

## Mise en forme d'une instrumentation de correction des déformations scoliotiques

Franck Toussaint, Frédéric Ducher & Laurent Tabourot

Laboratoire SYMME, Polytech'Savoie  
BP 806, 74016 Annecy Cedex, France  
[Franck.Toussaint@univ-savoie.fr](mailto:Franck.Toussaint@univ-savoie.fr)

### Résumé :

*Cet article présente un modèle éléments finis pour simuler et optimiser la mise en forme par pliage d'une pièce en titane commercialement pur destinée à une instrumentation de correction des déformations scoliotiques. L'outil numérique est en particulier utilisé comme indicateur technologique, notamment pour prévoir les dimensions de l'outillage compensant le retour élastique. Dans un premier temps, la simulation numérique est réalisée sur une pièce de référence fabriquée par le partenaire industriel. Le comportement mécanique du matériau est décrit au travers d'une loi élastique isotrope linéaire et d'un comportement plastique anisotrope. Nous montrons que le profil simulé de la pièce est en accord avec les mesures réalisées sur la pièce industrielle principalement si le phénomène de retour élastique est pris en compte. L'influence de l'angle d'ouverture de l'outillage sur ce phénomène est finalement discutée au travers d'une étude paramétrique.*

### Abstract :

*This paper presents a finite element model to simulate and optimise a bending operation of a part made in commercially pure titanium devoted to a scoliotic instrumentation. This numerical tool is used as technological indicator to anticipate tooling dimensions compensating the springback phenomenon. Firstly, the numerical simulation is carried out on a reference part manufactured by the industrial partner. The mechanical behaviour of the material (commercially pure titanium) is described according to a linear isotropic elastic law and an anisotropic plastic behaviour. We show that the simulated outline of the part is in agreement with the measurements carried out on the industrial part mainly if the springback phenomenon is taken into account. In a second time, the influence on this last phenomenon of the opening angle of tooling is discussed following a parametric study.*

### Mots-clefs :

**Mise en forme ; Titane ; Simulation numérique**

## 1 Introduction

La fabrication de nouveaux matériels implantables devient une démarche de plus en plus lourde à supporter par les fabricants d'implants chirurgicaux, notamment en raison des coûts relativement élevés liés à la fabrication des outillages, à la mise au point des gammes de fabrication... Ce constat conduit ainsi les ingénieurs des bureaux d'études de ces entreprises à réduire le nombre de prototypes au minima. Par ailleurs, pour rester compétitif dans ce secteur concurrentiel, les fabricants d'implants doivent présenter des gammes dimensionnelles de plus en plus large, voire même des produits "sur mesure", c'est à dire adaptés à la morphologie du patient. Depuis plusieurs années, les fabricants de pièces mécaniques des secteurs de pointes utilisent les codes de calculs par éléments finis pour simuler et optimiser les opérations de mise en forme, [Bahloul \(2006\)](#), [Ledoux \(2006\)](#). Le but de cette étude est de proposer un modèle numérique apte à reproduire une opération de pliage d'une pièce destinée à une instrumentation de correction des déformations scoliotiques et de pouvoir prévoir in fine les dimensions

de l'outillage permettant de compenser le retour élastique pour une quelconque géométrie de pièce.

## 2 Contexte de l'étude

### 2.1 Instrumentation scoliotique

La scoliose peut être définie comme étant une déformation sinueuse de la colonne vertébrale. Chez l'enfant ou l'adolescent, cette pathologie est progressive et s'aggrave parfois fortement au moment de la poussée de croissance, nécessitant alors un traitement orthopédique ou chirurgical. Les traitements chirurgicaux, par du matériel implantable, sont actuellement tous comparables tant dans leurs moyens que dans leurs résultats à la technique mise au point par Cotrel et Dubousset dans les années 1980. Afin de fournir aux chirurgiens un système complet capable de corriger les déformations dans les 3 plans tout en limitant le nombre de vertèbres lombaires instrumentées, une instrumentation innovante (Fig. 1) a été conçue par le partenaire industriel.

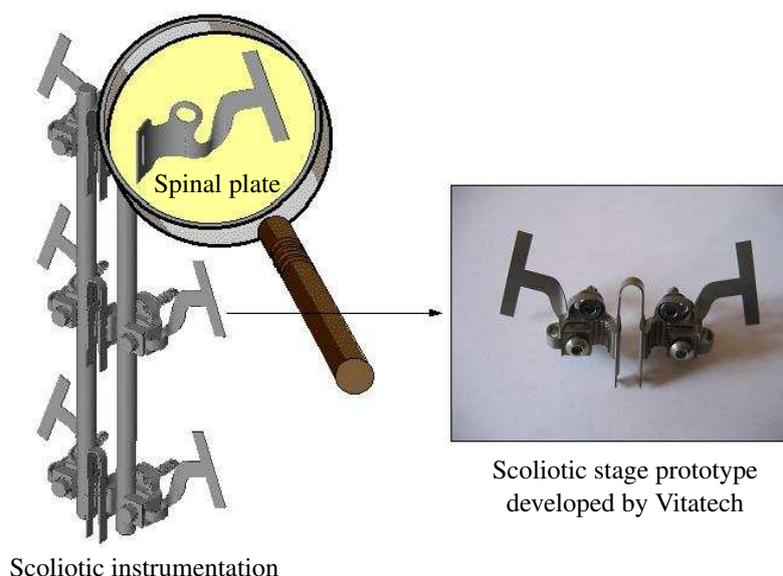


FIG. 1 – Prototype de l'instrumentation scoliotique développée par le partenaire industriel.

Il s'agit à la base d'une plaque "moulée" qui va épouser les contours de l'arc vertébral postérieur, s'étendant d'une apophyse transverse à l'autre en passant par l'apophyse épineuse. Cette plaque va se fixer sur ces trois apophyses par un système de type "agrafes" qui seront refermées sur l'os lors de l'implantation. Ces plaques vont comporter le système de fixation de la tige longitudinale par un connecteur dans chacune des gouttières paravertébrales : ce connecteur est lui-même relié à la plaque et à l'os par une vis. Ces plaques seront donc moulées et pliées selon une forme anatomique afin de s'adapter au mieux aux contours de l'arc vertébral postérieur.

### 2.2 Mise en forme et matériau

L'instrumentation et plus particulièrement la plaque crochet, que nous désignerons par la suite plaque, est réalisée dans une tôle d'épaisseur 0.5 mm de titane commercialement pure grade 2 (de dénomination française T40) fournit par la société ACNIS International (France). La

mise en forme de la plaque est réalisée au travers de différentes opérations (Fig. 2), notamment une opération de pliage sur laquelle l'étude se focalise.

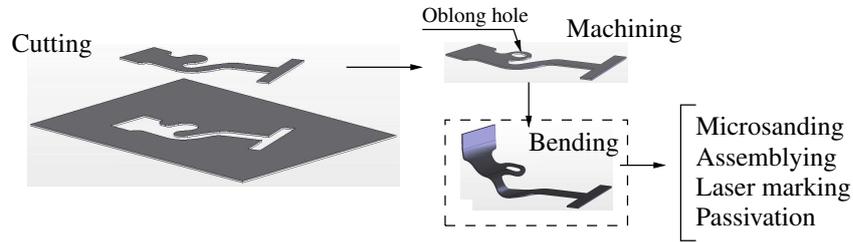


FIG. 2 – Gamme de fabrication de la pièce.

### 3 Simulation numérique

#### 3.1 Modélisation et paramètres matériaux

Le modèle numérique mis en place est constitué d'une matrice et d'un poinçon considérés comme étant des surfaces analytiques rigides (Fig. 3 (a)). Le comportement matériel de la plaque est décrit au travers d'une loi élastique isotrope linéaire et d'un comportement plastique anisotrope associé au critère de Hill (1948). En effet, le titane commercialement pure est un matériau qui en raison de sa structure cristallographique et des opérations de mise en forme qu'il a subit préalablement, notamment le laminage, présente un comportement fortement anisotrope, Fuh-Kuo *et al.* (2005), Toussaint (2006).

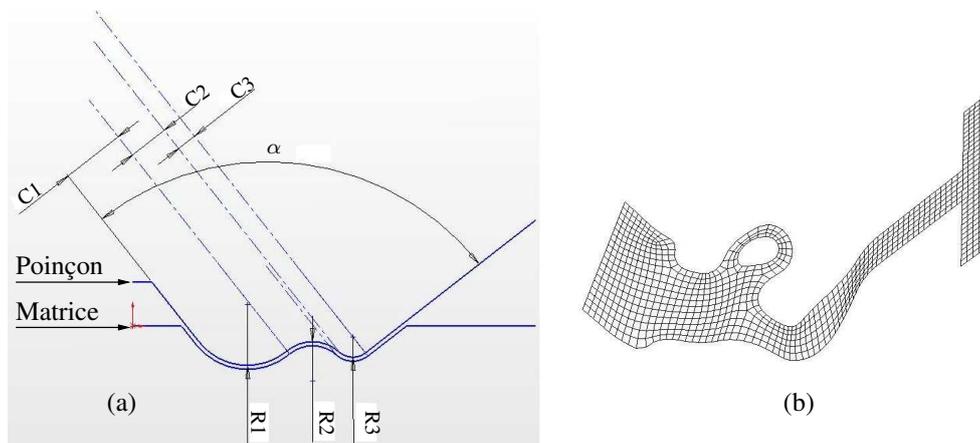


FIG. 3 – (a) : Principales caractéristiques géométriques de l'outillage, (b) : Maillage du flanc.

La Figure 3 (b) présente le maillage de la plaque réalisé à partir d'éléments de type coque à la fin de l'opération de pliage. Les principaux paramètres matériaux sont par ailleurs donnés dans le tableau 1. L'érouissage du matériau est renseigné au sein du code de calcul par la courbe issue de l'essai de traction suivant la direction de laminage. Le contact entre l'outillage (poinçon et matrice) et la plaque est définie à partir d'une loi de type Coulomb avec un coefficient de frottement  $\mu = 0.10$ . L'étape de mise en forme est réalisée par la descente du poinçon. Le retour élastique est simulé à partir d'un modèle simplifié où l'outillage est remplacé par les actions de contact qu'il exerce.

Parameters	$E$ (MPa)	$\nu$		
Value	111819	0.34		
Parameters	$F$	$G$	$H$	$N$
Value	0.52	0.29	1.70	4.20

TAB. 1 – Paramètres matériaux du titane commercialement pur.

### 3.2 Analyse des résultats

Lorsque le poinçon a atteint sa course maximale, la géométrie de la pièce est identique en tout point à celle de l'outillage (Fig. 3 (a)). Le matériau est alors fortement déformé notamment au niveau des rayons  $R1$ ,  $R2$  et  $R3$  de l'outillage. Au cours de la phase virtuelle de décharge de l'outillage, la relaxation progressive des contraintes résiduelles de traction et compression conduit à une ouverture de la plaque (angle  $\alpha'$ ) (Fig. 4) ainsi qu'à une rotation de la partie dite "agrafe" (angle  $\theta$ ).

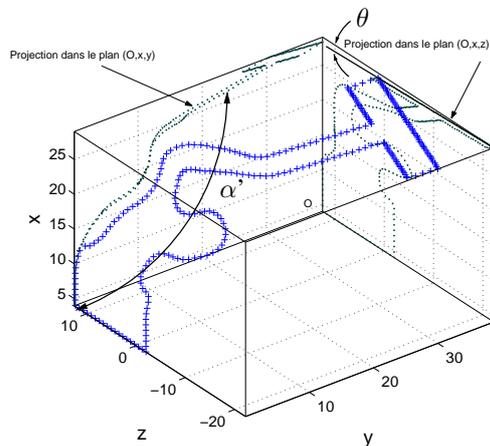


FIG. 4 – Géométrie 3D simulée de la pièce.

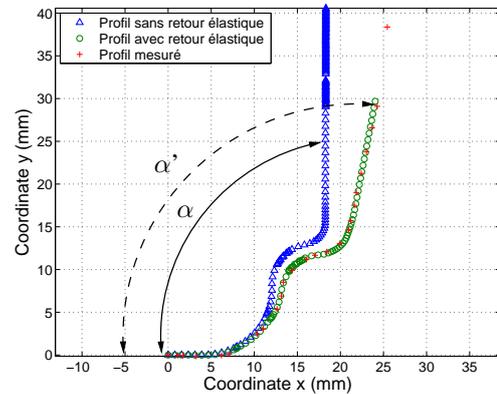


FIG. 5 – Comparaison des profils simulés avec et sans retour élastique avec le profil mesuré.

Pour mieux se rendre compte du phénomène, les profils simulés de la pièce avant et après le retour élastique ont été représentés dans le plan  $(O, \vec{x}, \vec{y})$  dans la Figure 5.

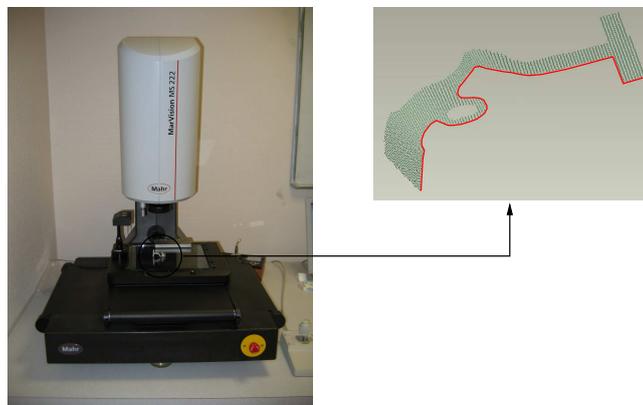


FIG. 6 – Géométrie 3D de la pièce issue d'une machine à mesurer MarVision MS 222 équipée d'un capteur laser. La ligne rouge représente le profil utilisé pour la comparaison avec la simulation numérique.

La pièce passe successivement d'un angle  $\alpha = 90^\circ$  (angle de l'outillage) à un angle  $\alpha' = 110.64^\circ$  après le retour élastique, soit une perte de  $10.64^\circ$ . Afin de vérifier la validité du modèle numérique, une pièce a été fabriquée par l'industriel à partir des mêmes spécifications géométriques d'outillage. Le profil de la pièce (correspondant à la ligne rouge dans la Figure 6) a été extrait de mesures 3D sans contacts obtenues à partir d'une machine à mesurer tridimensionnelle équipée d'un capteur laser. L'angle mesuré sur la pièce réelle correspond à un angle de  $103.25^\circ$ . L'erreur relative commise par le modèle numérique est d'environ 2.5%.

### 3.3 Influence de l'angle d'ouverture de l'outillage sur le retour élastique

La maîtrise du retour élastique est fondamentale dans la fabrication de l'instrumentation de correction des déformations scoliotiques, dans la mesure où la plaque doit épouser au mieux les contours de l'arc vertébral s'étendant d'une apophyse transverse à l'apophyse épineuse (Fig. 7).

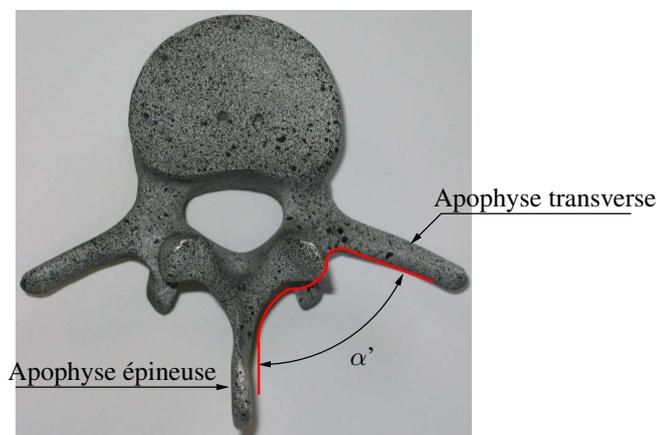


FIG. 7 – Positionnement de la plaque crochet de l'apophyse épineuse à l'apophyse transverse.

Par ailleurs, dans une démarche de mise au point d'implants sur mesures, le fabricant doit également être capable de définir la géométrie de son outillage à partir des radiographies du patient.

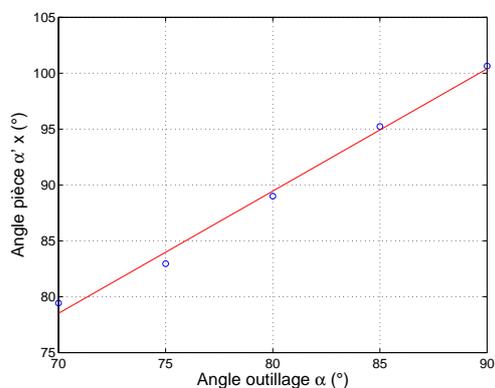


FIG. 8 – Evolution de l'angle pièce  $\alpha'$  en fonction de l'angle outillage  $\alpha$ .

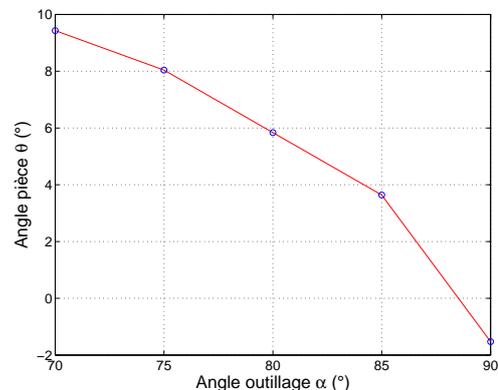


FIG. 9 – Evolution de l'angle pièce  $\theta$  en fonction de l'angle outillage  $\alpha$ .

L'étude paramétrique vise à trouver la relation entre l'angle  $\alpha$  de l'outillage et l'angle effectif mesuré sur les pièces fabriquées. Cinq simulations numériques pour des angles d'outillage  $\alpha$

de 90°, 85°, 80°, 75° et 70° ont été réalisées (d'un point de vue anatomie, l'angle entre les apophyses épineuse et transverse reste inférieur à 90°). Par ailleurs, les cotes  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  et les rayons  $R1$ ,  $R2$  et  $R3$  sont inchangés au cours des simulations. Les résultats de l'analyse sont présentés en Figure 8 et Figure 9. On constate que l'angle  $\alpha'$  calculé est quasiment proportionnel à l'angle  $\alpha$  d'ouverture de l'outillage. La différence  $\Delta\alpha = \alpha - \alpha'$  est toujours de l'ordre de 10°. L'angle  $\theta$  de rotation de la partie agrafe ne présente pas cette évolution et varie dans des proportions plus importantes. Le concepteur devra donc veiller à ce que cette rotation ne constitue pas une gêne lors de la fermeture de la partie "agrafe" sur l'os. Dans la négative, la maîtrise de forme pour cette partie de la plaque exigerait un outillage géométriquement plus complexe.

#### 4 Conclusion

La mise en forme d'une plaque en titane commercialement pur destinée à une instrumentation chirurgicale de correction des déformations scoliotiques a été étudiée à partir d'un modèle éléments finis. Les résultats obtenus dans le cas d'une pièce de référence conduisent à profil géométrique identique à la pièce fabriquée en milieu industriel si d'une part le comportement matériel de la plaque est décrit avec précision et d'autre part si le retour élastique est pris en compte. Dans une démarche d'optimisation des caractéristiques géométriques des outillages de fabrication de pièces sur mesure, l'outil numérique fournit des résultats forts utiles.

#### Références

- Bahloul, R., MKaddem, A., Dal Santo Ph., Potiron, A. 2006 *Sheet metal bending optimisation using response surface method, numerical simulation and design of experiments. International Journal of Mechanical Sciences* **48** 991-1003
- Fuh-Kuo, Ch., Kuan-Hua, Ch. 2005 *Stamping formability of pure titanium sheets. Journal of Materials Processing Technology* **170** 181-186
- Hill, R. 1948 *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proc. Roy. Soc. Lond.* **A193** 281-297
- Ledoux, Y., Samper, S., Favrelière H., Formosa, F., Pairel, E., Arrieux, R. 2006 *Optimisation of a stamping process by a design of experiment linked to a modal analysis of geometric defects. Archives of Civil and Mechanical Engineering* **6** 1-17
- Toussaint, F. 2006 Identification d'une loi de comportement pour la simulation numérique de la mise en forme d'une instrumentation en titane T40. 6<sup>ème</sup> journée technique Cetim : "Innovez dans les implants orthopédiques", Saint Etienne, 8 juin 2006.