



**HAL**  
open science

# Caractérisation mécanique par indentation instrumentée des matériaux métalliques

Gérard Mauvoisin

► **To cite this version:**

Gérard Mauvoisin. Caractérisation mécanique par indentation instrumentée des matériaux métalliques. CNRIUT 2023 Saint Pierre - La Réunion, IUT de Saint Pierre, Jun 2023, Saint Pierre (La Réunion), La Réunion. hal-04326804

**HAL Id: hal-04326804**

**<https://hal.science/hal-04326804v1>**

Submitted on 6 Dec 2023

**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.

---

# Caractérisation mécanique par indentation instrumentée des matériaux métalliques

---

Gérard MAUVOISIN<sup>1</sup>

gerard.mauvoisin@univ-rennes1.fr

Olivier BARTIER<sup>1</sup>

olivier.bartier@univ-rennes1.fr

Xavier HERNOT<sup>1</sup>

xavier.hernot@univ-rennes1.fr

Mathieu FONTAINE<sup>2</sup>

Mathieu.Fontaine@insa-rennes.fr

Marion PARISE<sup>3</sup>

marion.parise@edf.fr

1: IUT, Université de Rennes, Lab. Génie Civil et Génie Mécanique, 3 Rue du Clos Courtel 35704 RENNES

2: INSA, Lab. Génie Civil et Génie Mécanique, 20 Av. des Buttes de Coesmes 35000 RENNES

3: EDF Hydro - DTG, 134 Rue de l'étang, 38950 SAINT MARTIN LE VINOUX

**Thèmes** — Mécanique-Matériaux

**Résumé** – *La modélisation du comportement des structures et des pièces mécaniques nécessite la connaissance de loi de comportement des matériaux constitutifs, obtenue de manière classique par des tests de traction, ou plus récemment par l'essai d'indentation instrumentée.*

*L'indentation instrumentée consiste à imposer l'enfoncement d'un indenteur dans le matériau testé et à mesurer l'évolution de l'effort appliqué,  $F$ , en fonction de l'enfoncement,  $h$ . Le test peut être réalisé aux échelles macro, micro et nanométrique. En macro indentation, l'exploitation de la courbe  $F(h)$  peut conduire à la connaissance du module d'élasticité, de la limite d'élasticité et de l'exposant d'érouissage, permettant ainsi le tracé de la loi d'érouissage de Hollomon du matériau.*

*Les algorithmes développés au LGCGM durant ces 10 dernières années pour l'identification des propriétés mécaniques, à partir de l'indentation instrumentée, ont permis de développer le logiciel CaMMatI (Caractérisation Mécanique de Matériaux par Indentation). Ce logiciel associé à un dispositif d'indentation de laboratoire ou un dispositif portatif (DIPo, sur batterie, brevet WO 2011/064517-A1) constitue un système expert qui peut être utilisé en laboratoire, en atelier de production ou même sur chantier.*

**Mots-Clés** – caractérisation mécanique, matériaux métalliques, indentation instrumentée.

## 1 Introduction

La caractérisation mécanique des matériaux a pour objectif de connaître le comportement mécanique des matériaux, qui est essentiel tout au long du cycle de vie des produits mais plus particulièrement au moment de la conception afin de réaliser le dimensionnement répondant aux critères de résistance pour des conditions d'utilisation données et également pour prévoir le comportement mécanique des matériaux durant la phase de mise en forme, quel qu'en soit le procédé.

Il existe différentes techniques de caractérisation mécanique mais l'essai de traction uniaxiale, normalisé, est le plus simple à interpréter et le plus répandu. En revanche, il nécessite la réalisation préalable d'éprouvettes normalisées qui demandent un certain volume de matériau initial qui n'est pas toujours disponible par exemple lorsque le matériau constitue des couches minces ou lorsque le matériau, ou son procédé d'élaboration, est assez coûteux comme dans le cas des techniques de fabrications additives.

Depuis plusieurs dizaines d'années, le test d'indentation instrumentée est utilisé à différentes échelles pour déterminer principalement la dureté et le module de Young de matériaux, mais il est également pressenti comme une potentielle alternative aux essais de traction pour déterminer la loi d'écroutissage des matériaux métalliques.

Dans ce travail nous présentons le principe du test d'indentation ainsi que la méthode d'interprétation des grandeurs mesurables que nous avons développée ainsi que quelques résultats obtenus.

## 2 L'indentation instrumentée

L'indentation instrumentée consiste à imposer l'enfoncement d'un indenteur de géométrie connue dans le matériau et à enregistrer, durant l'opération, l'évolution de l'effort et de l'enfoncement en fonction du temps (figure 1). Ceci nous permet de tracer la courbe d'indentation (figure 2) donnant l'évolution de l'effort  $F$  en fonction l'enfoncement  $h$ .

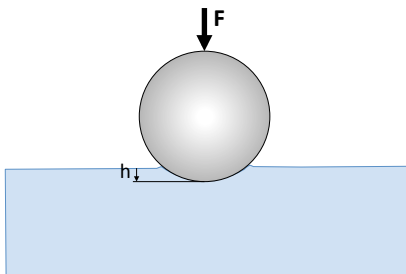


Figure 1: Principe de l'indentation sphérique

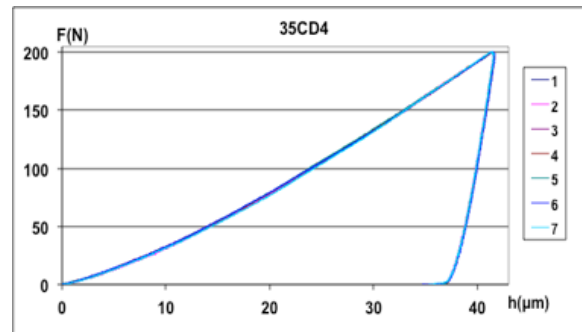


Figure 2: exemple de courbes d'indentation obtenues sur un acier 35CD4

L'indentation peut être pratiquée avec différentes géométries d'indenteur (sphériques, coniques, cube-corner, Berkovitch,...) et à différentes échelles (nano, micro et macroscopique).

L'exploitation de la courbe d'indentation peut conduire à l'évaluation de la dureté  $H$ , du module d'élasticité  $E$  et de paramètres de la loi d'écroutissage de certains matériaux.

Au LGCGM de Rennes nous travaillons notamment avec des indenteurs sphériques de rayon 0,25mm ou 0,5mm et à l'échelle macroscopique dans le but d'obtenir la loi d'écroutissage de matériaux métalliques.

## 3 Obtention d'une loi d'écroutissage

Différentes techniques d'analyse des courbes d'indentation sont proposées dans la littérature pour obtenir les paramètres  $\sigma_y$  (limite d'élasticité) et  $n$  (exposant d'écroutissage) de la loi de Hollomon qui interpole assez bien la loi d'écroutissage de la plupart des matériaux métalliques.

On peut citer les techniques inverses consistant à déterminer le jeu de paramètres mécaniques du matériau qui permet d'obtenir, à l'aide d'un modèle [1, 2] ou des simulations numériques par éléments finis [3], une courbe d'indentation similaire à celle obtenue expérimentalement. D'autres techniques consistent à reconstruire la courbe d'écroutissage point par point en déterminant une valeur de déformation représentative, et la contrainte représentative correspondante, pour plusieurs niveaux de chargement.

Nos travaux exploitent une base de données issue de nombreuses simulations par la méthode des éléments finis de l'indentation de matériaux métalliques avec un indenteur sphérique. Un calcul d'écart, au sens des moindres carrés, entre la courbe d'indentation expérimentale, obtenue à partir d'un essai d'indentation réalisé sur le matériau à caractériser, et chacune des courbes de la base de données conduit à une cartographie de l'écart [4], telle que celle représentée sur la figure 3.

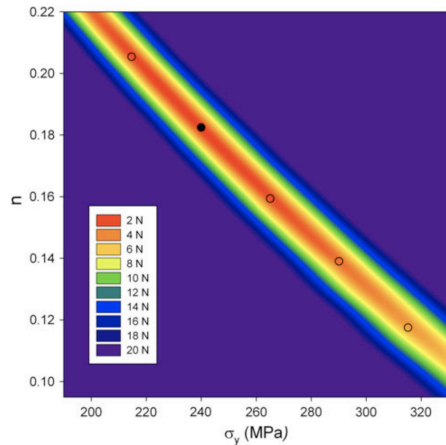


Figure 3: Cartographie de l'écart entre une courbe d'indentation expérimentale et chacune des courbes d'une base de données

La cartographie de l'écart présente une vallée dont le fond correspond aux couples de paramètres ( $\sigma_y$  et  $n$ ) donnant une courbe d'indentation très proches de la courbe expérimentale. Plus précisément, les jeux de paramètres ( $\sigma_y$  et  $n$ ) correspondant aux points situés sur le grand axe de la vallée correspondent à des loi d'érouissage qui se coupent toutes en un seul point dont l'abscisse constitue la déformation représentative moyenne [4]. La contrainte correspondante est ensuite obtenue à partir du modèle de Hollomon.

Plusieurs "points représentatifs" peuvent ainsi être obtenus en considérant différentes portions de la courbe expérimentale. L'interpolation de ces points représentatifs par une loi de Hollomon, conduit à une loi d'érouissage très proche de celle obtenue par un essai de traction.

#### 4 Logiciel CaMMatI

Sur la base de la technique d'exploitation des courbes d'indentation brièvement décrite ci-dessus, nous avons réalisé le logiciel CaMMatI, Caractérisation Mécanique des Matériaux par Indentation, (figure 4). Il permet d'enregistrer la courbe d'indentation au cours d'un essai d'indentation réalisé sur un matériau à caractériser et de déterminer le jeu de paramètres ( $\sigma_y$  et  $n$ ) de la loi de Hollomon le plus probable pour le matériau testé.

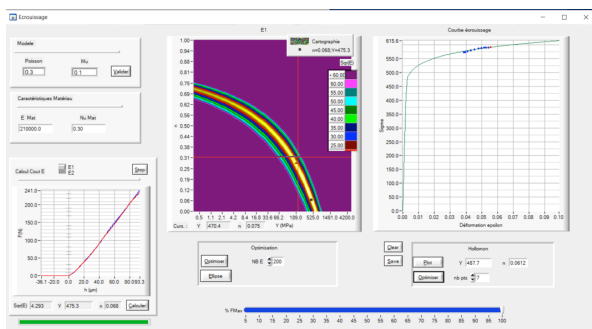


Figure 4: vue du logiciel CaMMatI

#### 5 Dispositif d'indentation portatif DIPo

Afin de pouvoir réaliser des tests d'indentation in-situ, c'est à dire directement sur les grosses structures sans la nécessité d'extraire des échantillons à tester en laboratoire, nous avons proposé le dispositif d'indentation portatif (DIPo) [5] dont quelques vues sont données sur la figure 5 ci-dessous.

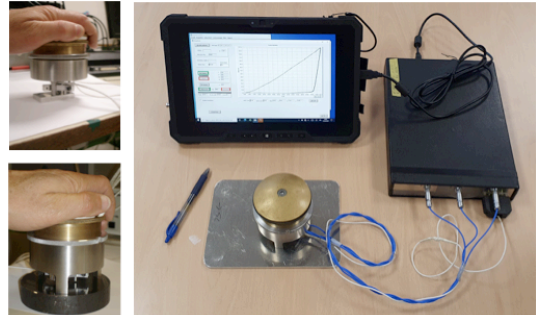


Figure 5: Dispositif portatif d'indentation

L'ensemble DIPo + CaMMatI a par exemple été utilisé avec succès pour la caractérisation mécanique de conduites forcées d'un barrage alimentant une unité de production hydroélectrique EDF.



Figure 6: Caractérisation par indentation de conduites forcées

#### 6 Conclusions

Le travail d'une équipe de l'IUT de Rennes a permis de développer un système expert, basé sur l'indentation instrumentée, pouvant être utilisé en laboratoire ou sur chantier pour la caractérisation mécanique de matériaux métalliques.

#### Références

[1]: A. Nayebi, R. El Abdi, O. Bartier and G. Mauvoisin, J. Mech. Mat. (MSA 15485), 34 4, pp. 243-254 (2002).  
 [2]: J.-M. Collin, G. Mauvoisin, O. Bartier, R. El Abdi, P. Pilvin. Mat. Sci. and Eng. - A . 501, pp.140–145, 2009.  
 [3]: J.-M. Collin, G. Mauvoisin, P. Pilvin. Materials and Design. 31 (2010) 636–640.  
 [4]: C. Moussa, X. Hernot, O. Bartier, G. Delattre, G. Mauvoisin. Journal of Materials Science, 49 (2), 592-603. (2013)  
 [5]: G. Mauvoisin. "Dispositif d'indentation instrumentée portatif". FR 2953291 (A1) /WO 2011/064517 (A1).