

# Simulation électromécanique 3D d'un conducteur 1+6 avec prise en compte des résistances de contact inter-brins.

Youcef ZEROUKHI<sup>1,2</sup>, Ewa NAPIERALSKA<sup>1,3</sup>, Fabrice MORGANTI<sup>1,3</sup>, Guillaume VEGA<sup>2</sup>, Stephane DUCHESNE<sup>1,3</sup>, Krzysztof KOMAZA<sup>4</sup>

1 UArtois, LSEE, F-62400 Béthune France 2 Société Nexans NRC Lens, Bd de Marais, 62301 Lens, France, 3 Univ. Lille Nord de France, F-59000Lille, France, 4TechnicalUniversity of Lodz, Institute of Mechatronics and Information Systems, 90-924Lodz,Stefanowskiego 18/22, Pologne

**RESUME** -Dans cet article, nous proposons une méthode d'analyse par éléments finis 3D, pour prédire le comportement électrique d'un conducteur (1+6). La performance d'un conducteur dépend de la nature du matériau, de son état métallurgique mais aussi de la résistance électrique des zones de contact inter-fils. Dans ce travail, une première analyse mécanique permet de reproduire le processus de câblage pour déterminer les déformations élasto-plastiques des fils, la forme et les forces de pressions dans les interfaces de contact. Une seconde analyse électrique est menée pour déterminer la résistance électrique du conducteur déformé. La résistance de contact tangentielle et radiale est alors prise en compte.

**Mots-clés**—*Éléments finis 3D, conducteur électrique, résistance de contact, câblage, Abaqus, déformations élasto-plastiques, Courant continu.*

## 1. INTRODUCTION

Nos travaux portent sur l'analyse du comportement électrique des âmes conductrices des câbles électriques, et plus précisément sur leur résistance électrique totale. L'analyse de cette dernière sera menée en fonction de plusieurs paramètres liés à la conception et aux procédés de fabrication. Le processus de fabrication des conducteurs électriques comporte de nombreuses étapes comme le tréfilage, le câblage et le compactage, l'extrusion, l'assemblage, etc.. Cette étude porte sur l'analyse d'un conducteur appelé 1+6, réalisé après torsadage et compactage. Il est constitué d'une âme centrale sur laquelle 6 fils sont torsadés..

Durant la fabrication du câble, plusieurs phénomènes physiques coexistent. En effet, les fils sont soumis à des forces de traction et de torsion, des forces de compression dues à la filière de compactage, à des forces tangentielles générées par le frottement des fils entre eux et de la couche extérieure du conducteur avec la filière. Tous ces paramètres affectent l'état métallurgique du matériau des fils et altèrent les performances générales du conducteur. À notre connaissance, les modèles existants reposent sur des géométries statiques négligeant ainsi les déformations réelles des fils ainsi que les conditions électromécaniques dans les zones de contact [1], [2], [3].

Certains de ces modèles sont basés sur des hypothèses géométriques, pour éviter les interférences du contact inter-fils [4]. En théorie, dans un conducteur concentrique avec une composition classique (1 + 6 + 12+...) il n'y a pas assez de place pour positionner tous les fils. Cependant, comme les matériaux (cuivre ou aluminium) sont assez élastiques, les déformations élasto-plastiques, ainsi que les pressions de contact générées durant le processus de fabrication, vont changer la forme des fils et réduiront leurs dimensions, de façon à pouvoir les mettre en place sur la périphérie de la couche inférieure. Le but de cette étude est d'analyser l'impact des déformations générées par le processus de câblage et de compactage sur les propriétés électriques du conducteur. L'originalité de ce travail, consiste à prendre en compte la géométrie déformée du conducteur, la résistance de contact inter-fils ainsi que de la répartition non homogène de la résistivité à l'intérieur d'un fil. Sachant que l'ensemble des fils constituant le câble subissent des déformations plastiques par écrouissage pendant la fabrication, il sera alors question d'analyser leurs influences sur la conductivité électrique du matériau. Ces déformations plastiques sont dues à la formation, la multiplication et le déplacement de défauts linéaires mobiles dans le réseau cristallin du métal appelés dislocations. Le nombre croissant de dislocations produites lors des déformations plastiques et leur interaction entre elles (ou avec des impuretés) conduit à réduire leur mobilité. Il en résulte un durcissement de la structure cristalline du métal. Ce phénomène est appelé « écrouissage ». Celui-ci provoque également une diminution de la taille des grains augmentant ainsi le nombre de joints de grains dans la structure du métal. De plus, les défauts dans le réseau cristallin du métal, constituent des obstacles vis-à-vis des porteurs de charges électriques (électrons). Ces variations provoquent une dégradation de la conductivité électrique du matériau, mais aussi une répartition non homogène de celle-ci dans la section d'un fil. Le câblage et le compactage sont caractérisés par de grandes déformations, du contact avec frottement, de fortes non-linéarités géométriques, entraînant de fortes distorsions du

maillage. Les simulations mécaniques sont basées sur des modèles élasto-plastiques. Il est donc question d'effectuer, au préalable, des essais expérimentaux afin de caractériser le comportement mécanique des matériaux. La méthode de résolution nécessite l'utilisation d'un code de calcul explicite ou implicite. Les résultats des simulations mécaniques sont transférés dans les modèles électriques afin que les déformations soient prises en compte. Pour ce faire, il est important que des lois de comportement expérimentales couplant les paramètres électriques et mécaniques soient établies. Les variables de couplage seront identifiées en fonction de l'impact qu'ils peuvent avoir sur la conductivité électrique du matériau comme les contraintes et les déformations plastiques caractérisant le phénomène d'écroutissage. D'autres lois de comportement seront également établies pour relier la résistance de contact électrique à la pression et la forme des contacts inter-fils [5]. Ces données sont nécessaires pour simuler le comportement global des conducteurs.

## 2. MODELISATION MECANIQUE DU CABLAGE ET COMPACTAGE DU CONDUCTEUR

Dans le processus de câblage les fils sont tractés à travers une filière guide avec un noyau en carbure de tungstène, par un cabestan qui transmet la force nécessaire au câblage par frottement. Le câblage est donc le résultat de deux mouvements : de traction et de torsion. Le tréfilage est l'un des procédés de mise en forme à froid les plus utilisés dans le milieu industriel, en particulier dans le secteur électrique et pour la fabrication de fils métalliques. Le processus consiste à étirer un fil, en plusieurs passes, en réduisant progressivement son diamètre à travers des filières sous l'action d'une traction continue. La déformation du métal, résulte de l'application d'un champ de contrainte pour provoquer un écoulement plastique, de façon à obtenir une géométrie donnée. Cette mise en forme du fil au cours de l'étirage à travers les filières provoque une modification générale de ses propriétés mécaniques. Du point de vue mécanique, un conducteur compacté présente une meilleure résistance à la rupture et une meilleure stabilité des conditions de contact. Du point de vue électrique, les déformations plastiques des fils, modifie leur géométrie et par conséquent entraînent une dégradation de la conductivité électrique du fil et du comportement électrique global du conducteur.

Le modèle mécanique reproduit l'opération de câblage et de compactage. Les simulations sont effectuées en quasi-statique avec le module explicite du logiciel Abaqus. Cette analyse mécanique, nous permettra d'approcher les déformations réelles des fils ainsi que les pressions et la forme des contacts. Les conditions limites sont appliquées de part et d'autre des surfaces extrêmes du câblage. Le câblage est réalisée en appliquant un déplacement angulaire sur une surface extrême du câble, alors que l'autre extrémité est complètement encastrée (les déplacements sont nuls  $U=UR=0$ ). Le déplacement angulaire est défini en spécifiant un angle de rotation exprimé en radian. Afin de supprimer les effets de bords ou effets des conditions limites des morceaux de fils sont ajoutés de part et

d'autres de la partie centrale du câble. Cela nous permettra d'effectuer une analyse des résultats plus fine sur la partie centrale du câble.

### 2.1. Les contacts mécaniques.

Dans le cas des conducteurs multi-fils et multicouches, il existe plusieurs interfaces de contact entre les différents fils du conducteur. Les contacts sont soit ponctuels soit linéiques. Un contact ponctuel est établi lorsque deux fils de couches successives câblés dans des sens opposés sont en contact, alors que le contact linéique est spécifique aux fils adjacents de chaque couche ainsi qu'aux couches dont les sens et les pas de câblage sont identiques (voir figure 1a)). Le contact est dit tangentiel lorsqu'il est établi entre deux fils adjacents d'une même couche et radial lorsqu'il est établi entre deux fils de couches différentes (voir figure 1b).

Le contact mécanique frottant aux interfaces de contacts inter-fils, est de type Coulomb. L'algorithme choisi pour nos simulations est géré dans le logiciel Abaqus par un la méthode de contact par pénalité. Le contact est modélisé entre une surface esclave et une surface maître. La surface maître peut pénétrer la surface esclave, alors que l'inverse est interdit. Un coefficient de frottement de 0.3 est choisi pour modéliser le frottement des fils.

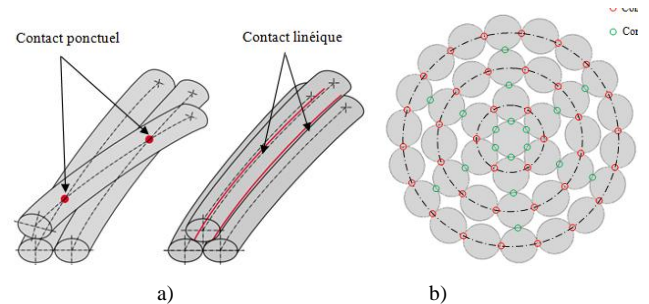


Figure 1: a) Contact ponctuel et linéique, b) Contact radial et tangentiel dans un conducteur multi-fils et multicouches.

Le modèle géométrique ainsi que les conditions aux limites appliquées sont schématisées en figure 2.

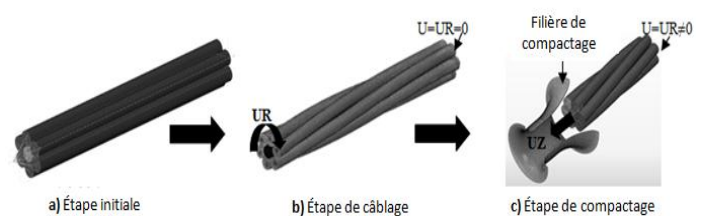


Figure 2. Le modèle géométrique et les conditions aux limites dans la modélisation de processus de câblage et de compactage

### 2.2. Les paramètres des simulations.

#### 2.2.1. La discretisation de la géométrie

Abaqus dispose d'un large panel d'éléments finis couvrant la plupart des problèmes physiques. Dans le cas de cette étude, le maillage choisi pour la simulation des procédés de câblage et de compactage, est construit à partir d'éléments solides rectangulaires en 3 dimensions à 8 nœuds avec une intégration

réduite au point de Gauss (C3D8R). Suite à l'analyse d'erreur de discrétisation (fig.3) nous nous sommes décidé de fixer la dimension de la maille à 0.2mm. Cette dimension est suffisante pour le modèle mécanique et pour le modèle électrique.

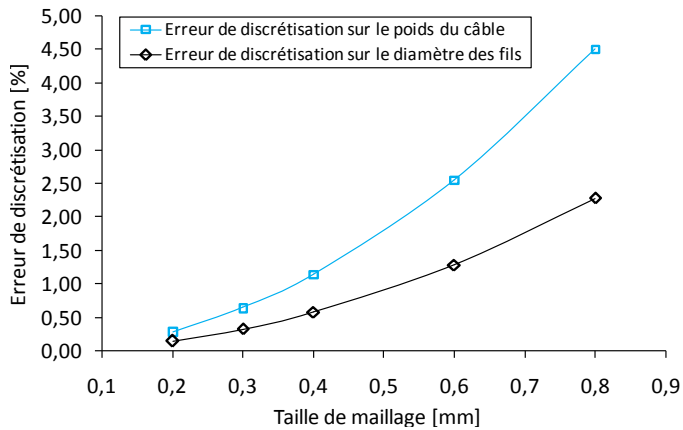


Figure 3. Erreur de discrétisation en fonction de la taille de maillage

### 2.3. Les mesures de la caractéristique de la conductivité en fonction de la force.

Le comportement mécanique et électrique des fils de cuivre est caractérisé en réalisant plusieurs essais de traction sur une machine de traction INSTRON. Les fils utilisés sont de différents diamètres et proviennent de bobines qui n'ont pas subi les opérations de câblage et de compactage. Seul, un traitement thermique de type recuit est réalisé sur les fils de cuivre afin de faciliter, en modifiant la structure cristalline, l'opération de tréfilage. Les essais de traction sont réalisés à température ambiante fixée, dans notre cas, à 20°C. La vitesse de traction est réglée à 50 mm/min. Ainsi, les lois de comportement sont identifiées pour les simulations des procédés et correspondent à un comportement élasto-plastique. Afin d'obtenir une caractérisation de la résistivité en fonction de la contrainte, un dispositif de mesure est utilisé comme le montre la Figure 4.

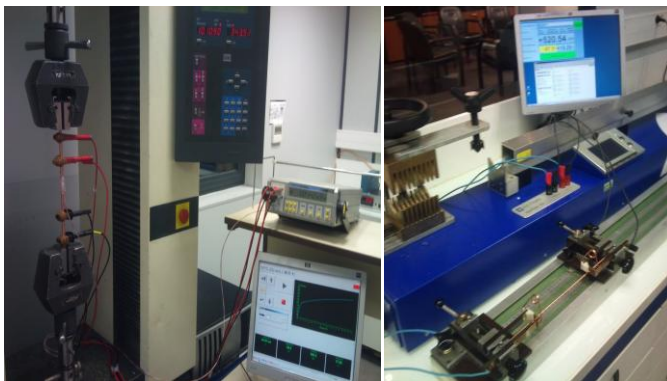


Figure 4 Les dispositifs des mesures a) de la force de traction b) de résistance de fils.

La longueur initiale des échantillons entre mors est de 200mm. Après application de la force la longueur du fil est mesurée, puis l'échantillon est pesé, ce qui permet de calculer le diamètre moyen du fil. Ensuite, la résistance totale est mesurée. Sur la base des valeurs de la résistance et des

dimensions, la résistivité du fil est déduite. Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 1

Tableau 1. Les résultats de mesures de la caractéristique de la résistance électrique en fonction de la force

Elongation [%]	Force [N]	Contrainte [MPa]	Déformation	Resistance [ $\mu$ Ohm]
1,06	828,26	144,49	0,011	486,90
2,04	908,05	160,03	0,02	491,03
3,87	1000,74	179,42	0,038	498,80
6,06	1094,49	200,59	0,059	507,80
8,07	1144,45	213,73	0,078	513,78
10,06	1213,25	230,49	0,096	520,66
12,05	1258,18	243,22	0,114	528,23
14,02	1305,66	256,96	0,131	536,87
16,02	1330,25	266,47	0,149	542,65
18,06	1370,25	279,24	0,166	551,71
20,08	1375,01	285,28	0,183	559,37
24,05	1431,09	306,65	0,216	575,59
28,10	1432,42	318,83	0,248	585,96
32,16	1440,78	331,94	0,279	605,15
34,28	1470,11	340,74	0,309	613,14

## 3. MODELISATION ELECTRIQUE

### 3.1. Simulation électrique (couplage faible):

Dans cette partie, nous allons décrire la méthode de couplage réalisée en tenant compte des champs de contrainte issus de la simulation mécanique présentée précédemment. Pour les simulations électriques, nous avons utilisé le module thermoélectrique d'Abaqus en régime stationnaire. En effet, dans ce module les variables électriques dépendent des variables thermiques. Cependant, Abaqus offre la possibilité de résoudre des problèmes purement électrique en séparant les deux domaines de la physique. Le maillage déformé issu de la simulation mécanique est importé dans le modèle électrique. Celui-ci est appelé maillage "orphelin", car sa modification est impossible. Par contre le type d'élément peut être changé. L'étape suivante, consiste à remplacer les éléments C3D8R utilisés pour la simulation mécanique, par des éléments de type C3D8E, ce qui permet de tenir compte des degrés de liberté électriques. Afin de prendre en compte l'influence des champs de contrainte symbolisant l'écroutissement du matériau, nous allons introduire la loi de comportement de la conductivité électrique en fonction des forces de contraintes obtenues expérimentalement. Cette caractéristique, permet de piloter l'évolution de la conductivité en fonction de la répartition de la contrainte issue du calcul mécanique. Du point de vue simulation numérique cette variation est introduite sous forme d'un tableau de points. Dans Abaqus, la conductivité peut être définie en fonction d'une variable d'état qui peut être la température ou dans notre cas une contrainte mécanique connue en chaque point du maillage. Pour cela nous élaborons une

fonction, à l'aide du langage Python, qui permet de relier la contrainte mécanique à la conductivité du matériau. Les contraintes aux nœuds sont alors codées pour chaque fil du câble.

#### 4. ANALYSE DES RESULTATS

La figure 6a montre la répartition de conductivité électrique exprimée en S/m et en %IACS. La figure 6b, montre la correspondance entre la distribution de la contrainte et la conductivité dans la structure. A l'aide des figures 8a et 8b, on remarque que la conductivité électrique est plus basse dans les zones de fortes contraintes. Cela signifie que ces zones sont moins conductrices. Il en résulte une résistance plus forte par rapport aux autres zones en rouge. La résistance totale est déterminée en intégrant la densité de courant sur la section droite de la structure. La résistance électrique peut alors être calculée par une simple application de la loi d'Ohm ( $R=U/I$ ). Nous avons implémenté cette équation dans le module post-processing afin d'afficher la résistance en fonction de la conductivité électrique dans chaque élément.

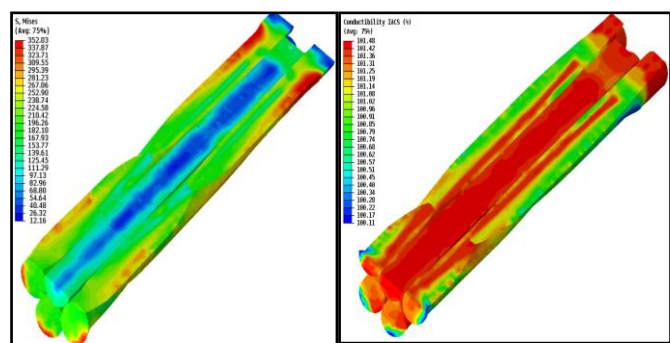


Figure 6. Répartition a) de la pression mécanique b) de la résistivité après le processus de fabrication

Les figures 6bet7bmontrent que la distribution delarésistivitédans le câblen'est pas uniforme. Ce phénomène affecte la résistance totale du câble.Avec la méthodeprésentée ici, ilestpossible d'analyser l'impact des paramètres de conceptiondu câble sursa résistance totale.

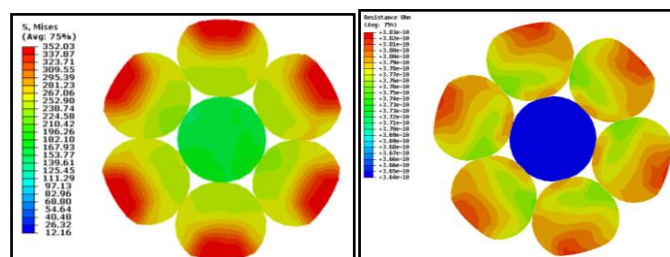


Figure 7. Répartition a) de la pression mécanique b) de la résistivité après le processus de fabrication

Les résultats obtenus par la FEM ont été comparés à la mesure expérimentale. Trois paramètres principaux ont été pris en compte: déformation de conducteur, le poids du conducteur et la résistance électrique. Le tableau 2 résume les mesures et les résultats de la modélisation par la méthode présentée dans cet article.

Table 2: Les résultats de mesure et de la simulation par la méthode présentée

	Résultat de mesure	Résultat de la simulation
Poids de conducteur [Kg/Km]	218,03	218,00
Resistance électrique [ $\Omega$ /Km]	0,707	0,7086

#### 5. CONCLUSIONS

Dans cet article, une méthode a été présentée pour prédire le comportement mécanique et électrique d'un conducteur concentrique selon des paramètres de processus de tréfilage et de compactage. L'originalité de la démarche consiste à considérer les déformations mécaniques du conducteur et de prendre en compte leur impact sur la conductivité électrique du matériau. Une relation entre la conductivité électrique du cuivre et de l'écrasement a été caractérisée par des mesures expérimentales. La répartition de la résistivité non uniforme dans le volume du câble ainsi été pris en compte. Les résultats obtenus par la méthode des éléments finis ont été comparés à des mesures expérimentales. La méthode sera exploitée pour effectuer un choix judicieux des paramètres de conception de façon à réduire la consommation de cuivre pour la fabrication de câbles. La méthode choisie pour réaliser des câbles industriellement est de réaliser des abaques qui prendront comme paramètres le diamètre, le nombre de brins unitaires, le nombre de couches, le pas de câblage, la direction de câblage, les conditions de contact inter-brins. L'étude des conditions de contact permet de quantifier l'influence de la forme, de la pression et de la résistance électrique des contacts inter-brins, ainsi que la distribution du courant dans la section de l'âme conductrice.

#### 6. REMERCIEMENTS

Nous voulons remercier la Société Nexans NRC Lens d'avoir mis à notre disposition tout le matériel ainsi que les moyens de calcul numérique pour réaliser l'étude.

#### 7. REFERENCES

- [1] G A. COSTELLO "Theory of wire rope", Springer Verlag New York, 1990.
- [2] R. HOLM "Electric contacts: Theory and applications", 4th ed. Berlin, Springer Verlag, 1979.
- [3] M RAOOF, I KRAINCANIC, I. "Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands", Computers and structures, 55, 4, 589-600. 1995
- [4] Messager T., Comportement élastique des câbles à 6 torons – résultats MEF et analytique. 2003
- [5] Yousef ZEROUKHI, Ewa NAPIERALSKA JUSZCZAK, Krzysztof KOMEZA, Fabrice MORGANTI, Guillaume VEGA, Slawomir WIAK „Dependence of the contact resistance on the design of stranded conductor.” Sensor Journal, open access mai 2014