

# Identification expérimentale de lois cohésives à partir de techniques d'imagerie thermomécanique

S. WEN<sup>a,b,c</sup>, L. SABATIER<sup>b</sup>, Y. MONERIE<sup>a</sup>, B. WATTRISSE<sup>b,c</sup>

a. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN), CE Cadarache, bat. 702, BP3-13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex

b. Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université Montpellier 2, CC 408, Pl. E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

c. Laboratoire de Micromécanique et intégrité des Structures (MIST), IRSN-CNRS-UM2

## Résumé :

*On s'intéresse dans ce travail à la modélisation du comportement élasto-plastique endommageable d'un matériau ductile. L'endommagement est associé à un comportement cohésif de l'interface entre des éléments volumiques purement élasto-plastiques. On se propose ici d'utiliser les mesures cinématiques et thermiques issues des techniques d'imagerie pour mettre en place une procédure d'identification du comportement thermomécanique qui prend en compte la nature des différentes irréversibilités mises en jeu.*

## Abstract :

*This work is focused on the modeling of the elasto-plastic damageable behavior of ductile materials. The damage is associated with a cohesive behavior of the interface between the purely elasto-plastic solid elements. We propose here to use the kinematic and thermal measurements given by the imaging techniques to set up an identification procedure of the thermo-mechanical behavior accounting for the different irreversibility sources encountered.*

**Mots clefs :** zone cohésive, thermographie infrarouge, stéréo-corrélation d'image, comportement thermomécanique

## 1 Introduction

Les modèles de zone cohésive, introduits par les travaux de Dugdale [1] et de Barenblatt [2], sont des outils de modélisation largement répandus pour simuler numériquement les mécanismes de fissuration. Dans ce travail, on s'intéresse à l'identification expérimentale des modèles cohésifs qu'il faut associer à un comportement apparent élasto-plastique endommageable d'un matériau ductile. L'approche proposée consiste à scinder ce comportement apparent en une partie volumique purement durcissante (élasto-plastique) et une partie surfacique cohésive résumant les effets d'endommagement. L'enjeu est d'abord de caractériser expérimentalement ces réponses volumiques et cohésives puis d'assurer leur cohérence thermomécanique.

Pour atteindre ces objectifs, il convient d'accéder à des mesures locales cinématiques et thermiques, qui peuvent être obtenues par différentes techniques d'imagerie : les grandeurs cinématiques sont mesurées par la technique de stéréo-corrélation et les champs thermiques sont estimés par thermographie infrarouge. En couplant ces mesures cinématiques et thermiques dans un même repère et une même base de temps, les énergies mises en jeu sont déterminées.

L'identification de la loi cohésive sur le plan mécanique est effectuée en utilisant des mesures purement cinématiques. Cette loi cohésive est validée sur le plan thermomécanique en comparant les énergies associées aux modèles retenus à celles mesurées expérimentalement. Ce travail d'identification/validation est réalisé sur des éprouvettes simples où l'amorçage et la propagation des fissures ne sont pas arbitrairement pré-déterminés. La démarche proposée permet ainsi, sur un essai de traction, de caractériser la forme du modèle cohésif, ses paramètres matériaux et la longueur caractéristique associée.

## 2 Dispositifs expérimentaux

Comme indiqué, l'identification des modèles de zone cohésive nécessite non seulement l'obtention de mesures mécaniques, mais aussi celles de mesures thermiques. Un dispositif équipé d'une machine de traction, d'une caméra infrarouge et d'un système de stéréo-corrélation (quatre caméras visibles) est mis en place (FIG. 1).

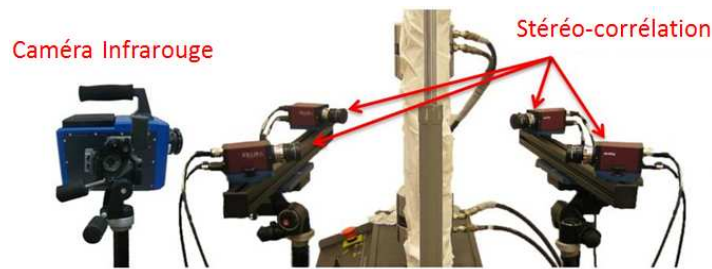


FIG. 1 – Dispositif expérimental

La machine est utilisée ici pour réaliser des essais de traction monotone. Pendant l'essai, les caméras visibles acquièrent des images de l'éprouvette avec une fréquence donnée. Ces images sont enregistrées sous la forme de niveaux de gris. Le rayonnement infrarouge est converti en signal électrique par le capteur InSb de la caméra infrarouge, puis numérisé avant d'être transféré sur un ordinateur d'acquisition. Le signal numérique est ainsi enregistré sous la forme de niveaux informatiques (NI).

La synchronisation de l'acquisition des images et des signaux analogiques issus de la machine d'essais est assurée par un dispositif électronique (SymchroCAM), développé au laboratoire. Ce dispositif permet de générer le signal d'acquisition spécifique à chaque caméra dans une base de temps commune à l'ensemble des caméras. Les fréquences d'acquisition des caméras peuvent être différentes, mais dans un rapport entier afin d'assurer l'existence d'instantanés d'acquisition communs. Les signaux analogiques fournis par les capteurs de la machine sont aussi numérisés à chaque prise d'image.

### 3 Traitements des images

Dans cette partie, les deux techniques d'imagerie sont présentées dans un premier temps : la stéréo-corrélation d'images numériques fournit des mesures cinématiques à partir des images visibles, et la thermographie infrarouge fournit les mesures thermiques à partir des images infrarouges. Ensuite, pour pouvoir comparer les champs cinématiques et les champs calorimétriques, on met en place le recalage temporel et le recalage spatial entre les images infrarouges et visibles.

#### 3.1 Traitement cinématique

Les champs cinématiques et notamment les champs de déplacement peuvent être mesurés par la corrélation d'images numériques qui se fait sur la base d'images en niveaux de gris fournies par les caméras visibles. La surface de l'éprouvette doit donc être recouverte d'un mouchetis aléatoire pour obtenir les contrastes nécessaires. Dans cette étude, pour obtenir la mesure cinématique 3D complète sur les deux faces de l'éprouvette, le dispositif de stéréo-corrélation mis en place inclut deux bancs d'acquisition. Chaque banc est composé de deux caméras visibles. Les quatre caméras acquièrent des images en même temps. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer de recalage temporel.

La mesure de déplacement 3D se base sur la mesure de forme 3D de la surface. Pour obtenir la géométrie 3D des pièces à partir des images 2D, il est nécessaire de faire l'étalonnage de chaque banc de stéréo-corrélation [3]. En minimisant un critère de corrélation et en utilisant cet étalonnage pour effectuer la triangulation, on calcule les coordonnées métriques 3D et les trois composantes du déplacement des points de la surface observée exprimés dans le repère du banc.

Dans notre cas, on utilise deux bancs de stéréo-corrélation. Chaque banc fournit ainsi des mesures dans son propre repère. Il est donc impératif de développer une méthodologie permettant de ramener les mesures des deux bancs dans un seul et même repère. La transformation permettant de recaler ces deux bancs est choisie comme étant la plus simple possible. Elle correspond à la combinaison de trois translations et de trois rotations indépendantes.

Une fois les champs de déplacement calculés, la déformation 3D et la vitesse de déformation 3D sont estimées en dérivant les champs de déplacement en espace et en temps. Pour calculer la déformation à partir

de champ de déplacement discret et bruité obtenu par la corrélation d'images numériques, on choisit une technique d'approximation locale des déplacements par des fonctions polynomiales. Le gradient de déplacement est ainsi associé à celui de la fonction d'approximation. Une méthode, basée sur une hypothèse de linéarité des champs de déplacements dans l'épaisseur, a été proposée pour déterminer les champs de déformation 3D moyens dans l'épaisseur à partir des mesures issues des deux bancs stéréoscopiques.

Il est nécessaire de remarquer que la mesure de déformation obtenue correspond à une valeur « moyenne » sur un voisinage du point de mesure. En conséquence, il existe une forte dépendance entre les mesures de déformation et la « longueur de jauge » qui représente la taille retenue pour ce voisinage. Plus cette longueur est petite, plus la déformation mesurée est « locale » mais l'effet du lissage est moins important et les mesures de déformation sont plus bruitées.

### 3.2 Traitement des données thermiques

Les champs de température sont estimés à partir des images fournies par la caméra infrarouge. On rappelle que ces images sont enregistrées sous la forme de niveaux informatiques. Un étalonnage est mis en place pour traduire ces cartes de niveaux informatiques en champs de température. Dans notre étude, cet étalonnage se base sur l'utilisation d'un corps noir étendu. Ce corps noir permet d'obtenir des champs de températures uniformes et constantes pour une surface d'émissivité uniforme et connue (environ 0.98).

La procédure d'étalonnage consiste d'abord à imposer plusieurs températures au corps noir. Ensuite pour chaque température imposée au corps noir, on prend une série d'images infrarouge de sa surface. Les images d'étalonnage doivent être prises dans les mêmes conditions d'acquisition que celles de l'essai. Ces images enregistrées permettent de tracer l'évolution du niveau informatique de chaque pixel en fonction de la température imposée au corps noir. Finalement, on relie l'évolution du niveau informatique à l'évolution de la température par une loi d'étalonnage polynômiale. Une fois que les paramètres de ces polynômes identifiés, on peut calculer la température pixel à pixel, en utilisant les images en « Niveaux Informatiques ».

### 3.3 Recalage des mesures cinématique et des mesures thermiques

Le dépouillement des mesures énergétiques nécessite de connaître aux mêmes instants et aux mêmes points les champs de température et les mesures cinématiques. Il est donc nécessaire de reporter ces mesures dans un même repère spatial pour des instants coïncidents. Ceci nécessite la mise en place de deux types de recalage : un recalage temporel et un recalage spatial entre les images infrarouges et visibles.

Le recalage temporel permet de trouver les différentes mesures (cinématique, thermique, force globale) au même instant. Ce recalage est effectué grâce au dispositif électronique « SynchroCam ». Ce dispositif génère une base de temps commune pour chaque caméra et produit les ordres d'acquisitions sur cette base (FIG.2).

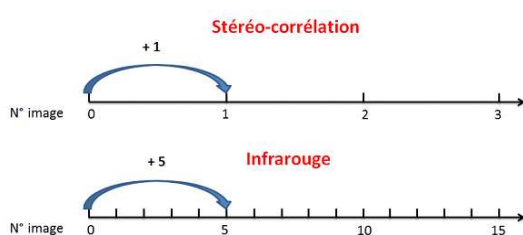


FIG.2 – Correspondances temporels entre les images

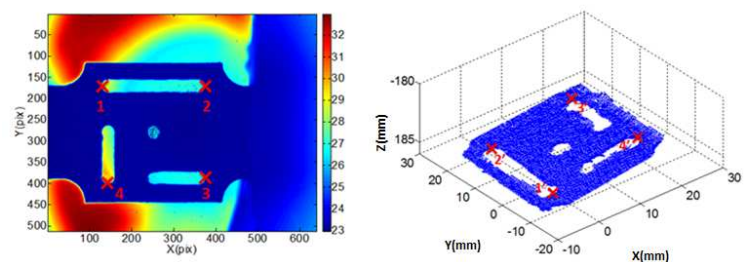


FIG. 3 – Correspondances spatiales entre les images (gauche : image infrarouge ; droite : image de la stéréo-corrélation)

Le but du recalage spatial est de ramener toutes les données dans le même repère afin d'obtenir des mesures couplées cinématiques et thermiques d'un même point matériel. Ce recalage spatial est réalisé en déterminant les paramètres de la transformation qui est prise sous une forme polynômiale permettant de rendre compte les translations, les rotations et les dilatations. A l'aide d'une mire de géométrie connue (FIG. 3), on repère quelques points coïncidents sur les images infrarouges et visibles de cette mire. A partir des coordonnées de ces points exprimés dans les repères des différentes caméras, on est capable de caractériser les paramètres de cette transformation.

## 4 Identification des modèles de zone cohésive

Dans cette section, on présente la procédure d'identification qui comporte deux étapes. La première consiste à caractériser la forme et les paramètres de la loi cohésive sur des essais de traction standard à partir d'une analyse des champs mécaniques locaux. La seconde étape consiste à vérifier la cohérence thermo-mécanique du modèle identifié en confrontant les mesures calorimétriques déduites des champs de température aux prévisions du modèle identifié.

### 4.1 Identification mécanique

On propose ici une méthode pour caractériser la partie normale de la loi cohésive associée à un métal ductile. Le chargement  $F$  est supposé monotone. L'analyse qui suit est basée sur une approche unidimensionnelle associée à la direction de sollicitation imposée. L'enjeu est d'identifier la réponse volumique et la réponse surfacique à partir de la réponse mécanique expérimentale. On s'attend à obtenir une réponse volumique durcissante (associée à un comportement élasto-plastique), et une réponse surfacique adoucissante (liée au développement de l'endommagement).

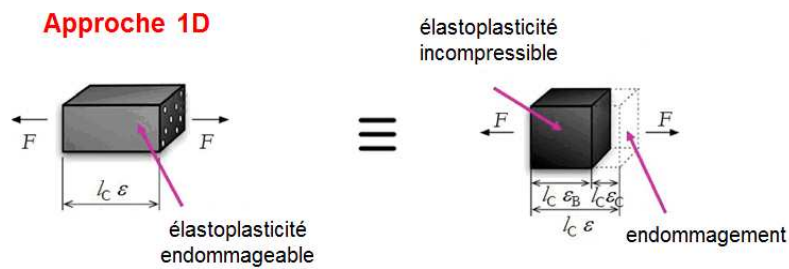


FIG. 4 – Schéma de la partition de déformation

L'identification de la réponse cohésive est réalisée par une partition des déformations (FIG. 4) : on détermine la partie volumique  $\varepsilon_B$  et la partie surfacique  $\varepsilon_C$  à partir de la déformation totale mesurée  $\varepsilon$ . L'approche proposée se déroule en trois temps [4] :

1. Identification de la fonction d'écrouissage : sous certaines hypothèses, on peut estimer une variable d'endommagement  $D$  à partir des champs de déformation et puis calculer la contrainte effective  $\sigma_{eff}$  en prenant en compte l'endommagement. L'écrouissage est ensuite caractérisé sur la réponse effective  $\sigma_{eff} - \varepsilon$ .
2. Caractérisation du comportement volumique à partir de la fonction d'écrouissage : on définit une contrainte virtuelle équivalente  $\sigma_{inc}$  qui est associée à la contribution volumique (contribution incompressible). Ensuite, en supposant que l'écrouissage du matériau  $\sigma_{eff} - \varepsilon$  est le même que celui de la partie volumique  $\sigma_{inc} - \varepsilon_B$ , on peut en déduire la déformation volumique  $\varepsilon_B$ .
3. Identification de la déformation surfacique  $\varepsilon_C$  comme étant la différence de la déformation totale  $\varepsilon$  et de la déformation volumique  $\varepsilon_B$ .

On présente ici les résultats obtenus sur un essai de traction uniaxiale sur l'acier DP600. On montre les trois réponses mécaniques identifiées au centre de la zone de localisation (FIG. 5) : il apparaît clairement que la partie volumique possède un comportement durcissant et la zone cohésive un comportement adoucissant. Ces résultats correspondent bien à ceux attendus.

Les méthodes d'identification développées donnent accès à une réponse surfacique construite comme une relation entre la contrainte et la déformation cohésive. Pour être transformée en un modèle de zone cohésive, on doit exprimer une « contrainte » en fonction d'un « saut » de déplacement. Il est donc nécessaire de traduire la déformation cohésive en un « saut » de déplacement en identifiant une longueur caractéristique. L'identification de cette longueur caractéristique constitue un problème délicat résolu par une méthode inverse basée sur un couplage entre résultats expérimentaux et simulations numériques [4] : les résultats de cette méthode montrent que la longueur caractéristique est égale à la « longueur de jauge » introduite dans la mesure de déformation. Le modèle de zone cohésive peut donc être identifié à partir de la réponse surfacique

caractérisée et de la « longueur de jauge » introduite (FIG. 6).

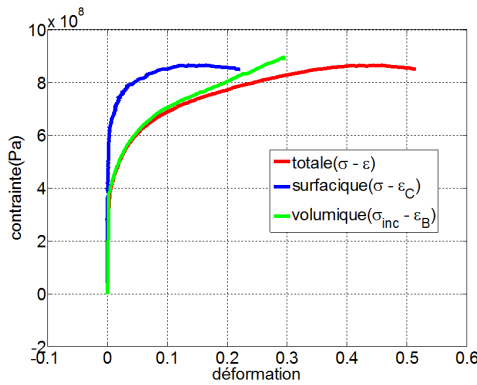


FIG. 5 – Réponses mécaniques au lieu de la fissure

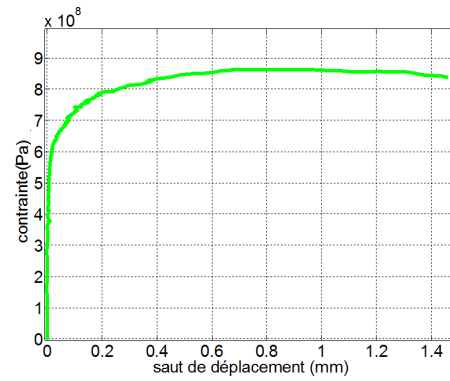


FIG. 6 – Réponse cohésive à longueur de jauge imposée (5.7 mm)

## 4.2 Analyse énergétique

Dans cette partie, on propose des outils et une méthodologie permettant de vérifier la validité thermomécanique du modèle identifié sur le plan mécanique. Cette étape de validation nécessite l'accès à des mesures couplées mécaniques et thermiques pour construire le bilan d'énergie expérimental associé à la réponse du matériau dans la zone de localisation. Ce bilan permet d'accéder à des mesures énergétiques locales : la source de chaleur, le couplage thermo-élastique et la dissipation intrinsèque. Si l'on considère que le comportement cohésif est purement dissipatif, on peut scinder la dissipation mesurée en une partie associée à la réponse cohésive et une autre partie associée à la réponse volumique.

Cette cohérence thermodynamique est vérifiée en comparant la dissipation volumique estimée expérimentalement avec celle associée au modèle de comportement volumique. Pour calculer l'énergie stockée et la dissipation associées à la réponse volumique identifiée, il est nécessaire de caractériser le comportement thermomécanique de ce modèle. Pour simplifier, on se place dans un cadre unidirectionnel (faible niveau de rotation matérielle durant l'essai) et on propose de rendre compte du comportement par un modèle rhéologique présenté sur la FIG. 7. Ce modèle comprend trois composantes : une élasticité décrite par un ressort de module d'Young  $E$  ; des composants plastiques représentés par des ressorts de raideur  $K_i$  et des patins possédant de seuil  $\sigma_i$  placés en parallèle ; une composante cohésive  $ZC$ .

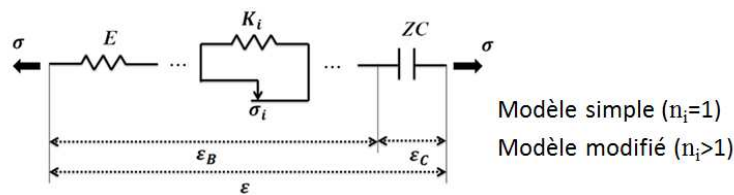


FIG. 7 – Modèles rhéologiques proposés

Dans un premier temps, on choisit un modèle simple ( $n_i = 1$ ). Dans ce cas, tous les paramètres de ce modèle rhéologique sont identifiés en prenant la réponse mécanique. Ce choix permet d'assurer, par construction, la cohérence mécanique entre ce « modèle » et la mesure. La réponse volumique de ce modèle est donc superposée à celle de la mesure  $\sigma_{inc}^{mes} - \varepsilon_{inc}^{mes}$ .

On applique cette méthodologie sur l'essai précédent. La FIG. 9 donne l'évolution durant la sollicitation de l'énergie dissipée. On constate que la dissipation volumique mesurée et celle du modèle simple sont bien superposées au début d'essai, mais qu'elles commencent à diverger assez rapidement : le modèle simple proposé sous-estime la dissipation obtenue expérimentalement. Ce résultat montre clairement qu'un modèle qui serait parfaitement satisfaisant du point de vue de la réponse mécanique peut avoir une signature énergétique très éloignée de l'expérience.

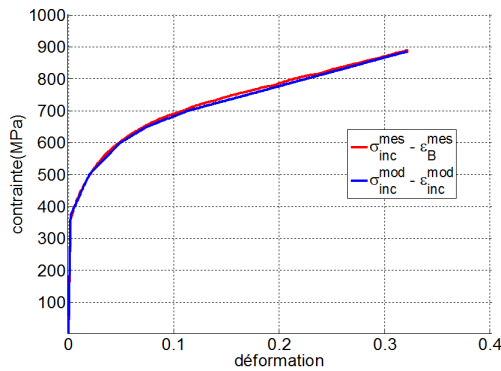


FIG. 8 – Réponse mécanique mesurée et du modèle modifié ( $n_i = 5$ )

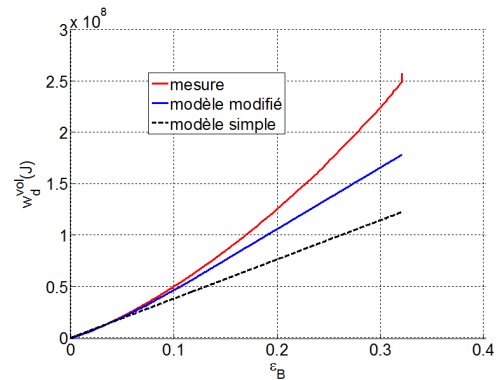


FIG. 9 – Comparaison de la dissipation volumique mesurée et celle du modèles proposés

Naturellement, il est possible de proposer d'autres modélisations qui permettent de mieux rendre compte des énergies mises en jeu. On utilise maintenant un modèle modifié qui décrit la plasticité par plusieurs éléments rhéologiques en série possédant des seuils et des modules d'écrouissage différents (ici  $n_i = 5$ ). Il apparaît clairement que ce modèle permet bien de retrouver sensiblement l'allure de la réponse mécanique (FIG. 8). Par contre, il permet de nettement améliorer la prévision des énergies mises en jeu par rapport au modèle précédent. En effet, la FIG. 9 montre que la dissipation volumique calculée par ce modèle modifié qui décrit la plasticité est beaucoup plus proche de la valeur mesurée que celle issue du modèle simple.

On a montré que l'on peut avoir plusieurs modèles identiques sur le plan mécanique, mais très différents sur le plan thermomécanique. L'enjeu est évidemment de trouver la forme la mieux adaptée au regard des observations expérimentales ainsi que le jeu de paramètres associé. Par contre, le but de cette étude n'est pas de proposer un modèle « optimal » vis-à-vis des observations énergétiques, mais plutôt d'illustrer l'influence du choix du modèle de comportement volumique sur sa cohérence thermo-mécanique. La complexité de la chaîne d'acquisition utilisée ici rend leur détermination délicate, il est donc important de valider de façon complète l'outil expérimental avant de pousser au-delà l'analyse thermo-mécanique sur ce type de matériaux.

## 5 Conclusion

Dans ce travail, on a proposé une procédure d'identification de lois cohésives qui s'est appuyée sur les deux étapes suivantes : la première consiste à identifier par imagerie mécanique en stéréo-corrélation un modèle cohésif permettant de résumer sur une « surface » tous les effets d'endommagement. Une attention particulière est portée sur la caractérisation de la longueur caractéristique associée aux modèles cohésifs. Cette longueur caractéristique peut être déterminée au travers d'une approche mêlant simulation numérique et expérimentation. La seconde étape consiste à valider la cohérence thermodynamique du modèle cohésif identifié à l'aide des bilans énergétiques établis par thermographie infrarouge. Nous avons montré, à l'aide de modèles rhéologiques très simples, que des modèles différents peuvent donner des réponses mécaniques similaires mais avoir des réponses complètement différentes sur le plan énergétique. L'enjeu est ainsi de proposer la forme et les paramètres du modèle volumique qui permette de s'adapter au mieux à l'intégralité des observations expérimentales.

## References

- [1] Dugdale D.S., Yielding of steel sheets containing slits, J. of the Mech. and Ph. of Sol, 8, 100-104, 1960
- [2] Barenblatt G.I., The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, Adv Appl Mech, 7, 55-129, 1962
- [3] Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W., Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Hardcover, 2009.
- [4] Wen S., Identification expérimentale de modèles de zones cohésives à partir de techniques d'imagerie thermomécanique, thèse, Université Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, 2012.