

**Création d'un fil caoutchouc entouré d'une gaine
métallique, quel sera son comportement
mécanique ?**



Etudiants :

Louis AMAR

Paul BELLIER

Pierre CHAMPAGNE

Emilie HARIVEL

Ilayda OMUR

Enseignant-responsable du projet :

Amandine DUCHAUSSOY

Date de remise du rapport : **17/06/2023**

Référence du projet : **STPI/P6/2023 – 09**

Intitulé du projet : **Création d'un fil caoutchouc entouré d'une gaine métallique, quel sera son comportement mécanique ?**

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Ce projet a pour but de nous introduire au monde de la recherche à travers l'étude du comportement d'un fil de caoutchouc entouré d'une gaine en aluminium.

L'étude du comportement du composite est intéressante car inédite. Il nous est difficile d'en prévoir les résultats et il est donc nécessaire de passer par des expériences pratiques pour mieux comprendre les effets du tréfilage sur celui-ci.

Pour étudier ce composite en laboratoire, nous réalisons des tests durant les premières semaines sur chaque composé séparément (caoutchouc et aluminium) tels que des essais de traction, dureté et observation au microscope. Nous réalisons dans une deuxième phase ces tests sur le composite après avoir créé ce dernier à l'aide de la méthode de tréfilage.

Mots-clefs du projet : **Aluminium, Caoutchouc, Tréfilage, Propriétés mécaniques**

TABLE DES MATIERES

1. Remerciements	5
2. Introduction	5
3. Organisation du travail	6
4. Présentation des matériaux.....	7
4.1. Aluminium	7
4.2. Caoutchouc.....	7
5. Méthodologie	9
5.1. Elaboration du fil	9
5.2. Préparation des échantillons	9
5.3. Traction.....	10
5.4. Dureté	10
5.5. Microscope.....	11
6. Etude Aluminium.....	12
6.1. Traction.....	12
6.2. Dureté	13
7. Caoutchouc.....	13
7.1. Traction.....	13
7.2. Dureté	14
8. Etude du composite aluminium-caoutchouc	14
8.1. Propriété mécanique	15
8.1.1. Traction.....	15
8.1.2. Dureté	17
8.2. Evolution de la microstructure	18
8.3. Discussion scientifique	19
9. Conclusion et perspectives du projet.....	20
10. Bibliographie	21
11. Annexes	22
11.1. Documentation technique.....	23

1. REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier Amandine Duchaussoy, notre responsable de projet, pour son aide et ses conseils avisés tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous tenons également à remercier Alain Guillet pour sa contribution à ce projet, en nous apportant son expertise et son expérience dans le domaine de l'étude des matériaux.

Nous souhaitons remercier le laboratoire Groupe de Physique des Matériaux pour la mise à disposition des équipements et des ressources nécessaires à la réalisation de ce projet.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

2. INTRODUCTION

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans différents domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale, etc. Ils sont particulièrement appréciés pour leur légèreté et leur résistance élevée. Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux distincts qui, lorsqu'ils sont combinés, ont des propriétés améliorées par rapport à leurs composants individuels.

Dans ce projet, nous nous intéressons au comportement mécanique d'un fil de caoutchouc entouré d'une gaine en aluminium, qui est un exemple de matériau composite. L'objectif de ce projet est d'étudier comment la présence de la gaine en aluminium affecte les propriétés mécaniques du fil de caoutchouc.

Nous utiliserons différentes techniques pour caractériser le comportement mécanique de ce matériau composite, telles que des essais de traction, de dureté et d'analyse microstructurale. Les résultats de ces études permettront de mieux comprendre les propriétés mécaniques de ce matériau composite.

Le rapport est organisé de la manière suivante :

Dans un premier temps, nous présenterons les deux composants de notre matériau composite individuellement, à savoir l'aluminium et le caoutchouc, en détaillant leurs propriétés mécaniques respectives. Nous effectuerons une comparaison entre ces deux matériaux afin de mieux comprendre leurs avantages et leurs limites.

Par la suite, nous décrirons le processus d'élaboration de notre matériau composite, en expliquant les différentes étapes de fabrication ainsi que les techniques utilisées.

Puis, nous présenterons les résultats de nos études sur les composants individuels, ainsi que sur le fil de caoutchouc entouré d'une gaine en aluminium. Nous analyserons les résultats en détail et discuterons des conclusions que nous pouvons en tirer.

Enfin, nous conclurons notre rapport en résumant les résultats obtenus et en discutant des perspectives futures pour ce matériau composite. Nous soulignerons également les limites de notre étude et proposerons des pistes pour des recherches futures.

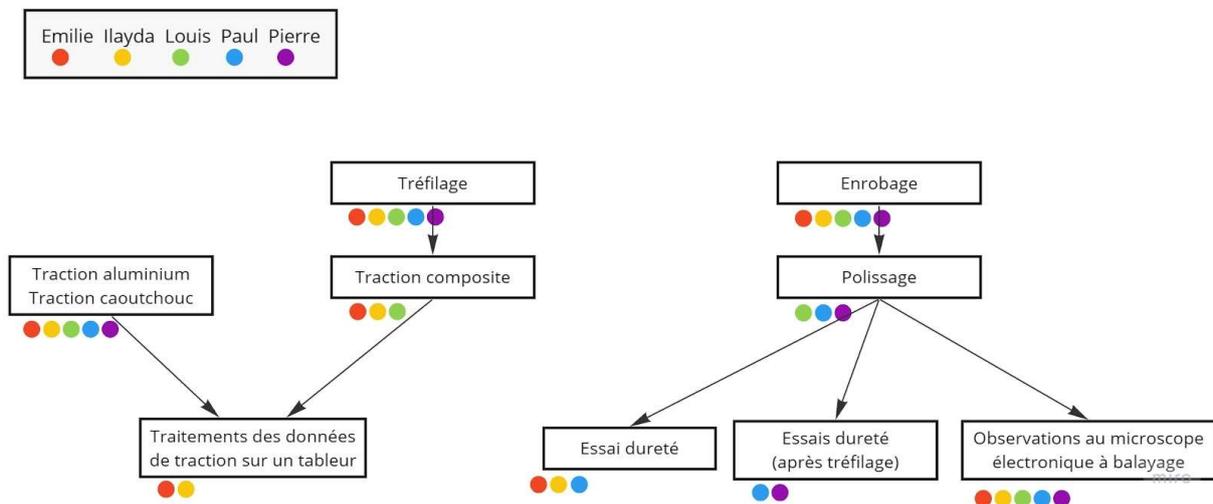
3. ORGANISATION DU TRAVAIL

Dans le cadre de ce projet physique, nous avons tout d'abord bénéficié, lors de nos premières séances avec notre responsable, de quelques points de cours et des démonstrations d'utilisation des différentes machines mises à notre disposition tout au long de notre projet (machine de traction, de dureté, de découpe, tréfileuse, appointeuse, enrobeuse, ...). Le Dr.Guillet a également pu nous donner des explications supplémentaires. Tous ces enseignements ont contribué à notre compréhension des comportements mécaniques des matériaux et à l'appréhension de notre sujet.

Après avoir reçu ces connaissances essentielles, nous nous sommes réunis en groupe afin de réfléchir aux différentes expériences que nous pourrions réaliser pour cette étude. Nous nous sommes également mis d'accord sur les différents moyens pour communiquer ensemble : nous avons créé un groupe Facebook afin de pouvoir communiquer tous ensemble durant la semaine et un Google Drive pour y déposer nos documents, résultats, graphiques, rapport, etc.

Concernant la répartition des tâches, nous avons réalisé les premiers tests de traction en groupe pour se mettre d'accord sur les forces et vitesses à appliquer aux matériaux. Par la suite, les manipulations étant répétitives, chacun a pu s'exercer aux différentes activités : découpe de l'aluminium, traction, polissage, dureté, tréfilage et enfin, traitement des données sur Google Sheet.

La rédaction de ce rapport s'est ainsi faite sur du temps personnel avec l'outil Google Doc afin de voir, de compléter et d'aider chacun à l'avancée des différentes parties à écrire.



ORGANIGRAMME : REPARTITION DES TACHES DANS LE GROUPE

4. PRESENTATION DES MATERIAUX

4.1. Aluminium

L'aluminium est un métal léger, malléable et résistant à la corrosion. Il est largement utilisé dans de nombreuses industries, notamment dans l'aéronautique, l'automobile et le bâtiment, en raison de ses excellentes propriétés mécaniques combinées à sa légèreté. L'aluminium pur est relativement mou et faible en résistance mécanique, mais il peut être renforcé en ajoutant des éléments d'alliages et en utilisant des traitements thermiques. Les alliages d'aluminium peuvent ainsi offrir une combinaison optimale de légèreté, de résistance mécanique, de résistance à la corrosion et de conductivité électrique et thermique.

Voici les propriétés usuelles de l'aluminium utilisé dans ce projet¹ :

Masse volumique	2,7 g/cm ³
Module de Young	70 GPa
Limite élastique	40 MPa
Résistance à la traction	80 MPa
Allongement à la rupture	30%
Température de fusion	660°C
Dureté	80 HV

4.2. Caoutchouc

Le deuxième composant de notre étude est le caoutchouc, un matériau élastique et souple qui est largement utilisé dans l'industrie pour sa capacité à absorber les chocs et à réduire les vibrations. Le caoutchouc est un polymère naturel ou synthétique qui peut être produit à partir de diverses sources, telles que le latex d'hévéa, le pétrole et le gaz naturel. Les propriétés du caoutchouc dépendent de sa composition chimique, de sa structure moléculaire et du traitement auquel il est soumis.

Le caoutchouc est un matériau amorphe, ce qui signifie qu'il n'a pas de structure cristalline ordonnée à l'échelle moléculaire. Sa densité est relativement faible, ce qui en fait un matériau léger. Il est également très élastique et peut être étiré à plusieurs reprises sans se déchirer.

¹ données provenant du site web: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/aluminium/7-proprietes-de-l-aluminium/>

Voici les propriétés importantes du caoutchouc pour notre projet² :

Masse volumique	1,1 g/cm ³
Module de Young	8 MPa
Limite élastique	12 MPa
Résistance à la traction	12 MPa
Allongement à la rupture	170%
Température de fusion	177°C

Les deux composants que nous avons présentés précédemment, l'aluminium et le caoutchouc, possèdent des caractéristiques mécaniques distinctes et complémentaires. L'aluminium est un matériau résistant et conducteur, utilisé dans de nombreuses applications où la légèreté et la résistance sont essentielles. En revanche, le caoutchouc est élastique, souple et possède de bonnes propriétés d'absorption des chocs et de réduction des vibrations.

Ces matériaux possèdent une élasticité et une résistance très différentes, ce projet vise donc à augmenter l'élasticité de l'aluminium grâce au caoutchouc et d'augmenter la résistance de ce dernier grâce à l'aluminium en les combinant en un seul matériau. Il est intéressant d'étudier le comportement mécanique de ce composite afin de comprendre comment ces propriétés se combinent. Ainsi, nous visons à exploiter les avantages individuels de chaque composant, l'élasticité du caoutchouc et la résistance de l'aluminium. L'élaboration de ce composite passera par la création d'un fil composite par tréfilage et permettra d'étudier comment ces propriétés se combinent et interagissent, ouvrant ainsi des perspectives d'application dans divers domaines.

² données provenant du site web:

<https://www.researchgate.net/publication/344781542> Prediction of the remaining service lifetime of inflatable rubber dam with deep hole damage

5. METHODOLOGIE

5.1. Elaboration du fil

Pour réaliser notre fil composite, nous avons utilisé le tréfilage. Il s'agit d'un procédé de déformation à froid qui permet de réduire la section d'un matériau, en le faisant passer à travers une filière dont nous faisons varier la section pour qu'elle soit de plus en plus petite. Le matériau est ainsi étiré et réduit de diamètre tout en conservant sa forme initiale.

Dans cette étude, il a été proposé de placer un fil de caoutchouc dans un tube d'aluminium afin de réaliser du co-tréfilage. Tout d'abord, à l'aide d'une appointeuse, nous devons former une pointe pour que les mors de la tréfileuse puissent saisir l'extrémité du fil. En ce qui concerne le premier fil que nous avons tréfilé, la pointe a été réalisée sur le tube d'aluminium avec le caoutchouc déjà présent à l'intérieur. Cependant, lorsque la section s'affine il devient de plus en plus difficile de réaliser la pointe sans que le matériau ne se casse. C'est pour cette raison que nous avons changé de méthode pour la réalisation du deuxième fil. En effet, dans ce deuxième cas, la création de la pointe s'est faite sans caoutchouc. Celui-ci se situait plus loin de la pointe.

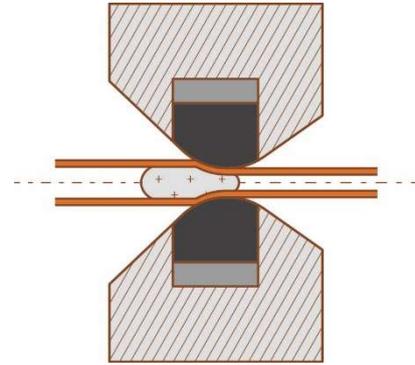


FIGURE 1 : SCHEMA EXPLIQUANT LE TREFILAGE



IMAGE 1 : POINTE DE L'ALUMINIUM AVEC LE CAOUTCHOUC CASSEE

Une fois l'étape de la pointe terminée, il en vient à tréfiler le fil initialement de 10mm de diamètre pour réduire sa section. Pour limiter la rupture du matériau pendant le procédé de fabrication, nous avons fait varier le diamètre de la filière progressivement, de quelques millimètres, jusqu'à atteindre un diamètre de 7,1 mm pour le premier fil et de 6,3 mm pour le second, soit un taux de réduction de 29% pour le premier et 37% pour le second.

5.2. Préparation des échantillons

Pour mener à bien la caractérisation des propriétés en dureté et l'analyse microstructurale, une préparation minutieuse des échantillons est nécessaire. Tout d'abord, l'échantillon est découpé à une longueur d'environ 2 cm, assurant ainsi une taille appropriée pour le polissage. Dans le cas de l'étude du fil composite, il a fallu séparer le caoutchouc de l'aluminium pour étudier la différence de comportement de l'aluminium. En effet, la température d'enrobage est supérieure à la température de fusion du caoutchouc donc ce dernier risquait d'endommager le matériel d'enrobage. Ensuite, il est enrobé de bakélite pour faciliter sa manipulation et sa fixation pendant les tests. Une fois l'échantillon préparé, on procède à l'étape de polissage en utilisant une progression de grains abrasifs, allant d'un

gros grain à un grain plus fin. Le polissage peut commencer avec un gros grain pour éliminer les imperfections grossières, puis progressivement passer à des grains plus fins jusqu'à atteindre un grain 1200, offrant ainsi une finition très fine. Ce nombre correspond à la densité de grains par unité de surface. Cette étape de préparation de l'échantillon garantit un état de surface homogène et exempté de défauts, favorisant ainsi des mesures de dureté précises. Cependant la surface étant trop rugueuse pour le microscope électronique à balayage, il a fallu continuer cette étape de polissage grâce à une solution avec des cristaux de diamants allant d'une épaisseur de 6 μm jusqu'à 0,25 μm .

5.3. Traction

L'essai de traction est une méthode qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité, le comportement élastique et plastique, la résistance à la traction et l'allongement à rupture d'un matériau.

Afin de réaliser cette expérience, il faut découper un échantillon d'environ 8 cm de long et le placer entre les deux mors de la machine qui permettent un serrage fixe. Il faut s'assurer que l'échantillon soit bien centré et aligné pour garantir le sens d'application de la tension. Au préalable il faut mesurer la section de l'échantillon S , puis, une fois monté, il faut mesurer la longueur initiale L_0 de l'échantillon puis une fois démarrée, la machine commence à appliquer une force de traction à vitesse constante sur l'échantillon (ici 10 mm/s) jusqu'à sa rupture.

La machine de traction est connectée à un ordinateur qui enregistre la force appliquée (en kN) et l'allongement (en mm) du matériau. La force et l'allongement enregistrés nous permettent de calculer la déformation et la contrainte du matériau déformé.

La contrainte est calculée avec la formule $\sigma = FS$ où F est la force appliquée (en kN) et S est la section du matériau (en mm^2). En mesurant le diamètre de l'échantillon, la surface se trouve avec la formule $S = \frac{\pi D^2}{4}$ où D est le diamètre de la section du fil cylindrique (en mm). Dans le cas de mesure de diamètre du fil aluminium qui est vide à l'intérieur, il faut mesurer le diamètre extérieur et intérieur séparément, ce qui rend la formule à $S = \frac{\pi(D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{int}}^2)}{4}$.

Le calcul de déformation se fait avec la formule $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ où L_0 est la longueur initiale du fil (en mm) avant la traction et ΔL est l'allongement du fil (en mm).

5.4. Dureté

La méthode de mesure de la dureté en utilisant l'échelle de Vickers est utilisée pour évaluer la résistance d'un matériau à la pénétration. Pour effectuer un test de dureté Vickers, une pointe en forme de pyramide est enfoncée dans la surface du matériau à tester, en appliquant une charge spécifique. Lorsque la pointe est retirée, une empreinte pyramidale en forme de losange est laissée sur la surface du matériau. La longueur des diagonales, d , de cette empreinte est ensuite mesurée à l'aide de l'optique de la machine.

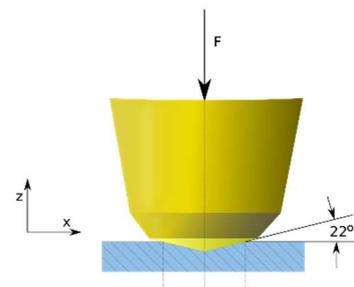


FIGURE 2 : SCHEMA EXPLIQUANT LA DURETE

En utilisant la formule spécifique du test Vickers, la dureté du matériau peut être calculée en fonction de la charge appliquée et de la taille de l'empreinte:

$$Hv = \frac{2m \times \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} \quad \text{où} \quad d = \frac{d1+d2}{2}$$

Avec m, masse en kg et d, longueur en mm.

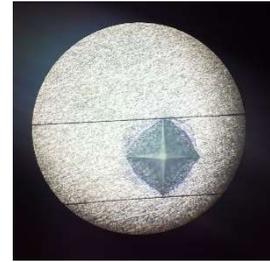


IMAGE 2: TRACE DE L'INDENT LORS D'UN
TEST DE DURETE

Une fois l'état de surface de l'échantillon suffisamment poli et plane, l'échantillon est placé sur une platine en dessous d'un optique de microscope permettant de faire mise au point. Une fois l'échantillon en place et la mise au point réalisée, on procède à l'essai. Pour ce faire, on règle la charge exercée par la machine (ici 3 kg) pendant dix secondes puis on exécute le programme : l'indent va alors automatiquement descendre sur la surface de l'échantillon, appliqué la charge pendant 10s puis de nouveau remettre l'optique en place afin de pouvoir observer la trace de l'indent sur la surface. Il ne reste plus qu'à mesurer les diagonales de l'empreinte à l'aide de l'optique (Image 2) puis le système applique l'équation ci-dessus afin d'indiquer directement la valeur de dureté. Les mesures ont été répétées une dizaine de fois pour chaque échantillon.

5.5. Microscope

Pour étudier la microstructure d'un matériau et plus particulièrement dans notre cas d'un métal, on doit pouvoir observer les grains présents à la surface de ce dernier afin de déterminer sa structure. Pour certains métaux tels que l'acier galvanisé, par exemple, (lampadaires, glissières d'autoroute...) on peut voir les grains du matériau à l'œil nu. Ce n'est pas le cas de l'aluminium, où l'on ne voit pas les grains à l'œil nu et nous avons dû utiliser un microscope à balayage électronique afin d'essayer de discerner les grains qui se forment dans une structure d'aluminium.

Un microscope à balayage électronique fonctionne grâce à l'envoi d'un faisceau d'électron concentré sur un échantillon généralement enrobé d'une résine conductrice. Il est placé dans une chambre sous vide afin d'éviter au faisceau des collisions avec des particules d'air. Ces électrons vont interagir à la surface du matériau et différents types d'électrons sont alors renvoyés par le matériau et récupérés par des détecteurs. Il existe les électrons secondaires, qui donnent une information sur la topographie à la surface de l'échantillon. Ou encore les électrons rétro-diffusés qui permettent d'obtenir une information chimique grâce à un contraste dû au numéro atomique des éléments : un élément lourd comme le fer sera alors plus brillant qu'un élément léger comme l'aluminium.

6. ETUDE ALUMINIUM

6.1. Traction

Nous avons réalisé plusieurs essais de traction sur l'aluminium afin d'étudier ses caractéristiques mécaniques. Au début, nous avons essayé d'effectuer la traction avec un tube d'aluminium creux mais à cause d'une mauvaise adaptation des mors, notre échantillon glissait très facilement. La courbe obtenue n'était donc pas exploitable.

Afin de résoudre ce problème, nous avons coupé l'aluminium sur sa longueur et réalisé deux autres essais avec ce nouvel échantillon. Pour le premier essai, l'échantillon a glissé de nouveau, certainement dû à un mauvais serrage, mais le deuxième l'échantillon s'est finalement cassé au milieu.

L'échantillon d'aluminium étant coupé sur sa longueur, il était compliqué de trouver sa section puisque la coupe n'avait pas été réalisée à la moitié parfaite de la section du tube. Pour faire le calcul, nous avons mesuré l'épaisseur et la largeur de l'échantillon et nous les avons multiplié afin de trouver une section approximative.

Vous pouvez trouver les valeurs de longueur et de section pour la traction de l'aluminium sur le tableau ci-dessous :

	Longueur initiale L_0 (mm)	Section S (mm ²)
Aluminium cassé	36	17
Aluminium glissé	47,1	39

Vous pouvez visualiser ci-dessous la courbe contrainte en fonction de la déformation pour l'aluminium cassé. Nous avons mis la courbe tracée pour l'aluminium glissé ainsi que les courbes théoriques dans les annexes.

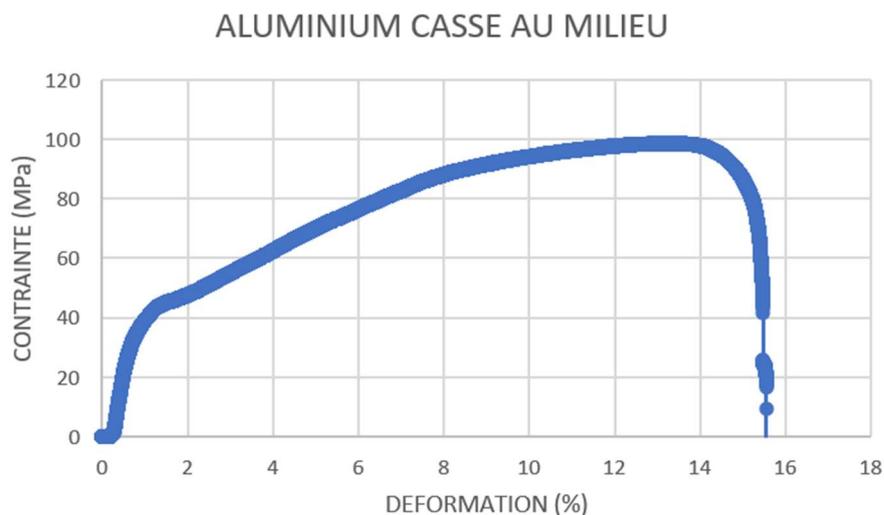


FIGURE 3 : COURBE CONTRAINT EN FONCTION DE DEFORMATION POUR L'ALUMINIUM CASSE

Ainsi, nous pouvons remarquer que la résistance maximale à la traction est proche de 100 MPa et que la limite d'élasticité se trouve autour de 40 MPa ce qui est cohérent avec les valeurs des propriétés usuelles de l'aluminium pur exposé dans la partie 4.1. Cependant l'allongement à rupture autour de 15% n'est que de moitié celle habituelle, ceci peut aisément s'expliquer par la géométrie particulière de nos échantillons.

6.2. Dureté

Afin de confirmer la nature de l'aluminium utilisé dans le composite, des tests de dureté ont été réalisés sur le composant individuel. Les résultats obtenus valident les propriétés intrinsèques de l'aluminium pur qui se situent autour de 80Hv. Cette comparaison permet d'établir une base de référence pour les propriétés mécaniques des composants individuels.

	Moyenne	Écart-type
Aluminium pur	83,5Hv	2,2Hv

7. CAOUTCHOUC

7.1. Traction

En ce qui concerne la traction du caoutchouc, notre premier essai n'a pas été concluant puisque l'échantillon a glissé à cause de la vitesse choisie trop grande.

Vous pouvez trouver les valeurs de longueur et de diamètre pour la traction de caoutchouc sur le tableau ci-dessous :

	Longueur initiale L_0 (mm)	Diamètre D de la section (mm)
Caoutchouc glissé	53,22	5,52
Caoutchouc cassé	56,88	5,53

Vous pouvez visualiser ci-dessous la courbe contrainte en fonction de la déformation pour le caoutchouc cassé. Nous avons mis la courbe tracée pour le caoutchouc glissé dans les annexes.

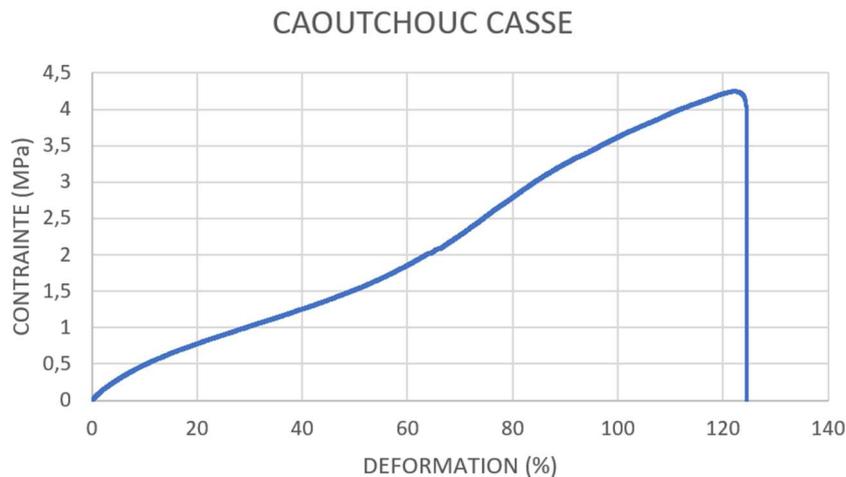


Figure 4 : Courbe contrainte en fonction de déformation pour le caoutchouc cassé

Ainsi, la résistance maximale à la traction mesuré se situe entre 4 et 5 MPa et l'allongement à rupture autour de 125% ce qui est légèrement inférieur que les valeurs usuelles de la littérature pour un caoutchouc synthétique. Cependant l'échantillon ayant cassé au niveau des mors, l'hypothèse d'une rupture prématurée due à la concentration des contraintes au niveau des points de serrage semble expliquer cette différence.

7.2. Dureté

La principale raison pour laquelle nous ne réalisons pas de tests de dureté sur le caoutchouc est liée à sa nature. En effet, en raison de sa grande élasticité, le caoutchouc ne présente pas une surface dure et rigide qui permet d'effectuer des mesures de dureté de Vickers. L'indent, lors de l'essai, possède un capteur de résistance, qui lui permet de détecter la surface de l'échantillon, ici la dureté du caoutchouc est trop faible pour permettre cette détection, mettant en erreur la machine. De plus, la trace de l'indent à la surface du matériau est due à une déformation plastique (déformation irréversible) de celui-ci. Le caoutchouc se déformant quasiment uniquement élastiquement (déformation réversible), l'indent ne laisserait donc pratiquement pas de trace à la surface. Par conséquent, il serait difficile, voire impossible, de mesurer les diagonales nécessaires pour calculer la dureté.

8. ETUDE DU COMPOSITE ALUMINIUM-CAOUTCHOUC

Dans la suite de notre étude, nous nous concentrerons sur l'analyse approfondie du composite aluminium-caoutchouc que nous avons élaboré. Cette étape vise à examiner les propriétés mécaniques du matériau composite dans des conditions de traction, à évaluer sa dureté et à effectuer une analyse microscopique pour mieux comprendre sa structure et ses caractéristiques internes. Cette étude nous aidera à mieux appréhender les propriétés mécaniques et la performance globale du composite, ouvrant la voie à de futures applications potentielles dans divers domaines de l'ingénierie.

8.1. Propriété mécanique

8.1.1. Traction

Après avoir effectué le premier tréfilage de l'aluminium et du caoutchouc, nous n'avons pu réaliser seulement qu'un seul essai de traction car celui-ci a glissé et un bout a été arraché au niveau du mors. C'est pour cela que nous avons dû réaliser un second tréfilage. Nous avons effectué deux autres essais de traction qui ont tous deux cassé à nouveau au niveau du mors.

Les valeurs de longueur et de diamètre pour la traction du composite aluminium-caoutchouc sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Longueur initiale L_0 (mm)	Diamètre D de la section (mm)
Composite glissé	45,7	7,1
Composite cassé au mors 1	55,3	6,3
Composite cassé au mors 2	50,6	6,3

Le graphique des deux courbes superposées de la contrainte en fonction de la déformation pour le composite est exposé ci-dessous. La courbe tracée pour le composite glissé se trouve dans les annexes.

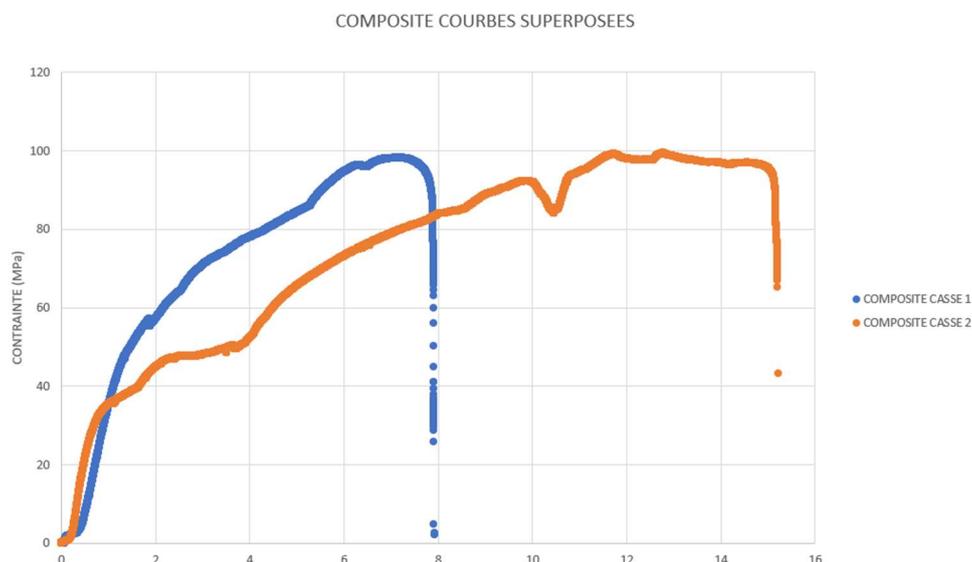
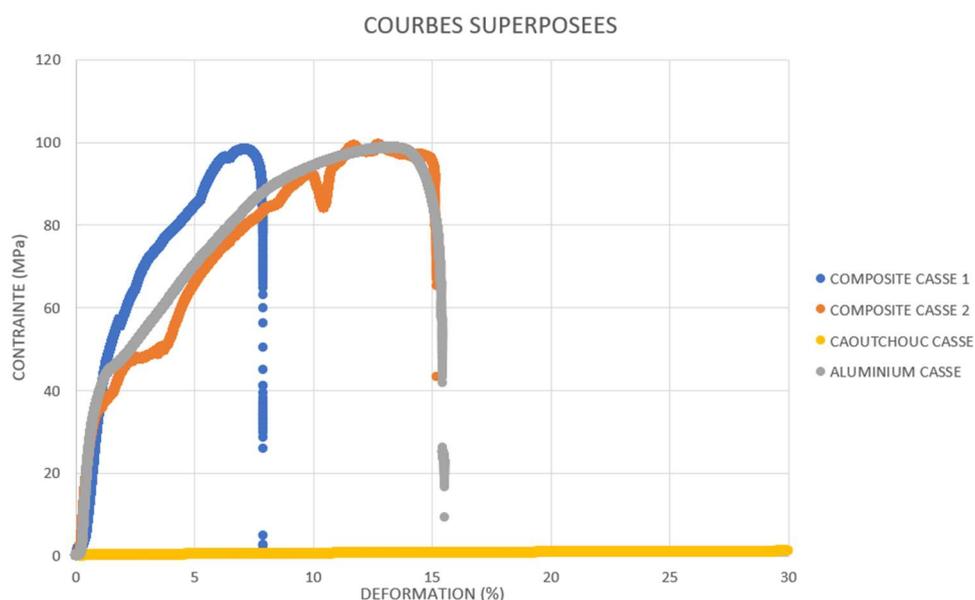
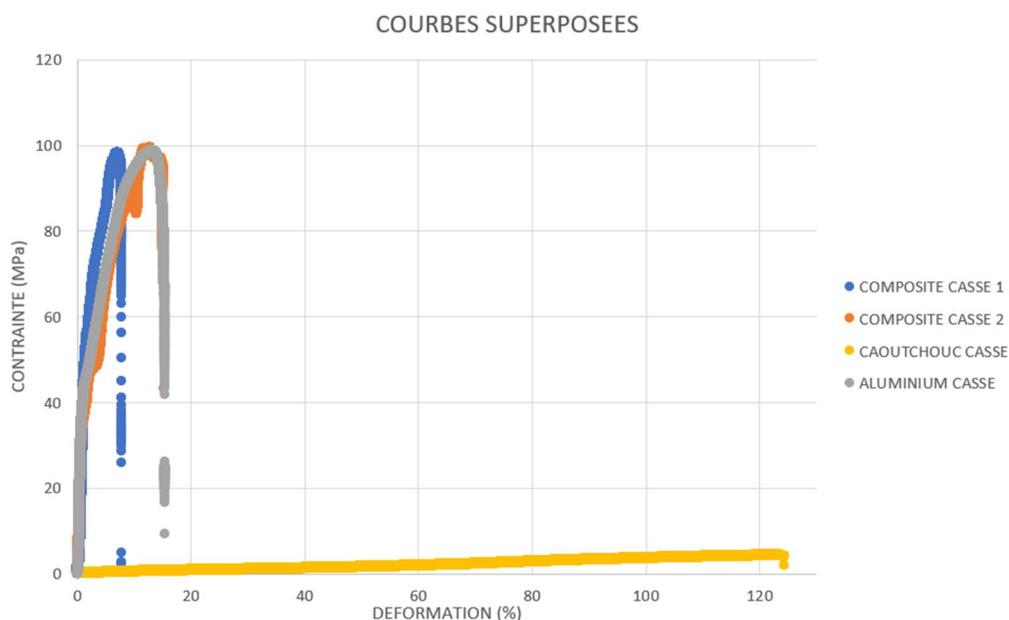


Figure 5 : Courbes superposés contrainte en fonction de déformation pour le composite cassé

Ces deux courbes semblent cohérentes puisqu'elles présentent la même pente initiale, ce qui signifie un module d'Young similaire et donc une rigidité similaire. Celle-ci étant dépendante de la composition du matériau, il est cohérent qu'elle soit quasiment identique. Les courbes superposées permettent de déduire que dans le deuxième essai, le matériau s'est plus déformé avant la rupture que le premier : sa déformation plastique est plus grande. Nous pouvons aussi remarquer que dans le deuxième essai, le fil a dû glisser plus que dans le premier cas. En effet, la droite de l'élasticité semble se déplacer par accoup par rapport au fil du deuxième essai.

Les figures 6 et 7 ci-dessous, montrent les courbes tracées pour le composite, l'aluminium et le caoutchouc afin de comparer et de vérifier les propriétés mécaniques. La figure 7 est un zoom en déformation du graphique de la figure 6.



Figures 6 et 7 : Courbes superposés contrainte en fonction de déformation pour toutes les éprouvettes

Ces courbes montrent que l'allongement du caoutchouc est beaucoup plus grand que celui des autres éprouvettes en raison de l'élasticité du matériau. Comme le caoutchouc est un matériau plus élastique que l'aluminium, il glisse plus facilement entre les mors. Également, les pentes initiales pour l'aluminium et le composites sont presque les mêmes. Cela semble signifier que la rigidité du composite est entièrement donnée par la gaine d'aluminium et que celle du caoutchouc n'intervient pas lors du début du chargement. Cependant entre la courbe du composite cassé 1 et l'aluminium pur, une légère augmentation de la limite d'élasticité est observée. Il est donc possible que le caoutchouc permettent ici d'augmenter les propriétés élastiques comparé à l'aluminium pur. La dispersion sur l'allongement à rupture ne nous permet de conclure sur l'effet du composite dans ce cas.

Les modules d'Young mesurés pour chaque éprouvette sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Module d'Young (MPa)
Composite cassé 1	6035 MPa
Composite cassé 2	7049 MPa
Aluminium cassé	7814 MPa
Caoutchouc cassé	4,25 MPa

8.1.2. Dureté

Une fois les échantillons préparés selon le protocole précédent, nous avons procédé aux mesures de dureté. Les résultats obtenus comprennent les valeurs moyennes de dureté ainsi que leurs écarts-types correspondants.

	Moyenne	Écart-type
Composite \varnothing 7,1 mm sans caoutchouc	82,3Hv	1,8Hv
Composite \varnothing 6,3 mm sans caoutchouc	83,0Hv	1,1Hv

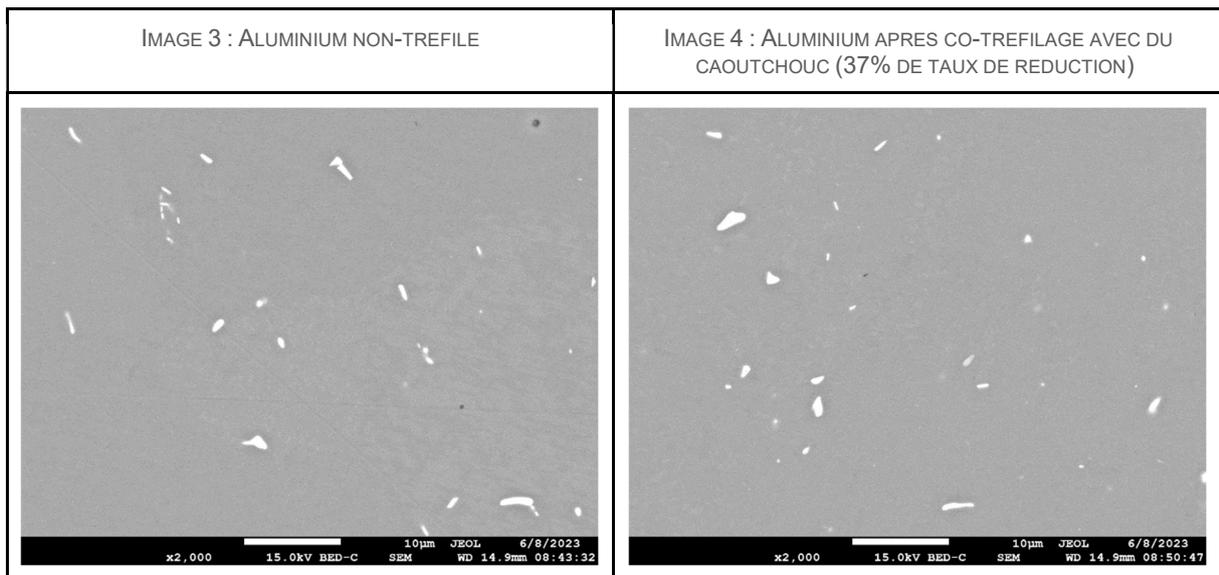
Initialement, avant tout tréfilage, la dureté de l'aluminium était mesurée à 83,5Hv. Lors de la première phase de tréfilage, où le diamètre est réduit à 7,1 mm, on observe une légère diminution de la dureté à 82,3Hv. Cependant, lors de la dernière phase de tréfilage, où le diamètre est réduit à 6,3 mm, la dureté de l'aluminium augmente légèrement pour atteindre 83,0Hv. Ces variations sont très légères et ne présentent pas de changement significatif de dureté par rapport à la valeur initiale. Pour confirmer ces valeurs, nous avons réalisé une deuxième batterie de test sur le dernier échantillon avec une masse de 5 kg et avons obtenu des valeurs très similaires.

Ces résultats suggèrent que le processus de tréfilage n'a pas d'impact significatif sur la dureté du composite aluminium-caoutchouc étudié.

8.2. Evolution de la microstructure

L'image 3 est une vue dans la section du tube au grossissement X2000 d'un morceau d'aluminium non tréfilé. L'image 4 quant à elle, est prise au même grossissement et dans le même plan mais avec un morceau qui a été tréfilé sur le deuxième échantillon composite et dont le diamètre est passé de 9,89 mm à 6,3 mm.

Concernant le caoutchouc nous avons jugé bon de ne pas l'observer au microscope électronique à balayage car ce dernier n'est pas conducteur et ne présente pas un grand intérêt au regard de sa microstructure.



Lors des observations de nos échantillons d'aluminium au microscope électronique à balayage, nous avons pu observer sur tous nos échantillons d'aluminium, la présence de nombreuses impuretés de fer au milieu de l'aluminium, caractérisé par les taches de couleur gris clair sur les images. Malgré un agrandissement des images par 2000, nous n'arrivons pas à observer les grains qui composent la microstructure du matériau aussi bien sur l'image 3 que sur l'image 4. Sur l'image 4, nous n'observons aucune différence significative avec l'image 3 qui pourrait indiquer une déformation de la microstructure dû au tréfilage de l'aluminium. Cette absence de déformation visible peut s'expliquer par le fait que nous sommes à une échelle encore trop grande mais cette hypothèse n'est pas la plus probable. En effet l'hypothèse la plus probable serait que comme cette photo ait été prise perpendiculairement au sens de tréfilage, on ne peut voir de déformation sous cet angle. Il faudrait donc changer d'angle d'observation et observer le tube dans la tranche, soit le sens de tréfilage, afin de pouvoir observer une déformation de la microstructure d'aluminium. Ou alors de faire une attaque chimique afin de révéler les grains d'aluminium.

8.3. Discussion scientifique

Cette étude préliminaire sur les avantages de la fabrication d'un composite aluminium/caoutchouc fabriqué par co-tréfilage a permis de comprendre plusieurs choses. Premièrement, il permet d'obtenir une rigidité et une limite d'élasticité bien plus élevées que pour le caoutchouc seul. Il permet également de gagner en limite d'élasticité comparé à de l'aluminium seul, soit grâce au caoutchouc soit grâce à la déformation de la gaine par le tréfilage. Un tel composite pourrait donc permettre d'augmenter la résistance de pièces entièrement faites en caoutchouc. La rupture de la gaine d'aluminium bien avant celle du caoutchouc qui se trouve à l'intérieur montre que la cohésion entre l'aluminium et le caoutchouc est limitant lors d'un essai de traction. Et donc que cette cohésion est un facteur important. Cette étude montre également que les essais de traction sont difficilement réalisables sur des fils d'un diamètre supérieur à 5 mm.

Il est important de noter que nous n'avons que peu d'expérience dans l'utilisation des outils et machines mis à notre disposition dans le laboratoire. De ce fait, nos mesures sont donc sujettes à de nombreuses imprécisions. Par exemple, lors des essais de traction, les mors devaient être extrêmement serrés pour saisir correctement l'échantillon, conduisant à un changement de section d'un cercle vers une ellipse et créant ainsi une plus grande fragilité à ce niveau là. C'est d'ailleurs ce qu'il a été observé, les échantillons ayant cédé ont souvent rompu près du mors. Malgré cela, nous avons réussi à obtenir des résultats pertinents et cohérents en essayant au maximum de limiter ces imprécisions et en analysant les tendances observées.

Afin d'aller plus loin, il serait possible de trouver une technique qui permettrait une meilleure cohésion entre l'aluminium et le caoutchouc. Il serait également intéressant de voir l'influence d'une gaine en aluminium plus épaisse. Il serait envisageable d'étudier le comportement en fonction d'autres diamètres de fil pour le tréfilage pour aboutir à un rapport de réduction qui rendrait le fil plus solide. Ou encore de trouver une géométrie d'échantillon qui permet de limiter le glissement des mors lors des essais de traction.

Cette étude a donc contribué à la communauté scientifique, en effet un tel composite n'avait encore jamais été étudié. Et c'est en faisant des essais que l'on trouve parfois des matériaux révolutionnaires, en effet certains ont eu l'idée de mélanger des fibres de verre à des polymères, et cela a permis de découvrir un composite largement utilisé de nos jours dans les circuits électroniques.

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DU PROJET

Au cours de ce projet, nous avons pu balayer de nombreux éléments théoriques et expérimentaux dans l'étude des matériaux et des composites. Dans un premier temps, nous avons pu mettre en œuvre des procédés d'usinage et de travail des matériaux utilisés dans la préparation d'échantillons et expérimenter avec. Ainsi, nous avons utilisé la tréfileuse, l'enrobeuse ou encore une ponceuse pour avoir des échantillons observables et les préparer au mieux pour les tests que nous allons leur faire subir. Dans un deuxième temps, nous avons pu utiliser les machines de l'atelier pour les tests de traction, de dureté et l'observation microscopique afin de mieux comprendre les propriétés mécaniques des matériaux et du composite. Enfin, la dernière partie de notre travail fût l'élaboration de ce rapport et le traitement des données obtenues.

Ce projet nous a permis à tous les 5 de mettre en pratique des connaissances théoriques que nous développons depuis notre arrivée à l'INSA. En nous confrontant directement à des expériences pratiques, nous avons pu approfondir notre compréhension des concepts abordés en classe et voir comment ils s'appliquent dans un contexte réel. Les manipulations et les recherches effectuées nous ont fait aller plus loin que les cours reçus dans notre cursus et nous ont ouvert à l'étude des matériaux de manière très concrète.

De plus, nous avons eu l'occasion d'apprendre à travailler avec de nouvelles personnes, le travail de groupe étant au cœur même du projet. Il a été intéressant d'apprendre à s'organiser et faire en sorte que chacun puisse manipuler sur les différentes machines. En travaillant avec d'autres élèves aux expériences et spécialisations différentes, nous avons pu bénéficier d'idées différentes pour résoudre les problèmes auxquels nous étions confrontés.

Par ailleurs, nous nous sommes rendu compte a posteriori que nous aurions pu nous organiser autrement afin d'éviter les erreurs et être plus efficace dans notre travail. Par exemple, nous aurions pu plus précisément nous répartir les tâches, laisser certains d'entre nous se concentrer sur la dureté tandis que d'autres s'occupaient de la traction. Même si cela aurait été plus productif et plus précis car chacun aurait pu mieux maîtriser ses manipulations, on aurait perdu sur l'aspect pédagogique qui est pourtant au cœur de la philosophie du projet P6. L'idée même du projet est de permettre à tous de manipuler et de pouvoir approfondir le sujet de notre choix, et se limiter à un seul aspect du sujet irait à l'encontre même de sa nature. D'autre part, nous aurions pu nous appuyer sur des travaux similaires déjà existants pour déterminer une marche à suivre ce qui nous aurait sûrement permis d'avancer plus vite et plus efficacement, mais nous avons préféré lancer des essais dès le départ pour laisser une marche à suivre plus précise se dessiner au fur et à mesure.

Pour aller plus loin dans le sujet, il pourrait être intéressant de faire varier les conditions d'expérimentation pour chercher à mieux connaître le composite aluminium/caoutchouc que nous avons formé. Ainsi, nous pourrions chercher à faire des tests similaires en faisant varier la température, la pression, les matériaux. Nous pourrions chercher à changer l'aluminium par un autre métal ou le caoutchouc par un autre élastomère par exemple. Finalement, les combinaisons et les pistes pour d'autres projets de recherche sont nombreuses.

10. BIBLIOGRAPHIE

Documentation

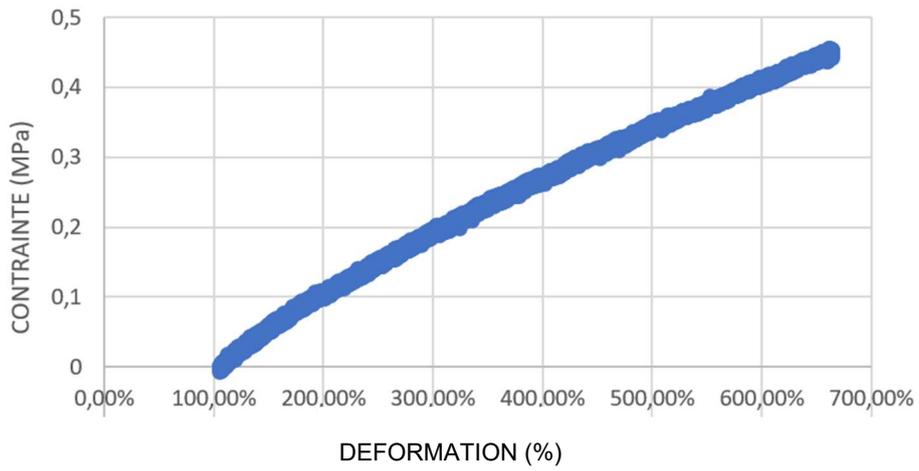
- Seiichi Kawahara, Hironari Nishioka, Masaki Yamano, Yoshimasa Yamamoto, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsapm.1c01508>, 8 mars 2022
- Bentang Arief Budiman, Poetro Lebdo Sambegoro, Samuel Rahardian, Rizky Ilhamsyah, <https://www.researchgate.net/publication/344781542> Prediction of the remaining service lifetime of inflatable rubber dam with deep hole damage, decembre 2020
- Ilya A. Zhukov, Alexander A. Kozulin, Anton P. Khrustalyov, Nikolay I. Kahidze, Marina G. Khmeleva, Evgeny N. Moskvichev, Dmitry V. Lychagin, Alexander B. Vorozhtsov, <https://www.researchgate.net/publication/337097563> Pure Aluminum Structure and Mechanical Properties Modified by Al₂O₃ Nanoparticles and Ultrasonic Treatment, novembre 2019
- Dr-Muhammad Rashad, Fu-Sheng Pan, Muhammad Asif, <https://www.researchgate.net/publication/280314762> Investigation on microstructural mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets, Juillet 2015

Sources Images

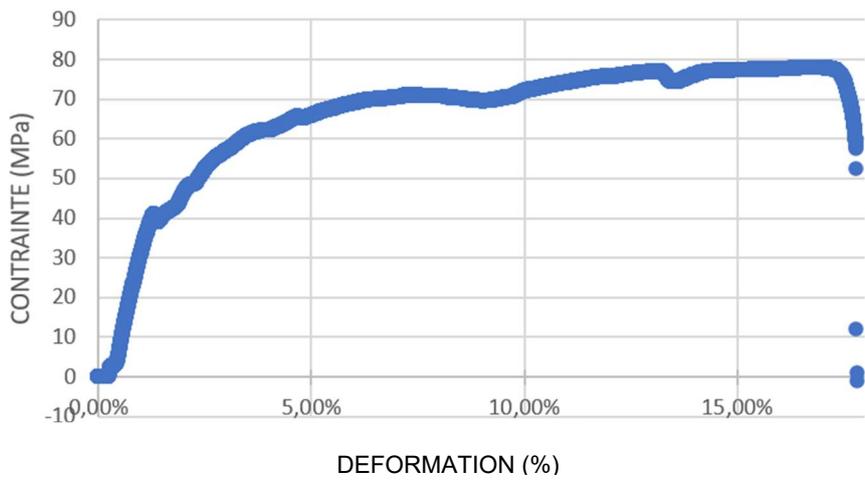
- Organigramme : Illustration personnelle
- Figure 1 : <https://balloffetdie.com/filiere-diamant-trefilage-monocristallin-polycristallin/filiere-diamant-monocristallin-polycristallin-tube>, consulté le 15/06/2023
- Figure 2 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_(mat%C3%A9riau)), consulté le 13/06/2023
- Figures 3, 4, 5, 6 et 7 : Illustrations personnelles
- Images 1, 2, 3 et 4 : Illustrations personnelles

11. ANNEXES

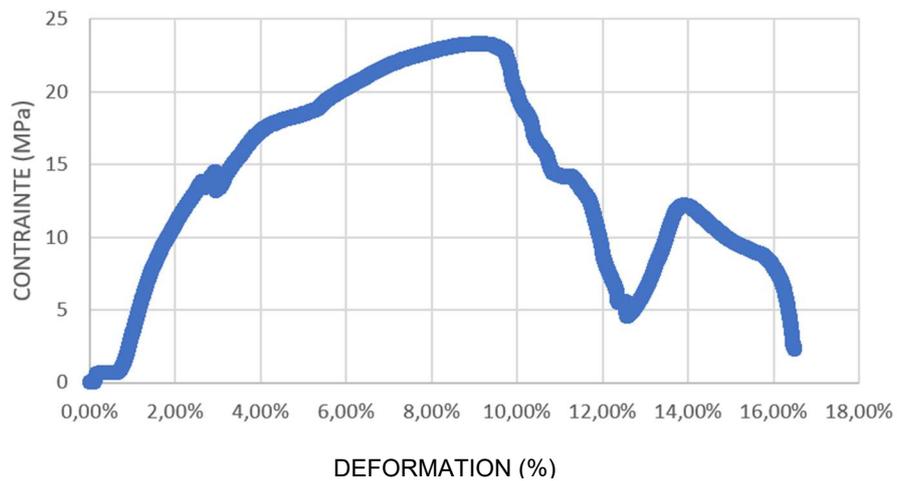
CAOUTCHOUC GLISSE



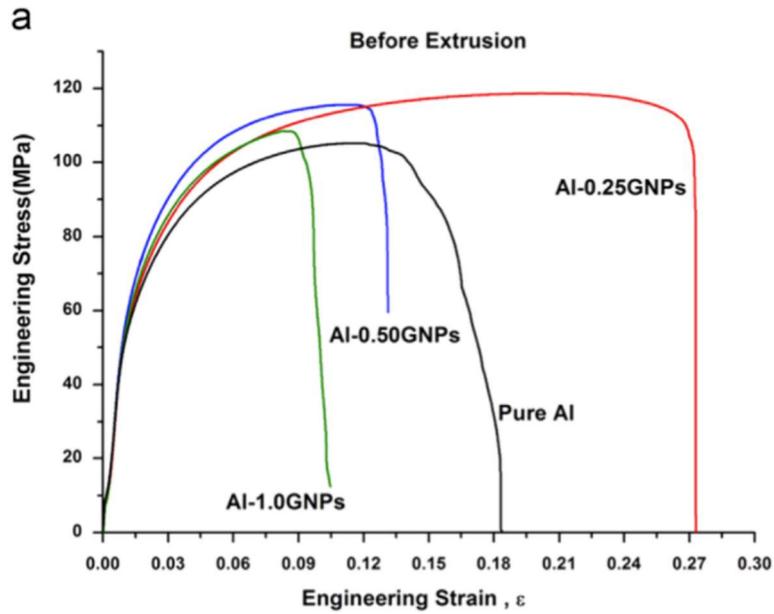
ESSAI ALUMINIUM



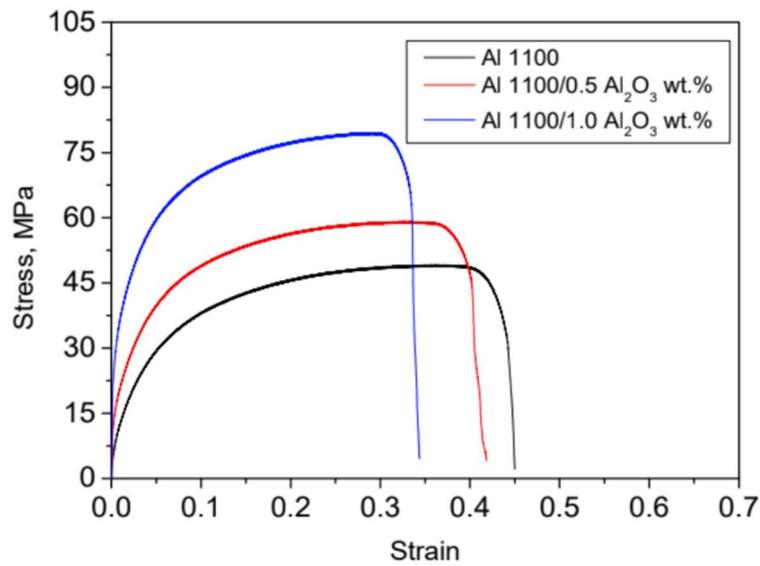
COMPOSITE GLISSE



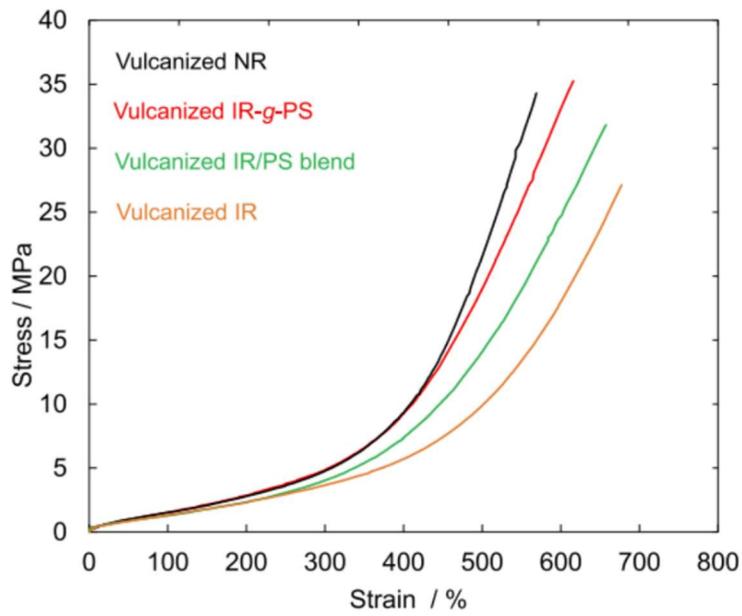
11.1. Documentation technique



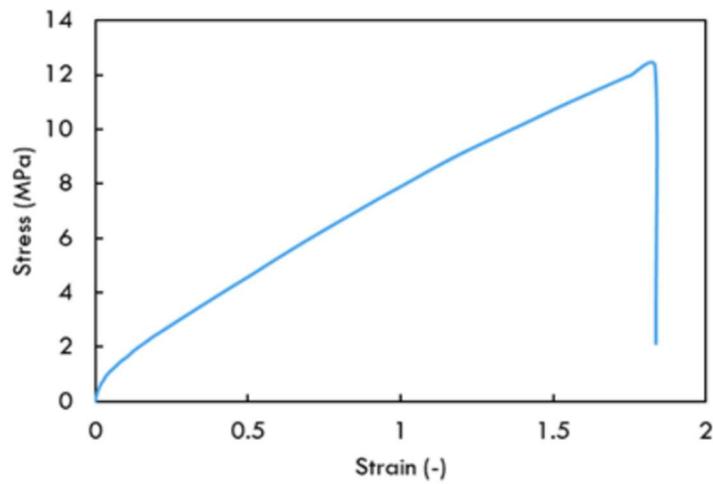
ROOM TEMPERATURE TENSILE STRESS–STRAIN CURVES OF PURE AL AND ITS COMPOSITES



STRESS–STRAIN CURVES OBTAINED FOR THE TENSILE TEST SAMPLES FROM INVESTIGATED ALLOYS



STRESS-STRAIN CURVES FOR VULCANIZED NATURAL RUBBER, VULCANIZED IR-GRAFT-PS(90), VULCANIZED IR/PS BLEND, AND VULCANIZED IR.



TENSILE TEST RESULT OF BASE RUBBER MATERIAL.