



**HAL**  
open science

## Étude du sertissage et de la tenue mécanique de contacts électriques

Matthieu Petitprez, Katia Mocellin, Christophe Desjean

► **To cite this version:**

Matthieu Petitprez, Katia Mocellin, Christophe Desjean. Étude du sertissage et de la tenue mécanique de contacts électriques. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. 8 p. ; Clé USB. hal-00592919

**HAL Id: hal-00592919**

**<https://hal.science/hal-00592919>**

Submitted on 3 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Etude du sertissage et de la tenue mécanique de contacts électriques

M. Petitprez<sup>1</sup>, K. Mocellin<sup>1</sup>  
C. Desjean<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mines ParisTech, CEMEF - Centre de Mise en Forme des Matériaux, CNRS UMR 7635, BP 207, 1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia Antipolis Cedex, France, [matthieu.petitprez@mines-paristech.fr](mailto:matthieu.petitprez@mines-paristech.fr), [katia.mocellin@mines-paristech.fr](mailto:katia.mocellin@mines-paristech.fr)

<sup>2</sup> Airbus, Toulouse, France, [christophe.desjean@airbus.com](mailto:christophe.desjean@airbus.com)

---

**Résumé** — Cet article porte sur la modélisation de sertissage de contacts électriques en cuivre et de l'étude de leur tenue à l'arrachement. Une caractérisation des matériaux constituant les différents composants a été menée en utilisant des procédures d'identification automatique. On montre l'influence de premier ordre que peut avoir la loi de comportement sur la simulation du procédé de sertissage mais surtout sur sa tenue.

**Mots clefs** — Sertissage, Calculs par éléments finis, Tenue mécanique.

---

### Introduction

Avec plus de 240000 contacts électriques sertis sur son A380, l'entreprise Airbus porte une attention toute particulière à la maîtrise du procédé de sertissage. La tenue de ces contacts impacte le transfert des informations dans l'appareil, et donc la sécurité. De plus, lorsqu'un contact défectueux est repéré, son positionnement dans l'avion rend son remplacement très difficile et coûteux. Cette double problématique motive donc l'étude de la tenue mécanique de ces assemblages.

Différents auteurs ont étudié le procédé de sertissage ([8], [9]). Leurs conclusions portent essentiellement sur les capacités des logiciels à reproduire les efforts et géométries de sertissage. On trouve, dans ces publications, peu d'informations sur la façon dont les lois de comportement sont identifiées pour les différents composants : câble et contact.

Dans cette étude, on s'intéresse à l'étape de sertissage mais également aux caractéristiques mécaniques de l'assemblage obtenu. Nous ne nous pencherons que sur l'arrachement qui est un des tests de validation industrielle. Les cartographies de contraintes et de déformations issues des calculs de sertissage, et prenant en compte le relâchement élastique, ont été importées comme configuration de départ. Pour les deux étapes que nous avons traité, le logiciel doit pouvoir gérer des grandes déformations sur un problème où 20 domaines déformables indépendants sont considérés.

La première partie de cet article est dédiée à la caractérisation des comportements rhéologiques des composants. On exposera pour cela les essais mis en œuvre pour solliciter les câbles et le contact. L'identification est en partie réalisée grâce au module d'optimisation du logiciel Forge® utilisé dans cette étude. Ensuite, les résultats de simulations de sertissage sont présentés. Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été comparées afin d'obtenir un modèle aussi proche de la réalité que possible en limitant les temps de calcul. La troisième et dernière partie de ce document traite des premières simulations d'arrachement. Ces premiers calculs permettent de montrer l'importance des paramètres des lois de comportement sur les résultats.

## 1 Les modèles numériques

### 1.1 Généralités des modèles numériques

Le logiciel de calculs par éléments finis utilisé dans le cadre de cette étude est la version commerciale de Forge®. Ce logiciel est dédié à la simulation de procédés de mise en forme (forgeage,

laminage, etc.) [1]. Il a également déjà été utilisé pour la simulation de procédés d'assemblage tels que le rivetage classique, le rivetage auto poinçonnant [5] ou le clinchage.

Le maillage des modèles numériques sous Forge® est basé sur des éléments triangulaires en 2D ou tétraédriques en 3D. Ce type de maillage permet d'utiliser un remaillieur automatique efficace [2], afin de pouvoir simuler des procédés engendrant de grandes déformations de la matière. Le calcul en parallèle est également possible pour des modèles en 3D car le logiciel utilise la librairie MPI avec une grande efficacité de partitionnement de domaines [3].

Une formulation mixte élément finis est employée. Les champs de vitesse et de pression sont donc les inconnues du système. Afin de vérifier les conditions de stabilité, un élément de type P1+/P1 est retenu. La vitesse et la pression sont linéaires. Une composante bulle est ajoutée à la formulation de la vitesse [1]. Enfin, un algorithme robuste de gestion du contact est implémenté dans le logiciel. Il est basé sur une méthode de pénalisation [6] et est adapté au calcul multidomaine [10].

## 1.2 Comportement des matériaux : Identification des paramètres des lois

Le procédé de sertissage est réalisé à température ambiante. Les matériaux (nuances de cuivre) sont considérés comme quasi-incompressibles et obéissent à une loi élastoplastique. Les équations de Prandtl-Reuss sont résolues [6].

Dans la bibliothèque de matériaux du logiciel, on peut trouver une loi de comportement d'un cuivre pur à 99,7%, dont l'écroutissage suit une loi de type Hansel Spittel (1). Ce formalisme est communément utilisé pour le comportement des métaux dans la bibliothèque Forge®.

$$\sigma_0 = Ke^{m1T} T^{m9} \epsilon^{m2} e^{m4/\epsilon} (1 + \epsilon)^{m5T} e^{m7\epsilon} \dot{\epsilon}^{m3} \dot{\epsilon}^{m8T} \quad (1)$$

avec  $\sigma_0$  la contrainte seuil,  $K$  la consistance du matériau,  $\epsilon$  la déformation,  $\dot{\epsilon}$  le taux de déformation et  $T$  la température. Ces données matériaux ont donc été utilisées en premier lieu pour valider la faisabilité de simuler le problème. Il a été nécessaire, par la suite, de déterminer les paramètres des lois de comportement réels des cuivres des brins et du contact pour pouvoir comparer les résultats de simulations aux données issues de sertissages expérimentaux. On notera cette loi Cu99,97 dans la suite du document.

## 2 Identification des paramètres des lois de comportement

Le matériau utilisé pour les brins du câble et le contact est quasi identique en début de procédés de fabrication. Cependant, on peut prévoir que les différents traitements thermiques successifs et les déformations importantes lors de la mise en œuvre créent une différence de comportement mécanique non négligeable. Une anisotropie conséquente est à prévoir, surtout au sein des brins. En effet, ces éléments sont issus du tréfilage, lors duquel la matière est soumise à des taux d'écroutissage importants. Afin de réaliser des simulations numériques proches de la réalité, il est nécessaire d'identifier les paramètres des lois de comportement pour chaque composant (brin, contact) dans des conditions de sollicitations les plus proches possibles des sollicitations rencontrées lors du sertissage, puis de l'arrachement.

### 2.1 Comportement des brins en traction

Lors du sertissage, un câble est écrasé dans la direction radiale. Il est toutefois difficile de réaliser des essais de compression à ces échelles (Diamètre des brins = 0,2mm). Nous avons tout d'abord décidé de déterminer les paramètres de la loi de comportement du cuivre des brins à l'aide d'essais de traction. Ceux-ci ont été réalisés sur une machine classique (Erichsen) équipée d'un capteur adapté au

niveau d'effort relevé (10N max).

Une dispersion importante des efforts de traction a été observée lors des essais sur brins issus de câbles. On explique cela par la déformation plastique subie lors de leur extraction. Le comportement qui en résulte est impacté par cette histoire. Nous avons donc comparé ces essais avec ceux réalisés sur des brins vierges, directement issus du tréfilage. La dispersion est plus faible au sein d'un même lot, mais le comportement obtenu est différent. Les brins vierges n'ont pas subi la déformation plastique liée à la mise en câble. La comparaison des courbes obtenues suite à l'étude des deux types de brins est présentée sur la Figure 1.

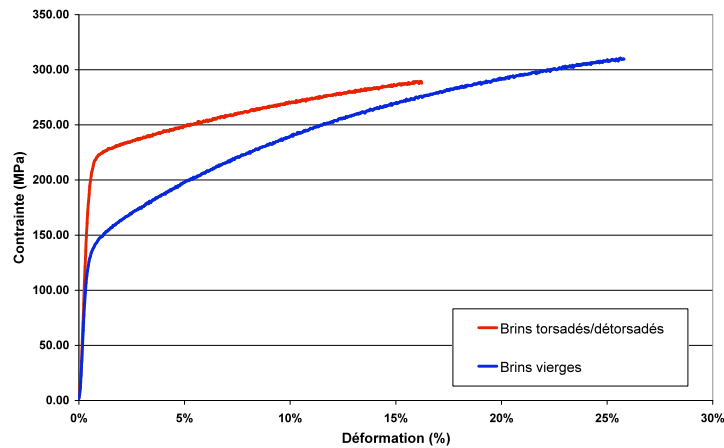


Figure 1 – Courbes contraintes/déformations obtenus par essais de traction sur brins vierges ou issus d'un câble

Les paramètres d'une loi linéaire puissance (2) ont pu être identifiés pour l'alliage de cuivre des brins à partir de ces essais.

$$\sigma = \sqrt{3}K(1 + a\varepsilon_p^n) \quad (2)$$

avec  $\sigma$  la contrainte,  $K$  la consistance du matériau,  $\varepsilon_p$  la déformation plastique,  $a$  et  $n$  deux termes d'écrouissage. La comparaison entre les efforts obtenus expérimentalement et numériquement avec les deux lois (linéaire puissance et Cu99,97) est présentée sur la Figure 2.

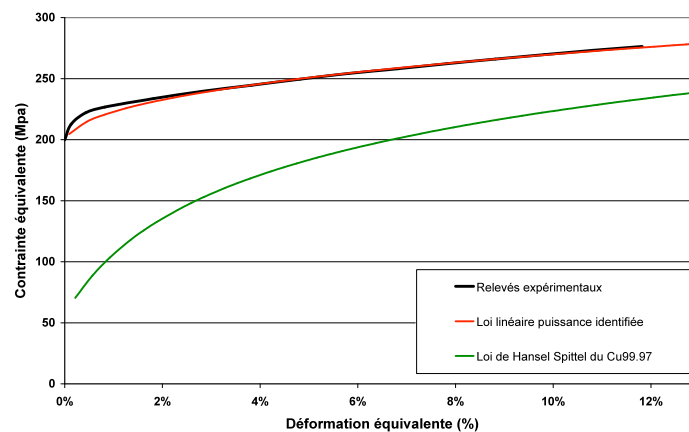


Figure 2 – Courbes contraintes/déformations obtenues expérimentalement, par simulation avec la loi linéaire puissance identifiée ou par simulation avec la loi Cu99,97

## 2.2 Comportement des contacts en compression

Le contact électrique peut être divisé en deux zones: la partie utile au sertissage (le fût écrasé lors du sertissage) et la partie utile à la connexion. Des traitements thermiques sont appliqués sur cette seconde zone pour les contacts femelles. En théorie, ce traitement thermique n'a pas d'influence sur la zone du fût. Ainsi, on obtient des comportements mécaniques différents dans le contact. Pour l'étude du sertissage, nous n'allons tenir compte que de la partie utile au sertissage : le fût. Au vu de la forme et des faibles dimensions (de l'ordre du millimètre) de la partie utile, il nous est impossible de prélever des éprouvettes pour réaliser des essais expérimentaux classiques sur le contact.

En suivant une méthode analogue à celle déjà appliquée dans le cadre d'une étude passée sur le procédé de rivetage [5], une identification par analyse inverse des paramètres de la loi de comportement a été réalisée grâce au module d'optimisation du logiciel Forge [4]. Cette méthode permet de comparer des résultats expérimentaux obtenus par des essais non normalisés à une simulation numérique modélisant les mêmes conditions.

Dans notre cas, nous avons réalisé l'analyse de compression à vide de contact dans une pince à sertir équipée de capteurs d'efforts. Cette pince permet de faire l'acquisition des efforts lors du sertissage. En utilisant la simulation de ce sertissage de contact sans câble, nous avons pu réaliser une analyse inverse et déterminer les paramètres de la loi puissance correspondant au cuivre du contact. La Figure 3 présente respectivement un aperçu du modèle de sertissage à vide et la comparaison des relevés d'efforts expérimentaux et simulés pour le Cu99,97 et le cuivre identifié par analyse inverse.

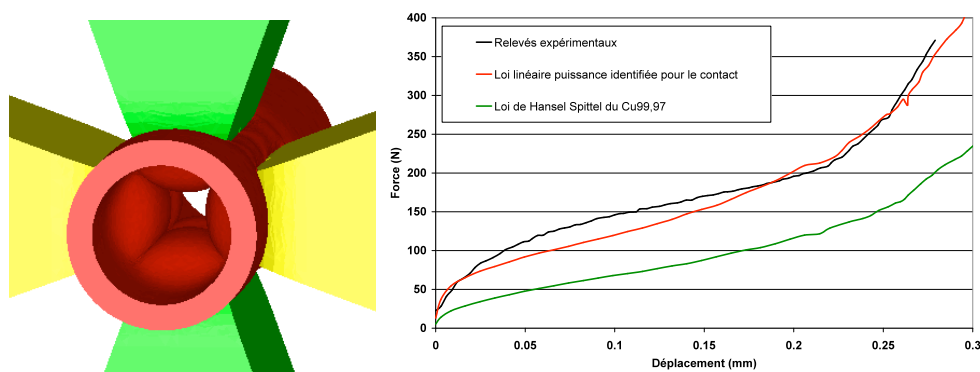


Figure 3 — Visuel du modèle d'un sertissage à vide et relevés d'efforts expérimentaux et simulés avec deux rhéologies différentes

Dans les simulations présentées dans la suite de ce document, nous avons comparé les résultats obtenus avec les différentes configurations de matériaux suivantes :

- La configuration 1 correspond à un ensemble de corps déformables en Cu99,97 (câble et contact).
- La configuration 2 correspond à des brins obéissant à une loi linéaire puissance déterminée par essais de traction et un contact suivant une loi linéaire puissance déterminée par analyse inverse de sertissages à vide.

## 3 Simulation du sertissage

L'opération de sertissage est un problème résolument tridimensionnel. Plusieurs auteurs ont montré qu'une approche 2D ne peut donner que des résultats approximatifs [9]. En négligeant la troisième dimension, on surcontraint la matière comme on peut l'observer sur la Figure 4.

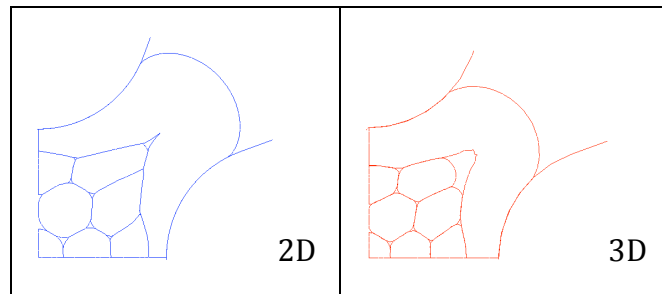


Figure 4 – Profils de contacts sertis sur câble pour les modèles 2D et 3D.

Pour le modèle 2D, nous avons fait l’hypothèse des déformations planes. Ce choix n’est pas le plus légitime, comme l’on montré plusieurs auteurs [9], mais est imposé par le logiciel de l’étude. Les efforts de sertissage sont donc naturellement surestimés dans notre approche 2D, comme on peut l’observer sur la Figure 5.

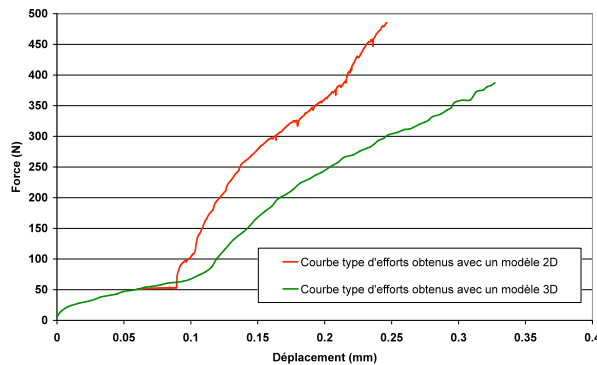


Figure 5 – Comparaison des efforts de sertissage obtenus avec un modèle 2D et un modèle 3D

Par ailleurs, bien que permettant que simuler le sertissage avec une erreur, un modèle 2D ne pourra jamais permettre de simuler l’arrachement de contacts sertis. Au vu des limitations rencontrées avec ce type de modèle, nous nous sommes donc orientés vers une étude en 3 dimensions. Un tel modèle peut permettre de modéliser le sertissage en tenant compte des géométries exactes des objets, mais les temps CPU sont bien largement supérieurs.

L’utilisation de modèles simplifiés permet de réduire considérablement ces temps de calculs. Cette approche a notamment permis d’étudier l’influence du coefficient de frottement et du type de contact entre les brins (frottant, glissant ou collant). La Figure 6 permet d’observer les modèles étudiés.

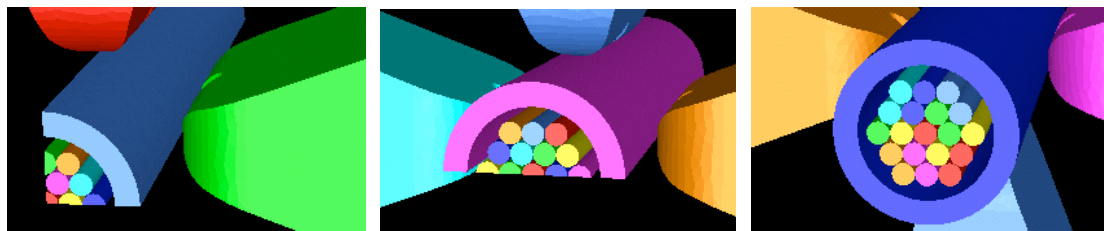


Figure 6 – Visuels des différents modèles simplifiés

La Figure 7 permet de conclure qu’il n’y a pas d’influence importante de la valeur du coefficient de frottement sur les relevés d’efforts.

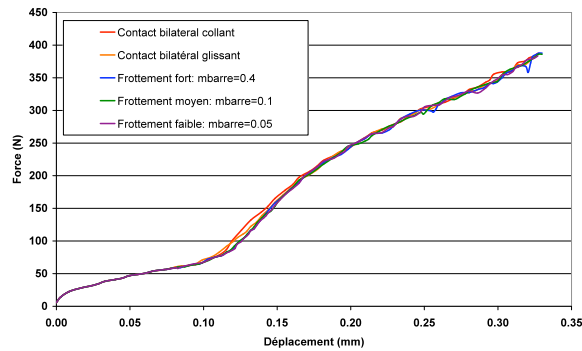


Figure 7 – Relevés d'efforts pour différentes valeurs de coefficient de frottement entre les brins pour un modèle  $\frac{1}{4}$  de contact

Après avoir créé des modèles simplifiés à l'aide de plans de symétries et de brins droits, nous avons traité un modèle le plus proche de la réalité : un contact est écrasé sur un câble torsadé composé de 19 brins, tous indépendants. La prise en compte du torsadage interdit l'utilisation de plans de symétrie. La Figure 8 présente un visuel de la simulation ainsi que les relevés d'efforts expérimentaux et simulés.

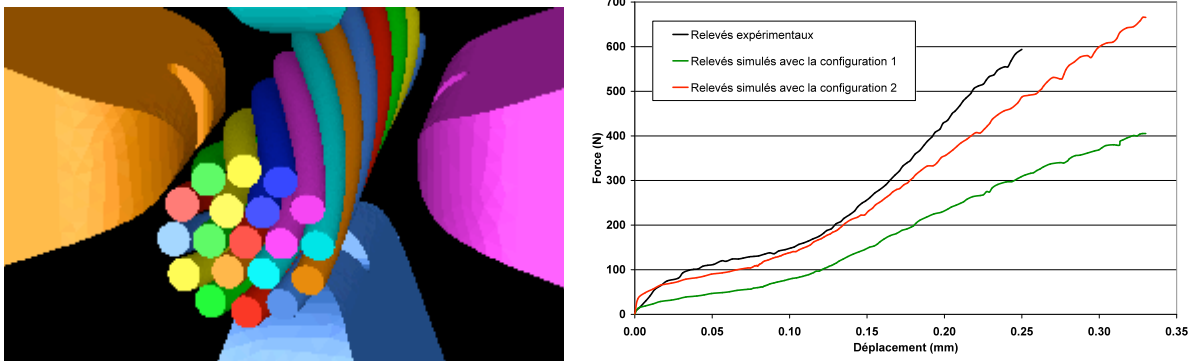


Figure 8 – Visuel du modèle complet torsadé et comparaison des efforts de sertissage expérimentaux et simulés avec deux rhéologies différentes

Cette courbe permet de justifier l'importance de la détermination exacte des paramètres des lois de comportement des matériaux. En effet, les efforts liés à la simulations utilisant le Cu99,97 sont bien plus faibles que les efforts réellement obtenus. Les premières lois de comportement déterminées grâce aux essais de traction des brins et à la compression de fût à vide permettent d'avoir une bonne concordance des efforts simulés et des efforts expérimentaux. Il sera important d'identifier la contribution des frottements au sein de la pince à sertir sur les efforts expérimentaux de sertissage pour améliorer encore ces résultats, notamment en fin de sertissage.

#### 4 Simulation de l'arrachement

Le but final de l'étude est d'estimer la tenue à l'arrachement de contacts sertis. Un premier modèle, obtenu en important les maillages finaux des simulations de sertissages ainsi que les champs de contraintes et de déformations résiduelles, a pu être étudié. Le retour élastique entre les étapes de sertissage et d'arrachement a été calculé pour repartir d'un état avec des contraintes relâchées.

Un essai de traction est simulé, en fixant l'extrémité des brins, et en appliquant un déplacement à l'extrémité opposée du contact. La Figure 9 présente l'évolution des géométries au cours du temps en

considérant la configuration 1 des matériaux. La Figure 10 présente l'évolution des géométries au cours du temps en considérant la configuration 2 des matériaux.

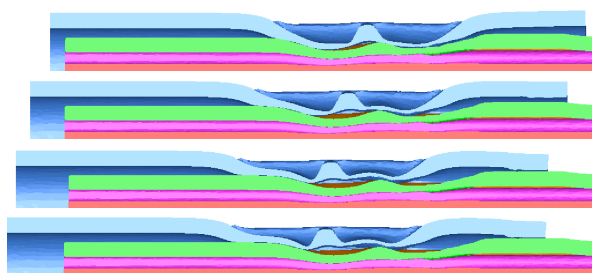


Figure 9 — Evolution de la géométrie au cours de la traction pour la configuration 1 de matériaux

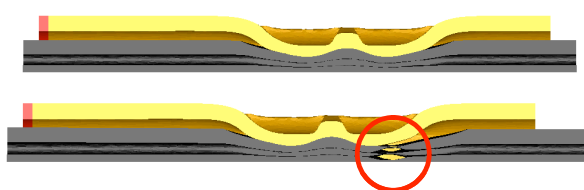


Figure 10 — Evolution de la géométrie au cours de la traction pour la configuration 2 de matériaux

La différence principale que l'on observe entre les deux configurations est le type de rupture. Dans le cas de la configuration 1, il y a glissement des brins tandis que la configuration matériau 2 mène à une rupture de ceux-ci.

Les efforts nécessaires à l'arrachement pour la configuration 2 sont tracés sur le graphique de la Figure 11. Sur cette figure, on reporte également le niveau d'effort de tenue minimal exigé par les normes (60 N min).

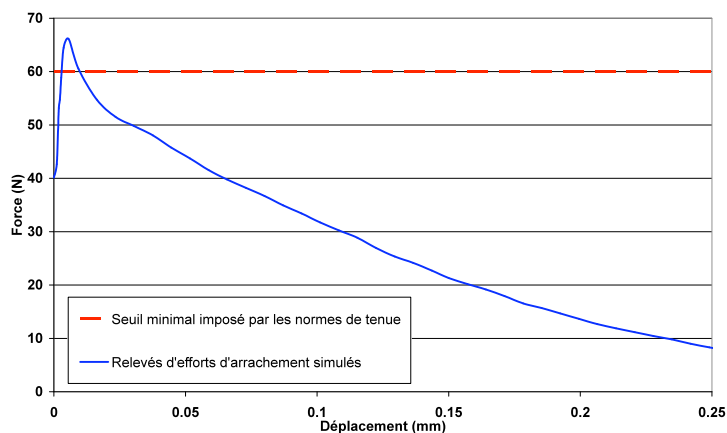


Figure 11 — Relevé d'efforts obtenu avec la configuration 2 et seuil d'admissibilité d'un contact

On observe que le sertissage simulé avec les comportements matériaux identifiés répond aux normes de tenue qui imposent un effort minimal de tenue de 60N.

La différence de comportement entre les simulations avec les deux configurations de matériaux nous conforte dans l'idée qu'il sera primordial de remonter aux comportements exacts des matériaux mis en jeu par le biais d'essais mécaniques et d'analyses inverses pour simuler exactement les phénomènes à prévoir dans la réalité.



## Conclusion

Cette étude aborde la problématique de la simulation numérique du procédé de sertissage, procédé couramment utilisé, notamment dans les industries aéronautiques et spatiales. La première partie de cet article a été consacrée à la présentation des travaux sur la caractérisation des matériaux. Nous avons pu montrer que les essais de traction sur brins de cuivre sont réalisables avec un capteur d'une capacité de 10N. L'analyse des courbes obtenues permet d'obtenir rapidement les paramètres d'une loi de comportement. Concernant le comportement du cuivre des contacts, le recours à l'analyse inverse de contacts sertis à vide a été inévitable. Au vu des faibles dimensions d'échantillons, la réalisation d'essais de compression ou de traction classiques était impossible.

La deuxième partie du mémoire a été consacrée à la présentation des résultats de simulation en 3D du procédé de sertissage. Une étude de l'influence du type de frottement sur des modèles simplifiés a permis de montrer que celui-ci n'avait pas d'impact sur l'ordre de grandeur des relevés d'efforts et sur les profils des coupes de contacts en fin de sertissage. Nous avons donc poursuivi l'étude en créant un modèle complet tenant compte du torsadage réel des brins dans un câble. Le modèle complet, malgré un temps de calcul important en comparaison de celui des modèles simplifiés, fourni de très bons résultats. Il permet en outre de tenir compte d'un paramètre pouvant influencer grandement les valeurs de tenue à l'arrachement : le torsadage lui-même.

Concernant les simulations d'arrachement, les premiers calculs présentés ont montré que la modélisation d'un tel procédé nécessite une détermination parfaite du comportement des matériaux. Cette détermination aura une influence importante, tant sur les relevés d'efforts que sur le type de rupture lors de simulations d'arrachement.

Les perspectives à ce travail sont donc une campagne de mesures précises des efforts de sertissage et d'effort à l'arrachement et une amélioration de la détermination des lois de comportement. Un effort important doit aussi être mené pour réduire les temps de calcul des simulations.

## Références

- [1] J.L. Chenot, *Three dimensional finite element modeling of forging process*, Computational Plasticity, 793-816, 1989.
- [2] T. Coupez, H. Dignonnet, R. Ducloux *Parallel meshing and remeshing*. Appl. Math. Model., 25(2) 153-175, 2000.
- [3] H. Dignonnet, T. Coupez, *Object-oriented programming for fast and easy development of parallel applications. forming processes*, 2nd MIT conference on computation fluid and solid mechanics, Pineridge press 1922-1924, 2003
- [4] R. Ducloux, L. Fourment, S. Marie, D. Monnereau, *Automatic Optimization Techniques Applied to a Large Range of Industrial Test Cases*, International Journal of Material Forming, Vol 3, Sup 1, 53-56, 2010.
- [5] S. Fayolle, P.O. Bouchard, K. Mocellin, *Joining and Mechanical Strength of self-piercing riveted structure – numerical modelling and experimental validation*, 13<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics - Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, Grèce, 2007
- [6] L. Fourment, J.L. Chenot, K. Mocellin, *Numerical Formulations algorithms for solving contact problems in metal forming simulation*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 1435-1462, 1999.
- [7] P. Gratacos, P. Montmitonnet, J.L. Chenot, *An integration scheme for Prandtl-Reuss elastoplastic constitutive equations*, Int. J. Num. Meth. Eng. 33 (1992) 943-961
- [8] S Kugener., *Simulation of the Crimping Process by Implicit and Explicit Finite Element Methods*, AMP Journal of Technology, Vol.4, 8-15, 1995.
- [9] P Lorrière., T. Courtin, E.Pagnacco, J.L.Batoz, G. Dhatt, *Modélisation par éléments finis du sertissage de contact électrique aéronautique*, 6ème Colloque National en Calcul des Structures Giens, 2003.
- [10] K. Mocellin, E. Pichelin, J.L. Chenot, *An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes*, European Journal of Computational Mechanics, vol 10 n°8, 857-880,2001.