



HAL
open science

Proposition d'une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre

Julien Vaïssette, Manuel Paredes, Catherine Mabru, Hervé Orciere

► To cite this version:

Julien Vaïssette, Manuel Paredes, Catherine Mabru, Hervé Orciere. Proposition d'une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296130

HAL Id: hal-03296130

<https://hal.science/hal-03296130>

Submitted on 22 Jul 2021

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.

Proposition d'une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre

Julien VAÏSSETTE, Catherine MABRU, Manuel
PAREDES
Institut Clément Ader
3 Rue Caroline Aigle
Toulouse – France
vaissett@insa-toulouse.fr

Hervé ORCIERE
CGR International
2a Avenue Jean Moulin
Veynes – France
herve.orciere@cgr-international.com

Résumé— *Le dimensionnement standard des ressorts s'appuie sur une hypothèse d'absence de contraintes résiduelles dans le fil. Cette hypothèse peut être assez forte pour les fils de faibles dimensions qui subissent un important tréfilage lors de leur fabrication. L'objectif principal de ce travail est de concevoir et d'éprouver une méthode de caractérisation des contraintes résiduelles dans les fils tréfilés de faible diamètre. Le principe de base consistant à enlever une partie de matière puis à mesurer les déplacements associés a été simulé par éléments-finis puis expérimenté en situation réelle. Les premiers résultats sont encourageants et semblent montrer que les contraintes résiduelles dans le fil étudié sont significatives et justifient nos investigations.*

Mots-clés— *contraintes résiduelles, tréfilage, ressorts, méthode de caractérisation, modélisation éléments finis*

I. INTRODUCTION

La norme NF EN 13906-1 [1] sur laquelle se basent de nombreux calculs de dimensionnement des ressorts hélicoïdaux [2] pose l'hypothèse que les contraintes résiduelles d'un fil d'acier avant formage sont nulles. Plus précisément, la norme de calcul n'évoque à aucun moment la présence de contraintes résiduelles dans les fils à ressorts. Or lorsque les fils d'acier entrent dans la phase de formage, ils sortent d'un procédé de tréfilage très lourd en déformations plastiques, parfois suivi d'un traitement thermique.

Dès lors, il est évident que l'hypothèse de contraintes résiduelles nulles sur laquelle repose la majorité des calculs de dimensionnement des ressorts est très forte. Nous connaissons d'ailleurs le profil des contraintes résiduelles dans les fils d'acier en sortie de tréfilage [3-4]. Ce profil est très caractéristique et il se retrouve dans tous les fils tréfilés : la peau du fil subit des contraintes résiduelles de traction, tandis que le cœur du fil est sollicité en compression. Cette hypothèse d'une absence de contraintes résiduelles devient problématique dans le dimensionnement des ressorts au regard de l'influence sur le comportement mécanique des ressorts que peut avoir la distribution et l'intensité des contraintes résiduelles, notamment en fatigue [5].

Néanmoins, cette hypothèse de travail est difficile à corriger à cause de la difficulté que rencontrent les ressortiers lorsqu'il

s'agit de caractériser les contraintes résiduelles dans les fils d'aciers qu'ils reçoivent. En effet, si les méthodes de caractérisation des contraintes résiduelles existent bien (nous connaissons l'efficacité de la méthode du perçage incrémental [6] ou la méthode de Sachs [7]), elles sont difficilement applicables sur des fils avec de faibles diamètres.

Dans l'optique de toujours affiner le dimensionnement des ressorts de faible diamètre, nous avons cherché à élaborer une méthode pour caractériser ces contraintes résiduelles.

Pour notre étude, nous avons fait le choix de confronter notre méthode à un fil de faible diamètre (0,8 mm), donc fortement tréfilé.

Par ailleurs, l'acier qui compose le fil que nous avons étudié est un acier austénitique que l'on retrouve très souvent dans les ressorts : l'acier AISI 301.

II. METHODE EXPERIMENTALE

A. Enrobage et polissage des fils d'acier

Nous nous sommes inspirés de la méthode du perçage incrémental pour concevoir notre méthode de caractérisation des contraintes résiduelles. Le principe est le même : nous enlevons de la matière au fil d'acier et nous observons le déplacement induit par cet enlèvement de matière. La différence réside dans l'impossibilité de retirer de la matière au fil sans l'enrober dans une résine. En effet, le fil est si fin qu'il est très difficile de le maintenir autrement que dans un enrobage de résine. Le corollaire de cette contrainte est que nous ne pouvons pas procéder de manière incrémentale, puisqu'une fois que nous avons dissous la résine et que nous avons mesuré le déplacement radial du fil, nous ne pouvons plus enlever de matière supplémentaire.

Ainsi, le protocole expérimental est relativement simple : il consiste à enrober des échantillons de fil (dans notre étude, le fil d'acier enrobé avait une longueur de 20 mm), à mesurer leur courbure, à polir les fils longitudinalement pour leur retirer de la matière, à dissoudre la résine et à mesurer la courbure du fil après dissolution. Il ne reste alors qu'à calculer la différence de courbure avant et après enlèvement de matière pour constater le

déplacement radial causé par le polissage du fil. En effet, lorsque nous retirons une couche de matière au fil d'acier parcouru de contraintes résiduelles, nous imposons au fil la recherche d'un nouvel équilibre interne. La couche que nous avons enlevée à l'acier étant majoritairement sollicitée en traction, le profil des contraintes résiduelles n'est plus équilibré. Le fil se courbe alors pour retrouver un état d'équilibre macroscopique.

L'enrobage des fils se fait à chaud, sur une presse Simplimet 2000 de Bhueler. Les mesures de courbures sont quant à elles réalisées sur l'InfiniteFocusSL d'Alicona, un appareil de mesure 3D optique. Les enrobages sont polis sur une polisseuse automatique. Il n'y a besoin d'aucun autre matériel pour pratiquer cette méthode de caractérisation.

B. Simulations éléments finis

En parallèle, et afin de comparer les déplacements obtenus expérimentalement, nous avons conduit des simulations numériques sur le logiciel Abaqus. Notre objectif était d'avoir une première notion des contraintes résiduelles présentes dans un fil tréfilé et d'évaluer si le procédé d'enlèvement de matière envisagé est susceptible d'engendrer des déplacements mesurables expérimentalement. Ces simulations se sont déroulées en deux étapes.

La première étape a été de reproduire un tréfilage de manière numérique. Nous avons simulé sur Abaqus une réduction de diamètre (figure 1), en nous basant sur la loi matériau étudiée dans le travail de C. LEVREAU [8]. De cette manière, nous avons pu obtenir un profil des contraintes résiduelles en sortie de tréfilage sur un acier inoxydable (figure 2).

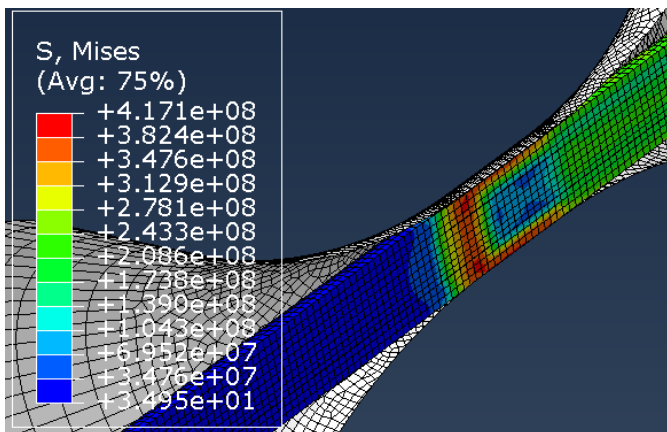


Figure 1. Contraintes de Von Mises pendant le tréfilage (Pa).

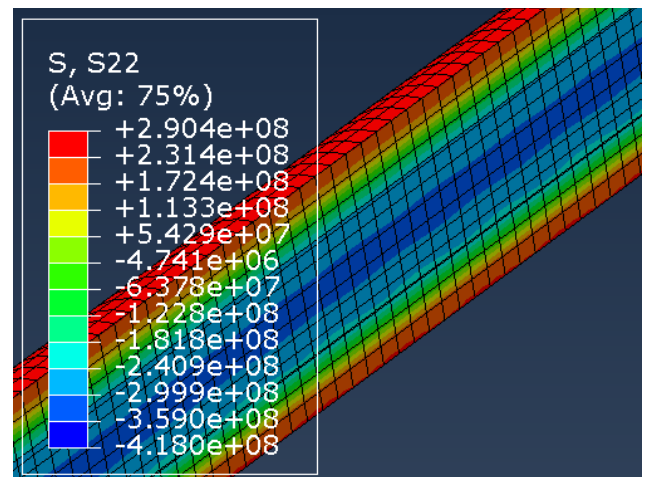


Figure 2. Contraintes résiduelles axiales après simulation du tréfilage (Pa).

La deuxième étape a été de simuler l'enlèvement de matière en désactivant certains éléments du maillage, pour libérer ensuite le fil et n'imposer que la fixation d'un bout du fil comme conditions aux limites. De cette manière, le fil se déforme et nous donne une idée du changement de courbure auquel peut correspondre un enlèvement de matière selon le profil des contraintes résiduelles. Nous avons effectué cette simulation avec 4 enlèvements de matière différents : 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm et 0,37 mm (figure 3).

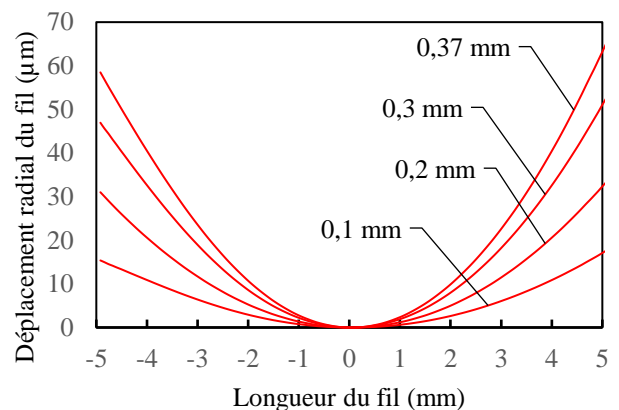


Figure 3. Simulation du changement de courbure d'un fil tréfilé après enlèvement de matière.

Nous pouvons donc observer très clairement sur ces simulations que plus nous enlevons de matière, plus le fil se déforme. De plus, pour le profil de contraintes résiduelles initiales simulées (de quelques centaines de MPa), l'ordre de grandeur des déplacements est de quelques dizaines de microns. Les déplacements auxquels nous nous attendons sont donc tout à fait mesurables expérimentalement.

C. Evaluation des biais expérimentaux

Avant de décrire les résultats que nous avons obtenus, il nous a semblé nécessaire de vérifier que notre méthode de caractérisation n'était pas biaisée par des erreurs de mesures évitables. Une étape critique pouvant influencer nos mesures semble se situer lors de l'enrobage des fils dans la résine,

puisque'il se fait à chaud et sous pression, à 150°C et 2,9 bars. Nous avons alors mesuré la courbure de 4 fils une première fois après l'enrobage puis une deuxième fois après la dissolution de la résine. Les résultats nous ont rassurés car si les courbures que nous avons mesurées avant et après dissolution ne sont pas égales, la différence de courbure est largement négligeable en comparaison avec le déplacement radial provoqué par l'enlèvement de matière que nous obtenons dans nos simulations numériques. En effet, le déplacement radial ne dépasse pas 2 à 3 microns sur la longueur des fils étudiés contre plusieurs dizaines de microns dans notre calcul par éléments finis).

Nous avons aussi cherché à mesurer l'influence du polissage sur l'état des contraintes résiduelles dans le fil. Lorsque le fil est poli mécaniquement, des travaux antérieurs [9-10] ont montré que le profil des contraintes résiduelles était modifié, imposant des contraintes résiduelles de compression sur la surface polie. Cet ajout de contraintes résiduelles de compression sur le cœur du fil, lui-même comprimé, peut augmenter la courbure du fil après enlèvement de matière. Cette augmentation de la courbure est problématique car elle peut nous amener à surestimer l'intensité de contraintes résiduelles présentes dans les fils testés. Il est donc nécessaire d'estimer l'amplitude des contraintes résiduelles de compression que le polissage imprime au fil, et la profondeur de la couche affectée. Ici, la littérature ne nous permet pas de nous rassurer car les contraintes qu'ils ont mesurées dépassent 50 MPa (soit plus d'un dixième des contraintes obtenues dans nos simulation), et ils ne précisent pas la profondeur altérée. Nous sommes donc pour le moment dans l'incapacité d'intégrer l'influence du polissage dans notre modèle. Cette faiblesse sera donc à corriger par la suite, et nous impose d'analyser les résultats de notre travail avec réserve.

III. RESULTATS

Nous avons procédé aux enrobages et polissages sur 4 fils d'acier austénitique AISI 301 de 0,8 mm de diamètre. Les figures 4, 5, 6 et 7 illustrent les déplacements radiaux que nous avons observés pour chacun de ces 4 fils en suivant notre méthode de caractérisation. Nous avons ajouté à ces figures les déplacements que nous avons obtenus en simulation numérique. De cette manière, nous pouvons comparer les résultats théoriques et expérimentaux.

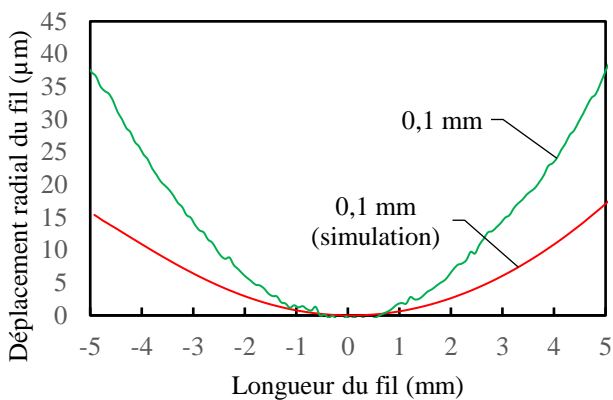


Figure 4. Comparaison de la courbure obtenue après le polissage du fil 1 (enlèvement d'une épaisseur de 0,1 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

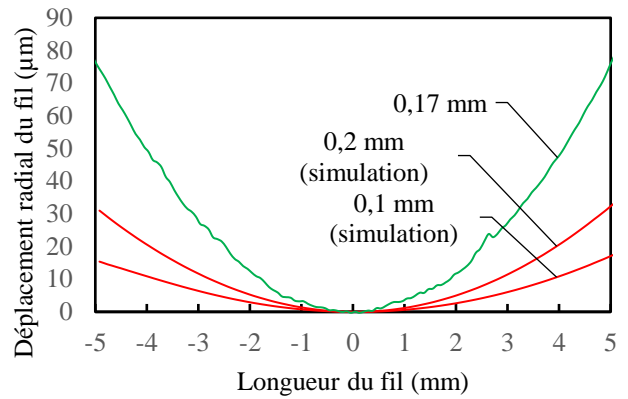


Figure 5. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 2 (enlèvement d'une épaisseur de 0,17 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

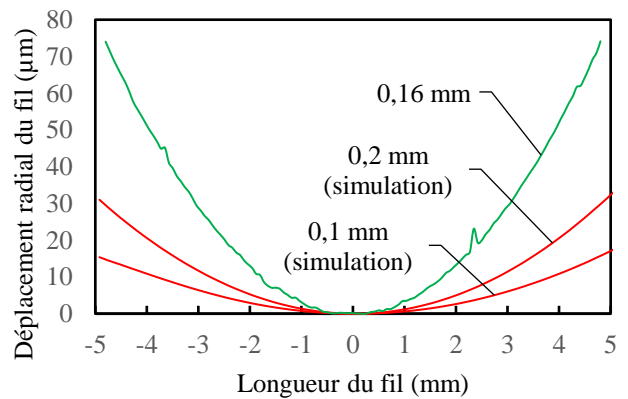


Figure 6. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 3 (enlèvement d'une épaisseur de 0,16 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

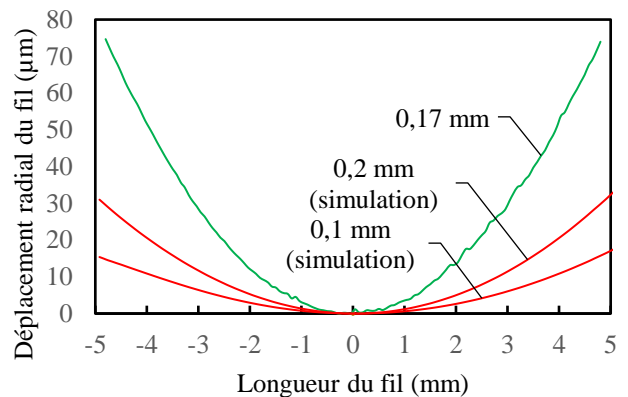


Figure 7. Comparaison de la courbure du fil obtenue après le polissage du fil 4 (enlèvement d'une épaisseur de 0,17 mm) avec les résultats obtenus par simulation numérique.

Les résultats se répètent sur les 4 fils que nous avons éprouvés : le déplacement radial observé après enlèvement de matière est non-négligeable, et invariablement supérieur à ce

que nos simulations numériques ont prévu, avec des niveaux de contraintes pourtant conséquents.

De plus, la répétabilité des mesures est remarquable car si nous superposons les déplacements radiaux pour les fils 2,3 et 4 dont l'enlèvement de matière est sensiblement égal, nous voyons que les courbes sont très proches (figure 8).

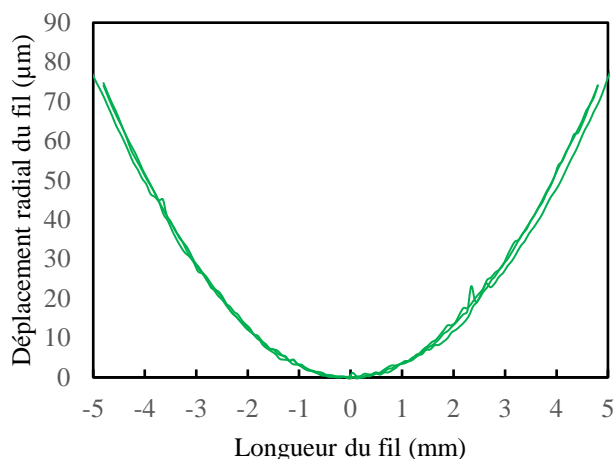


Figure 8. Superposition des déplacements radiaux obtenus après enlèvement de matière égal sur les fils 2,3 et 4.

Ici, nous pouvons vérifier que l'hypothèse selon laquelle les contraintes résiduelles du fil d'acier avant formage sont nulles est très éloignée de la réalité pour le fil étudié. En effet, les enlèvements de matières ont amené un déplacement radial des fils qui ne laisse aucun doute sur la présence de contraintes résiduelles. En revanche, notre modèle numérique sous-estime le déplacement engendré par l'enlèvement de matière. Ce qui implique que notre modèle numérique sous-estime le niveau des contraintes résiduelles.

Or sur la figure 2, nous pouvons voir que notre modèle évalue les contraintes résiduelles axiales à 291 MPa sur la couche extérieure et 418 MPa dans le cœur du fil. Ces valeurs, qu'il est difficile de considérer comme négligeables, sont donc probablement inférieures à celles qui se trouvent réellement dans le fil d'acier en sortie de tréfilage que nous avons étudié. Autrement dit, le fil tréfilé est bien parcouru de contraintes résiduelles est nous savons maintenant que leur niveau est assez conséquent.

IV. CONCLUSION

Cet article présente une méthode expérimentale originale de caractérisation des contraintes résiduelles adaptée au cas des fils de faibles dimensions (diamètre inférieur à 1 mm). Le principe consiste à enrober le fil dans de la résine puis à polir délicatement l'ensemble de manière à faire une découpe plane parallèle à l'axe du fil. Une fois la résine enlevée, les éventuelles contraintes résiduelles se libèrent et génèrent un changement de la courbure du fil d'autant plus grand que les contraintes résiduelles sont élevées.

Une simulation par éléments-finis de l'ensemble du protocole a tout d'abord montré des niveaux de déformées mesurables pour des contraintes résiduelles réalistes.

Les expérimentations menées sur un fil en acier inoxydable de diamètre 0,8 mm ont montré une très bonne répétabilité et mis en évidence une intensité très importante des contraintes résiduelles, qui justifie les investigations en cours.

Cette approche mérite donc d'être poursuivie de manière à permettre en particulier d'affiner la relation entre le profil obtenu après polissage et les contraintes résiduelles dans le fil ainsi que d'intégrer les effets du polissage sur le profil des contraintes résiduelles.

V. REFERENCES

- [1] AFNOR "Ressorts hélicoïdaux cylindriques fabriqués à partir de fils ronds et de barres – Calcul et conception – Partie 1 : ressorts de compressions", NF EN 13906-1, Octobre 2013.
- [2] N. RICHEUX, T. MORO. "Essais accélérés de fatigue pour la validation des objectifs de fiabilité d'un ressort de bouton-poussoir d'ouverture de portes de métro", QUALITA2013, Mars 2013, Compiègne, France.
- [3] J.M. ATIENZA et al. "Residual stresses in cold drawn pearlitic rods", Scripta Materiala, Volume 52, Issue 12, June 2005, Pages 1223-1228.
- [4] S.K. LEE et al. "Influence of process parameters on residual stress and reducing residual stress in drawn wire", Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No.8, 2005.
- [5] L. DEL LLANO-VIZCAYA et al. "Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs", Materials and Design, Volume 28, 2007, Pages 1130-1134.
- [6] G. MONTAY et al. "Analyse des contraintes résiduelles par la méthode de la rainure et du trou incrémental", AFM, Maison de la Mécanique, 2011.
- [7] A. P. PARKER "A critical examination of Sachs' material-removal method for determination of residual stress", Journal of Pressure Vessel Technology, Volume 126, Mai 2004.
- [8] C. LEVRAU "Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec des savons secs", Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [9] C.M. SÁNCHEZ CAMARGO, "Mechanical multi-scale characterization of metallic materials by nanoindentation test", Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2019.
- [10] H. QI et al. "Experimental study on the improvement of surface integrity of tungsten steel using acoustic levitation polishing", Journal of Materials Processing Technology, Volume 259, 2018, p 361-367.