

Assemblage composites multi-matériaux par impulsion magnétique

1. Introduction
2. Historique
3. Principe
4. Techniques
 - 4.1 Sertissage
 - 4.1.1 Assemblage tri-composants
 - 4.1.2 Contrôle de la qualité de sertissage
 - 4.1.3 Avantage de sertissage
 - 4.2 Soudage
 - 4.2.1 Soudage forme tubulaire
 - 4.2.2 Soudage à plat
 - 4.2.3 Contrôle de la qualité de la soudure
 - 4.2.3.1 Etanchéité
 - 4.2.3.2 Résistance mécanique
 - 4.3 Avantage de la soudure
5. Exemples et Domaines d'utilisations
6. Conclusion
7. Questionnaire à choix multiple

1. Introduction

La **Technologie par Impulsion Magnétique (TIM)** est un procédé innovant pour mettre en mouvement des pièces à haute vitesse qui permet de faire de la déformation et de l'assemblage. Ce procédé actuellement en plein développement est basé sur l'utilisation de forces électromagnétiques. Il est destiné à assembler, souder, former et découper des pièces métalliques. Il s'agit d'un procédé automatique qui peut être utilisé, par exemple, pour l'assemblage de produits plats ou tubulaires dans une configuration à recouvrement.

Cette nouvelle technologie présente les avantages très attractifs suivants :

- assemblage rapide et économique de matériaux à soudabilité difficile, comme le soudage hétérogène entre métaux et alliages très différents ;
- développement de pièces complexes ou produits nouveaux qui ne sont pas réalisables avec les technologies actuelles.

L'évaluation du potentiel et de l'applicabilité de cette nouvelle technologie à l'industrie, des fabrications métalliques et de « non ferreux », n'est pas évidente. A côté de sa notoriété limitée (très jeune technologie), il n'y a pas de connaissance accessible sur la faisabilité technique des produits concernés, ni sur l'augmentation de la productivité que l'utilisation de ce procédé innovant peut viser.

2. Historique

L'histoire de la Technologie par Impulsion Magnétique commença aux XIXe siècles par un physicien et mathématicien écossais, **James Clerk Maxwell**.

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

μ_0 = perméabilité de l'espace libre (H/m)

j = densité de courant (A/m²)

ϵ_0 = permittivité de l'espace libre (F/m)

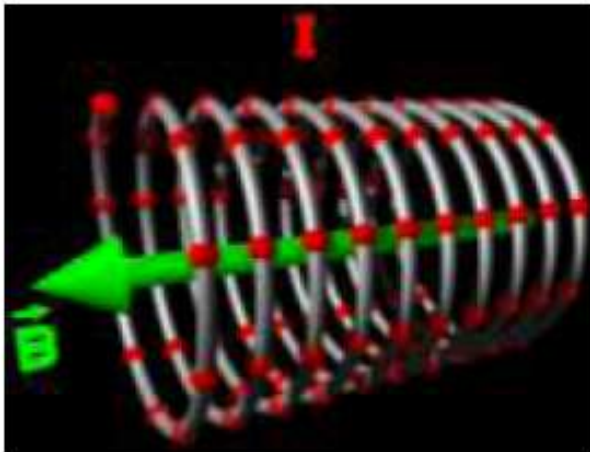
E = champ électrique (V/m)

B = induction magnétique (T)



1873, Maxwell unifie le champ magnétique et le champ électrique, au sein de la théorie de l'électromagnétique. Cette équation exprime la manière dont un courant électrique est à l'origine d'un champ magnétique. On remarque qu'un champ électrique dépendant du temps crée lui aussi un champ magnétique.

En 1907, Edwin Northrup met en évidence des forces dans un conducteur électrique. En effet, lorsqu'on fait passer un courant de plusieurs centaines d'ampères dans un conducteur liquide (mercure, sodium fondu, etc.), contenu dans une gouttière isolante, on voit le liquide s'amincir en son milieu et parfois même se couper en deux. Ce phénomène et plusieurs autres analogues s'expliquent par les forces existant à l'intérieur d'un conducteur traversé par un courant : le conducteur peut être décomposé en filets dont chacun est parcouru par un courant élémentaire, produisant autour de lui



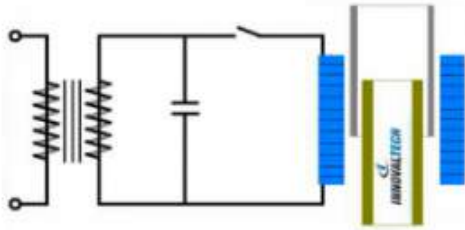
un champ magnétique.

1923 à 1934, dans le laboratoire Cavendish à l'université de Cambridge en Angleterre, **Piotr Kapitsa** est un ingénieur militaire russe, est à l'origine de la technique de déformation. En effet, il génère un champ magnétique assez élevé pour déformer une pièce de métal.

1958, Harvey et Brower posent un brevet sur la compression, l'expansion et la déformation à plat des métaux. Ils exploitent ce principe et posent un brevet en 1961. (US2976907 A)

Lors de la première guerre mondiale, on a observé que des éclats d'obus collaient aux plaques de blindage. Ils ne font pas que les enrober mais sont complètement soudés au métal. Comme il n'y a pas eu de température extrême comme pour les autres procédés de soudage, il a été conclu que c'est l'énergie à l'impact qui a causé cela. Ce principe de soudure par impact a d'abord été mis en oeuvre dans la technologie de soudure par explosion.

3. Le principe



Une énergie électrique est stockée dans des condensateurs et déchargée dans une bobine via les éclateurs.

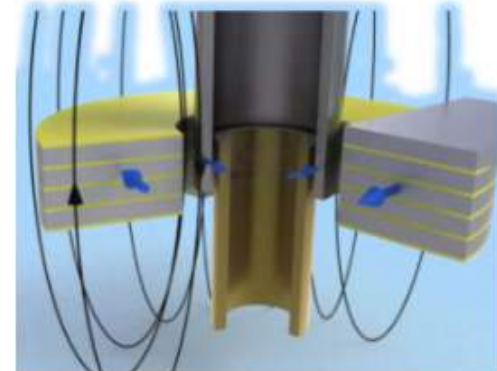
Dans le cas de l'assemblage d'un **tube métallique** par compression, ce tube est positionné à l'intérieur d'une bobine. Le passage d'une impulsion de courant de plusieurs

centaine de kilo ampères dans un temps très court (quelques dizaines de micro secondes) délivré dans une bobine induit un courant qui circule dans le sens opposé à l'intérieur de la pièce à mettre en mouvement. Ces deux courants circulant dans des sens inverses génèrent des champs magnétiques opposés. La force de Lorentz accélère la pièce.

Pour que le courant induit dans la pièce à mettre en mouvement soit important, il faut que cette pièce soit une bonne conductrice du courant. Si on souhaite mettre en mouvement une pièce qui n'est pas bon conducteur électrique, il est possible d'utiliser une pièce intermédiaire bonne conductrice appelée « pousseur ».

Exemples de matériaux très bons conducteurs : cuivre et aluminium.

Exemples de matériaux métalliques mauvais conducteurs : aciers inoxydables et titane.



4. Techniques

4.1. Sertissage

Le sertissage est un assemblage entre deux ou plusieurs matériaux (qui forme un composite) qui sont sertis en compression ou en expansion. C'est aussi un moyen d'assemblage pour l'étanchéité entre deux pièces.



Facile et efficace pour l'utilisation, le sertissage peut s'adapter à tout type d'interface. Des essais ont été réalisés, comme nous le montre l'image en dessous, et adaptés à des sollicitations en compression, traction et de torsion.

Le cas n° 1 est une interface lisse, la tenue de son sertissage est moyenne.

Le cas n° 2, avec une interface hexagonale a une excellente tenue en torsion. L'interface hexagonale peut être remplacée par des cannelures.

Le cas n° 3, avec une interface avec gorges, a une excellente tenue en traction et en compression.

Pour le dernier cas n°4, a une interface filetée qui lui procure une bonne tenue en traction, compression et torsion. Ce dernier cas peut être remplacé par des gorges et des cannelures.

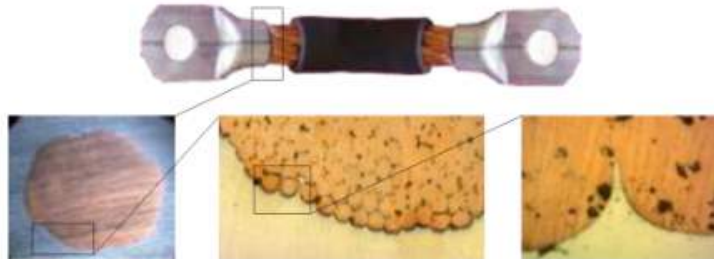


Autre exemple de sertissage d'un tube en aluminium sur une pièce en acier. La géométrie de la pièce en acier avec gorge et cannelures donne une bonne tenue mécanique de l'assemblage à la fois en traction/compression et en torsion.



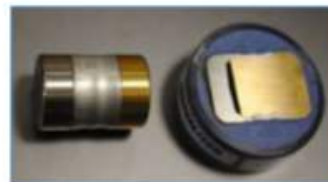
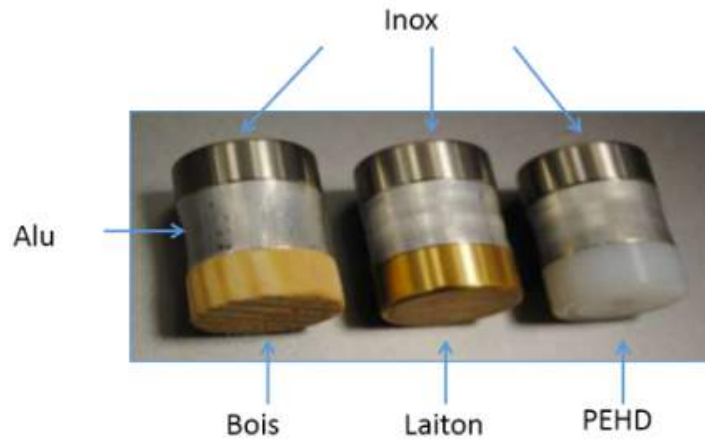
Sur l'image, nous pouvons réellement constater que pour un sertissage aluminium/cuivre, on a une bonne tenue de traction et de torsion de cet assemblage.

La déformation de la cosse en aluminium vient combler tous les espaces autour des brins de cuivre. Cela procure une plus grande surface de contact, ce qui augmente les propriétés électriques et mécaniques.



4.1.1 Assemblage tri-composants

Comme nous pouvons le voir sur les images ci-dessus, cette technique peut également assembler un tri-composant. La bague en aluminium est sertie sur la pièce en inox et la pièce intérieure en bois, en laiton ou en PEHD. Les matériaux gardent leurs propriétés mécaniques.



4.1.2 Contrôle de la qualité de sertissage



Tubes formés à l'état final (aluminium dure) en une seule opération.



Tenue en traction : rupture dans le tube à 4000 daN (4 tonnes) ; la zone de l'assemblage reste intacte. Cet assemblage remplace une autre technique qui cassait à seulement 2 tonnes.



Cet assemblage par sertissage par impulsion magnétique a permis à la fois une réduction du nombre d'opérations et des coûts, et une amélioration significative de la tenue en traction !



Assemblage d'une pièce en aluminium sur un matériau en composite (fibre de verre pour cet exemple).

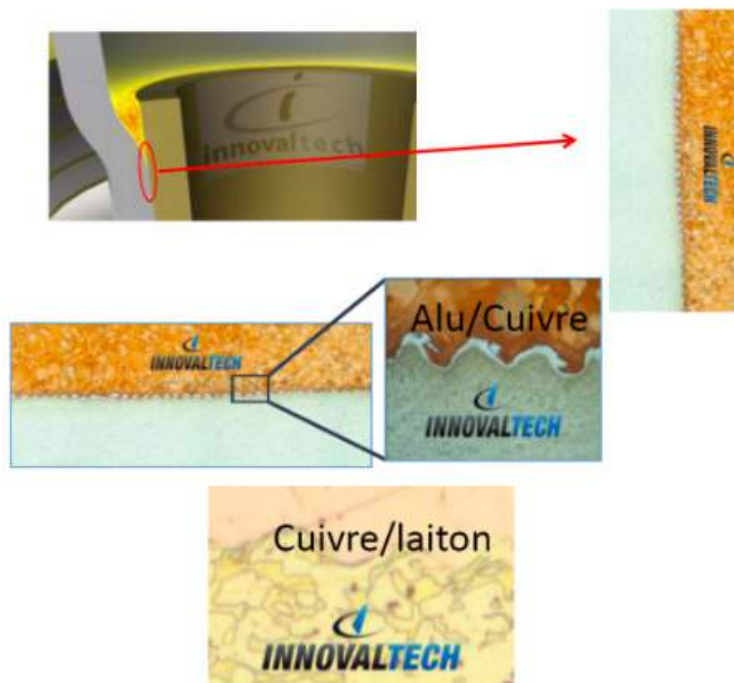
4.1.3 Avantages du sertissage TIM

Cette technologie permet de former et sertir des pièces en une seule opération. La géométrie des pièces peut être adaptée pour répondre à certains critères comme, de la tenue en traction, compression et/ou torsion. La technologie peut travailler sur des pièces cylindriques, rectangulaires ou complexes. Le sertissage demande peu de préparation au niveau du dégraissage et de l'état de surface. Sa consommation d'énergie est très faible (de l'ordre 0,0007€ par assemblage). Il est possible d'avoir une cadence de production élevée.

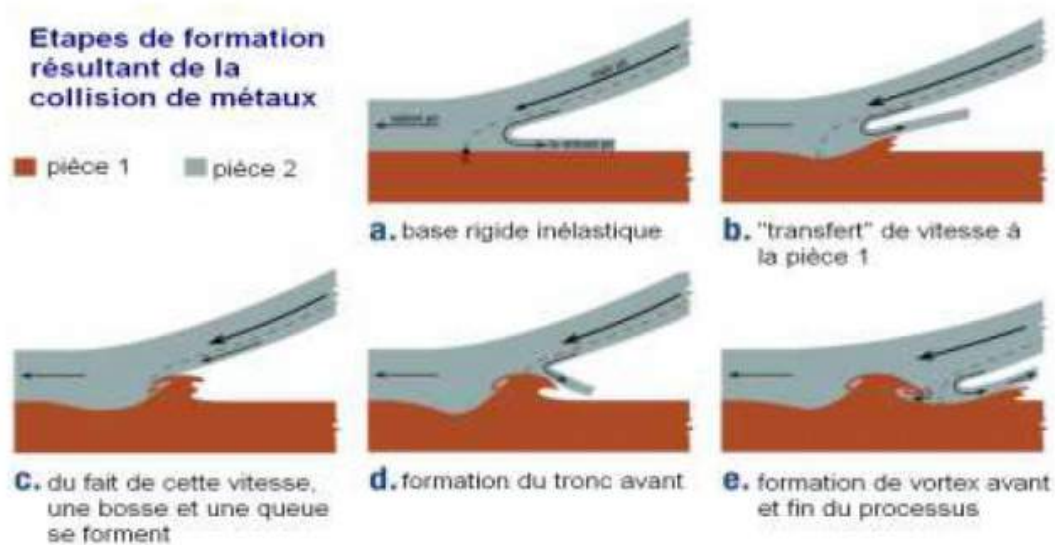
4.2. Soudage

Certains couples de matériaux ont la réputation de ne pas pouvoir se souder entre eux. Le soudage par impulsion magnétique peut le faire. Une grande quantité d'énergie est libérée pendant une impulsion très brève. Cela peut aller jusqu'à 110 kJ en 10 μ s. A l'impact des pièces, il se produit une fusion localisée à l'interface sur quelques dizaines de microns. Cette soudure est quasi froide, c'est-à-dire qu'après l'assemblage, nous pouvons prendre la pièce à main nue. C'est parce qu'il n'y a pas d'échauffement de pièce dans la masse qu'on a la possibilité de souder des couples de matériaux qui sont réputés impossibles. Lors de la soudure, la vitesse de l'impact va jusqu'à 1000 km/h. Pour obtenir une soudure, il faut au départ une distance d'environ 1 ou 2 millimètre entre les deux pièces pour permettre à la pièce mobile d'accélérer avant d'entrer en collision.

Lorsque l'on regarde la soudure au microscope, on observe des vagues à l'interface des deux pièces. Cette géométrie participe à la bonne tenue mécanique de la soudure.



Les schémas ci-dessous illustrent les étapes de formation de la soudure résultant de la collision de métaux :



L'air qui est éjecté à haute vitesse élimine les impuretés et les oxydes. Les surfaces sont alors propres à l'impact.

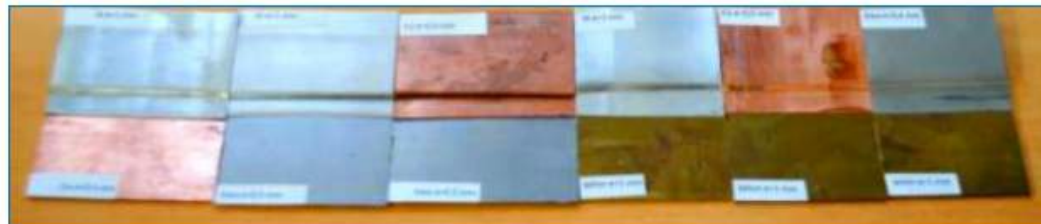
4.2.1 Soudage de forme tubulaire

La Technologie par Impulsion Magnétique s'applique très bien à la soudure de pièces de formes tubulaires par recouvrement. Sur l'image ci-dessous, le tube en alliage d'aluminium a été soudé par impulsion magnétique sur le tube en cuivre.



4.2.2 Soudage à plat

Nous pouvons également réaliser des soudages à plat. Deux plaques de matières différentes sont superposés localement l'une au-dessus de l'autre et on envoie une impulsion magnétique dans la zone de recouvrement. Une des plaques est accélérée pour impacter l'autre afin d'obtenir la soudure. La photo ci-dessous illustre des tôles de différents matériaux soudés par impulsion magnétique.



Al/Cu ; Al/inox ; Cu/inox ; Al/laiton ; Cu/laiton ; inox/laiton

4.2.3 Contrôle de la qualité de la soudure

4.2.3.1 Etanchéité

Après des essais d'étanchéités de la **soudure entre le cuivre et l'inox**, on obtient :

Tests de validation à l'hélium

Requis : $< 10^{-7}$ mbar.l.s⁻¹

Obtenu : 100 % $< 10^{-8}$ mbar.l.s⁻¹

On peut observer que l'étanchéité obtenue est au moins 10 fois supérieure à ce qui est demandé.



4.2.3.2 Résistance mécanique



Test de validation : couple

Requis : 3 000 N.m

Obtenu : 4 500 N.m

On observe que la résistance mécanique obtenue est supérieure de 50% à ce qui est demandé. On constate que c'est le tube qui est le point faible de l'assemblage et pas la liaison réalisée par impulsion magnétique.

4.2.4 Avantages de la soudure par TIM

Cette technique permet de souder des matériaux avec de très grandes différences de point de fusion (Alu/Inox, Alu/Cuivre,...). Il n'y a pas de Zone Affectée Thermiquement, elle conserve l'intégrité de la matière et donc les propriétés mécaniques restent intactes. Le procédé préserve l'environnement car il est sans métal d'apport, sans décapage et sans dégagements gazeux, ni gaz de protection. Les temps de soudure sont courts donc on peut avoir une cadence de production élevée.

Sa consommation d'énergie est très faible (de l'ordre 0,0007€ par soudure). Les paramètres sont contrôlables et ajustables (contrôle de l'alimentation électrique) ce qui est excellent pour la répétabilité. On crée une liaison métallique 'pure' (atomic bonding), la rupture sur l'assemblage est toujours en dehors de la soudure.

5. Exemples et Domaines d'utilisations

Le sertissage et le soudage peuvent s'utiliser comme technique d'assemblage dans tous les domaines (armement, automobile, joaillerie, etc...).

Comme ici, dans le domaine médical, en réglant la puissance du générateur, on peut sertir un bouchon en aluminium sur une bouteille en verre. C'est un nouveau procédé propre et sans contact qui préserve une bonne stérilisation.

L'aéronautique ou spatiale et l'énergie : Pièce de transmission de couple (Boeing 777, Boeing 747, Boeing 737)



6. Conclusion

Le principe de fonctionnement est semblable à celui du soudage par explosion mais l'accélération est générée par des forces électromagnétiques transmises par une bobine ou outillage.

Ces procédés sont innovants et de plus en plus plébiscités par les industriels. En effet, ces techniques peuvent assembler des multi-matériaux tout en gardant une excellente caractéristique mécanique et/ou électrique et répétition.

De plus lors des essais effectués, le retour élastique est inférieur à celui constaté avec d'autres procédés de mise en forme.

La TIM est aussi une technologie verte car il n'y a pas de lubrification, pas de gaz, pas de nettoyage à effectuer après chaque opération, etc... Il y a juste de l'électricité. Bien sûr, les industriels doivent prendre des précautions car la technologie utilise du courant à haute intensité.