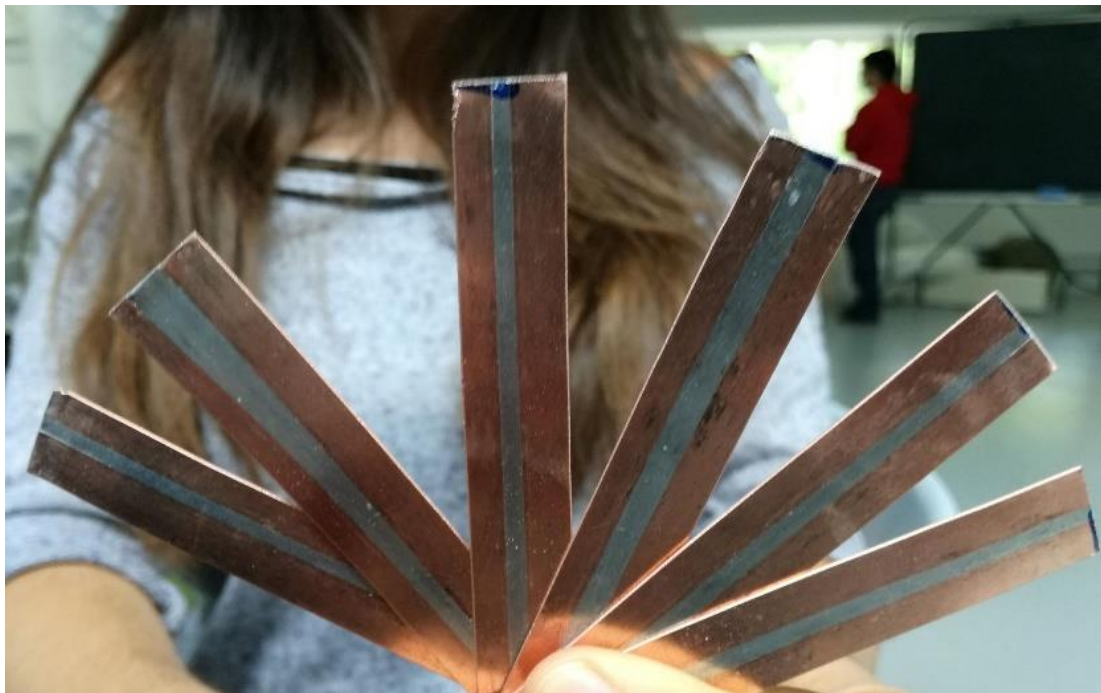


**ELABORATION D'UN MATERIAU
COMPOSITE CUIVRE/ALUMINIUM
par laminage et caractérisation de ses propriétés
mécaniques et électriques**



Etudiants :

Lucas BOT

Eléonore DUPIN

Léa MOREL

Dylan DUBOIS

Clément ELZIERE

Jeanne POILVET

Enseignant-responsable du projet :

Clément KELLER

Date de remise du rapport : 18/06/2018

Référence du projet : STPI/P6/2018 – 16

Intitulé du projet : *Elaboration d'un matériau composite cuivre/aluminium par laminage et caractérisation de ses propriétés mécaniques et électriques*

Type de projet : *expérimental*

Objectifs du projet :

Dans le cadre de la conception d'un nouveau type de câble électrique, notre projet a pour objectif l'élaboration d'éprouvettes permettant d'effectuer des tests de propriétés mécaniques, notamment en traction. L'enjeu principal a donc été de concevoir un matériau composite cuivre/aluminium reprenant au mieux la structure et les propriétés mécaniques des câbles concernés.

Sur ces câbles ont été trouvées des oscillations anormales sur les courbes de traction. Si notre matériau de surface plane présente ces mêmes oscillations, il sera alors possible de déterminer leur origine grâce à des capteurs d'émission acoustique.

Mots-clefs du projet : laminage, cuivre, aluminium, matériau composite

TABLE DES MATIERES

1. Méthodologie / Organisation du travail.....	5
2. Travail réalisé et résultats	8
2.1. Présentation des matériaux.....	8
2.1.1. Cuivre	8
3.1.1.1 Point historique.....	8
3.1.1.2 Carte d'identité.....	8
3.1.1.3 Domaines d'utilisation	8
3.1.1.4 Ses particularités	8
2.1.2. Aluminium	9
3.1.2.1 Point historique.....	9
3.1.2.2 Carte d'identité.....	9
3.1.2.3 Domaines d'utilisation.....	9
3.1.2.4 Ses particularités	10
2.1.3. Tests de dureté	10
2.2. Elaboration des éprouvettes.....	11
2.2.1. 1 ^{ère} phase de conception	11
2.2.1.1. Une source : Materials and design.....	11
2.2.1.2. Nos essais	12
2.3. 2 ^{ème} phase de conception : 3 ^{ème} test.....	14
2.3.1. Pliage sur la longueur	14
2.3.2. Le tube.....	15
2.3.3. Comparaison des 2 échantillons concluants	15
2.4. Essai de traction.....	16
2.4.1. Expérience Post-Projet (tube étiré).....	16
2.4.2. Essais de traction des deux échantillons tests élaboré lors de ce projet.....	17
3. Conclusion et perspectives	19
4. Bibliographie	20
5. Annexes.....	21
Schémas de montages, plans de conception.....	21

Introduction

La découverte de l'électricité s'est opérée par hasard vers 600 avant J.C par Thalès de Milet. En effet il a observé un phénomène d'attraction des corps lorsqu'il y a frotté une tige d'ambre avec une peau de chat. Cette découverte ne verra cependant pas d'application avant le 17ème siècle. C'est à cette période que naissent les concepts d'électricité vitrée et résineuse aujourd'hui connues sous le nom d'électricités positives et négatives. C'est en 1800 que Volt invente la première pile électrique par superposition de disques de zinc et de cuivre, chacun étant séparé par un tissu imbibé d'eau salée.

Au 19ème siècle les découvertes sur le courant électrique et le champ magnétique et leur lien se succèdent et mènent à de nombreuses inventions telles que le générateur à courant alternatif, la dynamo ou encore la lampe à incandescence.

Au 20ème siècle le rendement des machines, des lignes et des dispositifs ne cesse d'être amélioré. C'est ainsi que l'électricité prend de plus en plus d'importance dans les sociétés modernes et devient indispensable aux pays industrialisés.

Aujourd'hui la consommation d'électricité se retrouve dans les applications domestiques et quotidiennes telles que le chauffage, mais également pour les transports comme le métro. L'électricité est acheminée dans les logements via de grands réseaux électriques. Cependant, de nombreux incidents endommagent les installations électriques et parfois des structures (résidentielles et industrielles) voire des vies humaines. Les éléments majeurs au bon fonctionnement des réseaux électriques sont les câbles. En effet, il existe différents types de câbles, chacun adapté à une tâche spécifique et le choix du câble est primordial.

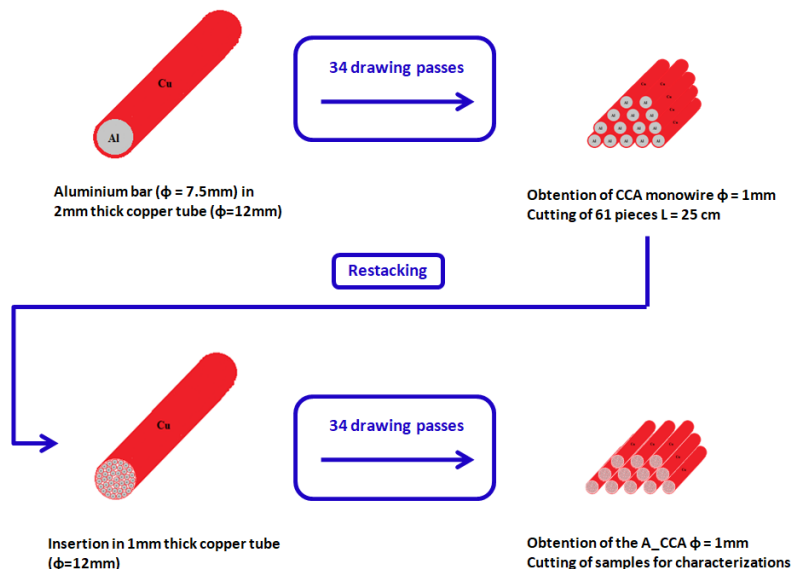
Pour les lignes de hautes tensions, il existe des câbles bimatériaux appelés Copperclad (littéralement "cuivre vêtu"). Ce sont des câbles composés d'un tube de cuivre enrobant de l'aluminium. Ils combinent la légèreté, la flexibilité et la conductivité de l'aluminium avec la résistance à la corrosion ainsi que la meilleure conductivité du cuivre.

Dans ce projet, nous visons à trouver une version améliorée d'un matériau de ce type.

1. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Méthodologie et origine du projet

Notre projet est un complément aux recherches de notre enseignant-responsable M. Keller. Il a effectivement créé un matériau composite cylindrique constitué d'un tube de cuivre contenant de l'aluminium. Pour réaliser un tel matériau, ils ont étiré le tube en le faisant passer dans une filière avec un diamètre plus petit. On réduit ainsi la section du tube et il est allongé tout en conservant sa forme cylindrique. Ensuite ils ont repris leur tube de cuivre qui contenait l'aluminium et l'ont remis dans un nouveau tube de cuivre pour retirer l'ensemble. C'est comme cela qu'ont été réalisés des fils d'1mm d'épaisseur.



Processus de fabrication du matériau composite d'origine

Le problème de ces fils est qu'en réalisant les essais de traction, l'équipe de chercheurs a constaté des oscillations anormales sur la courbe de traction, plus précisément au début de la zone de comportement plastique. Les essais de traction sont des expériences qui permettent de déterminer le comportement élastique d'un matériau ainsi que son degré de résistance à la rupture. Le domaine élastique est le domaine de déformation d'un matériau dans lequel les déformations engendrées par les actions mécaniques s'annulent si on supprime les actions mécaniques, c'est-à-dire la capacité du matériau à se déformer sous des contraintes tout en revenant à sa structure initiale après sollicitations. Ils souhaitent donc trouver l'origine de ces oscillations anormales. Pour cela, ils optent pour l'utilisation de capteurs d'émission acoustique pour écouter ce qu'il se passe dans le matériau. En effet, tous les phénomènes de déformation, de rupture et autres phénomènes mécaniques, émettent toujours un signal acoustique avec des fréquences déterminées/propres pour chaque phénomène. Chaque phénomène plastique a donc sa signature acoustique. Cependant les capteurs sont plats, donc lorsqu'ils sont utilisés sur une surface cylindrique, les résultats obtenus sont probablement erronés.

C'est ainsi qu'est né notre projet. Puisqu'une surface cylindrique ne convient pas pour s'assurer de la résistance suffisante du matériau élaboré, il a été convenu de tenter de réaliser un matériau semblable dont la surface serait plane afin d'y mettre les capteurs.

Pour cela, il faut que le matériau plat ait des caractéristiques et des propriétés mécaniques similaires mais pas nécessairement identiques au matériau initial, puisque les oscillations non prévues sur la courbe de traction proviennent d'un phénomène d'interface entre le cuivre et l'aluminium. Pour obtenir une surface plane, nous allons nous servir d'un laminoir. Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique et une méthode d'étirage dont le principe est de compresser un matériau entre deux cylindres afin de l'aplatir et de l'allonger. Puisque le matériau laminé possède également des interfaces cuivre/aluminium, on peut s'attendre à obtenir des oscillations similaires sur les courbes de tractions et ainsi on peut espérer pouvoir écouter le phénomène afin de trouver l'origine de ces oscillations.

Ce matériau serait utilisé en tant que câble électrique ou bien en tant que fil dans des systèmes tels que les carrosseries de voitures (câbles servant à allumer un clignotant, les phares, etc...). Il y a plusieurs raisons à la création d'un matériau composite de ce type.

Tout d'abord, le cuivre est le meilleur conducteur électrique, c'est-à-dire qu'il y a moins de pertes par effet Joule. Donc, pour des câbles électriques il est pratique d'utiliser ce matériau. Néanmoins, il s'agit d'un métal lourd et coûteux, ce qui peut, dans certaines circonstances poser problème. Selon l'utilisation souhaitée il va falloir trouver des alternatives. C'est pourquoi de l'aluminium est ajouté à l'intérieur du cuivre. En effet l'aluminium est beaucoup moins cher et plus léger. De plus dans un câble électrique il est rare de faire passer des courants continus, mais plutôt des courants alternatifs avec des fréquences élevées. Ici intervient "l'effet de peau". Il s'agit d'un phénomène électromagnétique qui traduit le comportement du courant à circuler qu'en surface du conducteur sous influence de hautes fréquences. Grâce à ce phénomène, il y a très peu de pertes du point de vue de la conductivité, car l'extérieur du fil est composé de cuivre. L'aluminium ne participe pas à la conductivité ici mais il est exploité pour d'autres raisons.

En effet, il est avantageux d'un point de vue mécanique de par sa légèreté et également d'un point de vue économique de par son coût réduit. Cependant, lorsqu'il s'agit de courants à basses fréquences, le courant passe également dans l'aluminium et on risque d'avoir une perte de conductivité. De là, né l'idée de créer un réseau de cuivre à l'intérieur de telle manière à ce que si les fréquences diminuent et que le courant en vient à passer à l'intérieur, il y aura toujours du cuivre afin de limiter au maximum les pertes. D'un point de vue mécanique, ce n'est pas particulièrement innovant mais on souhaite vérifier que les propriétés sont suffisamment bonnes pour que le matériau puisse être utilisé d'un point de vue industriel.

Organisation du travail

Notre projet étant essentiellement expérimental, les démarches et étapes à suivre pour le mener à bien n'étaient pas précisément définies. Ainsi, nous avons essentiellement avancé en groupe. A la première séance, après quelques explications sur le projet, nous avons effectué quelques recherches sur les propriétés des matériaux que nous allions utiliser ainsi que la technique de réalisation de notre matériau composite. Les deux séances suivantes, nous nous sommes divisés en deux groupes : un qui pouvait commencer à manipuler et l'autre qui continuait quelques recherches, et nous échangeons le rôle des groupes d'une semaine à l'autre. Ensuite, nous avons toujours tous procédé à la manipulation. Les expériences à réaliser étant similaires, nous avons chacun pu nous familiariser avec des machines telles que la tronçonneuse, la polisseuse, le laminoir, la machine à essai de dureté ou encore le banc d'essai. Les expériences étant assez longues nous avons rapidement pu constater que nous pouvions nous répartir les tâches expérimentales. Lorsqu'une personne effectuait des mesures de dureté, une autre s'occupait de remplir un tableau Excel récoltant les mesures pour être plus efficace. Dans le même temps, une autre s'attelait à la tronçonneuse pour de nouveaux échantillons et encore une autre se chargeait du polissage. Plusieurs personnes peuvent aider sur les différentes tâches. Etant donné que nous travaillions tous dans la même salle il était plus aisé lorsque nous avions besoin d'aide et cela a facilité les réflexions sur certains problèmes rencontrés. Après chaque séance, nous mettions tout en commun afin que tout le monde soit au courant des progrès réalisés et que nous puissions définir les objectifs de la séance suivante.

Comme les mesures que nous devons prendre sur les matériaux étaient longues à réaliser et que nous voulions exploiter au maximum les séances, nous nous sommes réunis 3 fois en dehors de notre créneau cours pour avancer dans le projet.

2. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

2.1. Présentation des matériaux

2.1.1. Cuivre

3.1.1.1 Point historique

Le cuivre est le premier métal travaillé par l'Homme. On trouve des outils en cuivre datant de 5000 ans avant J.-C, pendant le néolithique. De plus, le cuivre a souvent été utilisé en tant qu'alliage, et ce très tôt dans l'Histoire. En effet, on retrouve des traces de cuivre en alliage dès 3500 ans avant J.-C. Le cuivre a été très utilisé pour les alliages, notamment le bronze et le laiton. Enfin, le cuivre développe un essor particulier au XX^e siècle avec la découverte de l'électricité. De nos jours, il est essentiellement utilisé pour ses propriétés électriques.

3.1.1.2 Carte d'identité

Symbole	Cu
Numéro atomique	29
Masse atomique	63.54 g.mol ⁻¹
Réseau cristallin	Cubique à faces centrées
Température de fusion	1083 °C
Température d'ébullition	2570 °C
Masse volumique à 20°C	8.9 g.cm ⁻³
Conductivité thermique à 20°C	380 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité électrique	60,7.10 ⁶ S.m ⁻¹
Module d'élasticité	130 000 MPa

3.1.1.3 Domaines d'utilisation

- **Électrique/Électronique** : premier secteur d'utilisation du cuivre (environ 50%). Le cuivre est utilisé dans ce domaine pour ses propriétés de conductivité électrique et thermique, notamment pour les fils et les composants.
- **Bâtiment** : le cuivre est utilisé notamment dans la plomberie en raison de sa résistance à la corrosion.
- **Médical** : il est utilisé en tant qu'antibactérien, afin d'éviter les contagions.
- **Marine** : il est utilisé dans la construction de bateaux en raison de sa résistance à la corrosion, en particulier pour l'alliage cuivre-nickel qui a une très bonne résistance à l'eau salée.

3.1.1.4 Ses particularités

- **Conductivité** : Le cuivre est le meilleur conducteur électrique et thermique après l'argent (60,7.10⁶ S.m⁻¹ pour la conductivité électrique, 380 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la conductivité thermique). C'est la propriété qui nous intéresse le plus pour notre projet.
- **Résistance à la corrosion**

- **Oxydation** : Moins un cuivre est oxydé, meilleures sont ses propriétés. Pour notre projet, nous avons utilisé un cuivre désoxydé, qui possède donc de très bonnes propriétés.
- **Alliages** : le cuivre est très utilisé en alliage, notamment avec l'étain (bronze) et le zinc (laiton). L'alliage permet de combiner les propriétés du cuivre avec celles d'autres métaux, afin d'obtenir un matériau fonctionnel pour des usages plus poussés ou différents de ceux des métaux de base.

2.1.2. Aluminium

3.1.2.1 Point historique

C'est un métal relativement récent ; il n'est isolé pur qu'au milieu du XIX^{ème} siècle (première méthode d'élaboration industrielle mise au point en 1854). Jusqu'au XX^{ème} siècle, il reste catégorisé comme un métal semi précieux et sa production est rare et onéreuse. C'est à partir de 1950 qu'il devient le premier métal non ferreux utilisé, et passe devant le plomb, le cuivre, le zinc. De nos jours, il est économiquement intéressant et beaucoup de secteurs industriels l'utilisent en grande quantité. De plus, il est très bien recyclé.

3.1.2.2 Carte d'identité

Symbole	Al
Numéro atomique	13
Masse atomique	27 g.mol ⁻¹
Réseau cristallin	Cubique à faces centrées
Température de fusion	660 °C
Température d'ébullition	2056 °C
Masse volumique à 20°C	2,7 g.cm ⁻³
Conductivité thermique à 20°C	240 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité électrique	37,7.10 ⁶ S.m ⁻¹
Module d'élasticité	67 000 MPa

3.1.2.3 Domaines d'utilisation

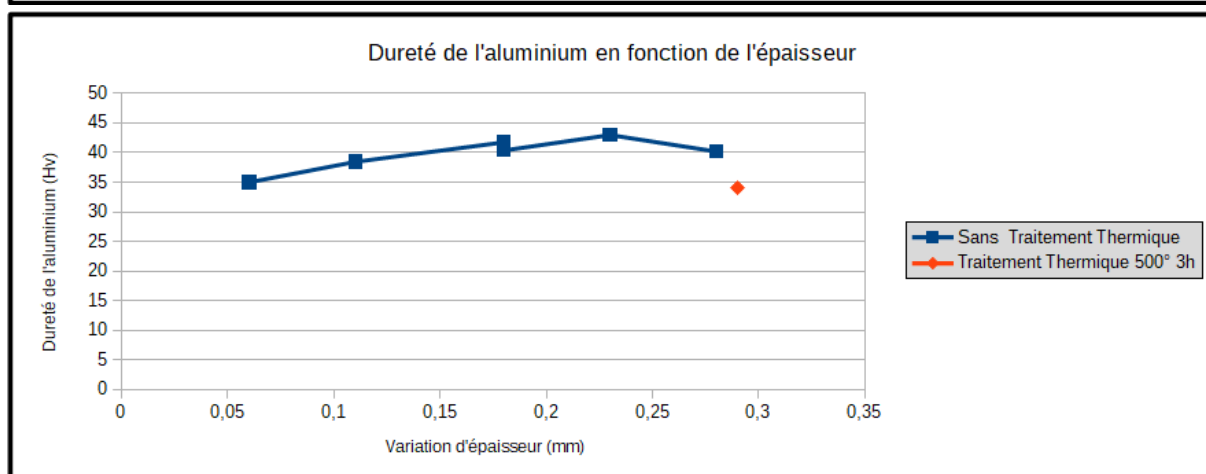
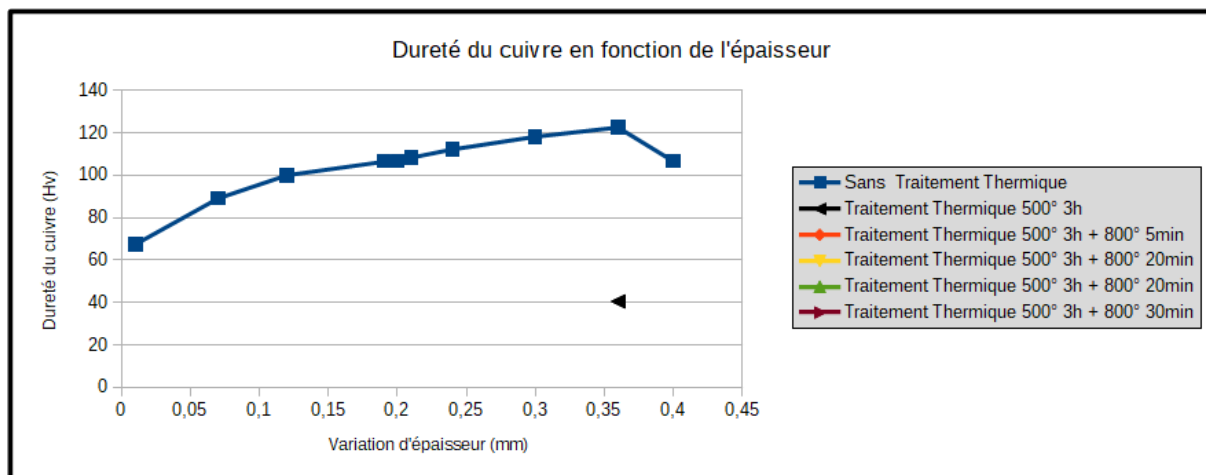
- **Transport** : premier secteur utilisateur, avec 37 % de ses utilisations (automobile, aéronautique, spatial)
- **Bâtiment** : cadres de fenêtres, portes, cloisons, vérandas...
- **Ingénierie** : divers domaines innovateurs tels que les batteries électriques, les éoliennes (etc...) ont recours à l'aluminium
- **Emballages** : souples ou rigides, les emballages en aluminium protègent efficacement (en particulier les denrées alimentaires) de la lumière, des rayons ultraviolets, de la vapeur d'eau, de l'oxygène et des micro-organismes

3.1.2.4 Ses particularités

- **Malléabilité** : il est trois fois moins rigide que les aciers avec un module d'Young de 70 000 MPa, et possède un fort allongement à la rupture (ce qui permet d'en faire des emballages souples)
- **Légereté** : il présente une faible masse volumique de 2.7 g/cm³, ce qui explique sa grande utilisation dans les secteurs du transport et en particulier dans l'aéronautique.
- **Résistance à l'oxydation et à la corrosion**
- **Résistance à des hautes températures** : point de fusion à 660°C, cette propriété est utile notamment dans le domaine des nacelles d'avions, où le matériau est à proximité du moteur qui dégage beaucoup de chaleur
- **Bonne conductivité** : c'est seulement 67 % de celle du cuivre mais sa faible densité (2.7 contre 8.9) suffit à le rendre compétitif pour la conduite d'électricité (câbles à haute tension). C'est le point qui nous intéresse le plus dans la réalisation de notre composite.

2.1.3. Tests de dureté

On fait des tests de dureté afin de comprendre l'influence du laminage sur les matériaux au niveau de leur dureté. Les tableaux suivants représentent les duretés respectives du cuivre et de l'aluminium en fonction de la variation de l'épaisseur (ici c'est une diminution).



Les deux diagrammes montrent bien que le laminage entraîne dans un premier temps une augmentation de la dureté, mais qu'il finit par rendre le matériau plus mou au bout d'une certaine différence d'épaisseur. De plus, il est possible d'obtenir un matériau beaucoup moins dur en lui faisant subir des traitements thermiques.

Concernant les différences entre nos deux matériaux, on retrouve bien expérimentalement que le cuivre est plus dur que l'aluminium, bien que les duretés puissent être adaptées.

Bilan :

Nous avons choisi le cuivre pour sa conductivité électrique et l'aluminium pour sa légèreté, sa résistance et son coût moins élevé. Afin de permettre un laminage du composite plus efficace, nous pouvons adapter les duretés de nos matériaux de départ à l'aide du laminage et du traitement thermique.

2.2. Elaboration des éprouvettes

2.2.1. 1^{ère} phase de conception

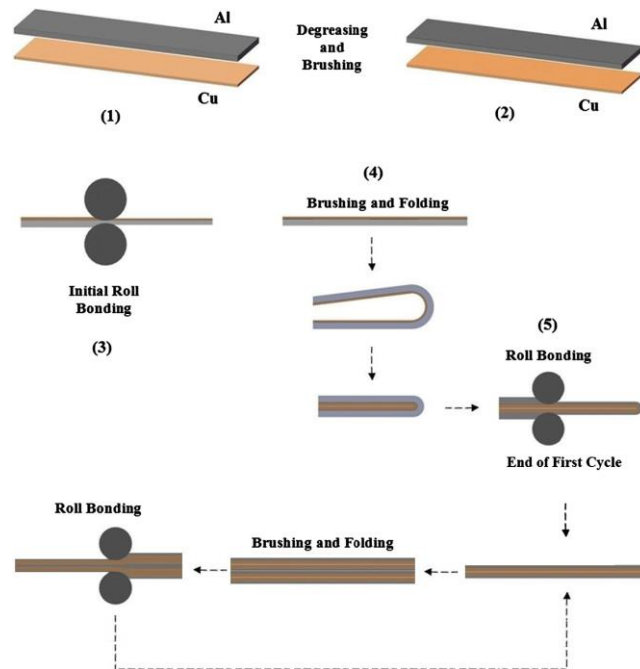
2.2.1.1. Une source : *Materials and design*

Au commencement de notre projet, nous n'avions aucune connaissance spécifique concernant le laminage ou les propriétés mécaniques du cuivre et de l'aluminium, nous avons donc dû commencer par un travail de bibliographie autour de ces sujets. Pour nous aider, notre professeur nous a fourni un article tiré d'un ouvrage scientifique : *Materials and design*.

C'est un journal scientifique collaboratif qui publie une vingtaine d'ouvrages scientifiques par an et dont la création remonte à 1978. De manière générale, ce journal publie des ouvrages de recherche à propos de nouvelles applications pratiques de la science de matériaux en proposant de nouveaux procédés.

Le volume qui nous intéresse est un article du volume 51, publié en 2013 : *Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process*

L'article est très pointu et traite de l'évolution de structure nanoscopique du cuivre et de l'aluminium au cours d'un procédé appelé : « accumulative roll bonding process » qu'on peut ici traduire par « procédé de laminages successifs », illustré ci-dessous :



C'est sur ce procédé que nous avons choisi de nous concentrer et que nous avons tenté de reproduire en l'adaptant à notre situation.

2.2.1.2. Nos essais

Dans le but d'obtenir notre matériau composite, nous avons dans un premier temps pensé à plusieurs procédés avec un principe similaire à celui évoqué au-dessus.

- A partir de plaques d'aluminium et de cuivre on découpe des bandes de dimensions identiques ($\approx 200 \times 20 \times 5$ mm)
- La sécurité du laminoir empêchant de trop grosses épaisseurs, on lamine de façon individuelle chaque bande jusqu'à une épaisseur proche de 1mm : ce sont ces bandes qui vont nous servir pour toutes les techniques qui vont suivre.

Option 1.

On prend une bande ainsi obtenue d'aluminium qu'on découpe à une longueur de 10 cm et une bande de cuivre de 20 cm, on replie le cuivre sur l'aluminium et on passe au laminoir.

Sur les photos ci-dessous, on peut voir très clairement que la stratégie ne fonctionne pas du tout malgré plusieurs tentatives.



Causes

Pour remédier au problème, il nous faut d'abord essayer de déterminer les causes de notre échec. Tout d'abord, l'obstacle qui nous paraît le plus évident est l'absence d'homogénéité entre les matériaux. Il en résulte une difficulté à guider la pièce dans son ensemble peut-être accentuée par des défauts sur les rouleaux du laminage. A chaque passage on observe une déformation latérale supplémentaire des différentes couches qui partent dans des directions opposées.

Ce phénomène peut aussi être expliqué par le fait des duretés différentes entre le cuivre et l'aluminium qui engendrent un allongement et un comportement différents sous l'effet du laminage. De plus l'allongement plus important de l'aluminium pourrait aussi être la cause de déchirure au niveau du pli du cuivre.

Solutions, améliorations envisagées

Ce qui nous paraît le plus important est un meilleur maintien en position des matériaux entre-eux. Celui-ci pourrait être mis en œuvre à l'aide de plis successifs, de points de soudure, ou bien à l'aide d'un procédé appelé traitement thermique.

Ce processus consiste en des cycles successifs de chauffage et de refroidissement qui vont conduire au changement de structure du métal. Cela afin d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques comme par exemple la ductilité, la limite élastique ou bien la dureté. Au niveau microscopique, avec l'augmentation de la température, l'énergie cinétique des atomes augmente elle aussi, ceux-ci vont alors s'agiter de manière plus importante jusqu'à créer un phénomène de dilatation. Différents phénomènes peuvent alors avoir lieu.

Dans notre cas, l'objectif est de palier au phénomène d'écrouissage (durcissement de la matière suite aux nombreuses passes de laminage). Pour cela on procède au recuit du matériaux, c'est-à-dire le chauffage modéré du métal afin de donner de la mobilité aux atomes qui vont se ré-organiser et éliminer les défauts d'organisation causés par le laminage. De plus, le phénomène de diffusion va créer un composé cuivre-alu (de type céramique donc très dur et fragile) au niveau de l'interface. Cela rendra l'interface plus continue et pourra donner une meilleure cohésion à l'ensemble.

De plus, nous avons fait des mesures de duretés sur des échantillons de cuivre et d'aluminium séparés et il semblerait qu'avec la bonne combinaison durée/température, on puisse obtenir une dureté équivalente pour les deux matériaux.

Pour les éprouvettes, on effectue ce procédé sous vide afin d'éviter le processus d'oxydation.

Options dérivées de la première.

En considérant les problèmes survenus, leur causes et les manières dont nous pouvions améliorer le processus, nous avons fait plusieurs tentatives ressemblant à la première mais incluant une ou plusieurs améliorations supplémentaires.

Tout d'abord les traitements thermiques successifs, sur différentes températures et durées. Dans aucun des cas le traitement thermique ne nous a permis de créer ce matériau intermédiaire qui aurait pu « coller » les plaques entre-elles. Les raisons peuvent être soit la température et durée pas assez importantes, soit le fait que les plaques ne sont pas parfaitement planes et donc que les surfaces ne contacts ne sont pas assez bonnes et importantes.

Replier du cuivre de chaque côté de l'aluminium afin de forcer les trois épaisseurs à rester les unes contre les autres. Deux manières différentes (voir photo):



Dans les deux cas, le problème du caractère plus malléable de l'aluminium que celui du cuivre pose le même problème : l'aluminium s'allonge plus vite que le cuivre et il va donc déchirer le cuivre aux endroits où il se replie. De plus, on voit avant la déchirure que les différentes couches commencent à se déformer latéralement dans des positions différentes.

Bilan :

Globalement, nous avons eu des difficultés à maintenir les trois couches en cohésion les unes par rapport aux autres. De plus, le pliage dans le sens de la largeur entraîne constamment une déchirure au bout d'un certain nombre de passages dans le laminoir.

Le traitement thermique a été efficace pour éviter d'atteindre une dureté trop élevée et garder des matériaux malléables mais n'est pas efficace pour créer une cohésion entre les matériaux, au moins tant que le contact n'est pas parfait.

2.3. 2^{ème} phase de conception : 3^{ème} test

2.3.1. *Pliage sur la longueur*

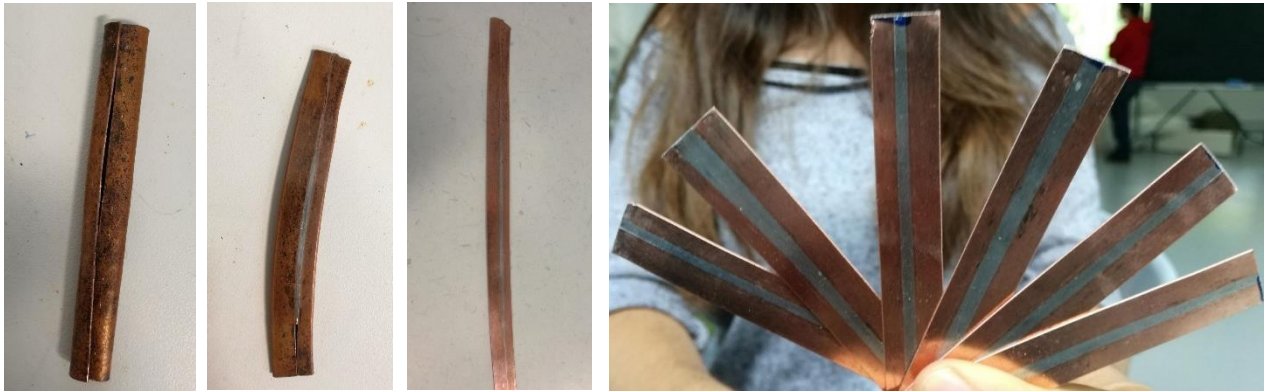
Le pliage sur les largeurs ne fonctionnait pas, en effet, les duretés des matériaux n'étaient pas égales, c'est pourquoi l'aluminium se déformait plus et plus rapidement que le cuivre. Nous avons donc décidé de tenter de replier le cuivre sur l'aluminium sur toute la longueur de l'échantillon. De cette manière, l'aluminium ne pouvait plus se séparer du cuivre lors des passages au laminoir. Cette dernière technique fonctionna. C'est pourquoi c'est celle que nous avons retenue pour notre étude.

Cependant la réalisation de ce matériau n'était pas des plus simples.



Mise en place avant pliage

Tout d'abord, il fallait scier un échantillon d'aluminium à l'aide de la scie à métaux. Ensuite, nous replions légèrement le morceau de cuivre sur l'aluminium avec l'étau avant de le replier au marteau. Ces manipulations fragilisant le matériau obtenu, nous avons réalisé par la suite des traitements thermiques pour que les métaux puissent retrouver toutes leurs propriétés mécaniques. Puis nous l'avons laminé jusqu'à obtenir une épaisseur satisfaisante. Nous l'avons ensuite découpé à la tronçonneuse en plusieurs échantillons d'environ 10 cm que nous avons ensuite utilisés pour effectuer des tests de traction.



Avant laminage Après le 1er laminage Après plusieurs laminages Produit final découpé en éprouvettes

2.3.2. Le tube



Mise en place
avant laminage

Comme le principal problème était le guidage des matériaux dans le laminoir, nous avons, dans les dernières séances, pensé à empiler des bouts de métaux dans un tube, coupés dans la longueur. Nous avons ainsi glissé les échantillons en alternant barres d'aluminium et de cuivre. Nous avons ensuite laminé le tube jusqu'à l'épaisseur désirée.

2.3.3. Comparaison des 2 échantillons concluants.

Afin de pouvoir comparer les échantillons obtenus, nous avons réalisé des tests mécaniques comme des essais de traction (voir partie suivante), mais nous avons aussi observé nos échantillons au microscope électronique. Ainsi nous avons pu avoir une meilleure idée de la structure finale des matériaux que nous avons élaborés. Cela nous a aussi permis de prendre des mesures très précises.

L'éprouvette réalisée par pliage possède trois couches assez irrégulières. De plus le cuivre ne recouvre pas entièrement l'aluminium ce qui pourrait induire des problèmes mécaniques à posteriori. On voit bien sur la photo 2 (annexe 5) que l'aluminium quand il n'est pas recouvert fait quasiment le double de l'épaisseur du cuivre.

Le tube, quant à lui, offre un résultat beaucoup plus régulier et plus proche de ce que nous désirions obtenir. En effet, il est composé de cinq couches pleines, d'épaisseurs similaires. Cependant, des espaces vides apparaissent encore, pouvant fragiliser le matériau. Nous avons donc laminé le matériau quelque fois au laminoir afin de tenter les faire disparaître. Cependant ce ne fut pas le cas. On peut, par ailleurs, noter que ces trous se trouvent à aux contacts entre les deux matériaux. Or, à ces endroits devraient se trouver un matériau composite formé par les différents traitements thermiques. C'est d'ailleurs ce dernier que nous cherchions principalement à observer à l'aide du microscope.

Nous avons donc cherché à expliquer cette absence par différentes hypothèses :

- Premièrement, il est possible qu'une fine couche d'oxydation soit présente sur les différents matériaux, ce qui pourrait bloquer la diffusion des métaux. Pour pallier ce problème, il aurait fallu décaper nos échantillons afin de supprimer cette couche.
- Les interfaces ne sont pas non plus parfaites, elles ne sont pas forcément parfaitement planes et les trous persistants après le laminage empêchent la diffusion.
- Le traitement thermique que nous avons appliqué au matériau n'est peut-être pas bien adapté. Il faudrait faire des essais en faisant varier la durée ou encore la température. Pour ce dernier point on pourrait observer les résultats obtenus si l'on réalise l'expérience avec un chauffage progressif ou au contraire brutal. Il faut toutefois prendre en compte le fait qu'une hausse de température ne serait pas une solution car à partir d'un certain point on aurait des problèmes de fusion des métaux.
- Enfin, du fait de sa structure le câble a beaucoup plus de surface de contact entre le cuivre et l'aluminium que notre matériau, relativement à la masse totale des échantillons. Cela pourrait donc rendre l'effet du phénomène de diffusion beaucoup moins important dans notre cas, et expliquerait pourquoi nous ne le voyons pas lors des observations au microscope.

2.4. Essai de traction

2.4.1. *Expérience Post-Projet (tube étiré)*

Le but principal de cette expérience est de savoir comment réagi le matériau à la suite d'une déformation. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisable et reproductible. Le but était d'obtenir une courbe qui correspondrait au résultat voulu. M. Keller et son équipe, après réalisation du matériau, ont créé plusieurs éprouvettes de tractions. Ils ont pu ainsi effectuer des essais de traction dont les résultats n'étaient pas ceux attendus, une anomalie s'est formée au niveau de la transition entre les zones élastique et plastique, il s'agit d'un décrochement (*voir courbe ci-dessous*). En effet, ici M. Keller souhaitait, à partir d'un certain allongement, une transition franche (rupture de pente). A la suite du problème, M. Keller voulait en connaître davantage sur ce type de phénomène, savoir quelles sont les causes de l'apparition de ces vagues. Sa première hypothèse remet en cause la technique utilisée pour fabriquer le matériau et le traitement thermique effectué sur les échantillons. En effet son hypothèse est que les intermétalliques de l'échantillon (Al_2Cu / $AlCu$ / Al_4Cu_9) sont plus fragiles que les métaux purs (Cu/Al).

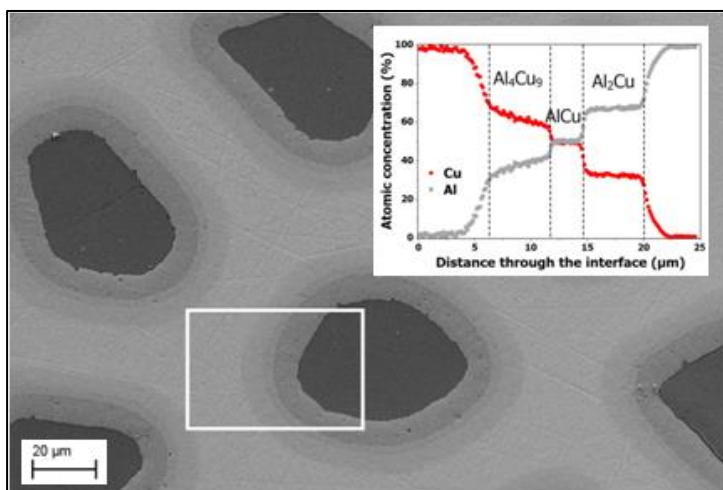


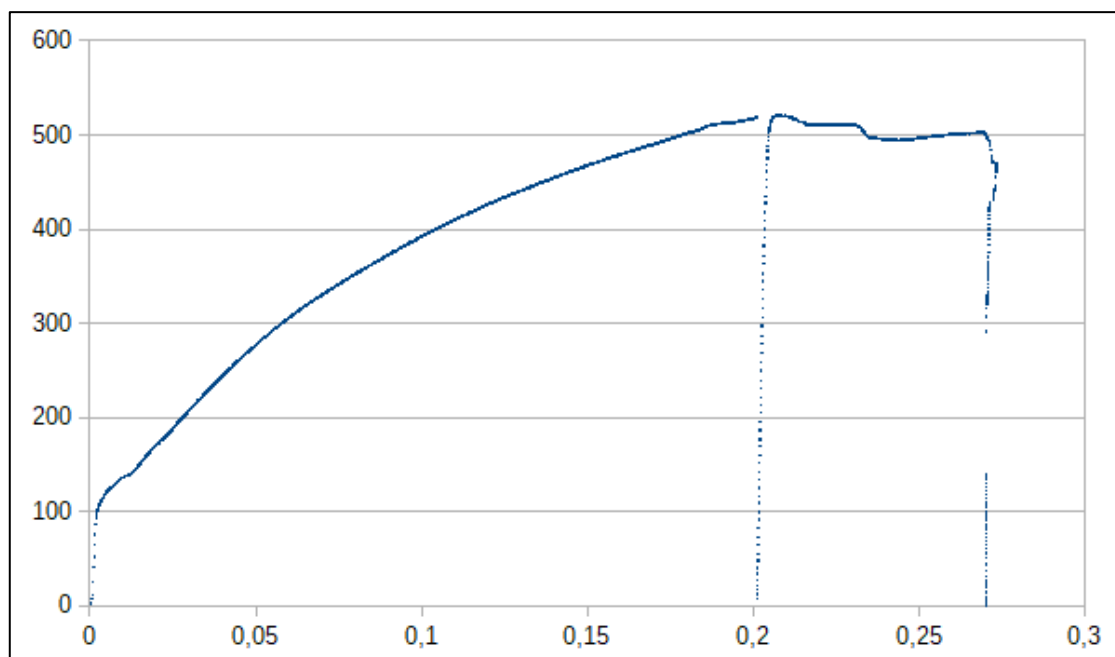
Photo au microscope des
intermétalliques de
l'échantillon



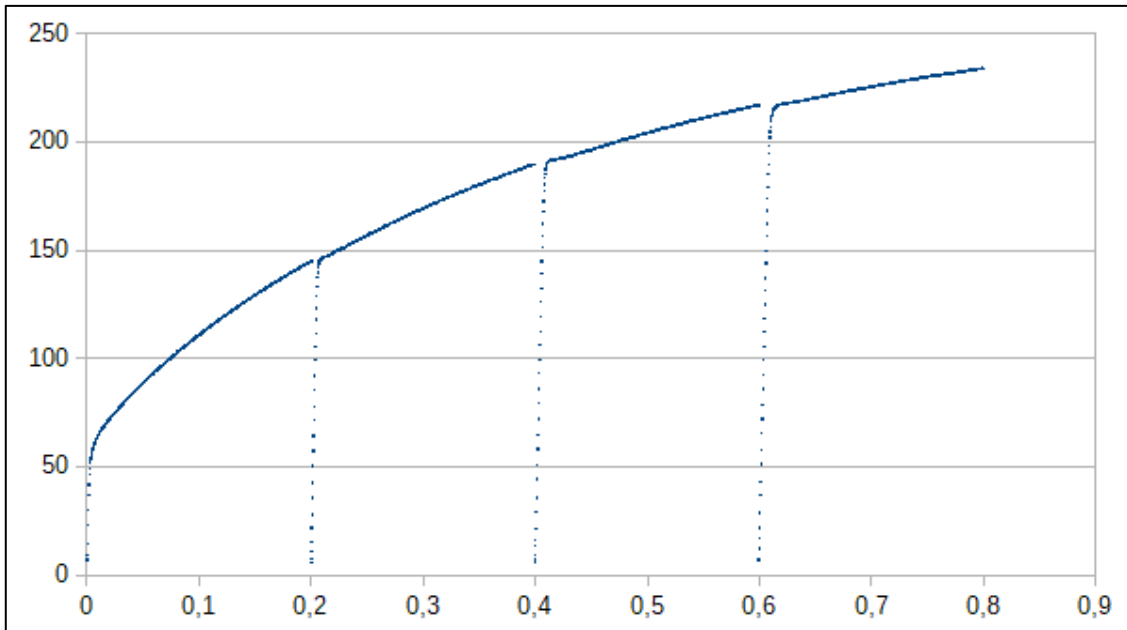
Courbe de traction d'un échantillon du matériau étiré par une filière

2.4.2. ***Essais de traction des deux échantillons tests élaboré lors de ce projet***

Notre projet est de développer de nouveaux échantillons par la méthode de laminage afin si possible de régler le souci apparu lors des essais de traction antérieurs et par là même comprendre d'où provient l'anomalie rencontrée dans les tests antérieurs. Pour cela nous effectuons des essais de traction sur divers échantillons (*voir graphiques ci-dessous*) issus des 2 méthodes de fabrications retenues lors de ce projet.

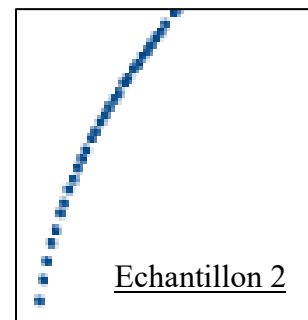
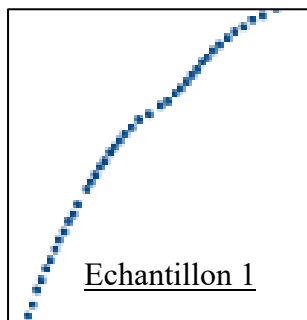


Courbe de traction de l'échantillon n°1 [Tube de Cuivre + Bande de cuivre + Bandes d'Aluminium]



Courbe de traction de l'échantillon n°2 [Bande de cuivre (Replié sur les côtés) + Bande d'Aluminium]

Au vu des résultats obtenus nous pouvons observer dans la zone de transition des résultats différents entre les deux échantillons. Pour l'échantillon n°1, des oscillations sont présentes mais assez différentes de celles rencontrées auparavant car beaucoup plus éparées ici. En ce qui concerne l'échantillon n°2, le graphique semble ne présenter aucune anomalie.



Zoom sur la transition de zone élastique/plastique des deux échantillons tests

Lors des essais nous avons pu constater certaines choses. Premièrement, la méthode de laminage implique, malgré transferts thermiques, une absence d'intermétalliques qui va causer lors de l'essai une disparité entre les différentes couches de matériaux, en d'autres termes rien ne relie les bandes de métaux entre elles, à part la compression. Ainsi nous avons pu constater que la méthode de laminage accroît la fragilité de l'échantillon. Deuxièmement, plus l'échantillon comporte de couches plus il devient dur impliquant une augmentation de sa limite élastique en contrepartie celui-ci devient fragile. Troisièmement, l'échantillon n°1 en s'étirant va s'endurcir légèrement.

Le phénomène d'oscillations dans l'échantillon n°1 est selon nous différent de celui présent dans les expériences de M. Keller. Les oscillations de la courbe de l'échantillon n°1 sont dues d'après nous aux défauts physiques de conception. En effet l'échantillon est fragile et possède un nombre plus important de bandes métalliques, nous pensons que la déformation est perturbée à cause de mouvements internes dus au laminage qui n'a pas compressé entièrement les métaux. Nous pouvons observer des

trous présents à l'intérieur de l'échantillon (observables au microscope), qui pourraient être la cause de cette instabilité.

Les résultats obtenus nous montrent de nombreux soucis quant à la méthode par laminage. Si nous effectuons des échantillons simples, sans un nombre trop important de métaux dans l'échantillon alors les tests ne comportent aucun souci mais si nous décidons de mettre plus d'alternances cuivre-aluminium dans notre échantillon, la possibilité d'avoir des fragilités suite au laminage s'accroît. Ainsi les résultats ne seront pas favorables car notre échantillon deviendra plus fragile et sa déformation sera rapide.

Une solution à cela serait les intermétalliques car ils permettent aux échantillons d'être plus ductiles néanmoins leurs courbes d'essais de traction présentent des oscillations qui pourraient être un souci (*voir graphique de l'échantillon étiré par une filière*). Les recherches de M. Wang (*Bibliographie => [15]*), doctorant à Centrale Paris, mettent en évidence l'apparition d'oscillations dans les essais de traction. Il évoque le phénomène Portevin-Le Chatelier (PLC) et les bandes de Lüders, représentant chacun des phénomènes d'oscillation dans le domaine élastoplastique. Il dit d'ailleurs que certains alliages à base d'aluminium seraient responsables de ces phénomènes comme Al-Cu, ce qui rentre en adéquation avec l'hypothèse que cela vient des intermétalliques présents dans les échantillons (alliage cuivre/aluminium).

3. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au fur et à mesure du projet, nous nous sommes rapprochés du matériau que nous souhaitons obtenir. Notre démarche a consisté à tirer des conclusions de nos échecs, afin d'améliorer notre technique tout au long des séances. Cela a abouti à un matériau plat composé de cuivre et d'aluminium, comme nous le désirions, mais il subsiste quelques défauts. Par exemple, nous aurions aimé décaper nos échantillons afin de supprimer les espaces vides dus à une couche d'oxydation. Cela est visible sur les photos prises au microscope électronique. De plus, il y a une trop grande disparité entre les couches de matériaux. Bien que nous l'ayons limitée grâce aux traitements thermiques, elle n'est pas supprimée. Enfin, nous n'avons pas réussi à obtenir les oscillations caractéristiques recherchées sur les courbes de traction. Nous avons été pénalisés par un manque de temps sur ce projet. Il aurait fallu faire beaucoup plus d'essais afin de tirer plus de conclusions permettant d'aboutir à un matériau tout à fait satisfaisant. Chaque manipulation est très longue et chacune découle d'une autre. Elles ne sont donc pas réalisées en même temps. Pour ces raisons, des séances d'une heure et demie sur un semestre n'ont pas suffi.

Malgré un manque de temps, ce projet a été riche sur l'apport personnel. Nous en avons appris sur le suivi d'un réel projet scientifique. En tant qu'étudiants ingénieurs, nous n'avons jamais réalisé ce type de projet où le protocole expérimental n'est pas vraiment défini à l'avance. Nous avons appris à concevoir une méthode expérimentale à partir d'un objectif et de moyens à disposition. De plus, nous étions un groupe de six, ce qui est un nombre important pour une réalisation aussi spécifique. Il a donc fallu apprendre à se répartir les tâches, et à être complémentaires. Cela peut être considéré comme un véritable entraînement au travail d'ingénieur : rechercher en groupe, donner des idées et appliquer des techniques, dans le but d'aboutir à un produit innovant.

Pour la poursuite de ce projet, il y a deux possibilités. En premier lieu, on pourrait continuer sur la voie entamée en améliorant le procédé de fabrication. Sinon, en prenant en compte les résultats obtenus durant ce semestre qui nous en apprennent sur le comportement des métaux et les effets des procédés mis en exécution, il faudra réfléchir à une autre méthode pour imiter le câble étudié.

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mohammad Reza Toroghinejad, Roohollah Jamaati, Jan Dutkiewicz, Jerzy A. Szpunar , « Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process », *Materials and Design*, 2013.
- [2] F. Moisy, A. Gueydan, X. Sauvage, A. Guillet, C. Keller, E. Guilmeau et E. Hug, “ Influence of intermetallic compounds on the electrical resistivity of architected copper clad aluminum composites elaborated by a restacking drawing method ”, 2018.
- [3] lien internet : <http://encyclopedie-energie.org/articles/histoire-de-1%E2%80%99%C3%A9lectricit%C3%A9-de-thales-%C3%A0-la-consommation-du-21e-si%C3%A8cle> (valide à la date du 13/03/2018).
- [4] lien internet : <http://www.aluminium.fr/aluminium/proprietes-aluminium> (valide à la date du 06/03/2018)
- [5] lien internet : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metaux-et-alliages-non-ferreux-42357210/proprietes-generales-de-l-aluminium-et-de-ses-alliages-m4661/proprietes-de-l-aluminium-m4661niv10001.html> (valide à la date du 06/03/2018)
- [6] lien internet : http://www.cqrda.ca/wp-content/uploads/2013/07/Feuillard32_Laminage.pdf (valide à la date du 06/03/2018)
- [7] lien internet : <http://www.zamak-cupro-aluminium.fr/cupro-aluminium/> (valide à la date du 06/03/2018)
- [8] lien internet : www.almet-metal.com/informations-techniques/donnees-aluminium (valide à la date du 13/03/2018)
- [9] lien internet : <http://copperalliance.fr/le-cuivre/les-proprietes-du-cuivre> (valide à la date du 13/03/2018)
- [10] lien internet : <http://copperalliance.fr/le-cuivre/le-cuivre-dans-l-histoire> (valide à la date du 13/03/2018)
- [11] lien internet : <http://blog.latrivenetacavi.com/fr/conducteurs-electriques-et-applications-techniques-cuivre-et-aluminium-comparaison/> (valide à la date du 13/03/2018)
- [12] lien internet : <http://www.copperclad.com.mx> (valide à la date du 05/06/2018)
- [13] lien internet : <http://mecan2010.blogspot.com/p/comportement-des-materiaux.html> (valide à la date du 15/06/2018)
- [14] lien internet : https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_science_des_mat%C3%A9riaux/Annexe/Esai_de_traction_normalis%C3%A9 (valide à la date du 15/06/2018)
- [15] lien internet : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00704515/file/MA_moire_thA_se_wang.pdf (valide à la date du 15/06/2018) **Voir fin p16 et début p17 de la thèse**

5. ANNEXES

Schémas de montages, plans de conception...

Echantillon par pliage :

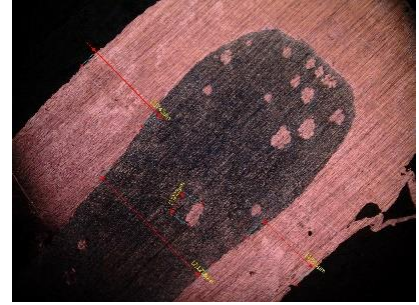
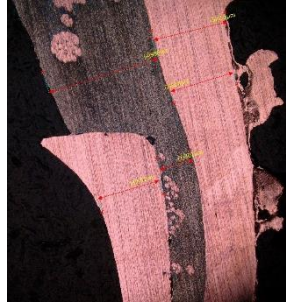
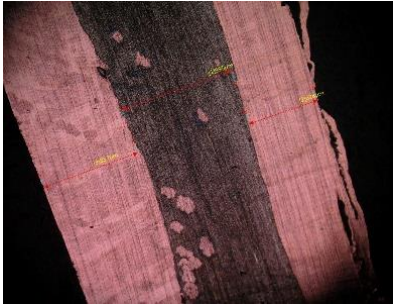
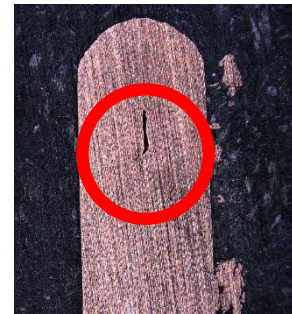
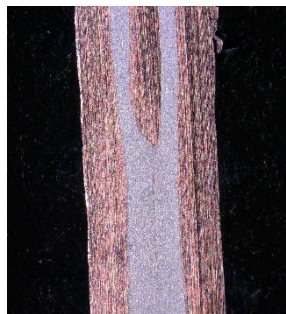
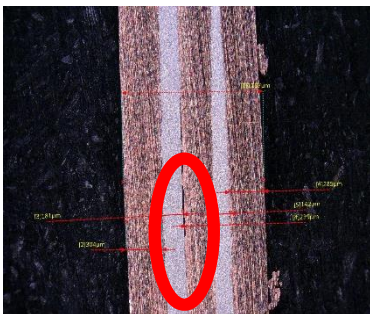


Photo 2

Echantillon tube :



Echantillon tube relaminé :

