

ETUDE DES MECANISMES DE RUPTURE D'UN ASSEMBLAGE BOULONNE

T. DANG HOANG, C. HERBELOT, A. IMAD

Université des Sciences et Technologies de Lille/Polytech'Lille, Laboratoire de Mécanique de Lille, CNRS UMR 8107, Cité Scientifique, Avenue Paul Langevin, 59653 Villeneuve d'Ascq, France.

Résumé :

Cette étude expérimentale et numérique traite de l'analyse du comportement et de la rupture d'un assemblage ponctuel boulonné soumis à un chargement statique de cisaillement en simple recouvrement.

Le nombre important et la diversité des paramètres liés au dimensionnement de la liaison à été réduit pour ne faire varier que la tension dans le boulon. La technique de l'émission acoustique couplée à la mesure de champs de déformations par corrélation d'images a été utilisée afin d'alimenter une banque de donnée qui permet de prédire la chronologie des différents mécanismes d'endommagement. Les résultats de ces travaux expérimentaux alimentent une étude numérique. Les principales conclusions sont mises à jour et des perspectives proposées.

Abstract :

This experimental and numerical study deals with the analysis of the behavior and the failure of a bolted assembly under a static load in simple shear recovery. The large number and diversity of the design parameters of the link has been reduced to vary the number and tension in the bolt. The technique of acoustic emission coupled to the measurement of deformation fields by image correlation was used to populate a database which can predict the timing of the different mechanisms of damage. The results of these experiments support a numerical study. The main findings are updated and perspectives offered.

Mots clefs : assemblage boulonné, expérimental, simulation numérique, corrélation d'images, émission acoustique.

1 Introduction

D'une façon générale, les structures mécaniques sont constituées par des assemblages de composants pouvant être composés de matériaux homogènes et hétérogènes (soudage, collage, par fixation) mixtes ou hybrides [1]. Les structures boulonnées sont souvent utilisées dans différents domaines mécaniques : aéronautique, automobile, ferroviaire, maritime, structures de ponts, grues, etc.

La tenue mécanique des assemblages par fixation (boulonnés, rivetés) constitue une préoccupation importante dans la phase de la conception des structures mécaniques dans un souci lié aux exigences importantes au niveau de la sécurité des installations industrielles.

Cette étude expérimentale et numérique traite de la ténacité d'un assemblage boulonné soumis à un chargement statique de cisaillement en simple recouvrement. Plusieurs configurations d'assemblages sont étudiées en fonction du nombre de fixations mais les résultats d'une seule morphologie sont proposés dans cet article.

Cet assemblage est constitué de deux tôles minces en Al 6082 T6, d'épaisseur deux millimètres reliées par un seul boulon. Un jeu fixe est accepté entre le fût du boulon et l'alésage de la plaque. Seuls les effets du couple de serrage sont analysés. Les mécanismes et la chronologie d'endommagement sont suivis à l'aide de la technique d'émission acoustique (E.A.) [2] couplée à la mesure des champs de déplacements et des déformations en utilisant une caméra par corrélation d'images digitales (C.I.D.). Des calculs numériques par éléments finis en 3D [3] ont permis une simulation du comportement mécanique de cet assemblage boulonné en utilisant une modélisation basée sur l'endommagement.

2 Procédures expérimentales

Des essais de traction monotone, réalisés sur des éprouvettes haltères usinées dans des tôles d'aluminium (sens long) série 6082T6 (vitesse de déplacement de la traverse : 1mm/min) permettent de caractériser le matériau de base. Les déplacements locaux ont été mesurés à l'aide d'un dispositif de vidéo-traction à partir de quatre marqueurs situés sur la partie centrale de l'éprouvette comme indiqué sur la Figure 1. Le comportement mécanique est du type puissance Ramberg-Osgood où $\sigma = k \cdot \mathcal{E}_p^n$ est utilisé.

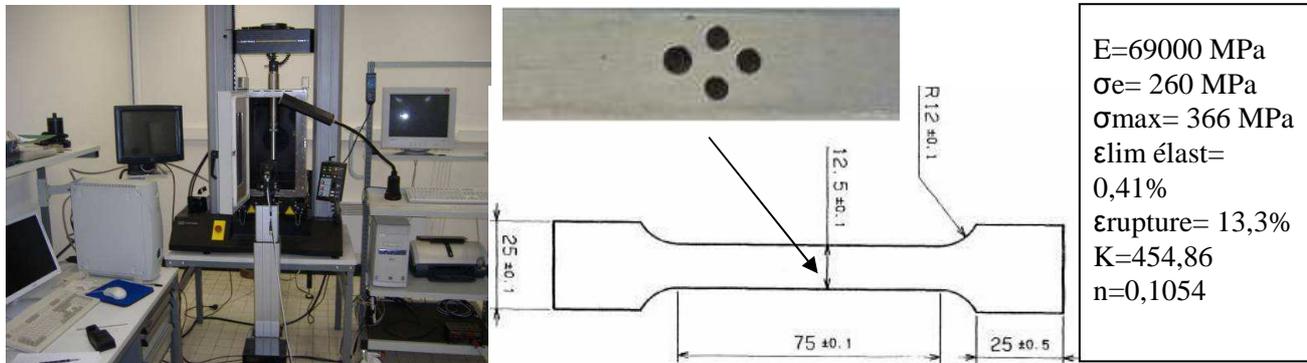


FIG. 1 – Equipement de vidéo traction , détails de l'éprouvette et caractéristiques matériau.

Les dimensions des assemblages sont fixées selon la norme NAS 1312-4 où les distances du centre de l'alésage par rapport aux bords libres sont déterminées en fonction du diamètre nominal du boulon. Les effets de tension du corps du boulon ont été pris en compte : cinq valeurs du couple de serrage des écrous ont été retenues : 2daN.m - 2,5 daN.m - 3daN.m - 3,5 daN.m et 4da N.m. Pour éviter une plastification des plaques d'aluminium sous la tête de la vis et de la rondelle d'appui, la valeur maximale du couple retenue est fixée à 4daN.m.

Un dispositif expérimental donné par la Figure 2 permet de déterminer la relation entre le couple de serrage appliqué sur l'écrou et la tension dans la vis. Ce résultat est proche de la relation empirique donné par Kellerman et Klein $C_s = K.F$ où C_s est le couple de serrage et F la tension dans la vis. Les fixations sont constituées de boulons en acier zingué (vis H ISO 4014-M8x20-4.8) et possèdent sensiblement une résistance à la traction $R_m=400$ MPa et une limite élastique $Re=320$ MPa. L'écrou ISO 4032-M8-8 et la rondelle d'appui ISO 7089-8-300HV possèdent une classe de qualité 8.

La technique d'émission acoustique (A.E.) a été utilisée pour enregistrer les données de formes d'ondes par l'intermédiaire de quatre capteurs piezo-électrique disposés comme indiqué sur la Figure 3. On retrouve sur cette figure les éléments importants de la chaîne d'acquisition, à savoir les capteurs, les pré-amplificateurs, la centrale

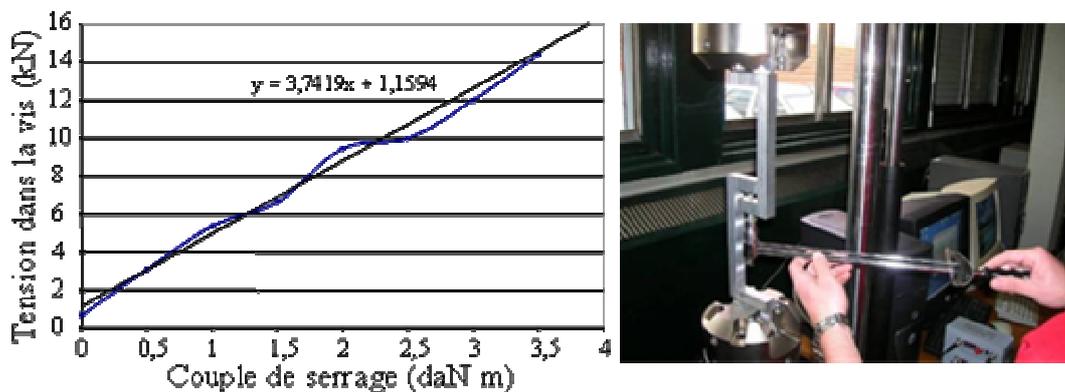


FIG. 2 – Evolution de la tension dans le corps du boulon..

d'acquisition (4 voies) et le logiciel de traitement. La valeur de dépassement de seuil est fixée à 35 dB. Cette valeur est le résultat d'un certain nombre d'essais qui prend en compte, entre autre, le bruit machine et le bruit de fond. Tous les résultats post-traités ne subissent aucun filtrage (localisation ou autre). Une des caractéristiques, exploitée ici, est le nombre de coups (sans dimension) c'est à dire le nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse la valeur de seuil. Cette caractéristique cumulée temporellement est en vis-à-vis

de la paramétrique charge/déplacement sur la Figure 6. Un système de caméra de corrélation d'images digitales (C.I.D.) a été utilisé pour mesurer le champ des déplacements au voisinage des fixations.

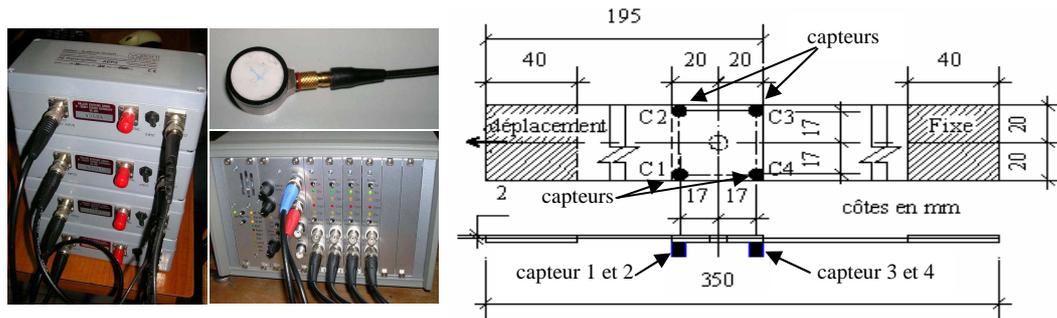


FIG. 3 – Système d'acquisition d'émission acoustique et schéma d'implantation des capteurs sur l'assemblage.

Ces mesures permettent d'accéder au champ des déformations au cours de l'essai de traction de l'assemblage. Une image est prise par la caméra CID toute les deux secondes. Le traitement des images utilise la méthode intégrale (comparaison des images par rapport à la première image dite de référence) avec un pas de cinq images et une taille de fenêtre en double passe en 16X16 bits (recouvrement de 50%). Le masque (zone d'étude) est un rectangle délimité par les quatre capteurs auquel on a enlevé un disque centré sur la tête du boulon pour éviter de perturber le champ de déformation.

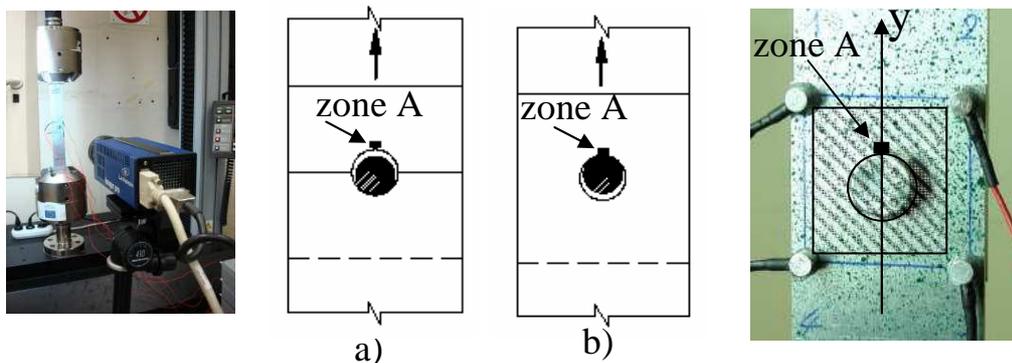


FIG. 4 – Caméra de corrélation d'images digitales et définition du masque.

On retrouve sur la partie gauche et droite de la Figure 4 une partie du système d'acquisition par corrélation d'images et de la définition du masque sur le mouchetis. Les résultats qui vont être exploités à partir de cette technique seront donnés sur la zone du masque pour le champ de déplacement et une zone notée A proche de la tête du boulon, mais sur la plaque (moyenne de deux vecteurs déplacement de deux fenêtres contiguës de 16x16 bits) pour la valeur de la déformation notée ε_y sur l'axe orienté y.

Le dessin noté a) représente une partie en vue de face de l'assemblage avant la mise en traction. On remarque un jeu entre l'alésage de la plaque supérieure et le corps du boulon. Au cours de l'essai (la flèche indique le sens de traction) le dessin noté b) montre qu'il y a eu déplacement relatif entre le boulon et la plaque mais aussi entre les plaques elles-mêmes. Le corps du boulon se retrouve maintenant en contact proche de la zone A. L'explication donnée pour la plaque supérieure est identique (au sens de déplacement près) pour la plaque inférieure. Le déplacement relatif des deux plaques vaut deux fois la différence entre le diamètre de l'alésage et de diamètre du corps du boulon.

Le couplage de ces deux techniques E.A. et C.I.D. permet de prédire la chronologie des différents mécanismes d'endommagement. Cette démarche est décrite au paragraphe suivant.

3 Résultats et discussions

On retrouve ces essais de traction pour une fixation sur la Figure 5. Ces essais ont été réalisés à l'aide d'une machine électrique +/- 30KN pour déterminer l'évolution de la charge globale en fonction du déplacement de l'assemblage.

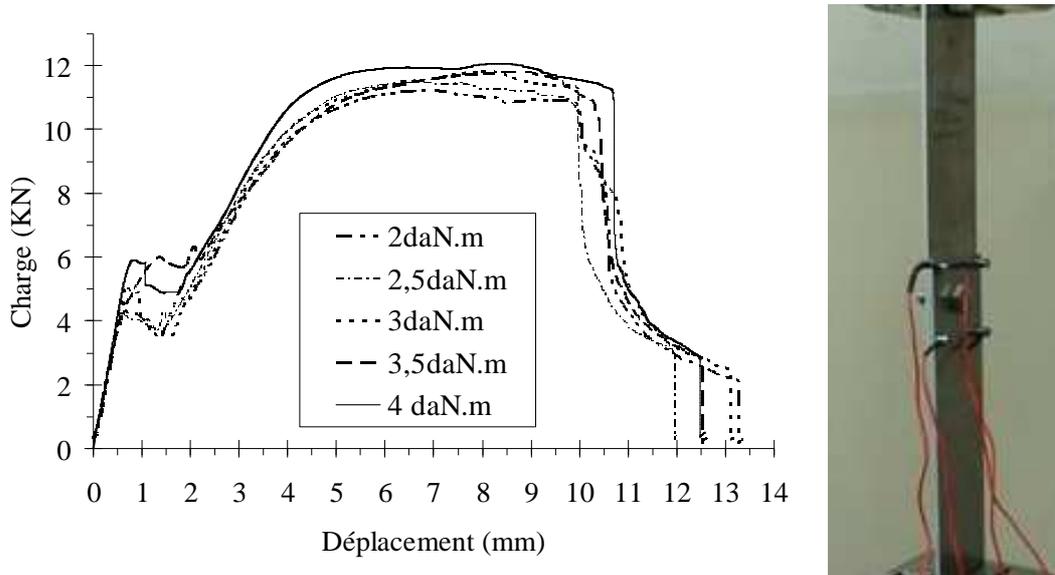


FIG. 5 – Charge/déplacement pour une fixation et plusieurs valeurs de couples avec détails de l'éprouvette.

La courbe «charge-déplacement» donnée pour une valeur de couple de 4 daN.m présente une évolution typique de la chronologie de la rupture d'un assemblage boulonné sollicité en cisaillement. Les explications données pour cette valeur de couple de serrage sont identiques (aux valeurs près) pour les quatre autres courbes. Au cours de cette expérience, la technique de l'émission acoustique et celle de la corrélation d'images digitales sont exploitées simultanément. La Figure 6 met en évidence avec la technique de l'E.A. le nombre d'évènements cumulés au cours de cet essai. La Figure 7 met en évidence avec la technique de la C.I.D. la valeur de la déformation de la zone A sur deux figures pour dilater les échelles avec les champs de déplacement des points particuliers.

Cette courbe met en évidence sept phases :

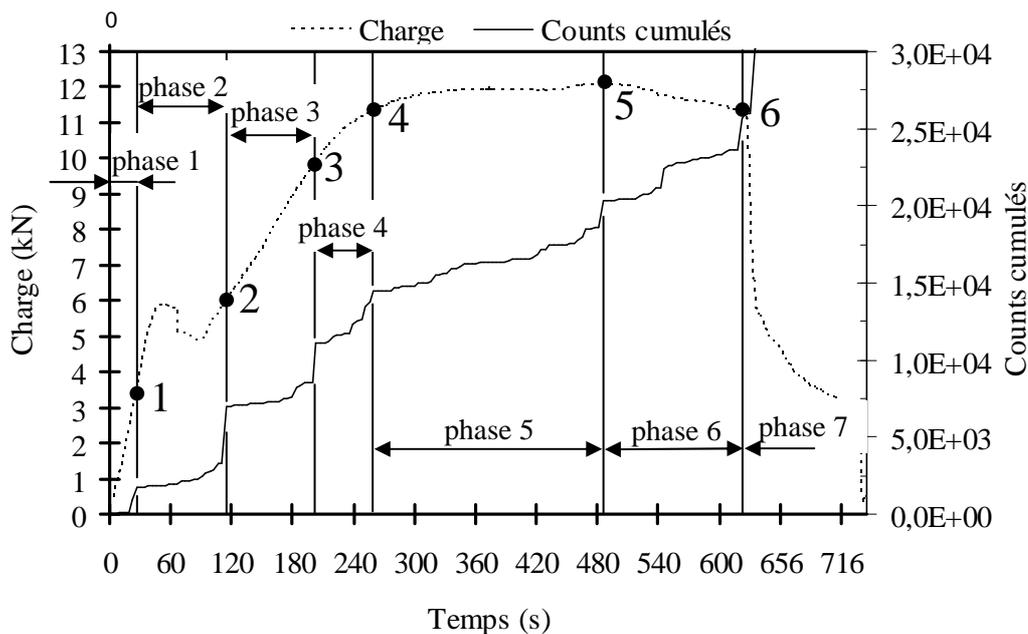


FIG. 6 – Coups cumulés et paramétrique charge/temps.

- Phase 1 : caractérise le comportement élastique du matériau, qui se présente par une partie linéaire dont la pente est similaire au module d'élasticité longitudinal des tôles d'aluminium. Cette phase est décrite par une activité silencieuse au niveau du signal fourni par la technique d'émission acoustique. De même, le suivi par la technique de corrélation d'images présente un champ élastique des déformations au voisinage de l'alésage.
- Phase 2 : il s'agit d'une phase qui caractérise à la fois un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon. Cette phase est décrite par une forte activité de l'E.A. qui reflète le frottement entre les deux tôles mais aussi par les contacts entre les tôles et le boulon (tête et rondelle). La fin de cette zone (point 2) est marquée par un sursaut instantané au niveau des évènements cumulés. Les relevés donnés, dans la zone A par la technique de corrélation d'images, montrent une variation de la déformation caractérisée par un net changement de pente (point 1) suivi par une chute de la valeur de déformation en traction jusqu'à atteindre une valeur nulle en fin de zone (point 2) : ce point marque le début d'une zone de compression au voisinage de la zone A.
- Phase 3 : cette phase est décrite par un comportement élastique de la structure qui est soumise à une traction avec une flexion secondaire. La pente de cette partie est différente de celle observée dans la phase 1 car il s'agit ici de la raideur de la structure. Les évènements cumulés enregistrés par la technique E.A. montrent bien la délimitation de cette zone. En effet, le point 3 est marqué par un saut qui caractérise le début de la plastification. De même l'évolution de la déformation de la zone A montre bien l'existence d'une zone comprimée où la valeur de la déformation atteint une valeur d'environ 0,4% correspondante à la valeur élastique des déformation pour l'aluminium étudié.
- Phase 4 : caractérise la plastification autour des alésages des plaques et en particulier de la zone A. Entre les points 3 et 4 l'activité est soutenue et régulière en terme d' E.A.. avec un saut particulier au point 4.

Les relevés par la technique C.I.D. montrent une augmentation de la valeur de la déformation en compression qui dépasse les 2%. Le point 4 est marqué par un changement accéléré de la déformation : il est le point d'amorçage de la fissure.

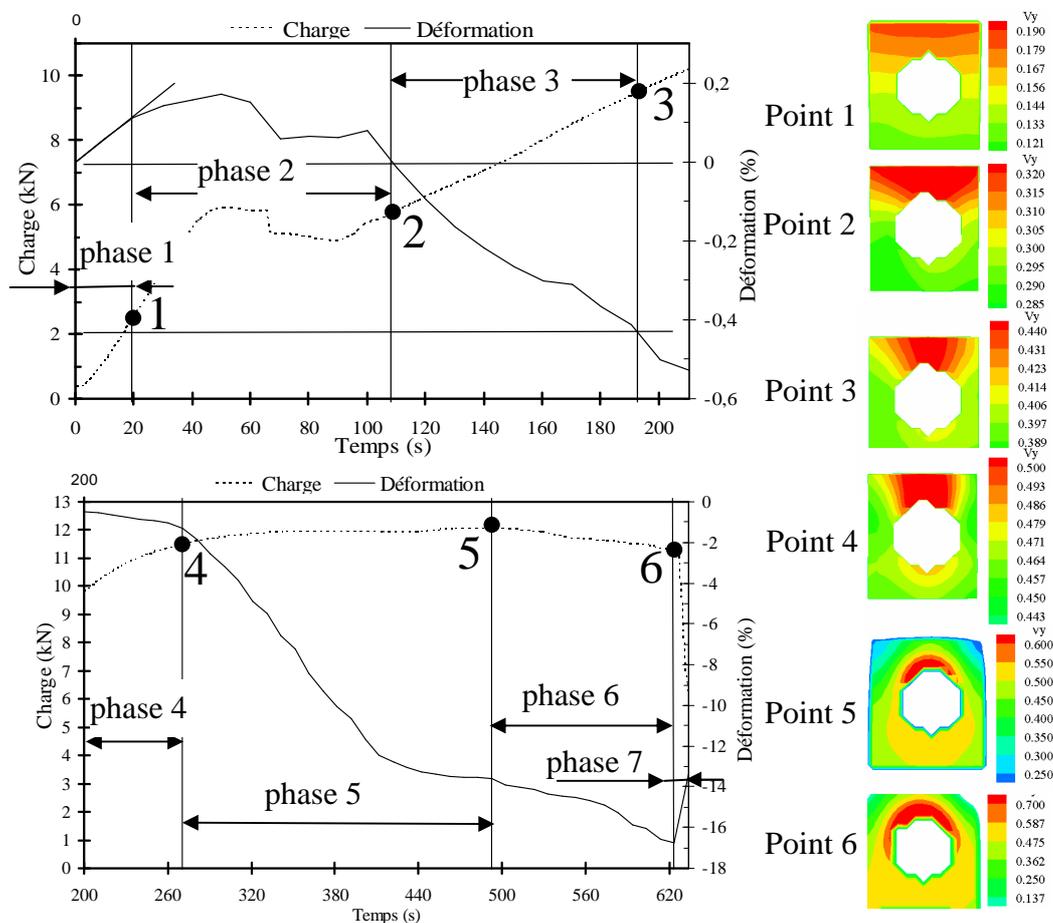


FIG. 7 – Déformation ϵ_y de la zone A avec la paramétrique charge/temps et détails des champs de déplacement.

- Phase 5 : cette zone est la propagation stable de fissure décrite par une activité régulière et soutenue de l'E.A. avec un sursaut instantané en fin de zone au point 5. Les relevés par la technique C.I.D. montrent une augmentation régulière de la valeur de la déformation en compression. Le point 5 est le lieu où l'effort est maximum.
- Phase 6 : elle correspond à une propagation instable de la fissure avec des sauts aléatoires en activité E.A.. A partir du point 5 l'effort de tension diminue car la section résistante des tôles diminue. Les relevés donnés par la technique C.I.D. montrent une variation de la déformation caractérisée par un changement de pente (point 5) suivi par une chute de la valeur de déformation en compression jusqu'à atteindre une valeur maximale en fin de zone au point 6.
- Phase 7 : il s'agit de la rupture brutale de l'assemblage caractérisé par une activité exponentielle des évènements par la technique E.A. et une diminution de la déformation en compression de la zone A (point d'inflexion au point 6).

La Figure 5 montre aussi que l'augmentation du couple de serrage se traduit par une augmentation de la valeur de seuil de point 1 et une valeur sensiblement constante de la charge maximale (point 5).

4 Simulation numérique et conclusion

Les calculs [4] ont été réalisés par éléments finis volumiques 3D hexagonaux à huit nœuds avec une gestion de sept zones de contact (plaque/plaque, plaque/rondelle, plaque/tête boulon, plaque/corps du boulon, rondelle/corps du boulon, écrou/corps du boulon et rondelle/écrou) par la méthode des Lagrangiens augmentés. La configuration traitée (1 fixation) permet une symétrie de l'ensemble passant par le centre de la fixation et le long des plaques. Les lois de comportement des différents éléments sont intégrés et l'endommagement des plaques est traité par le critère d'énergie de Latham et Cockroft. Les résultats de simulation obtenus Figure 8 sont proches des résultats obtenus par expérience (C.I.D. et chemin de fissure par localisation en E.A.).

Les techniques couplées d'émission acoustique et de corrélation d'images digitales permettent d'obtenir une chronologie fiable des différentes étapes d'endommagement. Grâce à ces résultats, une simulation numérique 3D permet de retracer ces évènements et d'envisager en perspective d'autres valeurs de couple de serrage, de jeux, de morphologies, de nature (assemblage mixte ou hybride) ou de sollicitation (tension, pull thru).

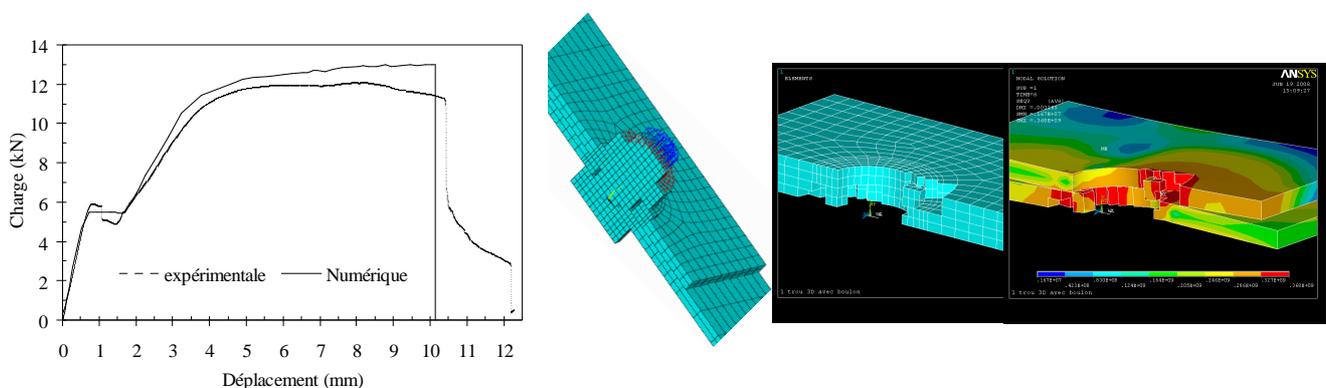


FIG. 8 – Modélisation en éléments finis et suivi de l'endommagement.

References

- [1] Mackerle J., Finite element analysis of fastening and joining : A bibliography (1990-2002), International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 253-271, (2003).
- [2] Grondel S. and Al, Fatigue crack monitoring of riveted aluminium strap joints by Lamb wave analysis and acoustic emission measurement techniques, NDT&E International, pp. 137-146, (2002).
- [3] Lagattu F. and Al, Etude du rôle de la microstructure sur la résistance à la fissuration par fatigue des alliages TiAl à l'aide de la technique de corrélation d'images numériques de mouchetis, Mécanique&Industries, pp. 499-507, (2005).
- [4] A. Imad, J. Wilsius, M. Nait Abdelaziz, G. Mesmacque, Experiments and numerical approaches to ductile fracture in an 2024-T351 aluminium alloy , International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 45, No. 11, pp. 1781-1927, (2003).