'essuyer avec un autre chiffon sec.

L'aluminium a des propriétés chimiques amphotères, ce qui signifie qu'il peut être dissous en milieu acide et en milieu alcalin. Le décapage des véhicules industriels est fait habituellement par pulvérisation d'un agent chimique. Les produits de décapage alcalins sont à base d'hydroxyde de sodium, de silicates, de phosphates et de carbonates.

La concentration d'hydroxyde de sodium et la température de décapage ont une forte influence sur la vitesse d'attaque du métal. Le décapage peut aussi être fait à base de solutions d'acide phosphorique ou d'acide nitrique.

Le décapage laisse une surface rugueuse et très sensible à l'humidité. Il est donc essentiel de

rincer soigneusement à l'eau pendant environ 20 minutes après décapage.

Traitement mécanique par meulage ou projection d'abrasif

Le meulage doit être fait sur une surface propre et dégraissée pour éviter que l'huile ne soit piégée à la surface de l'aluminium, ce qui provoquerait des problèmes d'adhérence des peintures.

Les grains des disques de meulage doivent avoir une taille de 120 - 180.

La projection d'abrasif assure un traitement plus uniforme et touche des surfaces difficilement accessibles avec une machine à meuler. Il est indispensable d'utiliser des abrasifs exempts de fer comme le corindon non recyclé. En effet, le fer peut provoquer des problèmes de corrosion superficielle¹.

La vitesse d'abrasion pendant la projection est très faible, l'enlèvement de métal est inférieur à 0,1 mm donc du même ordre que le décapage chimique.

Après le meulage (qui peut être utilisé pour araser les cordons de soudure et éliminer les rayures et les éraflures) ou la projection d'abrasif, il est nécessaire d'enlever les traces d'abrasif au jet d'air comprimé et de nettoyer à nouveau la surface.

4.2.2. L'application d'un primaire

Le primaire doit être appliqué immédiatement après le prétraitement de la surface pour éviter la reconstitution en l'état du film d'oxyde naturel ou pour éviter que de la poussière ne vienne se déposer pendant la période intermédiaire.

Le primaire (ou « wash primer ») a pour rôle de constituer un intermédiaire adhésif pour maintenir les forces adhésives entre le substrat (la surface de l'aluminium) et le revêtement.

Le primaire agit également comme inhibiteur de corrosion en évitant que de la vapeur d'eau diffuse au travers du revêtement et ne vienne réagir au contact avec la surface de l'aluminium.

1. L'incrustation de particules de fer à la surface de l'aluminium peut être une source de corrosion galvanique qui provoque en présence d'humidité des micro-piqûres superficielles.

Les primaires, constitués de résine époxy, sont tout indiqués pour le pré traitement de l'aluminium, mais nécessitent une préparation minutieuse de la surface brute de l'aluminium.

Le primaire est habituellement appliqué avec un pistolet et l'épaisseur de la couche de primaire est d'environ 10 µm.

4.2.3. La couche de finition

L'application de la couche de finition peut être faite de plusieurs manières. Il n'y a pas de méthode spécifique à l'aluminium.

En tout cas, et c'est d'une importance vitale, les différents composants du revêtement doivent avoir des propriétés compatibles entre elles. Les prescriptions techniques des fournisseurs de peintures doivent être suivies à la lettre.

La finition peut être constituée de 2 ou 3 couches avec ou sans charge et couche de fond.

Le mastic est nécessaire quand il faut combler les anfractuosités et/ou augmenter l'épaisseur du revêtement.

Pour la préparation de surface, la première couche doit être passée au papier abrasif fin (rugosité 300-400). Il en est de même pour le mastic qui doit être aussi traité de la sorte avant l'application de la couche finale.

La peinture est normalement appliquée au pistolet. Le temps de séchage et la température doivent être contrôlés. Il peut être nécessaire de passer un léger meulage entre chaque couche.

La séquence typique pour une citerne routière peut être celle-ci :

- Décapage, dégraissage intérieur et extérieur par pulvérisation avec un agent décapant et inhibiteur à base d'acide phosphorique
- Rinçage à l'eau douce pendant 20 minutes environ
- Assemblage final du véhicule industriel
- Meulage de la surface de la citerne avec une meuleuse manuelle pour éliminer les petits défauts de surface
- Nettoyage et dégraissage avec des dégraissants ou détachants aux silicones
- Application du primaire sur la surface extérieure de la citerne, épaisseur de la couche 9 à 10 micromètres
- Séchage à la température ambiante ou à plus haute température, jusqu'à 80 °C
- Elimination des anfractuosités et des défauts de planéité avec du mastic, meulage de la couche de mastic
- Elimination de la poussière et de la saleté avec un chiffon humide

• Application de la première couche du système de revêtement (couche de fond ou application du mastic en deux passes, d'épaisseur totale de 60 à 70 micromètres. Les zones de gravillonnage feront l'objet d'une attention spéciale

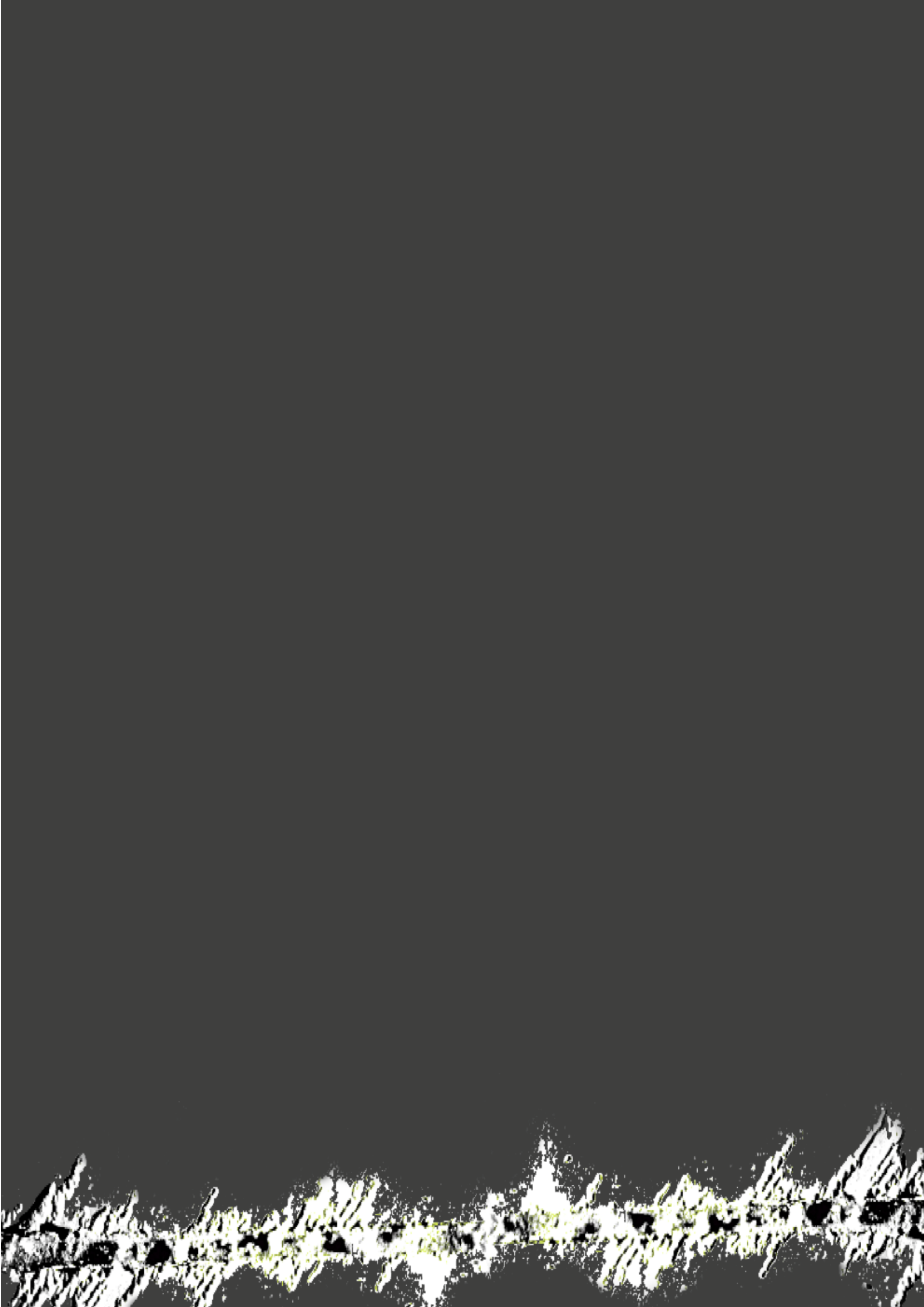
- Application de la couche finale (brillante) dans la couleur retenue dans un délai maximum de 2 heures. Cette couche aura une épaisseur de 50 à 60 micromètres
- Séchage de la couche finale.

Les profilés, par exemple ceux des bennes basculantes, peuvent être peints de deux manières : soit la benne est peinte dans son ensemble, soit les profilés peuvent être peints un à un avant d'être assemblés.

Les règles générales pour la décoration mentionnées ci-dessus sont également valables pour ces types de véhicules.

Dans tous les cas, il est essentiel pour avoir une peinture de décoration correcte et durable de faire une bonne préparation de surface comme cela est indiqué ci-dessus.

Les problèmes avec la peinture de finition ne sont souvent pas dus à la peinture elle-même ou à l'aluminium mais le plus souvent à une préparation de surface insuffisante.



CHAPITRE XI

LA RÉSISTANCE À LA CORROSION

| | |
|---|-----|
| 1. DÉFINITION DE LA CORROSION | 146 |
| 2. LA CORROSION DE L'ALUMINIUM | 146 |
| 2.1. Le film d'oxyde naturel | 146 |
| 2.2. Les formes de corrosion sur les véhicules industriels | 147 |
| 2.3. Références | 151 |

1. Définition de la corrosion

La corrosion est une interaction électrochimique entre un métal et son environnement qui se traduit par une modification des propriétés du métal et qui aboutit fréquemment à une perturbation des fonctions du

métal, de l'environnement ou du système formé par eux deux¹.

La corrosion peut se propager localement (c'est la corrosion par piqûres) ou elle peut affecter toute la surface exposée

pour provoquer une détérioration généralisée.

1. Suivant la définition de la norme NF EN ISO 8044 : *Corrosion des métaux et alliages*. - Termes principaux et définitions

2. La corrosion de l'aluminium

2.1. Le film d'oxyde naturel

La surface de l'aluminium est très réactive au point de réagir spontanément avec l'oxygène de l'air ou l'eau pour former l'oxyde d'aluminium.

Cet oxyde forme une couche naturelle protectrice de toute la surface du métal. Son épaisseur est de l'ordre du nanomètre (5 à 10 nm).

Le film d'oxyde naturel est chimiquement très stable, il a une bonne adhérence à la surface du métal, se répare lui même et il protège l'aluminium d'une éventuelle corrosion (figure XI.1).

Le film d'oxyde naturel peut être détruit dans des milieux fortement acides ou fortement alcalins

dans lesquels des ions agressifs sont présents.

Ces ions agressifs sont capables de détruire localement le film d'oxyde naturel et de provoquer une corrosion par piqûres.

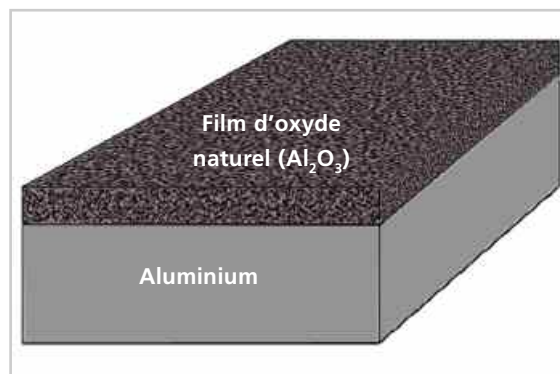
Un cas typique de ce genre de réaction est produit par le contact entre l'aluminium et les ions chlorures qui sont présents dans l'eau de mer ou dans le sel répandu en hiver sur les routes.

Plusieurs éléments d'alliage peuvent accroître la résistance à la corrosion du film d'oxyde naturel alors que d'autres vont l'affaiblir.

Les fabricants de véhicules industriels ou les opérateurs doivent prendre contact avec les fournis-

seurs d'aluminium pour les cas de service critiques, comme les températures élevées ou des chargements agressifs.

FIGURE XI.1



Corrosion galvanique



2.2. Les formes de corrosion sur les véhicules industriels

Bien que résistant à la corrosion grâce à son film d'oxyde naturel, l'aluminium des véhicules industriels en fabrication ou en service, peut présenter les formes suivantes de corrosion

- corrosion galvanique
- corrosion sous dépôt
- corrosion par piqûres
- corrosion filiforme

2.2.1. La corrosion galvanique

La corrosion galvanique peut se développer quand deux métaux différents (ou des matériaux non métalliques mais conducteurs de l'électricité – le graphite, par exemple) sont mis en contact direct ou indirect en présence d'un électrolyte.

La cause de cette forme de corrosion est due à la différence de potentiel de dissolution entre les deux métaux.

L'aluminium est un métal très électronégatif et il faut donc faire attention quand il est associé à un autre métal en présence d'un électrolyte, de l'eau par exemple. Dans la pile ainsi formée, l'aluminium fonctionne comme anode et il subit donc une dissolution alors que l'autre métal en contact ne subit aucune attaque.

Dans ce cas, les ions aluminium Al_3^+ réagissent avec l'eau pour former de l'alumine hydratée $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ d'aspect caractéristique : blanc gélatineux et qui reste accrochée à la surface de l'aluminium.

Pour que la corrosion galvanique se développe, il faut que trois conditions soient réunies simultanément : (figure XI-2)

- deux métaux de nature différente ayant un potentiel de dissolution différent
- présence d'un électrolyte
- contact direct (ou indirect) entre les deux métaux

L'électrolyte assure la circulation des électrons entre les deux métaux. Cela n'a lieu que si les deux métaux sont mouillés par l'électrolyte (par exemple de l'eau salée) ou immergés dans l'électrolyte.

Sur les véhicules industriels, ce type de corrosion peut se produire sur les assemblages rivetés ou boulonnés et s'ils sont mouillés par la pluie ou les éclaboussures de la route.

Pour éviter les contacts directs entre les deux métaux et pour prévenir la rétention d'eau, il est indispensable d'interposer entre les deux métaux un matériau isolant (tel du néoprène ou un autre élastomère) et de disposer un produit d'étanchéité pour obturer les interstices.

FIGURE XI.2

PRINCIPE DE LA CORROSION GALVANIQUE, AVEC L'ALUMINIUM ANODE

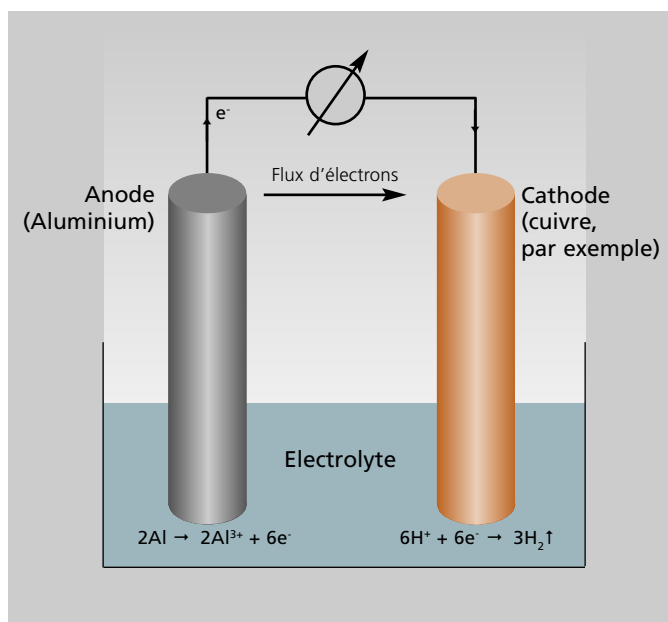
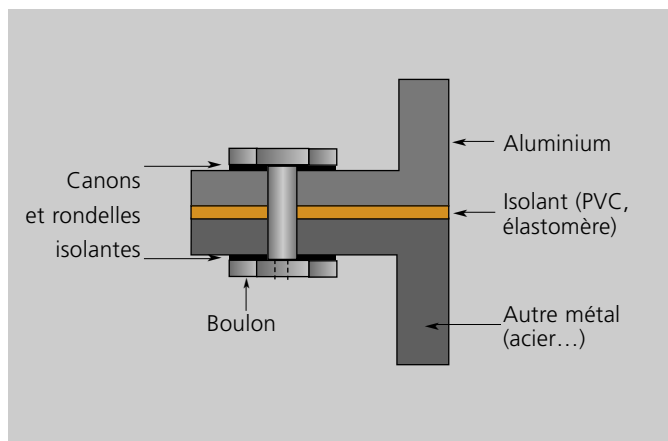


FIGURE XI.3

PRÉVENTION DE LA CORROSION GALVANIQUE



2.2.2. La corrosion sous dépôt

La corrosion sous dépôt se développe sous les recoins. De l'humidité peut s'accumuler sous un recoin par capillarité ainsi que des dépôts plus ou moins agressifs. Par conséquent, en particulier pour éviter les effets des éclaboussures, tous les interstices doivent toujours être obturés autant que possible pour empêcher la pénétration d'humidité contenant en général des ions agressifs provenant du sel de salage des routes (figure XI.4). La vitesse de corrosion sous dépôt est généralement lente du fait que le produit de corrosion – l'alumine – est très stable et constitue un obstacle à la pénétration de l'humidité dans l'interstice.

2.2.3. La corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est la forme la plus courante sur l'aluminium. Elle est caractérisée par le développement de petites piqûres localisées à la surface du métal. Leur diamètre et leur profondeur varient et dépendent de plusieurs paramètres relatifs à l'aluminium lui-même (nature de l'alliage, vitesse d'écrouissage, traitements thermiques) ou de l'environnement (présence d'ions agressifs).

FIGURE XI.4
CORROSION SOUS DÉPÔT ET PRÉVENTION

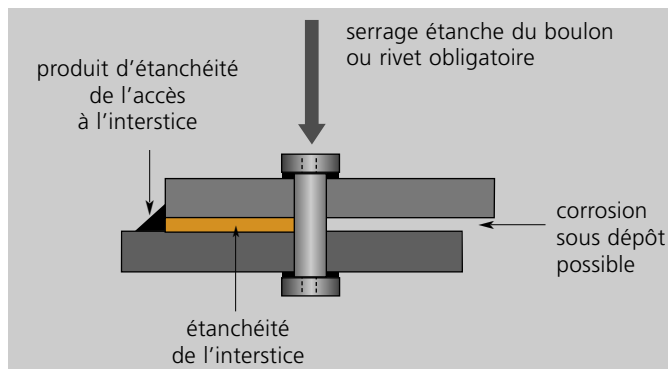
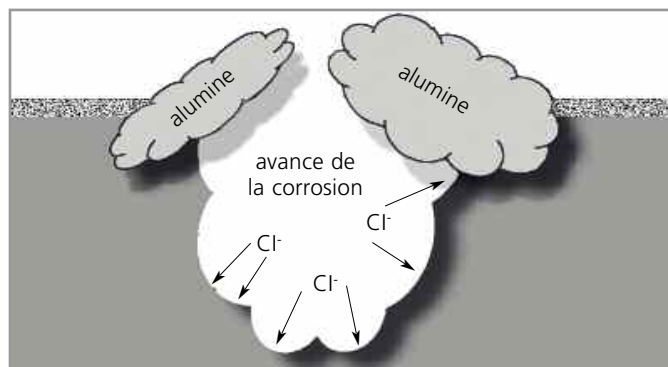


FIGURE XI.5
CORROSION PAR PIQÛRES



La corrosion par piqûres se développe sur des sites où le film d'oxyde naturel est dans un état endommagé ou présente des lacunes. Cela peut être dû à plusieurs raisons telles que les conditions de mise en œuvre (sol brut de l'atelier, discontinuités des cordons de soudure, etc.). Si la vitesse de formation des piqûres peut être rapide après leur initiation, elle décroît ensuite rapidement. Cela est dû au fait que les produits de corrosion – l'alumine – est très insoluble dans l'eau et donc adhère à la surface du métal, à l'intérieur même de la piqûre.

La présence d'alumine a pour effet d'isoler la surface de la piqûre du milieu agressif et donc de ralentir la vitesse d'approfondissement des piqûres (figure XI.5). Ce ralentissement de la vitesse de corrosion par piqûres explique que les équipements en aluminium peuvent rester en service pendant des décennies dans des atmosphères (rurale, marine) ou des milieux (eau de mer, etc.) sans aucune protection. En d'autres termes, la corrosion par piqûres est tout à fait normale et n'a pas d'incidence sur la durée de service des véhicules industriels en aluminium.

2.2.4. Dispositions constructives pour prévenir la corrosion

Quelques règles générales sont à appliquer pour éviter la corrosion (dans la plupart des cas il s'agit d'éviter l'infiltration d'humidité ou les zones de condensation).

- Les interstices doivent être évités par construction ou, à défaut, colmatés par un joint (figure XI-6).

FIGURE XI.6

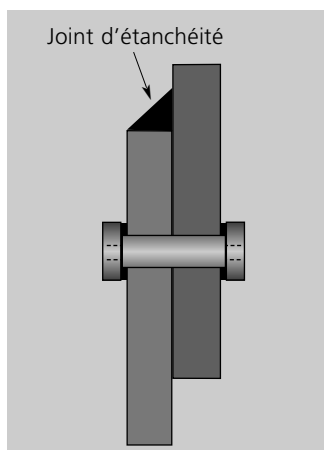


FIGURE XI.8

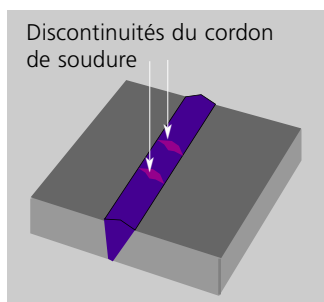
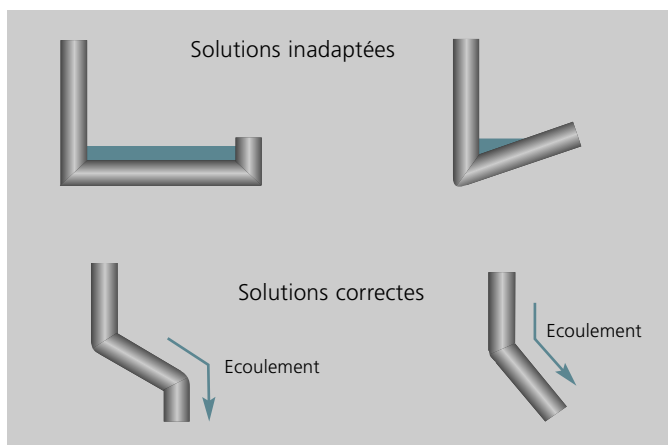


FIGURE XI.7



- Les zones à rétention d'humidité doivent être évitées. Il faut toujours prévoir l'évacuation de l'eau (figure XI-7).

- Les cordons de soudures discontinus doivent être proscrits à plusieurs titres : contraintes, résiduelles, tenue en fatigue, etc. (figure XI-8).

- Les métaux dont le potentiel de dissolution est différent doivent être isolés les uns des autres par des joints isolants

2.2.5. La corrosion filiforme

La corrosion filiforme (connue aussi comme étant une corrosion sous revêtement) se développe sous les peintures ou sous les revêtements organiques. Elle dépend principalement des propriétés de l'environnement et de la qualité des traitements de surface avant peinture.

Les filaments de la corrosion filiforme ont l'aspect de vers et sont bien visibles. La corrosion filiforme n'attaque pas la surface du métal mais affecte l'aspect de surface.

Le mode de propagation de la corrosion filiforme est assez semblable à celui de la corrosion par piqûres avec le front de l'attaque où l'humidité, qui pénètre la surface de la couche, apporte l'oxygène aux surfaces. Le front de l'attaque agit ainsi comme anode.

La corrosion filiforme a surtout pour effet de dégrader l'aspect des structures et peut aller jusqu'au décollement des revêtements (peintures, laques, vernis, etc.).

Pour éviter cette forme de corrosion, il est d'une importance capitale de suivre les consignes d'applications des fournisseurs de peintures, en particulier en ce qui concerne la préparation de surface et l'application d'un primaire approprié.

2.2.6. Sensibilité des alliages Aluminium – Magnésium aux chauffages prolongés

Sous l'effet d'un maintien prolongé à des températures élevées (entre 65 et 200 °C), les alliages d'aluminium – magnésium (famille 5000)



contenant plus de 3 % de magnésium subissent des modifications métallurgiques qui peuvent induire une corrosion inter cristalline si deux conditions sont réunies :

- Précipitation des intermétalliques Al_3Mg_2 le long des joints de grains sous forme de "colliers de perles". Le métal est alors dit "sensibilisé". Ces intermétalliques Al_3Mg_2 sont anodiques par rapport à la matrice.
- Présence d'un milieu agressif, par exemple une solution saline au contact de la surface brute du métal.

Ce phénomène a fait l'objet de nombreuses études dans le but de mesurer l'influence des paramètres suivants sur la sensibilisation des 5000 :

- La teneur en magnésium et la gamme de transformation sont des paramètres déterminants de la cinétique de sensibilisation des alliages de la famille 5000.
- Les gammes de fabrication telles que la mise en forme et l'assemblage par soudage peuvent réduire la résistance du produit fini à la sensibilisation.
- La température en soi n'est pas un indicateur suffisant. Ainsi pour un chargement de produits

chauds, il faut plutôt prendre en compte le produit scalaire : *Temps x Température*.

Par exemple, si 65 °C est souvent indiqué comme limite dans les catalogues ou les manuels, il faut 2 ans pour sensibiliser un 5086 à cette température alors qu'à 100 °C quelques mois suffisent. En général, c'est entre 130 et 150 °C que la sensibilisation est la plus rapide.

Même s'il y a sensibilisation sur une structure, il n'y aura de corrosion que si l'environnement devient agressif, c'est-à-dire quand la surface du métal entre en contact avec un liquide corrosif. L'expérience le confirme.

On trouve des citernes routières de transport de fioul lourd qui ont 20 ans et plus de service à raison de 8 à 10 heures de trajet par jour, ce qui représente une durée cumulée de service d'au moins 50 000 heures à 65 – 70 °C.

En règle générale, l'utilisation d'alliage à moins de 3 % de magnésium est fortement conseillée pour des expositions de longue durée à des températures de plus de 75 °C environ. Quand l'utilisation d'alliages de

la famille 5000 à plus haute teneur en magnésium est nécessaire, il est recommandé de consulter les producteurs pour que le projet puisse être évalué en détail en prenant en compte la durée d'exposition en température par rapport à la durée de service totale.

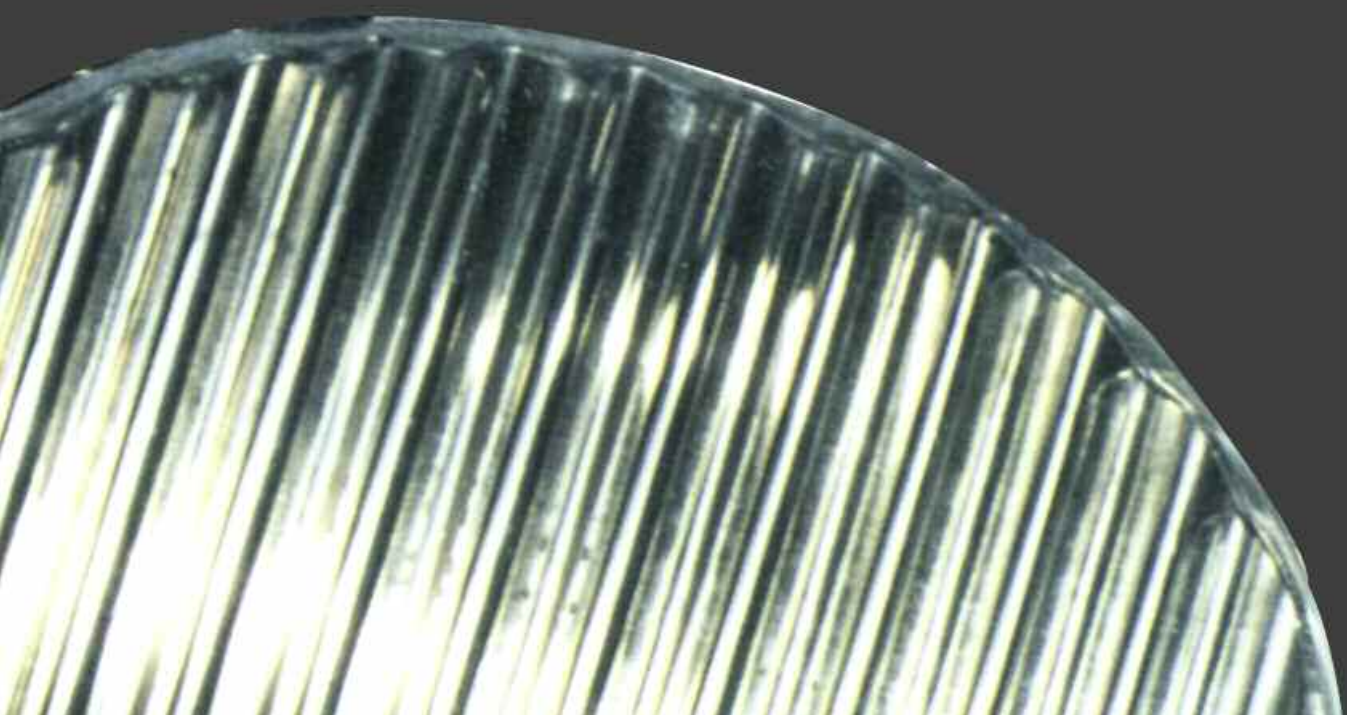
2.2.7. Les autres formes de corrosion

Il existe d'autres formes de corrosion mais les alliages et les états métallurgiques les plus courants dans la construction des véhicules industriels n'y sont pas sensibles.

2.3. Références

C.Vargel

- Corrosion de l'Aluminium, Dunod 1999
- Corrosion of aluminium, Elsevier 2004
- www.corrosion-aluminium.com



CHAPITRE XII

LE NETTOYAGE DES VÉHICULES INDUSTRIELS

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 1. INTRODUCTION | 154 |
| 2. LA NATURE DES SOUILLURES | 154 |
| 3. LE CHOIX DU DÉTERGENT | 155 |
| 4. L'APPLICATION DU DÉTERGENT | 155 |



Station de nettoyage de véhicules industriels (Interservice Arras)

1. Introduction

Le nettoyage régulier est une des conditions nécessaires pour assurer une longue durée de service aux véhicules industriels.

On conserve l'aspect esthétique des véhicules industriels en éliminant toute sorte de saleté. Les parties critiques comme les roues, les essieux, les freins et le système hydraulique sont plus faciles à contrôler visuellement.

On évite la corrosion et les dégâts provoqués par des frottements mécaniques entre des pièces en mouvement.

Dans le cas des citernes routières, il existe une réglementation stricte de propreté pour le transport des denrées alimentaires. Il y a également d'autres obligations strictes de nettoyage pour le transport de produits chimiques afin d'éviter toute réaction avec le chargement précédent.

Dans quelques cas, les véhicules industriels en aluminium ne peuvent être utilisés en raison des conditions de nettoyage imposant l'utilisation d'acides forts ou de certains produits alcalins.

En général, le nettoyage des véhicules industriels en aluminium n'est pas différent de celui de tout autre véhicule industriel. Il peut être réalisé sur des lignes automatiques de nettoyage aussi bien que manuellement en utilisant des jets à haute pression, des brosses et des chiffons.

2. La nature des saletés

Les saletés sur les véhicules industriels ont pour origine possible :

- La route : poussières, sels, boue, éclaboussures d'eau, poussières d'usure des pneus
- Le carburant : gaz d'échappement, suie
- Le chargement : asphalte, ciment, craie, résidus de produits agricoles
- L'environnement : pollution de l'air, poussières

Tous ces éléments, en présence d'humidité, peuvent provoquer des corrosions locales, l'altération des teintes et même la destruction de la couche de peinture.

Pour éviter que les résidus des chargements antérieurs ne contaminent les chargements suivants, un nettoyage efficace est indispensable.

3. Le choix des détergents

Les détergents utilisés pour le nettoyage des véhicules industriels en aluminium doivent être compatibles avec l'aluminium, donc non agressifs vis-à-vis de ce dernier.

En général, un détergent doit :

- Avoir un effet efficace sur toutes sortes de saleté
- Assurer une élimination efficace des saletés agressives
- Donner un aspect visuel brillant à la surface nettoyée
- Former un film protecteur à la surface de la peinture
- Être conforme aux spécifications réglementaires
- Être biodégradable
- Être sans danger pour l'utilisateur

Les détergents sont un mélange complexe de plus de 20 constituants chimiques qui ont simultanément plusieurs fonctions : décapage léger, nettoyage, préservation.

4. L'application des détergents

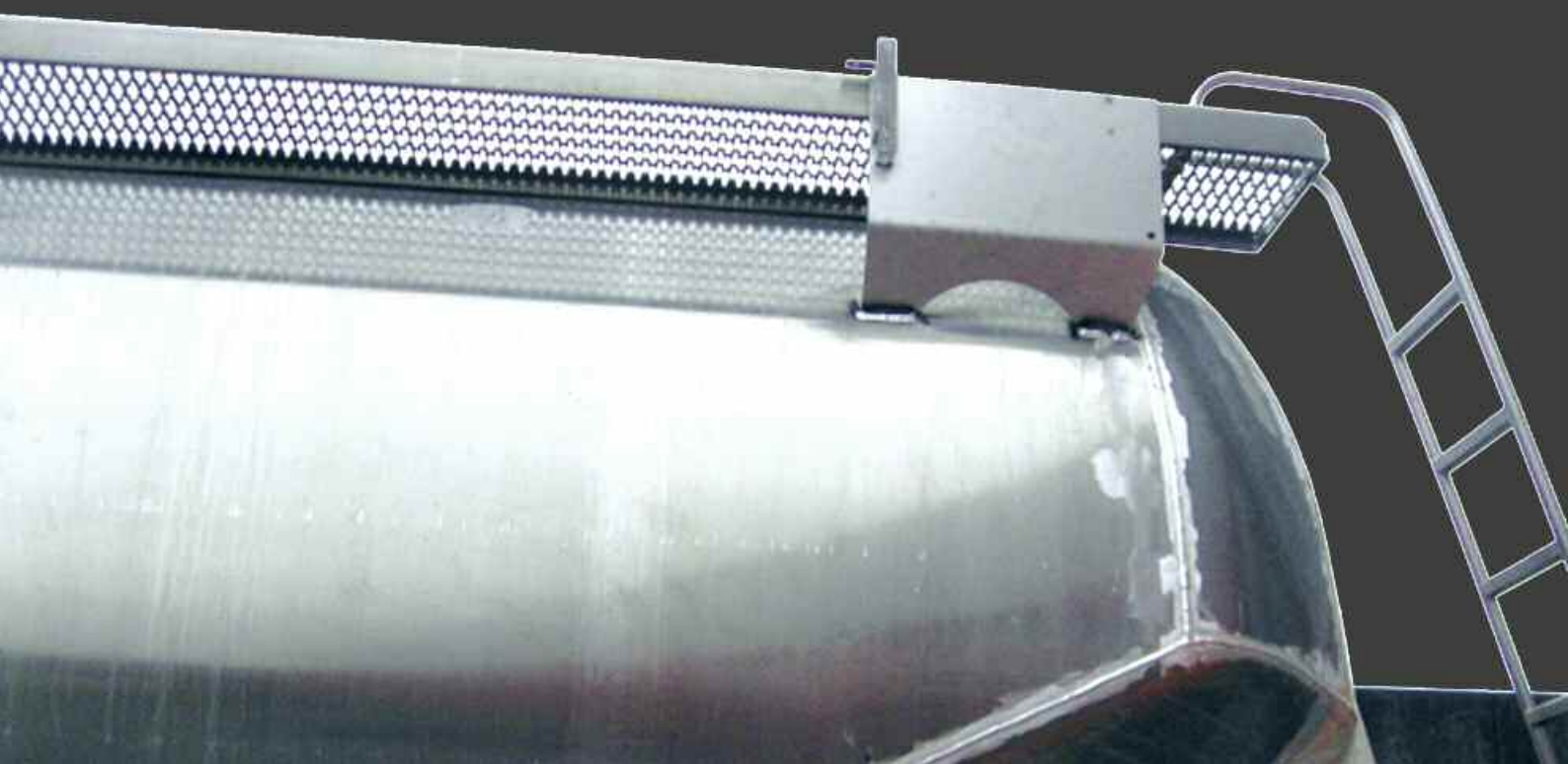
Le nettoyage des véhicules industriels doit avoir lieu sous éclairage direct. Chaque détergent doit être testé sur l'aluminium brut avant d'être utilisé.

Le détergent peut être utilisé soit sur des lignes de nettoyage automatique ou appliqué manuellement avec des jets d'eau sous pression : brosses, chiffons, etc.

Les principaux effets sont :

- Chimique : des constituants du détergent dissolvent la poussière ou les sels minéraux sans attaquer l'aluminium
 - Physique : les mouillants en abaissant la tension superficielle facilitent l'élimination des souillures
 - Mécanique : les souillures sont détachées par l'effet mécanique de la pression du jet d'eau additionnée des détergents ou par abrasion des brosses
 - Température : les températures élevées et surtout la vapeur d'eau en accélérant la vitesse des réactions chimiques entre le détergent et les souillures, accroissent l'effet du nettoyage.
- Pour éviter les traînées sur les surfaces nettoyées, il faut toujours commencer le nettoyage par le bas du véhicule et aller progressivement vers le haut.

Le temps de contact doit être suffisant pour éliminer les souillures. Il ne faut pas laisser sécher les détergents à la surface du véhicule et le lavage doit être suivi d'un rinçage intensif à l'eau déionisée.



LA RÉPARATION DES VÉHICULES INDUSTRIELS EN ALUMINIUM

| | |
|--|-----|
| 1. AVANT-PROPOS | 158 |
| 2. L'EXÉCUTION DE LA RÉPARATION | 159 |
| 3. LA RÉPARATION DES CHÂSSIS EN ALUMINIUM | 159 |
| 4. LA RÉPARATION DES SOUDURES TIG ET MIG | 160 |
| 4.1. Choix de l'alliage | 160 |
| 4.2. Préparations | 160 |
| 4.3. Soudage | 161 |



Vue intérieure de la réparation d'une citerne en aluminium (Felbinder)

1. Avant-propos

La réparation des véhicules industriels en aluminium doit être l'objet des mêmes soins que la fabrication de nouveau matériel.

En général, toutes les règles, les méthodes et les outils mis en œuvre sur la construction de matériel nouveau doivent être appliquées à la réparation.

La décision de réparer se fait au cas par cas, que ce soit pour de petits dommages qui peuvent être réparés sans démonter la structure ou que ce soit pour des éléments endommagés (tôles, profilés) devant être découpés et remplacés en totalité.

Dans tous les cas, les pièces endommagées ne doivent jamais être tout juste ressoudées en l'état. Cette façon de faire n'est pas une méthode de réparation acceptable. Toute pièce découpée et extraite parce qu'elle a été endommagée doit toujours être remplacée par le même type d'alliage que celui d'origine.

Cette règle doit être appliquée pour garantir que la réparation ne provoquera pas de contrainte sur la structure du véhicule industriel et ne l'affaiblira pas. On doit prendre en compte que la plupart des citernes routières

et des silos routiers sont considérés par la directive européenne 97/23/EU comme des réservoirs sous pression. Ceci implique des méthodes de contrôle complémentaire des réparations et le suivi obligatoire par une société de classification (TÜV, Bureau Veritas, etc.).

La réparation doit donc être effectuée par le fabricant de véhicules industriels ou un atelier agréé disposant de soudeurs qualifiés, travaillant suivant des méthodes conformes aux règles de l'art, ayant une organisation du travail adéquate, etc.



Vue extérieure de la réparation d'une citerne en aluminium (Felbinder)

2. Exécution de la réparation

Une réparation étudiée et soignée d'un véhicule industriel en aluminium doit être faite conformément aux procédures suivantes :

- Identification du dommage : Quelle est la quantité de métal affectée ?

Y a-t-il d'autres dommages éventuels qui n'auraient pas été vus lors d'une première inspection ?

- Enlèvement par découpe des éléments endommagés
- Identification des spécifications du matériau d'origine
- Commande de remplacement du matériau dont les spécifications ont été identifiées
- Commande du fil de soudure adapté (selon les normes ou les spécifications réglementaires)
- Pré découpage des éléments de remplacement en tenant compte du retrait au soudage
- Mise en forme préalable de l'élément, si cela est nécessaire

- Dégagement du revêtement dans la zone de réparation
- Fixation sur le véhicule de l'élément de remplacement ; si nécessaire, mise en forme complémentaire pour l'adapter au mieux aux contours de la découpe sur le véhicule. Cette opération a pour but d'éviter une trop forte contrainte pendant le soudage,
- Assemblage de la pièce de remplacement à la structure du véhicule par une technique de soudage appropriée
- Contrôle visuel de la qualité de la soudure
- Contrôles usuels et obligatoires (dont la pression d'épreuve) non destructifs (rayons X, ultrasons) du cordon de soudure
- Restauration du revêtement
- Contrôle final, celui-ci peut être imposé à tous les stades de la réparation, être effectué par un bureau de contrôle

3. La réparation des châssis en aluminium

Le cas des châssis en aluminium mérite une attention particulière parce qu'une réparation effectuée par un non professionnel peut conduire à la détérioration à la fois de sa résistance mécanique et de sa tenue en fatigue.

Pour éviter ce genre de problème, il est conseillé de lire la section 8 du chapitre VI relative à la tenue à la fatigue.

Abordant en premier l'aspect théorique de la fatigue, ce chapitre développe également les bonnes pratiques de perçage et de soudage pour assurer une longue durée de service des véhicules industriels en aluminium.



Réparation par soudage d'un silo (Feldbinder)

4. La réparation des soudures TIG et MIG

Un véhicule routier peut subir des dommages et il aura donc besoin d'être réparé. Réparer un véhicule industriel en aluminium n'est pas plus difficile que de réparer un véhicule industriel en acier.

Mais la réparation doit suivre une procédure stricte et être faite dans un atelier spécialement équipé et doté d'opérateurs qualifiés placés sous la direction d'une maîtrise responsable ou sous le contrôle d'un bureau de contrôle si le type de véhicule l'exige.

Aucune réparation ne peut être entreprise sans qu'on sache le type de fret qui est transporté

par le véhicule (liquide, pulvérulent, etc.) et avant d'avoir pris les précautions nécessaires et appropriées pour la sécurité : nettoyage, dégazage suivi à l'aide d'un explosimètre, élimination des poussières, etc.

4.1. Choix de l'alliage

Les demi produits de remplacement doivent être dans le même alliage (ou du moins compatibles) que ceux qu'ils remplacent et dont la nature de l'alliage est indiquée dans le manuel du fabricant.

4.2. Préparations

C'est une étape très importante qui va déterminer la qualité et la solidité de la réparation qui comprend :

- La découpe : on préférera la torche au plasma ou une disquetteuse en carbure. On évitera les disquetteuses en acier rapide ou les meuleuses abrasives qui peuvent laisser des inclusions dans le cordon de soudure
- Le meulage : on fera un meulage très soigné des bords à souder de manière à enlever les traces de peintures et d'autres résidus
- Le dégraissage soigné avec un dégraissant adapté

4.3. Soudage

Les règles de la réparation sont basiques et décrites au chapitre VII pour la mise en forme et ci-après pour le soudage.

Quand on répare, il est essentiel de :

- Maintenir toutes les parties du véhicule, c'est-à-dire la citerne, le châssis, etc. dans leur position relative les unes par rapport aux autres. Les brides de serrage doivent être ajustées de telle sorte qu'elles facilitent l'expansion due à la dilatation en sachant toutefois qu'un serrage trop fort aura l'effet inverse de contraction. Il est également habituel de repérer les surfaces susceptibles de subir le maximum de contraintes en se référant aux notes de calcul du fabricant, si elles sont disponibles.
- Brider les pièces à assembler pour contrôler le jeu entre elles.
- Porter une attention particulière à la direction du soudage. Le but est de limiter les déformations et de réduire le risque de fissuration à chaud. Le volume de contraction dans le lit de fusion est de l'ordre de 6 % entre l'état liquide et l'état solide à la température ambiante. C'est ce phénomène qui est à l'origine du risque de fissures.

- Changer le sens de la soudure afin d'éviter de revenir sur un cordon de soudure déjà en place (figure XIII.1).

- Faire si nécessaire des tests, par exemple une radiographie, du ressuage, etc.

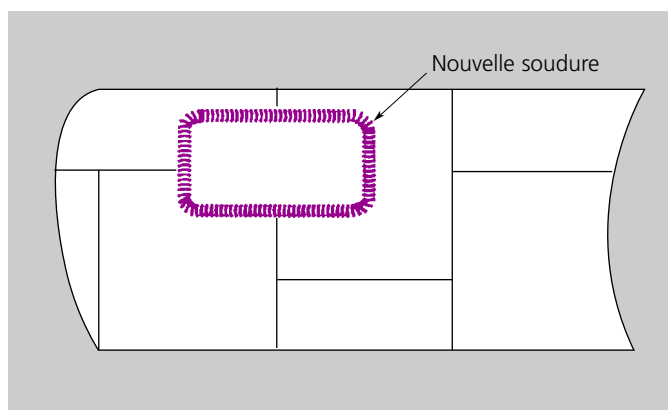
- Choisir la bonne technique de soudage adaptée au cas traité : TIG ou MIG. Le soudage TIG est préférable pour des réparations mineures où l'accès envers est impossible. Ce procédé est plus facile à mettre en œuvre et permet une meilleure pénétration que le MIG.

Des machines TIG compactes pesant moins de 20 kg sont disponibles sur le marché. Elles délivrent un courant d'environ 160 A. Ces machines sont faciles à

transporter et sont idéales pour de petites réparations localisées. Pour des réparations mineures telles qu'une éventration de l'enveloppe d'une citerne, la pièce de remplacement doit être parfaitement ajustée aux formes de la brèche dans l'enveloppe à obturer mais doit être légèrement élargie par martelage pour compenser la contraction due au soudage.

Sans prendre cette précaution, les contraintes résiduelles provoquent systématiquement une fissuration aux bords de la pièce rapportée. Ce phénomène est d'autant plus accentué que la pièce rapportée est petite.

FIGURE XIII.1
RÉPARATION AVEC SOUDURE



Remerciements

Les auteurs principaux : Jürg Zehnder, Reinhard Pritzlaff, Steinar Lundberg, Bernard Gilmont

L'équipe du projet : Asmund Broli, Roald Pedersen, Benoît Lancrenon, Michele Triboldi, Dietrich Wieser, Ralf Balduck, Klaus Vieregge

Les compagnies sponsors : Alcan Engineered Products, Alcoa Europe, Aleris Europe, AMAG, Elval, Hydro Aluminium, Metra, Novelis, Sapa

L'équipe du projet est particulièrement reconnaissante à Alcan Engineered Products qui a autorisé la reprise de certains textes, tableaux et illustrations provenant des publications suivantes

- L'aluminium dans les véhicules industriels de Pechiney Rhenalu
- L'aluminium et la mer de Alcan Aerospace, Transportation et Industrie

CRÉDITS PHOTOS

| Page | Compagnie ou marque | Photo ou source | Page | Compagnie ou marque | Photo ou source |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | Benalu | Benalu | 48 | Menci | Bernard Gilmont |
| 4 | Menci | EAA library | 48 | Alcoa Europe | Alcoa Europe |
| 6, 8 | Airbus | Airbus | 54 | Brabant Alucast | Bernard Gilmont |
| 9 | Hydro Aluminium | Hydro Aluminium | 75 | Alcoa Europe | Alcoa Europe |
| 9 | Babcock | Babcock | 76, 81 | Benalu | Benalu |
| 10 | Alstom, SNCF | Alstom, SNCF | 82 | Aluminium-Verlag | Aluminium-Verlag |
| 11 | Mercedes | | 86 | Schrader | Schrader |
| 11 | Hydro Aluminium | Hydro Aluminium | 87 | Stas | Stas |
| 12 | Aluminium-Verlag | Aluminium-Verlag | 88 | Schmitz | Schmitz |
| 12 | Alusuisse | Alcan Engineered Products | 89 | Menci | Menci |
| 12 | Trailor | Trailor | 90, 105 | König | Ursula Berndsen |
| 16 | Benalu | Benalu | 95 | SAG Alutech | SAG Alutech |
| 17 | Tang Fahrzeugbau GmbH | Tang Fahrzeugbau GmbH | 97, 98, 99 | Benalu | Bernard Gilmont |
| 19 | All American Marine | All American Marine | 100 | Sapa | Sapa |
| 20, 36 | Stas | Stas, IRTE | 108 | Stas | Stas |
| 21 | Alcan, Alcoa, Brabant Alucast | Alcan, Alcoa, Bernard Gilmont | 110 | SAG Alutech | SAG Alutech |
| 23 | Alcan Engineered Products | Alcan Engineered Products | 112 | Menci | Bernard Gilmont |
| 24 | Galloo Recycling | Bernard Gilmont | 114 | Sachsenring | Ursula Berndsen |
| 25 | ATM, PVC Transports | Patrick Van Crombrughe | 119 | Alcan Engineered Products | Alcan Engineered Products |
| 26 | Menci | Bernard Gilmont | 120 | Sapa | Sapa |
| 26 | Alcoa Wheel Products Europe | Alcoa Wheel Products Europe | 121 | Hydro Aluminium | Hydro Aluminium |
| 27 | Benalu | Benalu | 122 | Schmitz | Schmitz |
| 28 | Pezzaoli | Pezzaoli | 128, 132 | Alcan Engineered Products | Bernard Gilmont |
| 30 | Alcoa Europe | Alcoa Europe | 135 | Alcan Engineered Products | Alcan Rhenalu Isoire |
| 31 | Stas | Stas | 138 | Trailor | Trailor |
| 32 | Benalu | Benalu | 140 | LAG | LAG |
| 33 | Leciřena | Leciřena | 140 | Benalu | Benalu |
| 34 | Menci | Menci | 142 | LAG | LAG |
| 37 | Schrader | Schrader | 152, 155 | Interservice, Arras | Christian Vargel |
| 40, 43 | Alcan Engineered Products | Alcan Engineered Products | 156, 158, 159, 162 | Feldbinder | Feldbinder |
| 44, 45, 47 | Various aluminium plants | EAA library | | | |

Document produit par

European Aluminium Association AISBL

Avenue de Broqueville, 12

BE - 1150 Bruxelles - Belgique

Téléphone: +32 2 775 63 40

Fax: +32 2 775 63 43

www.aluminium.org

Sous la direction de Bernard Gilmont

Traduction française Christian Vargel

Infographie Marc Hernu

Coordination Pierre Jouhaud, PLJ édition-communication, Paris

Révision 0 - Août 2011