



**HAL**  
open science

# Modélisation du comportement élastoplastique d'un revêtement Fe-Zn par nanoindentation : approche inverse basée sur les plans d'expériences et les algorithmes génétiques multiobjectifs

Mohamed Nasser, Abdessalem Chamekh, Gildas Guillemot, Mustapha Nasri,  
Alain Iost

## ► To cite this version:

Mohamed Nasser, Abdessalem Chamekh, Gildas Guillemot, Mustapha Nasri, Alain Iost. Modélisation du comportement élastoplastique d'un revêtement Fe-Zn par nanoindentation : approche inverse basée sur les plans d'expériences et les algorithmes génétiques multiobjectifs. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422894

**HAL Id: hal-03422894**

**<https://hal.science/hal-03422894>**

Submitted on 9 Nov 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.

# Modélisation du comportement élastoplastique d'un revêtement Fe-Zn par nanoindentation : Approche inverse basée sur les plans d'expériences et les algorithmes génétiques multiobjectifs

Mohamed NASSER<sup>a,b</sup>, Abdesslem CHAMEKH<sup>c</sup>, Gildas GUILLEMOT<sup>a</sup>, Mustapha NASRI<sup>b</sup>, Alain IOST<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Mécanique de Lille, CNRS UMR 8107, ENSAM, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille cedex, France

<sup>b</sup> Unité de recherche en Mécanique Appliquée, Ingénierie et Industrialisation (MA2I), ENIT, BP 37 le BELVEDERE 1002 Tunis, Tunisie

<sup>c</sup> Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), ENIM, Avenue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie

Contact : [nasser@ensam.eu](mailto:nasser@ensam.eu)

## Résumé

*La prise en compte du comportement du revêtement des tôles galvanisées détermine leur intégration microstructurale et tribologique au substrat lors de la mise en forme en grande déformation. Ce travail porte sur l'identification des paramètres d'un modèle élastoplastique du comportement d'un revêtement Fe-Zn déposé sur un substrat en acier Dual-Phase DP600. La mesure de la dureté et du module d'Young en mode continue CSM (Continuous Stiffness Measurement) de nanoindentation assure le choix adéquat des niveaux de facteurs et des contraintes multiobjectifs garantissant l'unicité de la solution optimisée. La validation de cette approche inverse est établie via une simulation EF couplée à une évaluation statistique pour lequel l'écart Simulation/Expérience est valorisé par une erreur inférieure à 2%.*

## Abstract

*Taking into account the behavior of coating the galvanized sheets; determines their microstructural and tribological integration with the substrate at the time of working in great deformation. This work concerns the parameters identification of an elastoplastic model of the behavior of a coating Fe-Zn deposited on a substrate in steel Dual-Phase DP600. The measurement of the hardness and the Young modulus in mode CSM (Continuous Stiffness Measurement) of nanoindentation ensures the adequate choice of the levels of factors and the multiobjectives constraints guaranteeing a unique and optimized solution. The validation of this reverse approach is established via a simulation EF coupled to a statistic evaluation for which the Simulation/Experience variation is valorized by an error lower than 2%.*

**Mots clefs :** revêtement GA / nanoindentation / plan d'expériences / algorithmes génétiques / simulation EF.

## 1. Introduction

Les revêtements industriels Fe-Zn constituent une large gamme des semi-produits de galvanisation en continu de tôles minces destinées à l'industrie de la carrosserie automobile. Ce revêtement, typiquement d'une épaisseur de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ , résultant d'un traitement de post-galvanisation est constitué d'une phase « $\delta$ » et d'une fine couche « $\Gamma$ » à l'interface substrat/revêtement. La présence du fer qui améliore la soudabilité et la mise en peinture des tôles revêtues, fait partie des raisons pour les quelles ce procédé « Galvannealed » est mis en œuvre. Néanmoins, la fragilisation induite par la diffusion du fer dégrade, le plus souvent, l'adhérence du revêtement au substrat lors de la mise en forme. Ceci, impose la prise en compte du comportement du revêtement dans l'optimisation des processus de mise en forme.

Des approches inverses ont été proposées par Dao et al. [1] puis par Bucaille et al. [2] permettant d'extraire les propriétés élastoplastiques des matériaux indentés. Ces approches reposent sur une description géométrique du contact indenteur/revêtement notamment la profondeur d'indentation et le rayon de contact. Les modélisations, ont été établies dans certains travaux [3-7] pour le cas des matériaux homogènes ou des revêtements plus durs que le substrat (Cas de la nitruration par exemple) à des profondeurs d'indentation suffisamment élevées (supérieures à 1  $\mu\text{m}$ ). Ceci, n'est pas le cas pour des revêtements Fe-Zn déposés sur des aciers plus dur et à des profondeurs inférieurs à 1  $\mu\text{m}$  pour s'affranchir des effets de substrat. Panagopoulos et al [8-9] ont étudié l'influence de la concentration en Fe du revêtement Fe-Zn (électro-déposé sur un substrat en acier doux) sur les propriétés élastoplastiques. Ils ont montré que la dureté se multiplie par trois (et donc la limite d'écoulement  $S_y$ ) pour un teneur en Fe variant de 1.8% à 14%.

L'objectif de ce travail, est d'établir une méthode fiable de détermination des paramètres d'un modèle élastoplastique traduisant le comportement du revêtement Fe-Zn. L'approche est fondée sur le couplage expérience/simulation pour construire une stratégie d'identification par algorithmes génétiques multiobjectifs de modélisation du comportement afin de mieux maîtriser les procédés de mise en formes des tôles revêtues.

## 2. Méthodologie inverse

Le diagramme de la figure 1 décrit globalement l'approche inverse développée dans la présente étude. Celle-ci repose sur les algorithmes génétiques multiobjectifs établis sous Matlab en tirant profit de leur simplicité de mise en œuvre et de la possibilité d'imposer des contraintes pour la génération de la solution optimale, ce qui permettra de garantir une solution unique. Notons bien que les approches inverses utilisées dans la littérature scientifiques ont été abordées pour des matériaux métalliques ou des polymères [5-9]. La validation de ces travaux est effectuée par traction unidirectionnelle des matériaux testés, impliquant en conséquence une validation de l'approche inverse menée et non une réponse à un besoin d'une identification des modèles de comportement élastoplastique inaccessibles par traction classique comme le cas des revêtements industriels. Cette identification est avérée indispensable, pour mieux maîtriser et optimiser les processus de mise en forme des tôles revêtues.

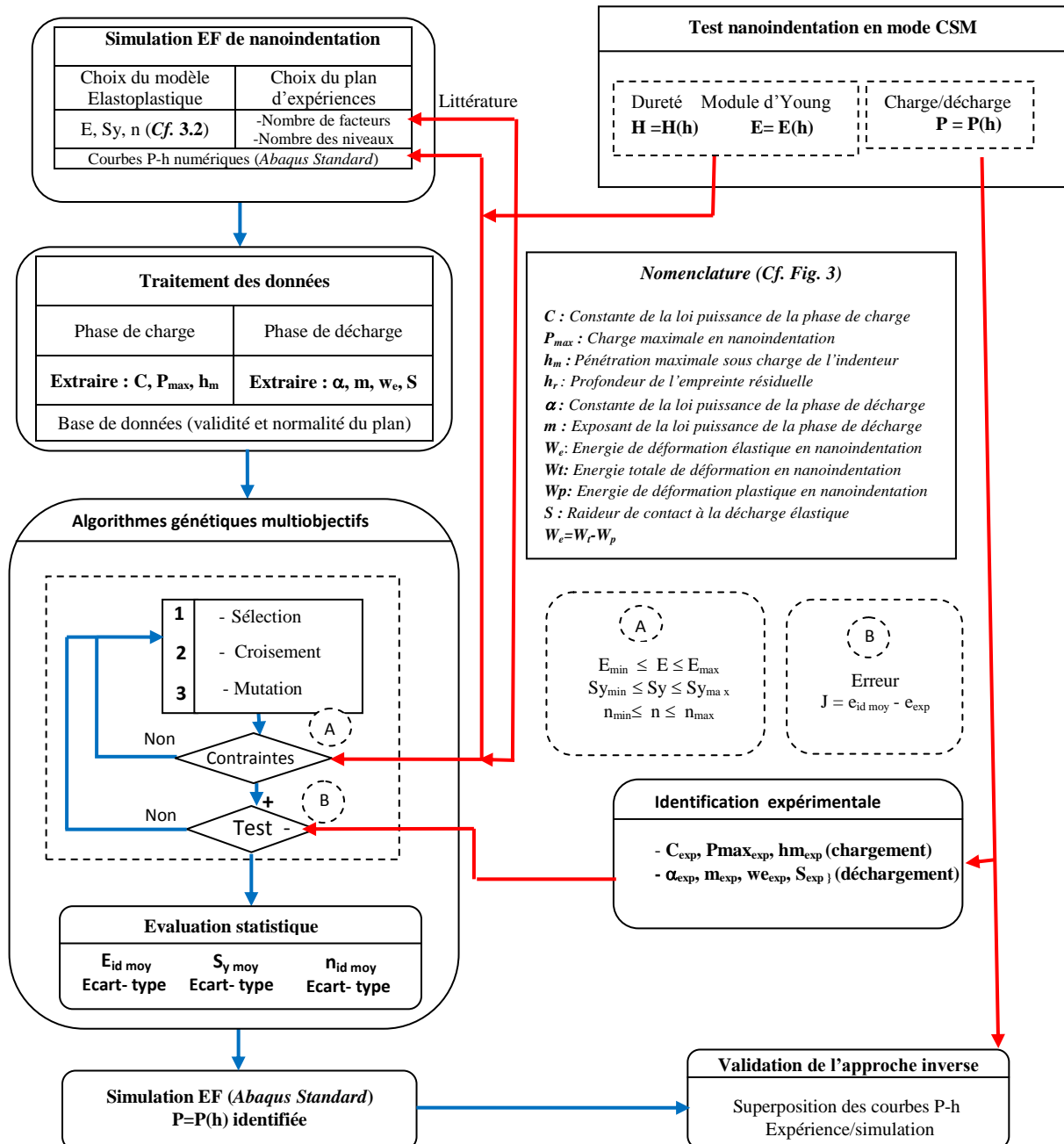


FIG. 1 – Synoptique de l'approche inverse adoptée pour la modélisation du comportement de revêtement

## 3. Résultats

### 3.1. Test de nanoindentation

L'échantillon issu d'une tôle en DP600 « galvannealed » fournie par le constructeur *AreclorMittal* est découpé et préparé par polissage mécanique selon le plan transverse à la direction de laminage. Les essais de nanoindentation ont été menés en mode continu à l'aide d'un appareil NanoIndenter XP<sup>®</sup>. L'avantage de ce mode (CSM), une fonctionnalité basée sur la rhéologie fréquentielle [3], est de rendre possible la mesure du contact indenteur/échantillon et donc la dureté (H) et le module d'Young (E) tout au long de la phase de pénétration.

Dix empreintes ont été réalisées sur chacune des deux constituants (couche Fe-Zn et substrat) ; ceux réalisés sur le substrat servant à valider l'approche inverse (puisque l'on dispose de sa courbe de traction) à établir pour déterminer le comportement du revêtement. La figure 2 représente l'évolution en fonction de la pénétration  $h$  de la dureté  $H$  (fig. 2.a) et du module d'Young  $E$  (fig. 2.b). Les valeurs moyennes associées sont de l'ordre de 0.86 GPa et de 70 GPa respectivement.

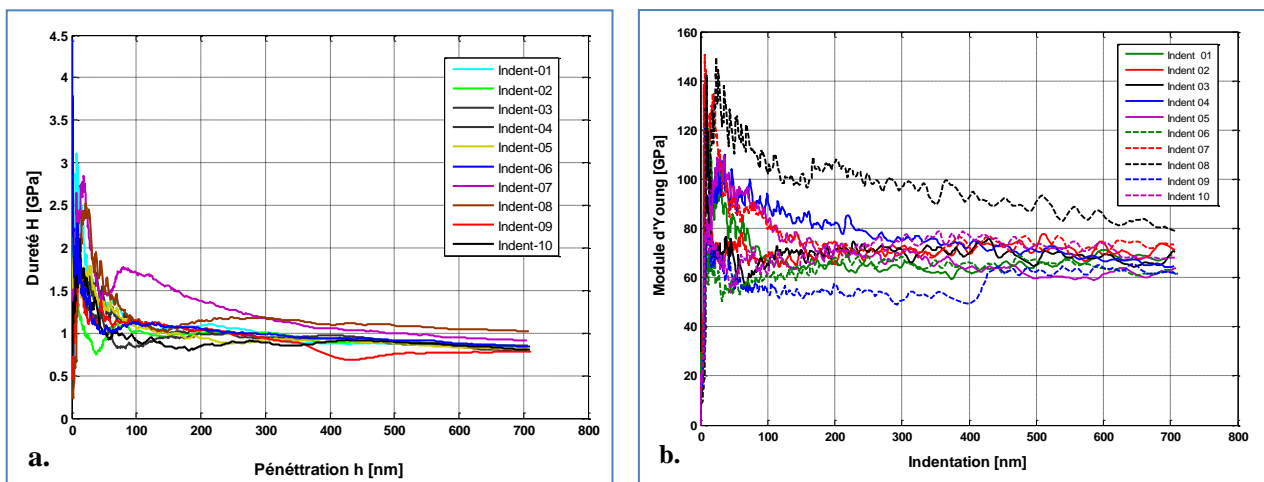


FIG. 2 – Test de nanoindentation instrumentée de revêtement Fe-Zn a. Evolution  $H=H(h)$  et b. Evolutions  $E=E(h)$ .

L'évolution moyenne en charge/décharge déduite des dix indentations est illustrée sur la figure 3 (fig. 3.a) qui présente un palier de maintien en effort en accord avec les acquis de la littérature scientifique pour des alliages de zinc, ce qui reflète que les 10 indentations n'ont pas subies l'influence du substrat dual-phases [10]. Les essais de nanoindentation ont été réalisés à charge maximale imposée. Cette dernière, est maintenue durant 10 s induisant, ainsi, le fluage de la matière sur environ 200nm (fig. 3.a).

### 3.2. Plan d'expériences et simulation numérique

Un plan d'expérience numérique est entretenu pour construire une base de données exploitable par les algorithmes génétiques multiobjectifs. Le modèle de comportement  $\sigma=\sigma(\epsilon)$  adopté nécessite d'identifier 3 facteurs : le module d'Young  $E$ , la limite d'écoulement  $S_y$  et le coefficient d'écrouissage  $n$ .

$$\sigma = S_y \left( 1 + \frac{E}{S_y} \left( \epsilon - \frac{S_y}{E} \right)^n \right) \quad (1)$$

Trois niveaux pour  $E$  (60, 70 et 80 GPa), trois pour  $n$  (0.01, 0.1 et 0.19) et cinq pour  $S_y$  (120, 180, 240, 300 et 360 MPa) ont été choisis par prise en compte des mesures en continu, lors de l'indentation, de module d'Young et de dureté en faisant l'hypothèse que l'écoulement plastique est le tiers de la dureté [1-3] et que les alliages de zinc sont peu écrouissables pour le choix de  $n$ . L'élargissement du domaine d'investigation de la limite d'écoulement est imputé à la dépendance de la dureté avec la teneur en fer du revêtement [8]. En conséquence, un plan complet de 45 simulations numériques a été réalisé sur un modèle axisymétrique CAE sous Abaqus Standard. Les dimensions du modèle ont été choisies de sorte qu'elles sont supérieures à 500 fois celles de l'indentation maximale, et le maillage est renforcé dans la zone indentée (de l'ordre de 84% des éléments triangulaire à 3 nœuds). L'indenteur est de type Berkovich supposé infiniment rigide, simulé par un cône équivalent à 70,3° (voir figure 6 plus loin). Le cône est tronqué d'un rayon de raccordement de 200 nm (défaut de 50 à 150 nm pour un indenteur parfait) pour se rapprocher au mieux de la configuration réelle de ce type d'indenteurs. Les réponses sélectionnées sont au nombre de 7 ( $C$ ,  $P_{max}$ ,  $h_m$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $S$  et  $We$ ) comme l'illustre la figure 3 à extraire de la courbes  $P=P(h)$  associée. Ces réponses permettent de reconstruire la courbe de nanoindentation résultante.

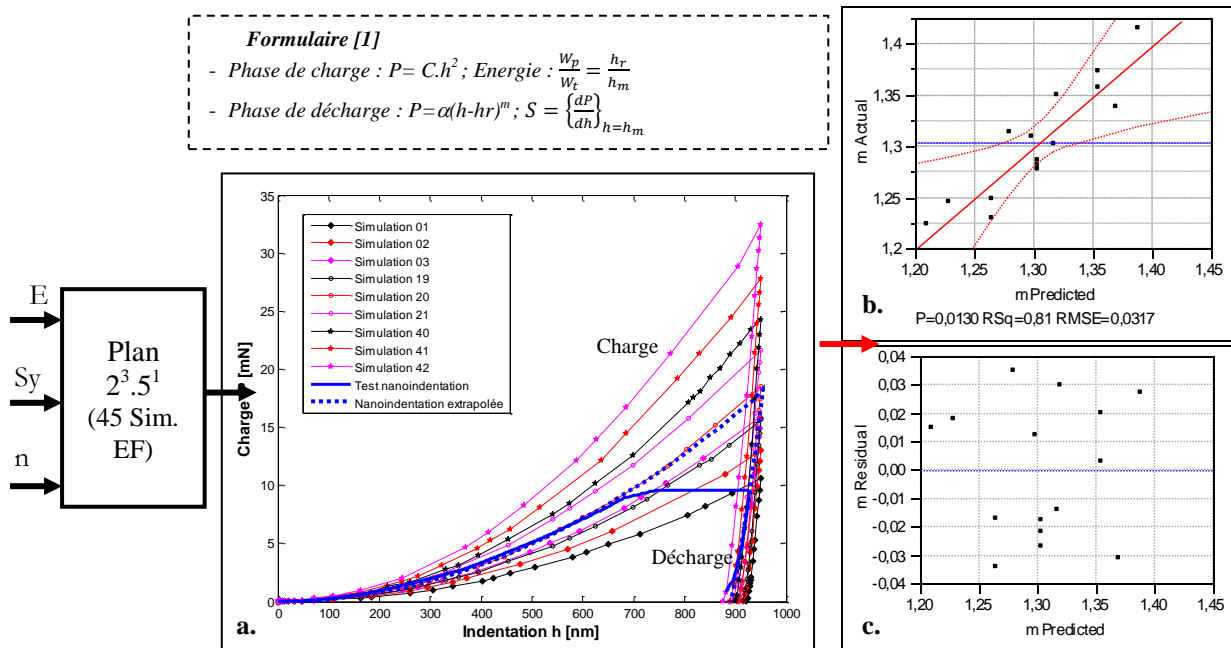


FIG. 3 – Concept plans d’expériences **a.** regroupement des courbes P-h d’un extrait des simulations EF et du test de nanoindentation, **b.** retrait (comparaison Calcul/mesure) **c.** résidu en fonction du rang d’essai

Pour évaluer la validité et la normalité du plan on extrait 15 essais parmi 45 pour construire un plan Box-Behnken, 3 facteurs à trois niveaux chacun, et nous considérons que les niveaux 120, 240 et 360 de  $S_y$  pour éliminer les répétitions qui faussent l’interprétation des résultats. On rappelle ici, que les 45 simulations (plan complet composite) permettent d’élargir le champ d’apprentissage de l’algorithme génétique. La figure 3 (3.b et 3.c) ne révèle pas d’évolution particulière des distributions de prédiction et de résidu de la réponse (**m**). Notons bien, que les autres réponses présentent aussi des distributions similaires (parfois meilleures) pour ces deux grandeurs de probabilité prédictive et de résidu. En conséquence, nous pouvons dire que les prélèvements des réponses à partir des courbes d’indentation  $P=P(h)$  ne présentent que des dispersions systématiques et sont donc valable pour établir une base de données fiable et déterministe.

### 3.3. Algorithmes génétiques multiobjectifs (AGmobj.)

En ce qui concerne le revêtement, nous le considérons comme monphasé (plus que 80% de l’épaisseur du revêtement est de la phase  $\delta$ ). Les résultats obtenus sont répertoriés sur la figure 5 par un histogramme et une distribution probabiliste pour l’identification ‘‘AGmobj’’ de la limite d’écoulement plastique  $S_y$  partant sur une solution initiale  $S_{y0}=204$  MPa et convergeant finalement sur une valeur moyenne  $S_{ymoy}=213$  MPa. Les mêmes constatations ont été relevées pour les deux autres facteurs **E** et **n**.

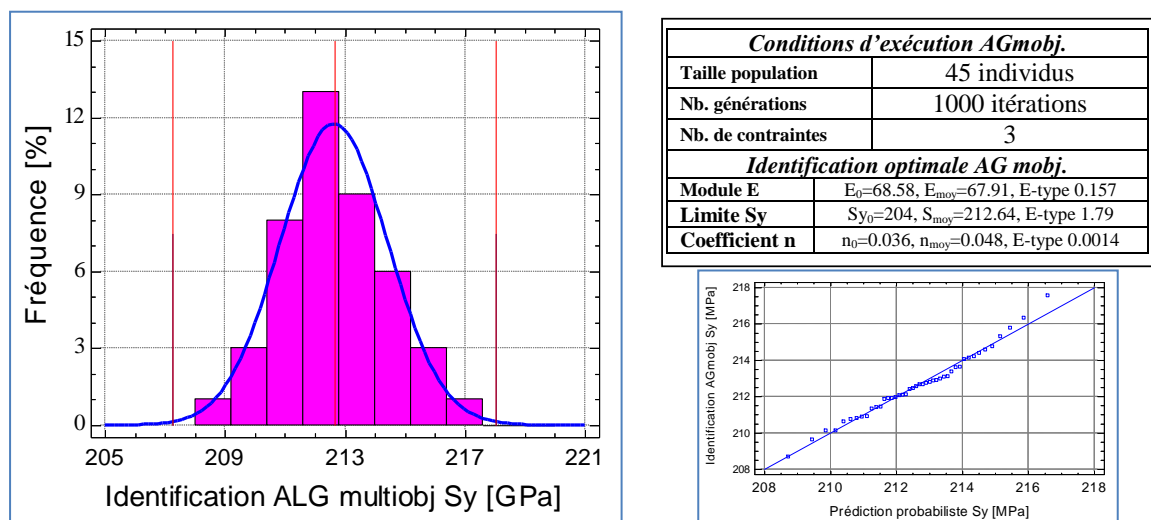


FIG. 4 – Évaluation statistiques des prédictions AGmobj pour le cas de revêtement Fe-Zn

Une fois les trois facteurs identifiés (tableau de figure 4), une simulation numérique est effectuée aux valeurs moyennes obtenues ( $E_{moy}=68$  MPa,  $S_{ymoy}=213$  MPa et  $n=0,048$ ) pour lesquelles les évolutions P-h reflètent un accord satisfaisant avec la courbe expérimentale extrapolée (erreur inférieure à 1,8%, fig. 5.a).

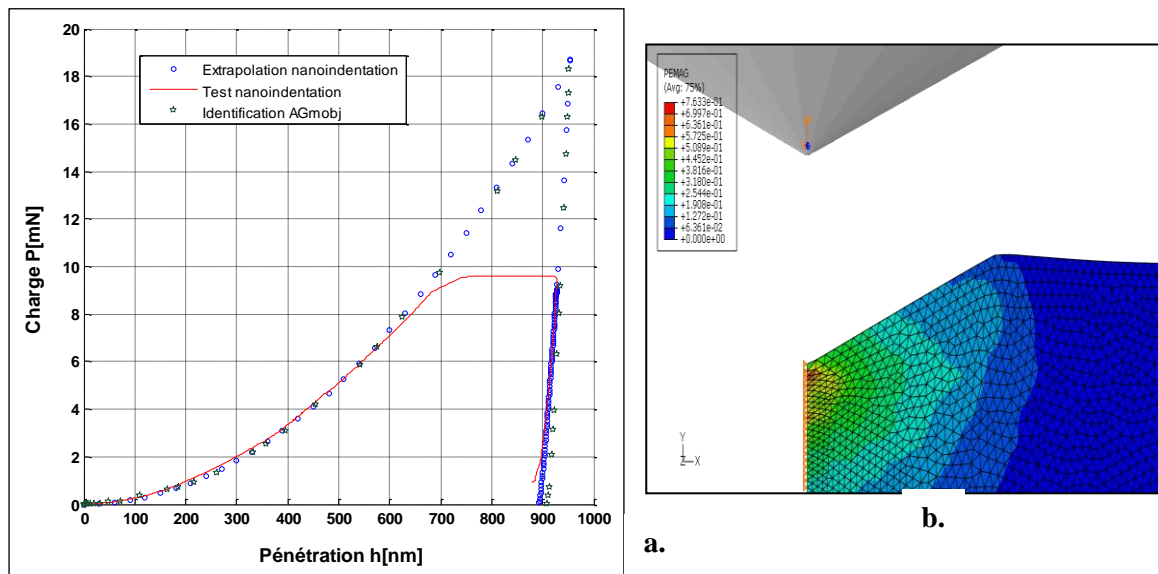


FIG. 5 – Identification par AGmobj. du revêtement Fe-Zn **a.** confrontation avec l'expérience **b.** les isovaleurs de l'amplitude de déformation plastique équivalente PEMAG (%)

Les isovaleurs en amplitude de déformation plastique équivalente révèlent une localisation sous la pointe de l'indenteur et décrivent le phénomène de pression de Hertz (concentration en sous couche), un axe d'investigation qui pourrait être développé dans la continuation de cette étude en vue d'extraire une modélisation fiable de la pression de contact sous indenteur et d'en évaluer son impact sur la mesure de la surface de contact et donc sur la dureté de revêtement.

#### 4. Discussion

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude révèlent un intérêt particulier qui réside dans la possibilité de remonter au comportement élastoplastique du revêtement Fe-Zn tout en tenant compte des mesures en mode CSM de la dureté et du module d'Young lors de la nanoindentation instrumentée. Ceci, permettra de s'affranchir de la difficulté d'avoir une solution unique d'une approche inverse surtout pour le cas des revêtements dont la loi de comportement n'est pas accessible par un essai de traction classique. La modélisation élastoplastique confirme les résultats de Panagopoulos [8-9] relatifs à la détermination des courbes de tractions des alliages Fe-Zn à différentes concentrations en fer. D'autre part, Lee et al. [7] ont montré que le revêtement Fe-Zn déposé sur un acier anisotrope est peu écrouissable ( $n=0,034$  contre 0,048 pour la présente étude) et possède des caractéristiques ( $K=1,5389$  GPa,  $S_y=1,32$  GPa) pour un revêtement plus dur et plus rigide ( $E=110$  GPa et  $H=2$  GPa que celui de cette étude  $E=70$  GPa et  $H=0,86$  GPa).

Dans le but d'expliquer la valeur identifiée par AG multiobjectifs de la limite d'écoulement ( $S_y=213$  MPa <  $H/3=280$  MPa) nous avons effectué des simulations EF pour différents coefficients du frottement ( $\mu=0$  ; 0,07 ; 0,14 et 0,3) pour l'interface échantillon/indenteur. La figure 6 montre que le frottement n'influe pas l'évolution sur la forme de la courbe P-h mais plutôt la formation de bourrelet au bord de l'empreinte résiduelle. Ce dernier varie de 75  $\mu$ m à 150  $\mu$ m de hauteur pour un coefficient de frottement allant de 0,3 à 0. La formation de bourrelet affecte la mesure de la surface de contact et donc la valeur obtenue pour la dureté [10]. De plus, les mesures en mode CSM de nanoindentation basée sur le modèle d'Olivier et Pharr [3-4] ne tient pas compte de la formation d'éventuelle de bourrelet autour de l'empreinte résiduelle et par conséquent ces mesures surestiment la dureté. Une étude approfondie est envisageable, à cette lumière, en vue de déterminer la grandeur réelle de dureté résultante via une caractérisation géométrique de bourrelet en se basant sur les travaux de Dao et al. [1] et Bucaille et al. [2] et cette approche inverse prenant en compte l'influence du frottement.

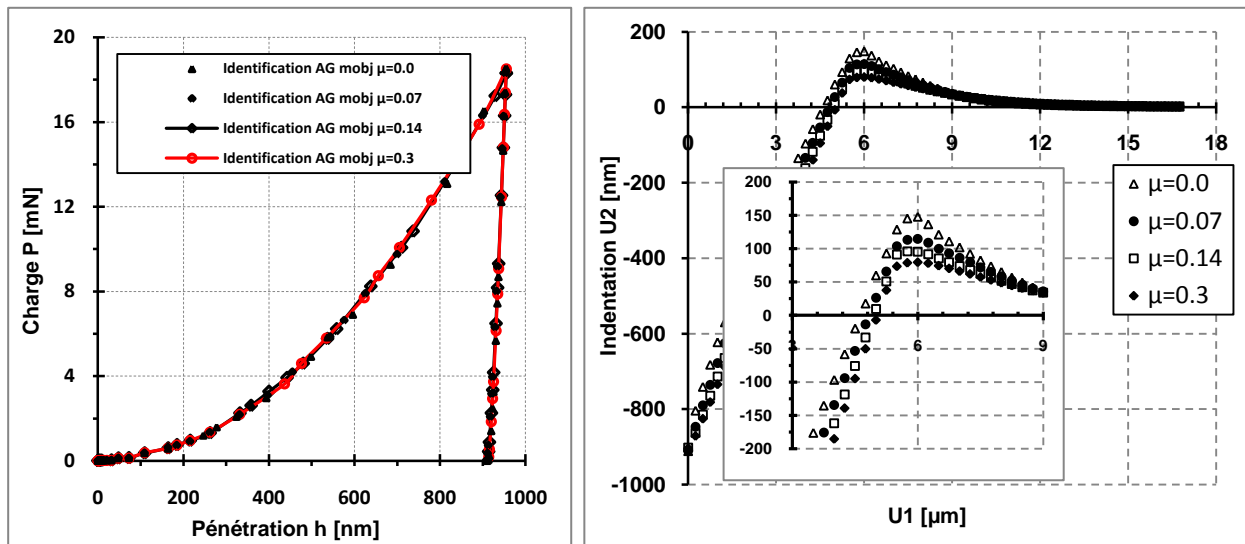


FIG. 6 – Influence du coefficient de frottement sur la formation de bourrelet aux bords de l’empreinte

## 5. Conclusion

L’étude a porté sur la mise en œuvre d’une méthode d’identification rapide des propriétés élastoplastiques de revêtement Fe-Zn. Les résultats ont abouti à l’identification des paramètres du modèle élastoplastique ( $E=68$  GPa,  $S_y=213$  MPa et  $n=0,048$ ) via une approche inverse basée sur les algorithmes génétiques multiobjectifs validée par des résultats obtenus en traction unidirectionnelle de substrat DP600.

## Références bibliographiques

- [1] Dao M, Chollacoop, N., Van Vliet K. J, T. Venkatesh A., Suresh S. “Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation”. *Acta Mater.* 49 (2001) 3899–918.
- [2] Bucaille JL, Stauss S., Felder E, Michler E.J. “Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters”. *Acta Mater* 51 (2003) 1663–78.
- [3] Oliver WC, Pharr GM. “An improved technique for determining hardness and elastic-modulus using load and displacement sensing indentation experiments”. *J. Mater Res.* 7 (1992)1564–83.
- [4] Oliver WC, Pharr GM. “Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology”. *J. Mater Res.* 19 (2004):–20.
- [5] Giannakopoulos AE, Suresh S. “Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation”. *Scripta Mater* 40 (1999);1191–8.
- [6] Lee J., Lee C. Kim B., “Reverse analysis of nanoindentation using different representative strains and residual indentation profiles *Materials and Design* 30 (2009) 3395–3404.
- [7] Lee J.M D.C. Ko, K.S. Lee, B.M Kim. “Identification of the bulk behavior of coatings by nanoindentation test and FE-analysis and its application to forming analysis of the coated steel sheet”. *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 (2007) 309–313
- [8] Panagopoulos C.N. “Mechanical behavior of Zn–Fe alloy coated mild steel”. *Materials and Design* 30 (2009) 4267–4272.
- [9] Panagopoulos CN, Pelegri AA. “Tensile properties of zinc coated aluminum”. *Surf Coat Technol.* 57 (1993) 203–6.
- [10] A. Iost, R. Bigot ‘Indentation Size Effect: Reality or Artefact ?’ *J. Mater. Sci.*, 31 (1996) 3573-3577