



HAL
open science

Adaptation d'une technique de mesure de champs de déplacement à un essai de traction large sur tôles : identification du comportement par inversion

Patrick Ienny, Jean-Samuel Wienin, Anne-Sophie Caro-Bretelle

► To cite this version:

Patrick Ienny, Jean-Samuel Wienin, Anne-Sophie Caro-Bretelle. Adaptation d'une technique de mesure de champs de déplacement à un essai de traction large sur tôles : identification du comportement par inversion. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03361671

HAL Id: hal-03361671

<https://hal.science/hal-03361671>

Submitted on 1 Oct 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.

Utilisation d'une technique de mesure de champs dans un essai de traction large : application au comportement des tôles métalliques

Anne-Sophie Caro-Bretelle, Patrick Ienny & Jean-Samuel Wienin

*Ecole des Mines d'Alès
Centre des Matériaux de Grande Diffusion
6 Avenue de Clavières, 30319 Alès Cedex
abretell@ema.fr*

Résumé :

Durant les vingt dernières années un grand nombre d'études a été réalisé sur la description de la déformation progressive des matériaux métalliques sous sollicitations multiaxiales, sollicitations qui permettent d'exciter plusieurs composantes de la matrice des contraintes de façon indépendante. Dans ce cadre, l'essai de traction large (TL) développé par RENAULT permet de compléter la caractérisation du comportement des tôles minces destinées à l'emboutissage. L'hypothèse d'homogénéité des contraintes nécessaire à l'interprétation analytique de cet essai repose sur le choix d'un facteur d'éclatement très faible et d'un comportement élastique. On se propose dans ce travail d'évaluer l'incidence de la prise en compte des conditions aux limites réelles de cet essai dit de "structure" associé à un comportement élastoplastique. L'utilisation combinée d'une technique de mesure de champs cinématiques par corrélation (CinEMA) et d'un code aux éléments finis (ZéBuLON Transvalor/ENSMP) permet l'identification par approche inverse du comportement mécanique non linéaire. Cette application est complétée d'une étude de sensibilité au maillage, aux erreurs de mesure et aux paramètres du comportement.

Abstract :

During the last twenty years, a high number of studies were carried out about the description of the progressive distortion of metallic materials under multiaxial sollicitations, loadings enable to highlight several stiffness matrix components in an independant way. In this framework, the traction large test (TL) developed by Renault policy enable to complete material behavior of some flat materials that are similar to metallic sheets used for stamping process. The homogeneity stress assumption required for the analytical interpretation comes from both a lower length ratio and an elastic assumption. We propose in this work to apply realistic boundary conditions of this structural test and to assess his impact on material behavior. The use of optical measurements technique by correlation (CinEMA) combine to a finite element code (ZéBuLON Transvalor/ENSMP) allows to identify by an inverse approach the non-linear material behavior. A sensitivity study compared to the meshing made for the simulation and to measurements noise was conducted.

Mots-clefs :

Traction large ; Extensométrie optique ; Recalage par éléments finis ; Optimisation non linéaire

1 Introduction

Ce travail concerne l'identification des paramètres élastoplastiques caractérisant le comportement mécanique des tôles métalliques. La production de ces matériaux par laminage leur confère un comportement orthotrope nécessitant la production d'essais dans le sens de laminage dit "sens long" et la direction perpendiculaire dite "sens travers". La production d'essais de traction simple selon ces deux directions est classiquement utilisée car cet essai est bien maîtrisé d'un point de vue expérimental. Il est complété par des essais de mise en oeuvre plus complexe tels que les essais de cisaillement, de traction large et de compression large. Une étude critique relative à l'exploitation de ces essais est parallèlement menée (WieninCFM20007). Le point

commun à la mise en place de ces essais réside dans la volonté de générer un état de contrainte homogène d'une part et de considérer une sollicitation "simple" suggérant une expression analytique entre états de contraintes et déformations d'autre part. On se propose dans ce travail d'étudier la validité de ces hypothèses pour l'essai de traction large. Le comportement du matériau est établi dans un premier temps par une approche directe en considérant les formulations analytiques propres à chaque essai. Dans un deuxième temps, et s'agissant de l'essai de traction large, on s'affranchit de ces hypothèses en considérant les conditions aux limites réellement mesurées sur l'éprouvette : ces dernières concernent l'évolution des déplacements relatifs au contour de l'éprouvette et mesurés par corrélation d'image numérique (logiciel CinEMA développé au laboratoire). Ces conditions associées à la résultante des efforts sont imposées à un maillage réaliste de l'éprouvette généré dans un code aux Eléments Finis (ZéBuLON, Transvalor/ENSMP). Cette procédure associée à un outil d'optimisation numérique permet d'affiner le recalage des paramètres du comportement. Une analyse de la sensibilité de cette méthode dite de "recalage par inversion" est proposée : le degré de raffinement du maillage ainsi que l'erreur introduite par la mesure des champs cinématiques sont considérés.

2 Identification du comportement à partir d'essais "homogènes"

2.1 Présentation des essais et du matériau

Le matériau étudié est un acier XES se présentant sous la forme d'une tôle laminée. Les conventions suscitées et relative au sens de laminage sont retenues : on notera le sens de laminage ou Sens Long (SL) et le sens perpendiculaire ou Sens Travers (ST). Les éprouvettes sont découpées dans la tôle selon ces deux directions.

Les différents essais réalisés sont :

- L'essai de traction et de cisaillement simples : ils sont réalisés sur des éprouvettes standards présentant respectivement des zones utiles de $110 \times 20 \text{ mm}^2$ et $5 \times 50 \text{ mm}^2$.
- L'essai de traction large : cet essai est fondamental pour la caractérisation des comportements mécaniques car il permet d'intégrer des états de contraintes biaxiaux : l'élanement très faible de l'éprouvette lui confère un allongement dans le sens de la sollicitation tout en interdisant la contraction dans la direction transverse, ce qui conduit à la naissance d'une contrainte transverse. Les dimensions utiles de l'éprouvette utilisée ($31 \times 310 \text{ mm}^2$) confèrent un élanement de 1/10ème jugé satisfaisant pour l'établissement d'un état de contrainte quasi-homogène. Compte tenu des hypothèses attendues d'homogénéité des déformations, l'extensométrie de ces essais est volontairement simplifiée et le plus souvent réduite à une mesure unidirectionnelle. Celle-ci est généralement assurée par des extensomètres à couteaux ou bien des jauges de déformation.

2.2 Choix de la loi de comportement

Dans cette étude on se place dans le cadre de l'élastoplasticité en petites perturbations. Le taux de déformation $\dot{\epsilon}$ s'écrit :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_p$$

Le taux de déformation élastique est donné par

$$\dot{\epsilon}_e = C : \dot{\sigma}$$

où C est le tenseur d'élasticité du 4ème ordre tel que

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad \forall i, j, k, l = 1..3 \quad (1)$$

avec λ et μ les coefficients de Lamé.

Le taux de déformation plastique est associé au tenseur des contraintes et à la déformation plastique cumulée p à travers la loi d'écoulement plastique

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}(\sigma, p), \quad \dot{\lambda} \geq 0.$$

Le choix du critère de charge de Hill s'est imposé comme étant le plus utilisé pour décrire la plasticité de matériaux orthotropes. Enfin, pour simplifier l'étude, on suppose un écrouissage isotrope non linéaire. La fonction de charge s'écrit alors :

$$f = \left(\frac{3}{2} \sigma : M_{Hill} : \sigma \right)^{1/2} - R_0 - Q(1 - e^{-bp}) \quad (2)$$

où M_{Hill} est une matrice diagonale contenant des coefficients indépendants (F, G, H, L, M et N) et R_0 est un paramètre à ajuster.

On se retrouve donc avec 9 paramètres sont alors à identifier : 2 pour l'élasticité (équation (1)), 3 pour l'écrouissage et 6 pour le critère (équation (2)).

2.3 Identification sur la base d'essais "simples"

Une première identification a été réalisée à partir des résultats (contraintes, déformations) que nous fournissent les essais "simples" décrits précédemment. Ces essais considérés comme homogènes permettent d'effectuer un recalage des paramètres à l'aide d'une simple optimisation. Le lecteur pourra trouver l'ensemble des expressions analytiques reliant contraintes et déformations dans la bibliographie suivante (Wienin (2001)). Des exemples de comparaison entre modèle et expérience illustrent ce premier résultat sur les figures 1 et 2, pour des essais de traction simple et de traction large.

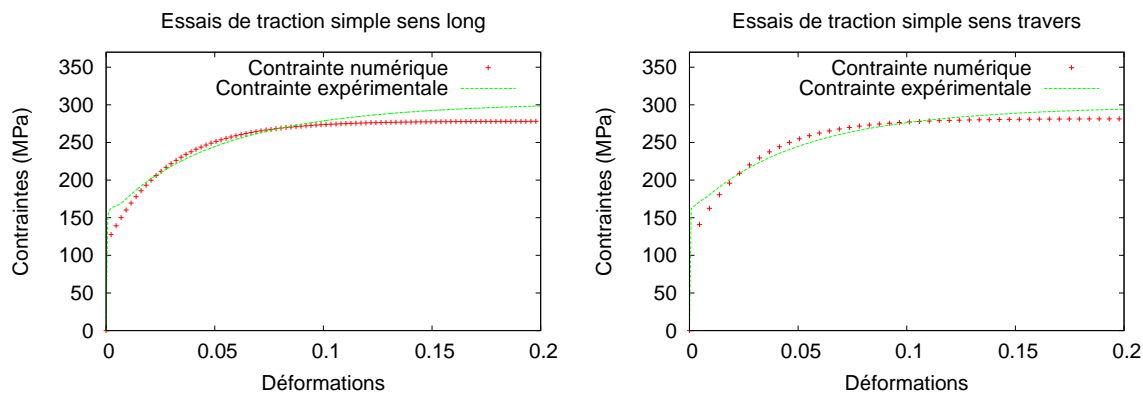


FIG. 1 – Identification sur la base d'essais simples : résultats pour des essais de tractions simples

Le tableau 1 synthétise l'ensemble des paramètres obtenus par cette première identification.

3 Identification sur la base d'essais de "structure" : principe de l'approche "inverse"

3.1 Apport de la photomécanique à l'analyse de l'essai de traction large

Dans cette deuxième partie l'essai de traction large est considéré comme un essai de "structure". L'instrumentation de l'essai est cette fois assurée par une caméra CCD Haute Résolution

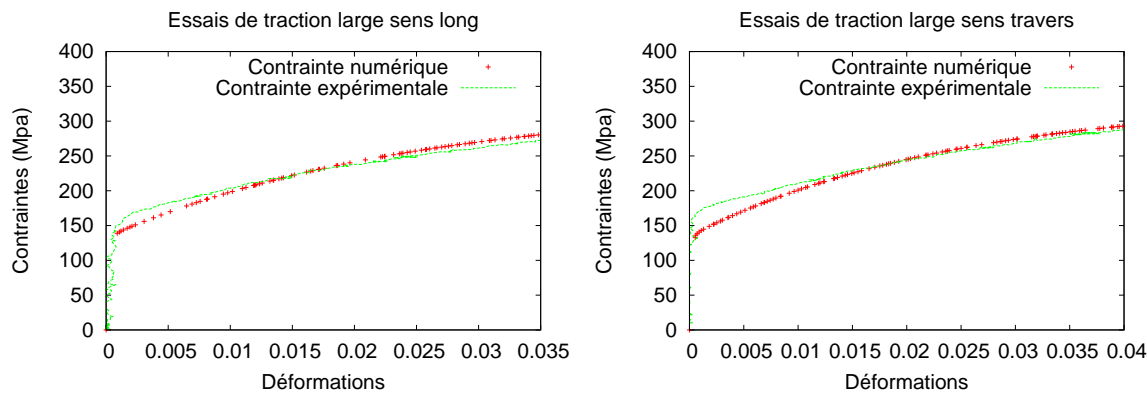


FIG. 2 – Identification sur la base d'essais simples : résultats pour des essais de tractions larges

Paramètres	E (GPa)	ν	F	G	H	L	R_0 (MPa)	Q (MPa)	b
Essais homogènes	228	0.3	0.64	0.61	0.57	0.58	116.	158.	28.5

TAB. 1 – Identification de la loi de comportement à partir des essais homogènes produits en sens long et sens travers : traction simple, cisaillement simple et traction large

qui permet d'enregistrer les états successifs de la surface de la tôle. Le post-traitement numérique de la séquence d'images acquise est constitué de l'algorithme de traitement des images (CinEMA) et des interfaces le reliant au code aux Éléments Finis (ZéBuLON) (Larraba-Abes et al. (2003), Giton et al. (2006)). Un premier traitement d'analyse d'image, réalisé sur la première image acquise, permet de définir la géométrie réaliste de l'éprouvette. A partir de ces considérations géométriques, un maillage réaliste de la zone étudiée de l'éprouvette est produit par le module Z-mesh du code ZéBuLON. La cinématique expérimentale de l'ensemble des points constituant ce maillage est ensuite calculée par corrélation numérique. La résolution du problème direct peut enfin être réalisée en imposant les déplacements réellement mesurés aux noeuds du contour de l'éprouvette : cette résolution en contrainte plane sera qualifiée de "simulation réaliste". Un maillage éléments finis de la structure est réalisé, il contient 371 noeuds (figure 3a). Ce premier calcul, établi sur la base du comportement identifié précédemment (Table 1), permet d'analyser les conditions d'homogénéité de l'essai : on montre par exemple l'évolution des profils des déformations axiales et transversales le long de la ligne médiane d'une demi-éprouvette (figure 3b). Ce calcul révèle un écart important avec l'hypothèse admise d'une déformation transverse nulle. Ce phénomène est d'autant plus marqué qu'on se situe à proximité des bords libres de l'éprouvette. Pour aller plus loin on s'aperçoit, sur la figure 4, que les hétérogénéités observées en déformations se traduisent par une sous-estimation des contraintes de l'ordre de 10%. Ce résultat était attendu puisque la violation de l'hypothèse de traction large à proximité des bords libres nous rapproche globalement des conditions de traction simple.

3.2 Approche "inverse" : recalage par éléments finis

Le protocole d'analyse par approche inverse est basé sur l'exploitation des champs de déplacements obtenus par corrélation. Cette partie numérique fait essentiellement appel aux modules du code ZéBuLON. Les modules Z-mat et Z-optim permettent l'identification des lois constitutives. L'utilisation du post-processeur de ZéBuLON nous fournit la résolution de l'ensemble des équations d'équilibre et de compatibilité cinématique qui régissent le système. Associé à la loi de comportement, cette résolution nous donne une estimation de l'évolution des

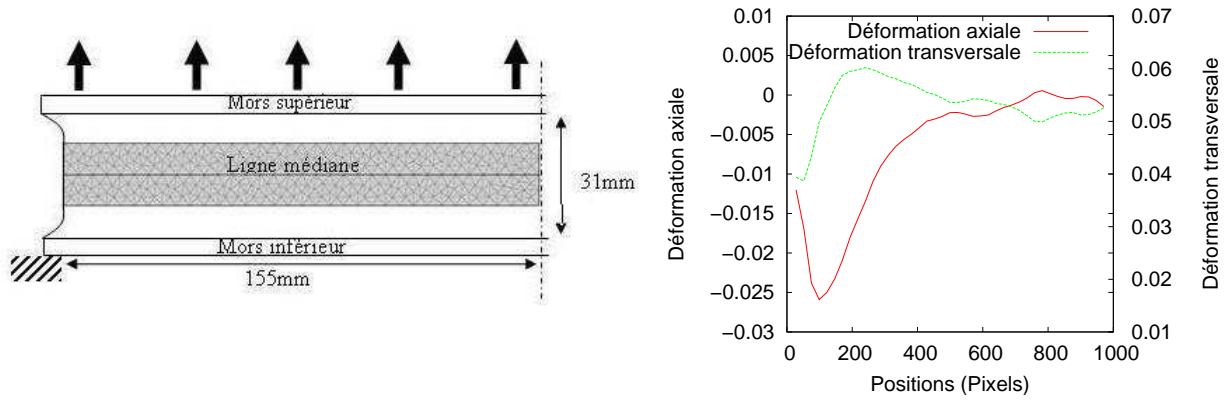


FIG. 3 – Géométrie de l'échantillon et profil des déformations longitudinale et transversale obtenues lors de la "simulation réaliste" sur la ligne médiane de la demi-éprouvette

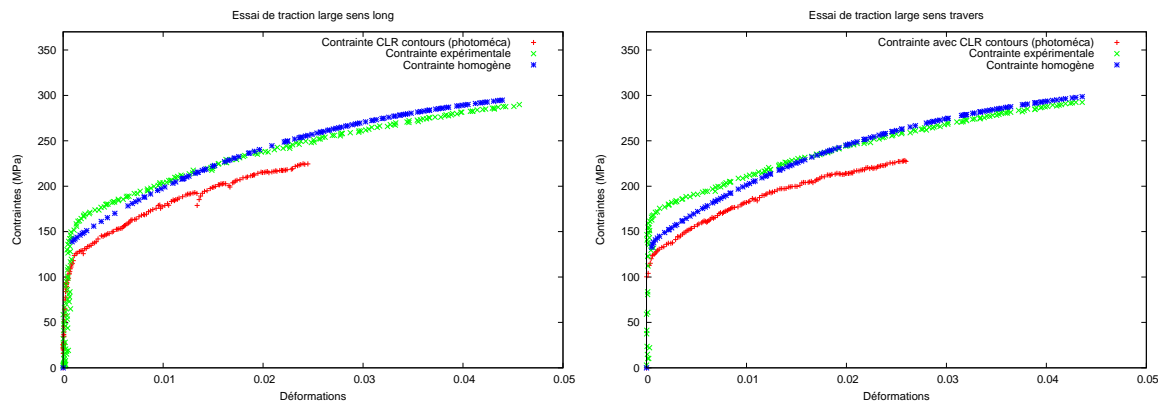


FIG. 4 – Évolutions des contraintes dans le cas de la première identification (en vert) et de la simulation réaliste (en rouge) par comparaison avec l'expérience (en bleu)

contraintes et des efforts en chacun des points. L'instrumentation de l'essai fournit à chaque instant les déplacements en tous points du maillage et la résultante des efforts longitudinaux s'exerçant sur les lignes de noeuds supérieure et inférieure de l'éprouvette. Concernant la mise en donnée les conditions en termes de déplacements sont imposées sur le contour de l'éprouvette $\delta\Omega$ que l'on différenciera des données mesurée sur tout l'échantillon Ω . $\delta\Omega$ est séparée en $\Gamma_u \cup \Gamma_T$ et $\Gamma_u \cap \Gamma_T = \emptyset$ (sur Γ_u on imposera des déplacements et sur Γ_T des efforts). L'approche inverse consiste alors à réitérer ce calcul aux Eléments Finis de façon à obtenir un jeu de paramètres matériaux permettant de minimiser l'écart entre les données expérimentales et numériques (contraintes et/ou déplacements). La fonction coût utilisée est la forme quadratique suivante :

$$J(E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b) = \frac{1}{2} (\vec{h}((E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b, w) - \vec{m}))^2,$$

où \vec{m} est le vecteur réponse expérimental et \vec{h} est le correspondant numérique. w représente des données concernant la géométrie et les conditions aux limites. Pour les problèmes considérés, la forme h pourra prendre les formes suivantes :

$$h_T(E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b, w) = \sigma(E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b) n(\vec{w}), \quad \vec{m} = \vec{T}, \quad (3)$$

$$h_u(E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b, w) = K^{-1}(E, \nu, F, G, H, L, R_0, Q, b) b(\vec{w}), \quad \vec{m} = \vec{u}, \quad (4)$$

où \vec{n} , K et \vec{b} sont le vecteur normal unitaire, la matrice de raideur et la somme des forces aux noeuds issues du calcul aux éléments finis. Dans le cadre de la résolution du problème direct par éléments finis on impose sur Γ_u les déplacements issus du logiciel de corrélation. On cherche alors à minimiser soit la fonctionnelle h_T , soit $h_T + h_u$.

Paramètres	E (GPa)	ν	F	G	H	L	R_0 (MPa)	Q (MPa)	b
Problème 1 (371 noeuds)	228	0.3	0.57	0.54	0.51	0.52	102.7	144.5	25.7
(650 noeuds)	228	0.3	0.69	0.54	0.60	0.45	136.5	162.3	26.98
Problème 2 (371 noeuds)	228	0.3	0.57	0.54	0.51	0.52	102.7	144.5	25.7
(650 noeuds)	228	0.3	0.69	0.54	0.60	0.45	136.5	162.3	26.98

TAB. 2 – Identification de la loi de comportement à partir des données issues de la photomécanique

Pour s'assurer de la robustesse de cette procédure inverse, on cherche dans un premier temps à caractériser la sensibilité de l'identification par rapport au degré de finesse du maillage choisi d'une part et à un bruit de mesure lié à la corrélation d'images d'autre part. Des exemples de résultats sont regroupés dans la table 2. On note une stabilité vis à vis du type d'optimisation réalisée (ce qui est attendu compte tenu des faibles gradients de contraintes obtenus au sein du matériau durant l'essai) et des termes caractérisant la loi d'écoulement. Par contre les paramètres décrivant le critère de charge évoluent.

4 Conclusions

Cette étude vise l'amélioration de l'analyse des comportements élastoplastiques des tôles destinées à l'emboutissage. L'exploitation des essais biaxiaux sur produits plats repose sur des hypothèses fortes d'homogénéité des champs de contraintes et des conditions aux limites qualifiant l'essai de "simple" (interprétation analytique). Ce travail rend compte, pour l'essai de traction large, de l'erreur introduite dans l'identification du comportement par le non respect de ces hypothèses. Pour cela une méthode dite de recalage d'un modèle aux éléments finis est adoptée. Elle est associée à une instrumentation de l'essai par une technique de mesure de champs cinématiques. Les premiers résultats témoignent de l'erreur commise notamment sur le recalage du critère de charge. Une analyse de la sensibilité du maillage et du bruit de mesure à ce recalage est par ailleurs discutée. Cette méthodologie d'analyse des comportements permet désormais de considérer des essais dont la géométrie induit une réponse en champ non homogène (structure) et/ou des essais dont les sollicitations ne correspondent pas aux axes d'isotropie du matériau.

Références

- Giton, M., Caro-Bretelle, A.S., Jenny, P. 2006 Hyperelastic behaviour identification by a forward problem resolution : application to a tear test of a silicone rubers. *Strain*. **42** 291-297.
- Larraba-Abes, F., Jenny, P., Piques, R. 2003 A new 'tailor-made' methodology for the mechanical behaviour analysis of rubber-like materials : I. Kinematics measurements using a digital speckle extensometry. *Polymer*. **44** 807-820.
- Lemaitre, J., Chaboche J.J. 1988 Mécanique des matériaux solides. Dunod
- Wienin, J.S. 2001 Comportement élastoplastique anisotrope de tôles minces destinées à l'emboutissage. Influence des données de compression large sur l'identification. *Thèse de l'école nationale supérieure des Mines de Paris*. France.