

**ÉLABORATION D'UN FIL COMPOSITE  
MÉTALLIQUE ET CARACTÉRISATION DE  
SES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**

**Etudiants :**

**Jules ALRIC**

**Mattéo FONDIN**

**Paul HERVIEU**

**Siane LADENT**

**Thaïs LE GALLIC**

**Augustin LIEGEARD**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Clément KELLER**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : 12/06/2021

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 13**

Intitulé du projet :

Élaboration d'un fil composite métallique et caractérisation de ses propriétés mécaniques

Type de projet : **expérimental et bibliographique**

Objectifs du projet :

D'une part, nous devons nous approprier les propriétés des matériaux que sont le cuivre et l'aluminium afin de les associer d'une façon optimale. Nous améliorons donc nos capacités à analyser de nombreux documents scientifiques en français et en anglais.

Un des buts principaux est aussi d'apprendre à manier des machines simples telles qu'une tréfileuse, une appointeuse, une machine de traction ou encore une enrobeuse.

Une fois les valeurs des essais de traction récupérées, nous devons mettre en application nos connaissances de mécanique acquises en CTI afin de déterminer numériquement les valeurs clés telles que le module d'Young.

Nous souhaitons ainsi pouvoir créer notre propre fil et l'étudier mécaniquement.

Mots-clefs du projet :

*Conception* : action d'élaborer quelque chose dans son esprit pour le réaliser ensuite.

*Matériau composite* : assemblage d'au moins deux composants dont les propriétés se complètent.

*Propriétés mécaniques* : caractéristiques d'un matériau, observables lorsque celui-ci est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques.

## Table des matières

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3. Travail réalisé et résultats .....	8
3.1. Recherches préliminaires .....	8
3.1.1. Pourquoi utilise-t-on des matériaux composites ? .....	8
3.1.2. Propriétés du cuivre et de l'aluminium .....	8
3.2. Elaboration des fils composites .....	11
3.2.1. Choix de la géométrie et de la composition initiale des deux prototypes .....	11
3.2.2. Tréfilage .....	12
3.3. Etude des fils.....	14
3.3.1. Caractérisation des propriétés mécaniques.....	14
3.3.2. Analyse de la structure des fils.....	19
4. Conclusions et perspectives.....	21
4.1. Conclusions sur le travail réalisé .....	21
4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C projet .....	21
4.3. Perspectives pour la poursuite du projet.....	21
5. Bibliographie .....	22
5.1. Propriétés mécaniques des matériaux .....	22
5.2. Etude des fils composites.....	22
5.3. Elaboration d'un fil.....	23
6. Annexes.....	24
6.1. Courbes d'essais de traction du fil témoin .....	24
6.2. Courbes de traction du fil composite n°1 .....	28
6.3. Courbes de traction du fil composite n°2 .....	32

## Remerciements

Avant toute chose, nous souhaitons remercier notre enseignant, M.Keller, responsable de notre projet. Grâce à ses explications et ses conseils avisés, nous avons tous pu comprendre les divers aspects théoriques du sujet et avons appris à manier rapidement les différents équipements.

Malgré la situation sanitaire compliquée, il nous a permis de profiter pleinement de cet enseignement projet basé en grande partie sur les manipulations.

Il a su, à travers ce travail, donner goût à la mécanique à plusieurs d'entre nous, ce qui a éclairé le choix de département de plusieurs élèves.

De plus, il nous a aidé à finaliser ce que nous envisagions réaliser, en nous donnant, à plusieurs reprises, accès aux laboratoires en dehors du créneau hebdomadaire.

Par ailleurs, nous tenons à remercier M.Guillet pour son aide à la conception d'un premier fil composite.

## 1. INTRODUCTION

Notre projet consiste en l'élaboration d'un fil composite conducteur à base de cuivre et d'aluminium. Comme nous le savons, tous les matériaux sont caractérisés par diverses propriétés électromagnétiques et thermiques notamment. Bien qu'il soit important en pratique pour un fil conducteur, nous ne nous intéresserons pas à l'aspect électrique, faute de temps. Les contraintes économiques et environnementales seraient également à prendre en compte, mais elles ne seront pas considérées comme de réelles limites dans cette conception. Ainsi, nous nous concentrerons davantage sur les propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

Le matériau réalisé a pour but de combiner à la fois, les qualités du cuivre et de l'aluminium.

Pourquoi avons-nous besoin de tels matériaux "hybrides" ? Ceci est dû en grande partie au coût important de matières premières telles que le cuivre. Réduire la quantité utilisée tout en améliorant les propriétés du matériau pur est un réel enjeu technologique actuel. Notre fil sera globalement composé d'une base cuivrée dans laquelle seront introduits un ou plusieurs fils d'aluminium. Nous reviendrons dans les différentes parties du rapport sur les multiples étapes ayant mené au modèle final.

Dans un premier temps, nous vous présenterons les connaissances acquises grâce aux recherches documentaires effectuées durant les premières séances.

Puis, nous décrirons la manière dont nous avons pu élaborer un fil composite.

Finalement, nous détaillerons les différents tests que nous avons réalisés afin de caractériser les propriétés mécaniques des fils.

L'objectif de ce projet est ainsi de parvenir à distinguer les atouts et points faibles mécaniquement parlant, des deux modèles de fils mis au point.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Avant de rentrer dans les détails de nos recherches, revenons sur l'organisation et la manière dont s'est déroulé ce projet.

Les deux premières séances, effectuées à distance, ont été pour l'ensemble du groupe l'occasion de se documenter sur les matériaux composites métalliques. Domaine en pleine expansion, nous avons pu nous procurer de nombreux écrits récents. Nous avons aussi eu recours aux leçons de sciences des matériaux disponibles sur le site Wikiversité afin de mieux appréhender le sujet. Après avoir listé les points à éclaircir, nous nous sommes réparti ces recherches comme indiqué sur l'organigramme.

Nous en avons aussi profité pour nous mettre d'accord sur les moyens techniques d'organisation. Nous avons ainsi opté pour un Google Drive nous permettant de classer tous nos fichiers en temps réel. Mattéo a aussi été désigné comme correspondant du groupe afin de faciliter la communication des informations par mail avec notre enseignant M.Keller.

La majorité du temps a ensuite été accordée à la prise en main des diverses machines et des protocoles associés. Ainsi, nous avons appris à réaliser les essais de traction et à analyser les données correspondantes via Excel. La réalisation d'échantillons par enrobage afin de visualiser la géométrie interne des fils au microscope numérique a aussi été présentée. Finalement, nous nous sommes initiés au tréfilage et à l'appointage pour concevoir et affiner notre propre fil.

Souhaitant produire un fil plus élaboré qu'une simple base cuivrée entourant de l'aluminium, nous avons pris part à plusieurs demi-journées supplémentaires sur les dernières semaines. Ces séances ont donc été consacrées à toutes les étapes citées précédemment pour un nouveau fil. Nous avons pris en charge la rédaction du rapport ainsi que la réalisation des supports visuels sur notre temps libre.

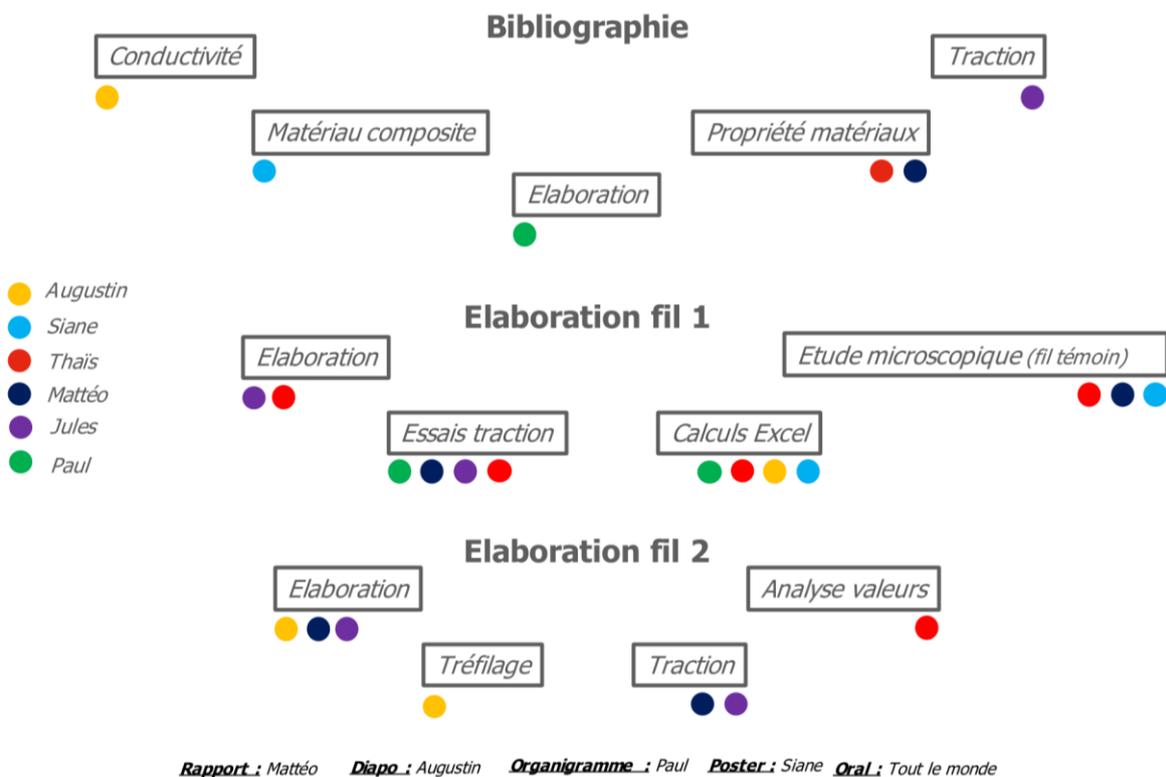


Figure 1 - Organigramme du projet

### 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1. Recherches préliminaires

##### 3.1.1. Pourquoi utilise-t-on des matériaux composites ?

Un matériau composite est un mélange de plusieurs matériaux non miscibles possédant des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Ils sont composés d'une ossature et d'une matrice. L'ossature sert de renfort et possède des propriétés isotropes, anisotropes ou orthotropes. Quant à elle, la matrice peut être composée de plastique, de métal ou de céramique. Elle permet de transmettre les efforts mécaniques au renfort tout en le protégeant des agressions de l'environnement. Dans ce projet, il s'agit d'aborder les matériaux composites à matrices métalliques.

Parmi cette catégorie, on distingue deux types d'assemblages :

- les matériaux de grande diffusion, moins efficaces en termes de propriétés mécaniques mais peu coûteux, ce qui permet une production en grande quantité
- ceux nommés comme étant à hautes performances ayant à l'inverse des propriétés mécaniques rares mais bien plus coûteux. On les retrouve particulièrement dans l'aérospatiale.

Le grand avantage des matériaux composites est l'existence de la multitude de combinaisons possibles. Ces divers mélanges sont à l'origine de l'amélioration voire de l'émergence de nouvelles propriétés mécaniques.

Les métallurgistes dosent très précisément la composition de leurs produits pour arriver au meilleur compromis entre des propriétés parfois opposées. Ils ne cessent donc de jouer sur la composition chimique, sur les traitements thermodynamiques, ainsi que sur les procédés d'élaboration. La modernisation des moyens de production, avec l'instrumentation et le contrôle informatique des processus, améliore grandement la précision de la composition des produits et la rapidité d'exécution. Le développement permanent des technologies liées à leur production est nécessaire pour accroître l'accessibilité de ces matériaux de demain. Ainsi, les scientifiques sont de plus en plus convaincus que les innovations du futur auront recours aux matériaux composites.

##### 3.1.2. Propriétés du cuivre et de l'aluminium

Pour rappel, les matériaux peuvent être classés en différentes catégories, à savoir les métaux, céramiques, verres, textiles, polymères, pierres et bétons, ainsi que composites. Ils peuvent aussi bien être naturels qu'artificiels.

Pour notre projet, nous nous intéresserons aux métaux que sont le cuivre et l'aluminium. Le but étant de les associer, nous rentrerons dans la classe des matériaux composites.

#### A) Propriétés du cuivre

*Définition* : Métal de couleur brune, le cuivre, de symbole chimique Cu, c'est une référence en termes de conductivité électrique, de ductilité et de résistance à la corrosion.

- **Densité** : 8,96 g/cm<sup>3</sup>

- **Température de fusion** : 1084°C

- Coefficient de dilatation : 1,7 mm/m pour 100 degrés
- Coefficient de Poisson : 0,33

Propriétés mécaniques :

*Tableau 1 - Propriétés mécaniques du cuivre*

Alliage	Module d'Young E (GPa)	Limite élastique Re (MPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
Cuivre	112	7 à 25	20 à 35	6 à 45

Avantages / Inconvénients :

*Tableau 2 - Avantages / Inconvénients du cuivre*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• facile à se procurer, à déformer (très ductile) et à usiner</li> <li>• excellent conducteur électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lourd</li> <li>• vert-de-gris toxique</li> </ul>

## B) Propriétés de l'aluminium

*Définition* : Très léger, ductile et malléable, ce métal blanc gris s'altère peu à l'air. L'aluminium, Al, est principalement utilisé dans la fabrication d'articles de ménage et dans les industries automobile, aéronautique et électrique.

- Masse volumique : 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Température de fusion : 660°C
- Dilatation thermique : 2,3 mm/m pour 100 degrés
- Coefficient de Poisson : 0,35

Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques de l'aluminium diminuent rapidement à chaud. Ainsi, pour un fil de 1,5 mm, à 150°C la charge de rupture est de 6MPa, 3 MPa sous 250°C et 1,5 MPa pour 350°C.

*Tableau 3 - Propriétés mécaniques de l'aluminium*

Alliage	Module d'Young E (GPa)	Limite élastique Re (MPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
Aluminium	70	5 à 520 (~300 l'alliage utilisé)	6 à 570	1 à 35

*Avantages / Inconvénients*

*Tableau 4 - Avantages / Inconvénients de l'aluminium*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• léger (3x plus que l'acier)</li> <li>• coût de fabrication faible</li> <li>• facile à mettre en forme, à déformer et à usiner</li> <li>• tenue mécanique correcte</li> <li>• bonne tenue des basses températures</li> <li>• conductivités électrique et thermique assez bonnes</li> <li>• résistant à la corrosion</li> <li>• esthétique</li> <li>• recyclable</li> <li>• déformation plastique importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• résistance mécanique (traction) faible</li>   <li>• minerais difficile à réduire <math>\Leftrightarrow</math> coût de matière première élevé</li>   <li>• vulnérable à l'abrasion et à la fatigue</li>   <li>• mauvaise tenue à haute température</li> </ul>

C) Intérêt d'allier cuivre et aluminium au vu de leurs propriétés respectives

L'objectif principal consiste à obtenir un fil conducteur nettement plus complet qu'un équivalent d'aluminium ou de cuivre pur.

La bonne conductivité électrique de l'aluminium ne viendra ainsi que moyennement l'excellente capacité à transmettre le courant du cuivre. Cette légère diminution est négligeable comparée aux perspectives de progressions mécaniques apportées.

Concernant leur résistance à la traction ainsi que leur limite élastique, on constate qu'ajouter de l'aluminium à du cuivre permettrait d'augmenter nettement les qualités mécaniques de ce dernier. Allier les deux matériaux permettrait d'en obtenir un globalement plus résistant tant en zone élastique que plastique.

De même, l'aluminium, parfois utilisé en cryogénie, et le cuivre supportent très bien les faibles températures. Moyennement résistants à la chaleur, ce ne devrait pas être un réel point faible puisque dans la plupart des applications les fils ne seront pas soumis à de hautes températures. Le cas échéant, les gaines utilisées suffiront à maintenir les métaux en état.

On peut noter que les deux matériaux sont résistants à la corrosion, ce qui pourrait être utile s'ils étaient amenés à évoluer en milieu humide, ce qui sera rarement le cas.

En termes de coût, l'aluminium se trouve à 1,725€/kg tandis qu'un kilogramme de cuivre est à environ 7€. Puisque nous pensons insérer de l'aluminium dans une enveloppe cuivrée, nous utiliserons beaucoup moins de cuivre ce qui nous permettra de réduire considérablement le prix du matériau.

Le métal composite serait donc potentiellement assez polyvalent pour résister à une large gamme de situations et de contraintes du milieu environnant.

## 3.2. Elaboration des fils composites

### 3.2.1. Choix de la géométrie et de la composition initiale des deux prototypes

#### A) Composition des fils

Le premier fil à avoir été conçu consiste en une base cuivrée au sein de laquelle nous avons inséré un cylindre plein d'un alliage d'aluminium.

Le tube de cuivre a pour dimensions, un diamètre extérieur  $D = 12\text{mm}$  et une épaisseur de 2mm. Ainsi, le cylindre d'aluminium a un diamètre extérieur d'environ  $d = 8\text{mm}$  pour remplir le tube.

La fraction volumique d'aluminium dans ce matériau composite est ainsi de  $\frac{8}{12} = \frac{2}{3} \approx 0,67$ . On y trouve donc seulement un tiers de cuivre.

Pour le deuxième fil, nous avons utilisé la même base cuivrée dans laquelle ont été ajoutés des échantillons de différents diamètres du premier fil conçu.

Quel que soit son diamètre, un fil composite conserve une même fraction volumique de chacun des matériaux le composant. Deux types de fils ont été insérés dans le tube.

Nous appellerons de type A les 5 fils de diamètre extérieur :  $D_A = 2,3\text{ mm}$

Leur diamètre intérieur est donc  $\frac{d_A}{D_A} = \frac{8}{12} \Rightarrow d_A = 1,53\text{ mm}$

4 fils de type B, tels que  $D_B = 1,6\text{mm}$  et  $d_B = 1,07\text{ mm}$ , en font également partie.

On souhaite alors déterminer la fraction volumique des deux métaux.

Pour cela, on calcule la surface occupée par du cuivre sur le tube et les deux types de fil à l'intérieur de celui-ci.

$$\text{Pour le tube : } S_{ext} - S_{int} = \pi \left( \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right) = 62,8\text{ mm}^2$$

$$\text{De même : } S_{ext,A} - S_{int,A} = 2,32\text{ mm}^2 \text{ et } S_{ext,B} - S_{int,B} = 1,11\text{ mm}^2$$

D'où :  $S_{cuivre} = 66,2\text{ mm}^2$ , par somme.

$$S_{alu} = 5\pi \times \left( \frac{d_A}{2} \right)^2 + 4\pi \times \left( \frac{d_B}{2} \right)^2 = 12,8\text{ mm}^2$$

$$\frac{S_{cuivre}}{S_{alu} + S_{cuivre}} = 0,84$$

Le deuxième fil est donc à 84% composé de cuivre, ce qui diffère grandement du premier dans lequel l'aluminium était prédominant.

#### B) Structure du fil n°2

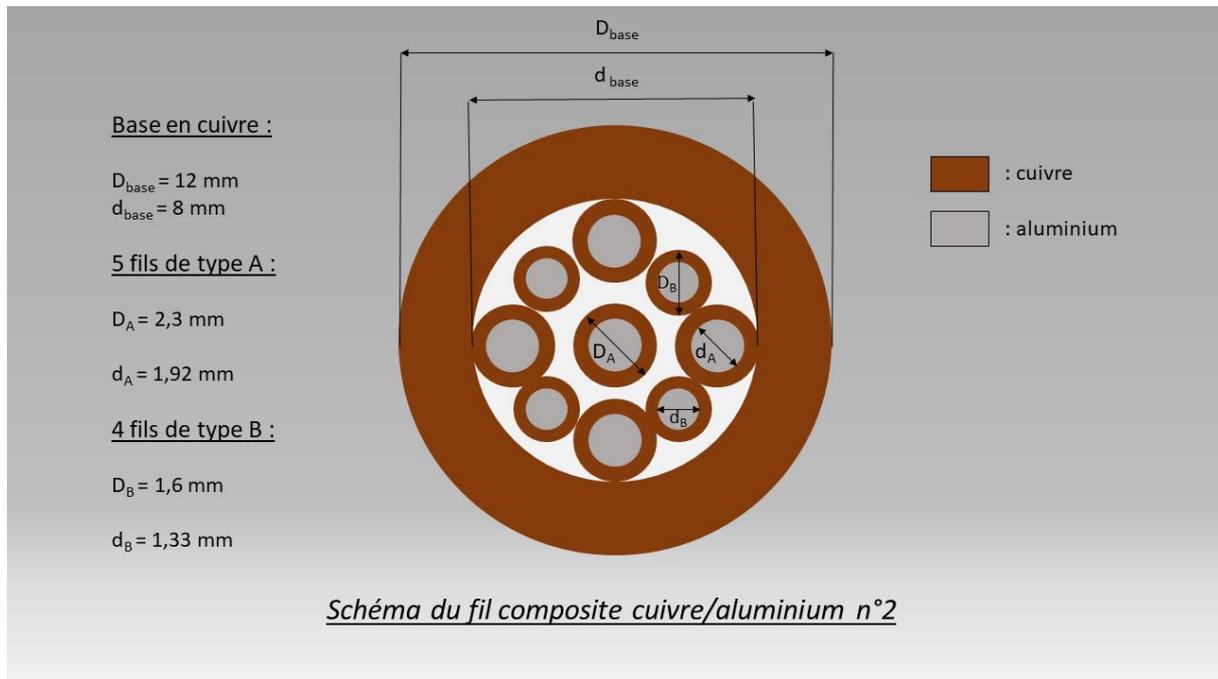
Le fil n°1 ayant une géométrie extrêmement basique, il n'est pas nécessaire de revenir dessus.

En revanche, le second fil a laissé place à une réflexion dans l'élaboration de sa structure.

En effet, si nous voulions initialement positionner les fils internes en forme de cercle jusqu'à atteindre le centre du tube, nous nous sommes rapidement ravisés. Il était quasiment impossible de conserver l'emplacement que nous souhaitions leur allouer. Nous avons alors opté pour une disposition en forme de croix, comme le nombre 5 d'un dé, pour les 5 fils de 2,3mm. Nous avons complété l'espace vide entre chacun de ces fils par 4 échantillons de 1,6 mm.

La disposition finale est donc celle présentée ci-dessous :

*Schéma 1 - Structure du fil n°2*



### 3.2.2. Tréfilage

Le tréfilage est une méthode de réduction de diamètre de fil métallique par traction mécanique. Le fil est réduit dans une machine appelée tréfileuse.

*Figure 2 - Tréfileuse*



*Figure 2 - Tréfileuse*

Son mécanisme est assez simple. Le fil est tout d'abord réduit à son extrémité par appointage afin qu'il puisse passer dans une filière.

*Figure 3 - Filière de tréfilage*

A la base de cette dernière, du lubrifiant en poudre est utilisé pour diminuer le coefficient de friction. Cela évite l'échauffement et le risque de casse.

Une précaution est à prendre. En effet, la réduction dans la filière ne doit pas excéder les 20%.

Mais d'ailleurs comment le fil est-il affiné ?

Une pince posée sur un vérin juste après la tréfileuse permet d'étirer le fil. Il aura donc le diamètre de de cette dernière. Par conservation de la matière, sa longueur va augmenter au fil des passages, son diamètre réduisant. Il est ainsi souvent nécessaire de le couper, le banc mesurant 3 mètres de longueur.



*Figure 3 - Filière de tréfilage*

*Protocole tréfileuse :*

- Choisir une filière appropriée afin qu'une dizaine de centimètres de fil puisse y pénétrer pour l'accrocher à la pince
- Réduire le diamètre à l'aide d'une appointeuse\*
- Placer la filière dans son emplacement
- Positionner le fil dans la tréfileuse  
Figure 4 - Fil dans tréfileuse
- Maintenir le bout du fil à l'aide de la pince  
Figure 5 - Pince tréfileuse
- Recouvrir le fil et la filière avec du lubrifiant
- Fermer le boîtier de sécurité
- Actionner la machine en appuyant sur le bouton vert puis en actionnant la manette tout en veillant au bon déroulement du processus



Figure 4 - Fil dans tréfileuse



Figure 5 - Pince tréfileuse

- \*Protocole appointeuse : Figure 6 - Appointeuse
- Allumer la machine, si on utilise un modèle motorisé
- Passer le fil sur un calibre adapté jusqu'à obtention du diamètre souhaité, tout en veillant à ne pas le déformer ou l'abîmer



Figure 6 - Appointeuse

### 3.3. Etude des fils

#### 3.3.1. Caractérisation des propriétés mécaniques

Les matériaux possèdent différentes caractéristiques mécaniques. Le module de Young, le coefficient d'élasticité, la contrainte ou encore la déformation sont des propriétés importantes pour différencier les matériaux.

Notre objectif est de déterminer expérimentalement ces valeurs.

#### A) Présentation de la manipulation : les essais de traction

La machine de traction possède un capteur de force fixé sur une traverse mobile.

Elle possède aussi un capteur de déplacement, deux mors situés aux extrémités permettant de fixer le matériau, un enregistreur graphique et un extensomètre permettant de mesurer l'allongement de notre fil composite.

Figure 7 - Machine de traction



Figure 7 - Machine de traction

*Protocole essai de traction :*

- Couper un morceau de 40cm environ du fil composite (40cm)
- Placer les deux parties du fil dans les deux mors de la machine Figure 8 - Fil dans machine de traction
- Accrocher l'extensomètre avec deux élastiques à l'aide d'un crochet
- Mesurer la valeur initiale de la longueur du fil  $L_0$  entre les élastiques de l'extensomètre (valeur donnée)
- Régler ensuite avec une télécommande la tension de du fil
- Étalonner la machine et étirer le fil doucement jusqu'à obtenir une valeur de « strain » proche de 0. (Il est important de tendre légèrement le fil initialement pour que nos valeurs soient cohérentes)
- Initialiser les valeurs d'extension du fil avec le logiciel relié à la machine



Figure 8 - Fil dans machine de traction

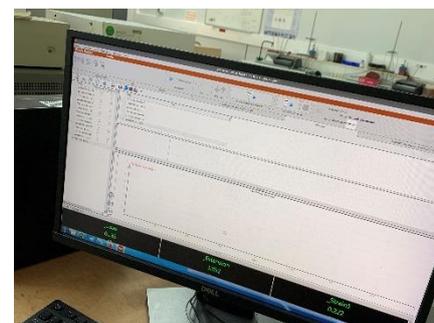


Figure 9 - Ecran de contrôle d'essai de traction

Figure 9 - Ecran de contrôle d'essai de traction

- Vérifier que la force initiale appliquée au fil est négligeable
- Démarrer la traction du fil

L'expérience s'arrête lors de la rupture du matériau.

On récupère ainsi les données statistiques comportant l'évolution de l'extension du fil composite en fonction de la force appliquée au cours du temps dans un tableau Excel.

On peut alors calculer la valeur de contrainte en combinant la charge « Load » et la surface de la section de l'échantillon.

On calcule également la valeur de déformation à l'aide de l'extension et la longueur initiale  $L_0$ . On peut enfin en déduire la valeur de la déformation max et de la contrainte max.

On trace un graphique représentant la contrainte en fonction de la déformation.

On en déduit de ce graphique les valeurs de limite d'élasticité et de déformation maximum élastique, en repérant les zones élastique et plastique. On effectue enfin une régression linéaire sur les valeurs de la zone élastique afin d'obtenir le coefficient directeur de cette droite qui est la valeur du module d'Young,  $\sigma$ .

## B) Exploitation des données et résultats

Nous allons ainsi présenter l'analyse d'un essai de traction, réalisé sur un échantillon du premier fil composite.

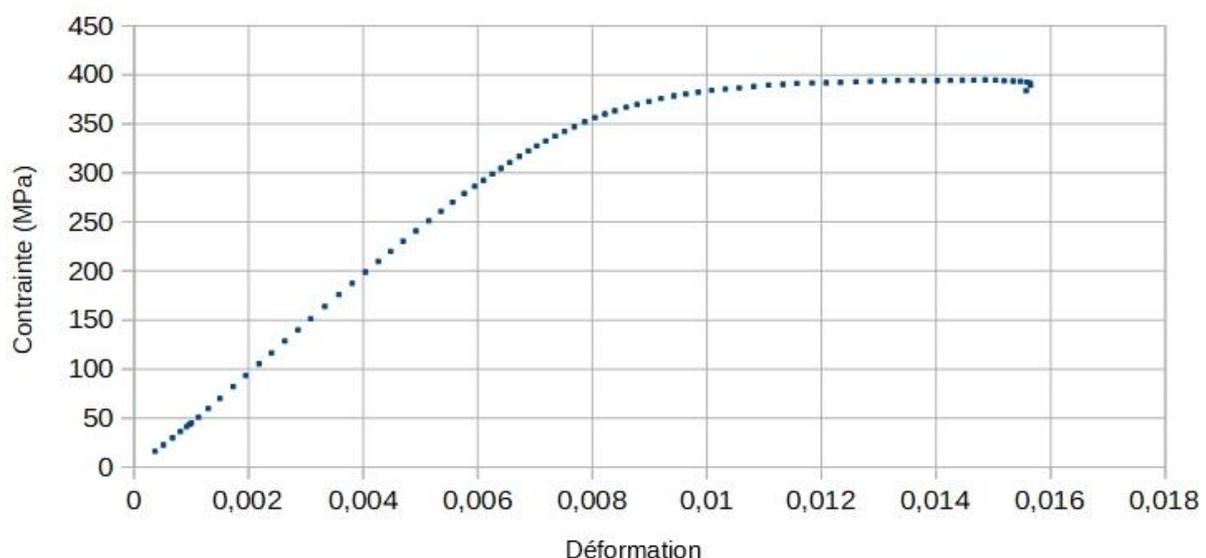
Données :

- Longueur initiale de l'extensomètre ( $L_0$ ) : 12,5 mm

- Diamètre du fil :  $D = 2$  mm

- Surface du fil :  $S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 12,57 \text{ mm}^2$

Grâce à l'essai de traction, nous obtenons la courbe ci-dessous :

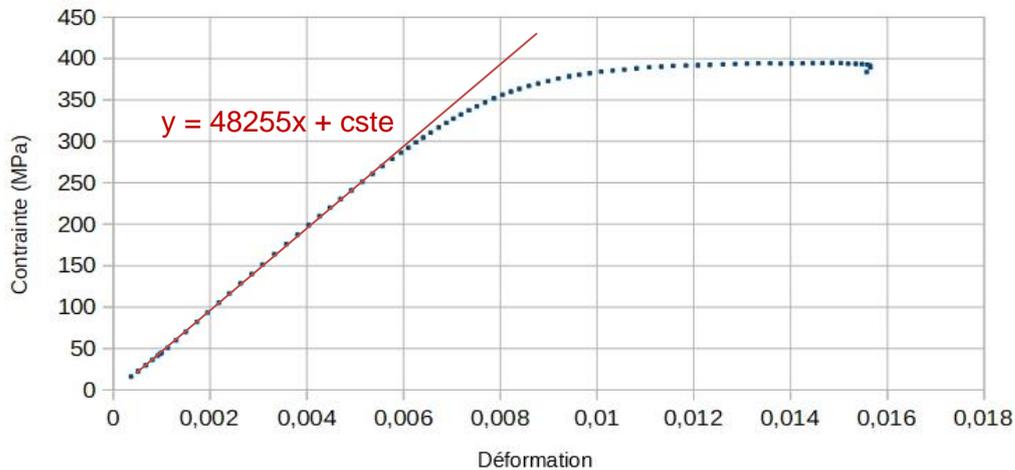


Essai de traction fil n°1,  $D = 2$  mm

Pour commencer, calculons le module d'Young par régression linéaire.

Pour cela, on sélectionne le maximum de points appartenant au domaine élastique, et on effectue une régression linéaire. Le module d'Young correspond alors au coefficient directeur de la droite ainsi tracée.

On obtient ici :  $E = 48255 \text{ MPa} = 48,255 \text{ GPa}$



Régression linéaire sur les points de la zone élastique

A présent, intéressons-nous à la limite d'élasticité,  $\sigma_{0,2}$ .

On déplace la droite précédente obtenue par régression linéaire pour qu'elle débute au niveau de l'abscisse correspondant à une déformation de 0,2%.

La limite d'élasticité est alors l'ordonnée du point d'intersection de la droite et de la courbe d'essai de traction.

On note :  $\sigma_{0,2} = 378 \text{ MPa}$

La troisième grandeur que nous pouvons calculer est la contrainte maximale  $\sigma_{max}$ . Il suffit de chercher la valeur maximale dans la colonne allouée aux valeurs de contraintes du tableur, grâce à l'opérateur MAX(valeur1 ; valeur2).

On obtient ainsi :  $\sigma_{max} = 394,83 \text{ MPa}$

Calcul de la déformation :  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

avec

$\varepsilon$  : sans unité

$\Delta L$  : extension du fil (mm)

$L_0$  : longueur initiale du fil (mm)

La valeur la plus élevée de « strain » obtenue est :  $\Delta L = 0,195 \text{ mm}$

On a alors :  $\varepsilon = \frac{0,195}{12,5} = 0,016$

En réalisant les mêmes étapes pour chacun des essais de traction, nous avons obtenu les valeurs suivantes que nous avons regroupées dans un tableau, [Tableau 5 - Résultats essais de traction](#).

Tableau 5 - Résultats essais de traction

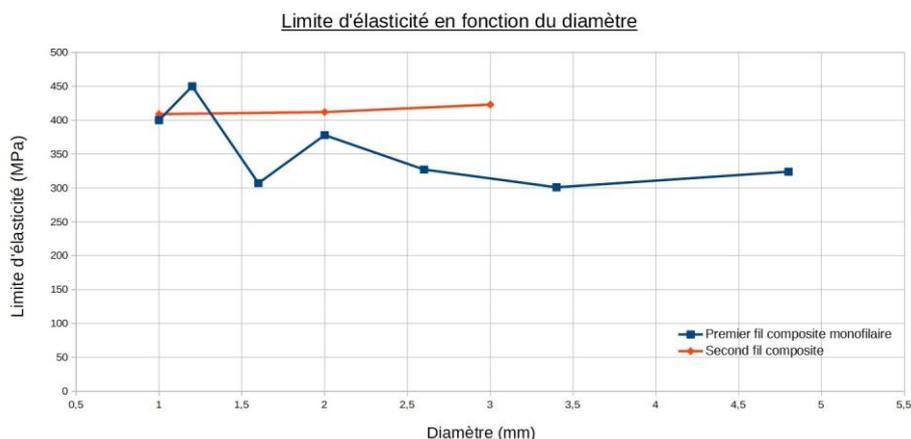
	Diamètre de la filière	Diamètre Réel	Module d'Young	Limite d'élasticité	Contrainte Max	Déformation Max
	D <sub>f</sub> (mm)	D (mm)	E (GPa)	σ <sub>0,2</sub> (MPa)	σ <sub>max</sub> (MPa)	ε
Témoin	1	1	23	266	392	0,03
	1	1	41	338	397	0,042
	1	1	35	341	419	0,021
	1	1	22	333	422	0,03
<b>Valeur moyenne Témoin</b>			<b>30,5</b>	<b>319,5</b>	<b>407,5</b>	<b>0,031</b>
Premier fil composite monofilaire	3,8	4,8	48	324	331	0,016
	3,3	3,4	40	301	348	0,02
	2,6	2,6	51	327,17	347	0,029
	2	2	48,255	378	394,83	0,016
	1,6	1,6	47,046	307	327	0,013
	1,3	1,2	56,87	450	458,307663	0,009
	1	1	39,36	400	405,051439	0,007
Second fil composite	3.4	3.4	56,869	409	448,7	0,031
	2.5	2.5	58,064	412	463,3	0,048
	1.7	1.7	52,258	423	482,7	0,019

### C) Analyse et interprétation

Pour finir à propos des essais de traction, nous allons analyser les valeurs obtenues.

Commençons par le module d'Young. On observe que celui-ci varie peu en fonction du diamètre et admet des valeurs moyennes d'environ 47 GPa et 56 GPa respectivement pour les fils 1 et 2. Le second fil, à la géométrie plus élaborée, a donc un module d'Young globalement supérieur ce qui indique qu'il est légèrement plus rigide. On peut néanmoins s'étonner qu'avec 84% de cuivre, le second fil ne soit pas nettement plus rigide, le module d'Young du cuivre pur étant d'environ 112 (cf [Tableau 1 - Propriétés mécaniques du cuivre](#), page 8).

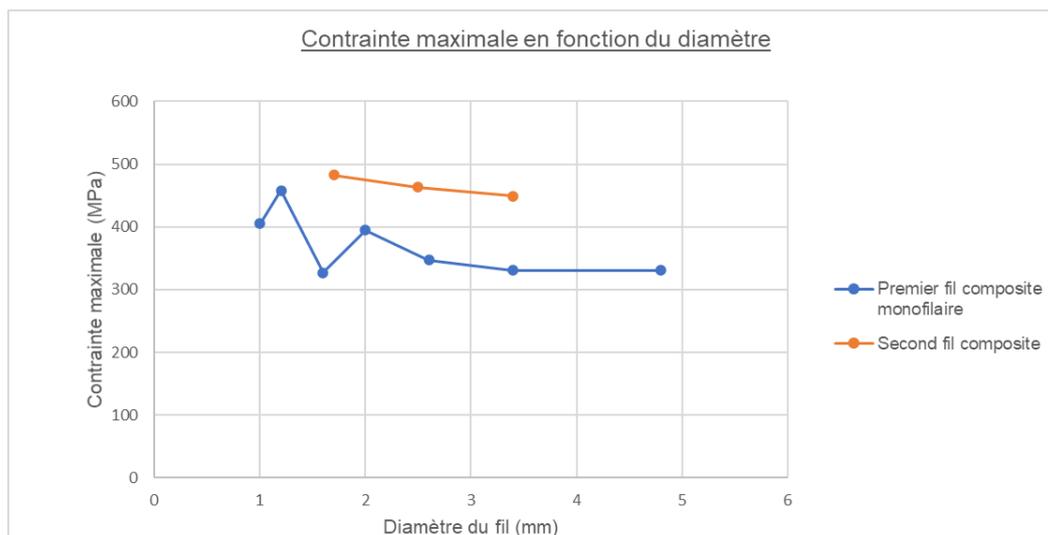
Concernant la limite d'élasticité, nous avons décidé de tracer un graphe pour mieux visualiser son évolution en fonction du diamètre, pour les deux fils que nous avons conçus.



On observe bien à travers le graphique une augmentation de la limite d'élasticité avec une diminution du diamètre. Cependant, certains points ne semblent pas suivre cette décroissance. Ces erreurs peuvent s'expliquer notamment par un glissement du fil dans la machine de traction, pour les fils en dessous de 2mm de diamètre. Ces glissements peuvent être expliqués par un mauvais serrage du fil. En effet, les machines de l'INSA ne permettent pas de faire plusieurs tours autour des poulies de traction. De ce fait, notre échantillon est maintenu uniquement sur quelques centimètres par les pinces métalliques sous les poulies. Ces attaches ne sont donc pas optimales pour la traction. D'autre part, le passage du fil dans les différentes filières au travers du lubrifiant de la tréfileuse augmente son graissage. Ainsi, notre fil est devenu au fil des passes, de plus en plus glissant ce qui renforce les risques d'erreurs.

Au-delà de ces imprécisions, on peut observer que le second fil admet des limites d'élasticités plus importantes. De plus, les valeurs semblent bien moins varier en fonction du diamètre. Nous n'avons pas réalisé de test sur des fils plus épais, néanmoins on peut imaginer que l'amélioration serait d'autant plus importante par rapport au fil 1. On peut ainsi penser que pour des besoins de câbles aux diamètres élevés sollicités en traction, le second fil connaîtrait une altération irréversible de sa structure pour des valeurs de contraintes nettement supérieures.

De même, la contrainte maximale que peut supporter l'échantillon augmente lorsque son diamètre diminue. On trace un second graphique équivalent au premier pour illustrer cela.



On observe une nouvelle fois que le second fil, à base de plusieurs fils composites, résiste à des contraintes plus élevées que le fil 1 pour un même diamètre. Contrairement à la limite d'élasticité, la contrainte maximale supportée par le fil 2 augmente lorsque son diamètre décroît. C'est assurément une des propriétés les plus accrues par la composition du fil 2, puisqu'il surpasse les capacités de son homologue monofilaire de près de 100 MPa pour un même diamètre, soit entre 25% et 30% davantage.

Pour finir, la déformation maximale, seule propriété diminuant pour des diamètres de plus en plus faibles, s'avère plus élevée pour le second fil composite. On ne peut pas vraiment dire qu'il soit nettement plus déformable car nous ne disposons pas de beaucoup de valeurs et qu'elles semblent assez variables. Néanmoins, si cela se confirmait, on pourrait en déduire que le fil 2 rompt plus tardivement lorsqu'il est soumis à une contrainte équivalente.

Ainsi, on en conclut que les matériaux composites peuvent assez simplement être améliorés en repensant leur géométrie interne et leur composition.

### 3.3.2. Analyse de la structure des fils

#### A) Mise au point d'échantillons par enrobage de résine

Afin de pouvoir observer la structure interne d'un fil, un moyen assez rapide et accessible s'avère être de concevoir des échantillons à polir dans lesquels sont insérés de petits morceaux du fil à étudier.

*Protocole enrobeuse* : [Figure 10 - Enrobeuse](#)

- Couper des morceaux de fil de quelques centimètres à la pince
- Placer un morceau de fil à l'horizontale et un à la verticale dans un clips plastique
- Mettre l'échantillon sur le piston de l'enrobeuse
- Ajouter une cuillère de résine solide
- Fermer avec le capuchon et visser
- Appuyer sur un bouton actionnant la remontée du piston jusqu'à atteindre une pression de 20 bar
- Enclencher le préchauffage de la machine
- Rester à proximité pendant la réalisation du cycle de la machine automatique durant environ 20 min



*Figure 10 - Enrobeuse*

#### B) Polissage progressif

Une fois les échantillons obtenus, il est nécessaire de faire disparaître la couche de résine séparant la surface du fil.

*Protocole polissage* : [Figure 11 - Polisseuse](#)

- Placer un papier de verre sur la machine
- Mettre de l'eau sur le papier de verre en rotation
- Placer l'échantillon sur le papier de verre
- Nettoyer l'échantillon poli à l'eau et l'éthanol
- Sécher l'échantillon
- Observer le polissage au microscope optique



*Figure 11 - Polisseuse*

Ce protocole est réalisé plusieurs fois pour des grains de papier de verre de 800 à 4000. Entre chaque papier, nous tournons notre échantillon de 90° pour enlever les rayures causées par le papier de verre. Cela permettra d'obtenir une image plus nette au microscope.

### C) Observation au microscope numérique et résultats

L'objectif final est de pouvoir analyser le fil par deux coupes : une transversale et une longitudinale.

*Protocole microscope numérique :*

- initialiser et effectuer la mise au point automatique
- observer des coupes longitudinales et transversales
- faire des captures d'écran avec l'échelle

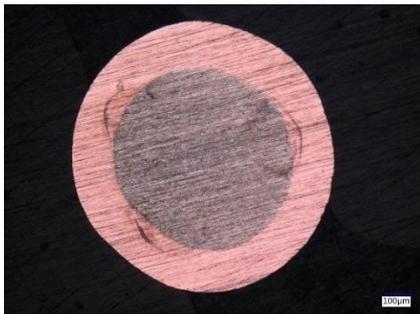


*Figure 12 - Utilisation du microscope*

Nous avons pu analyser des échantillons du fil témoin qui nous a permis d'apprendre toutes les manipulations.

Figure 12 - Utilisation du microscope

Il est normalement équivalent au fil composite n°1, c'est pourquoi nous n'avons pas fait à nouveau la manipulation.



*Coupe longitudinale et transversale du fil composite témoin*

Le microscope numérique étant hors service lors de la dernière séance, nous regrettons de ne pas avoir eu l'occasion de réaliser des clichés de notre deuxième fil.

Nous aurions pu ainsi observer si la géométrie schématisée sur le Schéma 1 - Structure du fil n°2 avait été conservée après le tréfilage.

## **4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

### **4.1. Conclusions sur le travail réalisé**

Aujourd'hui les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans les secteurs industriels, dont celui de l'aéronautique. De même, leur utilisation tend à se généraliser. L'A380 d'Airbus, par exemple, en contient 25% et le Boeing près de 50% ! Cet engouement vient du fait que les matériaux composites ont une plus faible masse volumique qu'un matériau pur, pour des propriétés mécaniques similaires. Cela permet l'allègement considérable des structures et donc, dans le secteur aérien, de diminuer considérablement la consommation de carburant et les émissions de polluant des avions.

Notre projet se focalise sur l'étude des composites basés sur du cuivre et de l'aluminium. Ce dernier, moins lourd que le cuivre, permet de satisfaire la notion d'un matériau composite plus léger. Au fil de nos expériences de tractions, nous avons pu déterminer les caractéristiques mécaniques de deux fils composites aux structures microscopiques différentes.

Nous avons ainsi pu vérifier que plus le diamètre du fil est faible, plus la limite élastique est élevée. Cette caractéristique est donc avantageuse pour des besoins de fils de faible diamètre.

Enfin, l'élaboration de deux fils de structure et de fraction en cuivre et en aluminium différentes, nous permet de conclure que la géométrie et la composition sont deux facteurs modifiant leurs caractéristiques mécaniques. En effet, nous avons vu que plus la concentration en cuivre dans le fil est importante, plus la contrainte maximale est grande. De même, le module d'Young et la contrainte d'élasticité sont plus élevés au sein du fil 2, composé à 84% de cuivre, que pour le premier fil comportant seulement 2/3 de ce matériau.

On peut donc faire varier les qualités de notre composite en fonction de la quantité de chacun des matériaux. La conception des fils composites peut alors s'adapter au mieux au besoin du constructeur. On aurait tendance à dire que plus le fil conducteur est riche en cuivre plus ses caractéristiques sont intéressantes. Cependant, il ne faut pas oublier que son coût est bien plus élevé que celui de l'aluminium. De plus, le processus de fabrication des matériaux composites nécessite du matériel, du personnel et du temps. Toutes ces ressources ont un coût qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de la conception du matériau à produire.

### **4.2. Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C projet**

Notre travail nous a ainsi permis de découvrir les matériaux composites et leur intérêt dans l'industrie. Nous avons été formés à manier différentes machines de conception et de traction. Cet apprentissage nous sera très utile à l'avenir car la majorité du groupe souhaite rejoindre le département de mécanique l'année prochaine.

D'autre part, ce projet a renforcé nos capacités à travailler en équipe. Nous avons dû nous répartir les tâches et classer les centaines de documents utilisés sur l'espace de travail collaboratif créé à cet effet. L'organisation a donc été un point clé pour gagner en efficacité.

Finalement, nous avons tous pris plaisir à réaliser ce travail, ce qui nous a poussé à nous investir davantage.

### **4.3. Perspectives pour la poursuite du projet**

Comme nous le savons, le cuivre a pour application principale de conduire un courant électrique. L'allier à de l'aluminium a donc pour but de renforcer mécaniquement ce fil conducteur. Nous pourrions ainsi nous pencher sur des propriétés telles que la conductivité électrique.

Enfin, il serait intéressant à l'avenir d'étudier l'élaboration de matériaux composites composés d'autres métaux et pourquoi pas d'autres types de matériaux.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

### 5.1. Propriétés mécaniques des matériaux

*La science des matériaux :*

[Introduction à la science des matériaux — Wikiversité \(wikiversity.org\)](#) (valide à la date du 13/01/2015)

[Introduction à la science des matériaux/Propriétés générales des matériaux — Wikiversité \(wikiversity.org\)](#)(valide à la date du 16/07/2019)

*La conductivité électrique :*

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivité\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivité_électrique) (valide à la date 28/10/2020)

*Propriétés générales des matériaux :*

[https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction\\_la\\_science\\_des\\_matériaux/Propriétés\\_générales\\_des\\_matériaux#Conduire\\_ou\\_isoler](https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_la_science_des_matériaux/Propriétés_générales_des_matériaux#Conduire_ou_isoler) (valide à la date du 16/07/2019)

*Application des matériaux composites :*

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/6570/6570-materiaux-composites-et-structures-composites-ensps.pdf> (valide à la date 17/05/2011)

*Propriétés du cuivre :*

<https://copperalliance.fr/le-cuivre/les-proprietes-du-cuivre/> (valide en 2018)

<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=ProprietesCuivre&LN=FR> (valide en 2021)

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-cuivre-premier-metal-travaille-homme-779/page/2/> (valide à la date du 24/09/2015)

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/cuivre/2-proprietes-du-cuivre/> (valide à la date du 11/06/2021)

*Propriétés de l'aluminium :*

<https://www.groupe-installux.com/laluminium/proprietes/>(valide en 2019)

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/aluminium/7-proprietes-de-l-aluminium/> (valide à la date du 11/06/2021)

### 5.2. Etude des fils composites

*Fil d'aluminium recouvert de cuivre :*

[https://en.wikipedia.org/wiki/Copper-clad\\_aluminium\\_wire](https://en.wikipedia.org/wiki/Copper-clad_aluminium_wire) (valide à la date du 08/06/2021)

*Copper clad aluminium wire :*

[https://www.fujikura.co.jp/eng/products/infrastructure/conductors/01/2050049\\_12853.html](https://www.fujikura.co.jp/eng/products/infrastructure/conductors/01/2050049_12853.html) (valide en 2020)

*Matériaux composites dans l'industrie :*

<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/physique-materiaux-composites-avantages-industrie-11064/> (valide à la date du 25/03/2019)

*Performance du cuivre et de l'aluminium :*

<https://www.usinenouvelle.com/article/acier-cuivre-aluminium-toujours-plus-de-performances.N72344> (valide à la date du 19/05/1994)

C. Keller, F. Moisy, N. Nguyen, S. Eve, A. Dashti, B. Vieille, A. Guillet, X. Sauvage, E. Hug b, "Materials Characterization", page 1 à 3, parution en ligne le 15/12/2020

F. Moisy, A. Gueydan, X. Sauvage, A. Guillet, C. Keller, E. Guilmeau , E. Hug, "Materials and Design", introduction page 2, parution le 15.06/2018

### **5.3. Elaboration d'un fil**

*Emboutissage du fil :*

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Emboutissage> (valide à la date du 31/05/2021)

*Elaboration des alliages de cuivre :*

<https://metablog.ctif.com/2020/07/27/les-parametres-influents-lors-de-lelaboration-des-alliages-de-cuivre/> (valide à la date du 27/07/2021)

*Elaboration de matériaux composites à matrice métallique :*

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01674183/document> (valide à la date du 2/01/2018)

*Procédés de fabrication de structures composites :*

[http://www.uphf.fr/congres/RFIS2005/Presentations/Session7-2/RP\\_Carreira-RFIS2005.pdf](http://www.uphf.fr/congres/RFIS2005/Presentations/Session7-2/RP_Carreira-RFIS2005.pdf)  
(valide en juin 2005)

*Etirage du fil :*

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Étirage> (valide à la date du 13/12/2020)

*Tréfilage :*

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Tréfilage> (valide à la date du 29/01/2021)

*Etirage de l'aluminium :*

<https://ceal-aluquebec.com/etirage-sur-forme-aluminium/> (valide en 2017)

*Le tréfilage des matériaux :*

<http://leslubrifiants.com/2016/06/27/le-trefilage-est-une-technique-de-mise-en-forme-a-froid-des-metaux/> (valide à la date du 27/06/2017)

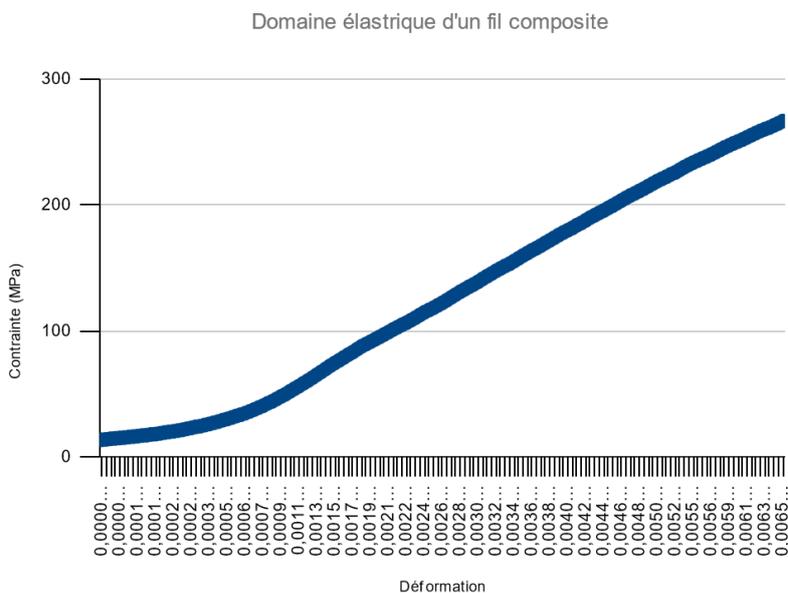
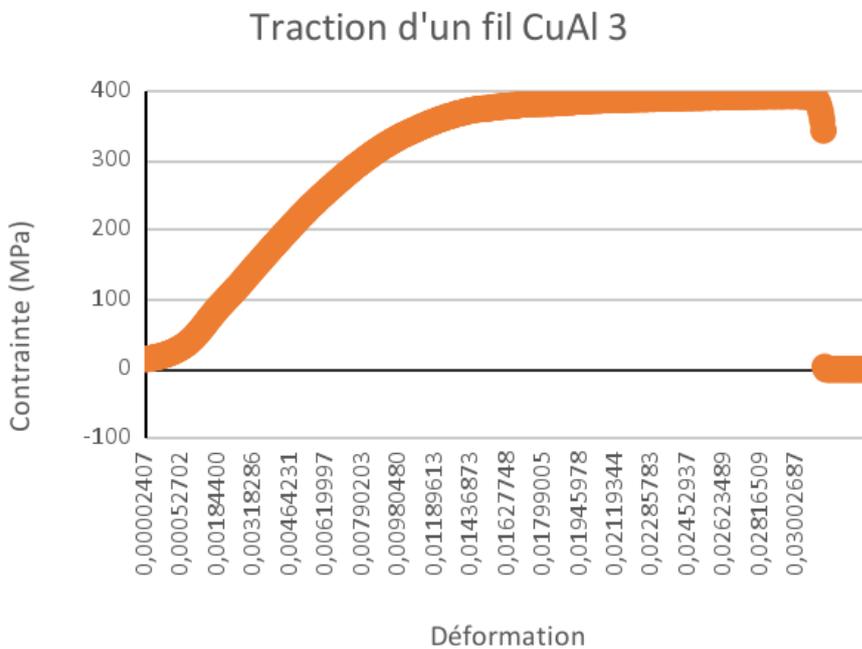
## 6. ANNEXES

### 6.1. Courbes d'essais de traction du fil témoin

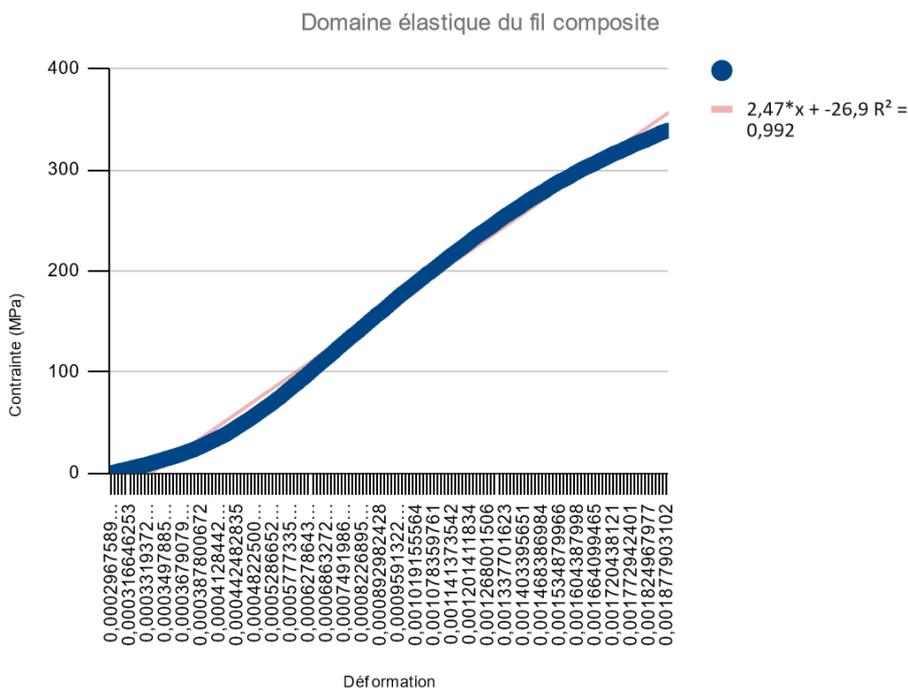
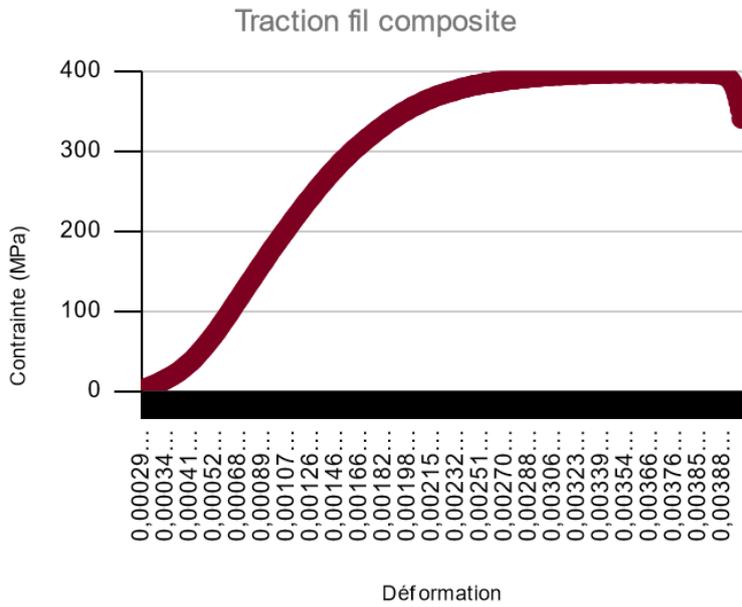
Données initiales :

- Longueur initiale de l'extensomètre (L0) : 125 mm
- Diamètre du Fil (d) : 1mm
- Surface du fil :  $S = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0,785 \text{ mm}^2$

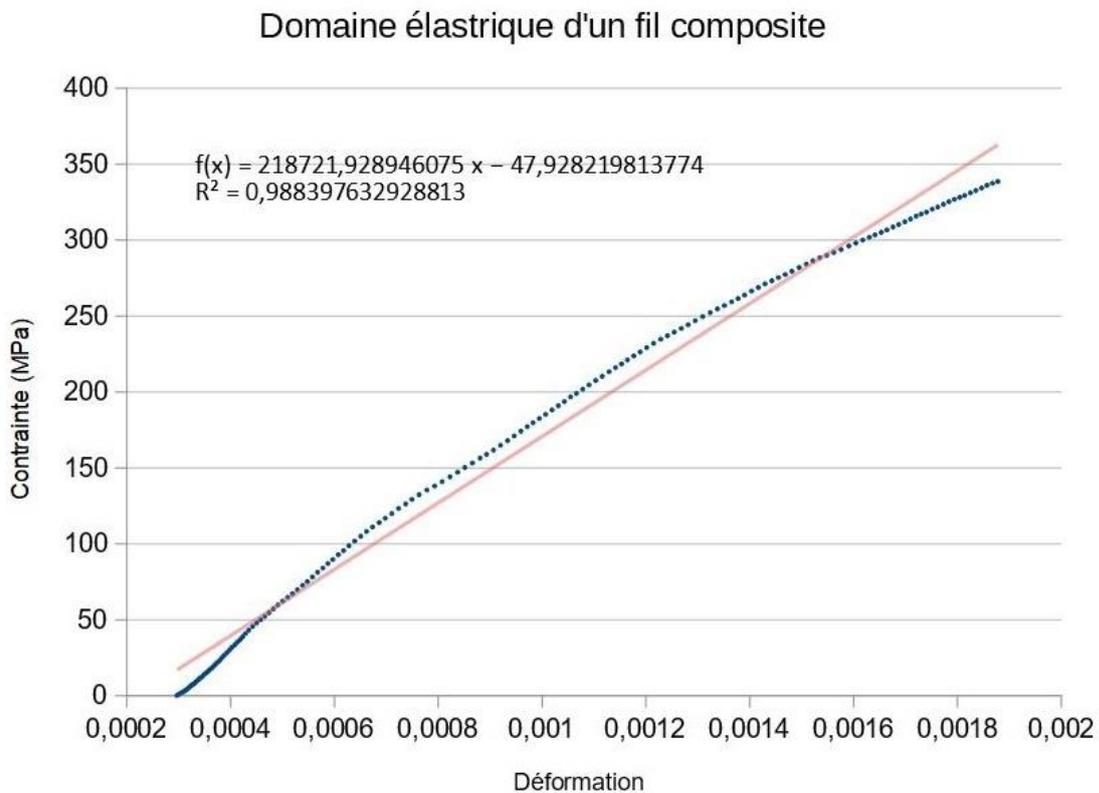
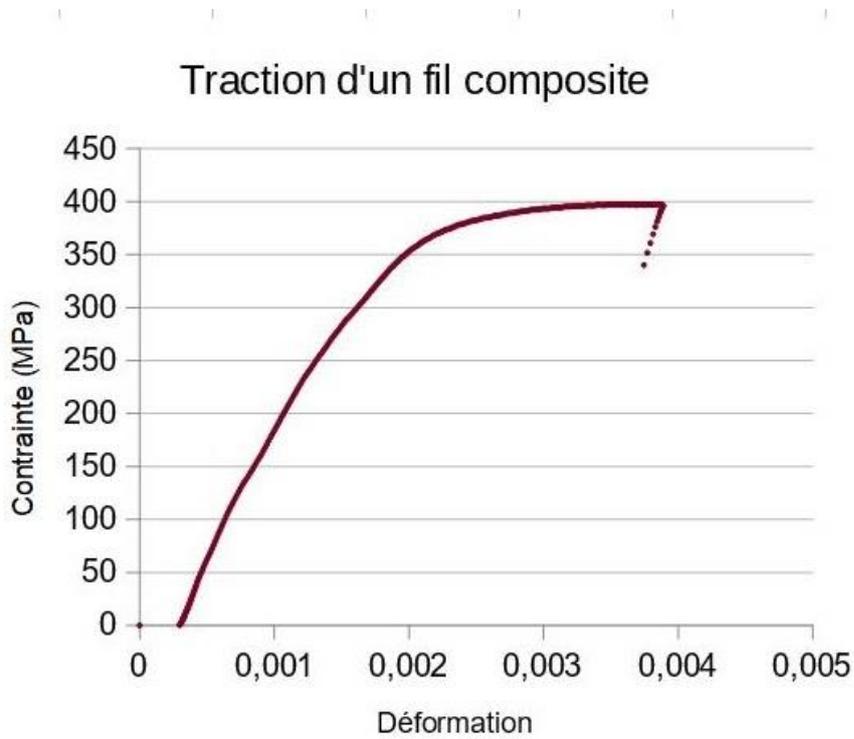
- Essai 1 :



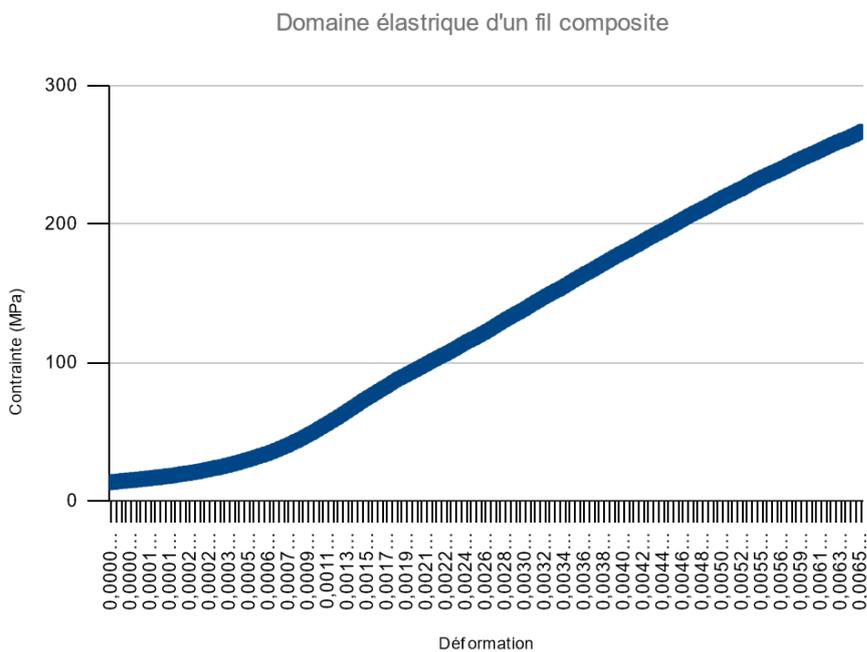
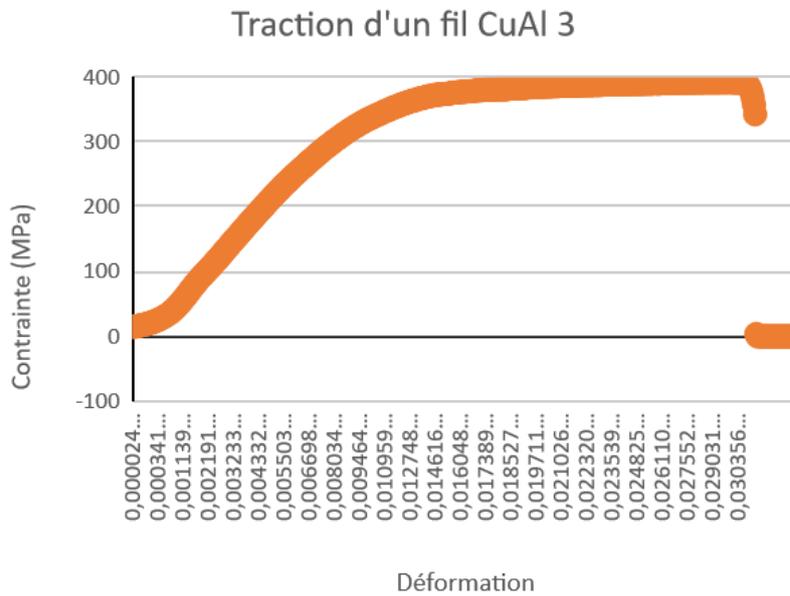
- Essai 2 :



- Essai 3 :



- Essai 4 :

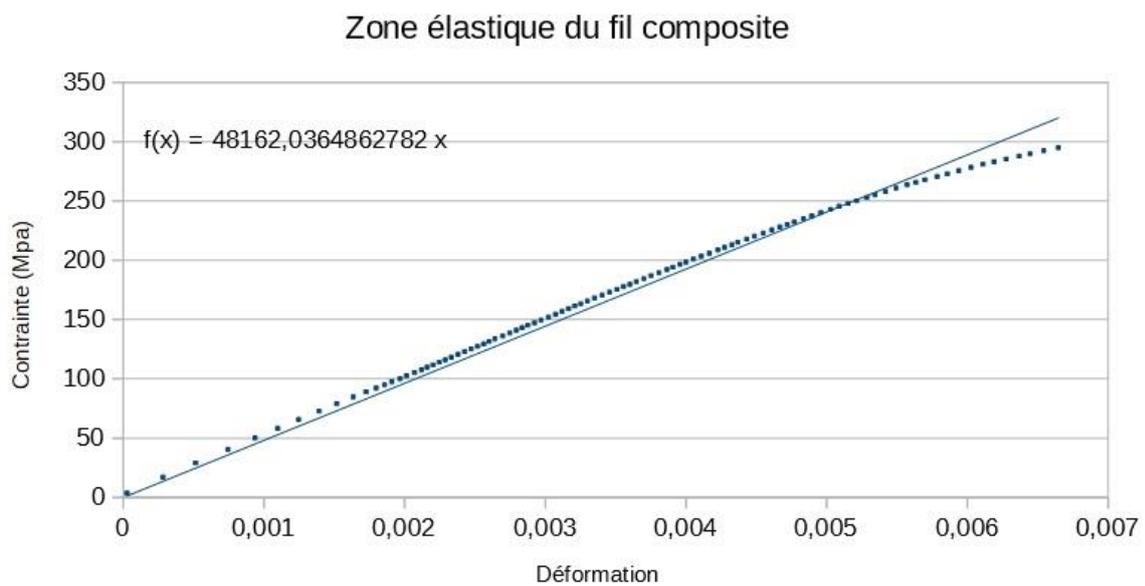
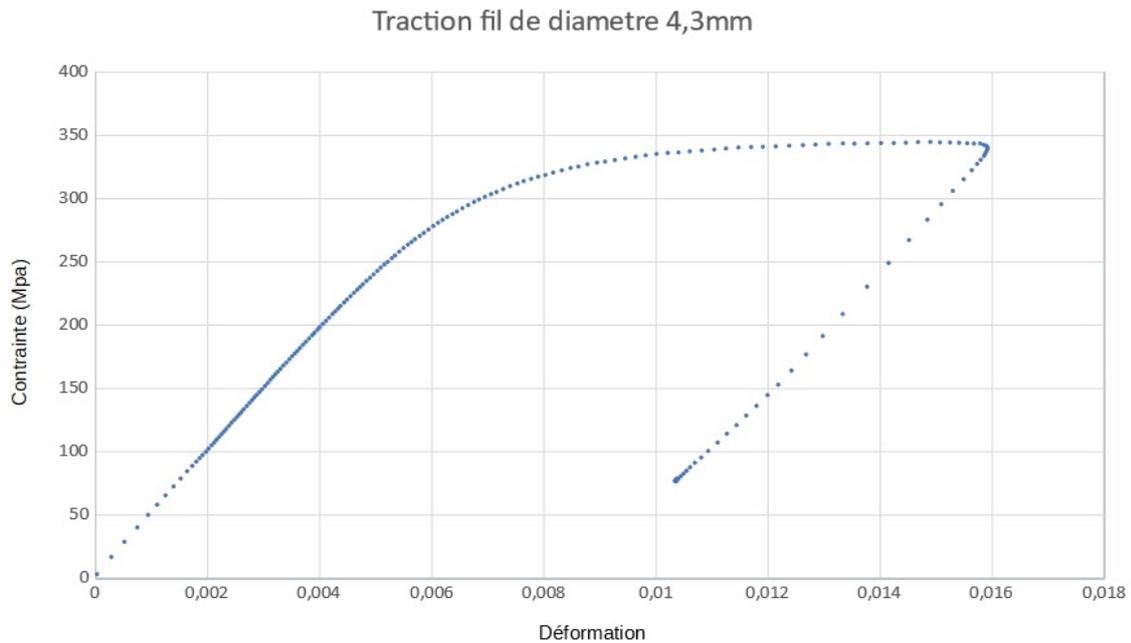


## 6.2. Courbes de traction du fil composite n°1

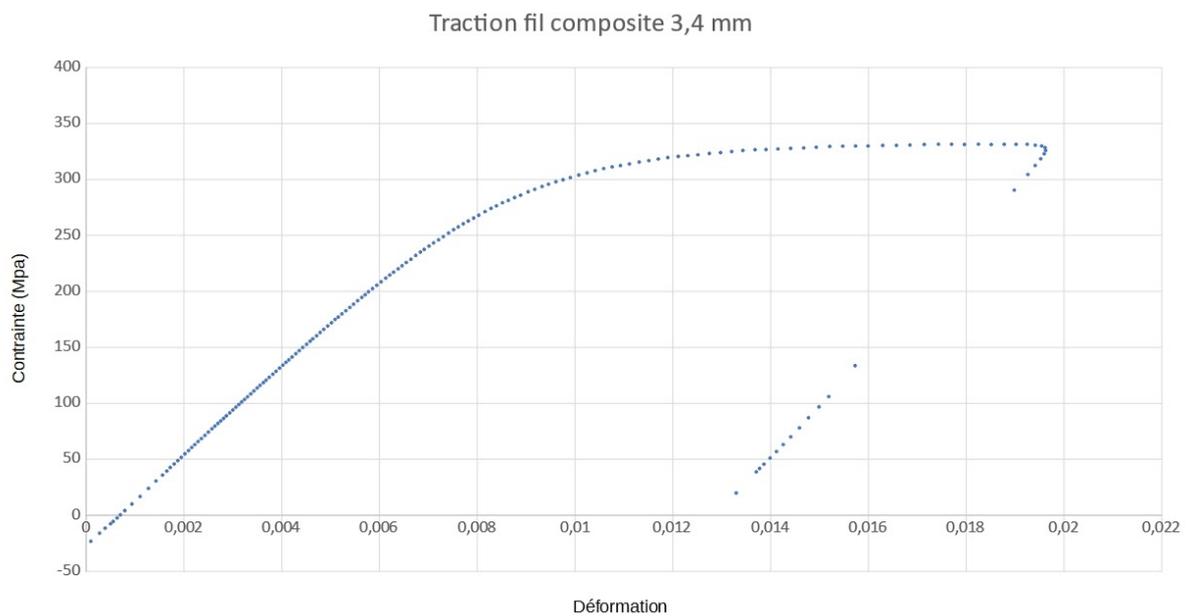
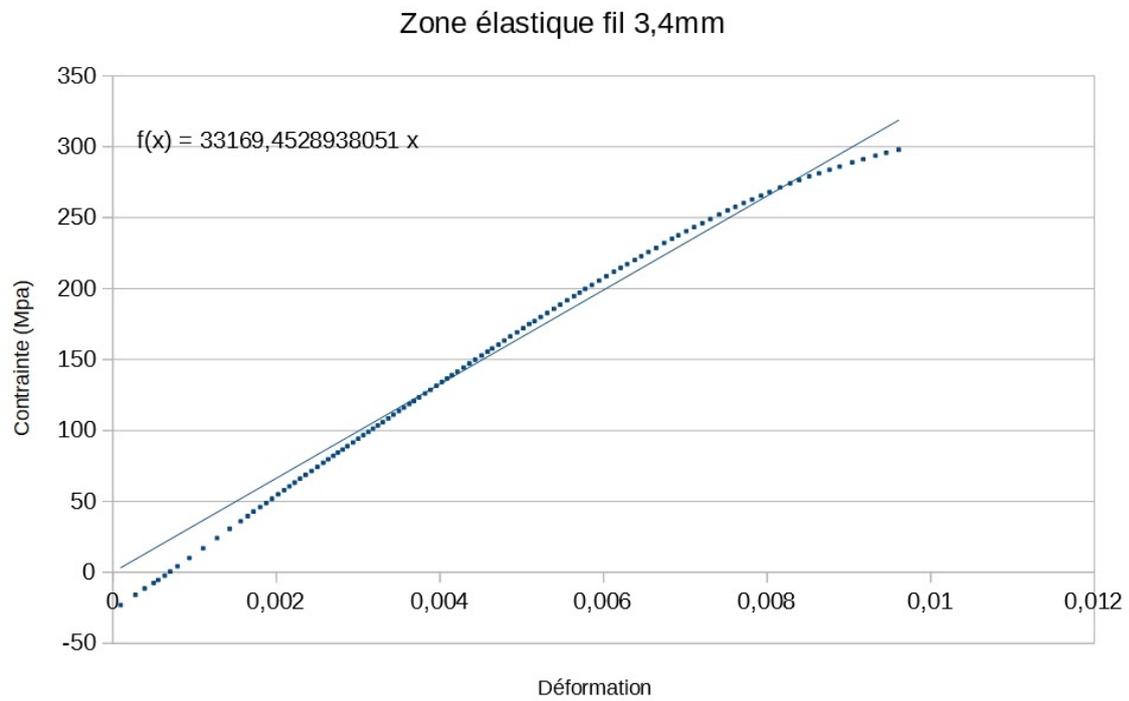
Données initiales :

- Longueur initiale de l'extensomètre (L0) : 125 mm

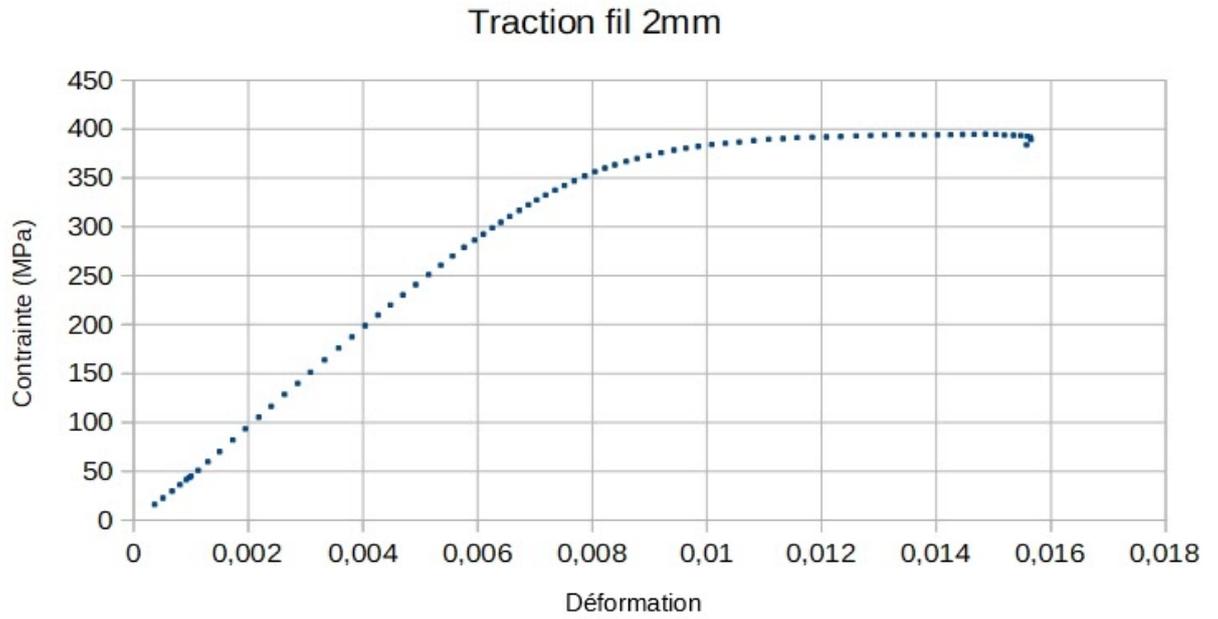
- Traction du fil à 3,8mm de diamètre



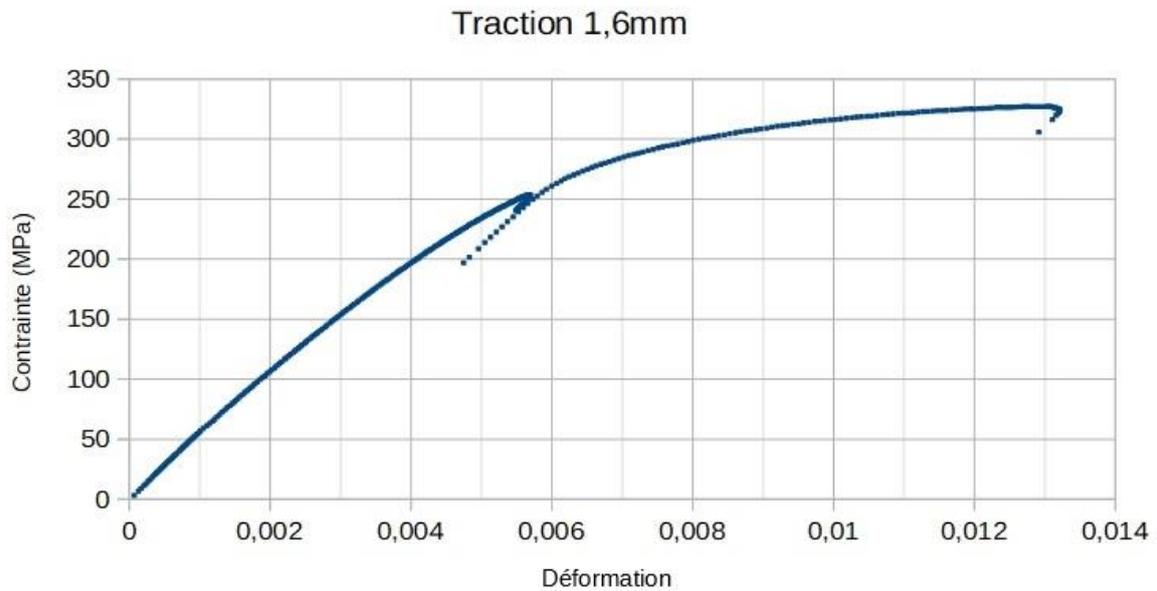
- Traction du fil à 3,3mm de diamètre



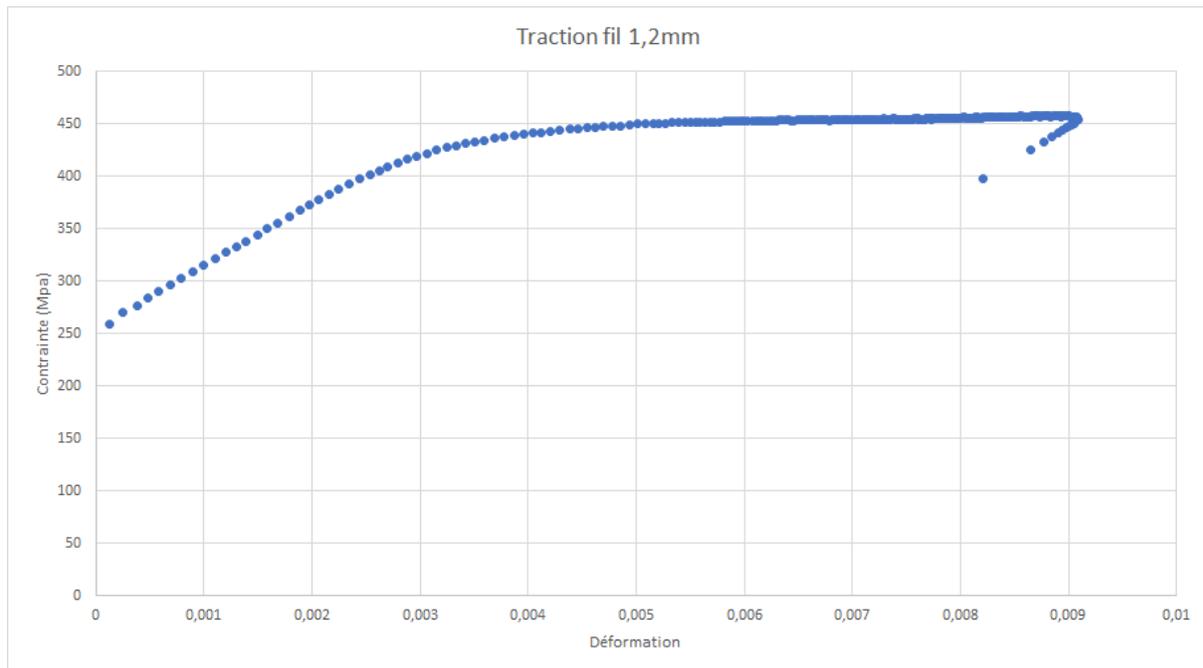
- Traction du fil à 2 mm de diamètre



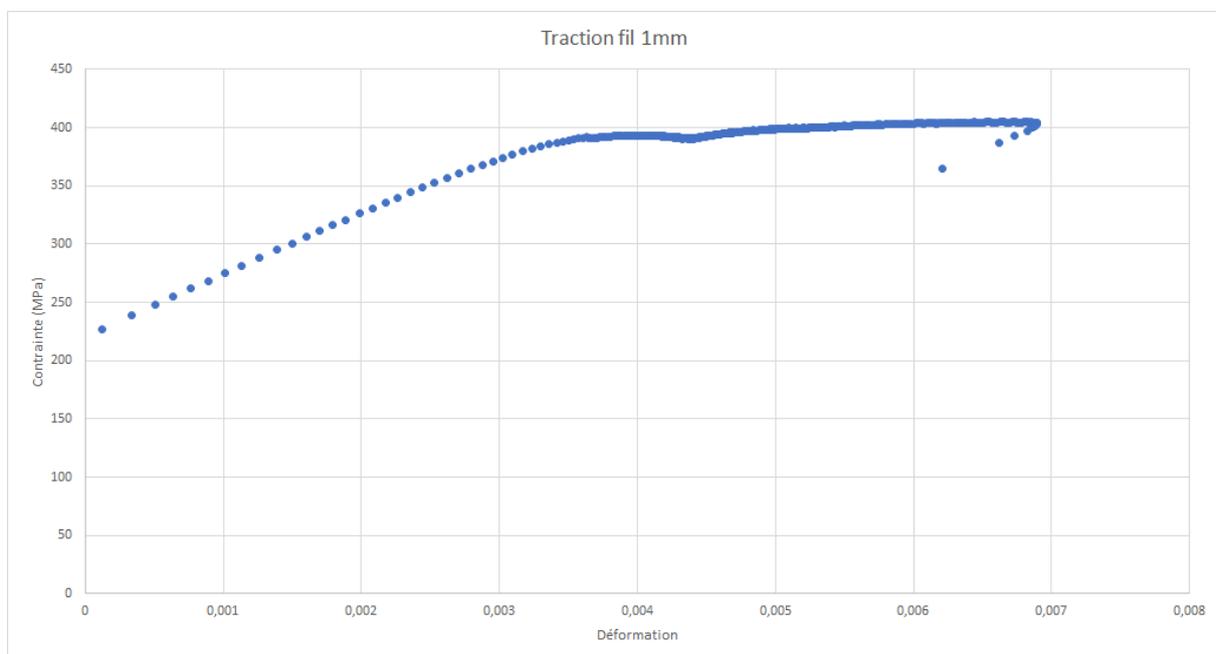
- Traction du fil à 1,6mm de diamètre



- Traction du fil à 1.2mm de diamètre

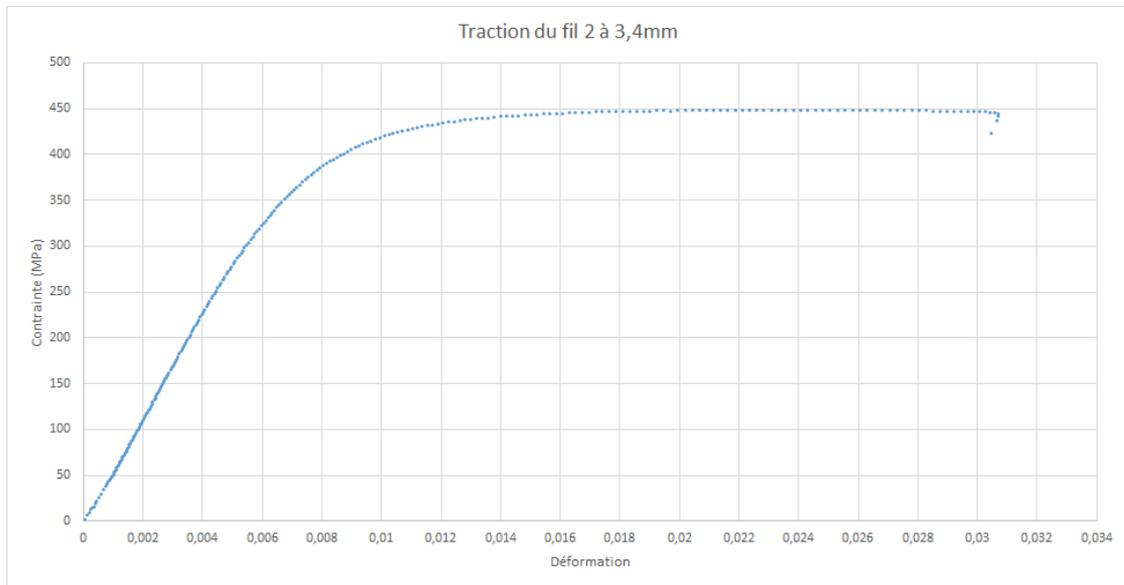


- Traction du fil à 1mm de diamètre

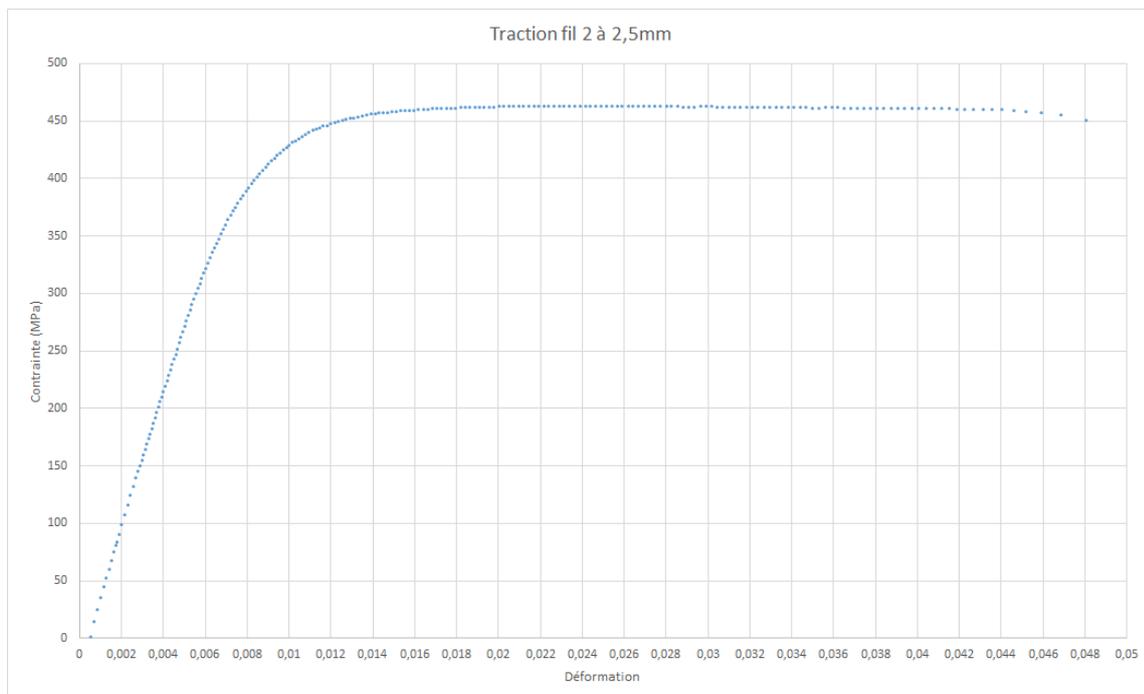


### 6.3. Courbes de traction du fil composite n°2

- Traction à 3,4mm



- Traction à 2.5mm de diamètre



- Traction du fil à 1,7mm de diamètre

