



HAL
open science

Sertissage de contacts électriques aéronautiques: modélisation, corrélation et étude paramétrique

Emmanuel Pagnacco, Philippe Lorrière, Gouri Dhatt

► To cite this version:

Emmanuel Pagnacco, Philippe Lorrière, Gouri Dhatt. Sertissage de contacts électriques aéronautiques: modélisation, corrélation et étude paramétrique. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01813064

HAL Id: hal-01813064

<https://hal.science/hal-01813064>

Submitted on 12 Jun 2018

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.

Public Domain

Sertissage de Contacts Electriques Aéronautiques

Modélisation, corrélation, et étude paramétrique

E. Pagnacco* — **P. Lorrière****,***— **G. Dhatt ****

* *L.M.R., I.N.S.A. de Rouen, B.P.8
76801 Saint Etienne du Rouvray cedex*

** *Laboratoire Roberval, G.S.M.
U.T.C., B.P. 20529
60205 Compiègne cedex*

*** *F.C.I. France Corporate Research Center
rue Robert Surmont, 72402 La Ferté-Bernard*

RÉSUMÉ. Le procédé de sertissage permet d'assurer la liaison électrique et mécanique entre un câble et un contact. Les câbles en aluminium de sections réduites pose de nouveaux problèmes. Le sertissage est un phénomène non-linéaire impliquant de grandes déformations élasto-plastiques et des conditions de contact multiples avec frottement. Sa modélisation numérique permet de comprendre les raisons des difficultés rencontrées, notamment grâce à la simulation du retour élastique. L'étude présente des simulations 2D et 3D réalisées avec la méthode des éléments finis en dynamique explicite avec ABAQUS. Ces résultats sont corrélés aux résultats expérimentaux, ce qui permet de mener une étude paramétrique. En particulier, nous mettons en évidence l'importance des paramètres matériaux sur le retour élastique par une étude analytique et numérique avec un modèle simplifié.

ABSTRACT. The crimping technology process ensure the electrical and the mechanical link between the wire and the contact. New small sections aluminum cables poses new problems. This nonlinear problem involves large elasto-plastic strains and multiple contact conditions with friction. The numerical simulation of the crimpings is useful to understand mechanical phenomenons in the process. Explicit dynamic finite element analysis with ABAQUS produce results of 2 and 3D simulation, correlated to the experimental result. This enabled a parametrical study. In addition, analytical and numerical study of a simplified model highlights important materials parameters on the spring back effect.

MOTS-CLÉS. Contacts électriques, procédé de sertissage, méthode des éléments finis, grandes déformations élasto-plastiques, contact avec friction, corrélation.

KEY WORDS. Electrical connectors, crimping process, finite element method, large elastoplastic strains, contact with friction, correlation.

FCI, un des leader mondial de la connectique, maîtrise depuis longtemps la technique de sertissage des câbles électriques dans les contacts automobile, militaire et aéronautique. Cette technique consiste à relier mécaniquement et électriquement un câble et un contact à l'aide d'une pince manuelle ou automatique en écrasant le contact sur le câble (cf. figure 1). Mais l'utilisation nouvelle pour l'aéronautique de câbles en aluminium en remplacement de câbles cuivre pose de nouvelles difficultés, et les techniques de sertissage habituelles montrent leurs limites. Les conditions très sévères d'utilisation (forte variation de température, milieu corrosif et humide...) provoquent en effet une augmentation trop importante de la résistance électrique du contact.

Les critères de qualités d'un bon sertissage sont la faible résistance électrique, une bonne tenue mécanique (arrachement du câble) et une bonne tenue dans le temps de ces deux critères sous des conditions de variation de température et d'atmosphère humide et saline. En fait, la résistance électrique et la résistance à l'arrachement dépend de la géométrie finale du sertissage (surfaces en contact,...) et de la pression exercée par le contact sur le câble. Aussi, nous proposons : 1) de simuler par éléments finis le procédé de sertissage ; 2) d'établir et de mettre en œuvre des critères globaux pour la corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux ; 3) d'étudier l'influence des différents paramètres de conception (géométrie et matériau) et de proposer des solutions alternatives de conception.

1. Sertissage des contacts aéronautiques

La liaison électrique et mécanique entre le câble et le contact est réalisée par écrasement du contact sur le câble. Cette technique est rapide et peu coûteuse. Les contacts aéronautiques de formes circulaires sont usinés dans une barre de cuivre de diamètre 3mm. Les câbles utilisés sont constitués de 6 ou 11 brins qui peuvent être soit en cuivre soit en alliage d'aluminium-fer-magnésium (type 1310-50) avec 1 brin de nickel au centre. Le brin de nickel contribue alors à la résistance mécanique et les brins d'aluminium permettent un bon compromis entre la conductibilité et la masse.

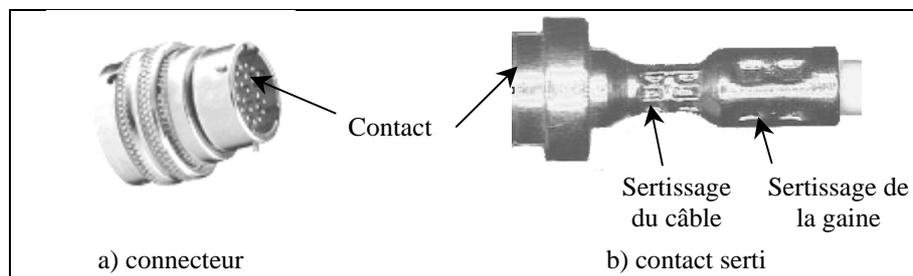


Figure 1 : Connecteur et contact.

Nous étudions seulement la géométrie de la zone de sertissage : la figure 2a représente la géométrie en 3 dimensions et la figure 2b représente une coupe bidimensionnelle constituée d'un câble à 7 brins, d'un fût circulaire de contact et de 4 mors de sertissage (en acier traité, ils sont considérés comme rigides).

2. Modèle mathématique

Le modèle mathématique représentant le comportement mécanique sous forme d'écriture faible, dit principe des puissances virtuelles est ([DHA 95]) :

$$\delta W = \int_{V_t} \delta \mathcal{D} : \sigma dV - \int_{\partial V_t} \delta u \cdot f_s dS + \int_{V_t} \delta u \cdot \rho \cdot \ddot{u} dV = 0 \quad \forall \delta u \quad (1)$$

avec : σ tenseur contraintes de Cauchy ; $\delta \mathcal{D} = \frac{1}{2} (\text{grad}(\delta u) + \text{grad}^T(\delta u))$ tenseur taux de déformations virtuelles ; f_s champ de sollicitations surfaciques ; δu champ de vitesses virtuelles ; u , \dot{u} , \ddot{u} champs de déplacement, vitesse et accélération ; ρ la masse volumique et V_t la configuration déformée. En utilisant la discrétisation par éléments finis, la relation (1) s'écrit : $\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_{\text{ext}} - \mathbf{F}_{\text{int}}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}})$ avec : \mathbf{M} matrice masse diagonale ; \mathbf{F}_{int} vecteur des efforts internes ; \mathbf{F}_{ext} vecteur des efforts externes ; \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ vecteur des variables nodales déplacement, vitesse et accélération.

La résolution du problème de sertissage demande une bonne stratégie de résolution pour obtenir une solution convergente car il est fortement non linéaire avec : 1) des non-linéarités géométriques et de comportement des matériaux ; 2) des non-linéarités complexes de contact entre brins et fût. Bien que ce soit un phénomène quasi-statique, l'algorithme explicite dynamique est mieux adapté pour cette simulation : il contrôle bien le contact et l'évolution de la géométrie.

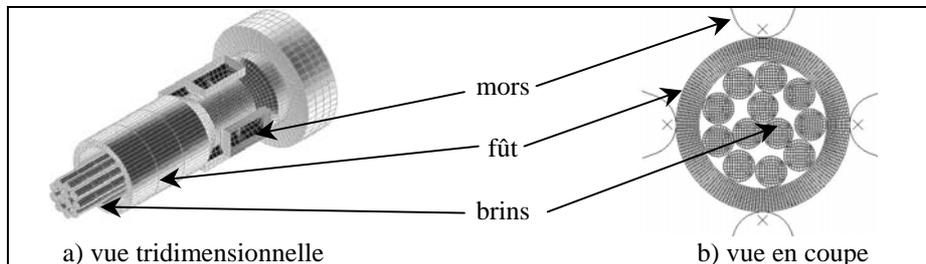


Figure 2 : Zone de sertissage.

Numériquement, l'intégration des équations du mouvement est réalisée en effectuant un grand nombre de petits pas de temps, sans itération, par résolution de : $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^t = \mathbf{F}_{\text{ext}}^t - \mathbf{F}_{\text{int}}^t(\sigma^t)$. Dans cette équation, le vecteur force interne est fonction des contraintes qui sont évaluées par la formulation incrémentale de la loi de comportement de type Von Mises. Le vecteur des forces externes dépend des conditions aux limites et des lois de contacts. L'opérateur temporel est discrétisé par un schéma de différences finies centrées : $\mathbf{u}^{t+\Delta t} = \mathbf{u}^t + (\Delta t/2)\dot{\mathbf{u}}^{t+\Delta t/2}$ avec $\dot{\mathbf{u}}^{t+\Delta t/2} = \dot{\mathbf{u}}^{t-\Delta t/2} + \Delta t\ddot{\mathbf{u}}^t$. Pour que l'intégration soit stable, le pas de temps Δt maximum est fonction de la taille de l'élément le plus critique et des propriétés du matériau : $\Delta t = L/C_v$ avec L la dimension caractéristique de l'élément et C_v la vitesse de propagation du son dans le matériau. Nous utilisons un schéma explicite pour obtenir la solution d'un problème quasi-statique. L'opérateur dynamique joue un rôle de prédiction de la solution incrémentale qui dépend du résidu des efforts statiques ($\mathbf{F}_{\text{ext}}^t - \mathbf{F}_{\text{int}}^t$). Les paramètres du schéma influencent la fiabilité et l'efficacité de la solution. Notamment :

- Pas : pour obtenir la stabilité numérique, le pas de temps est régi par la taille des éléments et la vitesse du son dans le matériau. Pour améliorer l'efficacité numérique, il est possible d'augmenter le pas de temps en augmentant la densité d'une manière artificielle (ceci réduit la vitesse du son). La taille des éléments est plutôt contrôlée par la précision souhaitée sur l'état de contrainte.

- Pilotage de la sollicitation : pour la convergence, il est important d'introduire l'incrément de sollicitation ou de position des mors par pas. Ici, la solution est pilotée en déplacement incrémental des mors. Le temps du sertissage est en réalité de 0,1s. ce qui implique un grand nombre de pas (10^8 pas) pour une taille d'élément de 0,01mm ($\Delta t \approx 10^{-9}$ s.). Pour réduire ce nombre de pas, nous avons choisi de réduire le temps du sertissage à 10^{-4} s., ce qui amène le nombre de pas à 10^5 . Nous vérifions toujours que les effets d'inerties restent négligeables.

- Contrôle de convergence : la convergence est contrôlée en effectuant plusieurs pas avec la force appliquée fixe.

La qualité du maillage est également très importante. Nous utilisons dans cette étude des éléments quadrangle ou hexaèdre à intégration réduite pour leur efficacité et aussi éviter le blocage d'incompressibilité.

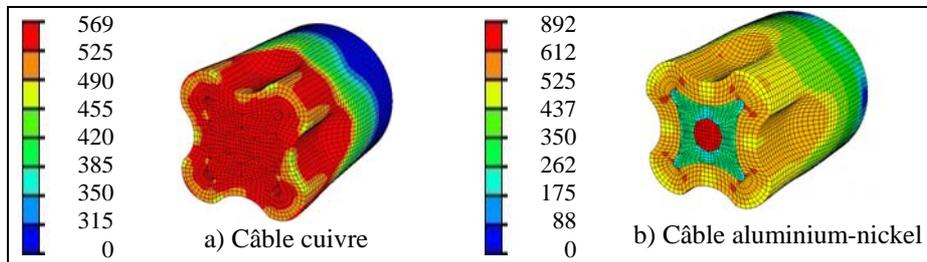


Figure 3 : Etat tridimensionnel de contrainte maximales (Mises [Mpa]).

3. Résultats

Les résultats numériques sont obtenus en utilisant Abaqus [HIB 01]. Nous avons validé les résultats numériques sur des cas simples en comparant les résultats des simulations dynamiques (explicites) et statiques (implicites). Le modèle tridimensionnel produit des informations complètes sur les états de déformations et de contraintes (fig. 3) et les pressions de contact entre les brins et le fût (fig. 4a) en fonction du chargement. Nous observons une forte concentration de contraintes dans les plis du fût (entre les mors) avant retour élastique pour le câble en aluminium. Ce résultat rejoint les résultats expérimentaux car c'est à cet endroit que certains fûts se fissurent pendant le sertissage. Le frottement produit une forte extrusion des brins dans le sens longitudinal pour le câble aluminium : la plastification du brin de nickel est provoquée par cet effet et ne peut pas être observée avec un modèle bidimensionnel. Elle est par contre bien observée expérimentalement : les simulations bidimensionnelles ne peuvent être qu'au plus qualitatives pour ce câble. La simulation du retour élastique montre qu'il n'y a que peu de pression de contact entre les brins et le contact pour le câble aluminium : un jeu de 1 à 2 microns apparaît autour des brins sauf au voisinage du pli formé entre les poinçons (visible avec le modèle tridimensionnel). Ce n'est pas le cas avec le câble cuivre (fig. 4). Pour valider ces résultats numériques (eu égard à la très faible valeur du jeu), nous avons conduit un travail analytique sur une situation bidimensionnelle simplifiée [LOR 04]. Nous avons ainsi pu obtenir des lois de pression en fonction des rapports des modules et des limites d'élasticité du câble et du fût. Nous avons ainsi validés nos résultats numériques, et déduit que le jeu qui apparaît avec le câble en aluminium provient de sa faible limite élastique par rapport au cuivre du fût (bien que l'effet des modules d'élasticité soit favorable pour le retour élastique). Des observations expérimentales poussées ont également confirmé ces résultats.

Pour une corrélation quantitative des résultats numériques, deux mesures sont adoptées : un relevé de la force de sertissage en fonction du déplacement des mors (avec un outil spécifique) et un relevé des surfaces finales pour produire un taux de vide et un taux de compression des brins. La comparaison des efforts de sertissage entre l'expérience et les simulations montre une tendance très satisfaisante pour le modèle tridimensionnel. De même, la comparaison des surfaces est bonne, notamment pour le toron de nickel qui plastifie et diminue rapidement de section.

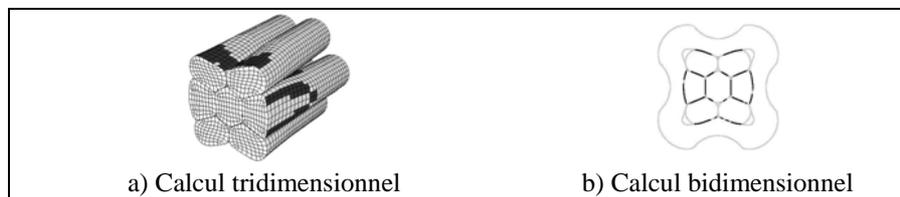


Figure 4 : Localisation des pressions de contact exercées sur un câble cuivre.

Les modèles numériques et analytiques établis nous permettent d'effectuer une étude paramétrique où le critère d'optimisation est le rapport de la surface de vide entre le câble et le fût après sertissage ainsi que le taux de compression du câble. En plus des résultats obtenus pour différentes nuances de matériaux du câble (et de frottement), nous avons obtenu des résultats pour des paramètres topologiques comme, par exemple, le rayon des poinçons ou l'épaisseur du fût, le jeu entre le câble et le fût, ou le nombre de poinçons. Une solution potentielle pour le sertissage de contacts sur des câbles aluminiums est alors proposée.

4. Conclusions

L'utilisation nouvelle pour l'aéronautique de câble en aluminium en remplacement de câble cuivre pose de nouvelles difficultés, et les techniques de sertissage habituelles montrent leurs limites avec une augmentation trop importante de la résistance électrique du contact dans des conditions d'utilisation réelles. Pour la modélisation numérique du procédé, il faut prendre en compte : 1) des lois de comportement élasto-plastique en grandes déformations ; 2) des contacts multiples entre les brins, les mors et le contact ; 3) un retour élastique après le retrait de l'outil de sertissage. Nous avons donc choisi Abaqus pour effectuer les simulations numériques avec la méthode dynamique (explicite). Différents modèles sont établis : un modèle tridimensionnel de référence et un modèle bidimensionnel (en contraintes planes), moins coûteux numériquement. Pour la corrélation numérique/expérimentale, nous comparons la force de sertissage en fonction du diamètre de sertissage, ainsi que différents taux liés à la géométrie sertie.

La résistance électrique et la résistance à l'arrachement dépend de la géométrie finale du sertissage (surfaces en contact,...) et de la pression exercée par le contact sur le câble. Nous portons donc une attention particulière au phénomène du retour élastique dont l'étude à la fois numérique, expérimentale et analytique, nous permet d'identifier les paramètres qui jouent un rôle déterminant sur les contraintes résiduelles après retour élastique (elles produisent la pression de contact nécessaire pour assurer le passage du courant et la tenue mécanique de l'assemblage). Aussi, nous avons effectué des simulations bidimensionnelles et tridimensionnelles du sertissage en variant les paramètres matériaux (modules d'élasticité et limite élastique, coefficient de frottement) et géométriques (\emptyset du contact et des brins du câble, nombre et forme des mors et \emptyset de sertissage) afin d'obtenir une forme alternative pour le sertissage de câbles aluminium.

Bibliographie

- [DHA 95] DHATT G., *Mécanique non linéaire des solides et des structures*, IPSI 1995.
- [LOR 04] Lorrière P. Modélisation du sertissage de contacts aéronautique, Ph D., UTC 2004.
- [HIB 01] Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, *ABAQUS Theory Manual*, Version 6.2, 2001.