

Instrumentation optique d'essais sur tôle : critères de validation d'essais et identification de comportements élastoplastiques

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

École des Mines d'Alès
Centre des Matériaux de Grande Diffusion
6 Avenue de Clavières
jean-samuel.wienin@ema.fr

Résumé :

L'identification du comportement des produits plats destinés à l'emboutissage nécessite la production d'essais variés permettant d'imposer des états de contraintes multiaxiales. Les méthodes optiques de mesure spatiale cinématique améliorent la connaissance de l'état des déformations au cours des essais. Leur sensibilité de mesure et leur résolution spatiale autorise aujourd'hui l'étude des comportements élastoplastiques.

Notre travail consiste en l'instrumentation optique d'un ensemble d'essais utilisés lors du processus d'identification. La première partie présente les essais et la validation systématique des hypothèses prises pour leur interprétation analytique (conditions aux limites retenues, homogénéité). La deuxième partie présente le comportement mécanique étudié et le protocole d'identification. L'optimisation employée utilise une détermination séquentielle et itérative du critère de charge et de la loi d'écoulement.

Dans le cas d'une violation des hypothèses prises pour interpréter l'essai, la mesure complète du tenseur des déformations permet tout de même d'identifier le comportement sur la base d'une approche inverse.

Abstract :

Identification of constitutive law of sheet metal used for stamping requires varied tests and multiaxial stress states. Kinematical spatial optical extensometry processes improve knowledge of the strain state during tests. Nowadays, their sensitivity and their space resolution authorize the study of elastoplastic behaviors. Our work consists of the optical instrumentation of a whole of tests used during the identification process. The first part presents the tests and the validation of the assumptions taken for their analytical interpretation. The second part presents the studied behavior and the protocol of identification. Optimization employed uses a iterative sequential determination criterion. In the case of a violation of the assumptions taken to interpret the test, the complete knowledge of the strain tensor makes it possible all the same to identify the behavior on the basis of forward resolution.

Mots-clefs :

Extensométrie optique ; Identification du comportement ; Hill 48

1 Introduction

L'identification du comportement des produits plats métalliques et d'alliages d'aluminium destinés à l'emboutissage nécessitent des essais de nature variée ainsi que des trajets de chargement simples ou complexes choisis de façon à correspondre aux sollicitations subies lors de la mise en oeuvre. L'instrumentation unidirectionnelle classique associée à une interprétation analytique de ces essais repose essentiellement sur l'hypothèse d'une homogénéité des contraintes dans le matériau. Bien que généralement vérifiée dans le cas de la traction simple lorsque la sollicitation a lieu dans les directions d'isotropie du matériau, ces hypothèses doivent dans tous les cas être vérifiées pour le couple classe de matériau/banc test expérimental.

S'agissant d'essais réalisés en contraintes planes, la méthode de mesure de champs cinématiques par corrélation bidimensionnelle nous donnent un accès à l'état des déformations au cours

des essais mécaniques. La particularité de notre étude a consisté en l'instrumentation optique systématique des essais utilisés lors du processus d'identification : il s'agit des essais de traction simple, de traction large, de compression large et de cisaillement simple (Sinou *et al.* (2003)). La première phase de ce travail concerne la présentation des essais et la validation systématique des hypothèses et conditions aux limites relatives à chacun d'eux. Elle conduit à l'établissement de critères de validité permettant d'écarter certains résultats qui s'éloigneraient de façon importante des hypothèses retenues. La deuxième phase concerne la présentation du comportement mécanique étudié et du protocole d'identification. En raison du grand nombre de paramètres à déterminer, la méthode d'optimisation employée est basée sur une détermination séquentielle du critère de charge et de la loi d'écoulement de façon itérative.

2 Protocole expérimental

2.1 Matériau et modèle de comportement associé

L'étude porte sur un acier XES laminé en épaisseur de 0,8 mm, c'est à dire un acier doux d'usage général. Le diamètre moyen des grains est de 27 μm . La production de ce matériau par laminage lui confère de comportement orthotrope. Par convention, on appelle sens long (orientation 00) le sens de laminage ; sens travers (orientation 90) sa direction perpendiculaire dans le plan de la tôle. Le sens travers court (ou épaisseur) est choisit de façon à ce que le repère soit direct. Un repère (x,y) est associé aux directions principales de chaque essai par une rotation du repère matériau d'axe le travers court.

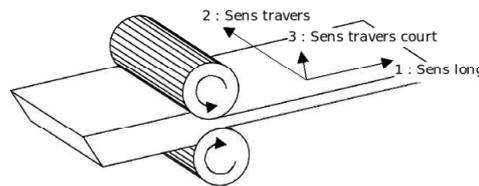


FIG. 1 – Orientation du matériau

On se place dans le cadre de la plasticité associée, de l'incompressibilité plastique et des contraintes planes proposé par Lemaitre et Chaboche (1985) :

$$f(\mathbf{T}, \mathbf{X}) = f_y(\bar{\mathbf{T}}) - \Gamma \quad \text{avec} \quad \bar{\mathbf{T}} = \mathbf{T} - \mathbf{X} \quad \text{et} \quad \Gamma = R_0 + R \quad (1)$$

où \mathbf{T} est le tenseur des contraintes de Cauchy, \mathbf{X} le tenseur d'écrouissage cinématique et R un scalaire traduisant l'écrouissage isotrope de valeur initiale R_0 . Après simplification par les hypothèses retenues, ce modèle peut s'écrire :

$$f = \sqrt{\frac{1}{2}(F(\bar{\sigma}_{22} + X_{33})^2 + G(-X_{33} - \bar{\sigma}_{11})^2 + H(\bar{\sigma}_{11} - \bar{\sigma}_{22})^2 + 2N\bar{\sigma}_{12}^2)} - \Gamma \quad (2)$$

$$\text{avec} \quad \dot{R} = b(R_{sat} - R)\dot{p} \quad \text{et} \quad \dot{\mathbf{X}} = \frac{2}{3}C\mathbf{D}^p - D\mathbf{X}\dot{p} \quad (3)$$

où \mathbf{D}^p est le tenseur des vitesses de déformation plastique, \dot{p} la vitesse de déformation plastique équivalente et p_0 la déformation plastique équivalente initiale. On écrit :

$$\dot{p}^2 = 2 \frac{F(H\dot{\epsilon}_{33}^p - G\dot{\epsilon}_{22}^p)^2 + G(F\dot{\epsilon}_{11}^p - H\dot{\epsilon}_{33}^p)^2 + H(G\dot{\epsilon}_{22}^p - F\dot{\epsilon}_{11}^p)^2}{(HF + GH + GF)^2} + 4 \frac{(\dot{\epsilon}_{12}^p)^2}{N} \quad (4)$$

2.2 Présentation des essais

Pour l'ensemble des essais traités les déformations sont mesurées par corrélation d'images numériques (logiciel *CINema* de l'École des Mines d'Alès). Les déformations mesurables sont de 5.10^{-5} (Laraba-Abbes *et al.* (2003)).

Des essais de traction simple sur des éprouvettes normalisées et des essais de cisaillement simple ont été réalisés. A titre d'exemple, le choix de la géométrie des éprouvettes de cisaillement a été préalablement étudié sur la base d'une modélisation par éléments finis (ABAQUS) et comparé avec les mesures cinématiques obtenues par extensométrie optique. L'homogénéité des déformations ainsi que le respect des conditions aux limites ont permis une interprétation analytique de ces essais.

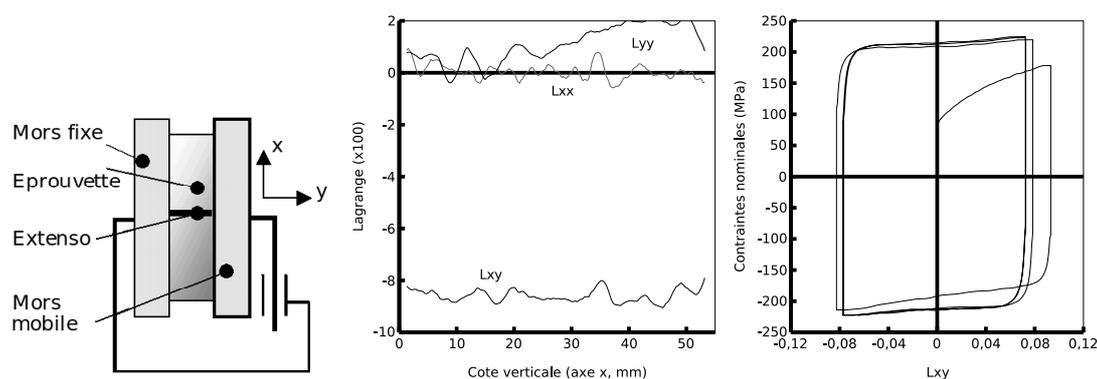


FIG. 2 – Essai de cisaillement simple ; profil après deux brins de chargement ; courbe d'écrouissage

Nous avons également réalisé des essais de traction large, c'est à dire sans déformation transverse autorisée. Les conditions de cet essai conduisent à un état de contrainte biaxial dans le plan de la tôle. Nous avons tracé un profil de déformation en y le long de la zone utile de l'éprouvette pour qualifier l'homogénéité de l'essai. On constate que le profil de déformation obtenu présente bien les caractéristiques attendues sur 70% de la section. Pour les bords libres, les conditions de déformations se rapprochent de celles de la traction simple. Les biais qu'introduisent cet écart aux hypothèses a été étudié (Caro-Bretelle *et al.* (2007)).

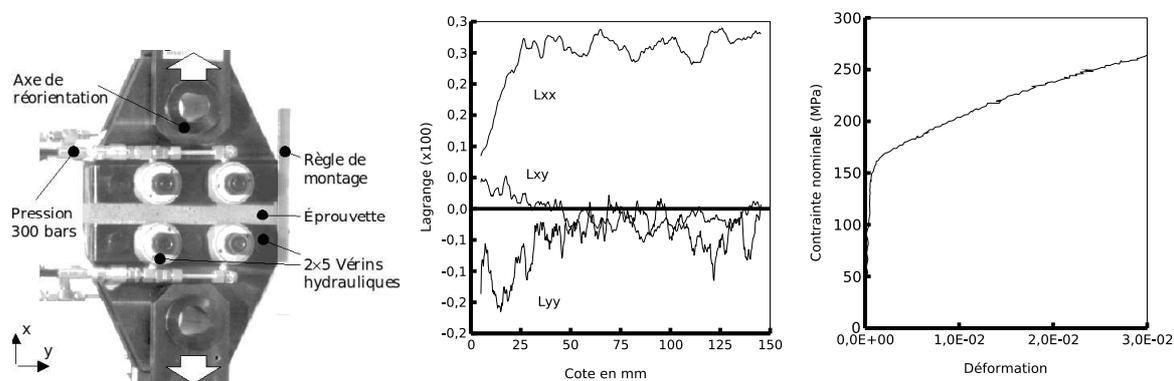


FIG. 3 – Montage de traction large ; profil à 170 MPa ; courbe d'écrouissage

Enfin, nous avons réalisé des essais de compression large. Cet essai est le pendant de l'essai de traction large et consiste à comprimer une direction du matériau (autre que l'épaisseur) tout

en maintenant une déformation nulle dans la direction transverse.

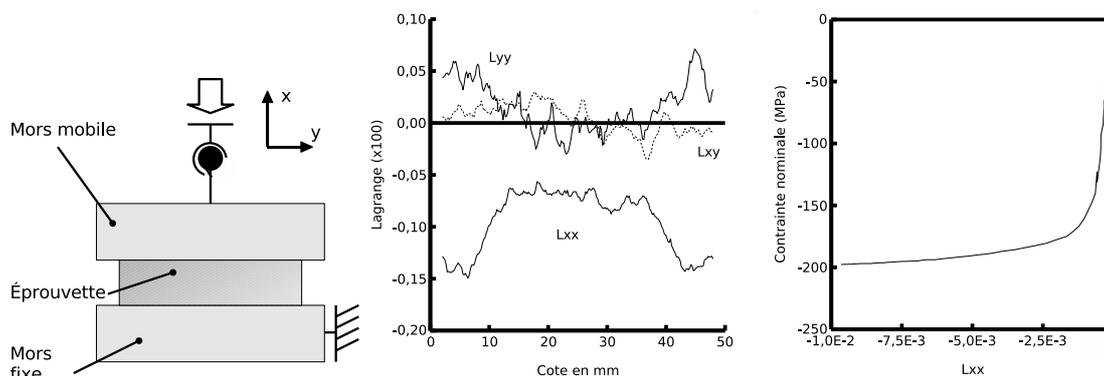


FIG. 4 – Essai de compression large ; profil de déformations ; courbe d'écroutissement

L'intérêt de cet essai est évident pour l'identification du critère de charge car il permet de fournir deux points dans le troisième quadrant de l'espace des contraintes ($\sigma_{11} < 0$; $\sigma_{22} < 0$) généralement inexploré. Pour des raisons de flambement, cet essai ne permet pas d'explorer l'écroutissement au delà de la contrainte limite. Comme pour la sollicitation en cisaillement, la géométrie retenue a fait l'objet d'une étude numérique basée sur des modélisations par éléments finis pour valider l'homogénéité de l'état de contrainte.

Pour les 4 natures d'essais traités, notre base de données finale comprend des éprouvettes sollicitées selon les 3 orientations 00, 90 et 45° soit un total de 12 types d'essais différents.

TAB. 1 – Paramètres des essais mécaniques

| Type | Section utile (mm) | Échelle ($\mu\text{m}/\text{pix}$) | Lj profil (mm) | homogénéité |
|---------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------|-------------|
| Traction simple | 110 × 20 | - | - | 100% |
| Traction large | 310 × 31 mm | 158 | 25 × 0.79 | 80% |
| Cisaillement simple | 3 × 50 | 55 | 2.47 × 4.95 | 100% |
| Compression large | 8 × 50 | 50 | 3.5 × 6.8 | 60% |

3 Protocole d'identification

Le module de YOUNG du matériau est déterminé sur la base des essais de traction simple sens long. La limite élastique conventionnelle $\sigma_{p(x\%)}$ est définie pour la déformation plastique équivalente constante correspondant à une déformation plastique de 2.10^{-4} en traction simple sens long. Les essais de traction large et compression large, qui ne permettent pas d'imposer un écroutissement important, obligent à choisir une limite conventionnelle basse.

L'exploitation des essais nécessite un traitement semi-automatique préalable. L'utilisateur définit une plage de linéarité permettant d'estimer le module apparent. Ce module est utilisé pour supprimer la partie élastique de la déformation en utilisant l'hypothèse d'additivité des déformations.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (5)$$

On définit également une déformation expérimentale seuil en deçà de laquelle les données expérimentales sont écartées. Une interpolation polynomiale quadratique permet d'estimer la

contrainte seuil retenue. Les courbes sont ré-échantillonnées sur 100 points par branche par interpolation locale. Cette valeur est suffisante pour une bonne description des évolutions transitoires. Ceci permet de conditionner les essais identiquement afin de normaliser le poids donné à chacun d'eux dans l'identification qui va suivre.

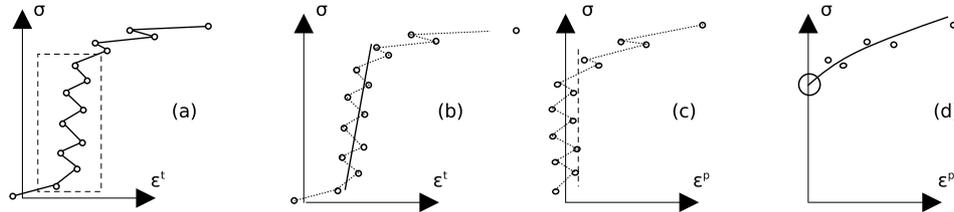


FIG. 5 – Principe du prétraitement réalisé sur les données expérimentales

Nous avons réalisé une optimisation séquentielle et itérative des paramètres caractéristiques de l'état initial du matériau ($F, G, H, N, X_{110}, X_{220}, X_{120}, R_0$) et de son écrouissage isotrope (p_0, b, R_{sat}) et cinématique (C, D). L'approche itérative est nécessaire puisque l'identification de la surface de charge se fait pour un écrouissage non nul (choix d'une limite conventionnelle). Pour cela, nous avons développé les expressions analytiques des relations entre les déformations mesurées au cours des essais et la déformation plastique équivalente d'une part, les paramètres d'anisotropie du matériau et la contrainte caractéristique de l'essai d'autre part. Nous avons utilisé pour l'optimisation l'algorithme de descente de LEVENBERG-MARQUART.

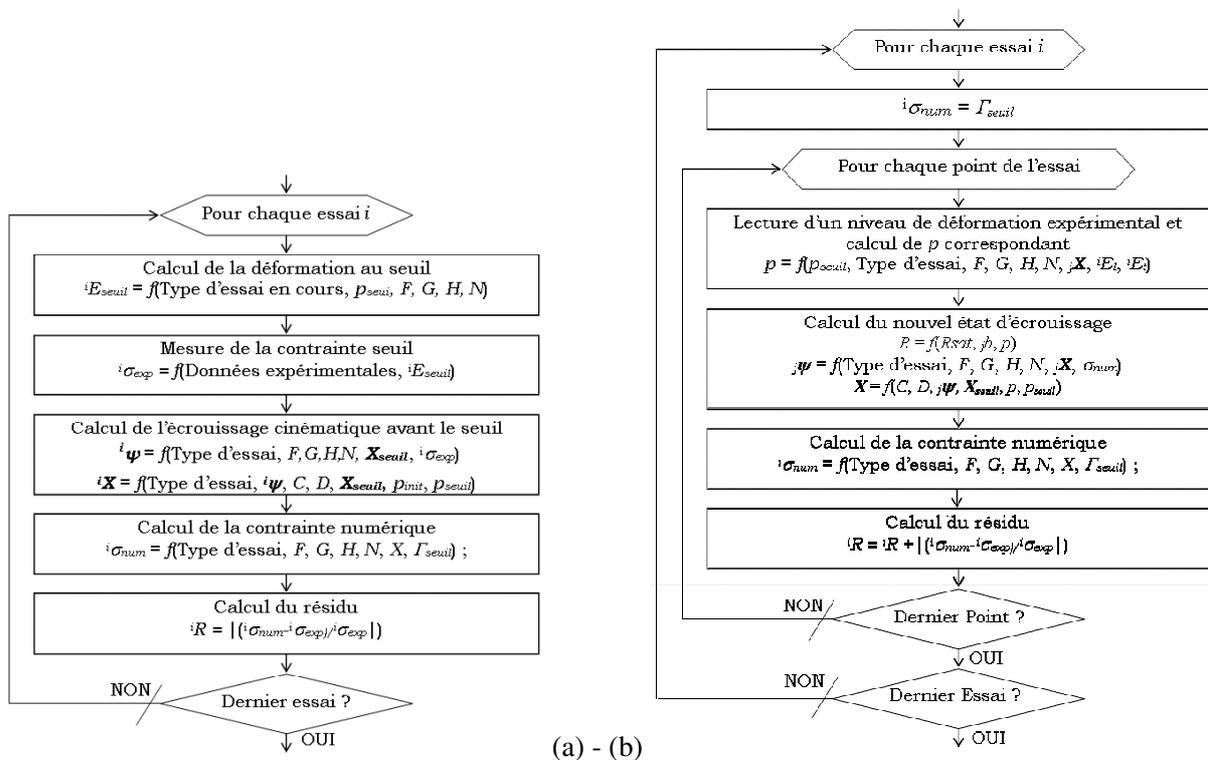


FIG. 6 – Optimisation des paramètres de l'état initial (a) et de l'écrouissage (b)

La comparaison d'essais de nature différente nécessite l'utilisation de la déformation plastique équivalente qui prend en compte dans son expression l'anisotropie du matériau (equ. 4).

La détermination des paramètres caractéristiques de l'état initial se fait pour une déformation plastique équivalente p_{seuil} de référence obtenue pour une déformation plastique imposée en traction simple sens long. Elle nécessite trois étapes :

- détermination de la déformation plastique correspondant à p_{seuil} ;
- calcul de l'écrouissage attendu entre l'état initial et la surface de charge à identifier ;
- confrontation des contraintes seuils numériques et expérimentales pour le calcul d'un résidu partiel.

Ces étapes sont répétées pour chaque essai.

L'identification des paramètres caractéristiques de l'écrouissage calcule pour chaque point expérimental de chaque essai une déformation plastique équivalente p et l'état d'écrouissage correspondant aux paramètres en cours du modèle. On peut alors calculer un résidu à partir de la contrainte expérimentale et de la contrainte numérique correspondante.

4 Conclusions

Cette étude synthétise les travaux réalisés sur l'identification du comportement élastoplastique de tôles destinées à l'emboutissage. La validation des essais sous sollicitation multiaxiale passe par la mesure locale des déformations sur la zone utile de l'éprouvette. La corrélation d'images bidimensionnelle constitue une méthode de mesure des champs cinématiques particulièrement adaptée à cette application.

Outre la qualification des essais sur la base du respect des conditions aux limites et de l'homogénéité des déformations, cette étude présente une méthode originale de recalage des paramètres du comportement basée sur l'analyse séquentielle du critère de charge et de la loi d'écroulement.

Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement le groupe RENAULT pour son soutien financier, logistique et matériel à cette étude.

Références

- Caro-Bretelle A.-S., Ienny P., Wienin J.-S. 2007 Utilisation d'une technique de mesure de champs dans un essai de traction large : application au comportement des tôles métalliques *18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble*
- Laraba-Abbes F., Ienny P., Piques R. 2003 A new 'tailor-made' methodology for mechanical behaviour analysis of rubber-like materials : I. Kinematics measurements using a digital pattern extensometry *Polymer* **44** 807-820
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. 1985 Mécanique des matériaux solides *ed. Dunod, Paris*
- Sinou J.-J., Macquaire B. 2003 Anisotropic behaviour law for sheets used in stamping : A comparative study of steel and aluminium *C. R. Mécanique* **331**