

## 2.1. Introduction du chapitre :

Les essais mécaniques ont pour objectif de caractériser les lois de comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre la contrainte et la déformation, et est intégrée au modèle numérique pour simuler le procédé d'assemblage qu'est le sertissage.

La déformation d'une pièce dépend de sa géométrie et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. La méthode classique d'obtention de la loi de comportement est basée sur la réalisation d'essais normalisés, sur des éprouvettes normalisées. La première partie de ce chapitre va donc permettre, par le biais d'une étude bibliographique, de déterminer si de tels essais sont applicables à nos échantillons. Pour cela, nous nous focaliserons sur la recherche de moyens d'essais mécaniques sur échantillons à l'échelle micro ou millimétrique. Cette recherche permettra d'orienter notre travail en vue de limiter les problématiques rencontrées par d'autres scientifiques.

Ensuite, le chapitre s'attachera à présenter les dispositifs d'essais disponibles au CEMEF et leurs caractéristiques. Ce paragraphe sera suivi de la présentation des résultats des diverses campagnes d'essais et par l'analyse des données recueillies. Nous nous efforcerons de conserver un regard critique sur nos méthodes de travail dans l'optique de trouver, si nécessaire, des alternatives aux problèmes rencontrés.

## 2.2. Dispositifs d'essais mécaniques sur petits échantillons :

### 2.2.1. Etude bibliographique :

Les contacts électriques de notre étude sont de forme cylindrique creuse, de rayon externe d'environ 1.2 mm. Les brins possèdent des diamètres variant de 0.115 mm à 0.25 mm en fonction du câble. Nous nous sommes donc penchés sur la bibliographie relative à la caractérisation des matériaux issus d'échantillons de petites tailles. Par petite taille, nous considérons les objets à l'échelle du millimètre.

Les informations pertinentes sur la caractérisation de brins métalliques à l'échelle millimétrique étant restreintes, la recherche bibliographique a été élargie à la détermination des paramètres matériaux sur brins non métalliques et à l'échelle nano/micrométrique. L'ensemble des documents issus de la littérature traite de la caractérisation mécanique de brins composites ou polymères. Bien que les dimensions de ces brins soient très inférieures à celles de nos échantillons, il est intéressant d'analyser ces travaux. Cela permet d'avoir un regard critique sur les premiers essais que nous avons mis en place lors de l'année de maîtrise spécialisé, pré étude au travail de thèse.

Par ailleurs, peu de documents traitent des moyens d'essais normalisés sur tubes métalliques à notre échelle. La détermination des paramètres matériaux des contacts se fera donc par analyse inverse et ne sera pas traitée dans ce chapitre.

#### 2.2.1.1. Nature des échantillons et dispositifs expérimentaux :

En 2002, Margueritat [MAR02] réalise des essais sur des filaments composites en carbone/aluminium dont le diamètre n'excède pas la dizaine de microns. Tan [TAN06] étudiera en 2006 des fibres de polycaprolactone (PCL) dont le diamètre se situe entre 100 et 500 nanomètres. Enfin, l'étude la plus récente est celle de brins en polyéthylène téréphtalate (PET) ou en polyéthylène naphthalate (PEN) de 20 à 30 micromètres de diamètre réalisée par Lechat [LEC07]

dans le cadre de sa thèse. Quelque soit l'étude, les diamètres des échantillons sont donc bien inférieurs aux diamètres de nos brins métalliques.

Les dispositifs expérimentaux de Margueritat [MAR02] et Lechat [LEC07] sont assez semblables. Les deux auteurs ont utilisé une machine de traction horizontale. Lechat fournit néanmoins davantage d'informations. Ses essais sur filaments ont été réalisés sur une machine développée spécifiquement pour ce type d'essais par Bunsell dans les années 70 [BUN71]. Le dispositif est similaire aux machines d'essais mécaniques habituellement utilisées, avec des dimensions beaucoup plus réduites. Deux mors, l'un fixe et l'autre mobile, sont reliés à un bâti. Le mors mobile est translaté selon l'axe du spécimen grâce à un moteur entraînant la vis mère.

Tan [TAN06] a, quant à lui, sollicité ses brins sur une machine verticale. Avant d'en arriver à un dispositif de nanotraction, l'auteur explique qu'il a essayé d'appliquer deux techniques :

- l'utilisation détournée d'un nanoindenteur pour effectuer un test de traction d'une seule fibre ultrafine [TAN04].
- la fixation de l'extrémité de la nanofibre à la pointe du cantilever piézorésistif d'un microscope à force atomique (AFM) et l'autre extrémité à une platine de microscope optique mobile [TAN05]. La pointe de l'AFM agit comme un capteur de force, tandis que la platine du microscope est utilisée pour étirer la nanofibre.

Tous les dispositifs présentés ci-dessus sont destinés à la traction d'échantillons à l'échelle nano/micrométrique.

Concernant les moyens d'acquisition, Margueritat [MAR02] a opté pour un capteur d'effort à lame en bronze-béryllium très rigide et un capteur de déplacement à transformateur différentiel (LVDT) placé sur la traverse. Lechat [LEC07] a, elle aussi, utilisé un capteur de déplacement LVDT, mais a mesuré les forces de traction à l'aide d'un capteur à jauges semi-conductrices d'une capacité de 1N. Tan [TAN06] ne donne quant à lui pas de détail sur les moyens d'acquisition de données.

Pour que le filament soit sollicité uniquement en traction (cisaillement négligeable), Margueritat [MAR02] propose de monter la fibre sur une feuille de bristol quadrillée, ce qui permet l'alignement. Cette méthode, conforme à la norme ASTM D 3379-75, semble donner de bons résultats.

#### **2.2.1.2. Fléchissement des dispositifs expérimentaux :**

Bien que les dimensions des brins et les efforts à appliquer jusqu'à rupture soient faibles, Margueritat [MAR02] suppose rapidement des problèmes liés à la compliance du bâti, sans en confirmer l'existence. Le recours à un capteur de déplacement situé sur la traverse ne permet pas la prise en compte des cédaiges de la machine, des capteurs ou de la colle permettant de fixer ses échantillons. L'utilisation d'extensomètres classiques pour remonter à la déformation réelle de la matière et aux contraintes n'est pas envisageable de part la fragilité et le diamètre réduit des brins polymères étudiés. Cela fragiliserait les brins et réduirait leurs tenues à l'arrachement. Ainsi, l'auteur privilégie un dépouillement qualitatif des résultats, en précisant que les valeurs des modules d'Young sont incertaines. Margueritat ne s'attache qu'aux valeurs de contrainte à la rupture, expliquant que le fait d'ignorer la compliance du bâti fausse également les valeurs de déformation.

Un problème analogue est imputable à la pré étude de thèse. Le recours au déplacement de la traverse comme déplacement de la matière au niveau des mors permet de déduire l'allongement de

la matière, en faisant l'hypothèse que le bâti et le capteur d'effort ne fléchissent pas. Cette hypothèse de bâti infiniment rigide peut se justifier en partant du principe que la machine de traction Erichsen est conçue pour traiter des échantillons bien plus volumineux et résistants. Cependant, l'allongement du capteur d'effort est également à prendre en compte.

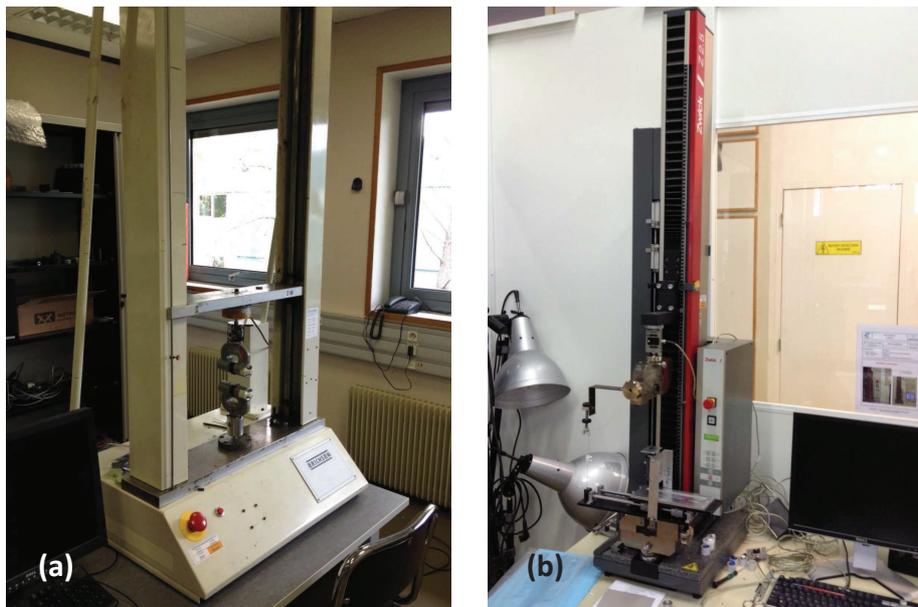
## 2.2.2. Moyens d'essais :

### 2.2.2.1. Sollicitations en traction :

Parmi nos échantillons à caractériser, les brins sont les seuls à pouvoir être sollicités en traction. Les dispositifs de traction présents au CEMEF sont nombreux, de la machine de précision (Zwick 200N) à la machine de puissance (Dartec 3T). Dans le cadre de notre étude, deux machines sont adaptées aux gammes de contraintes et de déformations à appliquer à notre problème :

- Machine de traction/compression Erichsen (cf. Figure 2-1-a) équipée d'un capteur de 10 ou 100N et d'extensomètre mécaniques ou d'un suivi par vidéotraction®.

- Machine de traction/compression Zwick. (cf. Figure 2-1-b) équipée d'un capteur de 2kN et d'extensomètres mécaniques.



*Figure 2-1 : Dispositifs de traction du CEMEF : Erichsen (a) et Zwick (b).*

L'avantage de la machine de traction Erichsen réside dans la possibilité d'utiliser un suivi des déplacements par Videotraction®. Directement en lien avec la problématique de compliance du bâti abordée dans le paragraphe précédent, ce dispositif permet de remonter à la déformation réelle.

Le principe de cet appareil est simple. Des marqueurs sont positionnés sur l'échantillon. L'acquisition vidéo, réalisée à l'aide d'une caméra, permet de convertir la distance entre les marqueurs en nombre de pixels, et d'en suivre l'évolution au cours du temps. Cette technique a déjà été appliquée sur des éprouvettes de traction en polyéthylène par Temimi-Maaref [TEM06]. La difficulté principale, dans notre cas, a été de réaliser le marquage. Le choix de marqueur à l'aide d'une encre noire pâteuse s'est avéré le plus efficace, comme on peut l'observer sur la Figure 2-2.

Les brins ont été fixés par collage à la cyanoacrylate entre deux plaquettes aluminium rainurées, afin de ne pas engendrer de déformation initiale liée à l'écrasement par les mors pneumatiques.



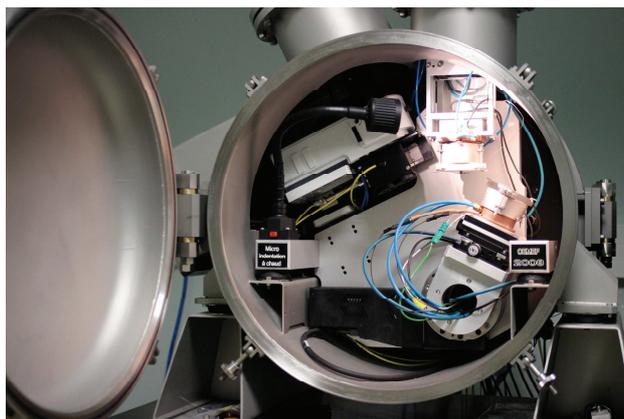
*Figure 2-2 : Marquage des brins à l'encre pour le suivi par vidéotraction®.*

#### **2.2.2.2. Sollicitations en compression :**

Dans son manuscrit de thèse, Fayolle [FAY08] insiste sur l'importance de solliciter les éprouvettes dans des conditions proches des sollicitations du procédé. Le sertissage étant un procédé d'assemblage basé sur l'écrasement d'un contact sur un câble, la sollicitation et la caractérisation en compression sont importantes pour tenir compte de l'anisotropie de la matière et s'assurer de la prédiction des efforts de sertissage lors de la simulation. En effet, les brins des câbles sont obtenus par tréfilage. On peut donc supposer que le comportement de la matière est impacté par son anisotropie. Les machines de traction/compression Erichsen et Zwick sont capables de réaliser des essais de compression. Cependant, étant données les dimensions et formes des brins et contacts, il est difficile, en l'état, de pouvoir faire des acquisitions avec ces deux dispositifs sur nos échantillons. L'utilisation d'extensomètre ou du dispositif de vidéotraction® est impossible à appliquer pour cause d'échantillons trop petits.

Pour s'approcher de la gamme de déplacement prévu de nos essais, l'analyse des machines d'indentation a semblé être judicieuse. Le CEMEF est équipé d'une machine de nano indentation dont la gamme d'acquisition en terme d'efforts est adaptée à notre étude. Cependant, les déplacements trop limités applicables par ce dispositif nous ont poussé à abandonner cette piste.

Le CEMEF est également équipé d'une machine de micro indentation à chaud, mise au point en interne par le groupe MEA (Mesures, Etudes, Atelier) en 2008, et notamment utilisé par Payen [PAY10] dans le cadre de sa thèse. Une photographie de cette machine est présentée à la Figure 2-3.



*Figure 2-3 : Dispositif de micro indentation.*

Cet appareil permet l'acquisition de déplacements sur une plage de 0,5 mm. Cependant, les efforts sont limités à 10N pour de l'indentation Vickers classique. Une pré étude numérique a montré qu'une adaptation de la machine était donc indispensable pour réaliser les essais souhaités.

## **2.3. Etude en traction des brins :**

### **2.3.1. Objectifs et paramétrages de la campagne d'essais :**

L'objectif de cette première campagne d'essais est de caractériser le comportement de la matière de nos différents brins en traction. Cette campagne a été menée sur la machine de traction Erichsen, préalablement équipée d'un capteur de 10 ou 100N en fonction du diamètre et de la nature du brin (cuivre ou aluminium). Le recours au suivi des déplacements par vidéotraction® a été un gros avantage pour remonter à la déformation vraie de la matière.

#### **2.3.1.1. Conversion de la force de traction en contrainte :**

Le suivi par vidéotraction a permis de déterminer la déformation dans l'axe longitudinal du brin. Les résultats bruts des essais sont donc de type Force/Déformation longitudinale. En faisant l'hypothèse de l'absence de striction localisée, le brin peut être assimilé à un cylindre dont le diamètre diminue au fur et à mesure que sa hauteur augmente. Le calcul analytique permet de remonter aux contraintes. La méthode de conversion est présentée en annexe 1 de ce manuscrit.

Pour la conversion des données, nous avons veillé à utiliser une valeur du rayon initiale mesurée au palpeur micrométrique plutôt que les valeurs théoriques des rayons des brins (dépouillement au cas par cas).

#### **2.3.1.2. Synthèse des échantillons à analyser :**

L'étude des deux technologies de câblage rassemble un grand nombre de brins de nature et dimensions différentes.

#### **Technologie cuivre :**

Deux jauges différentes sont étudiées dans le cadre de la thèse :

- Jauge 22 (Cu22) : 19 brins de cuivre de 0.15 mm de diamètre, repartis sur 3 niveaux. Le schéma (b) de la Figure 2-4 montre le brin central (en vert) et deux couronnes de 6 brins (en orange) et 12 brins (en rouge).

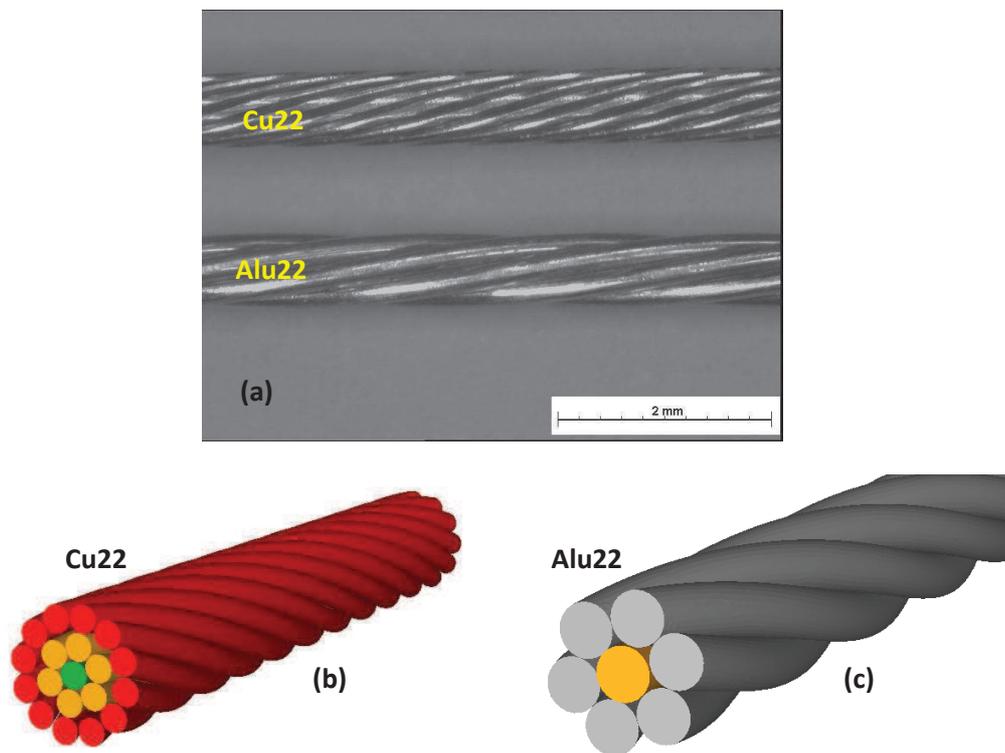
- Jauge 24 (Cu24) : 19 brins de cuivre de 0.115 mm de diamètre, également sur 3 niveaux. Les brins étant plus petits, le cuivre du câble Cu24 est "renforcé" (alliage différent) et a subi un recuit après torsadage pour éviter la rupture du câble dans la gaine lors des manipulations.

**Technologie aluminium :**

Deux autres câbles sont également étudiés dans le cadre de la thèse :

- Jauge 22 (Alu22) : 6 brins d'aluminium et un brin central de cuivre, tous de 0.25 mm de diamètre. Le schéma (c) de la Figure 2-4 montre le brin central (en cuivre) et l'unique couronne de 6 brins (en aluminium). Le brin de cuivre apporte la résistance mécanique à l'ensemble. L'aluminium permet le gain de poids, tout en conservant une excellente conductivité électrique.

- Jauge 24 (Alu24) : 6 brins d'aluminium et un brin de cuivre, tous de 0.2 mm de diamètre. Les brins étant plus petits, le cuivre du câble Alu24 est également "renforcé" (alliage différent) par rapport au cuivre du câble Alu22. Cependant, aucun recuit n'est réalisé.



*Figure 2-4 : Photographies des câbles Cu22 et Alu22 (a) et schémas de l'agencement des brins : technologie cuivre (b) et technologie aluminium (c).*

Le Tableau 2-1 permet de synthétiser l'ensemble des échantillons à étudier. Pour distinguer les différents brins, les dénominations utilisées dans ce manuscrit sont mentionnées en rouge :

	Jauge 24	Jauge 22	Jauge 20
<b>Technologie Cuivre</b>	19 brins de cuivre <b>Cu24</b> Ø d'un brin : 0.115 mm 6 brins d'aluminium	19 brins de cuivre <b>Cu22</b> Ø d'un brin : 0.15 mm 6 brins d'aluminium	19 brins de cuivre <b>Cu20</b> Ø d'un brin : 0.20 mm
<b>Technologie Aluminium</b>	<b>Alu24</b> + 1 brin de cuivre <b>Siclanic24</b> Ø d'un brin : 0.2 mm	<b>Alu22</b> + 1 brin de cuivre <b>CuProFor22</b> Ø d'un brin : 0.25 mm	Non étudié

Tableau 2-1 : Synthèse des échantillons de type "brin" à étudier en traction.

Le Tableau 2-1 possède également une colonne pour le câble Cu20, dont les 19 brins de cuivre mesurent 0.20 mm de diamètre. L'étude rapide des brins de ce câble doit permettre de s'assurer que le comportement de la matière des brins de Cu20 est le même que celui des brins de Cu22, comme le mentionnent les normes de nos partenaires industriels.

## 2.3.2. Résultats de la campagne d'essais :

### 2.3.2.1. Technologie cuivre :

La première série d'essais menée sur les brins d'un câble Cu22 a montré une grande dispersion des courbes d'efforts. Les courbes de cette série sont représentées sur la Figure 2-5. Cette dispersion avait déjà été observée lors des essais de traction menés dans le cadre du mastère spécialisé.

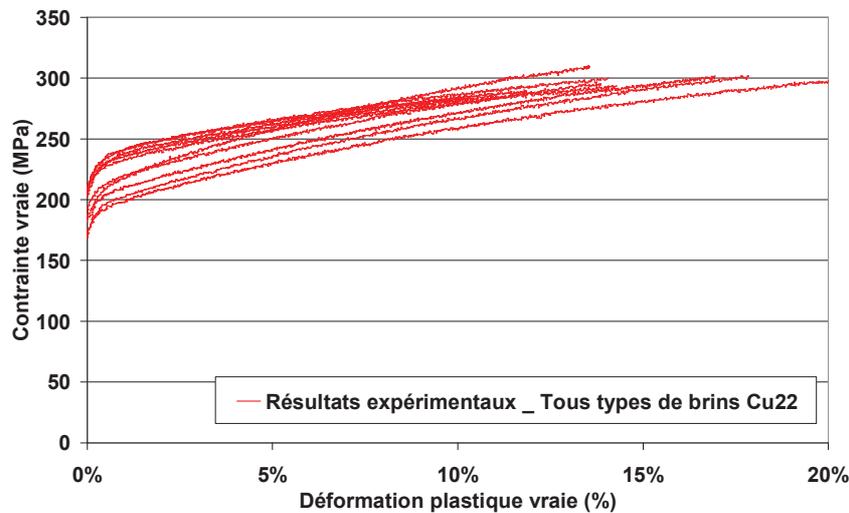


Figure 2-5 : Résultats des essais de traction sur brins cuivre de Cu22 sans distinction de la position initiale du brin dans la corde.

Dans le cadre de cette étude, une hypothèse avait été formulée quant à l'origine de cette dispersion. Le procédé de torsadage des brins engendrerait une plastification différente des brins en fonction de leur position dans la corde. Pour valider cette hypothèse, on compare les courbes de tractions obtenues avec des brins vierges issus du tréfilage (et jamais torsadés), et avec des brins extraits délicatement d'une corde Cu22. Comme le montre le graphique de la Figure 2-6, le comportement des deux brins est différent.

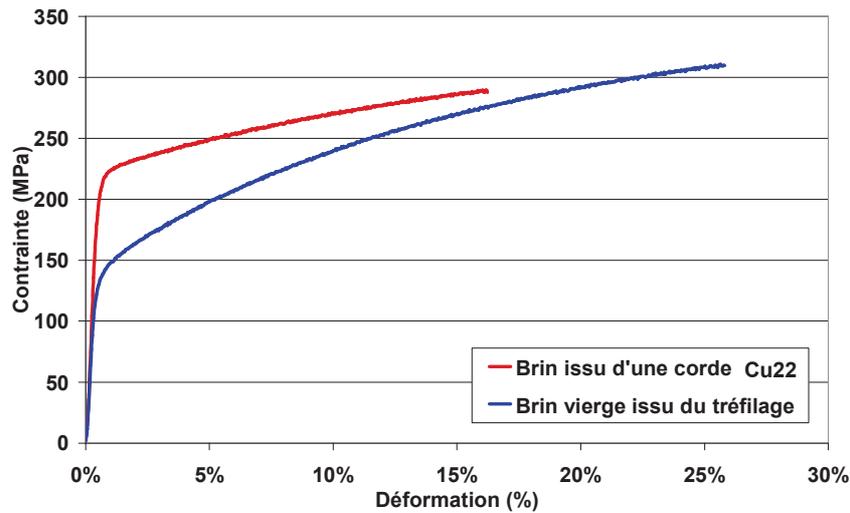


Figure 2-6 : Différence de comportement entre brin vierge et brin issu d'une corde Cu22.

Nous avons donc supposé que le comportement des brins était également différent en fonction de la position du brin dans la couronne. Après une extraction précise des brins, pour ne pas engendrer de plastification additionnelle, une nouvelle série d'essais a été réalisée en distinguant les trois origines de brins possibles. Les courbes obtenues ont été superposées sur le graphique de la Figure 2-7.

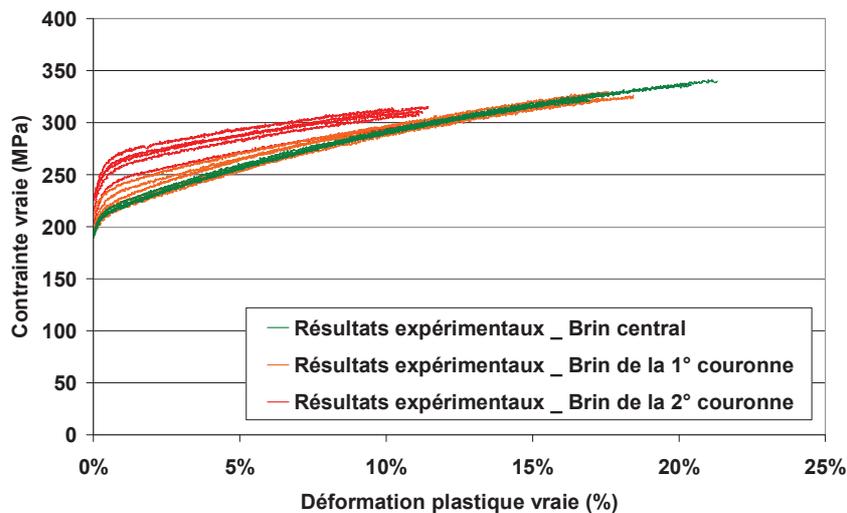


Figure 2-7 : Relevés d'efforts de traction pour les échantillons Cu22 testés : impact de la position du brin dans le câble.

Trois séries de courbes sont mises en évidence. Cela confirme un comportement différent des brins issus des trois couronnes. On émet l'hypothèse que cette différence provient du torsadage qui engendre une plastification du cuivre, dont il faudra tenir compte lors des caractérisations. Les brins de la 2<sup>o</sup> couronne (les plus sollicités) voient leur limite élastique repoussée et leur allongement à rupture réduit par rapport aux brins de la 1<sup>o</sup> couronne et aux brins centraux.

Après détermination des courbes moyennes expérimentales pour chaque type de brins, un décalage selon l'axe des abscisses (déformation) a été opéré pour superposer le domaine des courbes d'écroutissage correspondant à la déformation plastique de la matière pour les plus hauts niveaux de déformations. Ainsi, les valeurs de déformations initiales dans les brins ont pu être approximées. L'hypothèse d'une plastification homogène des brins a été faite. Le graphique de la Figure 2-8

permet de conclure que les brins de la 1<sup>o</sup> couronne ont subi une déformation de l'ordre de 0,8% et que les brins de la 2<sup>o</sup> couronne ont subi une déformation de l'ordre de 4,7%. La prise en compte des déformations initiales sera discutée lors de l'étude des simulations numériques de sertissage et d'arrachement. Pour la caractérisation de la matière Cu22, seules les courbes d'essais sur brins centraux seront analysées car elle sont les plus reproductibles. Le Tableau 2-2 fournit la valeur de l'écart type maximal pour cet échantillon.

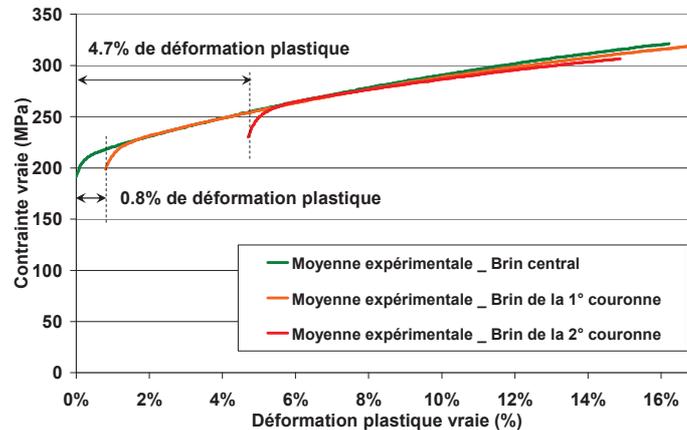


Figure 2-8 : Approximation des niveaux de déformations de chaque type de brin par décalage pour superposition des courbes d'érouissage.

Des essais de traction analogues ont été réalisés sur les brins des cordes Cu24 et Cu20. La Figure 2-9 rassemble deux graphiques avec les courbes obtenues pour les deux types de corde.

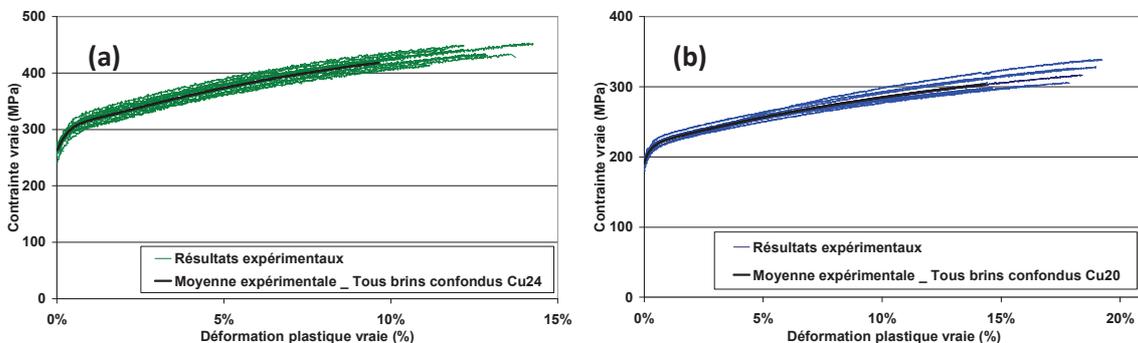


Figure 2-9 : Résultats expérimentaux des essais de traction de brins de Cu24 (a) et de Cu20 (b).

Contrairement aux essais menés sur la corde Cu22, la dispersion des essais sur Cu24 est faible, tous les types de brins étant superposés sur le graphique de la Figure 2-9 (a). Cette faible dispersion s'explique par le recuit que le câble Cu24 a subi après mise en toron, et qui a restauré les propriétés mécaniques de la matière.

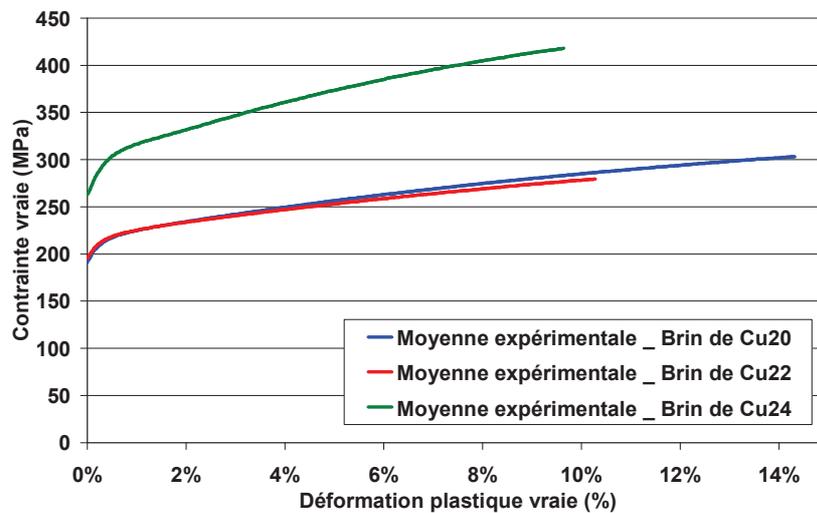
Concernant les essais menés sur le Cu20, seuls des brins centraux ont été testés. L'objectif était de vérifier que le comportement de la matière entre le cuivre du Cu22 et le cuivre du Cu20 est identique, comme le prévoit les normes aéronautiques de nos partenaires industriels.

Le Tableau 2-2 rassemble les valeurs des écarts types maximums pour l'ensemble des séries d'essais de traction de brins de la technologie cuivre.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
Cu20	0 à 350 MPa	1.5 MPa	0.43 %
Cu22	0 à 500 MPa	10 MPa	2 %
Cu24	0 à 320 MPa	11.4 MPa	3.5 %

*Tableau 2-2 : Quantification de la dispersion des essais de traction sur brins de la technologie cuivre.*

Le graphique de la Figure 2-10 permet de conclure en deux points. Tout d'abord, le comportement des brins de Cu22 et Cu20 en traction est identique. En revanche, les brins "renforcés" de Cu24 sont caractérisés par une courbe d'écroutissage dont les niveaux de contraintes sont plus élevés, ce qui est en accord avec les prescriptions des normes. Ce comportement permet de compenser les dimensions réduites des brins et conserver une bonne tenue mécanique à l'arrachement.



*Figure 2-10 : Superposition des moyennes expérimentales obtenues pour chaque type de brins : Cu20, Cu22 et Cu24.*

### 2.3.2.2. Technologie aluminium :

Les quatre types de brins de la technologie aluminium ont été sollicités en traction, afin d'en déterminer la loi de comportement mécanique. Les différents graphiques de la Figure 2-11 permettent de constater la très bonne reproductibilité des essais. Pour justifier cette affirmation, les écarts types en fin d'essais sont renseignés dans le Tableau 2-3.

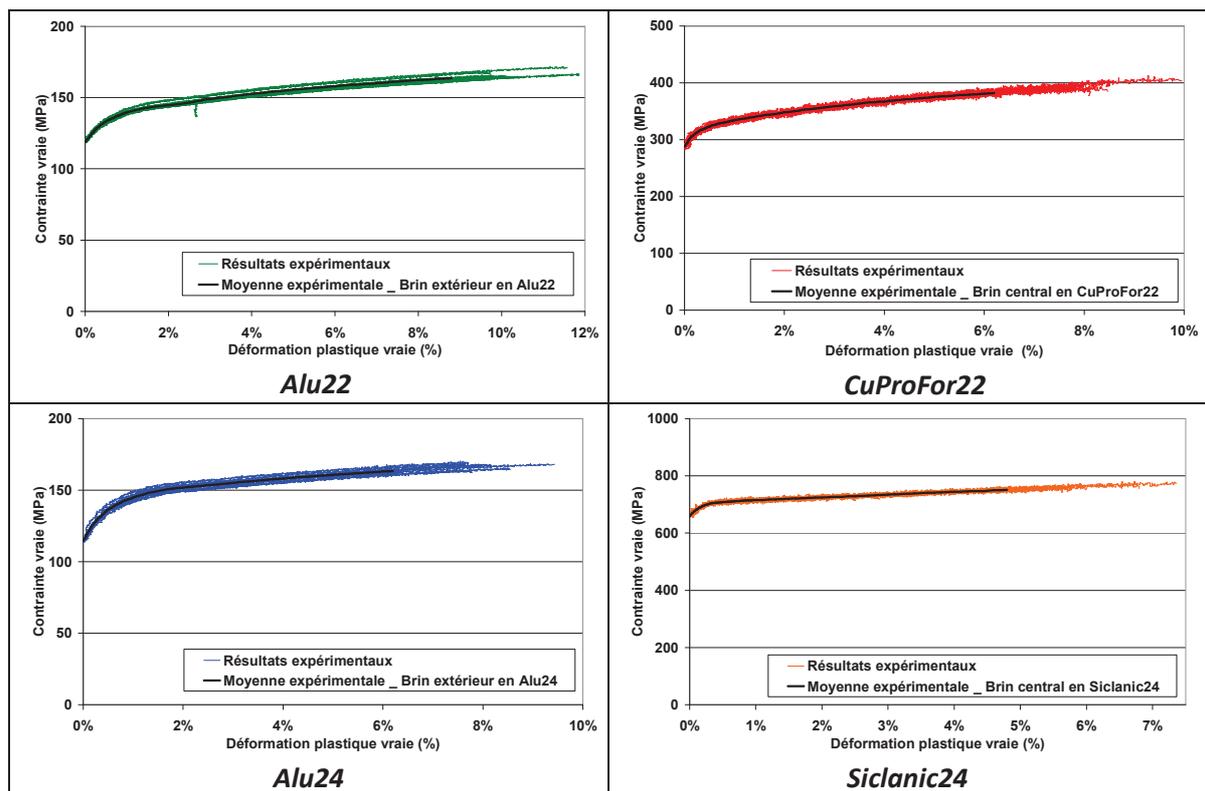


Figure 2-11 : Synthèse des courbes expérimentales en traction obtenues sur les brins de la technologie aluminium.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
Alu22	0 à 160 MPa	1.8 MPa	1.1 %
CuProFor22	0 à 400 MPa	2.8 MPa	0.7 %
Alu24	0 à 160 MPa	1.9 MPa	1.2 %
Siclantic24	0 à 750 MPa	4.0 MPa	0.5 %

Tableau 2-3 : Quantification de la dispersion des essais de traction sur brins de la technologie aluminium.

Cette reproductibilité des essais est un avantage pour une caractérisation précise des lois de comportements de nos matériaux.

Le graphique de la Figure 2-12 superpose les moyennes expérimentales des quatre types de brins précédemment cités. Concernant les brins en aluminium des deux cordes (Alu22 et Alu24), le graphique permet de conclure que le comportement de la matière est identique. Cette conclusion est en accord avec les normes aéronautiques. A contrario, les brins de cuivre ont des comportements différents. Le brin de Siclantic24, extrait de la corde Alu24, a un comportement plus résistant que le brin de CuProFor22 de l'Alu22. Ceci permet de conserver une bonne tenue mécanique de l'Alu24, câble de section plus petite que l'Alu22. Néanmoins, les courbes d'écrouissage des deux types de brins cuivre sont au-dessus des courbes d'écrouissage des brins aluminium. Cela démontre que les brins centraux en cuivre permettent aux deux cordes d'avoir une meilleure tenue à la traction.

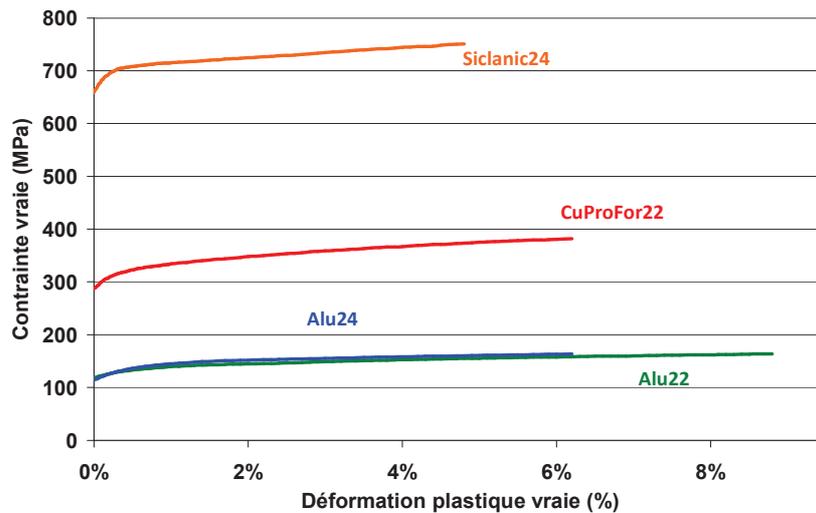


Figure 2-12 : Superposition des moyennes expérimentales obtenues pour chaque type de brins : Alu22, CuProFor22, Alu24, Siclanic24.

### 2.3.3. Conclusion et limitations de ce type de sollicitation :

Les essais de traction, menés sur l'Erichsen, ont permis d'obtenir, pour chaque type de brin, une courbe expérimentale moyenne contrainte/déformation. L'utilisation du suivi par vidéotraction® a été couplée à un calcul analytique des données brutes pour aboutir à ces résultats, avec une reproductibilité et une précision en accord avec notre problématique. Ces données moyennes seront traitées dans le troisième chapitre de ce manuscrit, afin de remonter aux paramètres des lois de comportement matériaux considérés.

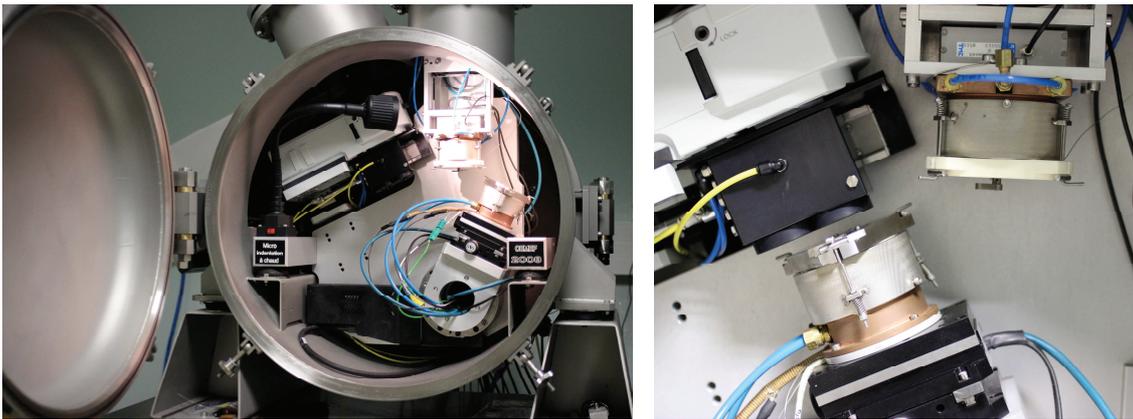
Lors d'un sertissage, le contact est écrasé sur les brins pour réaliser l'assemblage mécanique. La sollicitation s'apparente donc davantage à un essai de compression. De plus, les brins sont fabriqués par tréfilage. Une anisotropie de la matière est à prévoir. Enfin, les essais de traction ne permettent pas de prévoir le comportement de la matière pour de grandes déformations, les brins cassant pour des déformations de l'ordre de 5 à 15% en fonction de la nature du matériau.

Pour toutes ces raisons, nous avons réfléchi à un moyen de solliciter nos brins en compression. Etant donné que les contacts ne peuvent pas être sollicités en traction de part leur géométrie, nous avons choisi un dispositif qui pourrait permettre de tester à la fois les brins et les contacts.

## 2.4. Etude en micro compression des échantillons :

### 2.4.1. Objectifs et mise en place de la campagne d'essais :

En 2008, le groupe MAE du CEMEF a mis au point un dispositif de micro indentation à chaud. Cette machine est constituée d'une cuve permettant de réaliser un vide partiel et de chauffer l'échantillon à indenter. Cependant, il est possible de désactiver la chauffe et de travailler à pression ambiante. Cette machine a semblé la plus adaptée en terme de capacité des capteurs et de dimensions admissibles des échantillons. La Figure 2-13 rassemble deux photographies de la machine de micro indentation.



*Figure 2-13 : Machine de micro indentation.*

Concernant l'acquisition des données, un capteur capacitif permet de remonter au déplacement de l'outil sur une plage de 0.5 mm. Par défaut, un capteur d'effort de 10N permet d'enregistrer les efforts. Une étude réalisée en amont du travail de thèse a montré les limitations liées à ce capteur. Un capteur de 60N a donc été installé pour notre étude, cette valeur étant l'effort maximal admissible par les platines de déplacements. La Figure 2-14 rassemble deux photographies. La photographie (a) permet de visualiser le dispositif en position d'indentation. La partie haute est la partie mobile, sur laquelle est fixé l'outil de compression. La photographie (b) permet d'observer la platine porte échantillon usinée au CEMEF, et qui permet de maintenir en position les brins et les contacts lors de la compression.

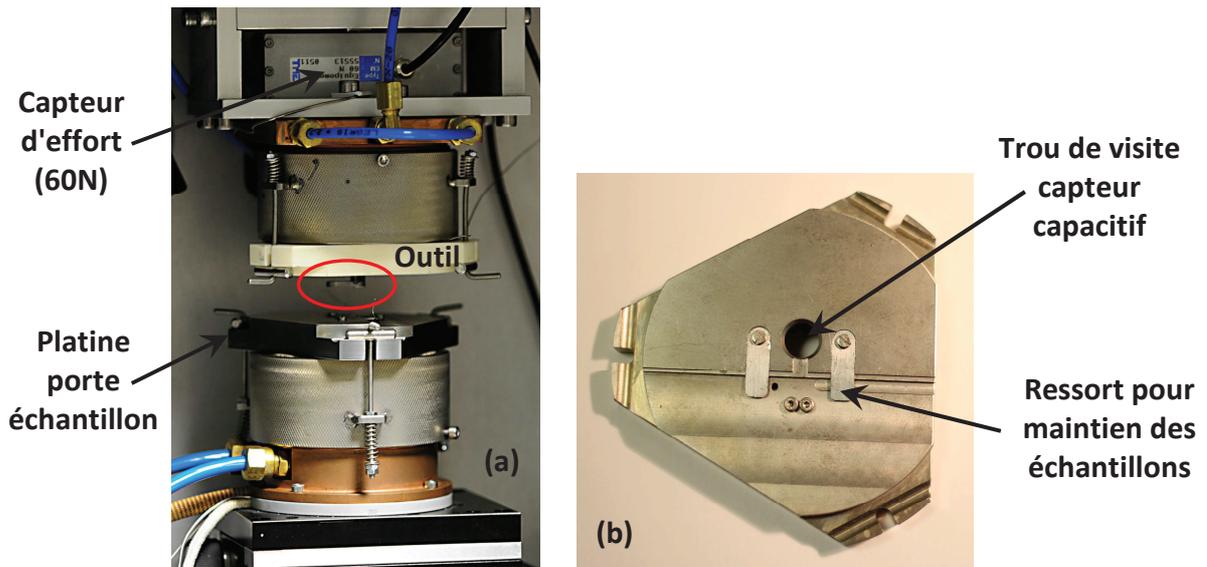


Figure 2-14 : Appareil en position d'indentation (a) et visuel du porte échantillon (b).

Par défaut, la machine de micro indentation est équipée d'une pointe Vickers pour réaliser les mesures de dureté. Dans le cadre de la thèse, un outil plan a été usiné afin de réaliser une compression plane. Cet outil spécifique est observable à la Figure 2-15. Il est fixé à la partie mobile du dispositif par une goupille passant dans le trou visible. La zone de compression est située à la verticale de ce trou. L'outil possède une protubérance qui permet d'activer le capteur capacitif et de mesurer les déplacements. Le schéma de la Figure 2-16 détaille les différents composants du dispositif expérimental.



Figure 2-15 : Visuels de l'outil mis au point pour solliciter nos échantillons.

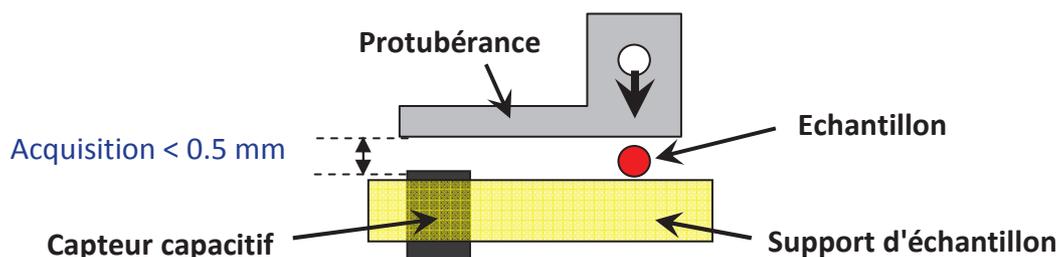


Figure 2-16 : Schéma du dispositif de micro compression.

#### 2.4.2. Campagne d'essais de micro compression sur brins :

Pour la micro compression de brins, l'outil de base plan a été équipé d'un demi cylindre calibré de 0.5 mm de rayon, positionné de manière transversale au brin comprimé. Cette forme permet de s'approcher de la géométrie d'un mors de sertissage. Les photographies de la Figure 2-17 permettent de constater la différence de profil d'un brin avant et après compression. Des niveaux de déformations supérieurs à ceux obtenus en traction sont prévisibles.

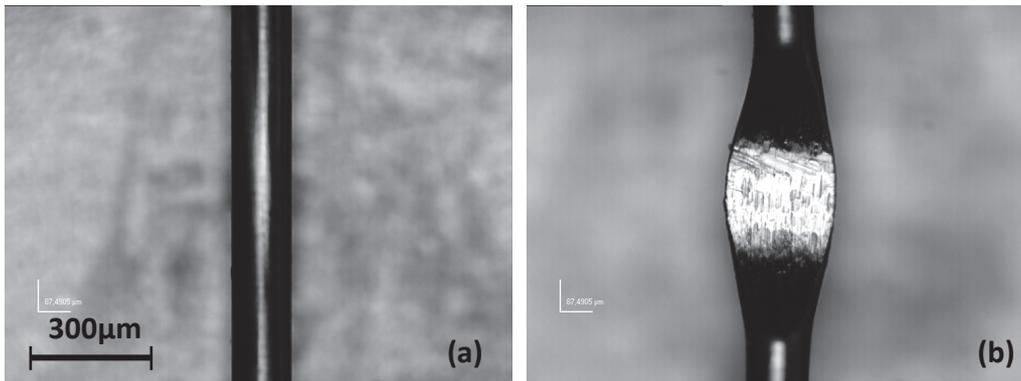


Figure 2-17 : Comparaison du profil avant (a) et après (b) compression d'un brin de cuivre de câble Cu22

#### 2.4.2.1. Technologie cuivre

La première campagne d'essai de compression sur brins a été réalisée sur les brins issus de câble Cu22 et Cu24 de la technologie cuivre. La Figure 2-18 rassemble les courbes des séries d'essais.

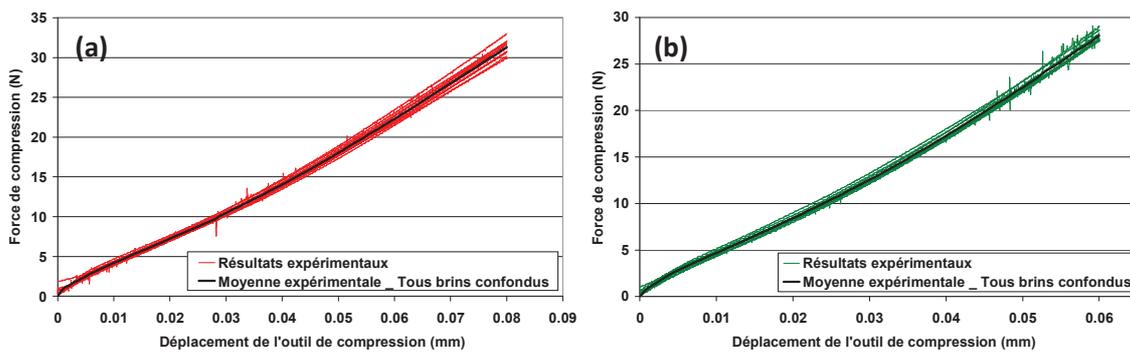


Figure 2-18 : Courbes expérimentales obtenus par essais de compression de brins Cu22 (a) et Cu24 (b)

Les écarts types en fin d'essai, pour chaque série, sont rassemblés dans le Tableau 2-4.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
Cu22	0 à 30 N	0.93 N	3.1 %
Cu24	0 à 28 N	0.52 N	1.8 %

Tableau 2-4 : Quantification de la dispersion des essais de compression sur brins de la technologie cuivre.

La superposition des courbes moyennes expérimentales de ces deux types de brins est faite sur la Figure 2-19. La course de compression est réduite pour le brin de Cu24 car son diamètre initial est inférieur. Cependant, le comportement renforcé des brins Cu24, déjà mis en évidence suite aux essais de traction qui ont mené à l'obtention de la Figure 2-10, est à nouveau observé sur ce graphique. De manière relative aux diamètres de chaque brin, le matériau des brins Cu24 est plus résistant que le matériau constituant les brins de Cu22.

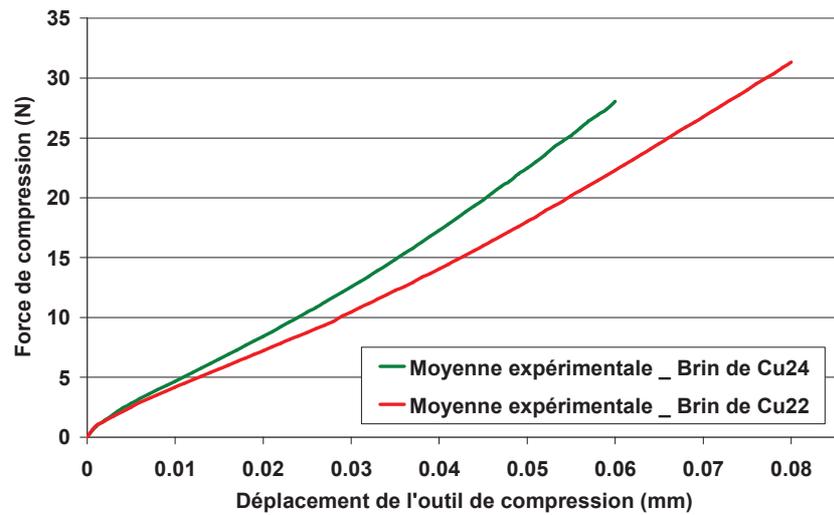


Figure 2-19 : Comparaison des moyennes expérimentales d'efforts de compression de brins Cu22 et Cu24

#### 2.4.2.2. Technologie aluminium

Les essais de compression menés sur les brins de la technologie cuivre ayant été concluants, le dispositif d'essai n'a pas été modifié pour l'obtention des courbes expérimentales pour la technologie aluminium. La Figure 2-20 rassemble les courbes force/déplacement obtenues pour les quatre types de brins liés à cette technologie.

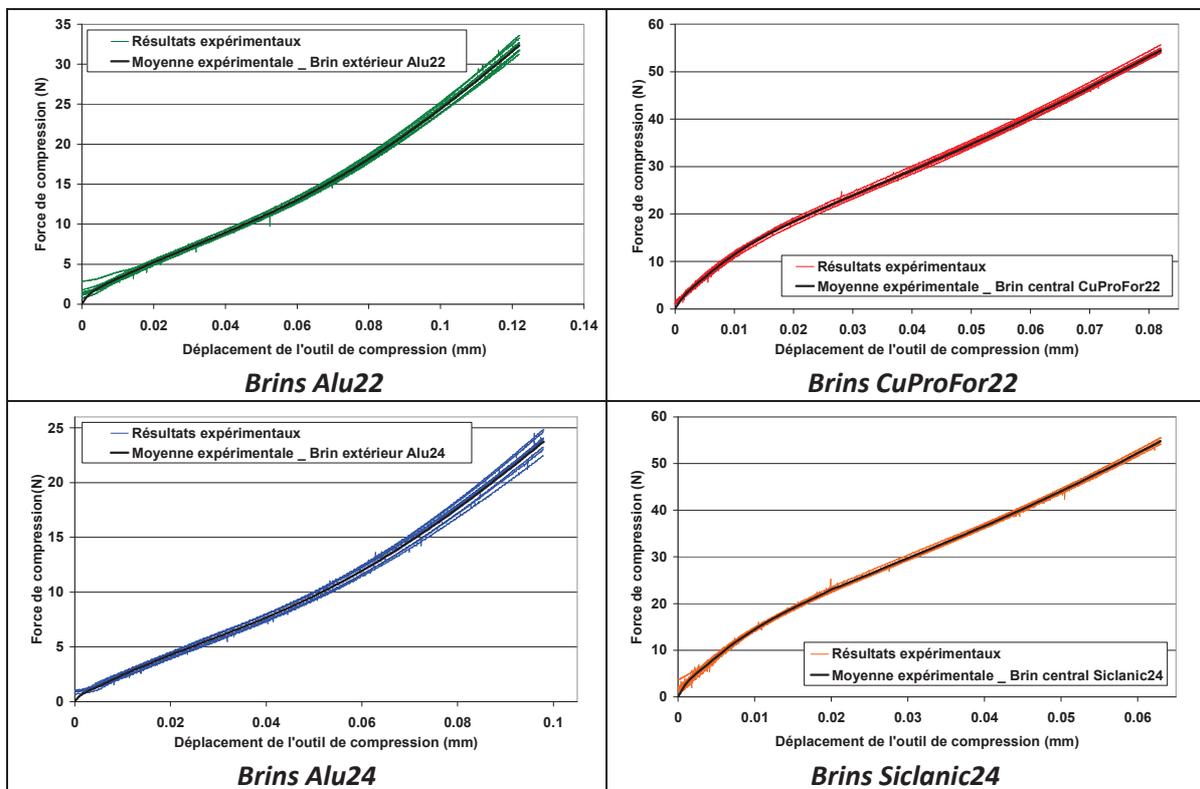


Figure 2-20 : Synthèse des courbes expérimentales en compression obtenues sur les brins de la technologie aluminium.

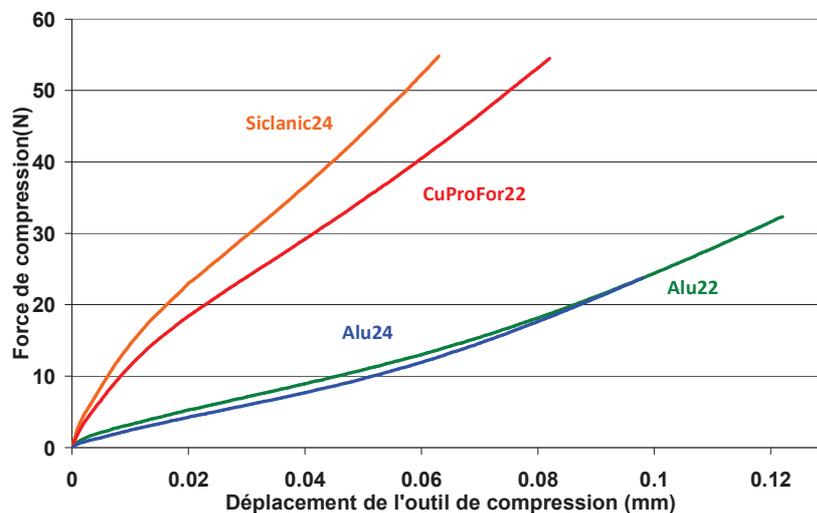
Comme pour les brins de la technologie cuivre, ces essais sont caractérisés par une excellente reproductibilité. Les écarts types en fin d'essais, pour chaque série, sont rassemblés dans le Tableau 2-5.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
Alu22	0 à 32 N	0.75 N	2.3 %
CuProFor22	0 à 55 N	0.54 N	1.0 %
Alu24	0 à 24 N	0.75 N	3.1 %
Siclanic24	0 à 55 N	0.48 N	0.9 %

*Tableau 2-5 : Quantification de la dispersion des essais de compression sur brins de la technologie aluminium.*

Pour une meilleure visualisation des résultats, les moyennes expérimentales de chaque type de brins sont superposées sur le graphique de la Figure 2-21. La conclusion est analogue à celle obtenue suite aux essais de traction. Les matériaux CuProFor22 et Siclanic24 sont notablement plus résistants que les brins d'aluminium, comme le prédisent les normes.

Les courbes d'efforts de compression des brins en aluminium Alu22 et Alu24 sont presque superposées. Pour s'assurer qu'une erreur d'analyse des courbes expérimentales n'ait pas été faite, nous avons simulé la compression d'un brin de 0.2 mm et d'un brin de 0.25 mm en utilisant une même rhéologie correspondant à un aluminium Al99 de la librairie de matériaux Forge®. La Figure 2-22 superpose les deux courbes d'efforts simulés et nous pousse à faire le même constat que l'analyse des courbes expérimentales. Finalement, la différence entre les deux courbes est du même ordre de grandeur que la dispersion même des essais mécaniques. La différence de diamètre (0.2 mm pour l'Alu24 contre 0.25 mm pour l'Alu22) impacte peu les niveaux d'efforts en fonction de la hauteur de presse réalisée.



*Figure 2-21 : Superposition des moyennes expérimentales en compression obtenues pour chaque type de brins : Alu22, CuProFor22, Alu24, Siclanic24.*

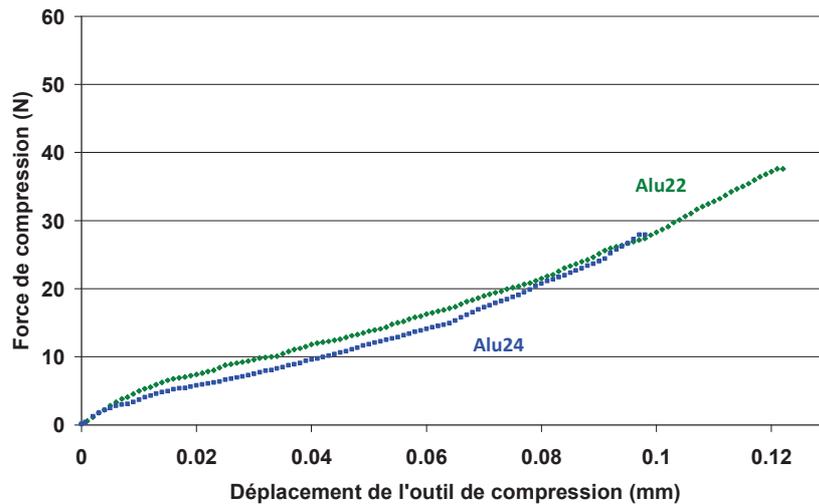


Figure 2-22 : Courbes d'efforts de compression simulées pour les brins d'Alu22 et d'Alu24 avec la même loi de comportement.

### 2.4.3. Campagne d'essais de micro compression sur contacts de la technologie cuivre :

#### 2.4.3.1. Synthèse des échantillons à tester :

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes limités à l'analyse de deux références de contacts pour la technologie cuivre. Ces références sont les plus utilisées en chaîne de production, et peuvent être serties sur les deux câbles Cu22 et Cu24 étudiés jusqu'ici. La première correspond au contact femelle F. La seconde correspond au contact mâle M. Dimensionnellement parlant, ces deux types de contacts sont identiques au niveau de la partie sertie sur le câble. Les plans de la Figure 2-23 montrent que les zones serties, entourées en rouge, sont identiques.

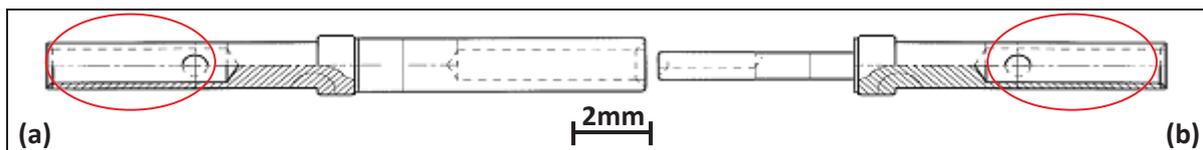


Figure 2-23 : Mises en plans sans côtes des contacts F (a) et M (b).

Le matériau employé pour la fabrication des deux types de contacts répond également aux mêmes normes aéronautiques. La seule différence entre les deux références est le traitement thermique de recuit que le contact femelle a subi. Le recuit consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé. Comme l'explique Bullens [BUL35], cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de mise en forme des contacts. Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques du métal et de restaurer ses propriétés physiques originelles. À l'occasion d'un recuit, les grains (mono-cristaux) de matière se reforment et retrouvent leur "état d'équilibre".

Avec un mauvais recuit (temps insuffisant par exemple), les propriétés mécaniques de la matière ne seront donc pas totalement restaurées. La campagne d'essais a eu pour objectif de tester des contacts F convenablement recuits, mais également "non recuits" et "trop recuits", afin de vérifier

l'influence de ce traitement thermique sur le sertissage et sa tenue mécanique. Le Tableau 2-6 synthétise les quatre types de contacts qui seront sollicités par le dispositif de micro compression.

	Dénomination	Dimensions
Contact mâle	<b>M</b>	Diamètre externe : 1.195 mm Diamètre inter : 0.876 mm
	<b>F</b>	Idem
Contact femelle	<b>F non recuit</b>	Idem
	<b>F trop recuit</b>	Idem

Tableau 2-6 : Synthèse des échantillons de type "contact" à étudier en micro compression.

#### 2.4.3.2. Essais sur contacts entiers :

Des essais de compression sur contacts entiers ont été menés en début de thèse. La capacité de 60N du capteur d'effort est devenu le facteur limitant l'amplitude de nos essais, et les niveaux de déformation applicables à nos échantillons. La Figure 2-24 permet de visualiser la déformation subie par le fût du contact à cette limite du capteur d'effort.

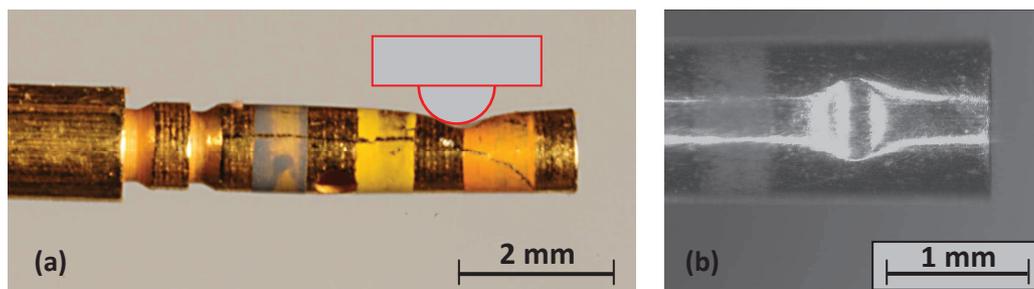
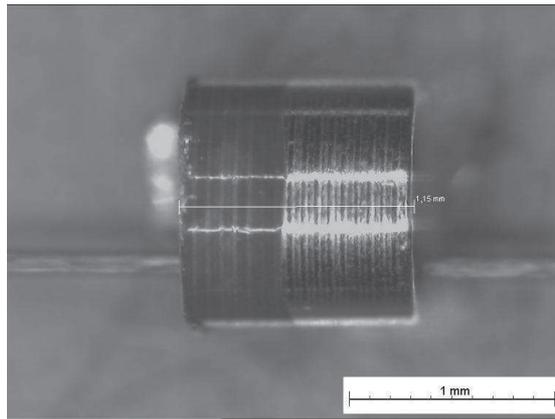


Figure 2-24 : Principe de l'essai de compression de contact avec indenteur cylindrique (a) et visuel d'un contact après compression à 55N.

Ce type d'essai ne permet pas d'atteindre des niveaux de déformation du même ordre de grandeur que ceux vus en sertissage. Le sertissage est un procédé mettant en jeu de grandes déformations. Une alternative a donc du être trouvée.

#### 2.4.3.3. Alternative à la compression de contacts entiers :

Ne pouvant plus augmenter la capacité du capteur, nous avons décidé de réduire les efforts nécessaires pour déformer notre matière. La deuxième solution proposée a été de solliciter des tronçons cylindriques de fût de contact. L'utilisation d'une scie à fil diamantée a permis d'obtenir des cylindres creux de cuivre d'environ 1 mm de longueur, comme le montre la Figure 2-25. Pour solliciter ce type d'échantillon, le demi cylindre a été supprimé de l'outil de compression. Les tronçons ont été comprimés entre deux tas plats.

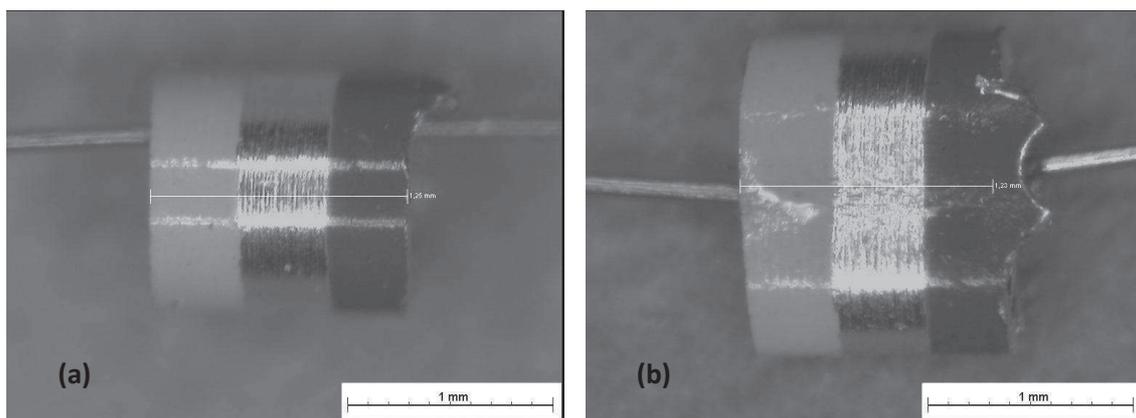


*Figure 2-25 : Echantillon type issu d'un contact de la technologie cuivre avant sollicitation en micro compression.*

Le problème s'est posé quant à la dispersion des essais liés aux différentes longueurs de tronçons obtenus grâce aux coupes. En effet, malgré toutes les précautions prises pour s'assurer une longueur de coupe des contacts homogène, les différences de longueur à cette échelle impactent notablement les efforts de compression. L'impossibilité d'obtenir des tronçons de même longueur a conduit à harmoniser les données par l'intermédiaire d'un coefficient de proportionnalité. Pour valider la viabilité de cette solution, une étude numérique a été menée. Les résultats de cette étude sont visibles en annexe 2 de ce manuscrit et ont été appliqués dans l'analyse des données expérimentales.

#### 2.4.3.4. Essais de compression sur tronçons de contacts :

La méthodologie à appliquer étant définie, les essais de compression ont été menés sur les quatre types d'échantillons présentés précédemment. Ces essais ont été menés à une vitesse de 0.05 mm/s et sont limités en terme d'efforts à 55N. Comme la dépendance à la vitesse de déformation n'est pas considérée dans cette sollicitation à froid, la valeur de la vitesse est purement arbitraire et permet d'assurer le bon pilotage de la machine. Ensuite, les courbes ont été traitées pour ne conserver que le début de compression, avant repli de la matière sur elle-même. La Figure 2-26 permet de visualiser l'évolution de la géométrie d'un fût avant et après compression.



*Figure 2-26 : Visuels d'un tronçon de contact avant (a) et après (b) compression à 55N.*

Le tableau de la Figure 2-27 rassemble les courbes expérimentales en compression obtenues sur les tronçons de contacts de la technologie cuivre.

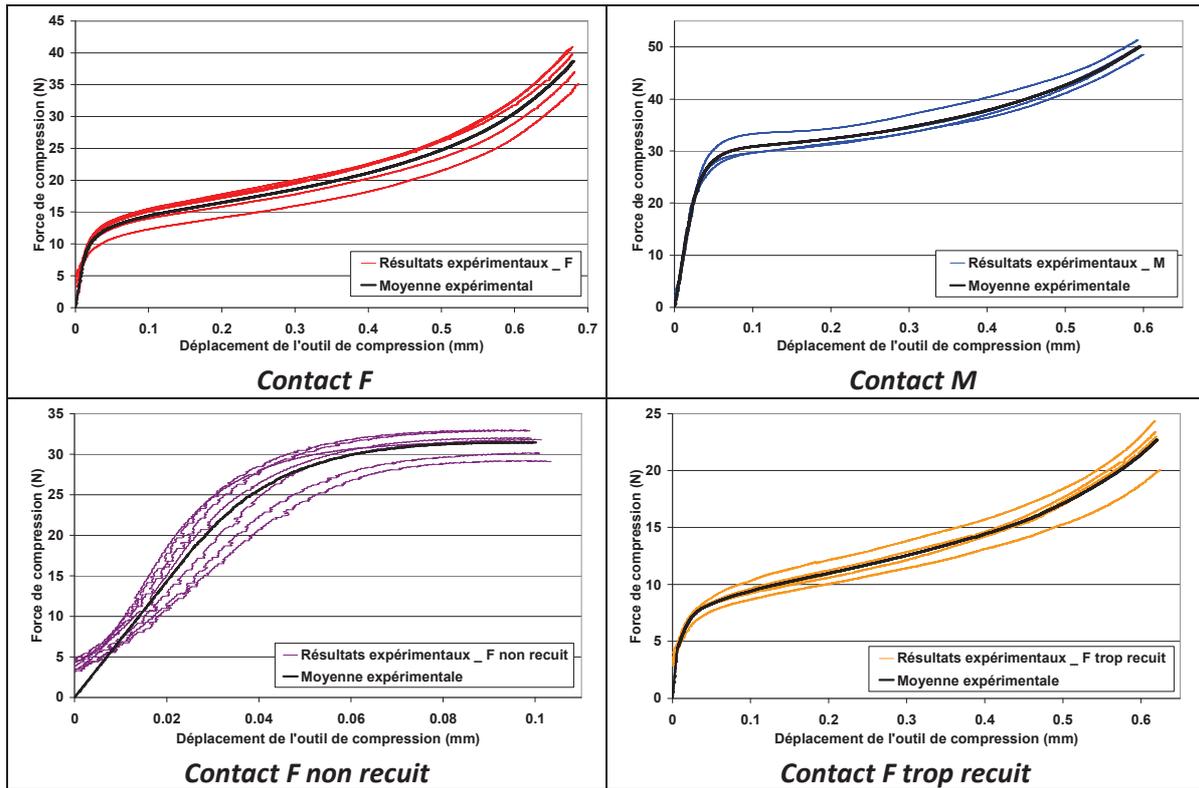


Figure 2-27 : Synthèse des courbes expérimentales en compression obtenues sur les tronçons de contacts de la technologie cuivre.

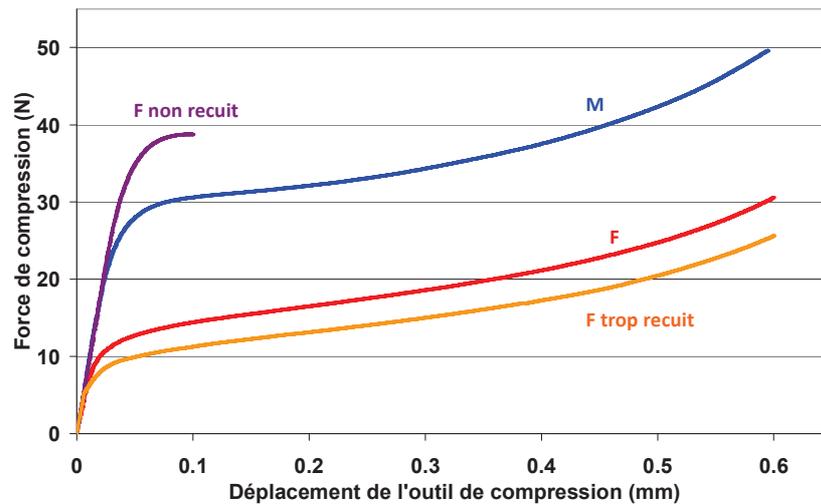
L'étude des écarts types en fin de compression témoigne d'une moins bonne reproductibilité des essais par rapport aux essais de compression sur brins, comme le prouve les données du Tableau 2-7.

Les essais réalisés sur les contacts F non recuits sont les plus critiques. D'un contact à l'autre, la matière a été déformée, mais n'a pas du tout subi de traitement thermique pour restaurer ses propriétés mécaniques. La dispersion est donc importante, et les essais aboutissent rapidement à la rupture fragile des contacts fortement écrouis.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
<b>M</b>	0 à 50 N	1.1 N	2.2 %
<b>F</b>	0 à 40 N	2.5 N	6.2 %
<b>F non recuit</b>	0 à 32 N	1.4 N	4.4 %
<b>F trop recuit</b>	0 à 23 N	1.6 N	6.9 %

Tableau 2-7 : Quantification de la dispersion des essais de compression de tronçons de contacts de la technologie cuivre.

Cependant, la superposition des 4 courbes expérimentales moyennes, faite sur le graphique de la Figure 2-28, permet de conclure en différents points.



*Figure 2-28 : Superposition des moyennes expérimentales en compression obtenues pour chaque type de tronçons : M, F, F non recuit et F trop recuit.*

Concernant les contacts standards, le contact femelle F ayant été recuit voit logiquement sa résistance à la compression diminuée de moitié par rapport au contact mâle M. Si ce contact femelle subit un recuit trop long, on observe que la courbe d'effort de compression est encore plus basse. Au contraire, si le contact femelle ne subit aucun recuit, les efforts de compression croissent rapidement, mais l'écrasement excessif de la matière engendre la rupture du cylindre après une course d'environ 0,1 mm. Il est étonnant de constater que le comportement d'un contact F non recuit est différent d'un contact M, qui n'a a priori pas subi non plus de recuit particulier. On peut supposer que les contacts M ont donc reçu un traitement thermique après fabrication, pour diminuer leur fragilité, tout en conservant une résistance mécanique plus importante que les contacts F.

Malgré une reproductibilité perfectible pour certains types de contacts, il est intéressant de constater que la pente initiale pour chaque échantillon est la même. Cette pente, caractéristique du domaine élastique, montre que la nuance du cuivre utilisé dans la fabrication des différents contacts est similaire. Le domaine élastique n'est pas impacté par les traitements thermiques de la matière et le module d'Young des quatre types d'échantillons est semblable. Il sera déterminé ultérieurement.

A terme, l'étude de ces différentes nuances matériaux va nous permettre de déterminer leur impact sur les courbes de sertissages simulés et les mécanismes de rupture dans les simulations d'arrachement.

#### **2.4.4. Limitations liées au dispositif utilisé :**

Ce dispositif de micro compression, bien que prometteur en ce qui concerne ses caractéristiques techniques, a montré certaines limites. La première est liée à la saturation du capteur d'effort. L'obligation de tronçonner les échantillons a engendré l'apparition de bavures de coupe sur les tronçons de contacts. Des exemples de bavures sont visibles sur les Figure 2-26 et Figure 2-29. La quantification de l'impact de cette bavure sur les efforts est difficile. Elle pourrait être à l'origine de la dispersion des essais, visible sur les courbes de la Figure 2-27.

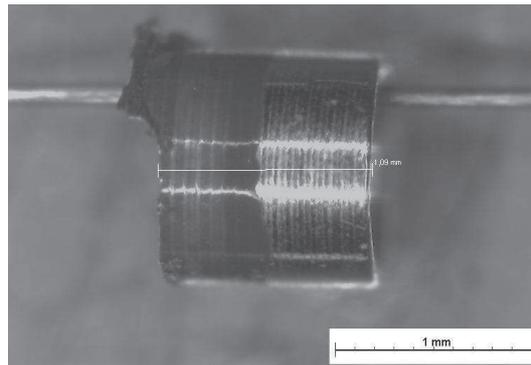


Figure 2-29 : Aperçu d'un tronçon et de sa bavure de coupe.

La seconde limitation du dispositif réside dans le mécanisme de déplacement de la platine porte échantillon. Une déflexion de l'ensemble de l'empilement n'est pas à exclure, étant donné que nous sommes largement au-delà des 10N de charge pour lesquels la machine a été conçue. La platine de déplacement est validée pour un fonctionnement en charge de moins de 60N. Cela signifie qu'elle peut toujours réaliser les déplacements sous cette charge, mais cela n'empêche en rien le dispositif de se tasser.

Pour apporter davantage de légitimité à cette hypothèse, une campagne d'essai a été menée sur un échantillon considéré comme infiniment rigide. Un barreau en acier trempé a été positionné sous l'outil de compression, et une acquisition a été menée à une vitesse de 0.05 mm/s pour obtenir la courbe force/déplacement correspondante. Si le dispositif avait été infiniment rigide, l'essai aurait été caractérisé par une pente quasi infinie et aurait stoppé immédiatement. La Figure 2-30 rassemble les courbes force/déplacement pour l'échantillon rigide et pour un tronçon de contact en cuivre. Cette superposition permet de comparer l'allure et les niveaux des relevés.

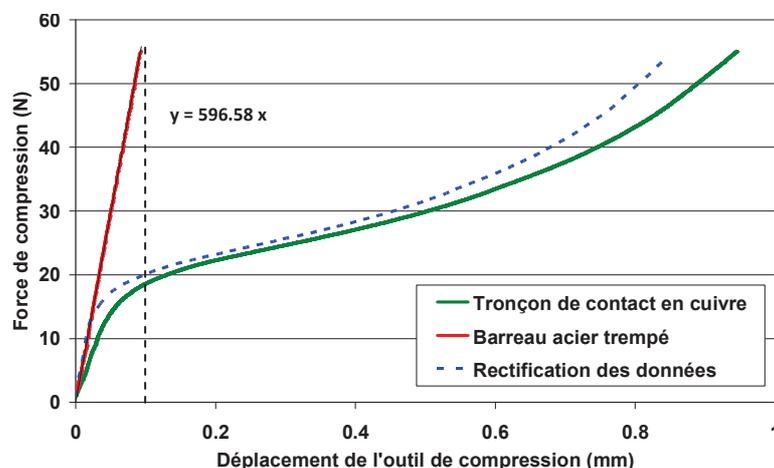


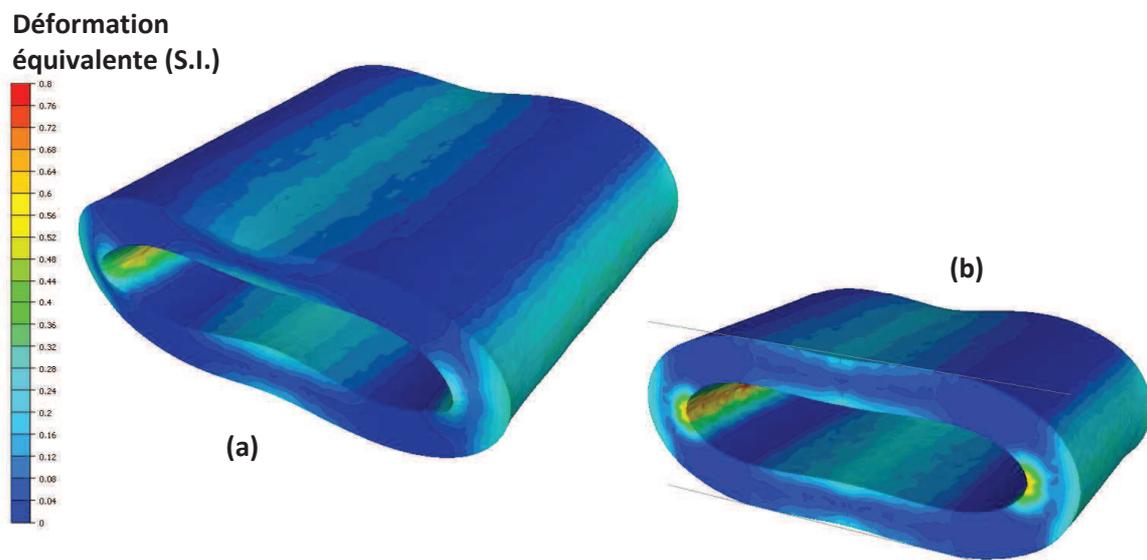
Figure 2-30 : Courbes issues des essais sur échantillon rigide en acier et sur tronçon de contact en cuivre

L'allure de la courbe obtenue par compression de l'échantillon rigide est une droite parfaite. L'analyse de la pente permet de supposer qu'une montée en charge de 0 à 55N engendre un tassement de la platine de 0.1 mm environ. Pour un essai de compression de tronçon mené sur 0.6 mm, ce tassement représente donc 17 % de la course de l'outil. Un tel cé dage pourrait engendrer une sous-estimation importante de module d'Young et des différences de paramètres de lois de comportement matériaux après analyse des données.

A titre d'exemple, la courbe expérimentale d'un dispositif fictif ne fléchissant pas a été extrapolée. La droite rouge permet d'associer à un effort donné une valeur de cé dage en millimètre. Il est donc

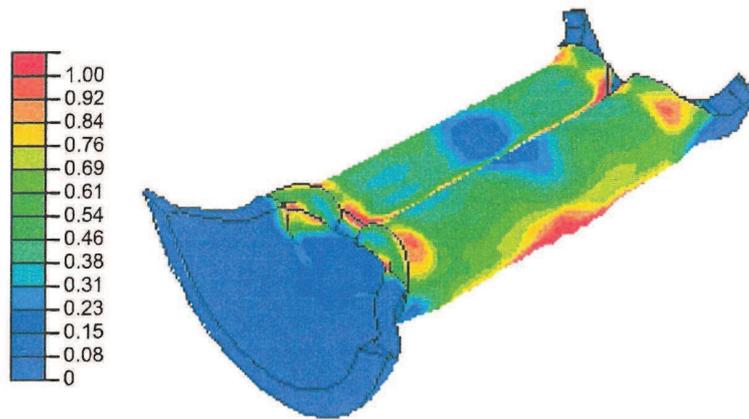
possible de soustraire à chaque instant, en fonction de la force vue par le capteur d'effort, une valeur au déplacement de l'outil. Cette courbe expérimentale fictive est représentée en pointillé sur le graphique de la Figure 2-30. Il est prévisible que le module d'Young déterminé par analyse de la courbe en pointillée sera supérieur au module d'Young déterminé par analyse de la courbe verte. En revanche, se contenter de telles imprécisions est difficilement acceptable dans une étude où la précision des relevés expérimentaux est justifiée par la finesse des composants et l'importance de la validité des résultats.

Enfin, la dernière limitation de ces essais réside dans les niveaux de déformations atteints. Une simulation numérique a été réalisée avec une rhéologie de cuivre Cu99.97 issue de la librairie de matériaux de Forge. La loi de comportement associée est présentée à l'annexe 3 de ce manuscrit. La Figure 2-31 montre les déformations équivalentes en fin de compression.



*Figure 2-31 : Déformation équivalente du fût en fin de micro compression : tronçon complet (a) et vue de coupe (b).*

La vue de coupe (b) permet de visualiser précisément la zone où se concentrent les plus grandes déformations. De manière globale, en omettant les zones de replis, la matière subit des déformations de 0 à 25%. Cependant, l'étude bibliographique menée en amont du travail de thèse a permis d'observer que les niveaux de déformations atteints lors du procédé de sertissage peuvent s'élever localement à 100%, comme l'illustre la Figure 2-32. Cette figure est issue d'une étude de sertissage sur contact à fût ouvert menée par Abbas [ABB02], mais laisse supposer que les niveaux de déformation atteints en sertissage sur contact à fût cylindrique sont du même ordre de grandeur.



*Figure 2-32 : Déformation plastique pour le fût d'un contact à fût ouvert serti sur câble [ABB02].*

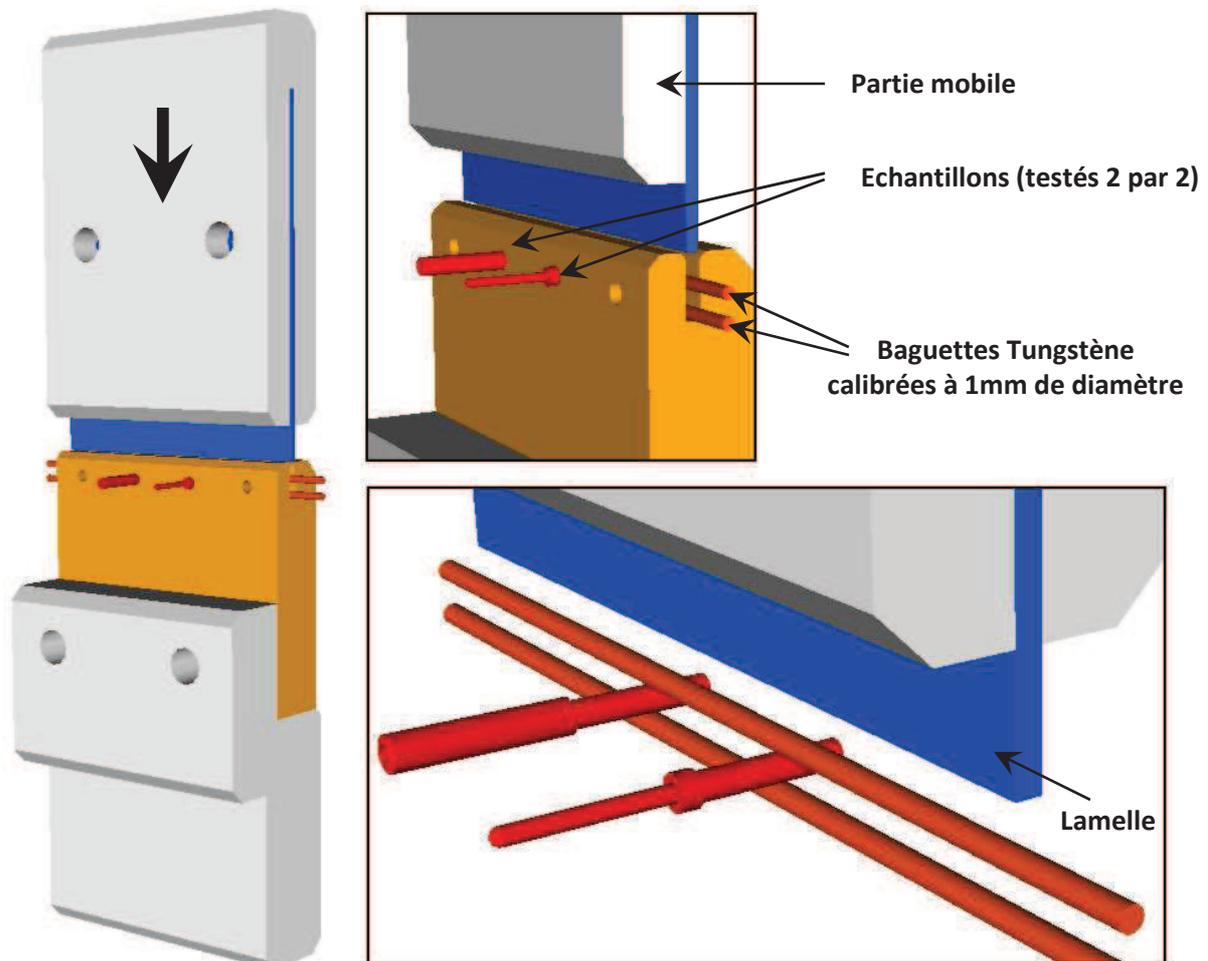
Pour être certains de prédire les efforts de sertissage avec précision, il a semblé important de déterminer un nouveau moyen d'essai qui permettrait de solliciter la matière à des niveaux de déformation supérieurs, tout en améliorant la rigidité du dispositif.

## 2.5. Etude en compression sur la machine Zwick :

### 2.5.1. Analyse préparatoire :

Le recours à une machine de traction/compression classique est la solution choisie. La machine Zwick est équipée d'un capteur de 2000N, ce qui permet de s'affranchir de la faible limitation des efforts de la machine de micro compression. L'utilisation des extensomètres permet également de prévoir une acquisition des déplacements précise, mettant de côté tous les problèmes de compliance du bâti. La plus grande difficulté liée à cette machine est de déterminer le moyen de maintenir en position notre échantillon. La petite taille du contact et sa géométrie circulaire ont obligé à la mise au point d'un outillage spécifique.

En nous inspirant d'un essai de bi poinçonnement, traité par Kubié en 1980 [KUB80] puis Chenot en 1991 [CHE91], nous avons développé le dispositif présenté à la Figure 2-33.



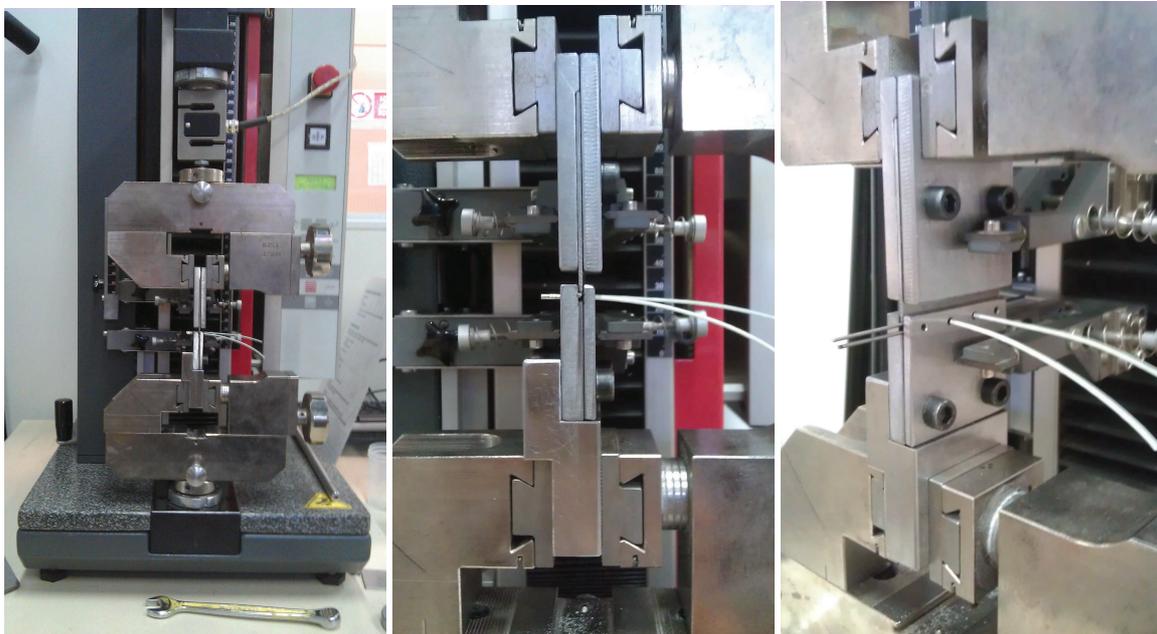
*Figure 2-33 : Vues CAO du dispositif mis au point pour solliciter les contacts cuivre en compression : dispositif du "Sertissage CEMEF".*

Lorsque la partie mobile effectue sa descente, elle comprime deux contacts entre deux baguettes de tungstène de 1mm de diamètre. Ces baguettes sont libres dans la gorge, et permettent de solliciter la matière de manière analogue au procédé de sertissage réel. Deux contacts sont comprimés simultanément pour assurer l'équilibre du montage. Une attention particulière est apportée au moment de la mise en place de l'outil sur la machine de compression Zwick. L'objectif est de

valider l'alignement parfait de la partie mobile par rapport à la partie fixe, afin d'annuler totalement les frottements entre la lamelle et la gorge.

Ce dispositif possède également l'avantage de pallier totalement les problèmes de bavures et de longueurs de tronçons aléatoires issus de la coupe des fûts, qui était indispensable à la réalisation des essais en micro compression. La sollicitation du contact entier, rendue possible par la gamme plus importante d'efforts admissibles, permet d'apporter une précision géométrique aux essais. En contre partie, nous avons une dépendance au fait de tester deux échantillons à la fois.

Enfin, outre les essais de compression sur contacts vides, ce dispositif pourra permettre de réaliser des sertissages appelés "Sertissages CEMEF" dans la suite du manuscrit. Des câbles Cu22 ou Cu24 pourront être insérés dans le fût avant essai, afin d'étudier l'assemblage ainsi obtenu en terme d'efforts de sertissage et de tenue à l'arrachement. La Figure 2-34 permet de visualiser le dispositif mis au point par les membres du groupe MEA du CEMEF.



*Figure 2-34 : Montage permettant de réaliser les essais de sertissage CEMEF sur contacts.*

### **2.5.2. Réalisation de la campagne d'essais :**

La méthodologie à appliquer étant définie, les essais de "Sertissage CEMEF" à vide (sans câble) ont été menés sur cinq types d'échantillons. L'étude de l'influence du traitement thermique a été menée sur le dispositif de micro compression. Nous avons donc profité de cette nouvelle série d'essais pour étudier l'impact du fournisseur de contact et du lot de fabrication sur la réponse des échantillons. Chaque fournisseur répond aux mêmes normes aéronautiques. L'objectif est d'étudier et de mesurer l'impact sur la dispersion des courbes relevées pendant les essais, mais aussi pendant le sertissage. Les échantillons testés en "Sertissage CEMEF" sont rassemblés dans le Tableau 2-8.

	Dénomination	Fournisseur _ N° du Lot
Contact mâle M	M_L1	Fournisseur 1 _ Lot 1
	M_L2	Fournisseur 1 _ Lot 2
	M_L3	Fournisseur 1 _ Lot 3
Contact femelle F	F_F1	Fournisseur 1 _ Lot X
	F_F2	Fournisseur 2 _ Lot Y

Tableau 2-8 : Synthèse des échantillons de type "contact" à étudier en "Sertissage CEMEF".

L'étude des contacts femelles a permis de constater l'impact dû à un changement de fournisseur. Les contacts mâles vont permettre, pour un fournisseur donné, de vérifier l'impact du lot de fabrication. Ces essais ont été menés à une vitesse de 0.05 mm/s, sur une plage de déplacement de 0.6 mm. La Figure 2-35 permet de visualiser la géométrie d'un fût de contact après écrasement par le dispositif.

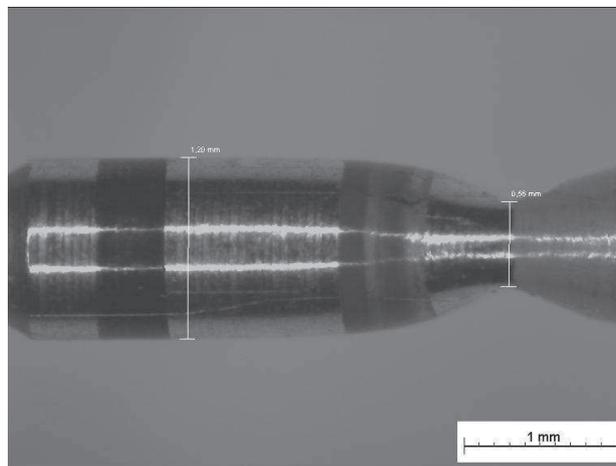


Figure 2-35 : Visuel d'un contact après essai d'écrasement sur le dispositif Zwick.

Les graphiques de la Figure 2-36 rassemblent les courbes expérimentales obtenues pour les contacts femelles, sur deux fournisseurs différents.

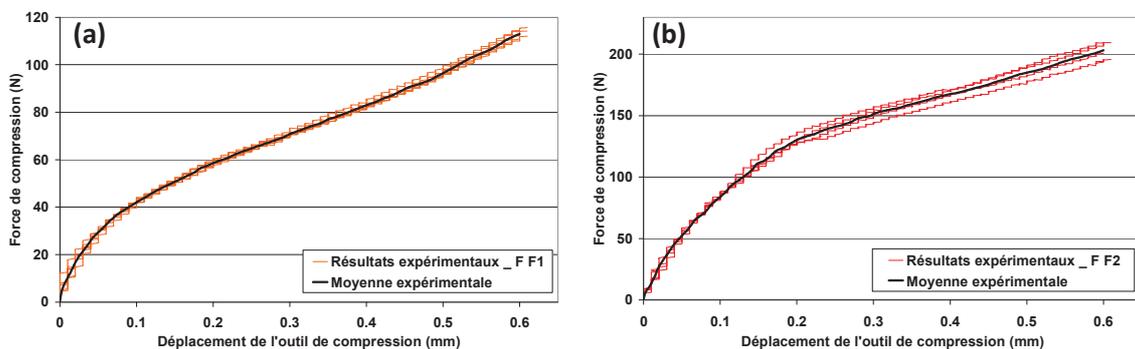


Figure 2-36 : Courbes expérimentales obtenues par « sertissage CEMEF » à vide sur les contacts femelles de deux fournisseurs différents : F1 (a) et F2 (b).

Contrairement aux essais de micro compression, la reproductibilité est bonne. Les écarts types en fin d'essais sont rassemblés dans le Tableau 2-9.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
F_F1	0 à 110 N	1.8 N	1.6 %
F_F2	0 à 200 N	6.7 N	3.3 %

Tableau 2-9 : *Quantification de la dispersion des essais de "Sertissage CEMEF" sur contacts femelles de la technologie cuivre.*

Cependant, la superposition des moyennes expérimentales faite sur le graphique de la Figure 2-37 prouve que le comportement de la matière varie beaucoup d'un fournisseur à l'autre. Cette différence s'observera de la même manière sur les courbes d'efforts de sertissage simulées dans la suite de notre étude. A première vue, il semblerait que les contacts femelles du fournisseur 2 aient été mal recuits, ce qui aurait engendré une augmentation des efforts de compression nécessaires.

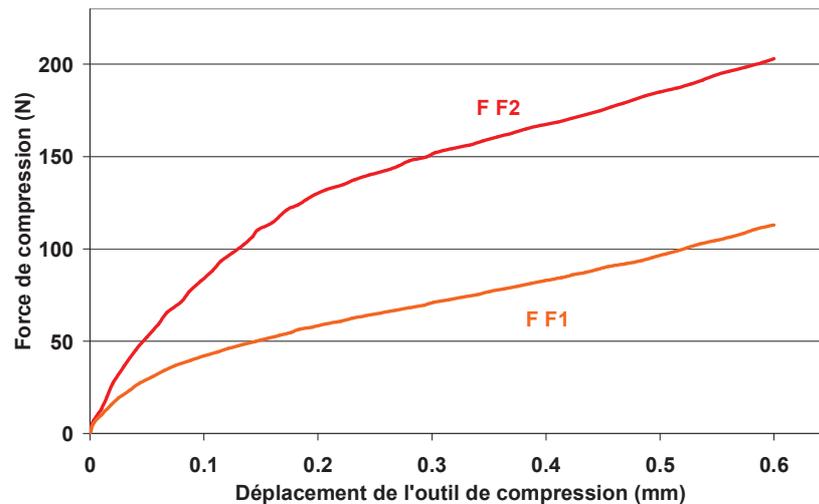


Figure 2-37 : *Superposition des moyennes expérimentales obtenues par sertissage CEMEF de contacts femelles de deux fournisseurs différents.*

Les graphiques de la Figure 2-38 rassemblent les courbes expérimentales obtenues pour les contacts mâles, sur trois lots d'un même fournisseur.

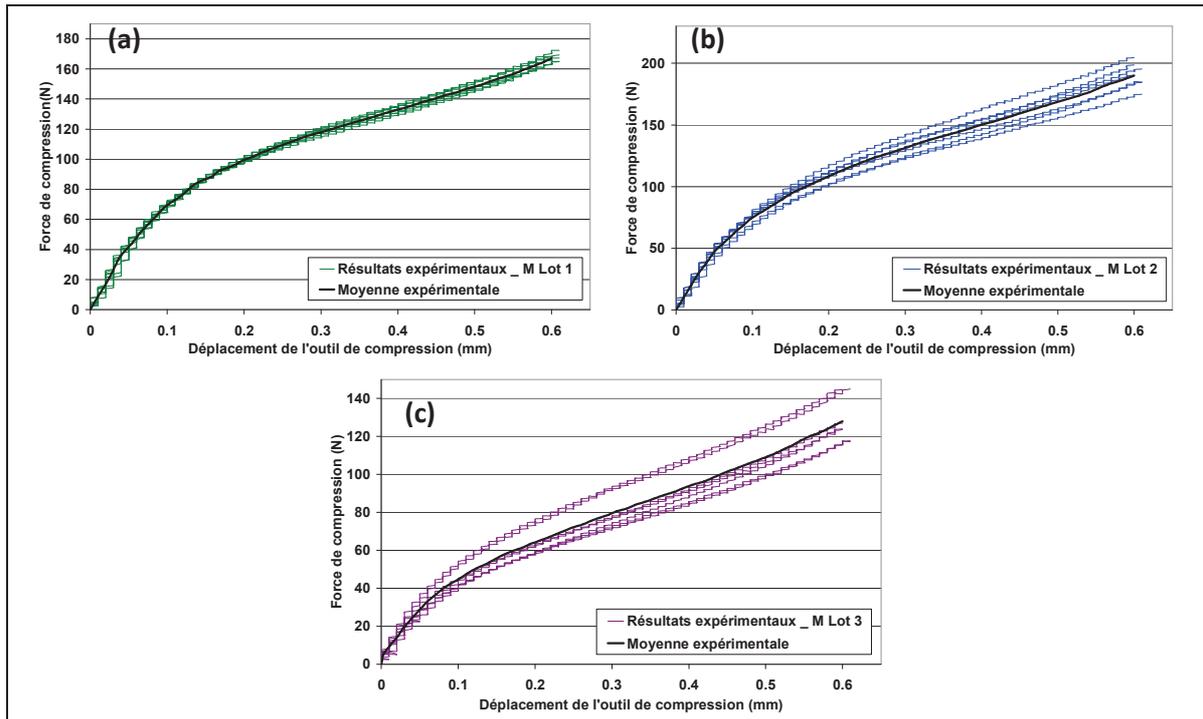


Figure 2-38 : Courbes expérimentales obtenues par sertissage CEMEF à vide sur les contacts mâles de trois lots différents d'un même fournisseur : lot 1 (a), lot 2 (b) et lot 3 (c).

En fonction du lot de contact, la reproductibilité est plus ou moins bonne. Les écarts types en fin d'essais sont rassemblés dans le Tableau 2-10.

	Amplitude des mesures	Ecart type maximal	Ecart type relatif maximal
M_Lot 1	0 à 170 N	3.0 N	1.8 %
M_Lot 2	0 à 180 N	9.9 N	5.5 %
M_Lot 3	0 à 130 N	11.7 N	9.0 %

Tableau 2-10 : Quantification de la dispersion des essais de "Sertissage CEMEF" sur contacts mâles de la technologie cuivre.

De manière similaire à l'étude sur contacts femelles, la superposition des moyennes expérimentales faite sur le graphique de la Figure 2-39 prouve que le comportement de la matière est totalement différent d'un lot à un autre pour un même fournisseur. Ce constat est problématique pour la validité de l'étude et pour le projet PSI en lui-même. Il est probable que cette différence générera de la même manière des écarts importants sur les courbes des efforts de sertissage issues de la simulation numérique dans la suite de notre étude.

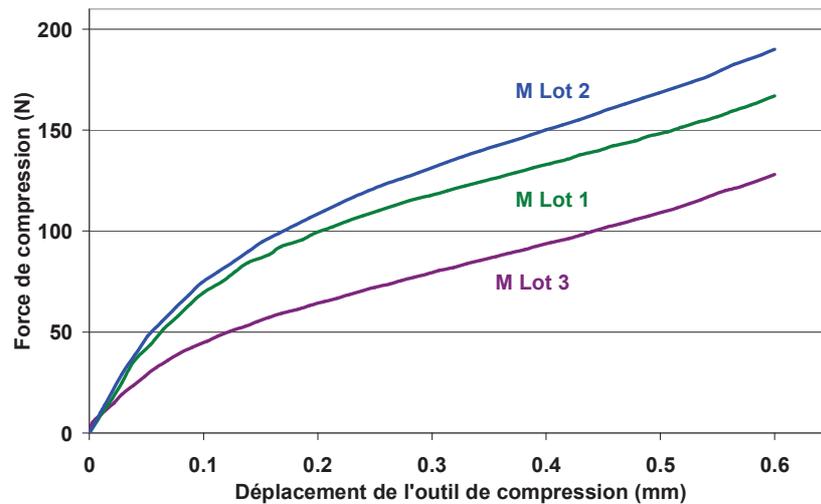


Figure 2-39 : Superposition des moyennes expérimentales obtenues par sertissage CEMEF de contacts mâles de trois fournisseurs différents.

Les contacts du lot 1 sont les plus répandus sur chaîne de production. De plus, les courbes issues des essais sur ce lot sont les plus reproductibles. Par conséquent, la suite de l'étude ne traitera que des résultats des essais sur ce lot.

### 2.5.3. Validation de l'importance de l'essai de "Sertissage CEMEF" :

Outre les avantages recensés précédemment au sujet de cet essai, la Figure 2-40 permet d'observer que les niveaux de déformation atteints dans le contact lors d'un "Sertissage CEMEF" sont légèrement plus élevés que lors d'un essai de micro compression. Les niveaux de déformations équivalentes se situent globalement entre 0 et 35% d'après observation des cartographies. Nous sommes loin des 100% de déformation de la matière représentés sur la Figure 2-32. Pour atteindre de tels niveaux, il aurait fallu pouvoir bloquer la matière dans la direction transverse à la sollicitation de compression. Cela aurait permis de nous approcher d'un sertissage quatre points classique, mais n'a pas pu être réalisé dans le cadre de la thèse.

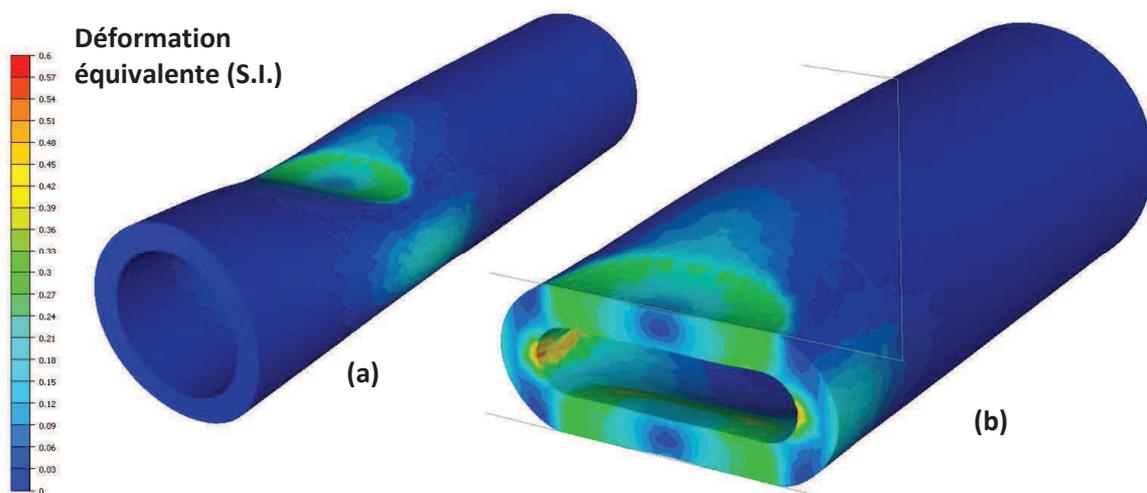


Figure 2-40 : Déformation équivalente du fût en fin de Sertissage CEMEF : fût complet (a) et vue de coupe (b).

## 2.6. Conclusion du chapitre :

Dans le cadre de ce second chapitre, notre travail s'est focalisé sur la mise au point, la réalisation et l'analyse des essais mécaniques. La recherche bibliographique préalable sur les méthodes d'essais sur échantillons à notre échelle d'étude n'a pas permis de déterminer de méthode directement applicable à nos contacts et à nos brins. La synthèse des moyens d'essais du CEMEF a permis de déterminer les différents dispositifs applicables avec un minimum de travail d'adaptation.

Tout d'abord, une campagne d'essais de traction a été réalisée sur les brins des deux technologies de sertissage. L'utilisation d'un suivi par vidéotraction a permis de déterminer les déformations de nos brins et un calcul analytique a converti la force de traction en contrainte. Excepté les problématiques de déformations résiduelles liées au torsadage, cette étude n'a mis en évidence qu'une seule limitation importante : les faibles niveaux de déformations applicables à la matière avant rupture.

L'étude en compression des échantillons de type "brin" a donc débuté. Outre l'accroissement possible des niveaux de déformations sous cette sollicitation, cette étude a également permis de diagnostiquer une éventuelle anisotropie de la matière. Menée sur le dispositif de micro indentation modifié, elle a permis l'obtention de courbes force/déplacement de compression de brins. Aucun calcul analytique n'étant possible pour convertir les données en contrainte/déformation, le recours à l'analyse inverse est indispensable.

Concernant les contacts électriques, la forme et les dimensions des fûts n'ont pas permis de réaliser d'essais normalisés. Deux moyens d'essais ont été utilisés : la machine de micro indentation convertie en machine de micro compression, et la machine de traction/compression Zwick équipée d'un dispositif mis au point au CEMEF.

La micro compression a permis de réaliser les essais sur 4 types de contacts : un contact mâle standard, et trois contacts femelles ayant subi des traitements thermiques différents. La détermination des paramètres rhéologiques de chaque type de contacts permettra de quantifier l'impact d'un défaut de traitement thermique sur les courbes d'efforts de sertissage. Cette étude laissant présager des problèmes de cé dage de la machine, des essais de compression sur un échantillon supposé indéformable ont été menés. Ils ont permis de mettre en évidence un réel fléchissement du dispositif lors de la charge. Les résultats d'analyse inverse du chapitre 3 permettront de quantifier l'impact d'un tel cé dage sur les valeurs de modules d'Young.

Le dispositif de "Sertissage CEMEF" a été élaboré pour pallier les problèmes de cé dage machine du dispositif de micro compression. Il a permis de tester cinq types de contacts : trois contacts mâles issus de trois lots différents, et deux contacts femelles issus de deux fournisseurs différents. La détermination des paramètres rhéologiques de chaque type de contacts permettra de quantifier l'impact d'un changement de fournisseur pour les contacts femelles sur les courbes d'efforts de sertissage. Pour les contacts mâles, nous étudierons uniquement les données issues du lot 1.