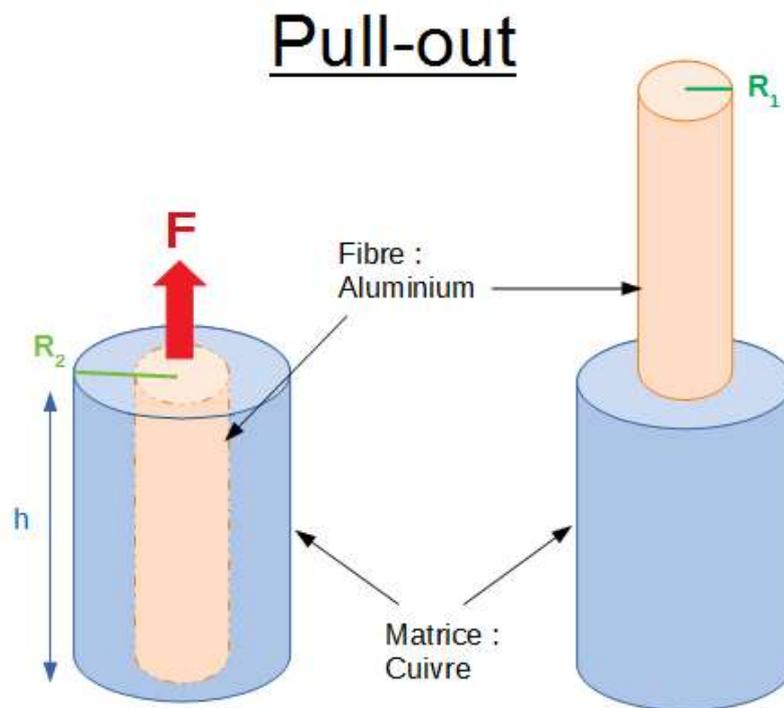


Étude de l'adhésion fibre/matrice dans un composite métallique : conception d'un essai de déchaussement de fibre



Étudiants :

Lola BREDEL

Rébecca LOUBET

Amicie NADAUD

Eisha Noor MOHAMMAD

Julie GANOFSKY

Enseignant-responsable du projet :

Benoît VIEILLE

Date de remise du rapport : **15/06/2020**

Référence du projet : **STPI/P6/2020 – 43**

Intitulé du projet : **Étude de l'adhésion fibre/matrice dans un composite métallique : conception d'un essai de déchaussement de fibre**

Type de projet : ***projet expérimental et bibliographique***

Objectifs du projet :

- ***Etude expérimentale et théorique de l'essai de déchaussement***
- ***Mécanique des milieux réformables et notion de contrainte de déformation***
- ***Comprendre le comportement mécanique d'un fil composite***

Mots-clefs du projet : ***composite - contraintes - déchaussement - interface***

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. Comportement du modèle mécanique en traction d'une structure composite.....	8
3.1.1. Identification des propriétés mécaniques de chaque composé du composite pris séparément, comportement en traction d'un fil monolithique.....	8
3.1.2. Modèle de comportement mécanique du composite CuAl.....	11
3.2. Les essais déchaussement de fibre afin de caractériser l'interface des matériaux composites.....	15
3.2.1. Théorie.....	15
3.2.2. <i>Caractérisation expérimentale</i>	15
3.2.3. Dimensions idéales pour le test de déchaussement de fibre.....	17
3.2.4. Les différentes étapes du comportement de l'essai de déchaussement idéal.....	19
4. Conclusions et perspectives.....	20
5. Bibliographie.....	20
6. Annexe.....	21
6.1. Documentation technique.....	21
6.1.1. Précision sur les caractéristiques des matériaux.....	21
6.1.2. Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre.....	23
6.1.3. Calculs permettant d'obtenir la courbe Force-allongement du composite.....	23
6.2. Images expérimentales.....	25
6.2.1. Mesure et forme des matériaux avant compression*.....	25
6.2.2. Mesure et forme des matériaux après compression*.....	25
6.3. Courbes obtenues expérimentalement.....	27
6.3.1. Courbes contrainte-déformation en compression.....	27
6.3.2. Méthode de résolution – trouver graphiquement E, H et σ^y	28
6.3.3. Courbe d'essai en traction d'un composite CuAL.....	30
Courbe de la force axiale par rapport à l'allongement obtenue grâce aux différents calculs effectués sur les éléments constituant le composite pris séparément.....	30
6.4. Compléments.....	31
6.4.1. Zoom sur l'interface d'un composite dit CMM.....	31
6.4.2. Histoire des CMM.....	31
6.4.3. Résistance interfaciale.....	32

NOTATIONS, ACRONYMES

- Dans ce dossier, toutes les légendes annotées de « * » signifient que les images ont été créées/prises par nos soins
 - CMM : Composite à Matrice Métallique
 - E_A : module d'Young respectif du matériau A
 - S_A : section respective du matériau A
 - F_A : charge axiale supportée par le matériau A
 - ϵ_A : déformation axiale induite sur le matériau A
 - L_A : longueur du matériau A
 - σ_A : contrainte normale sur le matériau A
 - Δl_A : déformation axiale du matériau A
 - τ_A : contrainte de cisaillement sur le matériau A
-

1. INTRODUCTION

Les matériaux composites sont présents dans de nombreuses applications dans notre environnement. La conception de ces composés, pourtant plus compliquée à étudier et à penser car nécessitant l'étude d'au moins deux matériaux différents ainsi que l'interaction chimique et mécanique entre ces matériaux, est une avancée majeure dans de nombreux domaines.

Un matériau composite est un « matériau en phase solide constitué d'au moins deux constituants dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées »[1]. Il correspond à l'association d'une matrice et d'un renfort. Les éléments constituant le composite pris sans interaction fibre/matrice, à eux seuls, se comportent différemment. En effet, les différentes interactions à l'interface de la fibre et de la matrice constituant ces composites permettent une amélioration des propriétés mécaniques et physiques de l'ensemble du matériau, ainsi que d'apporter des propriétés supplémentaires à l'ensemble que les matériaux seuls n'ont pas. Une des applications importantes des matériaux composites est celle du matériau composite à matrice métallique (CMM) Cuivre/Aluminium que l'on retrouve plus particulièrement dans la confection de fils électriques. Dans **notre cas**, l'**Aluminium joue le rôle de fibre (renfort) et le Cuivre le rôle de matrice**. Le matériau, qui est monofilamentaire, est simple : un composant cylindrique (l'Aluminium) est entouré d'une matrice tubulaire (le Cuivre).

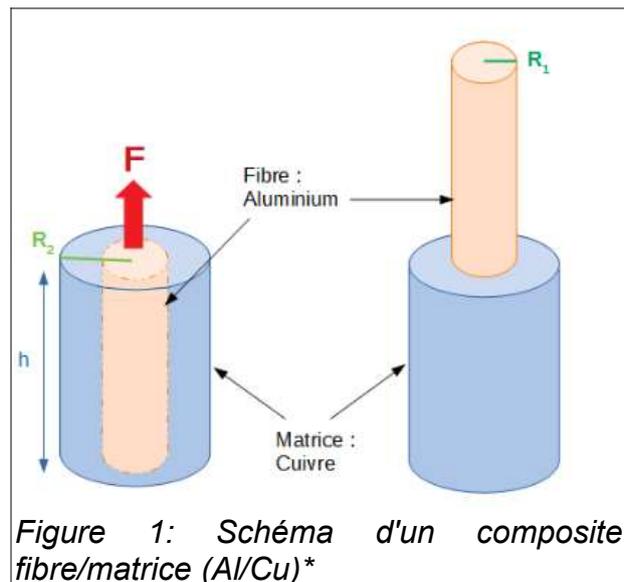


Figure 1: Schéma d'un composite fibre/matrice (Al/Cu)*

Une des applications importantes des matériaux composites est celle du matériau composite à matrice métallique (CMM) Cuivre/Aluminium que l'on retrouve plus particulièrement dans la confection de fils électriques. Dans **notre cas**, l'**Aluminium joue le rôle de fibre (renfort) et le Cuivre le rôle de matrice**. Le matériau, qui est monofilamentaire, est simple : un composant cylindrique (l'Aluminium) est entouré d'une matrice tubulaire (le Cuivre).

L'objectif de ce projet "Adhésion fibre matrice dans un composite métallique" est ainsi de définir mécaniquement le composite Cu/Al, de déterminer ses propriétés physiques essentielles pour satisfaire ses fonctions dans la longévité (rigidité, plasticité, cisaillement, etc.).

Dans un **premier temps**, nous allons étudier le comportement en traction d'un fil monolithique, afin de caractériser par la suite le comportement en traction d'un composite. Pour cela, nous allons appliquer une force sur le composite jusqu'à atteindre l'état où les deux composés ne sont pas dans la même phase (phase élastique et phase plastique). Dans une **seconde partie**, nous allons présenter la notion d'interface dans un composite (plus particulièrement métallique) afin d'étudier au mieux la résistance interfaciale et la contrainte de cisaillement au travers de tests sollicitant uniquement l'interface.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener ce projet à bien, étant un groupe de 5 étudiantes, nous nous sommes réparties le travail à la fin de chaque séance. Une organisation méthodique est requise pour mener à bien un projet scientifique alliant connaissances, recherches, expériences et déductions. De ce fait, chacune d'entre nous s'est occupée d'une tâche pour la séance prochaine comme par exemple la réalisation d'une courbe ou bien la recherche d'informations. Pour cela, nous avons commencé par nous approprier le sujet en faisant diverses recherches avant d'avoir défini les axes à traiter dans le but de répondre à l'objectif de notre sujet. Nous mettions en commun nos travaux dès que cela était possible afin de pouvoir nous superviser mutuellement et ainsi compléter ou modifier le travail. Nous ne pouvions pas travailler sur une partie à la fois car pour la compréhension du sujet, il fallait assimiler plusieurs notions et s'approprier le sujet dans sa globalité.

Malgré la crise sanitaire et le confinement, nous avons su nous adapter et continuer le projet grâce à des réunions en visioconférence. Nous avons dû changer d'objectif en cours de route : le projet de base expérimental est devenu un projet plus axé sur la recherche.

Voici un tableau regroupant notre répartition et réalisation des tâches :

TRAVAIL EFFECTUÉ	PARTICIPANTS
Recherche sur le sujet <ul style="list-style-type: none"> • essai de déchaussement • composites fibreux, comportement 	<ul style="list-style-type: none"> • Eisha, Amicie • Rébecca, Lola, Julie
Etude des documents afin de comprendre la partie théorique (thèses et documents fournis par le professeur)	Amicie, Eisha, Rébecca, Lola, Julie
Exploiter les données des essais de compression	Amicie, Eisha, Rébecca, Lola, Julie
Graphiques pour chaque matériaux et méthode de résolution graphique	Julie
Calculs pour trouver par exemple les coefficients de Poisson, contraintes etc..	Lola, Amicie, Rébecca
Schémas de composites	Amicie
Mise en page du rapport	Rébecca
Création de l'animation vidéo	Eisha
Création de l'affiche	Julie

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Comportement du modèle mécanique en traction d'une structure composite

Afin de caractériser le comportement d'un composite lors d'un essai en traction, nous avons besoin des propriétés mécaniques des matériaux composant le composite pris séparément.

3.1.1. *Identification des propriétés mécaniques de chaque composé du composite pris séparément, comportement en traction d'un fil monolithique*

Afin d'identifier les propriétés mécaniques de chaque phase du composite, nous avons effectué des essais de compression sur différentes éprouvettes de cuivre et d'aluminium.

a) Objectif de l'expérience

Le but de ces compressions uniaxiales sur les matériaux cuivre et aluminium sous différentes formes (tubulaire et cylindrique) est de nous permettre de déterminer expérimentalement l'élasticité et la plasticité des éléments qui constituent notre composite métallique. Pour cela, nous nous intéressons au module d'Young E et au coefficient de poisson ν . Ces deux constantes d'élasticité s'obtiennent expérimentalement en mesurant les allongements longitudinal x et transversal y (lors d'un essai de compression dans notre cas). Ce sont des paramètres intrinsèques au matériau.

Nous retrouvons en annexe les explications sur le module d'Young ainsi que sur le coefficient de Poisson. [Cf Annexe 6.1.1 Précision sur les caractéristiques des matériaux](#)

b) Protocole expérimental

Pour l'essai de compression sur les matériaux métalliques Cu et Al, l'utilisation d'une machine d'essai mécanique a été requise. Cette machine est équipée d'un capteur de force reliant la déformation locale de l'éprouvette au niveau de force. Ainsi, si la moindre résistance du matériau est détectée, la force appliquée sur l'éprouvette s'en voit adaptée pour obtenir une compression d'allongement constant en fonction du temps.

Cette machine d'essai de compression est également équipée d'une pompe hydraulique envoyant de l'huile sous pression aux vérins. Ceux-ci permettent la montée et la descendante des mors hydrauliques serrant l'éprouvette lors de l'essai.

Ici, la machine d'essai de compression est une machine thermique, c'est-à-dire que les essais peuvent se faire à température ambiante/chaude/froide. Pour notre

expérience, il a été convenu de réaliser les compressions à température ambiante, nos composites métalliques étant globalement utilisés à cette échelle de température.

Nous avons réalisé ces compressions avec un chargement monotone en mode axial.

Un appareil de traitement de données est relié à la machine thermique; les valeurs de déplacement relatif (par rapport à la hauteur initiale de l'éprouvette) ainsi que la force appliquée ont été enregistrés à une fréquence $f=20\text{Hz}$.

Avant de réaliser les compressions, les dimensions des différentes éprouvettes ont été mesurées au moyen d'un pied à coulisse afin de permettre une bonne exploitation des résultats. Cf [Annexe 6.2.1 Mesure et forme des matériaux avant compression](#)



Figure 2: Machine d'essai mécanique de compression

c) Résultats obtenus

Nous retrouvons en annexe la forme des matériaux avant compression. Cf [Annexe 6.2.1 Mesure et forme des matériaux avant compression](#)

Une fois l'expérience réalisée, nous avons pu remarquer à l'oeil nu des déformations. En effet, que ce soit pour les matériaux cylindriques ou tubulaires, on constate une diminution importante de la hauteur et augmentation non négligeable de la largeur. Les matériaux semblent s'être "tassés" (il se raccourcit et s'élargit).

Cependant, on note que les déformations entre les deux formes se distinguent par le fait que pour la forme tubulaire, la compression voûte les parois intérieures du tube et courbe les parois extérieures, il y a l'apparition d'une "bouée" non uniformément répartie. Tandis que les cylindres étant pleins sont juste courbés. Dans les deux cas, c'est ce qu'on appelle le flambage, c'est-à-dire que le matériau fléchit "perpendiculairement à l'axe de la force appliquée, en raison d'un phénomène d'instabilité élastique". Cf [Annexe 6.2.2 Mesure et forme des matériaux après compression](#)

De la même façon qu'avant compression, nous avons pris les dimensions des différentes éprouvettes. Cf [Annexe 6.2.2 Mesure et forme des matériaux après compression](#)

Les données enregistrées par le logiciel, c'est-à-dire pour chaque point le temps (s), la force de compression appliquée verticalement (kN) ainsi que l'allongement (négatif) de l'éprouvette (mm), nous ont permis de tracer les courbes suivantes « contraction – déformation » pour chaque éprouvette. Cf [Annexe 6.3.1 Courbes contrainte-déformation en compression](#)

Ces courbes nous ont permis d'obtenir les modules d'Young E , les contraintes élastiques σ^y , ainsi que les modules d'écrouissage de chacun des constituants composant le CMM pris séparément. Cf [Annexe 6.3.2 Méthodes de résolution – trouver graphiquement \$E\$, \$H\$ et \$\sigma^y\$](#)

Nous pouvons regrouper dans un tableau les valeurs mécaniques obtenues pour chacun des matériaux sous la forme des composants

	module d'Young (E)	module d'écroutissage (H)	contrainte limite élastique (σ^y)
aluminium	9733 MPa	661,98 MPa	221,36 MPa
cuivre	1,7394 MPa	601,31 MPa	346,501 MPa

d) Interprétation des résultats

Il y a plusieurs points que nous pouvons remarquer :

- Nous pouvons remarquer que la limite élastique du cuivre arrive beaucoup plus tard que pour l'aluminium. L'aluminium sera donc la limite à la réversibilité de la forme du composite.
- Nous pouvons remarquer à travers la courbe que l'aluminium n'a pas une plasticité quasi parfaite (la courbe aurait dû être proche d'une droite dans la zone élastique). Son module d'écroutissage aurait dû être faible. Nous ne pouvons pas exploiter nos valeurs expérimentales, nous prendrons les valeurs théoriques.
- Pour les deux tubes, une fois la limite élastique dépassée, nous obtenons une bouée non uniformément répartie : il y a une diminution de force, nous parlons de flambement.
- Les modules d'Young sont très différents des valeurs théoriques (Cf [annexe 6.1.2 Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre](#)), nous ne pouvons pas exploiter nos valeurs expérimentales, la déformation a été trop importante.

c) Conclusion

Nous ne pouvons pas conclure sur nos valeurs expérimentales à cause des valeurs aberrantes. Cependant, dans les valeurs théoriques, nous remarquons que le cuivre a un module d'Young plus élevé que l'aluminium, donc le cuivre est plus rigide que l'aluminium.

Une des principales applications de la matrice CuAl est les fils électriques : le cuivre est un conducteur électrique plus performant que l'aluminium[3]. L'aluminium est présent pour rendre le composite moins rigide, moins cassable.

Lors de ce test, nous avons observé une déformation de l'éprouvette qui était uniaxiale (on compresse l'éprouvette, la contrainte appliquée est uniquement une **contrainte normale** à la surface supérieure de l'éprouvette).

3.1.2. **Modèle de comportement mécanique du composite CuAl**

Dans la partie précédente, nous avons effectué des test d'efforts (plus particulièrement de compressions) sur les matériaux séparés (Cuivre et Aluminium) constituant le matériau composite afin de connaître les propriétés mécaniques de ces matériaux seuls. Cependant, lorsque ces mêmes matériaux sont engagés dans un composite, des propriétés mécaniques autres sont à prendre en compte : ce que provoquent les différences de phase des deux matériaux sur la déformation élastique du composite.

Dans cette partie, nous allons expliquer le comportement mécanique en traction d'un composite CuAl grâce à la limite élastique ainsi qu'au module d'Young des deux matériaux.

a) Les contraintes résiduelles

“Les contraintes résiduelles sont les efforts internes qui subsistent dans les pièces mécaniques lorsque ces dernières ne sont soumises à aucun effort extérieur. Dans une section, la répartition des contraintes résiduelles résulte de l'équilibre mécanique entre la zone occupée par la source des contraintes résiduelles, [...], et le reste de la section déformée élastiquement.”[4]

Dans notre projet, les contraintes résiduelles sont celles créés par la différence de comportement des phases (plastique et élastique), lorsque les forces à l'interface sont en équilibre.

b) Comportement mécanique en traction d'un composite CuAl

Avec cette expérience, les propriétés mécaniques des matériaux cuivre et aluminium (limite élastique, rigidité, module d'Young, etc.) sont utilisées afin de déterminer la réponse en traction du composite. En effet, le composite est sollicité différemment en fonction de la force appliquée car les propriétés mécaniques des deux matériaux sont à prendre en compte. Sur le schéma ci-contre, nous pouvons voir que la contrainte est séparée en contrainte normale (normal pressure) et contrainte de cisaillement (shear stress).

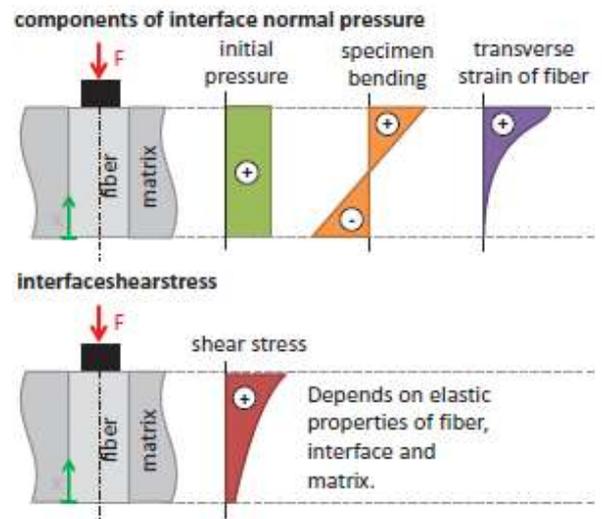


Figure 3: Schéma des composantes de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement à l'interface pendant la phase élastique (il n'y a pas de déchaussement) [7]

Nous effectuons théoriquement un essai de traction sur un composite où différentes hypothèses sont admises :

- L'interface est parfaite ($F=F_{Al}+F_{Cu}$ et $\epsilon_{Al}=\epsilon_{Cu}=\epsilon_{composite}$: la force appliquée sur le composite est la même que celle appliquée sur le cuivre sommée à celle appliquée sur l'aluminium et l'allongement relatif est le même que celui du cuivre et de l'aluminium)
- L'aluminium a une plasticité parfaite
- La température d'essai est celle de la température ambiante

Nous admettrons que l'écroutissement¹ du cuivre sera non nul mais constant².

Lors de nos essais de compression, nous avons obtenu des courbes Cf [Annexe 6.3.1 Courbes contrainte-déformation en compression](#), desquelles nous avons déterminé les propriétés mécaniques de l'aluminium et du cuivre. Cependant, nous utilisons les valeurs théoriques des propriétés mécaniques car les essais n'ont pas été concluants. Nous avons réalisé ces compressions jusqu'à atteindre un écroutissement³. Nous pouvons effectuer les calculs suivants car le cuivre et l'aluminium sont des matériaux élastoplastiques : ils sont caractérisés "par un seuil d'écoulement au-dessous duquel le comportement est purement élastique, alors qu'une fois celui-ci atteint la déformation n'est plus réversible"[5].

On peut utiliser la loi des mélanges parallèles (Modèle de Voigt):

$$E_x = f_{Al} \cdot E_{Al} + f_{Cu} \cdot E_{Cu} = 92,4 \text{ GPa}$$

Avec f_{Al} et f_{Cu} les fractions volumiques respectives. On obtient ainsi le module d'Young du matériau composite.

Si on compare ce module d'Young aux valeurs théoriques des constituants pris séparément (cf [annexe 6.1.2 Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre](#)), nous remarquons que le module d'Young du composite est plus petit que celui des deux autres composants. Le composite est donc moins rigide, il se cassera donc moins facilement.

Grâce aux calculs effectués en annexe (cf [Annexe 6.1.3 Calculs permettant d'obtenir la courbe Force-allongement du composite](#)), nous avons ainsi pu tracer la courbe de comportement en traction axiale pour chacun des constituants séparés ainsi que pour le composite. Nous avons fait l'hypothèse d'une plasticité parfaite ($H=0$ GPa) car au vue du confinement, nous n'avons pas pu faire l'essai de traction sur le fil composite (dans l'idéal, on aurait comparé plasticité parfaite et plasticité expérimentale). Le graphique que nous obtenons est visible en annexe. Cf [Annexe 6.3.3 Courbe d'essai en traction d'un composite CuAl](#).

Afin de comprendre le comportement du composite après une traction jusqu'à atteinte de la zone plastique pour l'un des constituants, après avoir assigné une force $F=300\text{N}$, on décharge jusqu'à $F=0\text{N}$. Il en résulte une déformation résiduelle

- 1 L'écroutissement se traduit par la tangente de la courbe « contrainte-déformation » une fois la limite élastique dépassée (dans le domaine plastique)
- 2 Nous faisons toutes ces hypothèses car nous effectuons le raisonnement pour le modèle théorique (avec nos caractéristiques propres à chaque matériau expérimentales) et non pour le modèle expérimental. Celui-ci n'a pas pu être fait en raison du confinement.
- 3 Les contraintes sont suffisamment fortes pour impliquer des déformations plastiques permanentes.

permanente due à la plasticité de l'aluminium qui se déforme de manière irréversible. Sur la courbe obtenue précédemment du comportement du composite en traction axiale, nous relevons la raideur du composite CuAl comme tangente à la courbe avant la déformation plastique de l'aluminium. Nous obtenons :

$$\text{Raideur CuAl} = 6519 \text{ N/m}$$

Ainsi, l'allongement du composite lors de la décharge se trouve ainsi :

$$\Delta l_{\text{décharge}} = -\frac{F}{\text{Raideur CuAl}} = -\frac{300}{6519} = -4,6 \cdot 10^{-2} \text{ mm} \quad \text{éq. 1}$$

Enfin, l'allongement résiduel du composite lorsque l'on décharge la force est :

$$\Delta l_{\text{résiduel}} = \Delta l_{\text{max}} + \Delta l_{\text{décharge}} = 6,33 \cdot 10^{-2} - 4,6 \cdot 10^{-2} = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

Maintenant, nous cherchons à mettre en évidence les contraintes qu'exercent les différents matériaux du composite l'un sur l'autre après la décharge : le cuivre n'ayant pas encore atteint la zone plastique a tendance à vouloir retrouver sa forme et sa longueur initiales; tandis que l'aluminium, ayant atteint sa limite élastique, ne peut pas retourner sous sa forme initiale. On cherche à déterminer ces contraintes résiduelles après décharge.

Grâce à éq.1, on peut déterminer, en utilisant la loi de comportement élastique de chaque matériau, les contraintes correspondantes :

- aluminium : $\sigma_{Al}^{\text{décharge}} = E_{Al} \cdot \frac{\Delta l_{Al}^{\text{décharge}}}{L} = 70 \cdot 10^9 \cdot \frac{-4,6 \cdot 10^{-2}}{100} = -32,2 \text{ MPa}$
- cuivre : $\sigma_{Cu}^{\text{décharge}} = E_{Cu} \cdot \frac{\Delta l_{Cu}^{\text{décharge}}}{L} = 110 \cdot 10^9 \cdot \frac{-4,6 \cdot 10^{-2}}{100} = -50,6 \text{ MPa}$

Pour finir, les contraintes résiduelles sont obtenues grâce à la loi de linéarité des contraintes :

$$\sigma_{Al}^{\text{résiduelle}} = \sigma_{Al}^{\text{charge}} + \sigma_{Al}^{\text{décharge}}$$

$$\sigma_{Cu}^{\text{résiduelle}} = \sigma_{Cu}^{\text{charge}} + \sigma_{Cu}^{\text{décharge}}$$

Pour ce calcul, nous avons besoin des contraintes induites par la force F=300N lors de la charge :

- aluminium : $\sigma_{Al}^{charge} = \frac{F_{Al}^y}{S_{Al}} = \frac{62,5}{3,14 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ MPa}$
- cuivre : $\sigma_{Cu}^{charge} = \frac{F_{Cu}}{S_{Cu}} = \frac{237,5}{3,93 \cdot 10^{-6}} = 60,4 \text{ MPa}$

D'où

$$\sigma_{Al}^{résiduelle} = -12,2 \text{ MPa} \text{ et } \sigma_{Cu}^{résiduelle} = 9,8 \text{ MPa}$$

La contrainte résiduelle du cuivre est positive, celui-ci cherche à retrouver sa forme initiale, donc il exerce une pression vers le bas. Quant à l'aluminium, sa contrainte résiduelle est négative, cela signifie qu'il cherche à s'élever, à s'éloigner de sa forme initiale en s'allongeant.

Dans notre recherche sur la caractérisation mécanique des matériaux composites, nous avons commencé par étudier la **contrainte en traction** du matériau (ce qui a été fait dans la partie précédente du rapport) car c'est la contrainte la plus simple à déterminer et à visualiser (en effet, c'est cette même contrainte qui est à l'origine des déformations des matériaux monolithiques). Cependant, les matériaux composites présentent un aspect non négligeable dans la caractérisation mécanique du matériau, c'est **l'interface** des deux matériaux. Dans cette partie, nous verrons en quoi l'interface et la **contrainte de cisaillement** ne faisant uniquement intervenir l'interface nous permettront de caractériser plus en détail le comportement mécanique d'un composite.

3.2. Les essais déchaussement de fibre afin de caractériser l'interface des matériaux composites

3.2.1. Théorie

a) Présentation de l'interface

Les matériaux composites ont permis un large développement dans le domaine industriel grâce à une optimisation des propriétés physiques des différents composants. Cependant, une étude approfondie de ces composites est nécessaire car la notion d'interface, lieu d'interactions chimiques et physiques des matériaux, n'existe que lorsque les matériaux seuls ont déjà été assemblés.

L'interface fibre/matrice du matériau composite est le lieu de toute modification des propriétés des composants seuls. Elle assure la continuité entre deux matériaux; un défaut d'adhérence engendre des problèmes de comportement mécanique (il en résulte une fragilité du comportement élastique du composite). En effet, elle empêche par exemple une fissure, qui aurait traversé la matrice, d'atteindre la fibre. Sans cette interface, une dégradation mécanique pourrait engendrer une rupture brutale entre les deux composants.

Aujourd'hui, il n'existe pas de méthode permettant une quantification de la qualité de l'adhérence et de l'interaction fibre/matrice. Cependant, différentes méthodes ont été développées afin de visualiser au mieux la qualité de l'interface des matériaux composites. Nous retenons l'essai de pull-out, dont le principe est d'extraire la fibre de la matrice du composite afin de calculer la résistance interfaciale (cf [Annexe 6.4.3 Résistance interfaciale](#)) au cisaillement. Cette analyse reste macroscopique, car contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'interface n'est pas une surface bidimensionnelle, mais un volume tridimensionnelle. Cf [Annexe 6.4.1 Zoom sur l'interface d'un composite dit CMM](#)

3.2.2. Caractérisation expérimentale

Afin de caractériser l'intégralité des propriétés mécaniques du matériau composite, il est nécessaire de déterminer la contrainte de cisaillement (celle qui s'exerce à l'interface) sans prendre en compte la contrainte de traction, afin de caractériser l'adhérence des matériaux constituant le composite.

Dans cette partie, nous allons expliquer le pull-out test et le pull-in test à réaliser afin de faire travailler uniquement l'interface de notre matériau composite. Pour cela, nous allons chercher à déterminer (de manière théorique) la contrainte de cisaillement présente à cette interface.

a) Essai de Pull-Out

La méthode de pull-out (déchaussement) est la plus simple et celle qui a connu le plus de développement et d'améliorations au cours du temps. Le but étant d'extraire une fibre d'un bloc ou d'un disque. Dans notre cas, il s'agit d'extraire

l'aluminium du cuivre qui est fixe en exerçant une force suffisamment importante pour retirer la fibre sans pour autant endommager la matrice. La principale difficulté de cette technique réside dans la fabrication et la manipulation des échantillons composites qui nécessitent un travail minutieux.

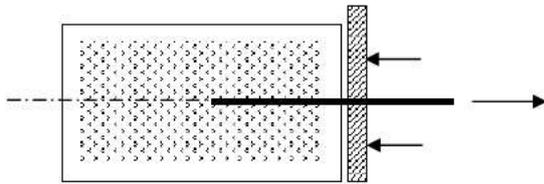


Figure 5: Schéma d'essai de Pull-Out [6]

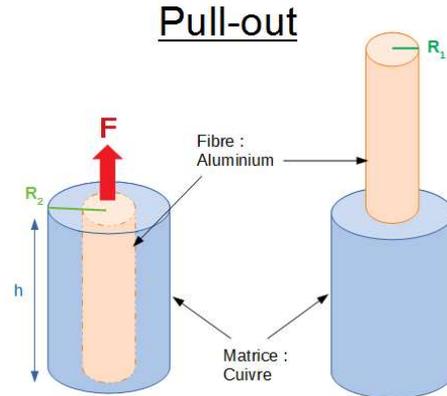


Figure 4: Schéma de l'essai de déchaussement pour un composite CuAl*

Le but ici est d'appliquer une force d'arrachement. L'appareil de traction possède un capteur de force permettant de mesurer les efforts rencontrés dans le cas du déchaussement de fibre. Dans ce montage, une partie de la matrice se trouve comprimée par la plaque[6].

b) Essai de Push-Out

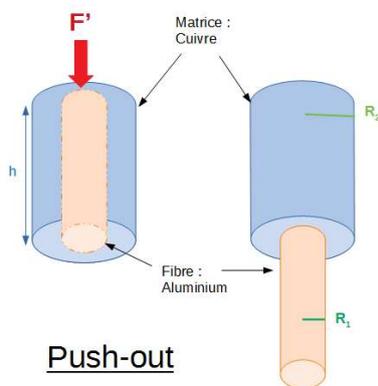


Figure 6: Schéma de l'essai de Push-Out d'un composite CuAl*

La méthode du Push-Out, bien que moins connue que celle du Pull-Out, a le même but. En d'autres termes, on cherche à déchausser la fibre de la matrice. Cependant, contrairement à la méthode précédente, la force exercée n'est pas une traction mais une compression.

Le composite est placé verticalement sur un support épais présentant un trou cylindrique de rayon légèrement supérieur à celui de la fibre du composite. On place le composite de manière à ce que la fibre puisse « sortir » de la matrice. Des embouts à empreintes plates s'abaissent donc jusqu'à entrer en contact avec la fibre, puis la pousse vers le bas, ce qui provoque son décollement progressif de la matrice⁴.

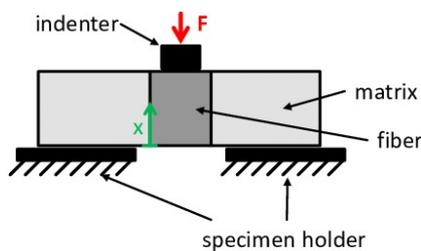


Figure 7: Schéma du montage de Push-Out [6]

Cette technique permet d'obtenir plus facilement la valeur du cisaillement interfacial et est particulièrement bien adaptée aux fibres métalliques.

4 https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-set-up-of-fiber-push-out-test_fig1_326499895 site pour l'image, consulté le 28/04/2020

Le procédé mécanique du Push-Out test se déroule ainsi : une fois que les embouts sont en contact avec la fibre, une charge est appliquée sur cette dernière. Les liaisons entre la fibre et la matrice commencent à céder. Une fois que ces liens sont devenus inexistant, la fibre commence à glisser. La force sur la fibre est continuée d'être appliquée, la seule force résistante est frictionnelle. Tout le long de cette expérience, la force en fonction du temps est mesurée. Cela nous permet d'obtenir une courbe de cette forme [7] :

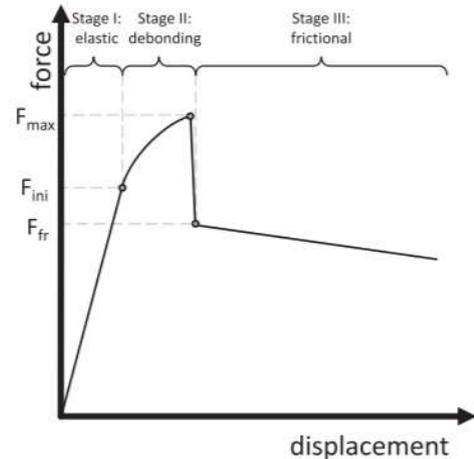


Figure 8: Courbe typique force-déplacement d'un test de push-out [7]

Ces modèles analytiques nous permettent d'obtenir des informations sur les propriétés d'interface et notamment les différents niveaux de forces et le déplacement relatif. A partir de ces 2 informations, on est en mesure de déterminer les 3 étapes de ce test: déformation élastique, progression du décollement et glissement par friction.

Cependant, les modèles analytiques utilisés nécessitent de faire des hypothèses telles que: matériau purement élastique ou bien comportement sans déformation plastique de la fibre; empêchant de représenter parfaitement les conditions expérimentales réelles.

3.2.3. Dimensions idéales pour le test de déchaussement de fibre

Afin de réaliser ces deux tests au mieux, il est nécessaire de respecter quelques prérequis. Tout d'abord, il est important de noter que deux contraintes sont en compétition : celle normale (liée à la force de traction sur le composite) et celle de cisaillement (liée à la résistance interfaciale) comme nous pouvons voir sur cette figure ci-contre. En effet, la déformation n'est pas uniquement uniaxiale.

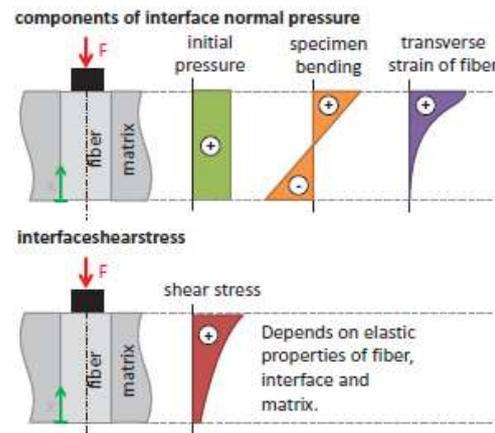


Figure 9: Schéma des composantes de la contrainte normale et de la contrainte de cisaillement à l'interface pendant la phase élastique (il n'y a pas de déchaussement) [7]

Pour caractériser au mieux le déchaussement à l'interface, il est nécessaire que la contrainte de cisaillement, notée τ , soit largement supérieure à la contrainte normale, notée σ . Pour cela, comme la formule de la contrainte de cisaillement τ se note :

$$\tau = \frac{F_{\text{appliquée}}}{S_{\text{latérale}}} \text{ avec } S_{\text{latérale}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

avec h la hauteur de la fibre, il est important que cette hauteur soit faible avant d'avoir une contrainte de cisaillement élevée⁵. La fibre est alors une pastille.

De plus, la faible hauteur h permet d'éviter le flambement (la déformation hors plan) du composite, ce qui fausserait les résultats.

Afin de trouver les dimensions idéales pour réaliser au mieux l'essai de push-out, nous nous intéressons à la courbe « tube » du cuivre et à la courbe « cylindre » de l'aluminium (forme des composants du matériau composite). Cf [annexe 6.3.1 Courbes contrainte-déformation en compression](#).

Ici, dans la méthode du pull-out, nous appliquons une force de traction sur la fibre aluminium pour chercher à la déchausser. Nous effectuerons les calculs avec $F_{\text{traction}}=10\text{kN}$. Afin que cet essai soit efficace, il faut que les pièces d'aluminium et de cuivre n'atteignent pas leur contrainte limite élastique afin de ne pas atteindre la zone plastique et se déformer. Or, dans le graphique du cylindre d'aluminium, $\sigma_{\text{Al}}^y=221\text{ MPa}$ et $\sigma_{\text{Cu}}^y=350\text{ MPa}$. Donc la contrainte normale ne doit pas dépasser 221 MPa, qui est la contrainte maximale avant qu'un des deux composants (ici la fibre) n'atteigne la zone plastique et donc ne déforme le composite.

$$\sigma_{\text{Al}} = \frac{F_{\text{traction}}}{S_{\text{Al}}} < 221\text{ MPa} \Leftrightarrow S_{\text{Al}} > \frac{10 \cdot 10^3}{221 \cdot 10^6}$$

$$\Leftrightarrow S_{\text{Al}} > 45,25\text{ mm}^2 \text{ donc } r_{\text{Al}} = \sqrt{\frac{S_{\text{Al}}}{\pi}} = 3,8\text{ mm}$$

Ici, pour que les deux composants n'atteignent pas la zone plastique, et donc pour qu'il n'y ait pas de déformation du composite, le **rayon intérieur** doit être de **3,8mm** pour une force de traction de 10kN.

Intéressons-nous à la contrainte de cisaillement τ liée à l'interface. Dans la littérature, nous trouvons que la résistance en cisaillement est de l'ordre de 550 MPa [8]. Or, la force à l'interface est la même que celle appliquée en traction ($F=10\text{kN}$) car il y a équilibre des forces (cette force de traction appliquée et transmise à l'interface est une force répartie sur une surface). Ce qui nous amène aux calculs suivants :

$$\tau = \frac{F_{\text{traction}}}{S_{\text{latérale}}} = 550\text{ MPa} \Leftrightarrow S_{\text{latérale}} = \frac{10 \cdot 10^3}{550 \cdot 10^6} = 18,2\text{ mm}^2$$

$$\text{Or } S_{\text{latérale}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Al}} \cdot h_{\text{composite}} \text{ et } r_{\text{Al}} = 3,8\text{ mm}$$

$$\text{Donc } h_{\text{composite}} = \frac{S_{\text{latérale}}}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Al}}} = \frac{18,2}{2 \cdot \pi \cdot 3,8} = 0,76\text{ mm}$$

Nous pouvons noter que la hauteur idéale du composite est très faible ($h_{\text{composite}}=0,76\text{ mm}$), l'éprouvette serait donc sous forme de pastille afin que le test s'effectue avec succès.

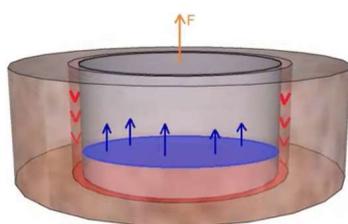
5 On ne réduit pas la taille du rayon car la contrainte normale σ , donnée par la même formule que τ mais cette fois-ci avec la surface normale, doit être faible pour une même force appliquée. Il suffit donc d'avoir une surface normale importante, c'est-à-dire d'augmenter le rayon de la pastille.

Cependant, nous pouvons noter que le composite se déformera obligatoirement car lors de l'essai de déchaussement, l'interface se voit endommagée et des fissures se créent, allongeant la surface latérale du composite. Donc S_{lat} augmente et donc la contrainte de cisaillement τ diminue, tandis que la contrainte de traction σ augmente car l'allongement du composite implique son amincissement (donc S_{ai} diminue).

Ces contraintes sur les dimensions de l'éprouvette afin que les constituants n'entrent pas dans le domaine plastique rendent ce test relativement compliqué.

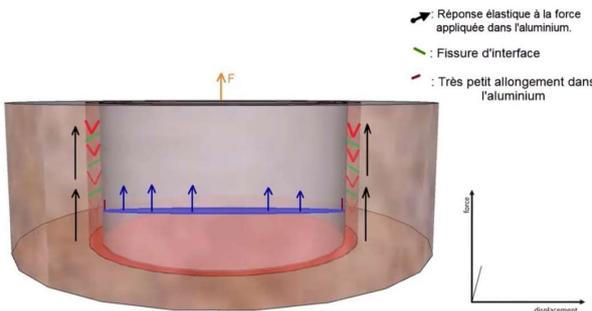
3.2.4. Les différentes étapes du comportement de l'essai de déchaussement idéal

Images prises de l'animation réalisée par Eisha Noor MOHAMMAD.



On a appliqué la force de traction F sur l'échantillon (sur la fibre aluminium). Celle-ci fait apparaître les deux contraintes (traction et cisaillement).

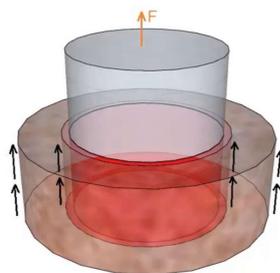
L'objectif est de déchausser la fibre de la matrice de cuivre. L'échantillon s'étire mais l'interface permet de ne pas laisser s'échapper la fibre.



A l'interface, la contrainte change à cause de l'endommagement. La réponse élastique de l'aluminium entraîne celle dans du cuivre, et donc un léger allongement du cuivre.

Les allongements traduisent l'élasticité des matériaux. Le matériau est forcément déformé car lorsque l'endommagement apparaît à l'interface, la contrainte de cisaillement diminue (S_{lat} augmente) et celle de traction augmente ($S_{normale}$ diminue).

Finalement, la fibre d'aluminium peut être récupérée :



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Lors de ce projet, nous avons appris à modéliser le comportement d'un matériau composite lors d'un essai en traction et d'un essai de déchaussement, tout cela grâce aux résultats des essais en compression des matériaux monolithiques constituant notre matériau composite d'étude. Nous avons su allier recherches bibliographiques (valeurs de la littérature, notions importantes, etc.), connaissances et exploitations des résultats expérimentaux afin de répondre au mieux à la problématique adhérence fibre/matrice. Nous avons ainsi pu constater que l'interface du matériau composite apporte une qualité au matériau lui-même.

Ce travail en groupe nous a permis, malgré le confinement et le changement de moyens utilisés pour répondre à la problématique du projet, de mettre en commun nos connaissances diverses (liées à nos différentes pré-spécialisations) et de réfléchir sur un domaine qui nous était toutes inconnu. Cette capacité à tirer et synthétiser des informations de documents ainsi que d'exploiter des données expérimentales sont des compétences nécessaires pour devenir un bon ingénieur.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Définition d'un matériau composite de FuturaSciences (valide à la date du 21/04/2020) : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-materiau-composite-2876/>
 - [2] Explications de l'interface, Anne BERGERET et Patricia KRAWCZAK, « Liaison renfort/matrice – Définition et caractérisation », *Techniques de l'Ingénieur*, p.3, publié le 10/01/2006
 - [3] Conductivité électrique des matériaux, (valide à la date du 04/05/2020) <https://www.breakingvap.fr/la-conductivite-electrique-des-materiaux/>
 - [4] Définition de contraintes résiduelles, Farid BELAHCENE, « Détermination des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore », *Techniques de l'Ingénieur*, p.1, publié le 10/10/2015
 - [5] Définition de matériau élastoplastique, Dominique FRANÇOIS, « Loi de comportement des matériaux-Elastoplasticité-Viscosité », *Techniques de l'Ingénieur*, p.1, publié le 10/03/2005
 - [6] Explications du Pull-Out test, F.Z. MIMOUNE et M. MIMOUNE, « Étude de l'arrachement des fibres métalliques et caractérisation de la liaison fibre matrice », *Techniques de l'Ingénieur*, p.80, publié le 18/12/2002
 - [7] Explications de l'essai de Push-Out et graphique, Stephan SCHONEN, Bruno JASPER, Jan WILLEM COENEN, Juan DU, Till HOSCHEN, Johann RIESCH, Ghaleb NATOUR, Rudolf NEU & Christian LINSMEIER, « Insight into single-fiber push-out test of tungsten fiber-reinforced tungsten », *Composite Interfaces*, p. 4-6, publié le 19/07/2018
 - [8] Choix des propriétés de l'interface pour une simulation, Stephan SCHONEN, Bruno JASPER, Jan WILLEM COENEN, Juan DU, Till HOSCHEN, Johann RIESCH, Ghaleb NATOUR, Rudolf NEU & Christian LINSMEIER, « Insight into single-fiber push-out test of tungsten fiber-reinforced tungsten », *Composite Interfaces*, p. 9-12, publié le 19/07/2018
-

6. ANNEXE

6.1. Documentation technique

6.1.1. Précision sur les caractéristiques des matériaux

- Module d'Young :

Le module d'Young (MPa) caractérise la raideur de la matière et relie la contrainte à la déformation selon la relation suivante⁶ :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Que ce soit dans le cas d'une traction (allongement) ou d'une compression (rétrécissement), la déformation est toujours du même signe que la contrainte. Ainsi, le module d'Young est nécessairement positif. Pour une même contrainte, plus le module d'Young est élevé, plus la déformation subit par le matériau sera faible. On peut également retrouver ce module grâce à la pente de la courbe dans sa portion linéaire (correspond au module d'élasticité en traction).

- Coefficient de Poisson :

Le coefficient de Poisson a été mis en évidence par le mathématicien français Denis Poisson (1781-1840). Il caractérise la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliquée et est défini par la relation suivante :

$$\nu = \frac{\text{contraction transversale unitaire}}{\text{allongement axial unitaire}}$$

Le coefficient de Poisson est compris entre -1 et 0,5⁷ et fait partie des constantes d'élasticité. Dans le cas des matériaux isotropes⁸, sa valeur théorique est de 0,25 et il relie directement le module de cisaillement G^9 (MPa), le coefficient de Poisson et le module d'Young E grâce à la relation suivante :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

- 6 Avec la contrainte en Pascal et la déformation sans dimension
 - 7 Les matériaux possédant un coefficient de Poisson négatif sont dits auxétiques. Le matériau est parfaitement incompressible. Pour un métal, le coefficient de Poisson vaut 0,3 en moyenne.
 - 8 Matériau dont les propriétés physiques ne varient pas en fonction de la direction de la force appliquée.
 - 9 Grandeur physique caractérisant les déformations causées par des effets de cisaillement
-

Le tableau ci-dessous indique les variations de Volume lors d'un essai de traction en fonction de la valeur du coefficient de Poisson :

ν	Variation du Volume (Cas d'un effort de traction)
$<0,5$	Augmentation du Volume
$=0,5$	Déformation à Volume constant
$>0,5$	Diminution du Volume

Voici un schéma caractérisant les propriétés de la pièce mécanique en fonction de sa courbe de contrainte, fonction de la déformation :

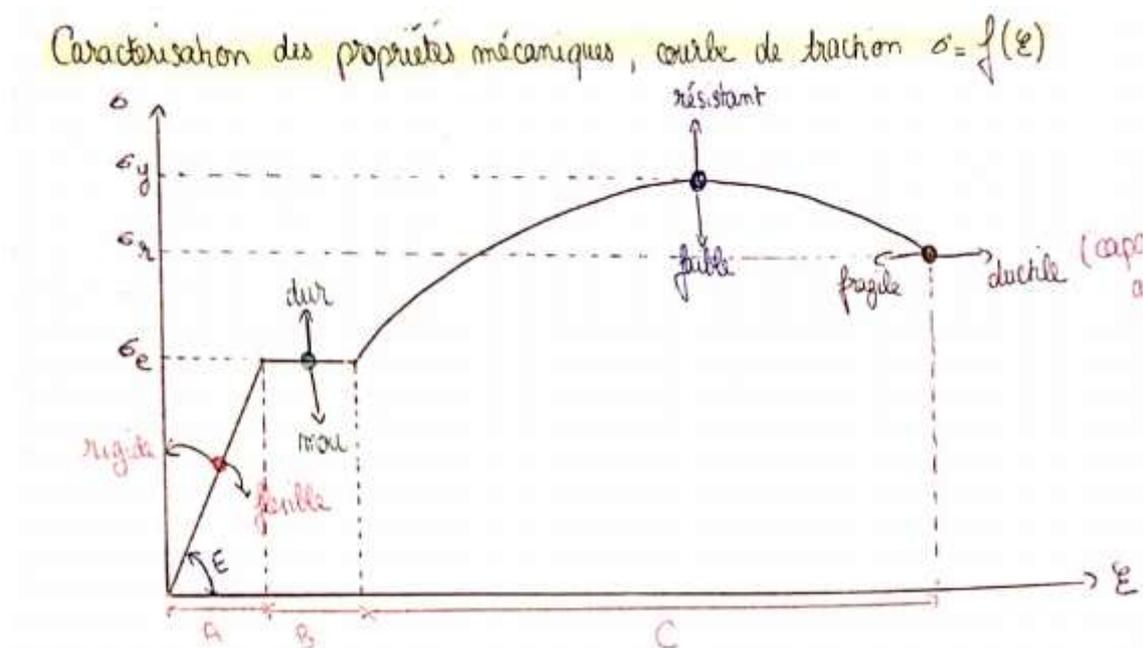


Figure 10: Courbe de la contrainte sur une pièce en fonction de sa déformation*

A : zone élastique

B : zone de transition¹⁰

C : zone plastique

E : module d'Young (coefficient directeur)

Plus le module d'Young est élevé, plus la pièce est rigide.

Plus la limite élastique est importante, plus la pièce est dure.

Plus la contrainte maximale est élevée, plus la pièce est résistance.

Avant σ_e , la zone est élastique réversible. Après ce point, la zone est plastique irréversible.

¹⁰ Nous ferons l'hypothèse dans nos expériences que cette zone de transition est faible devant les zones élastique et plastique.

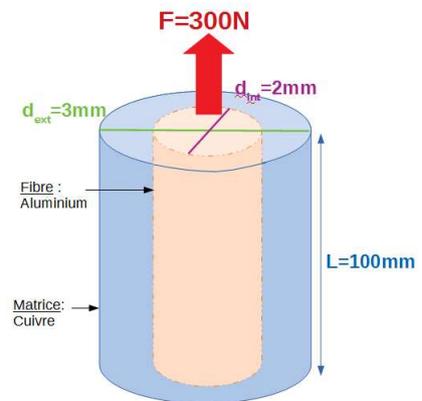
6.1.2. Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre

	Section (mm ²)	α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	E (GPa)	σ_y (MPa)	H (GPa)	ε_r (%)
Aluminium	3,14	24	70	20	35	
Cuivre	3,93	17	110	70	55	

Tab. 1 - Propriétés mécaniques en traction des constituants

6.1.3. Calculs permettant d'obtenir la courbe Force-allongement du composite

Afin de réaliser le raisonnement sans avoir fait l'expérience, nous imaginons un composite dont le diamètre interne (celui du cylindre d'aluminium) fait **2mm** et celui extérieur (si on prend en compte et l'aluminium, et le cuivre autour) fait **3mm**. Nous prenons un composite cylindrique faisant une longueur **L=100mm**.



On commence par appliquer une force **F=300N** sur le composite en traction. On commence par calculer la force correspondant au début de la plasticité dans :

- l'aluminium : $F_{Al}^y = \sigma_{Al}^y \cdot S_{Al} = 20 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 = 62,8 \text{ N}$
- le cuivre : $F_{Cu}^y = \sigma_{Cu}^y \cdot S_{Cu} = 70 \cdot 10^6 \cdot [\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2 - S_{Al}] = 274,9 \text{ N}$

Avec σ_{Al}^y et σ_{Cu}^y les valeurs de la littérature. Cf Annexe 6.1.2 Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre.

On applique ensuite la loi de Hooke pour obtenir l'allongement correspondant :

- aluminium : $\Delta l_{Al} = L \cdot \varepsilon_{Al} = L \cdot \frac{\sigma_{Al}^y}{E_{Al}} = 100 \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{70 \cdot 10^9} = 2,86 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$
- cuivre : $\Delta l_{Cu} = L \cdot \varepsilon_{Cu} = L \cdot \frac{\sigma_{Cu}^y}{E_{Cu}} = 100 \cdot \frac{70 \cdot 10^6}{110 \cdot 10^9} = 6,36 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

Avec E_{al} et E_{cu} les valeurs de la littérature. Cf Annexe 6.1.2 Valeurs théoriques des propriétés de l'aluminium et du cuivre.

Ensuite, on cherche à déterminer la réponse en traction du composite CuAl. Comme nous pouvons le remarquer dans les graphiques (cf IV/Expériences, Résultats obtenus), l'aluminium atteint sa limite élastique et entre dans la zone plastique avant le cuivre.

Sachant que $\Delta l_{Al} = \Delta l_{Cu}$, on a alors :

$$F_{Cu} = \sigma_{Cu} \cdot S_{Cu} = E_{Cu} \cdot \varepsilon_{Cu} \cdot S_{Cu} = E_{Cu} \cdot \frac{\Delta l_{Al}}{L} \cdot S_{Cu} = 110 \cdot 10^9 \cdot \frac{2,86 \cdot 10^{-2}}{100} \cdot 3,93 \cdot 10^{-6} = 123,62 N$$

$$\text{Donc } F = F_{Al}^y + F_{Cu} = 62,5 + 123,36 = 185,86 N$$

Ainsi quand la force appliquée est $F=300N$, la force sur le cuivre est alors :

$$F_{Cu} = F - F_{Al}^y = 300 - 62,5 = 237,5 N$$

Soit un allongement maximal correspondant :

$$\Delta l_{Cu} = \Delta l_{\max} = L \cdot \frac{F_{Cu}}{S_{Cu} \cdot E_{Cu}} = 100 \cdot \frac{237,5}{3,93 \cdot 10^{-6} \cdot 110 \cdot 10^9} = 6,33 \cdot 10^{-2} \text{mm}$$

Pour finir, lorsque la force sur le cuivre atteint la limite d'élasticité dans le cuivre, on a:

$$F_{Cu}^y = 275 N$$

$$\Delta l_{Cu}^y = L \cdot \frac{F_{Cu}^y}{S_{Cu} \cdot E_{Cu}} = 100 \cdot \frac{275}{3,93 \cdot 10^{-6} \cdot 110 \cdot 10^9} = 6,36 \cdot 10^{-2} \text{mm}$$

$$F = F_{Al}^y + F_{Cu}^y = 62,5 + 275 = 337,5 N$$

6.2. Images expérimentales

6.2.1. *Mesure et forme des matériaux avant compression**

Mesures (m)	Tube Al	Cylindre Al	Tube Cu	Cylindre Cu
Hauteur	$1,067 \cdot 10^{-2}$	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$9,68 \cdot 10^{-3}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$
Diamètre intérieur	$8,87 \cdot 10^{-3}$	/	$9,72 \cdot 10^{-3}$	/
Diamètre extérieur	$1,201 \cdot 10^{-2}$	$7,45 \cdot 10^{-3}$	$1,192 \cdot 10^{-2}$	$8,52 \cdot 10^{-3}$



Les pièces couleur rouille sont les pièces de cuivre, les autres sont celles d'aluminium.

6.2.2. *Mesure et forme des matériaux après compression**

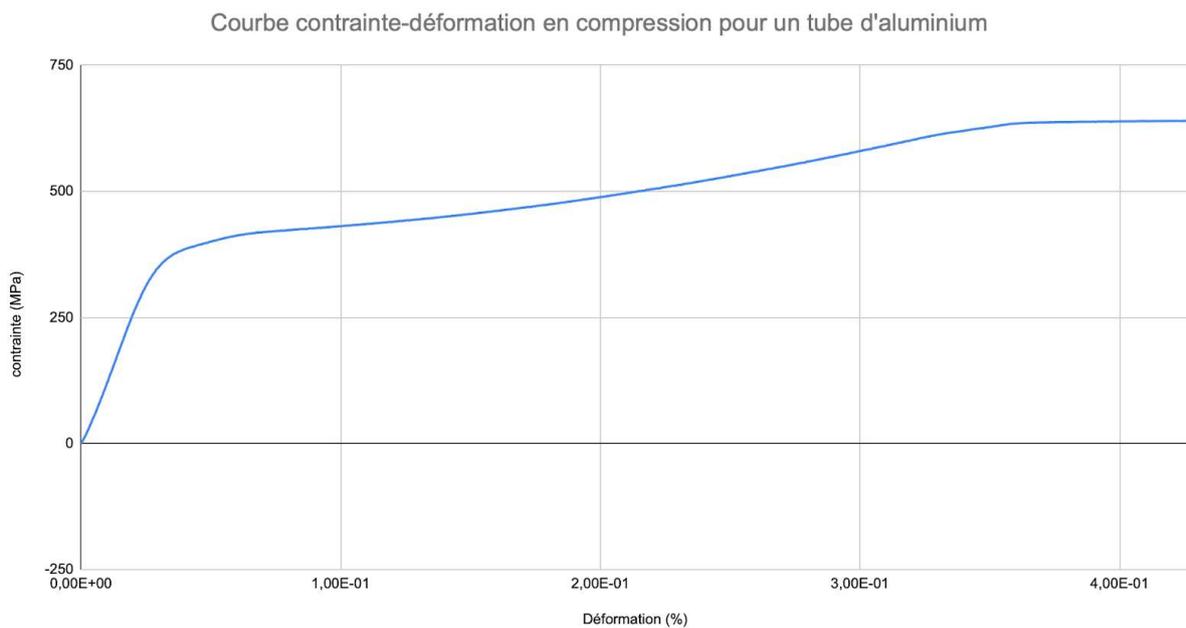
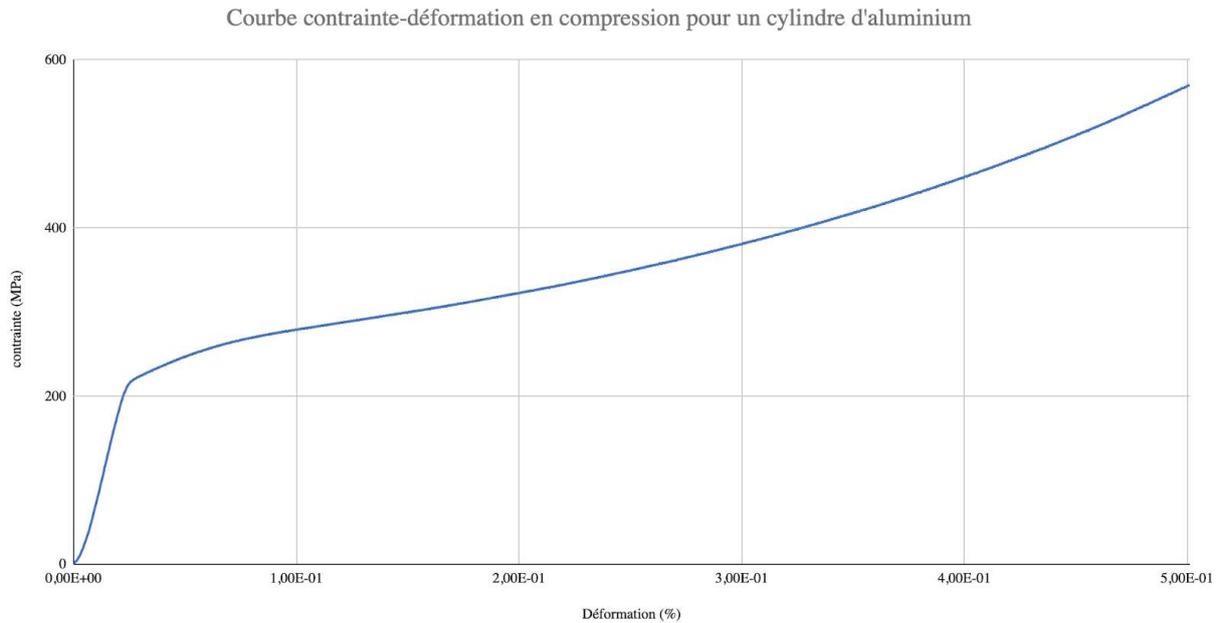
Mesures (m)	Tube Al	Cylindre Al	Tube Cu	Cylindre Cu
Hauteur	$6,10 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$6,20 \cdot 10^{-3}$
Diamètre intérieur	$8,10 \cdot 10^{-3}$	/	$8,30 \cdot 10^{-3}$	/
Diamètre extérieur	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$



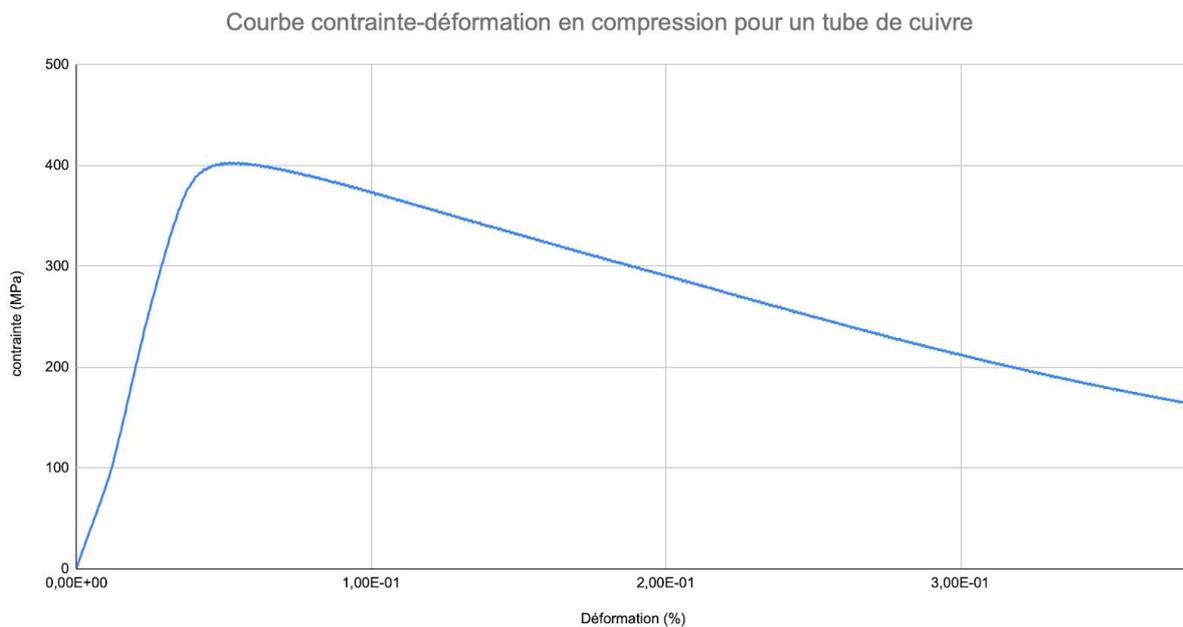
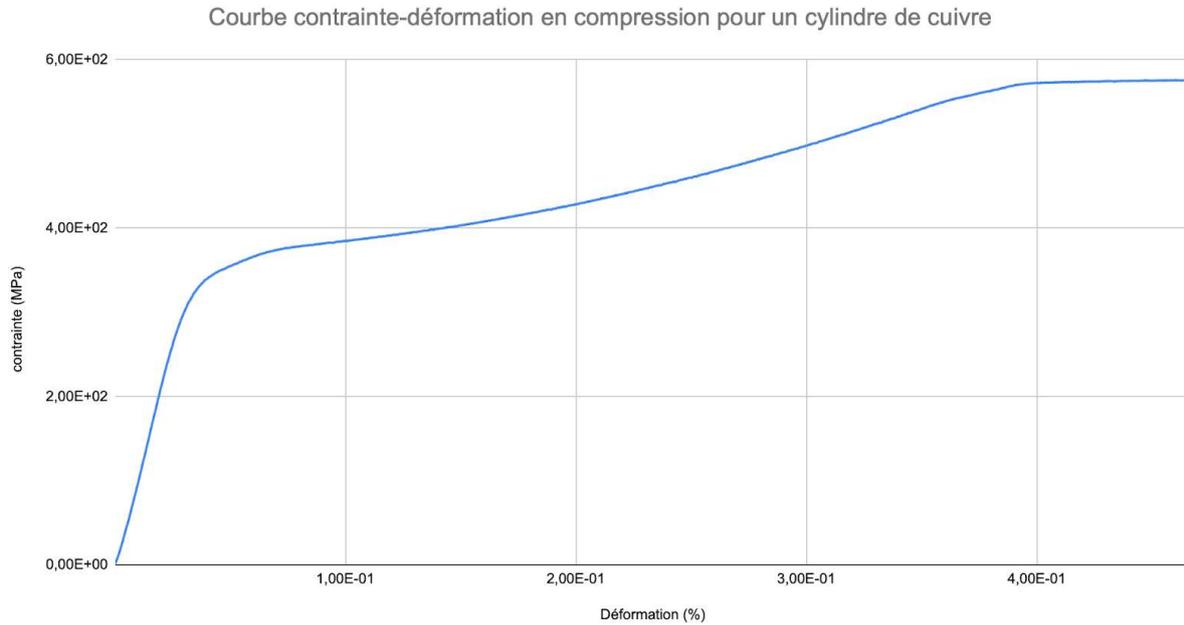
6.3. Courbes obtenues expérimentalement

6.3.1. Courbes contrainte-déformation en compression

Aluminium :



Cuivre :



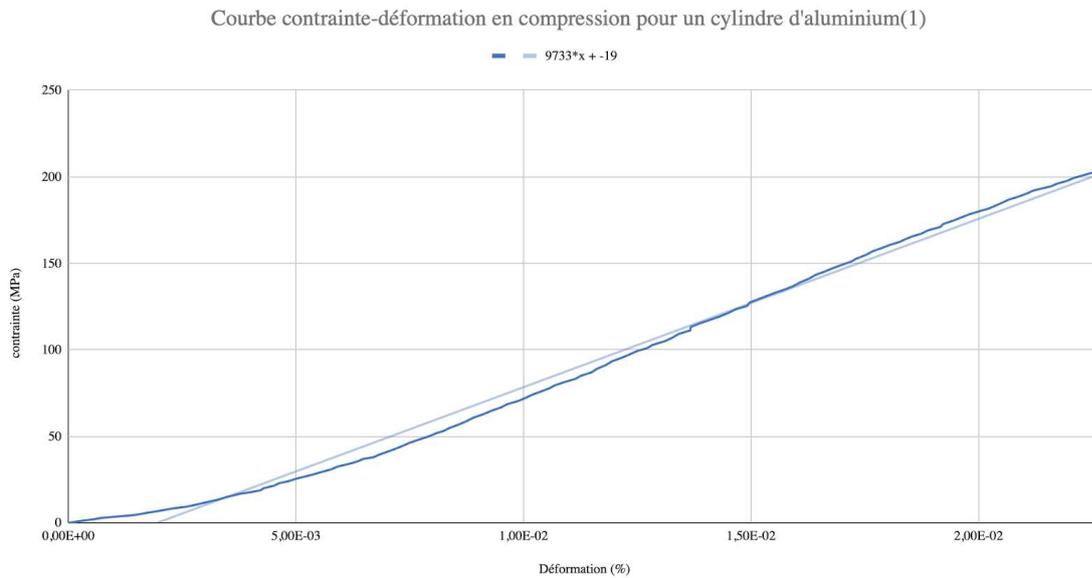
6.3.2. Méthode de résolution – trouver graphiquement E , H et σ^y

On utilise les courbes obtenues de la contrainte selon la déformation pour les **cylindres**, cf [Annexe 6.3.1 Courbes contrainte-déformation en compression](#).

a) Détermination de E

Le module d'Young E s'obtient en linéarisant la première portion de la courbe. En effet ce dernier correspond au coefficient directeur de la droite linéaire correspondante.

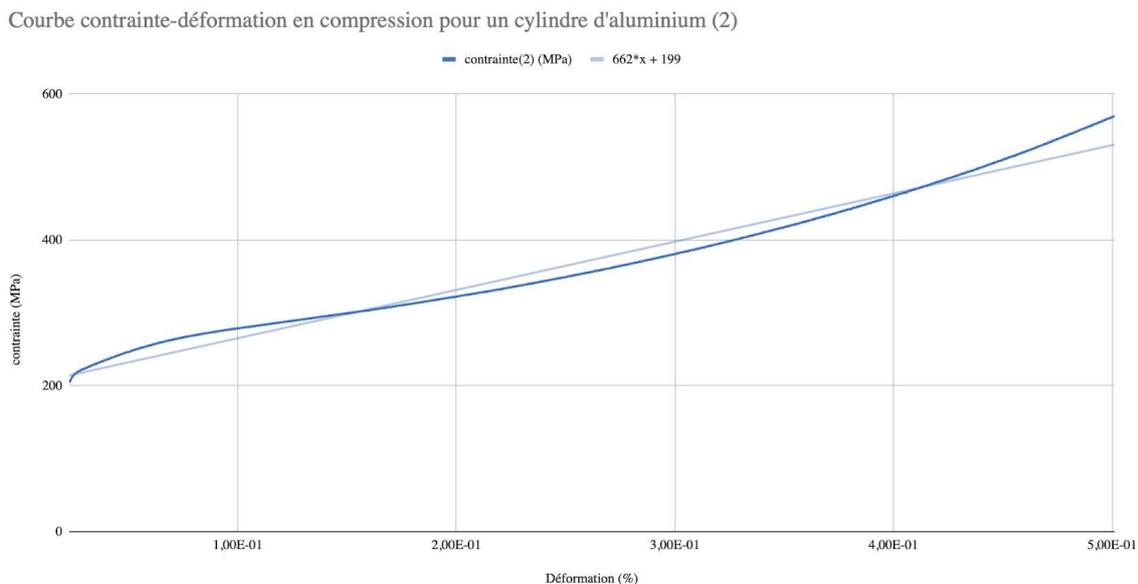
Exemple du cylindre d'aluminium :



b) Détermination de H

Pour obtenir H, on procède comme précédemment avec la deuxième portion de la courbe.

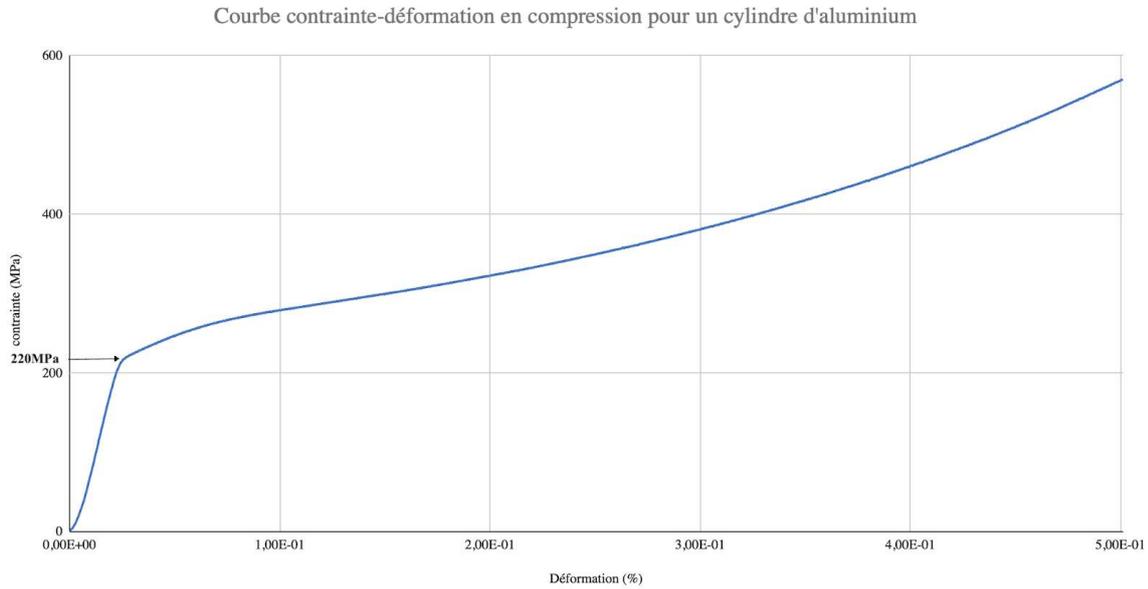
Exemple du cylindre d'aluminium :



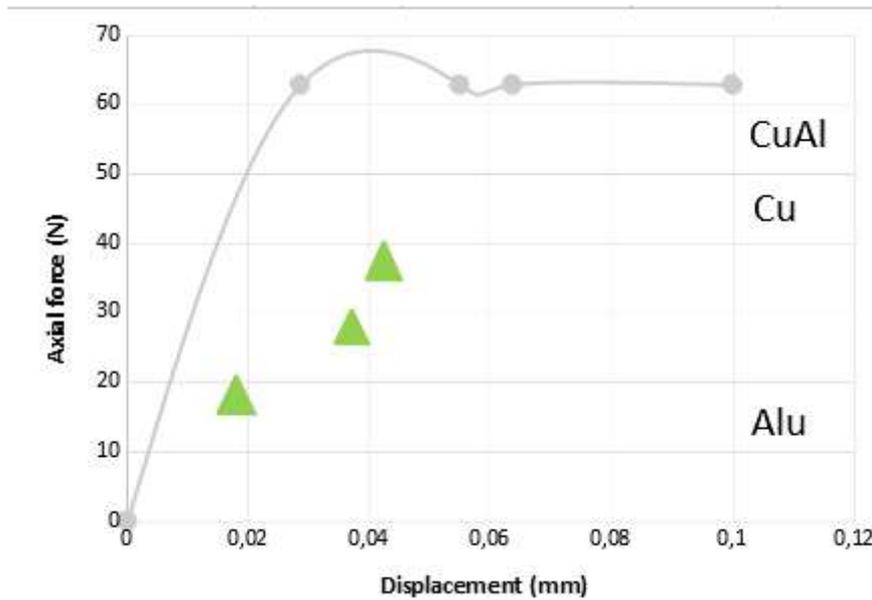
c) Détermination de σ_y

La contrainte y se lit à l'intersection des deux droites linéaires sur le graphique.

Exemple du cylindre d'aluminium :



6.3.3. Courbe d'essai en traction d'un composite CuAl



Courbe de la force axiale par rapport à l'allongement obtenue grâce aux différents calculs effectués sur les éléments constituant le composite pris séparément.

6.4. Compléments

6.4.1. Zoom sur l'interface d'un composite dit CMM

Cette zone de l'interface englobe la zone de contact entre la fibre et la matrice mais aussi « une zone d'épaisseur finie s'étendant de part et d'autre de l'interface à la fois au sein du renfort et surtout au sein de la matrice »[2]. Comme nous pouvons le remarquer sur le schéma ci-contre, cette zone est complexe : elle incorpore les liaisons chimiques, les textures cristallines, vides, anomalies locales, etc. Il est à noter que ce zoom de l'interface est celui d'une interface d'un composite à matrice organique. Mais cela ne change pas le fait que tout ce qui a été cité précédemment est à prendre en compte pour caractériser l'interface d'un CMM. Cf [Annexe 6.4.2 Histoire des CMM](#)

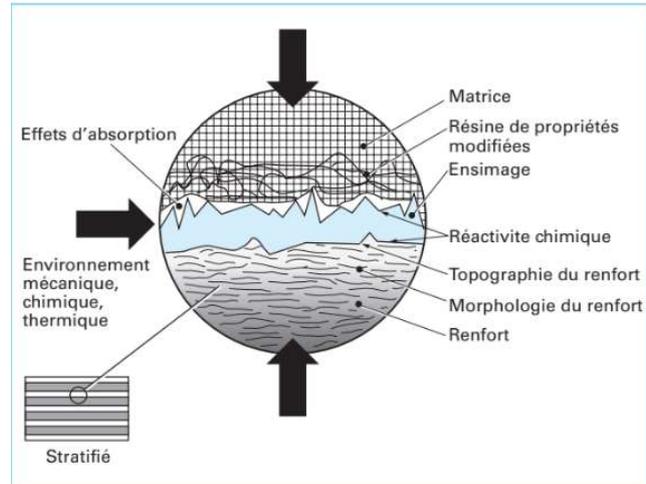


Figure 1 - Interphase renfort/matrice dans un matériau composite [3]

Figure 12: Schéma de l'interface, image de la revue "Techniques de l'Ingénieur"

6.4.2. Histoire des CMM

Les CMM (composites à matrice métallique) sont apparus au milieu du XXème siècle. Comme toutes nouvelles inventions, le prix a d'abord été très élevé, dû notamment à la complexité de la fabrication liée à l'adhésion entre la matrice et le renfort, toute l'efficacité du composite réside dans la qualité de l'interface. En effet pour la fabrication il faut que la matrice soit en phase liquide ou semi-solide pour que les renforts puissent être bien placés. De plus chaque matériau à sa propre température de fusion, il faut donc faire attention à ne pas engendrer une réaction chimique entre la matrice et le renfort, c'est le cas lors des hautes températures. C'est pourquoi les CMM étaient d'abord réservés exclusivement à l'aérospatiale pour les fuselages des navettes spatiales. En 1980, les scientifiques comprennent mieux les CMM et réussissent à développer des renforts intéressants par leurs propriétés et de meilleure qualité. Il existe deux familles de CMM qui diffèrent par le renfort, les composites peuvent être renforcés par des particules ou bien par des fibres.

Aujourd'hui les matériaux composites sont utilisés dans l'industrie car deux matériaux combinés ensemble permettent d'avoir des propriétés mécaniques, dynamiques et statiques intéressantes. Ces matériaux permettent d'améliorer la tenue à la chaleur ou encore de diminuer le coefficient de frottement. Les CMM résistent mieux à l'usure, à l'abrasion et à l'érosion. Il existe une variété de matériaux composites allant des matrices métalliques aux matrices organiques en passant par les renforts en céramique. Cependant pour avoir une rentabilité technologique et économique, rechercher dans le monde industriel, il faut que le composite soit léger,

c'est pourquoi pour les CMM on utilise un métal léger pour constituer la matrice, c'est le cas de l'aluminium et de ses alliages.

Ainsi, ils peuvent être appliqués à d'autres domaines. Aujourd'hui, tous les domaines industriels sont intéressés par les CMM, mais ils ne recherchent pas tous les mêmes propriétés. En effet, leur usage dans le domaine de l'automobile pour les plaquettes de freins n'est pas le même que pour les cadres de vélo, le matériau n'est pas sollicité de la même manière.

6.4.3. Résistance interfaciale

La résistance interfaciale représente la résistance à l'interface fibre/matrice due aux liaisons chimiques, aux anomalies locales, etc. Parmi les méthodes permettant de caractériser l'interface fibre/matrice, il en existe deux basées sur les modèles d'Aykolisitman (modèle élastique prenant en compte l'influence des fibres sub-critiques et super-critiques) et de Bowyer-Bader (modèle élastique parfaitement plastique prenant en compte la non-linéarité du comportement de la matrice) qui évaluent ce paramètre à partir de la réponse contrainte-déformation du composite. Une fois les deux modèles appliqués on prend en compte la valeur qui permet de réduire au maximum l'écart entre les réponses expérimentale et analytique définie par la loi des mélanges modifiés¹¹ :

$$\sigma_c(\varepsilon) = \eta_{FOD} \cdot \eta_{FLD} \cdot \varepsilon E_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

Cette réponse contrainte-déformation peut être obtenue grâce à plusieurs essais différents.

La méthode du pull-out prend notamment en compte les phénomènes de frottement après décohésion et permet de déterminer les énergies de rupture correspondantes

¹¹ Avec le module d'élasticité de la fibre, E_f ; la contrainte de la matrice, σ_m ; le taux volumique de fibres, V_f ; le facteur d'efficacité de l'orientation des fibres η_{FOD} ; facteur d'efficacité de distribution des longueurs des fibres, η_{FLD}

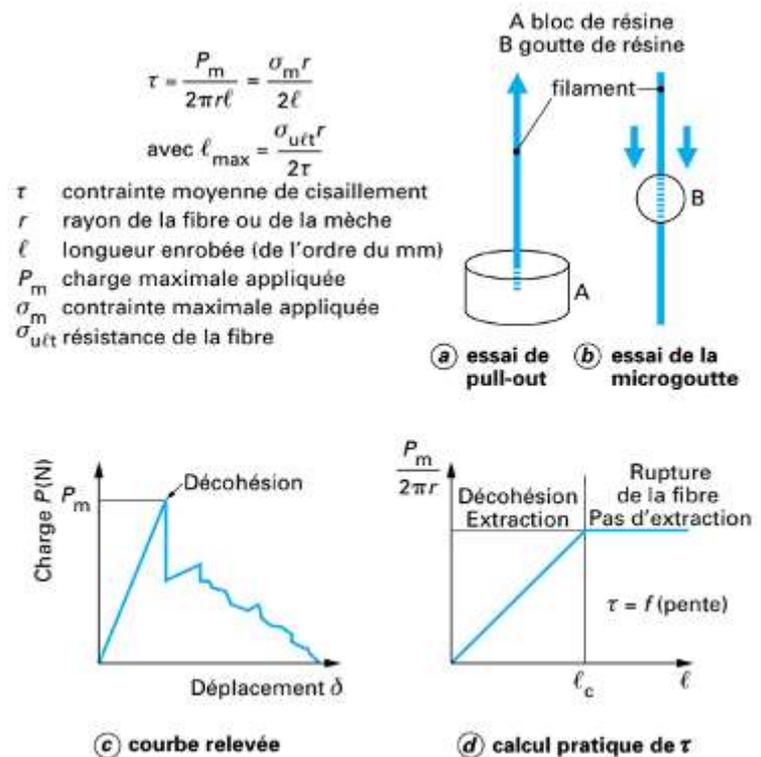


Figure 13: Schéma de l'essai du pull-out, image de la revue "Techniques de l'Ingénieur"

aux deux phases. En revanche l'analyse des données obtenues est assez délicate et comme pour le cas d'une compression la fabrication des échantillons est assez laborieuse.
