



HAL
open science

Evaluation non destructive de la performance mécanique du cuir

Minh-Phong Luong

► **To cite this version:**

Minh-Phong Luong. Evaluation non destructive de la performance mécanique du cuir. 4e colloque francophone: Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Nov 2003, Belfort, France. hal-02270304

HAL Id: hal-02270304

<https://hal.science/hal-02270304v1>

Submitted on 24 Aug 2019

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.

Evaluation non destructive de la performance mécanique du cuir

Minh Phong LUONG

Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, Ecole Polytechnique, Palaiseau

Résumé: Cette communication propose l'utilisation de la thermographie infrarouge pour évaluer la performance mécanique du cuir, appelée *limite d'endommagement acceptable LEA* du matériau cuir, facilement obtenue à partir des essais mécaniques couplés avec une scrutation infrarouge non contact, non destructive et en temps réel.

1. Introduction

Les problèmes de rupture des matériaux et des structures sont habituellement étudiés sous l'hypothèse simplificatrice de découplage entre les évolutions thermique et mécanique. Le champ de température y est considéré comme une donnée au même titre que les conditions de chargement et de liaison avec l'extérieur et n'intervient dans la réponse mécanique que par l'intermédiaire de la déformation thermique. Cette description mécanique n'est valable que si le couplage thermomécanique est faible. Lorsque le matériau est endommagé ou fissuré, il est localement fortement sollicité avec des concentrations de la déformation et de la contrainte. Le couplage thermomécanique ne peut plus être négligé [Nguyên 1982]. La détection, l'analyse des mécanismes de résistance et l'étude de la dissipation intrinsèque des matériaux et des structures, souvent sous contraintes triaxiales et soumises à des sollicitations diverses en relation avec leur mode d'utilisation, fournissent des bases physiques pour une validation des modèles mathématique ou numérique du problème.

Cette méthode d'auscultation est basée sur l'observation d'une cartographie thermique à la surface de l'objet testé. La quantité d'énergie émise par rayonnement infrarouge dépend des effets thermiques engendrés par le couplage thermomécanique, et développés sous charge.

2. Motivation d'une technique d'évaluation non destructive pour le matériau cuir

En 2002 la filière française du cuir comprend 548 entreprises dont les activités de négoce, de transformation, de fabrication s'articulent autour d'un matériau commun : le cuir. Avec 32.821 salariés elles ont réalisé un chiffre d'affaires de 3,43 milliards d'euros [CTC 2003]. En aval de la filière, 425 établissements produisent des biens de consommation : chaussures (1 626 M€), articles de maroquinerie (1 092 M€), gants (38 M€) pour une valeur totale de 2 756 millions d'euros.

Dans les équipements de sports et loisirs, le cuir est un matériau très présent. Il est utilisé dans la fabrication de chaussures de sport. En France, on en fabrique par an :

- 320 000 paires pour le tennis, basket, training, footing,
- 200 000 paires à pointes et à crampons,
- 930 000 paires pour la randonnée,
- 24 000 paires pour l'équitation,
- 180 000 paires pour la danse.

Il intervient également dans la fabrication des sacs de sport (28 000 en France), des gants de boxe, ballons de football et de rugby, etc.

Dans les pratiques sportives, ces matériels sont durement sollicités (chocs, frottement, abrasion). Avant la fabrication, les cuirs utilisés subissent des tests mécaniques :

- de résistance à la rupture, au pliage
- de résistance à la traction et à l'allongement à la rupture,
- de déformation rémanente,
- de résistance à l'arrachement au point de couture,
- de résistance à l'arrachement des points d'arrêt,
- de résistance à la flexion répétée,
- de résistance aux frottements,
- de résistance à l'abrasion.

Après fabrication, les articles de sport sont testés et doivent répondre à certaines normes. Par exemple, le laboratoire fédéral (EMPA de Saint-Gall) de la Fédération Internationale de Football et Associées (FIFA) soumet les ballons en cuir à sept tests pour obtenir la mention *FIFA Approved* concernant la mesure de la circonférence du ballon, de la sphéricité, du rebond, de l'étanchéité, du poids, de la perte de pression, de la déformation au bout de 2000 tirs.

Dans les tests pratiqués, on n'est pas en mesure de connaître l'endommagement en cours d'essai, avant la rupture. Le couplage de tels essais avec la thermographie infrarouge permet d'évaluer la dissipation d'énergie intrinsèque en fonction de la charge imposée, en n'importe quelle zone de l'échantillon au cours de l'essai. Il est ainsi possible d'identifier les zones de faiblesse du matériau, à quel endroit et à partir de quelle charge il commence à se dégrader et suivre l'évolution de l'endommagement.

Cette méthode apparaît très prometteuse dans la mesure où elle apporte une connaissance fine des phénomènes de dégradation dans le matériau cuir mais aussi dans les assemblages sous forme de coutures ou de collages. Les fabricants d'articles en cuir pourront en tirer de précieux renseignements pour évaluer la durabilité de leurs articles et réfléchir, à partir de données observées et quantifiées, à des modifications dans la conception de certains articles pour éviter des points de faiblesses trop importants, par exemple.

Le fait que la thermographie infrarouge soit une technique non destructive, légère et assez aisée d'emploi est d'un grand intérêt pour son application dans l'étude des matériaux sportifs en laboratoire et en situation de service.

3. Caractéristiques du cuir

Le cuir est un produit d'origine biologique. Ses propriétés mécaniques dépendent principalement de la composition et de la structure des peaux [Bérard & Gobillard 1951]. C'est un matériau très variable et hétérogène.

3.1 Composition de la peau

La peau est un matériau multi-couche, chaque couche ayant une structure bien définie :

1. L'*épiderme*, la couche de surface, est un matériau cellulaire protecteur de la peau. L'épiderme et la surface de poils sont enlevés lors du tannage.
2. La couche sous l'épiderme est une *couche fibreuse*. Elle est composée de très petits et nombreux paquets de fibres. Elle devient la couche supérieure du cuir fini.
3. En-dessous de la couche fibreuse, se trouve le *corium*.

Dans une peau de vache, à la culée, l'épaisseur de l'épiderme n'est que de 0,5 % de l'épaisseur totale : les deux parties du derme, fleur du derme ou couche thermostatique et couche réticulaire sont entre elles dans la proportion de 1 à 4.

3.2 Composition du cuir tanné

Le corium est composé de paquets de fibres de collagène et 1% de fibres d'élastine qui est la source de résistance du cuir et varie beaucoup en épaisseur d'une région à l'autre de l'animal. D'où vient la nature hétérogène du cuir.

Mécaniquement, les fibres de collagène sont résistantes dans la direction de l'axe des fibres et la déformation à la rupture est d'environ 2 % [Kanagy 1954]. Les fibres se trouvent dans une matrice de liants naturels. Ces agents liants sont enlevés lors du tannage pour créer une structure ouverte de fibres, qui se maintient ensemble grâce à l'enchevêtrement des fibres. A la dernière étape du tannage, les pores entre les fibres sont partiellement remplis avec des huiles et des graisses, ce qui détermine le comportement du cuir. Le remplissage partiel des zones entre des fibres adjacentes produit une structure de matrice poreuse.

Sous l'application d'une charge uni-axiale, ce type de structure permet aux fibres de tourner et glisser l'une sur l'autre. La résistance mesurée dépend directement du nombre de fibres intéressées et de leur mode de mise en place au cours du chargement [Mitton 1945]. Le comportement

rhéologique du matériau cuir se trouve ainsi très éloigné des schémas classiques [Lin & Hayhurst 1993].

4. Principe de détection de l'endommagement du cuir

L'équation thermomécanique couplée [Kratochvil & Dillon 1969] :

$$\rho C_v \theta_{,t} = \rho r + \text{div} (k \text{ grad}\theta) - (\beta : \mathbf{D} : E^e)_{,t} \theta + S : E^I_{,t} \quad (1)$$

où C_v désigne la chaleur spécifique à déformation constante, $\theta_{,t}$ la dérivée de la température par rapport au temps, k la conductivité thermique, β le tenseur des dilatations thermiques, \mathbf{D} le tenseur d'élasticité du 4^{ème} ordre et E^e la déformation élastique.

Les variations de température détectées, résultant de plusieurs phénomènes physiques tout à fait différents, doivent pouvoir être judicieusement discriminées par des conditions particulières d'expérimentation ou par des méthodes spécifiques de traitement d'images thermiques. Ceci constitue la principale difficulté rencontrée lors de l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Le dernier terme $S : E^I_{,t}$ exprime la *dissipation intrinsèque* générée par la plasticité du matériau. Cette dissipation de l'énergie interne a été reconnue par de nombreux auteurs. Le travail effectué par le système en déformation plastique a été identifié comme étant une contribution importante de la dissipation calorifique. En thermoélastoplasticité, on admet que tout le travail mécanique, produit par la déformation plastique, n'est pas complètement converti en chaleur. Une partie a servi à modifier la structure microscopique du matériau. Pour expliciter ces aspects dissipatifs, des variables d'état internes doivent être prises en compte pour décrire des changements structuraux de la matière. Le membre de droite de l'équation thermomécanique couplée doit être complété par des termes supplémentaires pour traduire les effets de couplage croisés [Duszek & Perzyna 91]. Ils sont généralement du 2^{ème} ordre, mais peuvent dans certains cas se révéler indispensables pour la détection et la compréhension des phénomènes thermomécaniques particuliers.

5. Thermographie infrarouge de l'endommagement mécanique du cuir

La thermographie infrarouge se révèle capable d'améliorer notre connaissance de l'endommagement des matériaux et des structures en fournissant un indicateur de l'état d'endommagement, par exemple pour détecter des zones de faiblesse mécanique dans les structures composites, étudiées en phase de conception ou sollicitées en service.

En réponse à ces préoccupations, diverses méthodologies d'analyse ont été proposées et développées ces dernières décennies. Les physiciens du solide cherchent à expliquer *pourquoi* le matériau s'endommage. Les mécaniciens tentent de démontrer *comment* le matériau se rompt. La thermographie infrarouge essaie de préciser *quand* et *où* le matériau se dégrade et perd sa résistance mécanique. En supposant que l'endommagement se manifeste par un phénomène irréversible appelé dissipation intrinsèque, la technique proposée a été utilisée pour quantifier ce scalaire, étudier le comportement dissipatif du matériau, et localiser la zone endommagée sur le système en scrutation.

5.1 Evaluation de l'endommagement du cuir

La Figure 1 montre une éprouvette de cuir amincie dans la partie centrale, spécialement préparée pour être soumise à un chargement de traction uniaxiale. La Figure 2 donne la courbe expérimentale de l'essai. En examinant les thermogrammes de l'éprouvette sous différents niveaux de traction, on peut suivre le comportement thermomécanique du cuir testé. La Figure 3 donne un thermogramme infrarouge du spécimen de cuir sous traction de rupture. On constate un échauffement très significatif de plusieurs degrés Celsius exactement à l'endroit où doit se produire la rupture. La localisation de la dissipation intrinsèque précédant la ruine du cuir est ainsi nettement mise en évidence. Les Figures 4 montrent la dissipation en effectuant des soustractions d'images thermiques entre deux niveaux de chargement. La Figure 5 décrit la localisation de la dissipation à la rupture. La Figure 6 définit de façon graphique la limite d'endommagement acceptable LEA du cuir testé.



Figure 1 :
Eprouvette de cuir

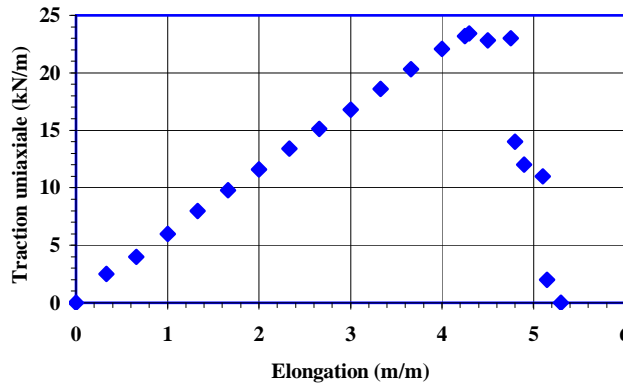


Figure 2 : Traction-élongation de l'éprouvette

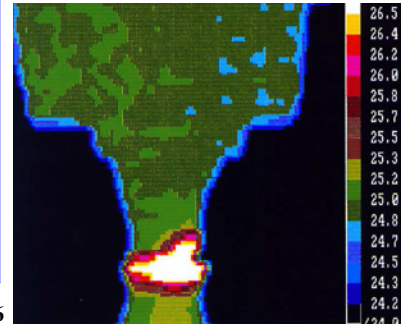
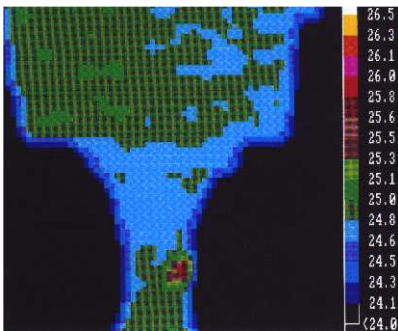
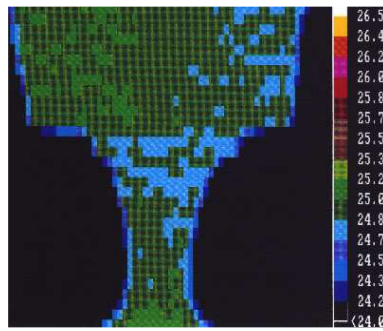


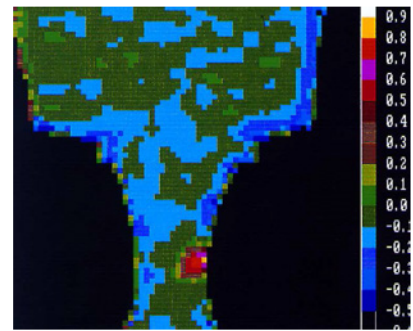
Figure 3 : Thermogramme de l'éprouvette de cuir à la rupture



Thermogramme 6b



- Thermogramme 6



= Dissipation entre les tractions 6b et 6

Figure 4 : La soustraction entre 2 images thermiques donne la dissipation du cuir entre 2 niveaux de chargement

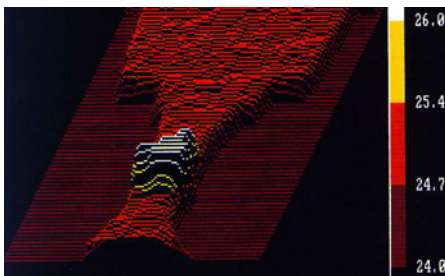


Figure 5 : Thermogramme infrarouge du spécimen de cuir sous traction uniaxiale à la rupture

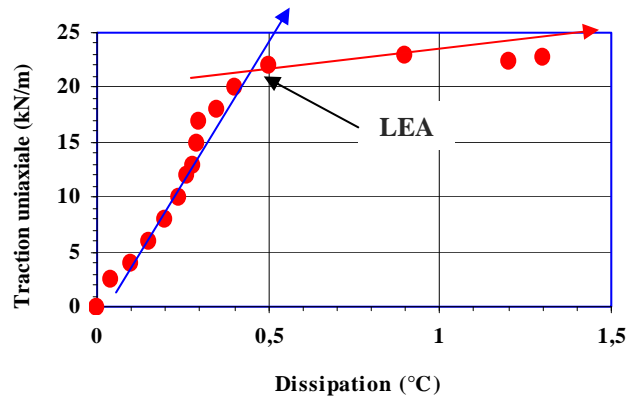


Figure 6 : Définition de la limite d'endommagement acceptable du cuir

5.2 Evaluation de l'endommagement d'un assemblage de cuir

La Figure 7 représente un échantillon d'assemblage "*croûte-pleine fleur*" de cuir par coutures. La Figure 8 décrit la courbe effort-allongement de cet assemblage de cuir sous traction. Elle offre relativement peu d'informations sur l'apparition de l'endommagement mécanique du matériau et de l'assemblage. Mais l'examen des thermogrammes aux différents niveaux A, B, etc. permettent d'apprécier l'évolution de la dissipation intrinsèque décrivant le mécanisme de ruine. La Figure 9 montre la localisation de l'énergie dissipée lors de la rupture.

La Figure 10 donne la dissipation obtenue par soustraction d'images thermiques entre deux niveaux de traction précédant la rupture.

La Figure 11 offre une autre représentation de l'échauffement dissipatif entre les niveaux de traction D-C appliqués à l'échantillon.

Bien avant sa rupture, une éprouvette (ou une structure) subit généralement des dommages progressifs qui influencent l'évolution du comportement dissipatif du matériau. Le couplage thermomécanique s'est révélé capable de traduire avec réalisme l'évolution du comportement à l'endommagement en relation directe avec la dissipation intrinsèque, paramètre énergétique aisément détectable par une caméra thermique infrarouge.

Les résultats obtenus donnent, à cette technique thermographique infrarouge un avantage décisif par rapport aux méthodes classiques.



Figure 7 : Assemblage croûte-pleine fleur

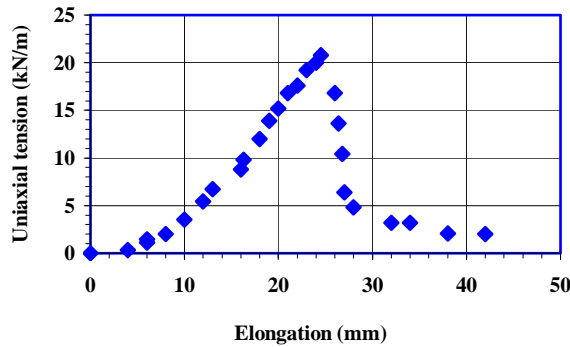


Figure 8 : Traction-élongation d'un spécimen d'assemblage

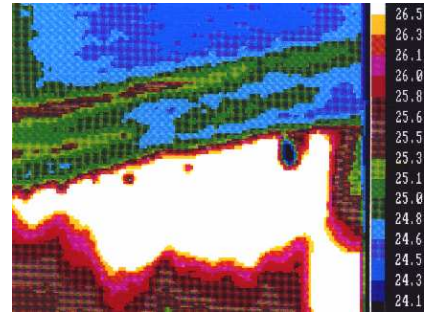
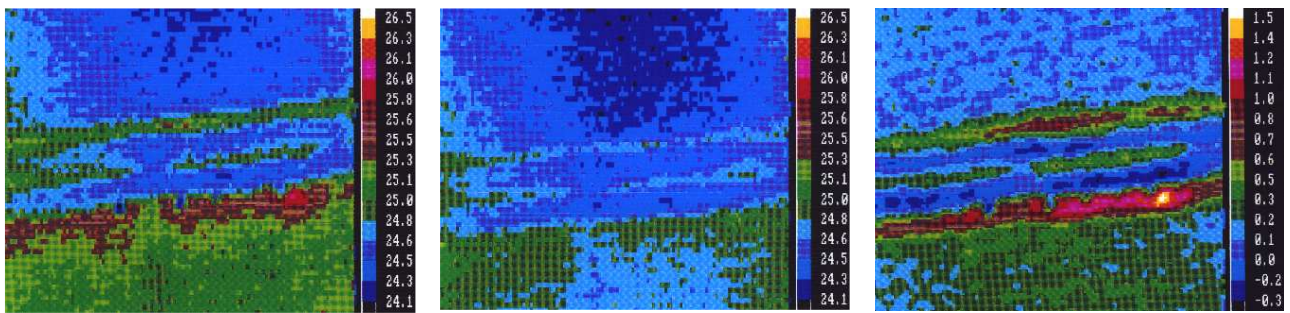


Figure 9 : Thermogramme de l'assemblage lors de la déchirure d'une ligne de couture



Thermogramme 5

- Thermogramme 4

= Dissipation entre 4 et 5

Figure 10 : Dissipation obtenue par soustraction d'images thermiques à deux niveaux de traction

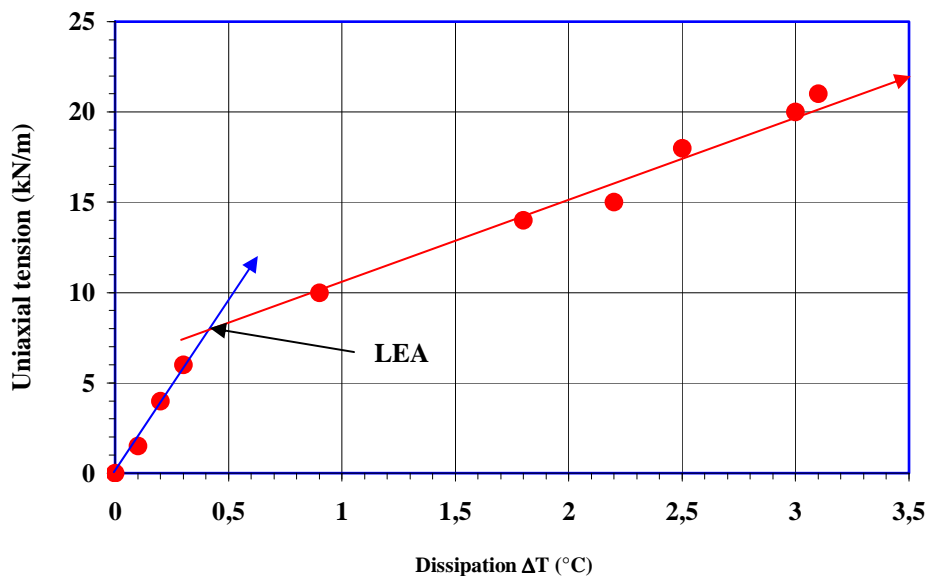


Figure 11 : Définition de la limite d'endommagement acceptable d'un assemblage de cuir

6. Conclusion

Grâce au couplage thermomécanique, la technique thermographique infrarouge permet d'étudier les phénomènes thermomécaniques qui interviennent dans le matériau cuir sous sollicitations de service. Une interprétation réaliste des phénomènes en jeu conduit à des applications novatrices extrêmement variées dans l'étude de la performance mécanique du matériau cuir et des assemblages en cuir.

La technique proposée est non destructive, sans contact et utilisable en temps réel. C'est un moyen commode et précis pour vérifier des hypothèses de calcul qui nécessitent un support physique. Elle s'est révélée très fiable, précise et capable de localiser la partie endommagée du corps d'épreuve étudié.

L'approche expérimentale proposée a permis :

- d'observer les processus dissipatifs de l'endommagement,
- de détecter l'apparition de la dissipation intrinsèque du matériau cuir sollicité.

Cette technique se révèle particulièrement prometteuse pour connaître la qualité et le comportement mécanique du cuir, soit qu'il s'agisse de chaussure, ganterie, maroquinerie ou de vêtements en cuir pour vérifier la conformité aux spécifications du cahier des charges, soit pour évaluer la durabilité mécanique des articles en cuir.

En outre, en recherche et développement des produits mécaniquement performants, il est indispensable d'avoir des informations sur la répartition des contraintes et sur les mécanismes d'endommagement et de ruine, afin d'optimiser rapidement leur confection et leur utilisation

Références

- [1] Nguyen Q.S. : *Mécanique de la Rupture*, FNB CISCO, 85-106 (1982).
- [2] CTC : *Les industries françaises du Cuir en 2002*, <http://www.ctc.fr>, (2003).
- [3] Bérard J. & Gobillard J. : *Cuir et peaux*, Presses Universitaires de France, Que sais-je? (1951).
- [5] Kanagy J.R. : *Significance of the results of some physical tests on upper leather*, J. Amer. Leather ' Chem. Assoc., 8, 112-148 (1954).
- [6] Mitton R.G. : *Mechanical properties of leather fibres*, J. Society of Leather Trades' Chemists, XXIX, 169-194 (1945).
- [7] Lin J. & Hayhurst D.R. : *Constitutive equations for multi-axial straining of leather under uni-axial stress*, Eur. J. Mech., A/Solids, 12, n°4, 471-492 (1993).
- [8] Kratochvil J. & Dillon O.W.Jr : *Thermodynamics of elastic-plastic materials as a theory with internal state variables*, J. Appl. Phys., 40, 3207-3218 (1969).
- [9] Duszek M.K. & Perzyna P. : *The localization of plastic deformation in thermoplastic solids*, Int. J. Solids & Structures, 27, 11, 1419-1443 (1991).