Université de Lille 1 N° d'ordre :

Laboratoire de Mécanique de Lille (CNRS UMR 8107)

THESE DE DOCTORAT

présentée par

Thong DANG-HOANG

pour l'obtention du titre de
DOCTEUR en Mécanique

Rupture et endommagement d'un assemblage boulonné : approche expérimentale et simulation numérique

Soutenue le 9 juillet 2009

Rapporteurs : *M. BARRAU Jean-Jacques, Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse*
M. KARAMA, Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Tarbes

Examinateurs : *M. DANG-VAN Ky, Directeur de Recherche CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau*
M. BENMEDAKHENE, Directeur Scientifique, Société AETech, Compiègne
M. BENSEDDIQ Nourredine, Professeur, Université de Lille I, IUT ' A '
M. RABET Luc, Professeur, Ecole Militaire Royale, Bruxelles, Belgique

Directeur de Thèse : *M. IMAD Abdellatif, Professeur, Université de Lille I, Polytech'Lille*
Co-encadrant : *M. HERBELOT Christophe, Maître de Conférences, Université de Lille I, Polytech'Lille*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail et de l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude.

Ainsi, j'exprime profondément mes remerciements à M. Abdellatif Imad, professeur à Polytech'Lille pour avoir dirigé mes recherches. Sa disponibilité à tout instant, ses critiques constructives et sa rigueur scientifique sont autant d'atouts qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à M. Christophe Herbelot, maître de conférences à Polytech'Lille qui a suivi de près l'avancement de ce travail. Son esprit d'analyse, sa patience à toute épreuve, sa disponibilité, ses compétences scientifiques et techniques ont été indispensables à la conduite de cette étude. M. Herbelot m'a motivé dans les moments difficiles.

J'adresse ma reconnaissance à M. Jean-Jacques Barrau et également à M. Moussa Karama, professeurs à l'université Paul Sabatier à Toulouse et à l'ENIT à Tarbes, qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de mon travail et ont accepté de consacrer du temps pour la lecture et le jugement de ce document.

Je remercie vivement M. Nourredine Benseddiq, professeur à Polytech'Lille pour sa disponibilité, son aide et ses conseils.

J'adresse également mes remerciements à la secrétaire de l'école doctorale SPI, Mme Nguyen Tram, pour sa gentillesse et son aide dans les démarches administratives.

Je remercie également à tous mes collègues de bureau pour leur sympathie.

Merci à tous ceux, parfois venus de loin, qui m'on encouragé en assistant à la soutenance de ma thèse.

En fin, je tiens à associer à ce travail ma famille et mes proches, notamment à mes parents, ma sœur et Hanh qui m'ont soutenu et encouragé durant toute mon activité de recherche.

Merci aux lecteurs de cette thèse.

Introduction générale ……..…1

Chapitre I: Etat de l'art 4

I. Généralités sur les assemblages boulonnés 5

I.1. Flexibilité des fixations 5

I.2. Transfert de charge pour une fixation 8

I.3. Concentration de contraintes dans un assemblage boulonné 11

I.4. Comportement mécanique global d'un assemblage boulonné 12

I.4.1. Chronologie des mécanismes d'endommagement dans un assemblage boulonné 12

I.4.2. Modes de rupture d'un assemblage boulonné 14

I.5. L'effet du couple de serrage 17

I.5.1. Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension dans Le boulon 17

I.5.2. Effet du couple de serrage 19

I.6. Simulation numérique d'une fixation 21

Chapitre II : Etude expérimentale..... 24

II.1. Objectifs et stratégie de l'étude expérimentale 25

II.2. Caractéristiques des matériaux 25

II.3. Procédure expérimentale des essais sur les assemblages 28

II.3.1. Eprouvettes et machine 28

II.3.2. Technique d'Emission Acoustique 31

II.3.2.1. Définition 31

II.3.2.2. Objectifs 31

II.3.2.3. Acquisition de signaux – instrumentation 32

II.3.2.3.1. Sources d'Emission Acoustique 32

II.3.2.3.2. Capteurs 33

II.3.2.3.3. Pré-amplificateur 33

II.3.2.3.4. Système d'acquisition 34

II.3.2.4. Limitations et avantages 34

II.3.2.5. Paramétrage d'acquisition 34

II.3.2.6. Paramètres d'analyse 35

II.3.2.7. Technique de localisation planaire 36
II.3.2.7.1. Elaboration des évènements 36
II.3.2.7.2. Algorithme de localisation 33
II.3.2.7.3. Elaboration des évènements localisés 39
II.3.2.7.4. Description de la localisation plane 39
II.3.3. Technique de Corrélation d'image Digitale (CID) 40
II.3.3.1. Objectifs 40
II.3.3.2. Protocole expérimental 40
II.3.3.3. Le calcul du champ de déplacement 42
II.3.3.4. Le calcul du champ de déformation 44
II.3.4. Conditions d'essais et configurations étudiées 45
II.3.4.1. Explication des jeux 45
II.3.4.2. Position des capteurs 46

Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussions 48
III.1. Analyse du comportement mécanique global d'un assemblage ..... boulonné 49
III.1.1. Le cas d'un assemblage à une fixation de norme usuelle 49
III.1.1.1. Analyse par émission acoustique 49
III.1.1.2. Analyse par corrélation d'images digitales 57
III.1.2. Le cas d'un assemblage à une fixation selon la norme NASM 64
III.1.3. Le cas d'un assemblage à deux fixations horizontales 68
III.1.4. Le cas d'un assemblage à deux fixations verticales 71
III.1.5. Conclusions 73
III.2. Influence des paramètres..... 76
III.2.1. Couple de serrage 76
III.2.1.1. Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension ..... dans le boulon 76
III.2.1.2. Influence du couple de serrage 78
III.2.2. Effets de bord.....81
III.2.3. Influence du jeu 82
III.2.4. Nombre de fixations 84
III.2.4.1. Deux fixations verticales 84
III.2.4.2. Trois fixations verticales 86
III.2.4.3. Deux fixations horizontales 88

III.3. Localisation 89
III.4. Modes de rupture : analyse macro et microscopique..... 93

Chapitre IV : Etude numérique 98
IV.1. Objectifs et simulation numérique..... 99
IV.2. Description du modèle de l'assemblage boulonné 100
IV.2.1 Géométrie et maillage 100
IV.2.2 Comportement des matériaux..... 102
IV.2.3. Méthode de modélisation du contact..... 102
IV.2.4. Modélisation du serrage 104
IV.2.5. Les conditions aux limites..... 105
IV.3. Simulation numérique 107
IV.3.1. Comportement global sans endommagement..... 107
IV.3.1.1. Condition de calcul d'un assemblage 107
IV.3.1.2. Effet de bord 108
IV.3.1.3. Effet du couple de serrage..... 112
IV.3.1.4. Validation du champ de déplacements et de déformations numériques 113
IV.3.1.5. Validation globale..... 118
IV.3.2. Comportement global avec endommagement 120
IV.3.2.1 Modèle d'endommagement énergétique de .....
Latham et Crockoft 120
IV.3.2.1.1. Présentation générale du modèle..... 120
IV.3.2.1.2. Modélisation numérique du modèle..... 121
IV.3.2.2. Modèle de Gurson – Tvergard - Needleman 125
IV.3.2.2.1. Présentation générale du modèle GTN..... 125
IV.3.2.1.2. Modélisation numérique du modèle GTN 126
IV.4. Comparaison des résultats 130

Conclusions générales 131

Perspectives 133

Références bibliographiques 134

Publications **140**

Annexes **142**

Introduction générale

Les assemblages par fixation (boulonnés ou rivetés) constituent un mode de liaison des composants mécaniques, souvent utilisés dans les domaines aéronautique, automobile, ferroviaire, etc. Ce type d'assemblage présente un avantage intéressant de part sa facilité de réalisation (alésage des trous dans les plaques et montage de la fixation avec ou sans rondelles). Néanmoins, la présence du trou d'alésage constitue le point faible de ce type des structures du fait de la concentration des contraintes qui est souvent la cause principale de la naissance des fissures. La démontabilité des assemblages boulonnés est un atout important permettant l'interchangeabilité des composants lors des périodes de maintenance, ce qui exige de prévoir un jeu de fonctionnalité entre les alésages et le boulon. De même, le couple de serrage est un élément significatif du fait de la charge appliquée sur le boulon qui doit être bien maîtrisé pour évaluer la tenue mécanique de ce type d'assemblage.

Dans le domaine de l'aéronautique, les composants (plaques et coques minces) sont souvent assemblés par deux types de fixations : démontables (boulons) et non démontables (différentes familles de rivets).

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse porte sur l'étude de la rupture et l'endommagement d'un assemblage boulonné constitué de tôles minces d'épaisseur e=2 mm, en alliage d'aluminium 6082 T6. L'influence de deux paramètres liés au procédé de réalisation de tel assemblage sur son comportement global sera analysée, à savoir : le couple de serrage et le jeu fonctionnel. Seul l'assemblage à simple recouvrement est étudié dans le cadre de ce travail, avec plusieurs configurations de fixations (nombre et dispositions des fixations). Cette étude est menée à la fois selon une approche expérimentale en analysant la chronologie et les mécanismes d'endommagement en utilisant la technique d'émission acoustique (EA) et la mesure des champs par caméra à corrélation d'images digitales (CID) d'une part, et une simulation numérique par éléments finis, d'autre part.

Globalement, le présent rapport de la thèse est organisé en quatre chapitres principaux :

(i) Le chapitre I traite l'état de l'art concernant les assemblages par fixation, en particulier boulonnés. Ce chapitre introduit les généralités sur les assemblages boulonnés et leur comportement mécanique global, généralement décrit à partir des courbes «charge-déplacement» obtenues via des essais de traction-cisaillement. Ce type de courbes permet d'évaluer la flexibilité de la fixation qui est obtenue à partir de l'inverse de sa raideur. Un aperçu des formulations permettant l'obtention la valeur de la flexibilité est exposée. De même, la notion du transfert des charges par la fixation est introduite. Un exposé de

différents travaux bibliographiques relatifs au comportement mécanique, à la rupture et à l'endommagement des assemblages boulonnés est introduit dans ce chapitre.

(ii) Le chapitre II est consacré à la présentation des éléments relatifs à l'approche expérimentale utilisée dans le cadre de ma thèse. Les détails sur le matériau des plaques (alliage d'aluminium 6082T6) et son comportement mécanique sont donnés à partir des essais de traction monotone sur des éprouvettes du type haltère. Les essais mécaniques en traction-cisaillement sont réalisés sur des assemblages boulonnés afin de vérifier l'influence du : couple de serrage des boulons, jeu fonctionnel entre l'alésage des plaques et le boulon, nombre et disposition des fixations (1 fixation, 2 fixations horizontales et verticales, 3 fixations verticales). Les dimensions des assemblages sont fixées selon une recommandation usuelle en aéronautique et selon une norme américaine NASM, permettant de vérifier l'effet des distances entre les fixations et les effets de bord. Le système d'exploitation d'émission acoustique (EA) et le dispositif de caméra de corrélation d'images (CID) sont présentés. Le couplage entre ces deux techniques expérimentales permet d'identifier les différentes phases décrivant le comportement global et la chronologie d'endommagement d'une part, et de détecter le point d'amorçage et la phase de propagation des fissures d'un assemblage boulonné, d'autre part. La technique d'EA utilisant la localisation planaire contribue à mieux cerner les lieux d'endommagement.

(iii) Le chapitre III présente une analyse basée sur les évolutions des activités acoustique d'une part et le suivi des champs de déformations par la technique CID d'autre part, afin de mieux cerner les différentes phases d'endommagement d'un assemblage boulonné. Différentes configurations d'assemblages sont étudiées selon la norme usuelle et la norme NASM, avec plusieurs cas de fixations. La technique d'émission acoustique permet de suivre les évolutions des activités acoustiques durant l'essai de traction-cisaillement d'un assemblage boulonné. Le mode et la nature des évolutions, les sauts des ces activités permettent la détection d'un phénomène physique : frottement, glissement, contacts, amorçage de fissures, propagation de fissures, rupture, etc. La technique de localisation planaire permet de détecter des événements et de cerner la zone d'activités. Les scénarios d'endommagement sont confirmés à l'aide du suivi par caméra de corrélations d'images digitales (CID), qui permet surtout d'évaluer le champ de

déplacements et d'en déduire le champ des déformations en tout point au voisinage de la fixation.

(iv) Le chapitre IV porte sur la simulation numérique utilisant les éléments finis afin de prédire le comportement global d'un assemblage boulonné. Les calculs sont réalisés en 3D, à l'aide du code de calculs Ansys V11.0. Une description générale du modèle géométrique et du maillage de l'assemblage étudié est présentée. Les différentes conditions aux limites et de chargement sont détaillées en soulignant la prise en compte des différents points et surfaces de contact liés à la spécificité d'un tel assemblage. Deux types de calculs sont entrepris : un calcul élastoplastique sans endommagement et un calcul avec endommagement. Ces derniers sont effectués en utilisant deux types de modèles : un modèle basé sur l'énergie de Latham et Cockroft et un modèle basé sur l'endommagement continu de Gurson modifié. Dans cette partie, les algorithmes de calcul développés sont détaillés.

Ce rapport se termine par une conclusion générale et une perspective des travaux à l'issue de cette thèse.

Une liste bibliographique qui a servi de base à nos travaux et plusieurs annexes sont données à la fin de ce rapport.

Chapitre I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Généralités sur les assemblages boulonnés
I.1. Flexibilité des fixations
I.2. Transfert de charge pour une fixation
I.3. Concentration de contraintes dans un assemblage boulonné
I.4. Comportement mécanique global d'un assemblage boulonné
I.4.1. Chronologie des mécanismes d'endommagement dans un assemblage boulonné
I.4.2. Modes de rupture d'un assemblage boulonné
I.5. L'effet du couple de serrage
I.5.1. Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension dans Le boulon
I.5.2. Effet du couple de serrage
I.6. Simulation numérique d'une fixation

Généralités sur les assemblages boulonnés

Les assemblages par fixation (rivetés ou boulonnés) souvent utilisés dans des structures aéronautique, automobiles, ferroviaires et aussi dans plusieurs composants mécaniques (grues, ponts, etc.). Les structures boulonnées présentent l'avantage de leur facilité de mise en œuvre comme l'indique M. J.P. MUZEAU [MUZ05]. Ce type d'assemblages concerne à la fois les tôles métalliques (aluminium, acier, …) et en composites, avec des corps de boulons en aluminium ou en acier. L'utilisation de ce genre de structure nécessite la maîtrise de leur tenue mécanique à la fois en statique, en dynamique et en fatigue.
Plusieurs travaux dans la littérature se sont intéressés à l'étude de la caractérisation mécanique des assemblages boulonnés. Ces études ont porté sur plusieurs volets, nous citons entre autres :

- la flexibilité de la fixation,
- le transfert de charge,
- les concentrations de contraintes,
- l'effet du couple de serrage,
- l'effet du jeu entre l'alésage et le corps du boulon,
- les différents modes de rupture, etc.

On note que les démarches entreprises ont été basées sur des approches expérimentales, des modélisations analytiques mais aussi des simulations numériques par éléments finis.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu non exhaustif de l'état de l'art relatif à la tenue mécanique des assemblages boulonnés soumis à des sollicitations monotones de traction cisaillement.

I.1. Flexibilité des fixations

La flexibilité des fixations est un paramètre important dans le dimensionnement des assemblages boulonnés, puisque la durée de vie de l'assemblage est directement liée à la répartition des contraintes autour du trou d'une fixation, qui elle-même dépend de l'effort transféré par cette fixation.

La flexibilité d'une fixation, qui représente l'inverse de la raideur de C, est définie par :

$$C^{-1} = \frac{\delta}{F}$$

avec δ : l'allongement de la fixation et F : l'effort appliqué.

La figure I.1 illustre une schématisation d'un assemblage boulonné à simple recouvrement soumis à une traction-cisaillement et donne aussi un exemple type d'une courbe d'évolution de la charge appliquée F en fonction du déplacement δ, permettant d'évaluer la raideur de l'assemblage dans le domaine élastique.

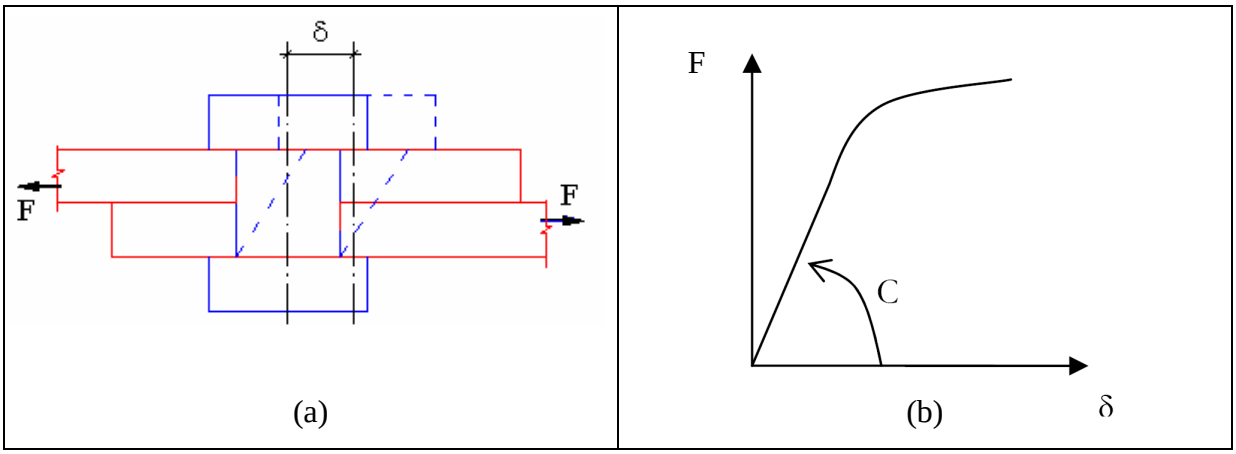


Figure I.1. ***(a)*** *Schématisation d'un assemblage boulonné à simple recouvrement,* ***(b)*** *Raideur d'une fixation dans le domaine élastique (courbe –déplacement).*

La notion de flexibilité est valide tant que le comportement de l'assemblage demeure linéaire. Ce terme ne s'applique qu'aux assemblages de deux plaques en simple recouvrement (figure I.1) ou trois plaque en double cisaillement.

Les premiers travaux sur la flexibilité des assemblages ont été réalisés par Vogt [VOG44]. L'auteur a déterminé la rigidité de la fixation d'un assemblage symétrique avec un seul boulon. De nombreuses études ont alors été réalisées pour déterminer des formulations semi-analytiques permettant la détermination de la flexibilité. Cependant, les formulations établies diffèrent, ainsi que le concept de flexibilité du fait des influences croisées de différents paramètres de conception, à savoir :

e_i : épaisseur du substrat i

E_i : module Young du substrat i

E_f : module Young de la fixation

ν : coefficient de Poisson

I_i : module quadratique du substrat i

Sans être exhaustif, nous présentons brièvement quelques formulations de la flexibilité :

(i) Formulation de Tate et Rosenfeld

Tate et Rosenfeld [TAT46] [TAT47], en 1947, à partir d'une étude expérimentale, donnent d'après [PAR06] une formulation pour la configuration en simple cisaillement :

$$C^{-1} = \frac{1}{e_1 E_1} + \frac{1}{e_2 E_2} + \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2}\right)\frac{1}{E_f} + \frac{32(e_1 + e_2)(1+\nu_f)}{9E_f \pi \phi^2} + \frac{8(e_2^{\,3} + 5e_2^{\,2}e_1 + 5e_2 e_1^{\,2} + e_1^{\,3})}{5E_f \pi \phi^4}$$

Avec les hypothèses suivantes :
- le comportement des matériaux de l'assemblage est élastique;
- la flexion des substrats est négligée ;
- le frottement entre les éléments de l'assemblage est négligé ;
- il n'y a pas de jeu;
- la relation est linéaire entre la charge appliquée et la charge transférée.

(ii) Formulation de Gore

Il donne la formulation suivante [GOR90] pour la configuration en simple cisaillement :

$$C^{-1} = \frac{1}{e_1 E_1} + \frac{1}{e_2 E_2} + \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2}\right)\frac{1}{E_f} + \frac{8(e_1 + e_2)(1+\nu_f)}{5E_f \pi \phi^2} + \frac{(e_2^{\,3} + 5e_2^{\,2}e_1 + 5e_2 e_1^{\,2} + e_1^{\,3})}{40E_f I_f}$$

Cette formulation ressemble à celle de Tate et Rosenfeld. Il n'y a aucune information sur les hypothèses et la méthode employée dans ce cadre.

(iii) Formulation du constructeur Boeing

Boeing donne [BOE] à partir de travaux expérimentaux et d'après [HUT86], pour le cas du simple cisaillement :

$$C^{-1} = \frac{2^{\left(\frac{e_1}{\phi}\right)^{0,85}}}{e_1}\left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{8E_f}\right) + \frac{2^{\left(\frac{e_2}{\phi}\right)^{0,85}}}{e_2}\left(\frac{1}{E_2} + \frac{3}{8E_f}\right)$$

Il n'y a, là aussi, aucune information sur les hypothèses et la méthode employée.

Vu le nombre de formulations il semble très difficile d'accéder à une valeur de référence de la rigidité de la fixation dans un assemblage en simple ou double cisaillement. Il est cependant possible de noter des analogies et de mettre en place deux familles.
La première contient la formulation de Tate et Rosenfeld et celle de Gore. Elles sont construites sur la somme de trois termes (exprimés en déplacement par exemple) qui correspondent à trois phénomènes différents :

- le déplacement dû au cisaillement de la fixation δ_α ;
- le déplacement dû à la flexion de la fixation de la forme δ_β ;
- le déplacement dû au matage δ_χ

En notant S_f la section de la fixation et P un polynôme de degré 3 on constate que ces déplacements sont à une constante près de la forme :

$$\delta_\alpha = \alpha \frac{\sum_i e_i}{G_f S_f} \qquad \delta_\beta = \beta \frac{P(e_i)}{E_f I_f} \qquad \delta_\chi = \sum_i \chi_i \frac{1}{e_i E_f} + \sum_j \chi_j \frac{1}{e_j E_j}$$

Dans cette famille intervient directement la caractéristique matériau de la fixation ou des substrats. Elle ne relève en rien d'une formulation arbitraire.

La seconde famille contient les formulations de Huth et de Boeing (comme celles de Swift [SWI71] [SWI84], de Niu [NIU88], de Cope et Lacy [COP00] ou enfin Cramer [CRA68]). Elles sont construites à partir de la contrainte de matage (contrairement au déplacement $\delta\chi$ le diamètre de la fixation intervient explicitement). Dans cette famille intervient directement la caractéristique matériau de la fixation ou des substrats.

I.2. Transfert de charge pour une fixation

Pour un assemblage boulonné à plusieurs lignes de fixations, différentes méthodes ont été développées afin de calculer la répartition des transferts de charge entre ces différentes lignes de fixations.

En effet, l'effort total appliqué à un assemblage boulonné n'est pas équitablement réparti sur toutes les fixations. La contrainte dans les plaques assemblées diminue au fur et à mesure d'une fixation (ou ligne de fixation) à une fixation (ou ligne de fixation) suivante. La figure I.2. illustre le mécanisme du transfert d'effort au niveau de la dernière fixation (ou ligne de fixation) dans un assemblage en simple cisaillement.

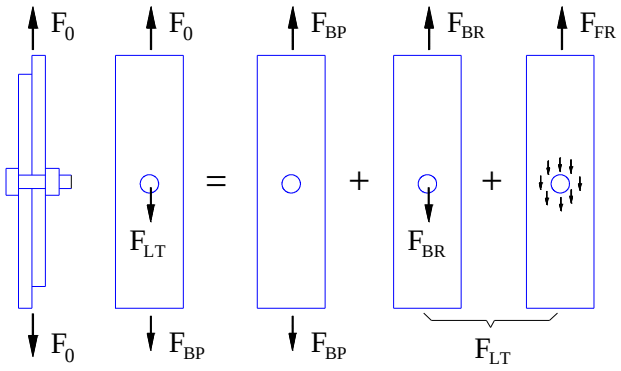


Figure I.2. *Principe du transfert de charge dans un assemblage boulonné*

F_0 : Effort total

F_{BP} : Effort passant, effort de traction dans la tôle

F_{BR} : Effort de matage

F_{FR} : Effort de friction

F_{LT} : Effort transféré

L'effort de matage F_{BR} et l'effort de friction F_{FR} représentent l'effort transféré par la fixation. Le taux de transfert d'effort au niveau de la fixation est donné en faisant le rapport de l'effort transféré sur l'effort total :

Taux de transfert = FL_T/F_0

Approche par récurrence

La détermination de la charge transférée par un assemblage (qui possède plusieurs fixations) relève de la résolution d'un problème hyperstatique. Tate et Rosenfeld [TAT47] ont développé une approche par récurrence de la détermination du transfert de charge. Ils explorent une jonction symétrique en double cisaillement, dans le domaine élastique, sans flexion secondaire et sans frottement à l'interface. En notant R_i la charge transférée par la fixation *i*, dans le cas d'une jonction à paramètres constants, on obtient la relation suivante :

$$R_{i+1} = R_i - \frac{2K_p}{C_f} f + \frac{(2K_p + K_s)}{C_f} \sum_{j=0}^{i} R_j$$

où K_p est la souplesse de la plaque principale ou intermédiaire, et K_s la souplesse des substrats supérieurs et inférieurs. Tate et Rosenfeld proposent deux types de résolution : la méthode des différences finies et l'analogie au collage.

Avec la méthode des différences finies l'équation de récurrence d'ordre 2 est obtenue:

$$R_{i+1} - (2+\varphi)R_i + R_{i-1} = 0$$

en notant :

$$\varphi = \frac{2K_p + K_s}{C_f}$$

Cette équation est résolue par : $R_i = a\exp(\lambda i) + b\exp(-\lambda i)$

avec : $\lambda = cosh^{-1}(1 + 0{,}5\varphi)$

$$a = -\frac{\varphi + \frac{2K_p}{C_f}(e^{-n\lambda} - 1)}{(e^{n\lambda} - e^{-n\lambda})(e^{-\lambda} - 1)} f \qquad b = -\frac{\varphi + \frac{2K_p}{C_f}(e^{n\lambda} - 1)}{(e^{n\lambda} - e^{-n\lambda})(e^{-\lambda} - 1)} f$$

Où n est le nombre de fixations.

Avec la méthode de l'analogie au collage [COM68] la fixation est remplacée par un assemblage collé équivalent où la charge de transfert est représentée par un flux de cisaillement. Cette analogie est quand même approximative et elle est d'autant plus précise que le pas entre les fixations est grand (ce qui peut limiter les champs d'application de ladite méthode). Les fixations sont enlevées et on place une épaisseur de colle au niveau de l'interface. On passe alors d'un mode de transfert discret à un mode de transfert continu où l'on remplace la flexion et le matage par du cisaillement pur.

En notant A_s et A_p les sections des plaques supérieures/inférieures et la section de la plaque intermédiaire, s le pas constant entre deux fixations, L la longueur du recouvrement et E_1 le module d'Young des substrats, on obtient :

$$R_i = \frac{kp}{A_r \sinh(kL)}\left[A_s \cosh(kx) + 0{,}5A_p \cosh(kL - kx)\right]f$$

avec :

$$k^2 = \frac{1}{sE_1C_f}\left(\frac{1}{A_s} + \frac{2}{A_p}\right)$$

$$A_r = A_s + 0{,}5A_p$$

La notion de charge critique de transfert (critical bolt load) est introduite. Elle correspond à la limite du comportement élastique de l'un des composants de l'assemblage et Volkersen [VOL38] montre que cette charge critique dépend du rapport du diamètre de la fixation sur l'épaisseur des plaques alors que Tate et Rosenfeld démontrent que cette charge critique de transfert dépend aussi du rapport diamètre de la fixation sur le pas transverse.

Approche par analogie électrique

Ross [ROS47] a développé cette méthode pour une jonction en double cisaillement pour le calcul du transfert de charge d'un éclissage (sans adhésif à l'interface) en utilisant une méthode de résolution par une analogie à un réseau maillé électrique. Cette approche est facile d'emploi pour des assemblages complexes mais nécessite des positions de fixations très ordonnées (en ligne et en rangées). On retrouve sur la figure II-11 la modélisation de l'assemblage en simple cisaillement où K_i et J_i sont les souplesses des plaques et Ci sont les souplesses des différentes fixations.

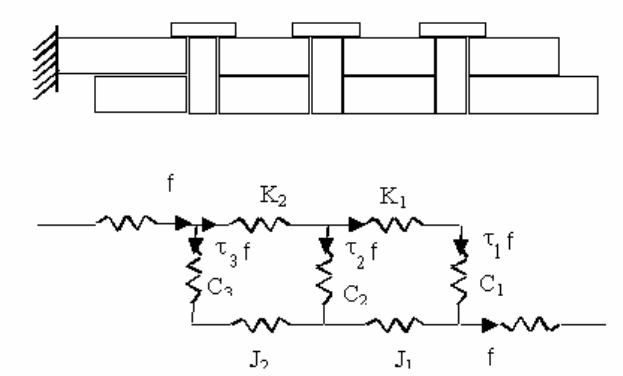


Figure I.3. *Eclissage en simple cisaillement : analogie électrique (PAROISSIEN)*

La figure I.3 [PAR06] montre que, pour chaque maille, la compatibilité des allongements peut s'écrire et que l'on peut étendre la méthode (sous forme matricielle) pour des assemblages avec une multitude de fixations. On notera enfin que cette méthode est appliquée chez AIRBUS [HUE95] de part sa facilité.

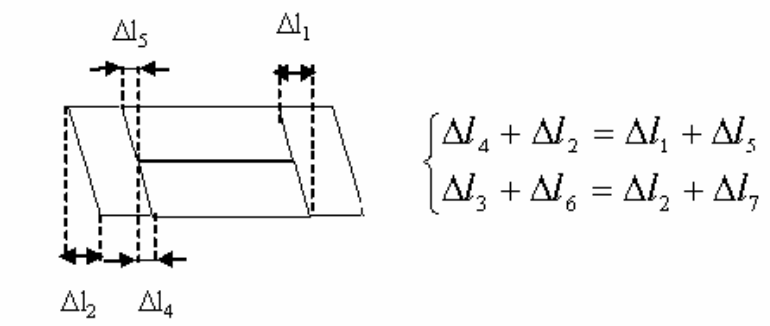


Figure I.4. *Compatibilité des allongements (PAROISSIEN*)

I.3. Concentration de contraintes dans un assemblage boulonné

La concentration de contraintes aux bords des alésages des plaques est la cause principale des fissurations dans les assemblages boulonnés aéronautiques; la rupture survenant toujours par propagation de ces fissures dans les zones les plus sollicitées. La durée de vie de l'assemblage est directement liée au coefficient de concentration de contrainte K_t qui est défini comme le rapport de la contrainte maximale en bord de trou sur la contrainte appliquée à l'infini. Barrois, en 1973 [BAR73] à partir des travaux de Théocaris [THE40] donne des formulations pour le calcul de ce coefficient de surcontrainte, en fonction du rapport λ_K du diamètre de la fixation Φ avec b la largeur de l'assemblage :

$$K_t = \frac{1+\lambda_K{}^2}{\lambda_K(1-\lambda_K)} \qquad \text{avec : } \lambda_K = \frac{\phi}{b}$$

Il donne aussi les coefficients de contrainte du au matage K_b et à la traction de la tôle en section nette K_{net} :

$$K_b = \frac{1+\lambda_K{}^2}{(1-\lambda_K)} \quad K_{net} = \lambda_K + \frac{1}{\lambda_K}$$

Mais encore : $K_b = \lambda_K K_t = \frac{\lambda_K}{(1-\lambda_K)} K_{net}$

Des paramètres technologiques de fabrication et de réalisation de l'assemblage sont introduits par Niu en 1993 [NIU93]. L'expression suivante est la somme de la contrainte de traction de la tôle au bord de l'alésage sans fixation et de la contrainte de matage (avec fixation) :

$$K_t = \alpha\beta\left(K_b \frac{\theta\tau}{\lambda_K} + K_{net}(1-\tau) \right)$$

Avec :

- α et β paramètres empiriques issus d'essais de fatigue ; α dépend de l'état de surface du trou et β varie avec le type de fixation,
- τ taux de transfert ;
- θ coefficient donné par des abaques et qui représente la distribution de matage (permet l'étude en simple et double recouvrement),
- K_b coefficient donné par des abaques et qui représente la contrainte de au matage,
- K_{net} coefficient donné par des abaques et qui représente la contrainte de traction de la tôle.

I.4. Comportement mécanique global d'un assemblage boulonné

I.4.1. Chronologie des mécanismes d'endommagement d'un assemblage boulonné

La tenue mécanique des assemblages boulonnés ont fait l'objet de plusieurs travaux dans la littérature : tenue mécanique traction–cisaillement, en dynamique, en fatigue, etc. Ces travaux ont été entrepris dans l'objectif de cerner la chronologie d'endommagement des fixations.

Les travaux de Langrand et Al. [LAN00] ont étudié le comportement mécanique d'un assemblage riveté (1 fixation) sollicité en statique sous différentes vitesses de sollicitation. Deux configurations d'éprouvettes ont été étudiées : deux éprouvettes superposées (tension punched) et deux éprouvettes en simple recouvrement (shear single) maintenues par un rivet.

Cette étude a été appliquée dans le cas de plaques en aluminium série 2024, d'épaisseur e =1,6 mm, assemblées par rivet en aluminium série 7050 à tête fraisée et soumises à un effort

de traction. L'étude porte à la fois sur une approche expérimentale et une simulation numérique.

La figure I.5 donne schématiquement l'évolution de la charge globale appliquée en fonction du déplacement. Globalement, trois zones principales sont distinguées :

(i) zone de comportement élastique

(ii) zone plastique allant de la limite élastique jusqu'à atteindre la valeur maximale F_{max}, suivie d'une chute de la charge traduisant la phase de rupture de la fixation.

(iii) Zone ultime couvrant la phase de propagation instable.

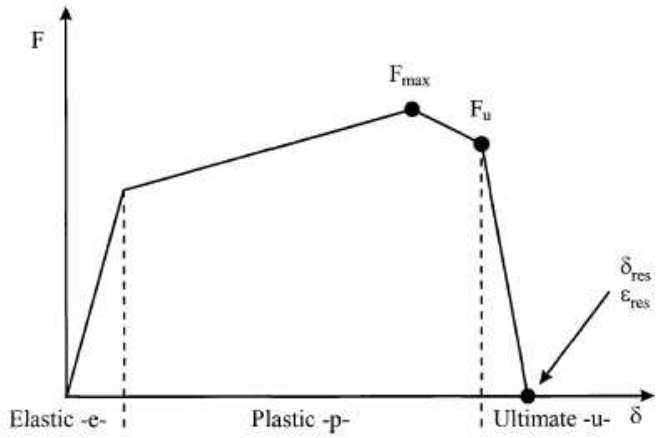


Figure I.5. *Schématisation des zones de comportement mécanique d'un assemblage boulonné*

Minguez et al. [MIN06] ont étudié la tenue mécanique d'un assemblage boulonné. La figure I.6, présentant l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement global de la structure, met en évidence différentes phases d'accommodation de la liaison : (1) frottement et glissement des tôles, (2) transfert élastique (phase précédent le matage), (3) transfert plastique (phase du flexion secondaire), (4) arrachement de l'élément et rupture de la liaison. La connaissance des différentes zones permettent de déduire la rigidité de la liaison vissée K, la limite élastique du joint et la charge à la rupture. Les résultats obtenus à partir de la simualtion numérique apparaissent en parfait accord avec les résultats expérimentaux jusqu'à la valeur maximale de la charge (phases 1-2 et 3). Néanmoins, la simulation numérique a été effectuée en utilisant une modélisation élastoplastique, ce qui limite cette investigation à la phase plastique; la phase d'endommagement n'est pas simulée (phase 4).

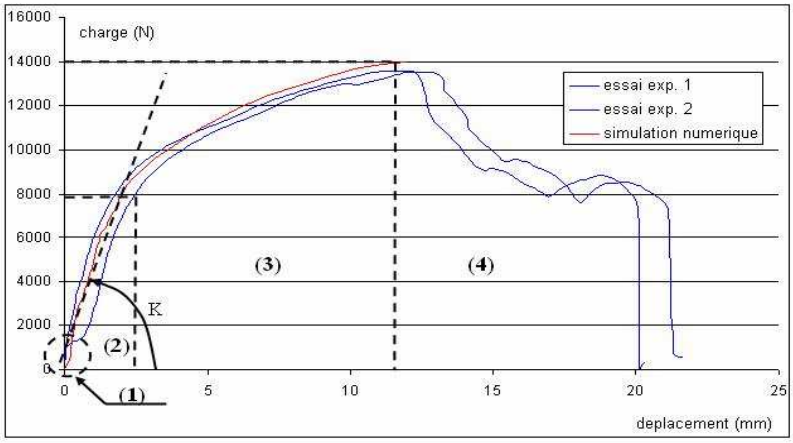


Figure I.6. *: Charge en fonction du déplacement d'un assemblage boulonné : confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique.*

I.4.2. Modes de rupture d'un assemblage boulonné

Les assemblages boulonnés sollicités en traction-cisaillement se rompent selon différents modes de rupture. Plusieurs travaux dans la littérature ont porté sur la chronologie et les mécanismes d'endommagement dans ce type de structures. Généralement, la fissure (s) (ou les fissures) s'initie au voisinage du bord de trou du fait de la concentration des contraintes; la contrainte à la rupture du matériau est dépassée dans cette zone de l'assemblage. Ensuite, la fissure se propage d'une façon stable sur certaine longueur, suivie d'une phase de propagation instable provocant la ruine de l'assemblage. Mais, la rupture peut aussi se produire au niveau de la fixation par cisaillement au plan de joint quand la valeur de la contrainte tangentielle du matériau du boulon atteint sa valeur maximale.

Les modes de rupture dans les plaques d'un assemblage boulonné dépendent, entre autres, de deux paramètres géométriques décrivant les effets du bord (Fig. I.7), définis par deux rapports :

(i) le rapport entre la largeur de la plaque W et le diamètre du trou D : W/D, qui définit le pourcentage de la zone utile de la plaque résistant à l'effort de la traction,

(ii) le rapport de la distance du centre du trou au bord libre de la plaque et du diamètre du trou : E/D qui défini le pourcentage de la zone utile de la plaque résistant à l'effort du cisaillement.

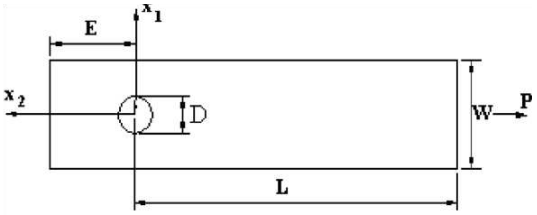


Figure I.7. *Paramétrage des effets de bord d'une plaque trouée*

Pour les assemblages boulonnés (ou rivetés), les ruptures dans les plaques sont toujours situées à partir du bord du trou. Nous pouvons citer quatre modes de ruptures souvent rencontrés (Fig. I.8) :

(i) Rupture par clivage caractérisée par une seule surface de cisaillement décrite par : Sc= (E-D/2)*t (t étant l'épaisseur de la plaque).

(ii) Rupture par cisaillement caractérisée par deux surfaces de cisaillement décrites par : Sc=2*(E*t),

(iii) Rupture par traction caractérisée par la surface : S= (W-D)*t, la direction des fissures est orthogonale à la direction de la charge appliquée.

(iv) Rupture par matage caractérisée une zone de fortement endommagée sous l'action du corps du boulon, conduisant à l'ovalisation du trou.

Il existe aussi des modes de ruptures mixtes (traction – cisaillement) où les deux fissures se propagent selon une direction quelconque.

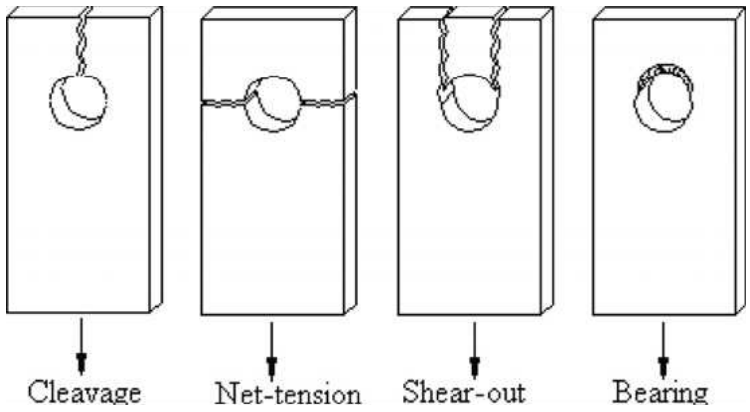


Figure I.8. *Modes de rupture dans les assemblages boulonnés*

Dans une étude sur le comportement mécanique des assemblages boulonnés de substrats en composites, Crocombe et al. [CRO05] ont montré l'influence de la valeur du couple de serrage sur le mode et la morphologie de la rupture. La figure I.9. montre des photos illustrant la topologie de la rupture en cisaillement des plaques en composites pour les quatre valeurs de

C_S. On constate un endommagement prématuré pour les faibles valeurs du couple de serrage. En effet, l'augmentation du couple de serrage se traduisant par une augmentation de l'effort appliqué localement au voisinage du trou qui s'oppose aux efforts appliqués minimisant ainsi l'effort de cisaillement, ce qui retarde la phase de la rupture finale.

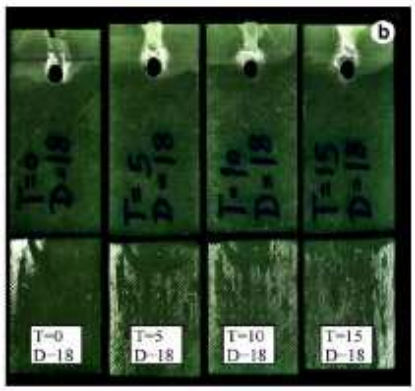


Figure I.9. *Topologie des endommagements de plaques en composites au voisinage de l'alésage*

Généralement, on peut fixer l'existence de deux modes principaux de rupture des assemblages par fixations qui sont : le matage et le cisaillement. Cela dépend de deux variantes:

- les dimensions relatives de la fixation et des plaques
- Les propriétés mécaniques des matériaux des plaques et des fixations.

Les charges maximales du matage et de cisaillement peuvent être évaluées à partir des formulations suivantes :

(i) pour le matage, la charge maximale P_{max} que peut supporter l'assemblage est donnée par : $P_{\max} = \sigma_{mat}.t.D \rightarrow \frac{P_{\max}}{D^2} = \sigma_{mat}.\left(\frac{t}{D}\right)$ où σ_{mat} est la contrainte de matage maximale.

(ii) Pour le cisaillement, la charge maximale P_{max} que peut supporter la fixation est donnée par la formule suivante $P_{\max} = F_{cis}.\left(\frac{D^2\pi}{4}\right) \rightarrow \frac{P_{\max}}{D^2} = F_{cis}.\left(\frac{\pi}{4}\right)$

F_{cis} est la contrainte de cisaillement de la fixation maximale

Pour résumer ces différents modes de ruptures, la figure I.10. présente schématiquement l'évolution du rapport (P_{max}/D^2) en fonction du rapport t/D, qui met en évidence l'existence de trois zones : (1) une zone de matage, (2) une zone de transition et (3) une zone de cisaillement pour les grandes valeurs du rapport t/D.

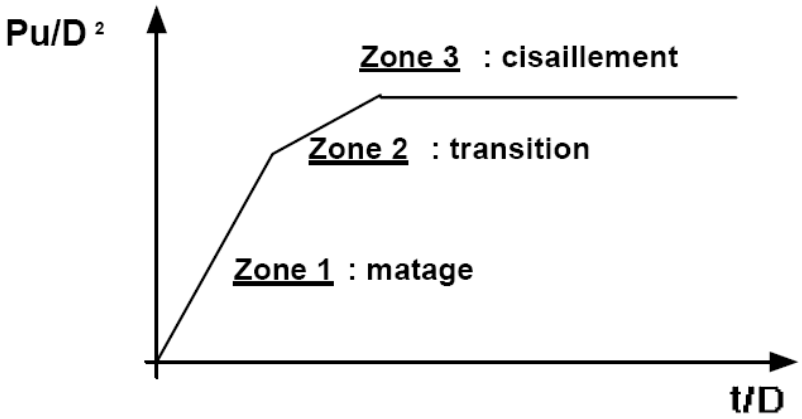


Figure I.10. *Zones de matage et de cisaillement*

I.5. L'effet du couple de serrage

I.5.1. Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension dans le boulon

Quand on serre l'écrou pour l'assemblage des plaques, on exerce sur celui-ci un couple de serrage en fixant la tête de vis jusqu'à ce que le dessous de la tête de boulon vient en contact avec la plaque A, puis la rondelle et l'écrou viennent en contact avec la plaque B.

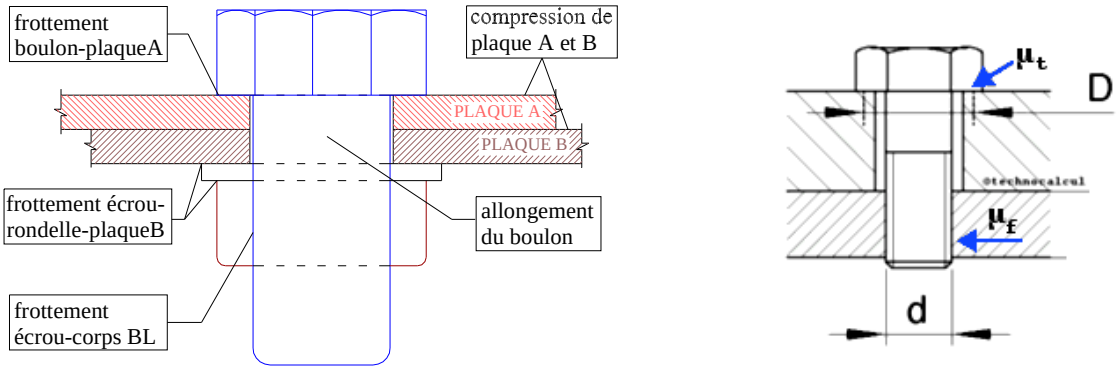


Figure I.11. *Les effets du couple de serrage*

Le couple de serrage est la résultante de quatre effets (comme indiqué sur la figure I.11).

1. Vaincre les frottements apparaissant entre la tête du boulon avec la plaque A, entre la rondelle et la plaque B, entre l'écrou et la rondelle.
2. Vaincre les frottements apparaissant entre les filetages du boulon et l'écrou.
3. Tirer sur le boulon pour l'allonger.
4. Ecraser les deux plaques A et B pour les comprimer et les maintenir.

L'effet 1 et 2 serviront à empêcher le boulon de se desserrer, car pendant la phase des serrage, ces effets sont parasites. Les deux effets sont très fortement influencés par les frottements de boulon –écrou -plaques, donc par les états de surface. L'effet 3 sert à profiter de l'élasticité du boulon pour qu'il comprime la plaque A contre la plaque B. Plus on serrera fort, plus on tirera sur le boulon, et plus on empêchera les deux plaque A et B de se décoller sous l'effet des vibrations, des variations de température, des efforts extérieurs. Mais, si on serre trop fort, on risque de trop écraser les plaques, d'allonger voire de casser le boulon. L'effet 4 est complémentaire de l'effet 3. Si le boulon est beaucoup plus résistant que les plaques, celle-ci s'écrasera beaucoup alors que le boulon s'allongera peu, et inversement.

Formule de Kellerman et Klein

Lors de la mise en place d'un boulon d'assemblage, il est primordial d'appliquer un couple de serrage adapté. Ce couple de serrage sert d'une part à mettre en tension le boulon pour tenir les éléments en contact, d'autre part à compenser les efforts additionnels éventuels dûs à des vibrations, la pression, les variations thermiques, etc. La formule de Kellerman et Klein [NOR], issue de l'analyse et de l'expérience, met en relation le couple de serrage et l'effort de tension dans le boulon, qui s'écrit sous la forme suivante:

$$C_s = K * F \qquad \text{(équation VIII-1)}$$

Le couple de serrage est constitué trois parties qui correspondent aux quatre effets exposés ci-dessus :

1. Couple de frottement de la tête de boulon, rondelle, écrou (effet 1)

$$C_1 = 1/2\ (F * \mu_t * D) \qquad \textit{(équation VIII-2)}$$

2. Couple de frottement de filetage (effet 2)

$$C_2 = 1/2(F * 1{,}166\mu_f * d) \qquad \textit{(équation VIII-3)}$$

3. Couple produisant l'allongement du boulon et l'écrasement des plaques→ couple de la réaction à la tension induit par l'inclinaison du pas (effet 3 et 4)

$$C_3 = 1/2\ (F * p/\pi) \qquad \textit{(équation VIII-4)}$$

Par conséquent, l'expression générale du couple de serrage incluant les trois parties s'écrit sous la forme suivante : $C_S = C_1 = +C_2 + C_3$

$$C_s = (p/2\pi + 0{,}583\ d\ \mu_f + D/2\ \mu_t) * F \qquad \textit{(équation VIII-5)}$$

avec :

F : effort de tension dans le boulon

C_S : le couple de serrage

p : pas du filetage

d : diamètre moyen à flanc de filet (moyen de filetage)

D : diamètre moyen sous tête de boulon (ou écrou)

μ_f : coefficient frottement dans les filets

μ_t : coefficient de frottement sous tête

$\mu = 0,10$: Lubrification adaptée et état de surface propre

$\mu = 0,15$: Lubrification sommaire

$\mu = 0,20$: Montage à sec

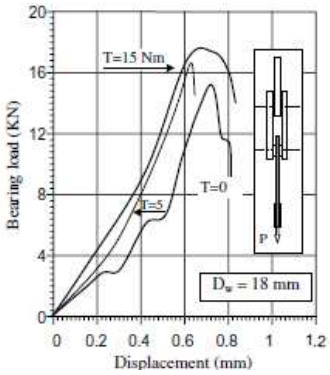
On remarque que les couples de frottement sont toujours bien plus grands que le couple utile et donc que la majeure partie du couple de serrage $\mathbf{C_S}$ sert à vaincre les frottements. La difficulté majeure du serrage par le moyen de l'application d'un couple vient de la variabilité des coefficients de frottement qui entraîne une incertitude sur la précontrainte installée. Cette situation est cependant très bénéfique pour la stabilité de l'assemblage et la sécurité au desserrage [GUI05]. Les résultats de ces expressions (entachées d'une certaine erreur due aux différentes approximations réalisées) montrent que l'erreur totale introduite reste dans tous les cas inférieure à 1 % donc tout à fait négligeable par rapport aux dispersions dues aux variations du coefficient de frottement et à l'imprécision des moyens de serrage.

I.5.2. Effet du couple de serrage

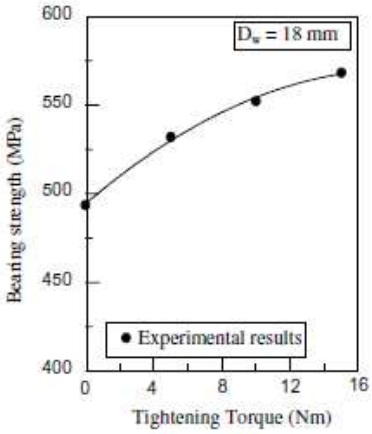
Plusieurs travaux de recherche portant sur les assemblages boulonnés ont abordé l'influence du couple de serrage sur leur comportement mécanique global sous sollicitations statiques et dynamiques.

Khassaba et col. [KHA05] ont étudié expérimentalement la tenue mécanique d'un assemblage boulonné de plaques en composites, soumis à une traction-cisaillement an analysant les effets du diamètre des rondelles (diamètre des rondelles Dr= 14, 18, 22, 27 mm) et de la valeur du couple de serrage (C_S= 0, 5, 10 et 15 Nm) .

La figure I.12 (a) montre l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement de la structure pour différentes valeurs du couple de serrage, pour un diamètre de rondelle Dr= 18 mm). On constate que l'augmentation de la valeur du couple de serrage s'accompagne d'une augmentation de la valeur la contrainte à la rupture; évolution en puissance (Fig. I.12. (b)).



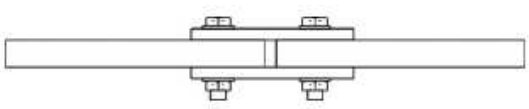
(a)



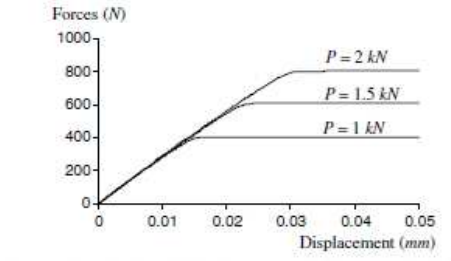
(b)

I.12. (a) : *Charge en fonction du déplacement en fonction du déplacement pour différentes valeurs du couple de serrage.* (b) : *Contrainte à la rupture en fonction couple de serrage*

Pour sa part, Crocombe et al. [CRO05] ont effectués une simulation numérique d'un assemblage boulonné de plaques en aluminium d'épaisseur e=2 mm (figure I.13. a), en introduisant trois valeurs du couple de serrage Cs= 1 – 1.5 et 2 kN. La figure I.13.b, illustrant l'évolution de la charge appliquée en fonction des déplacements, montre clairement que la charge élastique augmente avec la valeur du couple de serrage, pour une valeur du coefficient de frottement égal à 0.4.



(a)



b)

Figure I.13. (a) *Schéma de l'assemblage étudié.* (b) *Ch*arge-*déplacement pour trois valeurs de la précontrainte dans le boulon pour un assemblage boulonné (coefficient de frottement égal à 0.4)*

I.6. Simulation numérique d'une fixation

La simulation numérique des tôles assemblées par fixation (rivetés ou boulonnés) présente une difficulté au niveau de la mise en œuvre du comportement réel de la structure avec toutes les variantes qui rentrent en jeu. Il existe une modélisation simplifiée présentant la structure en 2D avec des hypothèses simplificatrices concernant le mode de transmission des charges. On peut citer le modèle type « ressort » où les plaques et les fixations sont modélisées par des ressorts sollicités dans la direction de la charge appliquée [LAN05]. En général, ce type de modèle sert essentiellement à déduire le transfert des charges. Il faut noter que le phénomène de la « flexion secondaire » ne peut pas être pris en charge.

Par ailleurs, nous retrouvons aussi des modèles représentant les plaques par des éléments « coques » (shell) et les fixations par des éléments « poutres », en introduisant des conditions de contact.

Crocombe et al. [CRO05] ont effectués une simulation d'un assemblage boulonné, à simple recouvrement, constitué de deux plaques en aluminium d'épaisseur 2 mm et d'un boulon en acier. Les auteurs ont opté pour une modélisation utilisant des éléments « coques » pour les plaques considérant que les éléments « solides » rendent la modélisation difficile. La figure I.14 (a) illustre les conditions la modélisation globale de l'assemblage en considérant les conditions de symétrie. Les précontraintes dû au couple de serrage appliqué sur le boulon sont modélisées par des pressions. Pour une précontrainte égale à 1500 N, les auteurs ont vérifié l'influence de la valeur du coefficient de frottement au niveau des contacts sur la d'évolution de la charge globale appliqué en fonction du déplacement de la structure. En effet la phase élastique augmente avec la valeur du coefficient de frottement (μ= 0.4 – 0.6 et 0.8) (Fig. I.14 (b)).

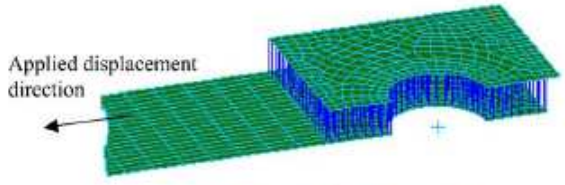


Fig. 2. FE model of the preliminary joint specimen.

(a)

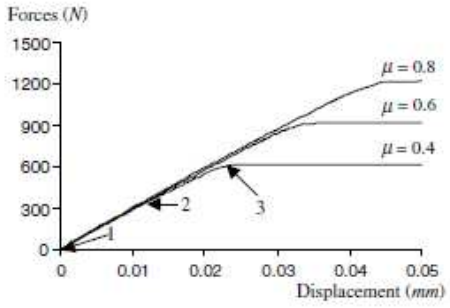
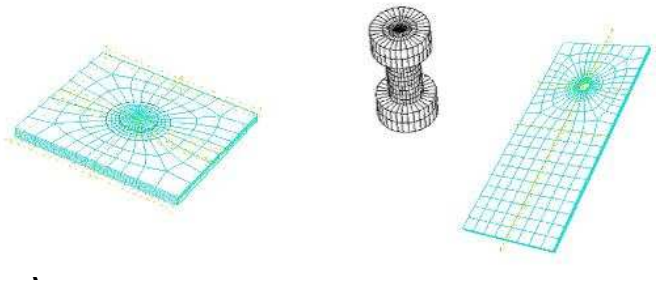


Fig. 3. The variation of joint force with displacement for different coefficients of friction (preload = 1.5 kN).

(b)

Figure I.14. *(a) Modélisation des plaques . (b) Influence du coefficient de frottement*

La difficulté de la modélisation numérique est de rendre de façon similaire, compte du comportement des tôles, des mouvements du boulon notamment lors de l'essai de cisaillement en simple recouvrement. La complexité de ce modèle est principalement due à l'ensemble des phénomènes impliqués dans son fonctionnement car l'excentricité des charges génère des flexions secondaires créant des contraintes non linéaires aux plaques assemblées, et forçant la rotation des fixations [ESQ05].
La prise en compte des mouvements relatifs des éléments antagonistes de la liaison amène à définir différentes zones dans lesquelles le contact devra être considéré de façon différente.
Un autre paramètre non négligeable de l'assemblage boulonné provient du fait que le couple de serrage a une valeur bien précise et de ce fait génère une précontrainte dans l'assemblage. Afin d'imposer cette précontrainte dans le modèle, les tôles sont alors sollicitées en compression et l'élément de fixation en traction [MCC05]. Le maillage des pièces (figure I.15) est réalisé en utilisant des éléments volumiques quadratiques à 8 nœuds avec intégration réduite.



(c)

Figure I.15. *Maillage de l'éprouvette*

La figure I.16 montre une confrontation des résultats issus d'une simulation numérique d'un assemblage par fixation (rivets) et des résultats expérimentaux en termes de courbes charge-déplacement [LAN00]. Dans cette étude, la simulation numérique est effectuée en utilisant un modèle basé sur l'endommagement ce qui explique une description globalement correcte.

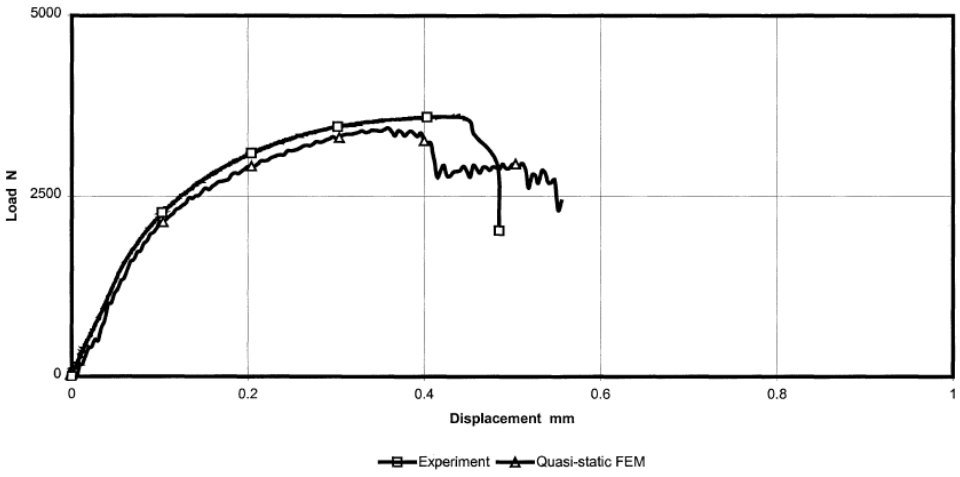


Figure I.16. – *Comparaison expérience/simulation numérique*

Chapitre II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

II.1. Objectifs et stratégie de l'étude expérimentale
II.2. Caractéristiques des matériaux
II.3. Procédure expérimentale des essais sur les assemblages
II.3.1. Eprouvettes et machine
II.3.2. Technique d'Emission Acoustique
II.3.2.1. Définition
II.3.2.2. Objectifs
II.3.2.3. Acquisition de signaux – instrumentation
II.3.2.3.1. Sources d'Emission Acoustique
II.3.2.3.2. Capteurs
II.3.2.3.3. Pré-amplificateur
II.3.2.3.4. Système d'acquisition
II.3.2.4. Limitations et avantages
II.3.2.5. Paramétrage d'acquisition
II.3.2.6. Paramètres d'analyse
II.3.2.7. Technique de localisation planaire
II.3.2.7.1. Elaboration des évènements
II.3.2.7.2. Algorithme de localisation
II.3.2.7.3. Elaboration des évènements localisés
II.3.2.7.4. Description de la localisation plane
II.3.3. Technique de Corrélation d'image Digitale (CID)
II.3.3.1. Objectifs
II.3.3.2. Protocole expérimental
II.3.3.3. Le calcul du champ de déplacement
II.3.3.4. Le calcul du champ de déformation
II.3.4. Conditions d'essais et configurations étudiées
II.3.4.1. Explication des jeux
II.3.4.2. Position des capteurs

II.1. Objectifs et stratégie de l'étude expérimentale

Cette partie est consacrée à la présentation des éléments relatifs à l'approche expérimentale utilisée dans la thèse portant sur la tenue mécanique des assemblages boulonnés. Nous avons effectué des essais de traction-cisaillement sur des plaques, en d'alliage aluminium 6082 T6, assemblées par boulons. Deux familles d'éprouvettes ont été utilisées. Une première famille utilisée par le « Standard National Aérospatial Militaire » mais aussi civil des Etats-Unis (NASM1312-4). Une deuxième famille, couramment employée dans le domaine aéronautique, permet d'étudier les effets de bord.

Les essais mécaniques ont été réalisés sur ces deux types d'éprouvettes afin de vérifier l'influence sur le comportement mécanique global, du :

- nombre de fixations (une, deux et trois fixations),
- jeu entre le boulon et l'alésage des plaques,
- couple de serrage.

En plus des mesures globales données par la machine de traction (force et déplacement), nous avons utilisé deux systèmes de mesure plus localisés pour mieux comprendre l'ensemble des mécanismes de déformations et d'endommagement qui ont lieu dans l'assemblage boulonné. Un système d'exploitation d'**E**mission **A**coustique (E.A.) est utilisé simultanément avec un système de caméra de **C**orrélation d'**I**mages **D**igitales (C.I.D). Ces deux dispositifs couplés permettent de suivre en temps réel les activités du matériau dues aux déformations, frottement, glissement, matage, craquelures, propagation de fissure, etc. Cette analyse combinée des données de ces deux techniques est utilisée pour :

- Identifier les différentes phases de comportement global et la chronologie d'endommagement d'un assemblage boulonné.
- Détecter le point d'amorçage et la phase de propagation de fissure.

Ces éléments sont nécessaires pour constituer une banque de données qui permettra de valider la simulation numérique.

Par ailleurs, la morphologie des ruptures dans les substrats a été analysée en utilisant des observations macro et micrographiques.

II.2. Caractéristiques des matériaux

Pour étudier des assemblages boulonnés dans le domaine aéronautique, le matériau choisi est un alliage d'aluminium 6082 T6 (série 6xxx souvent utilisée dans ce domaine). Ce matériau possède une bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement). Il possède également une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Les tôles sont obtenues par laminage ce qui leur confère des caractéristiques particulières dans les

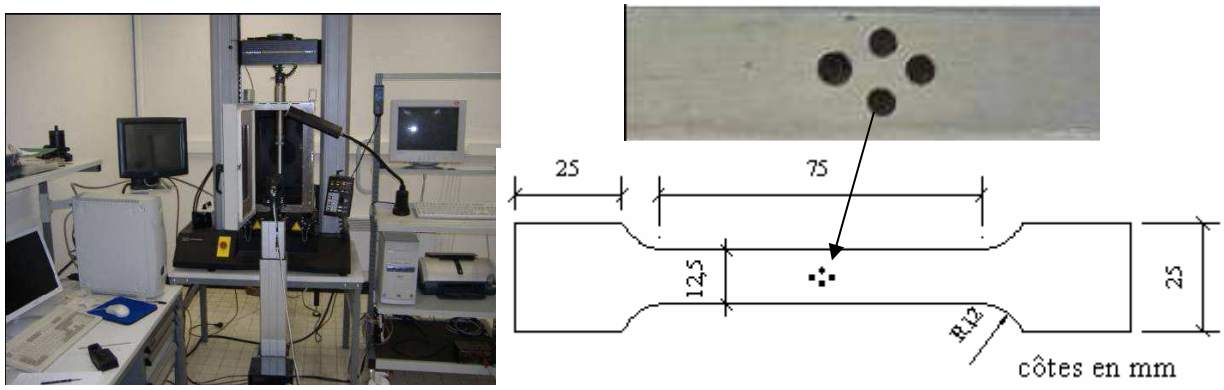
deux directions. Seule une direction sera privilégiée : celle du sens long (même comportement que dans le sens travers).

Les éléments prépondérants de cet alliage d'aluminium sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). La composition chimique est donnée par le *Tableau II-1*.

	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Autre chaque	Autre total	Al
Min	0,7	0,6	/	/	0,4	/	/	/	/	/	95,2
Max	1,3	1,2	0,5	0,1	1,0	0,25	0,2	0,1	0,05	0,15	98,3

Tableau II-1. *Composition chimique en pourcentage massique de l'aluminium 6082-T6*

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques globales de ce matériau, nous avons effectué des essais de traction simple sur des éprouvettes de type «haltère» usinées dans des tôles d'aluminium (sens long) série 6082T6. La géométrie des éprouvettes est décrite dans la figure II-1. La machine d'essais a été pilotée en déplacement imposé avec une vitesse de déplacement de la traverse fixée à 1 mm/min. Pour vérifier la reproductibilité des essais, quatre éprouvettes sont testées jusqu'à rupture. Les essais de traction monotone ont été effectués l'aide d'une machine de traction électromécanique de type INSTRON 5500 de capacité 10 kN. Deux techniques ont été utilisés pour suivre les déplacements locaux sur les éprouvettes : une technique sans contact (dispositif de vidéo-traction) et une technique avec contact (extensométrie). Les figures II-1 et II-2 montrent les détails des deux techniques ainsi que le dispositif expérimental. Le dispositif de vidéo-traction utilise quatre marqueurs situés sur la partie centrale de l'éprouvette comme indiquée sur la figure II-1 (b) afin de mesurer les déformations longitudinales et transversales.

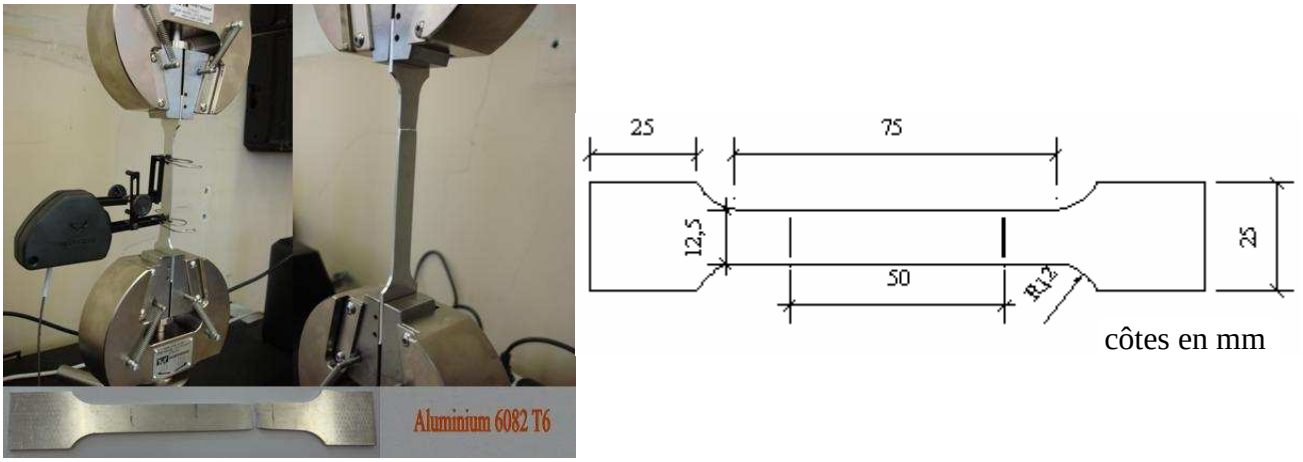


(a) (b)

Figure II-1. *(a)- Equipement de vidéo traction, (b)- détails de l'éprouvette haltère*

Pour le dispositif d'extensomètrie (figure II-2.a), le capteur à lames est disposé au niveau de la longueur utile (Lu = 50 mm), comme indiqué dans la figure II-2.b.

Il est à noter que les deux techniques donnent des résultats similaires.



(a) (b)

Figure II-2. *(a)- Essai de traction d'éprouvette haltère mesuré par l'extensomètre (b)- détails de l'éprouvette*

La figure II-3 donne la courbe contrainte vraie – déformation vraie qui présente un comportement élasto-plastique du matériau.

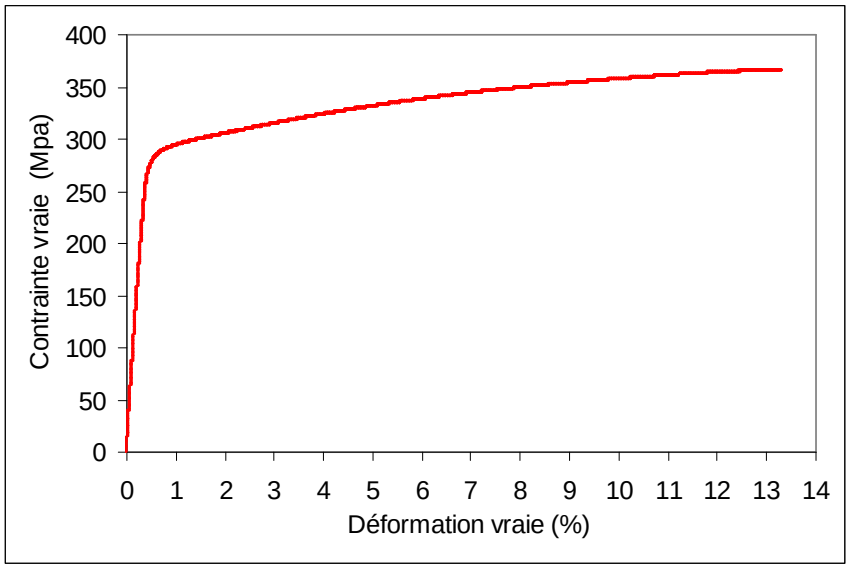


Figure II-3. *Comportement en traction de alliage aluminium 6082 T6*

Le comportement de matériau est modélisé par une loi puissance du type Ramberg-Osgood sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \\ \sigma = E.\varepsilon_e & \text{pour } \sigma \leq \sigma_e \\ \sigma = \sigma_e + K\varepsilon_p^{\,n} & \text{pour } \sigma > \sigma_e \end{cases}$$

Avec ε_e : la déformation élastique vraie
ε_p : la déformation plastique vraie
σ_e : la contrainte à la limite d'élasticité
E : le module d'Young
n, K : coefficient d'écrouissage

Les caractéristiques mécaniques usuelles du matériau sont données dans le tableau II-2.

E (MPa)	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{limite_élastique}$ (%)	$\varepsilon_{rupture}$ (%)	K (MPa)	n
69000	260	366	0,41	13,3	455	0,10

Tableau II-2. *Caractéristiques mécaniques du substrat*

Les boulons utilisés sont en acier inoxydable, ISO 4762 - M8 x 20 - 8x8, dont les dimensions sont :



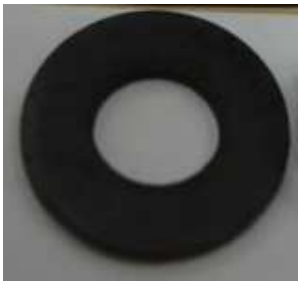
- Diamètre nominal du boulon : 7,9 mm
- Diamètre d'appui intérieur du boulon = 8 mm
- Diamètre d'appui extérieur du boulon = 12,8 mm
- $R_m \approx 800$ MPa, $R_e \approx 640$ MPa,
- Limite conventionnelle d'élasticité $R_{P0,2} \approx 640$ MPa

L'écrou hexagonal ISO 4032 M8 - 8, dont les dimensions sont :



- Contrainte minimale à la traction ≈ 800 MPa,
- Pas = 1,25 mm
- Diamètre minimal surface appui = 8,75 mm
- Diamètre maximal surface appui =11,6 mm
- Epaisseur = 6,8 mm

La rondelle plate selon norme NF EN ISO 7089 - 8 – 200 HV, dont les dimensions sont :



- Diamètre minimal = 8,4 mm
- Diamètre maximal =15,57 mm
- Epaisseur = 1,6 mm

Figure II-4. *Vis, écrou et rondelle*

II.3. Procédure expérimentale des essais sur les assemblages

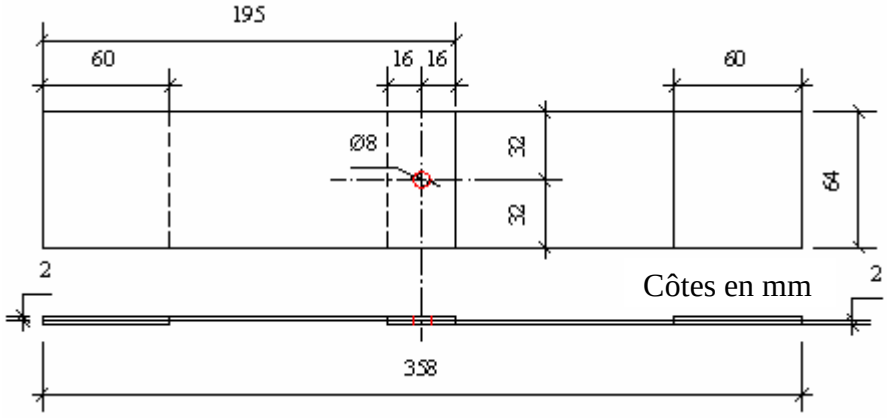
II.3.1. Eprouvettes et machine

L'épaisseur de la tôle utilisée pour la fabrication des éprouvettes est de deux millimètres. Deux types d'éprouvettes ont été testés en simple recouvrement. Une première famille *(figure II-5a)* dont les caractéristiques géométriques sont fixées selon la norme NASM

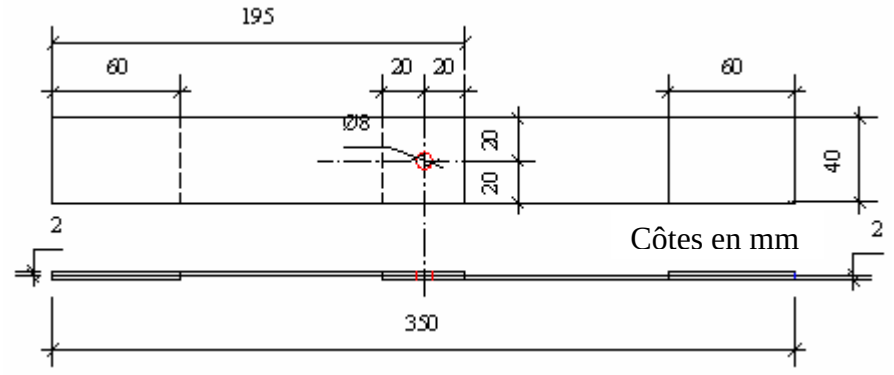
1312-4 où les distances du centre de l'alésage par rapport aux bords libres sont déterminées en fonction du diamètre du standard (en détail : la largeur de l'éprouvette vaut 8.d, la distance du centre de deux alésages vaut 4.d, la distance du centre de l'alésage aux bords libres vaut 2.d, où d est le diamètre de l'alésage). Une seconde famille dont les caractéristiques géométriques sont données par une distance du centre de l'alésage aux bords libres qui vaut 2.5.d, et une largeur qui vaut 5.d. Cette famille (*figure II-5b*) a été envisagée afin d'étudier l'influence des effets de bords sur le comportement global de l'assemblage.

Le diamètre de l'alésage de la plaque varie de 8 à 8,4 mm afin d'étudier les influences du jeu (j=0,4 – 0,6 – 0,8 – 1 – 1,2mm). Le couple de serrage des boulons est introduit à l'aide d'une clé dynamométrique de précision. Cinq valeurs du couple de serrage des écrous ont été retenues : 2daN.m – 2,5 daN.m - 3daN.m – 3,5 daN.m et 4 daN.m. Pour éviter les effets du matage des plaques sous la tête de l'écrou, une rondelle d'appui a été disposée.

(a)



(b)



(a) norme NASM 1312-4, (b) norme usuelle

Figure II-5. *Deux types d'éprouvette d'un assemblage boulonné (une fixation)*

Trois configurations d'assemblages ont été étudiées : assemblage avec une fixation, deux fixations verticales, deux fixations horizontales et trois fixations verticales *(figure II-6 a,b,c).*

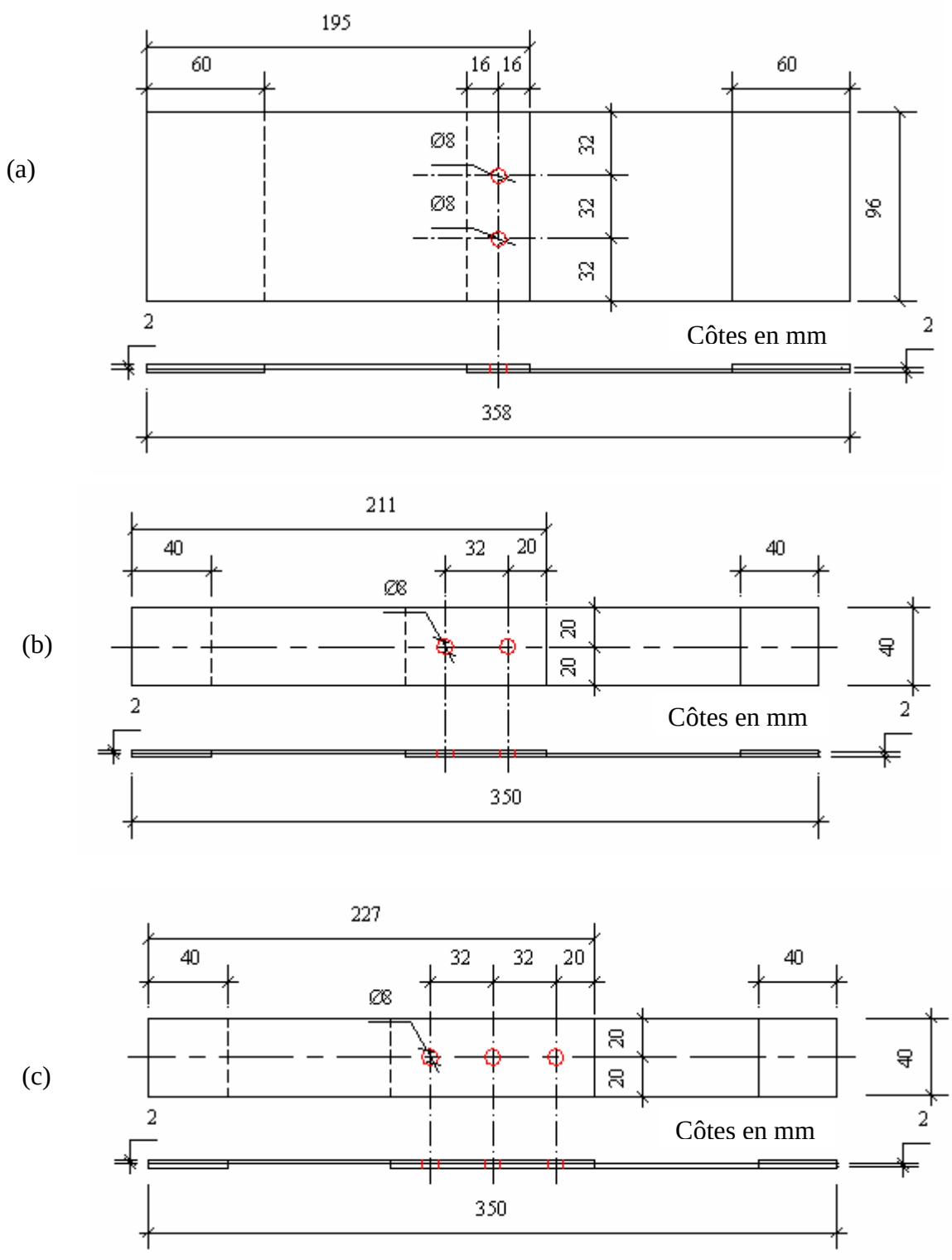


Figure II-6. *Différentes configurations étudiées.*

Les essais mécaniques de traction-cisaillement ont été effectués l'aide d'une machine de traction électromécanique de type INSTRON de capacité 30 kN (figure II-7).



Figure II-7. *Dispositif d'essais*

II.3.2. Technique d'Emission Acoustique

II.3.2.1. Définition

L'Emission Acoustique (EA) est une technique qui permet d'étudier les phénomènes de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des microdéplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation (Norme AFNOR NFA 09350).

II.3.2.2. Objectifs

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé la technique EA pour deux objectifs :

- Identifier les différentes phases de comportement de l'assemblage boulonné (élasticité, glissement, plasticité, endommagement,…), afin d'établir les processus chronologiques de ces phases de comportement. Pour caractériser le signal EA, il existe un grand nombre de paramètres, qui lorsque la salve est numérisée, sont extraits, calculés et présentés pour affichage selon le mode choisi par l'utilisateur. Nous avons fait le choix de ne traiter que quelques paramètres (les plus importants) du signal enregistré à savoir l'amplitude, l'énergie, la fréquence, le nombre de coups, le nombre des salves et la durée. Leurs exploitations nous permettent d'établir des signatures acoustiques qui décrivent le processus chronologique du comportement de l'assemblage que nous appellerons phases. Les frontières de ces phases seront déterminées avec précision.

- Détecter le point amorçage et suivre la propagation des fissures dans les assemblages étudiés. Le logiciel d'EA permet de localiser l'origine des événements. Pour cela, il faut au moins de 3 capteurs. Dans notre cas, nous avons utilisé quatre capteurs répartis autour du boulon (cf figure II-16). La position de ces capteurs est renseignée par nos soins dans le

logiciel, ce qui lui permet de situer dans un plan les capteurs. Pendant l'essai, la procédure de localisation est effectuée de la même manière par le logiciel. Lorsque les différents capteurs détectent un signal séparé de quelques microsecondes, le logiciel détermine cet/ces intervalle(s) de temps et grâce à la vitesse de propagation des ondes dans le matériau, il en déduit une/des distance(s) qui représente(nt) le(s) lieu(x) possible(s) entre l'événement(s) et le/les capteur(s) considéré(s). Il recoupe les données des capteurs et retrouve les coordonnées du point d'émission. Grâce à cela, nous pouvons déterminer à quel moment et où se passe l'amorçage et suivre les localisations au fil du temps. Cela nous permet temporellement de suivre le chemin de la déchirure. La détermination de l'amorçage et de la propagation des fissures est une combinaison entre la technique de localisation de l'EA et de l'analyse des champs de déformation autour du boulon par la technique de corrélation d'images digitales.

II.3.2.3. Acquisition de signaux – instrumentation

De part les mécanismes physiques mis en jeu et la diversité des sources émissives d'EA, cette technique impose une instrumentation spécifique. Pour ce travail, la figure II-8 représente les différents éléments (matériau, instrumentation d'EA) et par là même, les différentes fonctions de transfert qui entrent en jeu de la source jusqu'au système d'acquisition d'EA.

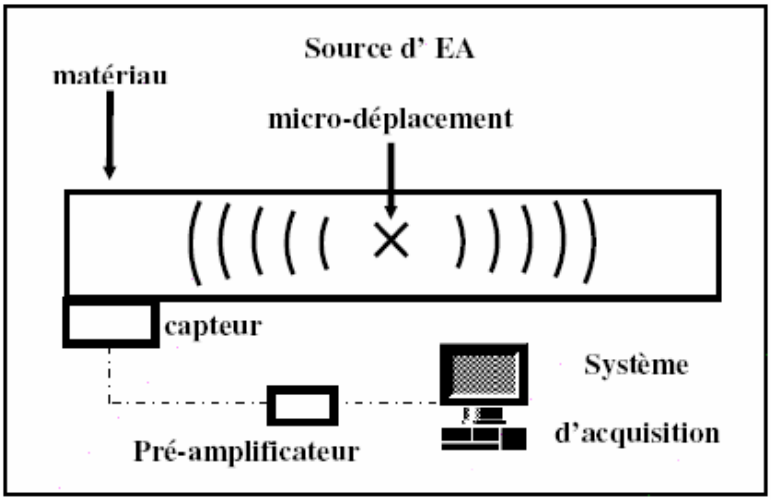


Figure II-8. *Principe d'acquisition d'émission acoustique*

II.3.2.3.1. Sources d'Emission Acoustique

Lorsqu'un matériau, qui présente un défaut, est soumis à une variation de contrainte et si ce défaut évolue sous l'effet de cette sollicitation, ce défaut devient source d'EA en donnant naissance à des ondes élastiques transitoires, qui se propagent au sein du matériau. Cette énergie libérée par vibration se nomme onde élastique transitoire ultrasonore (de l'ordre du nanomètre et d'une gamme de fréquence de l'ordre de 150 kHz).

La détection de signaux d'EA appelés salves, permet de déceler en temps réel l'existence d'un défaut évolutif. Cependant, l'EA ainsi générée est irréversible. Si la structure est de nouveau sollicitée, aucune activité ne sera détectée jusqu'à ce que le niveau de contrainte dépasse celui atteint précédemment : c'est l'effet Kaiser. Par ailleurs, lorsqu'une structure est sollicitée à intervalles réguliers au même niveau de contrainte, l'EA détectée caractérise la propagation des défauts dans les conditions de service entre les deux cycles de sollicitation. L'exploitation de l'effet Kaiser constitue la base d'un contrôle non destructif périodique. Pour un événement (évolution unitaire d'une source d'EA donnant lieu à plusieurs salves), la mesure des différents temps d'arrivée des salves détectées par plusieurs capteurs, permet de calculer la localisation de la source d'EA selon des algorithmes bien connus de triangulation en deux dimensions ou trois dimensions .

II.3.2.3.2. Capteurs

Le premier filtre rencontré par le signal est constitué du matériau lui-même. En effet, les ondes élastiques subissent de considérables modifications lors de leur propagation. Le choix du capteur est adapté en fonction du type de source à étudier, des caractéristiques environnementales, de la sensibilité, et en fonction du filtrage fréquentiel induit par la propagation dans le matériau.

Les capteurs sont utilisés en EA sont de type piézo-électrique. Ils ont pour rôle de transformer ce mouvement vibratoire en signal électrique. Ils sont constitués d'une céramique piézo-électrique qui, lorsqu'elle est en contact avec le matériau va convertir les ondes mécaniques en signaux électriques. La localisation de source d'EA dans un matériau s'effectue en utilisant plusieurs capteurs (au moins deux). Une disposition particulière de ces capteurs sur la structure, définissant ainsi une maille de localisation adaptée à la géométrie, taille, etc., du matériau permet alors de calculer et de visualiser, la position des sources d'émission acoustique. La bonne transmission des ondes mécaniques entre le matériau et le capteur est assurée en général par l'intermédiaire d'un couplant acoustique (type graisse).

II.3.2.3.3. Pré-amplificateur

Ces ondes mécaniques reçues par le capteur sont converties en signaux électriques (niveaux de tension générés sont de faible puissance) au système d'acquisition. Il est alors nécessaire d'amplifier, de filtrer éventuellement en fréquence (filtre passe bande) et de conditionner le signal (adaptation d'impédance pour le transport du signal, sur parfois de longue distance). C'est le rôle du préamplificateur qui transmet ce signal au système d'acquisition.



Figure II-9. *Capteurs et système d'acquisition EA*

II.3.2.3.4. Système d'acquisition

Ce dernier permet la gestion de la configuration du système (paramètres d'acquisition, visuels type graphiques, de localisation), mais également l'analyse par extraction des caractéristiques EA lorsque la salve est numérisée. Le stockage des données est également assuré par le système d'acquisition.

II.3.2.4. Limitations et avantages

Limitations :

- la structure doit être mise sous contrainte,
- le capteur doit être en contact ou couplé acoustiquement au matériau,
- méthode sensible uniquement aux défauts évolutifs et aux transformations irréversibles (effet Kaiser),
- ne donne pas d'indication sur la taille ou la géométrie des défauts.

Avantages :

- sensibilité élevée,
- détection en temps réel (alarme avant rupture),
- détection à distance (possibilité de détecter des défauts dans des endroits inaccessibles),
- sensible aux défauts évolutifs, permet le suivi en temps réel,
- méthode globale et rapide (examen de la totalité d'une structure en un seul essai),
- s'applique à l'étude d'un grand nombre de matériaux,
- permet la surveillance permanente.

II.3.2.5. Paramétrage d'acquisition

Préalablement à toute acquisition, il est nécessaire de définir un seuil de détection (en dB_{EA}) en dessous duquel aucune salve ne sera détectée par le système d'acquisition utilisé

dans l'environnement déterminé. Cette valeur de seuil est choisie en fonction du niveau du bruit de fond mais surtout en fonction de ce que l'on veut entendre avec l'EA (déformations plastiques, frottements, fissures,…). Un seuil trop bas enregistrerait des informations inutiles (bruit de fond) et un seuil trop haut nous ferait perdre des informations. Nous avons utilisé la valeur de seuil égale à 32 $dB_{EA.}$ Le seuil d'acquisition permet de définir le début d'une salve et par la même, son franchissement signifie le début des calculs pour les caractéristiques EA.

II.3.2.6. Paramètres d'analyse

Afin de caractériser le signal EA, il existe un grand nombre de paramètres, qui lorsque la salve est numérisée, sont extraits, calculés et présentés pour affichage selon le mode choisi par l'utilisateur.

Ces paramètres sont définis de la façon suivante :

- Chan : numéro de capteur qui enregistre un signal
- Hit : définit une salve
- Amax (dB_{EA}) : amplitude maximale du signal pendant toute la durée de la salve
- R = temps de montée (µs) : intervalle de temps qui sépare le premier dépassement du seuil de l'instant où l'amplitude maximale est atteinte
- D = durée (µs) : intervalle de temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil de la salve
- Count = nombre de coups (sans dimension) : nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse la valeur du seuil
- E = énergie absolue ou énergie d'EA, (unité d'énergie 1 eu =1 aJ = 10-18 J) : l'intégrale du signal au carré sur la durée de la salve
- f = fréquence au pic ou fréquence maximum (kHz) : fréquence au maximum de la transformée de Fourier discrète de la salve.

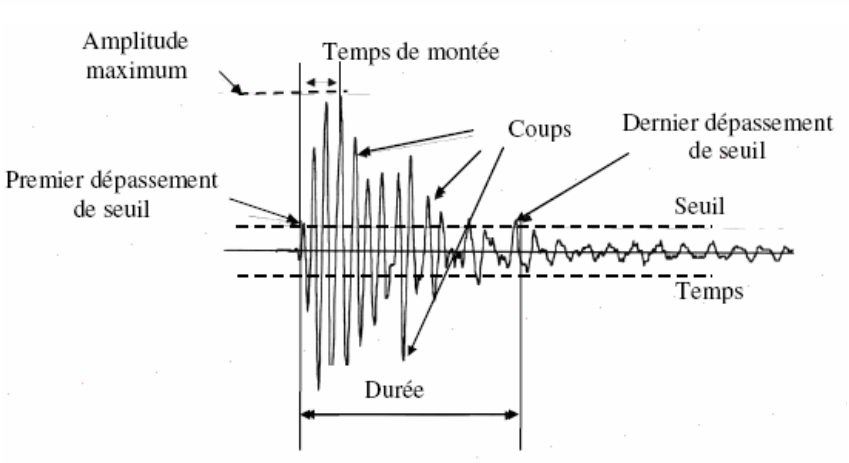
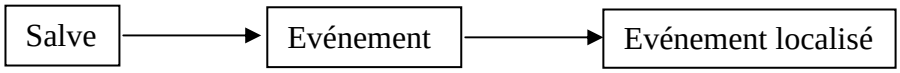


Figure II-10. *Les paramètres d'onde acoustique sur une salve*

II.3.2.7. Technique de la localisation planaire

II.3.2.7.1. Elaboration des événements



Un événement est un groupe de salves qui naît d'une même source. La construction de cet élément est bâtie sur trois critères temporels qui sont renseignés par l'utilisateur. Après ce filtrage un événement sera caractérisé par une famille de salves avec indication du/des capteurs qui ont eux-mêmes identifiés les salves.

- FHCDT - First Hit Channel Discrimination Time (ms) est utilisé pour diviser des événements et identifier une première salve. La première salve est détectée lorsque l'intervalle de temps à la salve précédente est supérieur FHCDT.

- DT1X-MAX (ms) : intervalle maximal de temps entre la première et dernière salve dans un événement. L'événement est fermé si le temps différent entre la nouvelle salve et la première salve est supérieur DT1X-MAX.

- DTNX-MAX (ms) : intervalle maximal de temps à la salve précédente. L'événement est fermé si le temps différent entre une nouvelle salve et la salve précédente est supérieur DTNX-MAX.

Les phénomènes à étudier se situent sur la zone de recouvrement des deux plaques. On retrouve sur la figure II-12a, les différentes longueurs à prendre en compte. Il est normal d'y placer les quatre capteurs et d'usage d'appliquer les règles suivantes :

- si les distances entre les capteurs sont plus petites que les distances de la zone d'étude, alors FHCDT = 2 ou 3 x (distance maximale entre capteur / la vitesse d'onde),
- si les distances entre les capteurs sont proches des valeurs des distances de la zone d'étude, alors FHCDT = 1,5 x (distance maximale entre capteur / la vitesse d'onde).

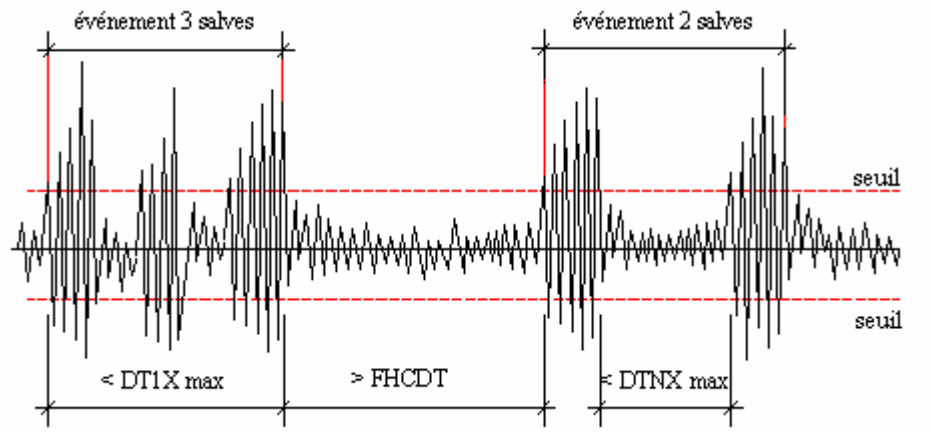
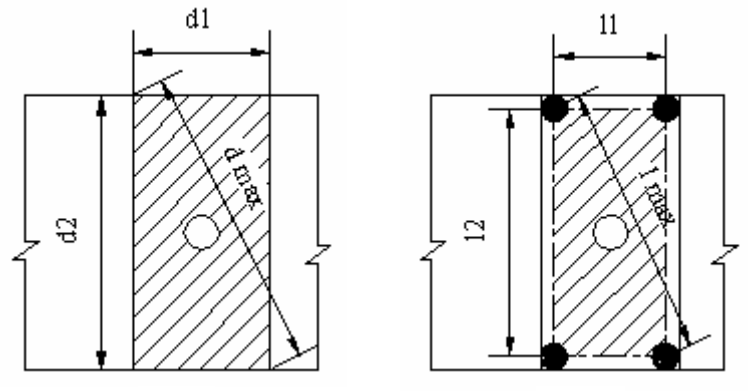


Figure II-11. *Détermination d'un événement*

Nos cas d'études seront dans ce deuxième cas, on appliquera alors la règle l1 ≈ d1, l2 ≈ d2, lmax ≈ dmax (figure 12). Les valeurs de DT1X –Max, DTNX-Max et FHCDT sont identiques.



(a) (b)

Figure II-12. *(a)-zone de recouvrement , (b)-zone de détection*

Pour notre étude, la vitesse de propagation d'une onde dans l'alliage aluminium vaut 5000 m/s.

Les valeurs de ces trois critères temporels dépendent la géométrie d'éprouvette. On retrouve, dans le tableau II-3, les valeurs de ces trois paramètres en fonction de l'essai à réaliser, donc du type d'éprouvettes. Ces valeurs ne sont pas figées : elles permettent d'initialiser le calcul. Une étude de sensibilité permet d'ajuster ces paramètres. Cet ajustement est terminé lorsque l'on retrouve les mêmes événements en faisant varier ces paramètres temporels.

Type d'éprouvette	Distance maximale de détection, lmax (cm)	FHCDT=DT1X=DTNX = 1,5 x lmax / vitesse (ms)
1 fixation, modèle a, norme NASM	6,36	0,019
1 fixation, modèle b, norme usuelle	4,81	0,014
2 fixations verticales	8,20	0,025
2 fixations horizontales	9,37	0,028
3 fixations verticales	10,7	0,032

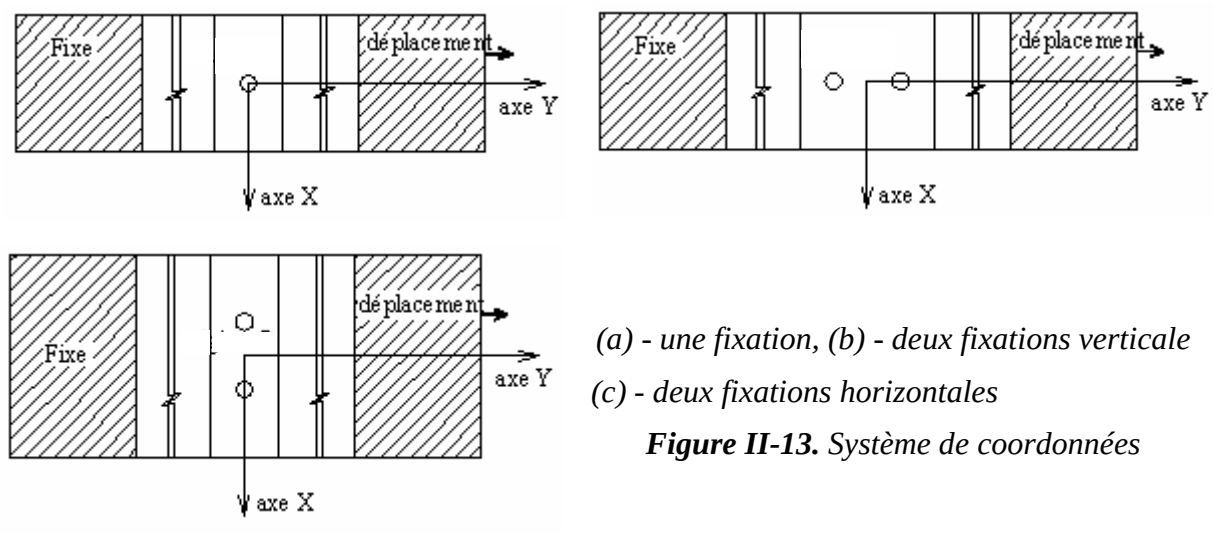
Tableau II-3. *Valeurs des critères temporels en fonction de la géométrie*

II.3.2.7.2 Algorithme de localisation

L'algorithme de localisation permet de trouver les positions des sources. Pour alimenter l'algorithme de localisation, il faut obtenir des événements, spécifier la position des capteurs et la vitesse d'onde. L'algorithme est choisi après la géométrie d'éprouvette. Nous avons utilisé l'algorithme de localisation plane avec une propagation d'onde dans deux directions.

On retrouve sur la figure II-13 les axes orientés X et Y qui permettent de définir ce plan. Le nombre minimal de salves est trois pour la naissance d'un évènement. La méthode du gradient itératif est utilisée. Les résultats calculés sont les coordonnées X et Y de localisation ainsi le paramètre Lucy.

Lucy (Location Uncertainty) est un paramètre qui renseigne sur la précision du calcul de localisation. Du point de vue pratique, ce paramètre doit être proche de zéro (grande précision). Si cette valeur est plus grande, supérieur ou égal à cinq millimètres pour nos cas d'étude, il y a une grande incertitude sur la position de la localisation. Ce paramètre n'est donné que si le même événement est « entendu » par trois capteurs au moins. Dans le cas contraire, la valeur de Lucy vaut -1 ce qui signifie que le calcul a échoué malgré la « présence » d'un événement.



(c)

(a) - une fixation, (b) - deux fixations verticale
(c) - deux fixations horizontales

Figure II-13. *Système de coordonnées*

On retrouve sur la figure II-14, le résultat graphique de l'analyse de localisation pour un événement donné. On distingue la position des capteurs (au nombre de quatre), l'abscisse représente l'axe x et l'ordonnée représente l'axe y. La localisation se trouve au plus proche des intersections des hyperboles (en localisation planaire). Une hyperbole représente dans le plan, pour un binôme de capteurs (le premier capteur est celui qui a détecté en premier l'onde, et le deuxième capteur est celui qui a détecté cette même onde en deuxième), le lieu possible de cet événement. L'ensemble des hyperboles tracées représente les lieux de cet événement. La position de la localisation se trouve au plus proche de l'intersection de ces hyperboles. La valeur du paramètre Lucy est alors un indicateur sur la dispersion de ces intersections.

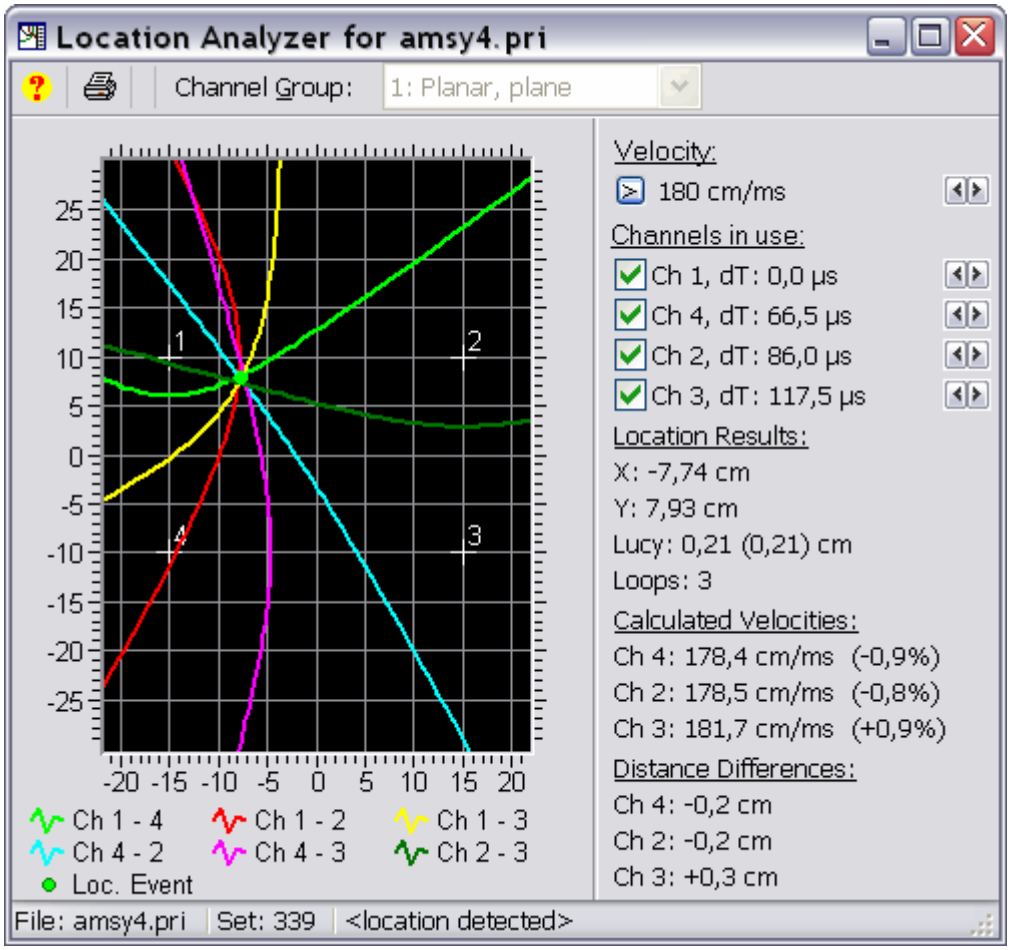


Figure II-14. *Résultat graphique d'une analyse de localisation*

II.3.2.7.3 Elaboration des événements localisés

Un événement localisé est un événement dont le nombre des salves est supérieur ou égal à un nombre minimum déterminé. Notre utilisons l'algorithme planaire où le nombre minimum des salves vaut trois

II.3.2.7.4 Description de la localisation plane

Le logiciel d'EA permet de localiser l'origine des événements. La position de ces capteurs est renseignée par nos soins dans le logiciel, ce qui lui permet de situer dans un plan (0, x, y) la position des capteurs. On effectue ensuite une procédure automatique de calibration, i.e. chaque capteur devient émetteur tour à tour. Le capteur 1 (le capteur 1 est maître (master), les autres sont esclaves (slaves)) émet quatre bips à une seconde d'intervalle puis c'est le deuxième capteur et ainsi de suite. Ce signal émis est reçu par tous les capteurs. Le décalage dans le temps de réception de ce signal par les autres capteurs permet de calculer la vitesse de propagation d'une onde dans le matériau.

Pendant le test, la localisation est effectuée de la même manière par le logiciel. Lorsque trois capteurs captent un signal séparé de quelques microsecondes, il calcule l'intervalle de temps et grâce à la vitesse de propagation dans le matériau, il en déduit une distance. Il recoupe les données des trois capteurs et retrouve les coordonnées du point d'émission. Nous pouvons déterminer à quel moment et où se passe l'amorçage puis suivre les localisations au fil du temps. Cela nous permet temporellement de suivre le chemin de la déchirure.

Si on ajoute un quatrième capteur, celui-ci sera utilisé pour trouver l'erreur de localisation (lucy). Les coordonnées de la localisation donnes en cm (x_{loc}, y_{loc}) sont associées à erreur de localisation : 0,5 cm par exemple au maximum dans nos essais ($-1 \leqslant Lucy \leqslant 0,5$).

II.3.3. Technique de Corrélation d'Image Digitale (CID)

II.3.3.1 Objectifs

Pour notre étude, nous avons utilisé une technique de mesure du champ des déplacements et des déformations par inter corrélation directe d'images numérisées de mouchetis. Un mouchetis est ensemble de petites tâches disposées de façon aléatoires sur la surface à étudier (figure II-16). Dans notre cas un brouillard de peinture de couleur verte d'une bombe aérosol.

On filme un essai avec une caméra. Un logiciel Davis® version 7.2 permet l'acquisition et le traitement des données. Ce logiciel de traitement d'images numérise le mouchetis et établit (après traitement) pour chaque image enregistrée une cartographie planaire des points.

Ensuite, en comparant chaque image successivement enregistrée et traitée par numérisation à l'image de référence (mouchetis déposé sur l'éprouvette non sollicitée), on mesure pour chaque point identifié la distance qu'il a parcouru entre un temps t_0 et un temps $t_0 + \Delta t$.

Si cette opération est répétée pour l'intégralité des images enregistrées on peut alors obtenir le déplacement total de l'ensemble des points de la zone d'étude du début jusqu'à la fin de l'essai. On obtient alors le déplacement réel de la matière. A partir du champ des déplacements, on obtient par calcul le champ de déformation de la zone d'étude de l'éprouvette.

II.3.3.2 Protocole expérimental

La partie d'étude sur éprouvette est le recouvrement de deux plaques. Dans le cadre de cette étude, un mouchetis a été projeté sur la zone d'étude de l'éprouvette permettant d'obtenir des grains noirs et blancs d'un diamètre moyen de 30 μm. La surface de l'échantillon est éclairée en lumière blanche et les images sont stockées tous au long de l'essai grâce à une caméra. La caméra utilisée est du type Imager Compact fournie avec le logiciel Davis® (Figure II-15). Elle est la plus petite des caméras de la famille Imager Compact de « LaVision® » qui possède des caractéristiques identiques de dynamique et de résolution que

les caméras de grandes tailles tout en étant plus compacte. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- haute résolution avec 640 * 480 ou 1376 *1040 Pixels
- afficheur rapide jusqu'à 5 photos /s,
- obturateur électronique jusqu'à 100 ns pour le déclenchement rapide,
- double mode d'armature disponible pour acquérir deux images,
- sensibilité UV jusqu'à 300 nm.



Figure II-15. *Caméra « LaVision® » de type « Imager Pro »*

Deux types d'objectifs sont disponibles :

- un objectif standard fournit par « LaVision® » qui permet d'obtenir une image globale de l'éprouvette,
- un objectif « Nikon® » monté avec un soufflet qui permet de faire des zooms importants sur l'éprouvette (pour une étude locale).

Nous avons utilisé l'objectif standard.

Comme la plupart des systèmes de mesure, une première étape essentielle consiste à calibrer le dispositif. Lors des essais, la caméra doit être correctement placée pour permettre une bonne mise au point (netteté) et une prise d'image perpendiculaire à la zone à étudier gage d'une numérisation (après traitement) réussie.

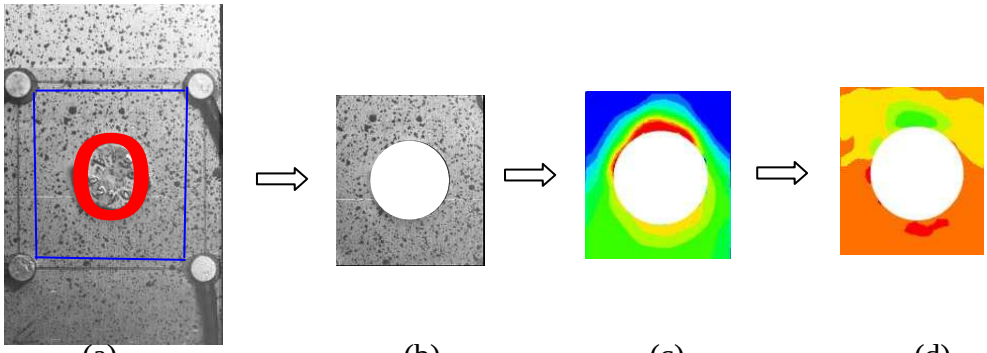
Une zone d'étude ou masque (partie qui sera traitée) doit être renseignée pour le traitement des images. Ce masque peut avoir différentes formes et permet de s'intéresser à une zone locale bien déterminée. L'avantage d'une telle opération est d'une part l'amélioration des résultats de calcul (découpage plus fin et plus précis de l'image), d'autre part, un gain de temps très important (une partie de l'éprouvette est étudiée).

Un masque est employé pour indiquer précisément la zone à traiter (post-traitement) dans l'image globale du mouchetis prise par la caméra.

La deuxième étape consiste à renseigner le logiciel d'acquisition et de traitement d'images sur l'intervalle de temps entre chaque image. Pour l'ensemble des essais nous avons opté pour un temps de deux secondes. En effet, pour la plupart des configurations des

éprouvettes, et avec une vitesse de déplacement de la traverse mobile de 1 mm/min, la durée moyenne des essais se situe approximativement à 620 secondes c'est-à-dire plus de dix minutes. Le choix d'une image toutes les deux secondes ou tout les deux centièmes de millimètres de déplacement permet de limiter le volume moyen des fichiers informatiques (4.3Mo ≈ 310 images), les temps de calcul pour le traitement d'images (2 heures sur CPU Pentium IV 3,01 Ghz, 4Go Ram) tout en étant suffisamment fin temporellement (évolution fine des champs de déplacement).

On retrouve sur la figure II-16 l'image réelle prise par la caméra (a), le détail du masque (b), le champ de déplacement après traitement (c) et le champ de déformation (d).



(a) (b) (c) (d)

Figure II-16. (a) - image prise par caméra, (b)- image de masque (c) - image de déplacement, (d) - image de déformation

II.3.3.3. Le calcul du champ de déplacement

Sur les images obtenues, nous avons choisi un ensemble des points (mark) où l'on souhaite faire une mesure. Chacun de ces « points » de mesure est représentatif d'une petite surface de l'image (270×270 μm^2) contenant un nombre suffisant de motifs aléatoires pour être unique dans le champ de l'image. Ainsi, lors de la corrélation entre deux images, chaque « point » va fournir la valeur du vecteur déplacement. Tout le traitement des images est réalisé par le logiciel Davis® 7.2. Ce logiciel assure l'interface avec l'utilisateur, exécute les calculs de corrélation entre les images numériques en chaque noeud du maillage. Les paramètres d'entrée du logiciel, à choisir par l'utilisateur, sont : l'ensemble des « points » de mesure (noeuds du maillage), la taille moyenne du motif aléatoire en pixels, la valeur seuil de la corrélation, et le nom des images à traiter.

Le déplacement est obtenu par interpolation parabolique de la fonction de corrélation, ce qui permet d'avoir une résolution sub-pixel. Le vecteur déplacement est défini par sa direction, son sens et sa norme. Il est la somme de deux composantes : le déplacement d'ensemble de la pièce et le déplacement dû à la différence de chargement entre les deux images. La composante liée au déplacement d'ensemble disparaît par dérivation lorsque les déformations sont calculées.

Chacun des « points » de mesure est une petite fenêtre de l'image de $N \times N$ pixels contenant un nombre suffisant de motifs aléatoires pour être unique dans le champ de l'image. Considérons un point P, de coordonnées (x_P, y_P), dans la première image (Figure II-17). La fenêtre f_P extraite de l'image autour du point P se compose d'un ensemble de pixels de coordonnées ($x_P + i$, $y_P + j$), i et j variant de $-N/2$ à $N/2$. Chacun de ces pixels présente un niveau de gris noté I_{fP} ($x_P + i$, $y_P + j$). Cette fenêtre est comparée par corrélation à des fenêtres f_M extraites d'une seconde image, centrées sur le point M de coordonnées ($x_P + u_M$, $y_P + v_M$). Le vecteur déplacement du point P entre la première et la seconde image est déterminé en maximisant le coefficient de corrélation entre f_P et f_M. Les coordonnées du point M correspondant seront alors ($x_P + u_P$, $y_P + v_P$), ou u_P et v_P sont les composantes du vecteur déplacement recherché. La valeur du coefficient de corrélation entre les fenêtres f_P et f_M est donnée par l'équation :

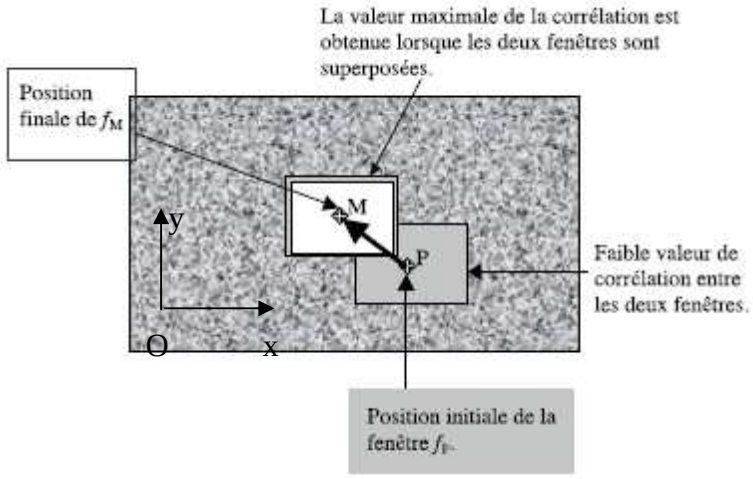


Figure II-17. *Principe du calcul de corrélation directe entre les fenêtres extraites de l'image de la surface de l'échantillon avant et après chargement.*

$$C_P(M) = \frac{C_i(f_P, f_M)}{\sqrt{C_a(f_P).\sqrt{C_a(f_M)}}}$$

où *C*i et *C*a représentent respectivement les fonctions d'inter corrélation et d'auto corrélation définies par :

$$C_i(f_P, f_M) = \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} I_{fP}(x_P + i, y_P + j).I_{fM}(x_P + i + u_M, y_P + j + v_M)$$

$$C_a(f_Q) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} I_{fQ}(x_Q + i, y_Q + j).I_{fQ}(x_Q + i, y_Q + j)$$

où Q est un point de coordonnées (x_Q, y_Q).

A partir des images enregistrées, on peut maintenant procéder au calcul du champ des

déplacements. Beaucoup d'options sont réglables, mais agissent à des niveaux de calculs différents. Pour se rendre compte de leurs rôles réels, il faut faire beaucoup de tests et de calculs en ne changeant qu'un paramètre à la fois. On trouve d'abord des options de correction d'image, puis un pré-traitement, ensuite le calcul de corrélation en lui même, et enfin le post traitement. Les différents paramètres du logiciel « Davis® » utilisés sont optimisés pour obtenir un champ de déplacement correct et cohérent d'une part, et un temps de calcul raisonnable d'autre part.

II.3.3.4. Le calcul du champ de déformation

Le différentes composantes du tenseur de déformation E_{ij} dans le plan (X, Y) sont définies par :

- E_{xx} et E_{yy} sont les déformations normales qui décrivent la déformation locale unidimensionnelle dL/L, respectivement, dans la direction x et y

- E_{xy} et E_{yx} sont les déformations qui décrivent le cisaillement local en projection sur x (ou y) d'une surface de normale y (ou x).

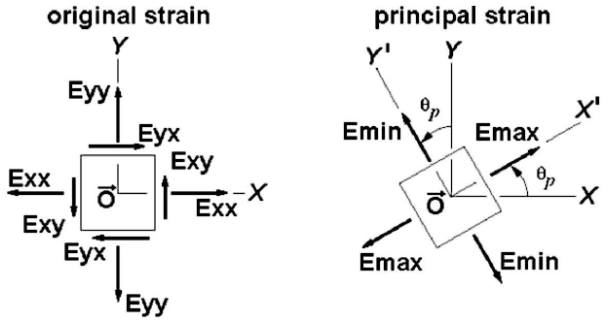


Figure II-18. *Composante du tenseur de déformation dans le plan (X, Y).*

A partir du tenseur de déformation généralisé E_{ij} (écrit dans base quelconque dans la plan (X, Y)), les valeurs des déformations principales (Figure 18) ainsi que l'angle θ_p définissant les directions associées sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} E_{\min}^{\max} = \dfrac{E_{xx}+E_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left|\dfrac{(E_{xx}-E_{yy})^2}{4}\right| + E_{xy}^{'}} \\ \tan(2\theta_p) = \dfrac{2E_{xy}^{'}}{E_{xx}-E_{yy}} \end{cases} \quad \text{avec} \quad E_{xy}^{'} = \frac{E_{xy}+E_{yx}}{2}$$

Dans l'étude qui va suivre, on va s'intéresser principalement à la composante verticale E_{yy} (suivant la direction de traction).

II.3.4. Conditions d'essais et configurations étudiées

II.3.4.1 Explication des jeux

Le protocole expérimental qui permet d'appliquer le couple de serrage est suivant :

a) le corps du boulon est introduit dans les deux alésages pratiqués dans les deux éprouvettes. Mise en place de la rondelle et de l'écrou.



Figure II-19.a

b) les éprouvettes sont placées sur une surface plane (cela évite les défauts d'alignement).

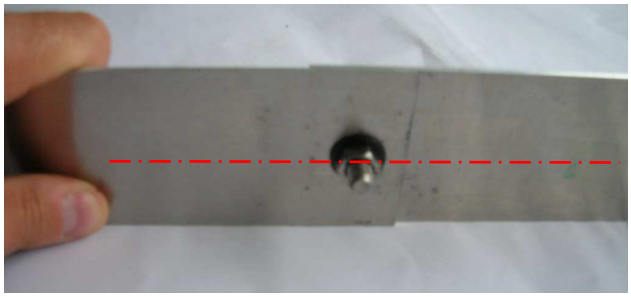


Figure II-19.b

c) Les deux éprouvettes sont « plaquées » sur le corps du boulon.

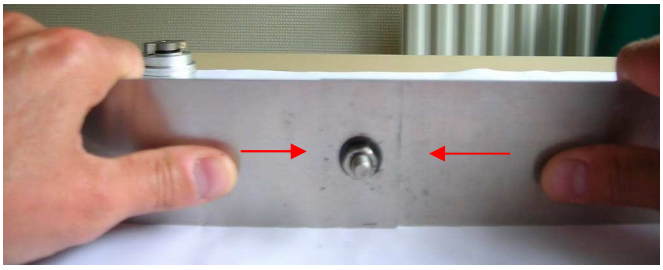


Figure II-19.c

d) On applique le couple de serrage désiré.

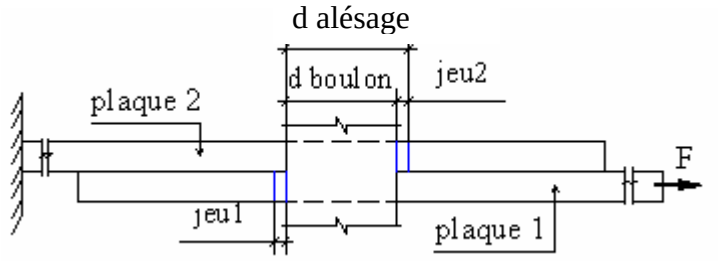


Figure II-19.d

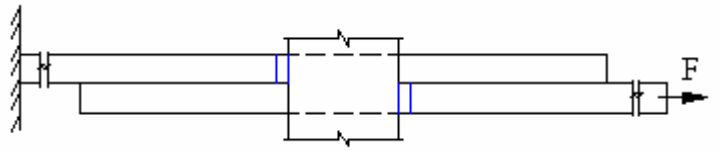
Figure II-19. *Procédure de serrage*

Cette procédure permet une valeur maximale du jeu pour l'éprouvette considérée. On constate sur la figure II-20 que cette valeur vaut deux fois la différence entre le diamètre de l'alésage pratiqué sur éprouvette et le diamètre du corps du boulon.

Lors de l'essai de traction, on retrouve sur la figure II-20 la plaque 2 est reliée aux mords fixes et seule la plaque 1 est solidaire des mords mobiles. Quand la force de traction atteint une certaine valeur, le glissement apparaît. Le glissement des tôles commence par le rattrapage du jeu 1 (entre la plaque 1 et le corps de boulon). Quand la plaque 1 touche le corps du boulon, le glissement continue dû au jeu 2 (entre la plaque 2 et le corps du boulon). La figure II-20b représente l'éprouvette après rattrapage de ces jeux.



(a) - avant le glissement des substrats

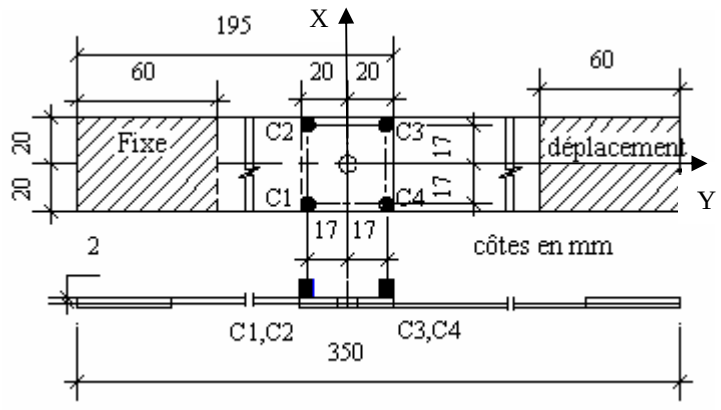


(b) - après le glissement des substrats

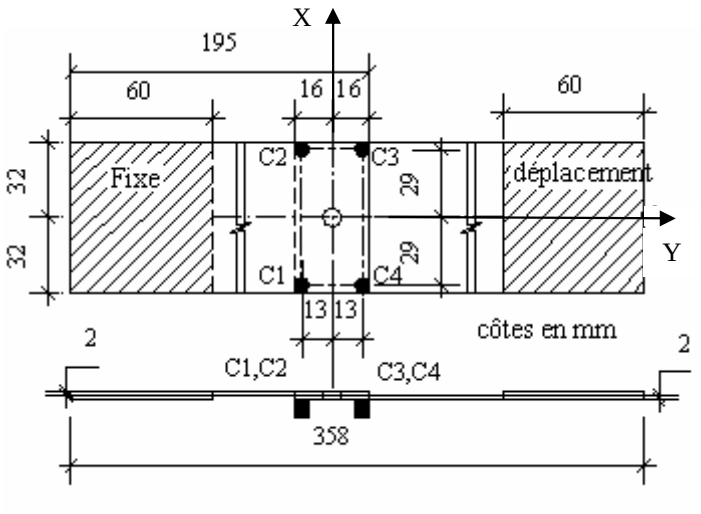
Figure II-20. *Description physique du jeu relatif de l'assemblage une fixation*

II.3.4.2. Position de capteurs

La position des capteurs est un paramètre important pour l'acquisition des données en EA. Dans nos essais, comme la largeur des éprouvettes est beaucoup moins importante que la longueur, nous avons positionné les capteurs avec une distance équivalente à la largeur des éprouvettes. L'idéal serait que les quatre capteurs forment un carré (figure II-21a,b).



(a) - norme usuelle



(b) - norme NASM - 1312-4

Figure II-21. *Position des 4 capteurs (C1, C2, C3,C4)*

Pour l'ensemble des essais, les capteurs piézo-électriques (série V6 600 capteur miniature ø = 4,75 mm et hauteur = 5,8 mm) sont collés avec une colle silicone Rubber de marque Momeentive qui assure aussi le couplant acoustique sur :

- la zone de recouvrement côté tête de boulon pour les éprouvettes en norme usuelle
- la zone de recouvrement côté écrou de pour les éprouvettes en norme NASM-1312-4

pour un placement des capteurs sur la zone où va se produire la rupture de la plaque.

Chapitre III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

III.1. Analyse du comportement mécanique global d'un assemblage boulonné
- III.1.1. Le cas d'un assemblage à une fixation de norme usuelle
  - III.1.1.1. Analyse par émission acoustique
  - III.1.1.2. Analyse par corrélation d'images digitales
- III.1.2. Le cas d'un assemblage à une fixation selon la norme NASM
- III.1.3. Le cas d'un assemblage à deux fixations horizontales
- III.1.4. Le cas d'un assemblage à deux fixations verticales
- III.1.5. Conclusions

III.2. Influence des paramètres
- III.2.1. Couple de serrage
  - III.2.1.1. Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension dans le boulon
  - III.2.1.2. Influence du couple de serrage
- III.2.2. Effets de bord
- III.2.3. Influence du jeu
- III.2.4. Nombre de fixations
  - III.2.4.1. Deux fixations verticales
  - III.2.4.2. Trois fixations verticales
  - III.2.4.3. Deux fixations horizontales

III.3. Localisation

III.4. Modes de rupture : analyse macro et microscopique

III.1. Analyse du comportement mécanique global d'un assemblage boulonné

Dans cette partie, nous présentons une analyse basée sur les évolutions des activités acoustiques d'une part et le suivi des champs de déformations par la technique CID d'autre part, afin de mieux cerner les différentes phases d'endommagement d'un assemblage boulonné. Différentes configurations d'assemblages sont étudiées selon la norme usuelle et la norme NASM, avec plusieurs cas de fixations.

III.1.1. Le cas d'un assemblage à une fixation de norme usuelle

III.1.1.1 Analyse par émission acoustique

La figure III-1 donne une courbe typique présentant l'évolution de la charge globale en fonction du déplacement d'un assemblage à une fixation (norme usuelle), pour un couple de serrage de 4 daN.m et un jeu j=1 mm. Les courbes ont une allure générale similaire quelle que soit la valeur du jeu ou du couple de serrage.

Afin de déterminer les points particuliers permettant d'établir les différentes phases du comportement et de la chronologie de l'endommagement de l'assemblage, nous avons couplé les analyses réalisées à partir du système d'exploitation d'Emission Acoustique (E.A.) et du système de caméra de Corrélation d' Images **D**igitales (C.I.D).

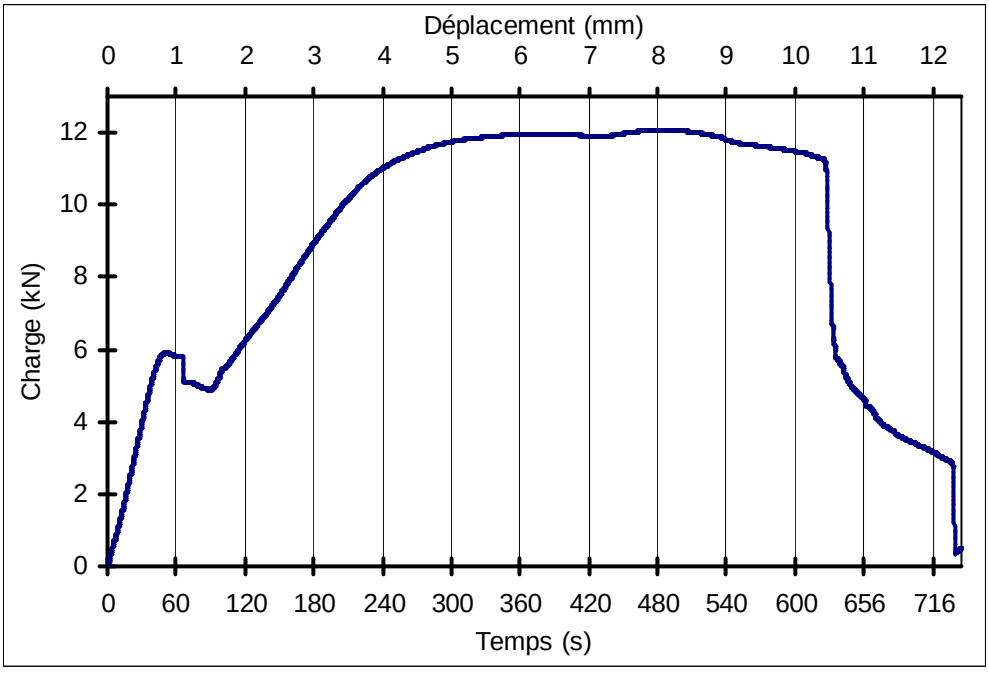


Figure III-1. *Charge/déplacement pour une fixation et C=4 daN.m*

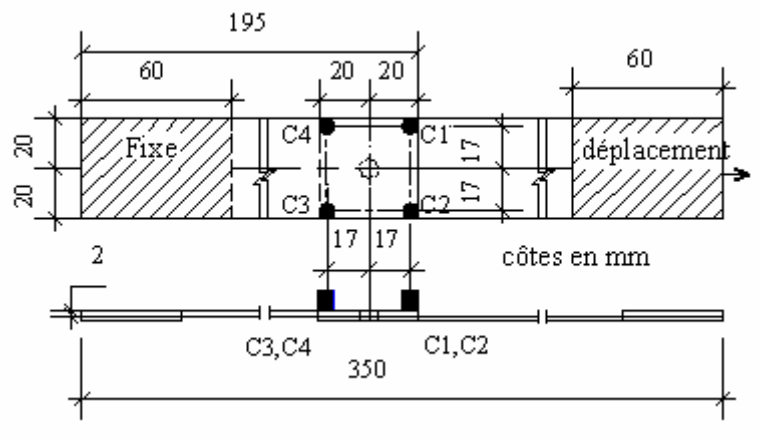
Après l'acquisition des données brutes par l'intermédiaire de quatre capteurs piézo-électriques positionnés comme indiqué sur la Figure III-2, nous étudions quatre paramètres caractéristiques à savoir :

- Le nombre de Coups (Counts) (sans dimension): nombre de coups - nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse la valeur du seuil.

- La durée (Duration en seconde) : intervalle de temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil de la salve.

- L'amplitude maximale Amax (dB_{EA}) : amplitude maximale du signal pendant toute la durée de la salve.

- L'énergie (1 unité énergie (eu) = 1 aJ = 10^{-18} J) : énergie absolue ou énergie d'E.A, l'intégrale du signal au carré sur la durée de la salve



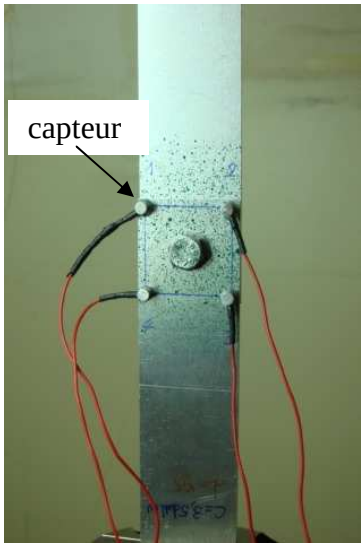


Figure III-2. *Position des quatre capteurs C1 à C4*

La Figure III-3 représente le nombre de coups, pour une valeur cumulée pendant deux secondes pour les quatre capteurs, en fonction du temps et de la charge appliquée. On constate que les allures des courbes déterminées par les quatre capteurs sont pratiquement identiques, ce qui valide la reproductibilité des essais. Par conséquent, les informations fournies par un capteur peuvent suffire à suivre les événements pendant un essai.

A partir de ces courbes, nous pouvons mettre en évidence les différentes phases se produisant lors du chargement de l'assemblage à partir d'une analyse détaillé de l'évolution du nombre de coups cumulés et de l'amplitude maximale mesurés au cours d'un essai de traction – cisaillement d'un assemblage. Les autres paramètres caractéristiques de l'EA, à savoir la durée et énergie des salves, sont présentés dans l'annexe 1.

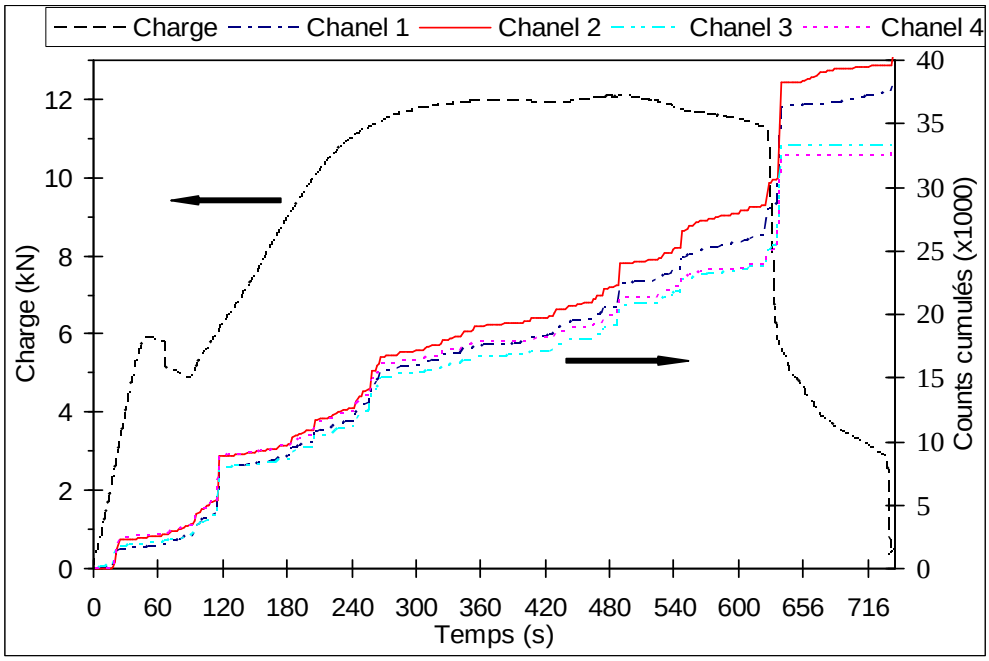


Figure III-3. *Coups cumulés et paramétrique charge en fonction du temps*

Les figures III-4a et b représentent l'évolution de la charge et du nombre de coups cumulés ainsi que l'évolution de la charge et de l'amplitude maximale en fonction du temps, respectivement, pour l'assemblage à une fixation. Ces courbes permettent d'identifier les différentes phases de la chronologie de l'endommagement à partir des différentes zones délimitées par les évolutions et les sauts enregistrés par les activités acoustiques.

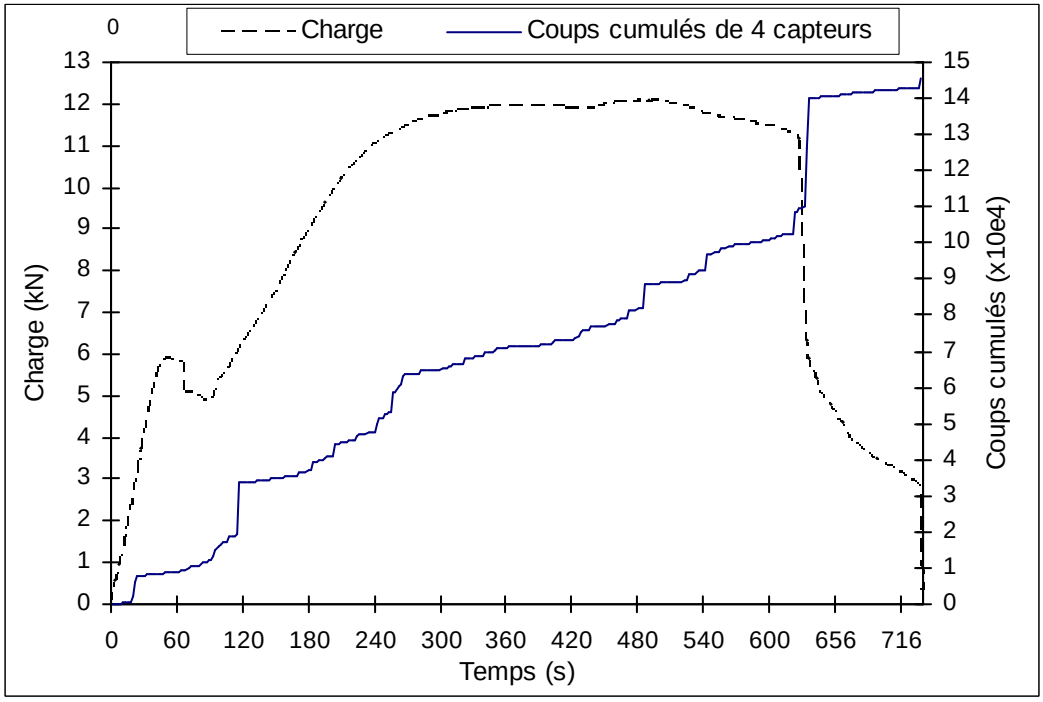


Figure III-4a. *Coups cumulés et charge en fonction du temps*

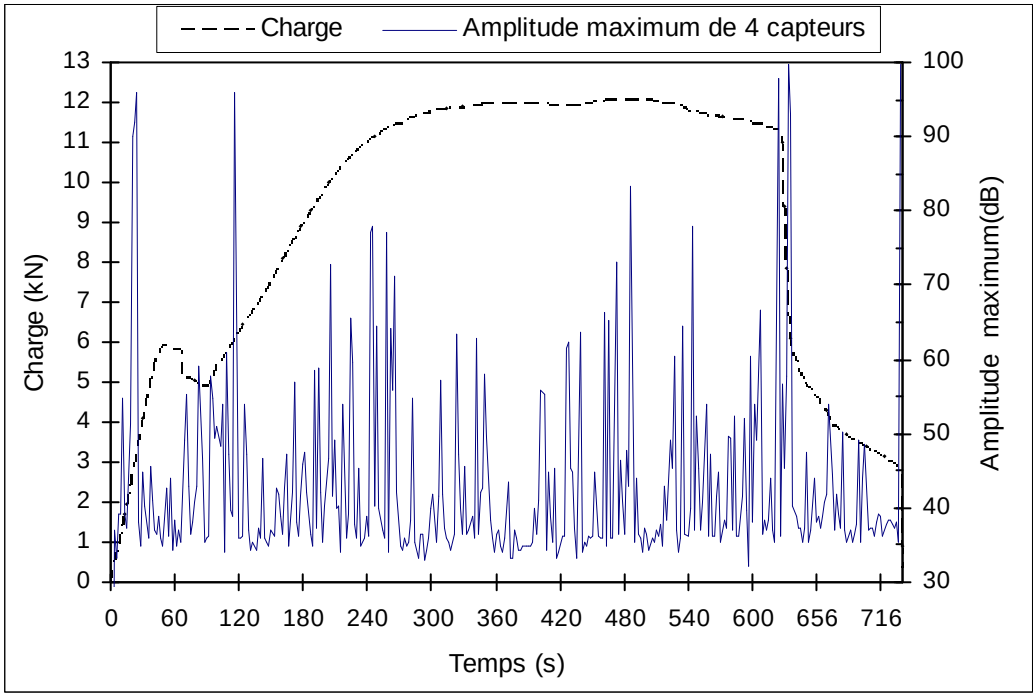


Figure III-4b. *Amplitude maximale et charge en fonction du temps*

Globalement, nous pouvons distinguer huit phases essentielles décrivant le processus d'endommagement au cours d'un essai de traction – cisaillement d'un assemblage boulonné :

(i) phase 1: qui caractérise le comportement élastique du matériau (figure III-5). Cette phase, décrite par une activité silencieuse au niveau du signal fourni par la technique d'émission acoustique, est représentée par le segment [0,1] sur la courbe charge-déplacement, avec une pente définissant la flexibilité C de la fixation (ou C=d/P avec d définissant l'allongement de la fixation et P la force transférée). La fin de cette phase est marquée par un saut instantané au niveau des événements cumulés (à t_1 = 22 secondes).

Comme la force de traction devient plus importante que celle du frottement, un déplacement relatif des deux plaques tend à augmenter la valeur du nombre de coups, ce qui explique le saut instantané observé au niveau du nombre de coups cumulés correspondant à une valeur élevée de l'amplitude maximale atteignant la valeur de 95 dB.

(ii) 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 (figure III-5). Cette phase est décrite par une forte activité acoustique qui reflète le frottement entre les deux tôles mais aussi les contacts entre les tôles et le boulon (tête et rondelle). Cette phase commence par un glissement entre les deux plaques sous l'effet de la force de traction. Cette courbe perd sa linéarité pour atteindre une valeur maximale au point b, correspondant au début de la zone de glissement pur située entre les points b et 2. Cette zone est marquée par un plateau avec un effort maintenu constant, qui correspond au glissement entre les deux plaques dû au jeu entre l'alésage et le boulon (dans ce cas du jeu j = 1 mm).

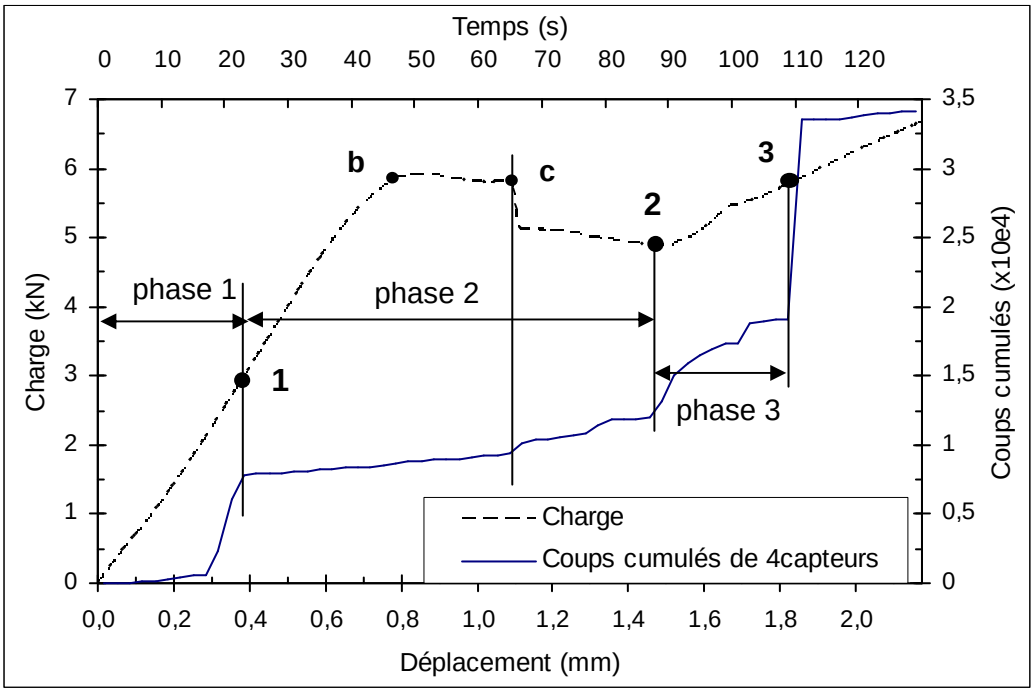


Figure III-5. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et de la charge en fonction du temps (phase 1+2+3)*

La phase 2 se termine au point 2. La pente de cette courbe (nombre de coups cumulés) tend à augmenter. A partir de ce point 2 la force de traction augmente.

La figure III-6 montre clairement la phase de glissement observée par les enregistrements de la caméra mettant en évidence le jeu entre l'alésage et le corps du boulon. Cette figure met en évidence une zone mâte différenciée de la zone de mouchetis.

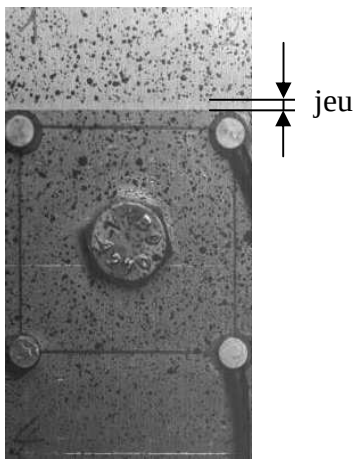


Figure III-6. *Image réelle de la fixation au point 2*

(iii) phase 3: cette phase est décrite par un phénomène de matage et d'adaptation (figure III-5). Le diamètre du corps du boulon étant plus petit que le diamètre de l'alésage des plaques (mais aussi de caractéristiques des matériaux différentes) un matage se produit au niveau des contacts corps de boulon et des alésages des plaques. Cette phase est caractérisée par une évolution importante de l'activité acoustique. Ce phénomène se termine au point 3. Il est

représenté par un saut instantané des événements cumulés correspondant à une valeur élevée de l'amplitude maximale qui atteint la valeur de 95 dB.

(iv) phase 4 : cette phase est décrite par un comportement élastique de la structure qui est soumise à une traction avec une flexion secondaire (figure III-8a et b). Dans cette phase, l'assemblage (plaque + boulon) est sollicité en traction avec une flexion secondaire. La flexibilité de cette structure est marquée par une pente de la courbe « P-d» qui est différente de la flexibilité constatée dans la phase 1. Elle est délimitée par des sauts bien marqués des événements acoustiques (point 3 et 4). La technique du EA montre bien le début de la phase de plastification aux alentours du trou marquée par un changement brusque des événements acoustiques.

La zone plastifiée au voisinage du trou est mise en évidence par l'image enregistrée par la caméra CID, ce qui confirment les constatations données par l'EA (figure III-7).

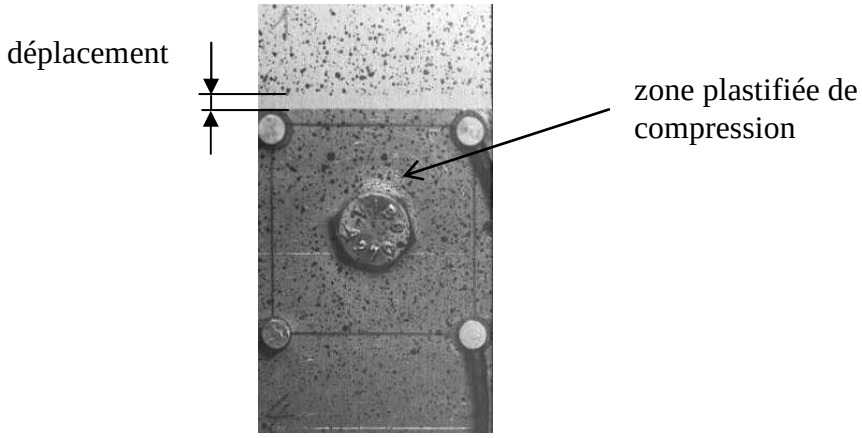


Figure III-7. *Image réelle de la fixation au point 4*

(v) phase 5 qui caractérise la plastification autour des alésages des plaques (figure III-8a,b). Durant cette phase se développe une forte plastification dans la partie de la plaque en contact avec le boulon qui est caractérisée par une évolution rapide des événements acoustiques entre le point 4 et le point 5. La fin de cette phase est marquée par une forte activité acoustique avec l'apparition de plusieurs pics au niveau de l'amplitude maximale pouvant atteindre une valeur de 80 dB. Cette phase correspond au déclenchement de l'amorçage de fissure sous la tête du boulon située dans la zone de traction. La photo prise par la technique du CID confirme bien l'existence de la zone de plastification de traction et le point d'amorçage de la fissure (figure III-9). La position du point d'amorçage est déterminée par la technique de la localisation de l'E.A. utilisant quatre capteurs piézo-électriques.

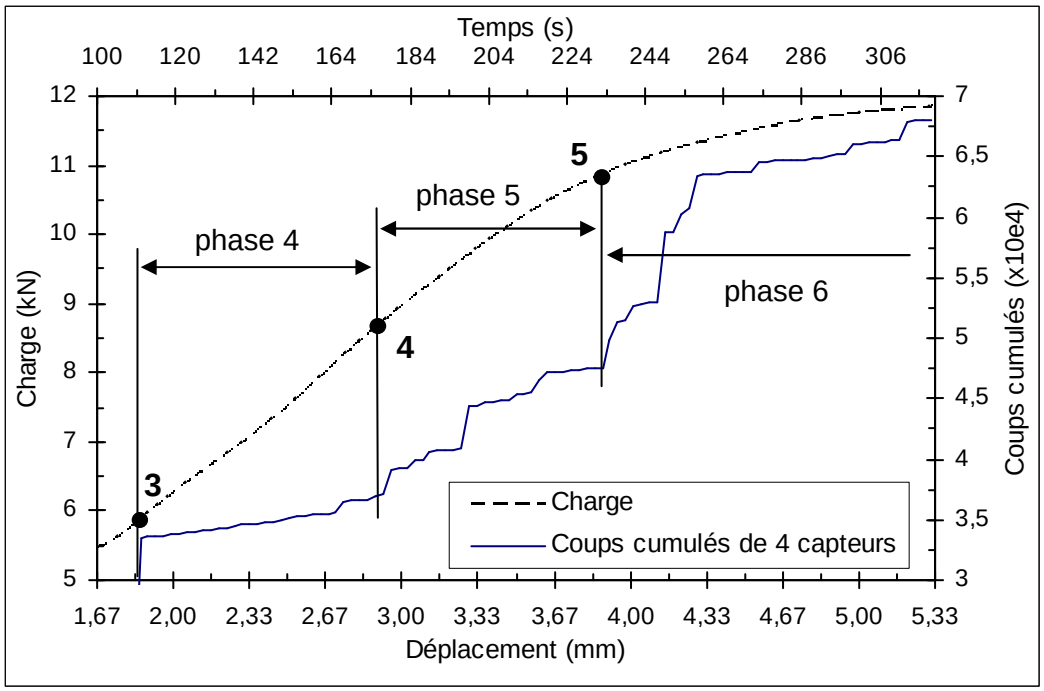


Figure III-8a. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 4+5)*

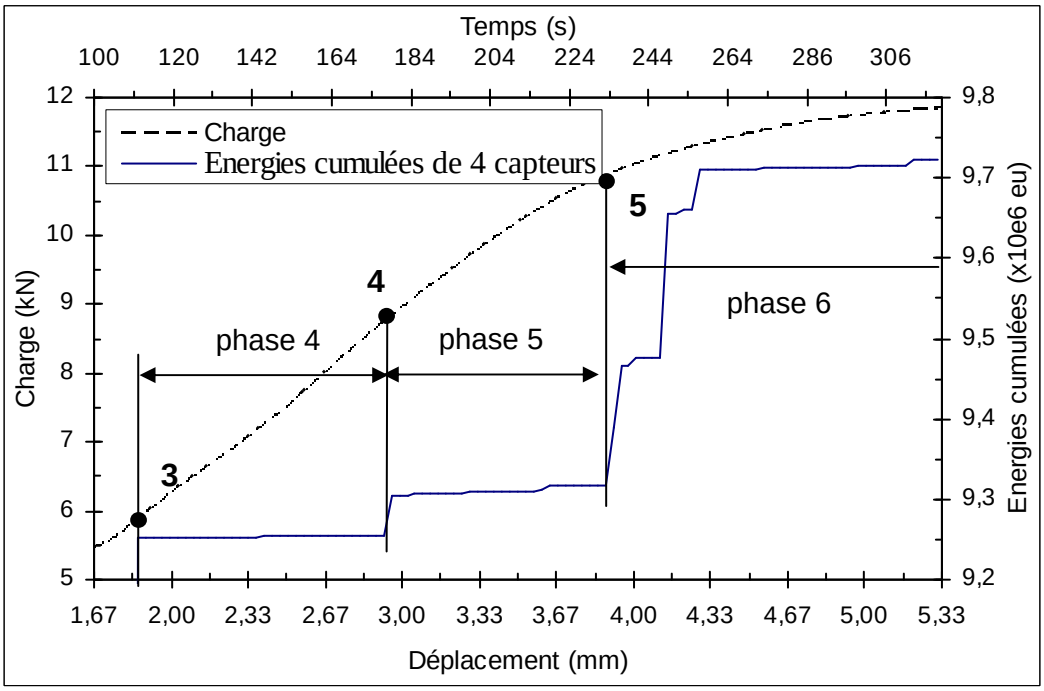


Figure III-8b. *Agrandissement d'une zone de l'énergie cumulées et charge en fonction du temps (phase 4+5)*

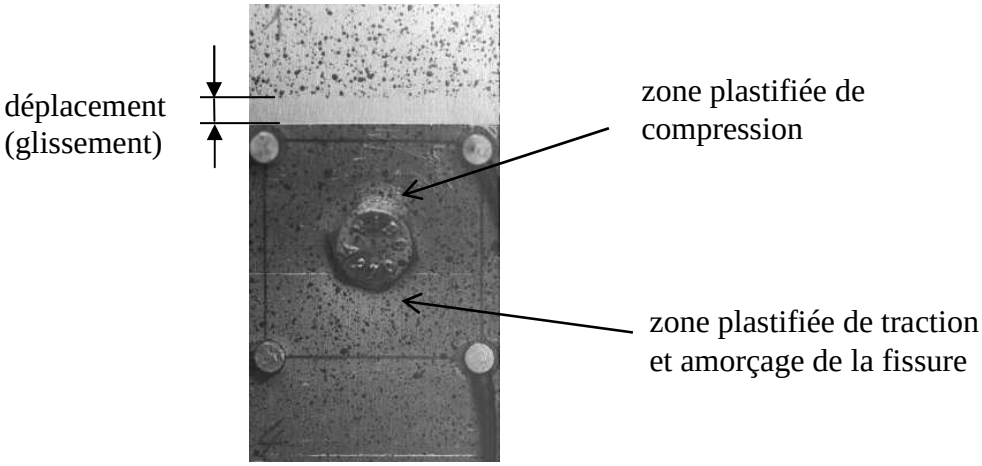


Figure III-9. *Image réelle de la fixation au point 5*

(vi) phase 6 : cette zone correspond à la phase de la propagation stable de la fissure dans l'assemblage boulonné (figure III-10). Cette phase est marquée par un adoucissement de la courbe « P-d », la perte de la rigidité de l'assemblage boulonné s'accompagne par une faible évolution de la charge avec un déplacement important (environ une variation de déplacement d égale à 4 mm pour une charge P = 1 kN). La technique CID met en évidence la progression de deux fissures sous la tête du boulon : Chaque fissure a avancé d'une longueur égale environ 3 mm (la fissure a été initiée sous la tête du boulon) (figure III-11a). Le point 6 marque la fin de cette phase où la charge appliquée atteint une valeur maximale Pmax = 12,1 kN. Ce point est repéré par un saut instantané des événements acoustiques avec une amplitude maximale égale à 85 dB environ.

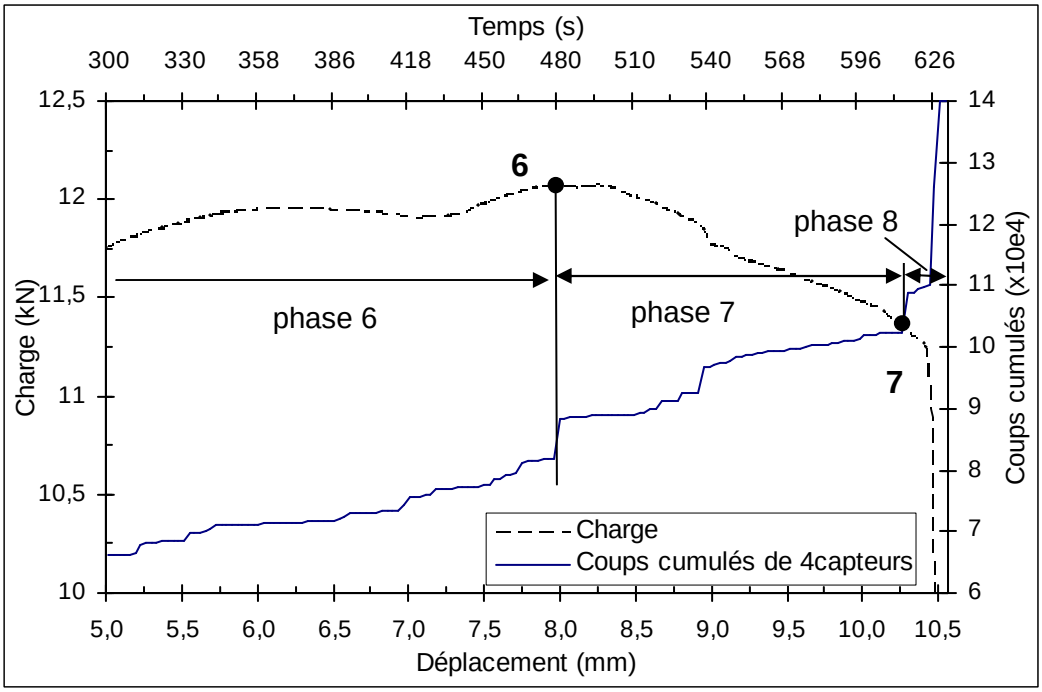
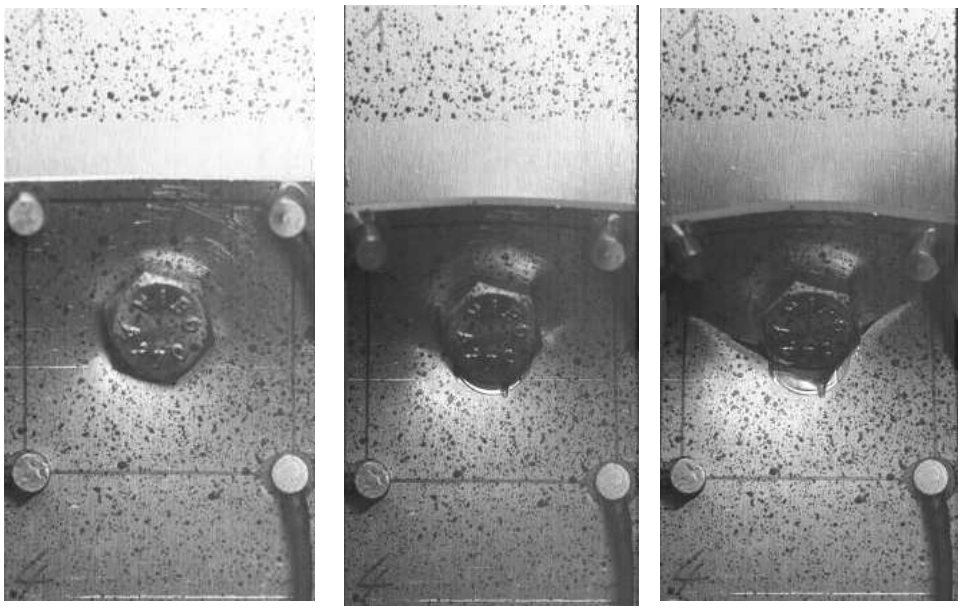


Figure III-10. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 6+7)*



(a) - Point 6 *(b) - Point 7* *(c)- Point de rupture finale*

Figure III-11. *Développement de la propagation de la fissure*

vii) phase 7 : elle correspond à une propagation instable de la fissure (figure III-10). A partir du point 6, l'effort de traction diminue car la section résistante des tôles diminue marquant la phase de la rupture instable de l'assemblage. Les activités acoustiques montrent bien la délimitation de cette zone où l'amplitude maximale atteint une valeur égale 100 dB environ au point 7. La technique de CID montre clairement l'évolution rapide des deux fissures, comme indiqué sur la photo de la figure III-11b.

viii) phase 8 : il s'agit de la rupture brutale de l'assemblage. Cette phase est caractérisée par une activité acoustique très importante (point d'inflexion au point 7) qui marque la rupture finale de l'assemblage boulonné décrit par la photo de la figure III.11-c.

III.1.1.2 Analyse par corrélation d'images digitales

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. 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 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 2 images et une taille de fenêtre en double passe en 32X32 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 (figure III-12a).

On retrouve sur la figure III-12b une partie de la définition du masque sur le mouchetis. Les résultats, exploités à partir de cette technique, seront donnés sur la zone du masque pour le champ de déplacements. Une zone notée A, proche de la tête du boulon, est analysée pour suivre l'évolution des champs de déformations (figure III-12c).

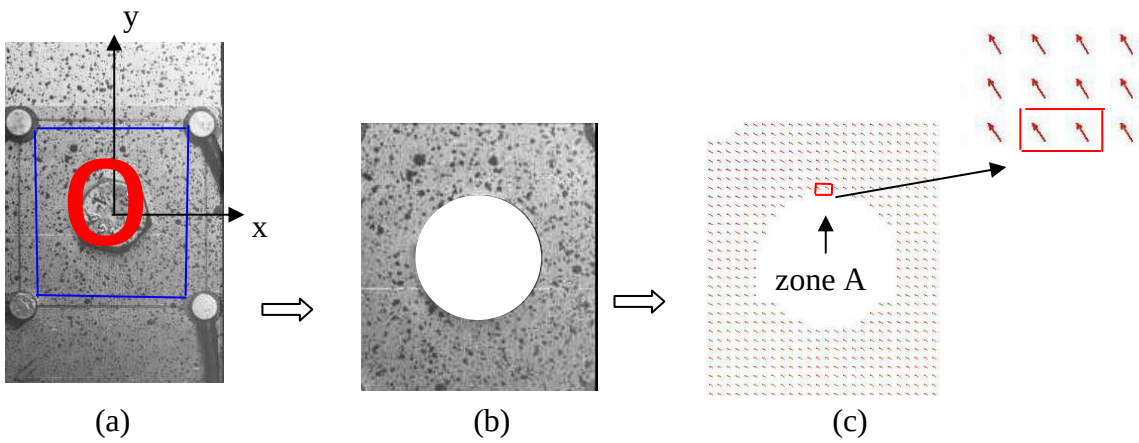


Figure III-12. *(a)-image prise par caméra, (b)-image du masque, (c) -image des vecteurs de déplacement et détail de la fenêtre choisie de la zone A*

Au niveau des analyses du champ de déformations, nous utilisons les valeurs de la déformation notée εy sur l'axe y. Sur la figure III-13, les courbes de la déformation de zone A sont présentées en fonction du temps. A partir de ces courbes, nous pouvons mettre en évidence l'évolution de la déformation εy dans les différentes phases se produisant lors du chargement de l'assemblage :

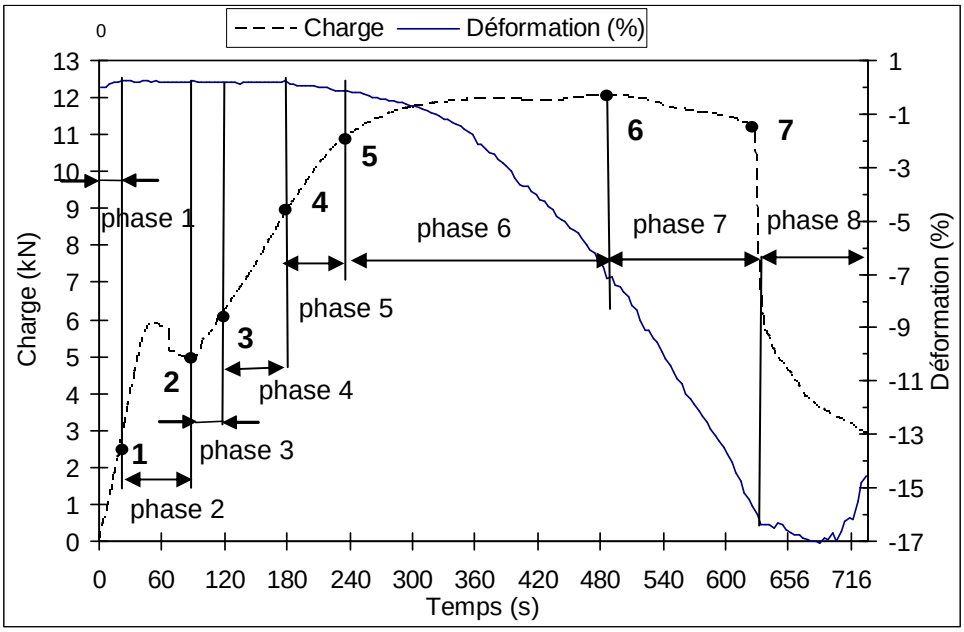


Figure III-13. *Déformation εy de la zone A et charge en fonction du temps*

i) phase 1 : phase élastique du matériau. Cette phase est décrite par la technique de corrélation d'images et présente un champ élastique des déformations au voisinage de l'alésage. Durant l'essai de traction, la valeur de déformation de traction (zone A) augmente jusqu'au glissement et atteint une valeur de 0,25% environ au point 1 (la valeur de la déformation élastique déterminée à partir de la courbe contrainte – déformation du matériau vaut 0,4% environ). La fin de cette phase est marquée par la diminution de cette déformation due à l'apparition du phénomène de glissement (cf. figure III-14).

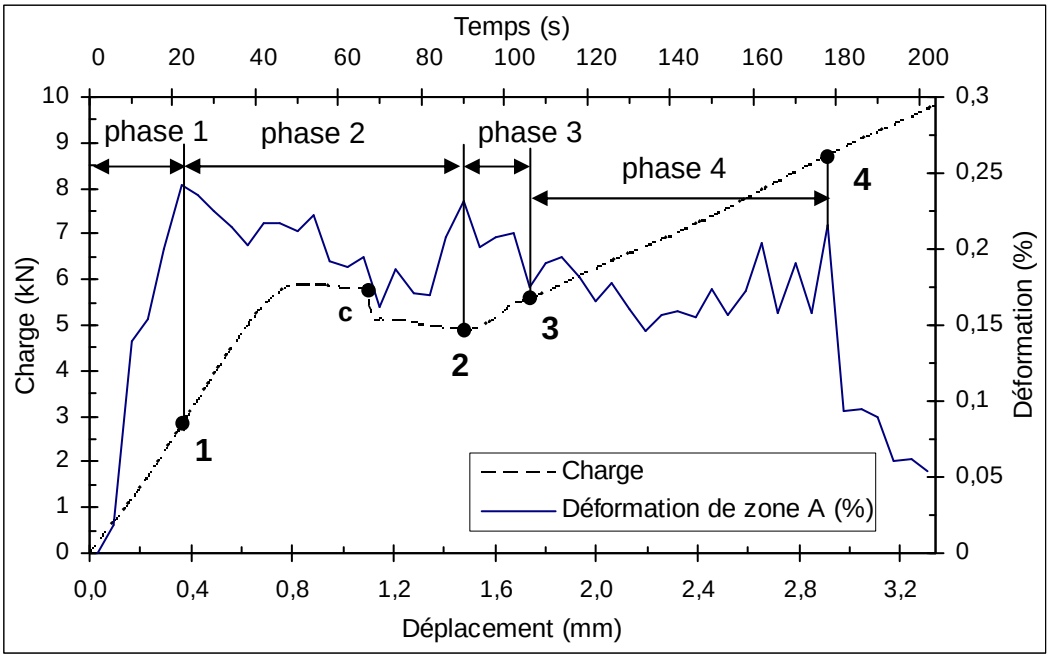


Figure III-14. *Agrandissement d'une zone de déformation ε_y de la zone A et charge en fonction du temps (phase 1, 2, 3,4)*

On donne, sur la figure III-15, l'image réelle prise par la caméra (a), le champ des déplacements (b) et des déformations (c) de la zone du masque considérée.

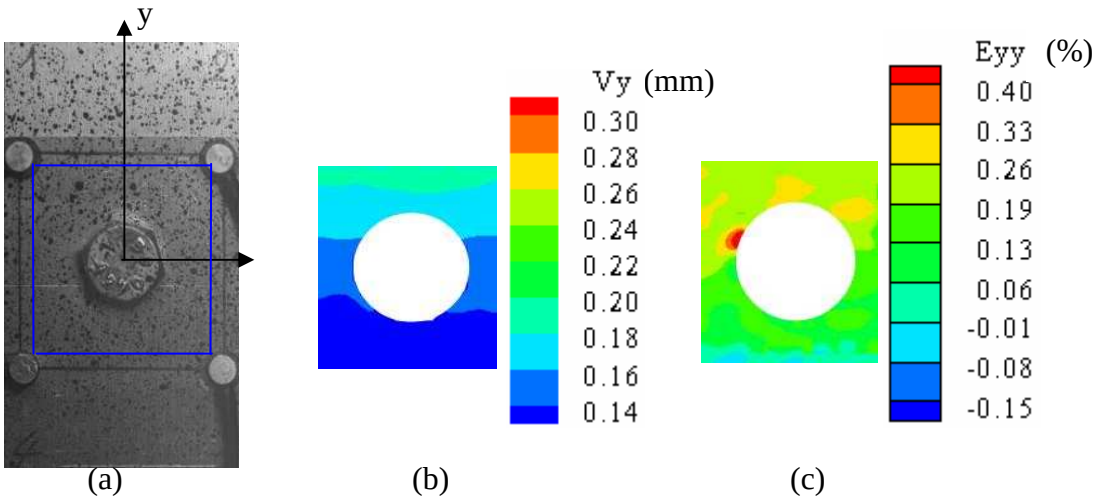


Figure III-15. *(a)-image réelle, (b)-champ de déplacement au point 1, (c)-champ de déformation au point 1*

Avant la phase de glissement, la valeur du déplacement augmente de 0,12 mm à 0,2 mm suivant Y, de même, la valeur de la déformation εy varie de 0,04 à 0,25% environ sur la zone du masque.

ii) phase 2 : phase correspondant à un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon. (figure III-14). Les relevés donnés dans la zone A par la technique de corrélation d'images, montrent une variation de la déformation caractérisée par une faible diminution des valeurs de εy. Du point 1 au point b, le glissement est dû au jeu entre la plaque tirée (notée plaque 1 sur la figure II-18a, chapitre II) et le corps du boulon. La déformation de traction dans la zone A diminue jusqu'à ce que la plaque tendue est en contact avec le corps du boulon. Cette déformation augmente jusqu'à ce que le corps de boulon touche le bord du trou de la plaque fixée au point 2. Ce point marque le début des déformations de compression dans la zone A. Après le glissement, la valeur de la déformation des points au bord du trou est nulle car le champ de déformations passe de la traction à la compression.

Sur la figure III-16 a, le jeu est délimité clairement par la partie mouchetée. Le champs des déplacements et des déformations est présenté dans la figure III-16b,c. Il est à noter que la valeur maximale de la déformation εy atteint 0,4% environ qui est comparable à la valeur de la déformation élastique déterminée à partir de la courbe contrainte – déformation du matériau est qui vaut aussi 0,4% environ).

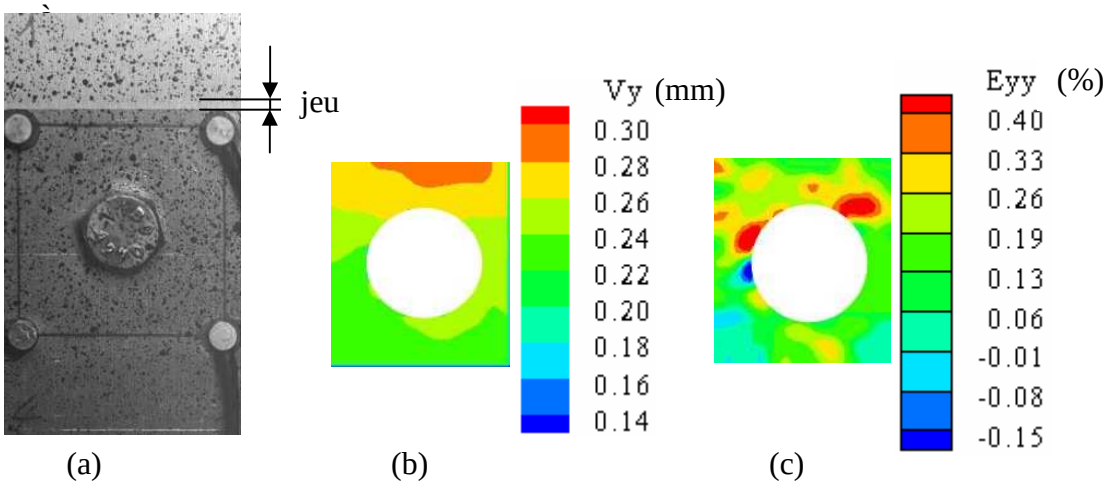
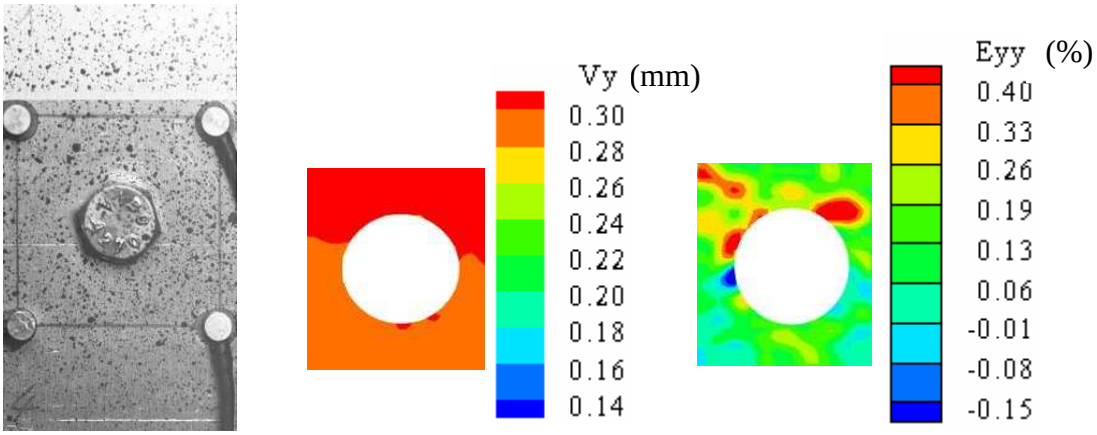


Figure III-16. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 2, (c)-champ de déformation au point 2*

iii) phase 3 : phase de matage et d'adaptation (figure III-14). Dans cette phase, la déformation dans la zone A tend à diminuer. La figure III-17 donne le champ des déplacements et des déformations suivant l'axe y.

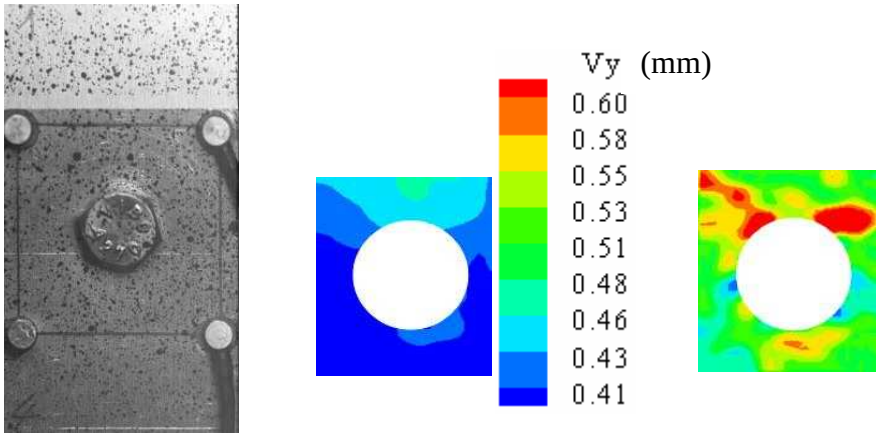


(a) (b) (c)

Figure III-17. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 3, (c)-champ de déformation au point 3*

iv) phase 4 : phase élastique de la structure qui est soumise à une traction avec une flexion secondaire (figure III-14). De même l'évolution de la déformation de la zone A montre bien l'existence d'une zone comprimée. Le point 4 est marqué par un saut qui caractérise le début de la plastification.

La figure III-18 illustre la séquence où le corps du boulon touche le bord du trou, le champ de déplacement est sous la forme d'un V qui varie de 0,4 à 0,7mm.



(a) (b) (c)

Figure III-18. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 4, (c)-champ de déformation au point 4*

iii) phase 5 : phase de la plastification autour des alésages des plaques (figure III-19). Les relevés par la technique C.I.D. montrent une augmentation de la valeur de la déformation de la zone A en compression. Le point 5 est marqué par un changement accéléré de la déformation, la pente de la courbe de déformation diminue : c'est le point d'amorçage de la fissure.

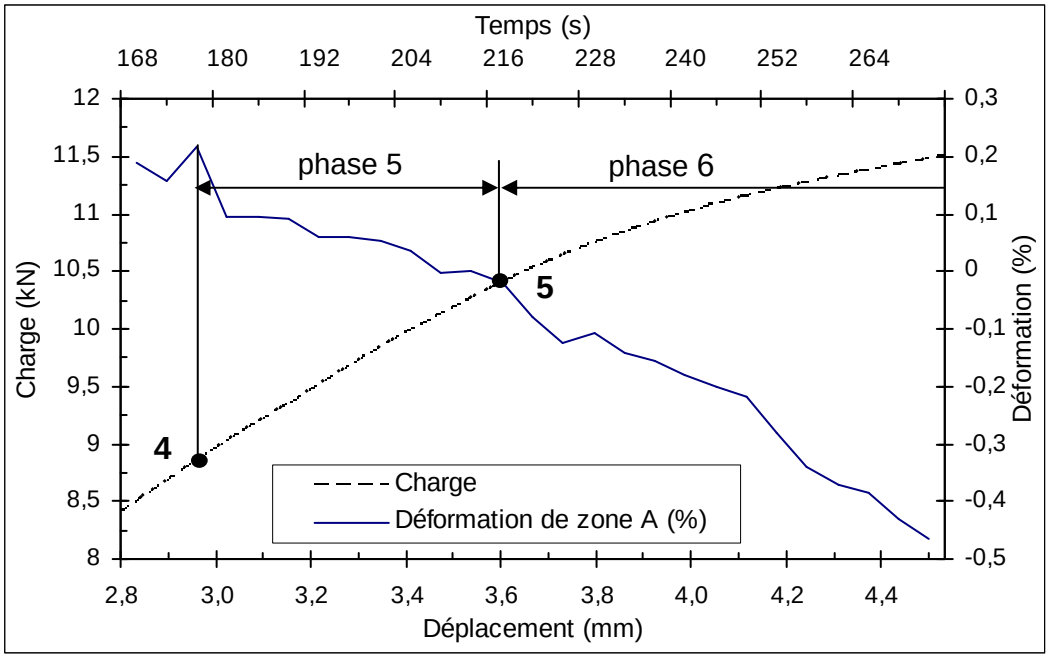
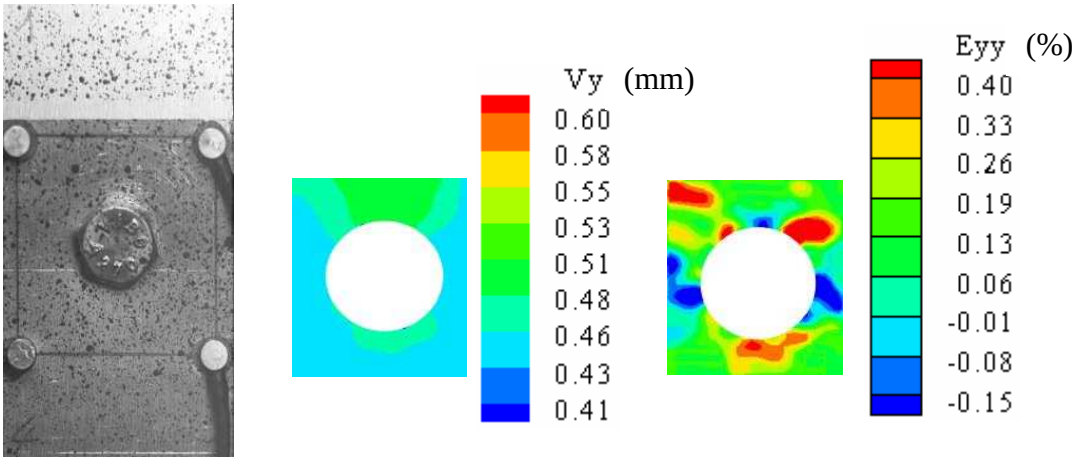


Figure III-19. *Agrandissement d'une zone pour la déformation ε_y de la zone A et charge en fonction du temps (phase 5, 6)*

La valeur du déplacement continue à augmenter de 0,43 à 0,51mm dans la zone de masque (figure III-20). Dans la zone A, nous avons des déformations de compression, mais les valeurs restent encore faibles.



(a) (b) (c)

Figure III-20. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 5, (c)-champ de déformation au point 5*

vi) phase 6 : phase de la propagation stable de la fissure (figure III-19). Les relevés par la technique C.I.D. montrent une augmentation régulière de la valeur de la déformation en compression. Le point 6 est marqué aussi par un changement de pente : c'est le point où l'effort est maximal.

Sur la figure III-21, nous remarquons clairement la naissance de la fissure qui est située dans la ligne frontalière entre la partie sombre et éclairée, au voisinage de la tête du boulon, où la zone plastifiée est mise en évidence. Dans la zone A, le champ de déplacement atteint la valeur maximale de 0,65 mm, et les déformations sont de compression et peuvent atteindre la valeur de 8% environ.

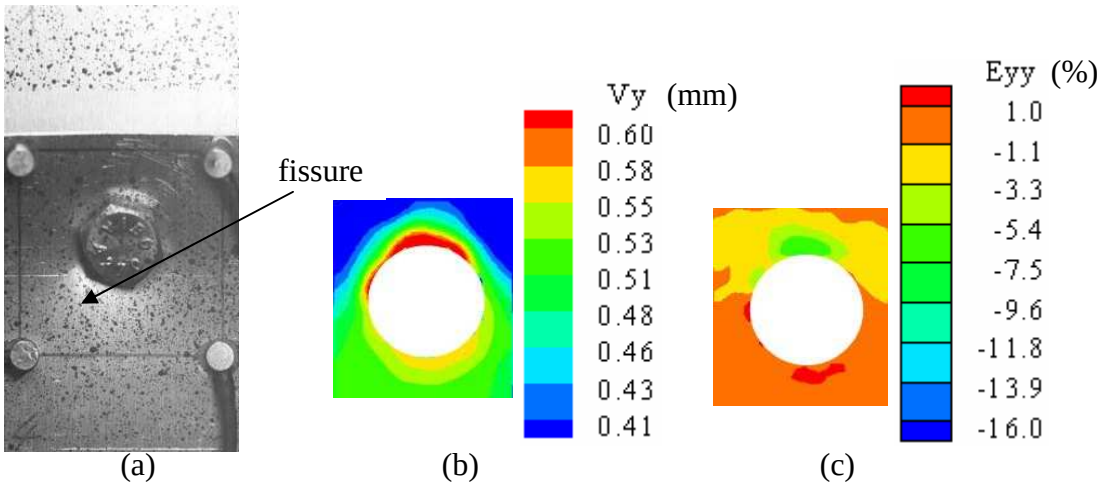


Figure III-21. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 6, (c)-champ de déformation au point 6*

vii) phase 7 : phase de la propagation instable de la fissure (figure III-22). Les relevés donnés par la technique C.I.D. montrent une variation de la déformation caractérisée par un changement de pente (point 6) suivi par une chute de la valeur de la déformation en compression jusqu'à atteindre sa valeur maximale en fin de zone au point 7.

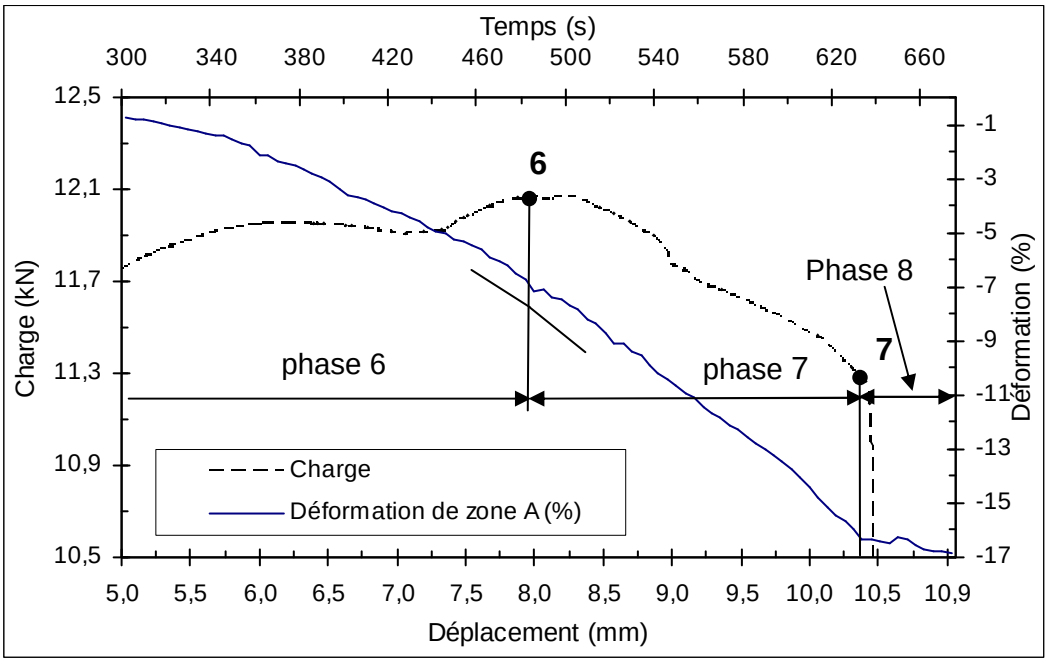


Figure III-22. *Agrandissement d'une zone pour la déformation ε_y de la zone A et charge en fonction du temps (phase 6, 7, 8)*

Sur la figure III-23, nous remarquons que les fissures se trouvent des deux côtés de la tête du boulon en forme de V : fissures dues à la fois aux effets de la traction et au cisaillement. La valeur des déplacements, en zone A, augmente par rapport à la phase précédente tandis que la valeur de la déformation de compression atteint son maximum à 16% environ. Les fissures continuent à progresser au cours de cette phase.

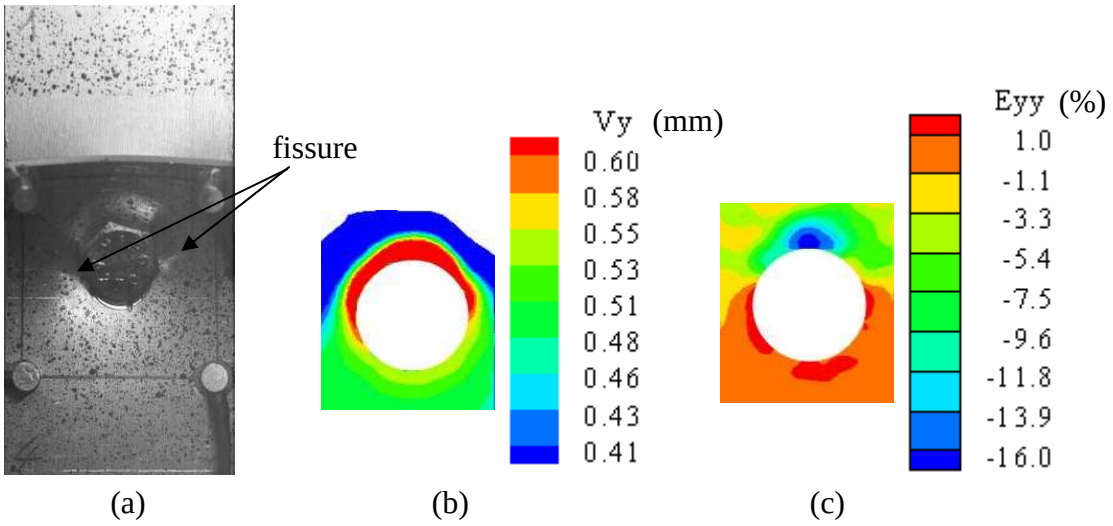


Figure III-23. *(a)-image réelle, (b)- champ de déplacement au point 7, (c)-champ de déformation au point 7*

viii) phase 8 : phase de la rupture brutale de l'assemblage caractérisée par une activité exponentielle des évènements par la technique C.I.D. et une diminution de la déformation en compression de la zone A (point d'inflexion au point 7).

III.1.2. Le cas d'un assemblage à une fixation selon la norme NASM 1312-4

Dans cette partie, nous analysons l'effet de bord sur le comportement mécanique global d'un assemblage boulonné. En effet, la norme NASM 1312-4 propose une configuration d'assemblage avec des distances entre les deux axes d'alésage ainsi qu'entre les bords de plaques et les axes d'alésages de telle sorte à limiter la flexion secondaire au cours d'un essai de traction - cisaillement.

Nous avons bien identifié, dans la partie III.1.1, les phases du comportement global d'un assemblage d'une fixation selon la norme usuelle en utilisant les deux techniques EA et CID. Dans cette partie, nous analysons de façon identique les phases du comportement global d'un assemblage d'une fixation selon norme NASM, pour un couple de serrage de 4 daN.m et un jeu de 0,2 mm.

La figure III-24 représente les positions des capteurs sur l'éprouvette d'une fixation selon la norme NASM.

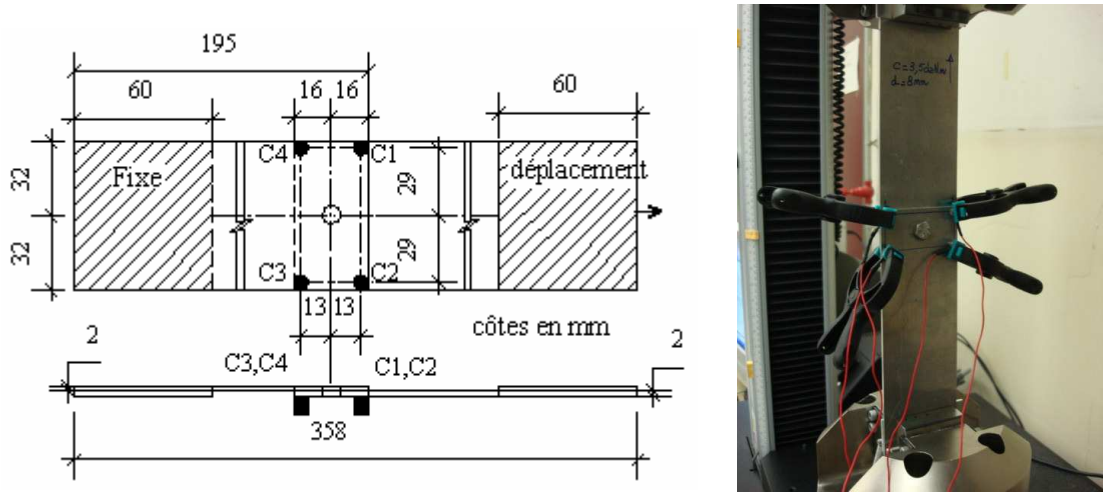


Figure III-24. Position des quatre capteurs C1 à C4

La Figure III-25 représente le nombre de coups, pour une valeur cumulée pendant 2 secondes pour les quatre capteurs, en fonction du temps et de la charge appliquée. A partir de ces courbes, nous pouvons mettre en évidence les différentes phases se produisant lors du chargement de l'assemblage.

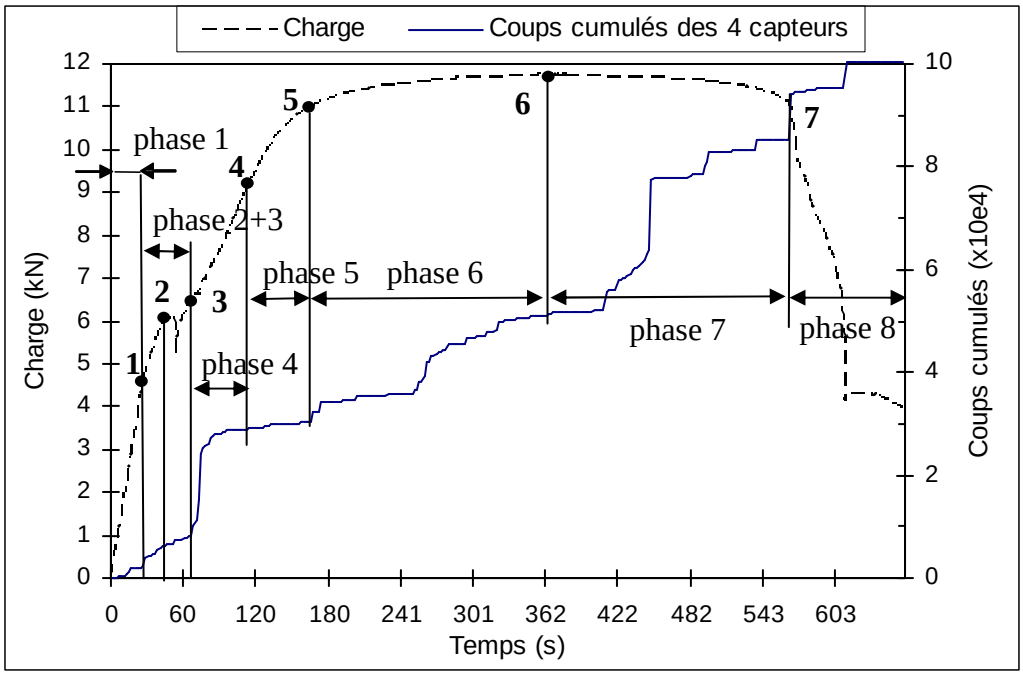


Figure III-25. *Coups cumulés et charge en fonction du temps*

Nous remarquons que le mode de rupture, dans ce cas, est en mode de cisaillement mais en analysant les figures III-26a,b,c nous pouvons identifier, comme précédemment, des phases en analysant le paramètre nombre de coups. Dans ce cas, le comportement global est divisé également en huit phases comme l'éprouvette de norme usuelle. Seules les valeurs de début et de fin de phases changent. On retrouve alors :

i) phase 1 : phase élastique du matériau.

ii) phase 2 : phase d'allongement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

iii) phase 3 : phase de matage et d'adaptation.

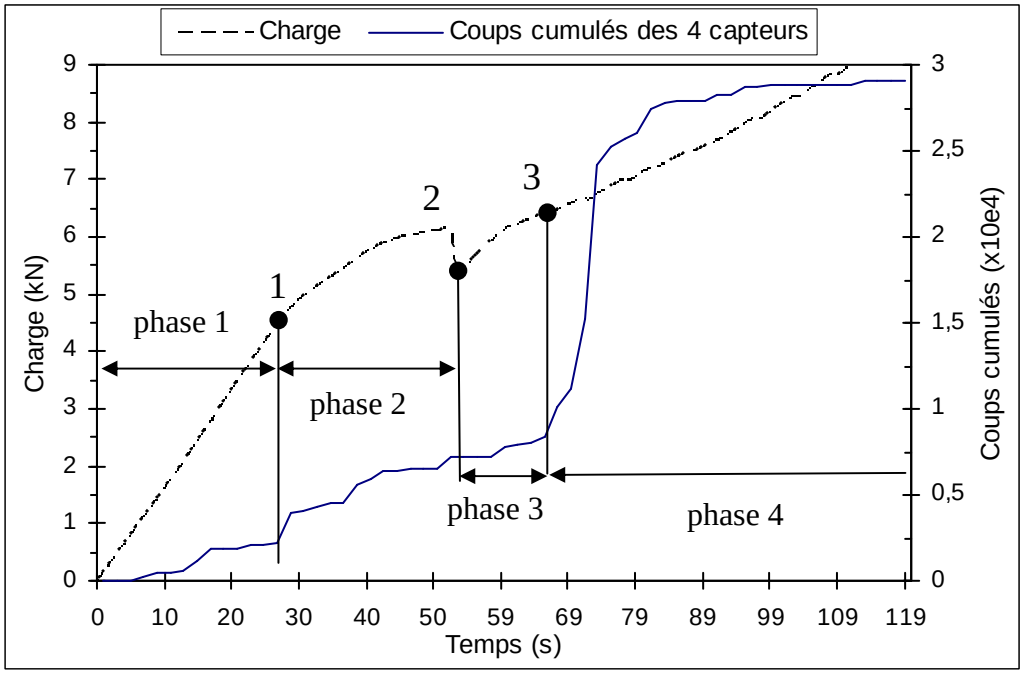


***Figure III-26a**. Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et paramétrique charge en fonction du temps (phase 1+2+3)*

iv) phase 4 : phase élastique de la structure soumise à une traction avec une flexion secondaire.

iii) phase 5 : phase de la plastification autour des alésages des plaques.

vi) phase 6 : phase de la propagation stable de fissure.

vii) phase 7 : phase de la propagation instable de la fissure.

viii) phase 8 : phase de la rupture brutale de l'assemblage.

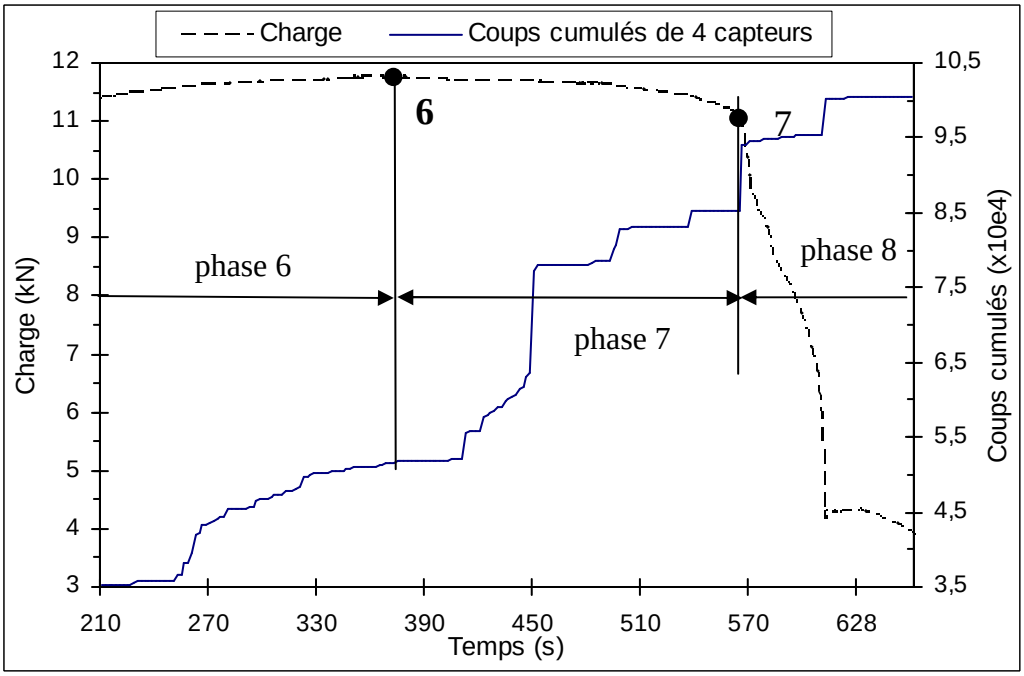


***Figure III-26b**. Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 4+5)*

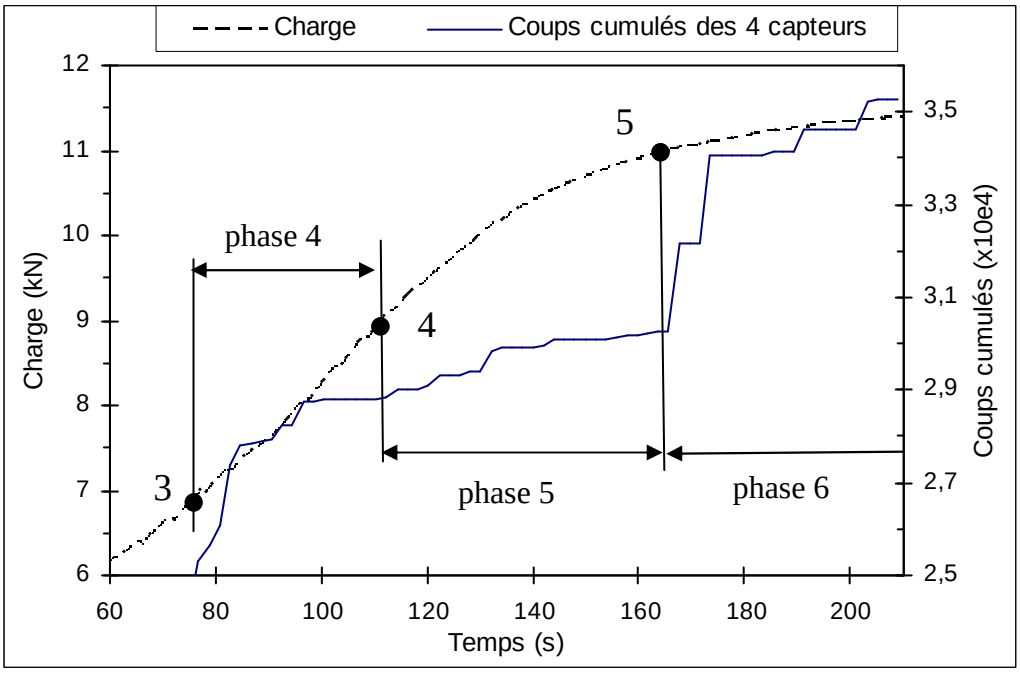


***Figure III-26c.** Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 6+7)*

III.1.3. Le cas d'un assemblage à deux fixations horizontales

La figure III-27 représente les positions des capteurs sur l'éprouvette de deux fixations selon la norme NASM 1213-4 pour un couple de serrage de 4 daN.m et un jeu de 0,2 mm.

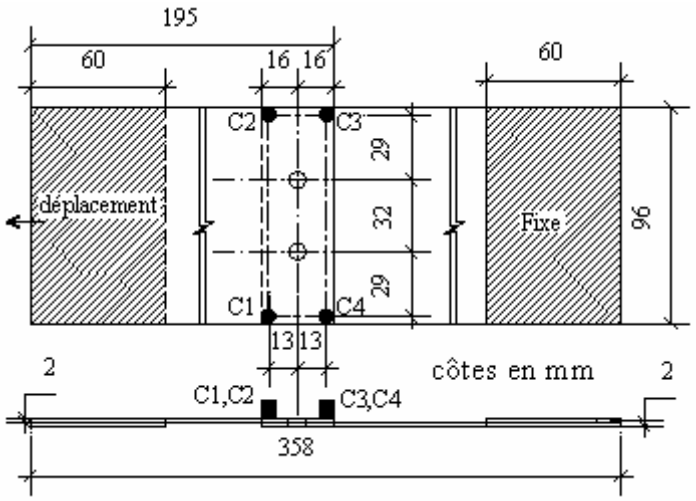


Figure III-27. *Position des quatre capteurs C1 à C4*

La figure III-28 représente le nombre de coups, pour une valeur cumulée pendant deux secondes pour les quatre capteurs, en fonction du temps et de la charge appliquée. A partir de ces courbes, nous pouvons mettre en évidence les différentes phases se produisant lors du chargement de l'assemblage.

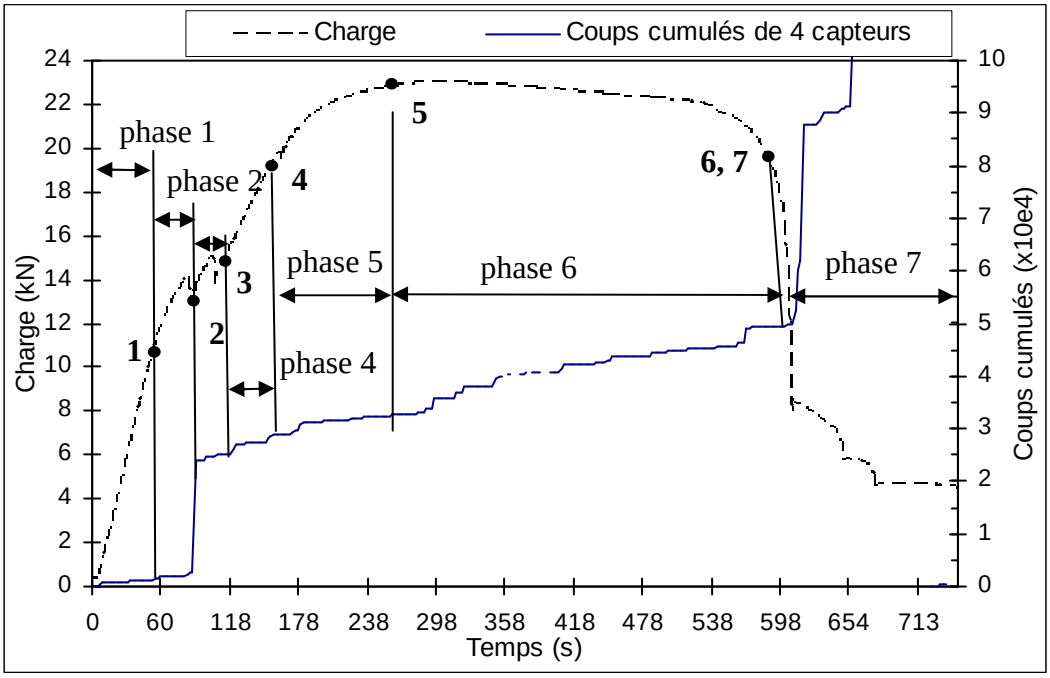


Figure III-28. *Coups cumulés de 4 capteurs et charge en fonction du temps*

Nous remarquons pour le cas d'une éprouvette avec deux fixations horizontales que :

- pour un jeu de 2 mm, il n'existe pas de glissement pur,

- le mode de rupture dans ce cas se produit en cisaillement,

- le point d'amorçage se situe à l'endroit où la force de traction atteint la valeur maximale.

En observant les figures III-29a,b,c nous pouvons identifier des phases en analysant les sauts du nombre de coups. Dans ce cas, le comportement global comprend sept phases :

i) phase 1 : phase élastique du matériau.

ii) phase 2 : phase d'un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

iii) phase 3 : phase de matage et d'adaptation.

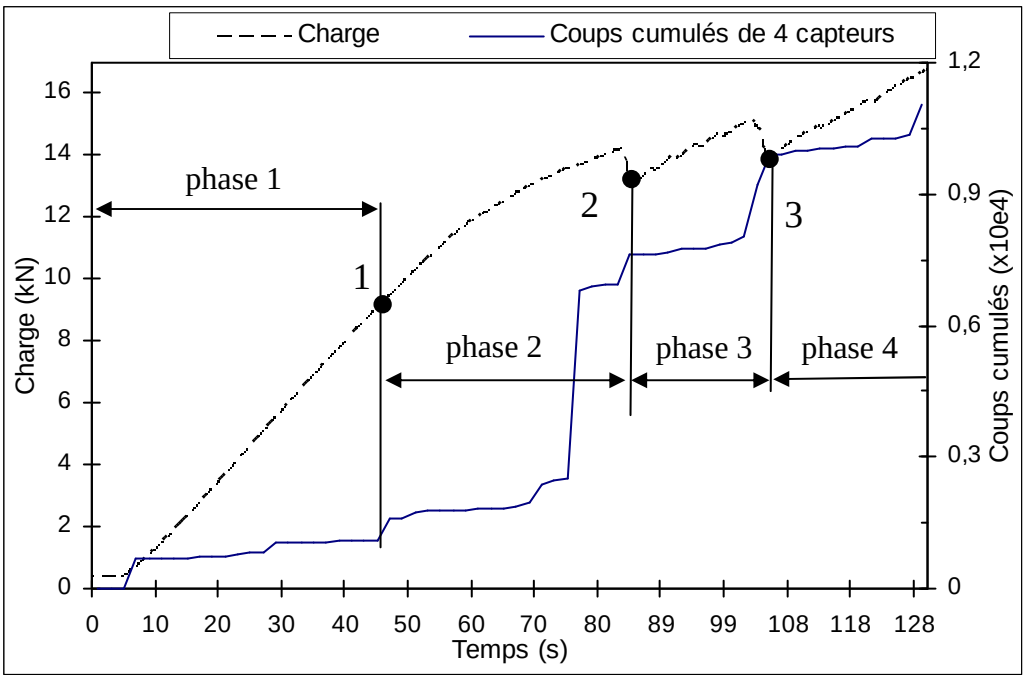


Figure III-29a. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 1+2+3)*

iv) phase 4 : phase élastique de la structure soumise à une traction avec une flexion secondaire.

iii) phase 5 : phase de la plastification autour des alésages des plaques.

vi) phase 6 : phase de la propagation de fissure.

vii) phase 7 : phase de la rupture brutale de l'assemblage.

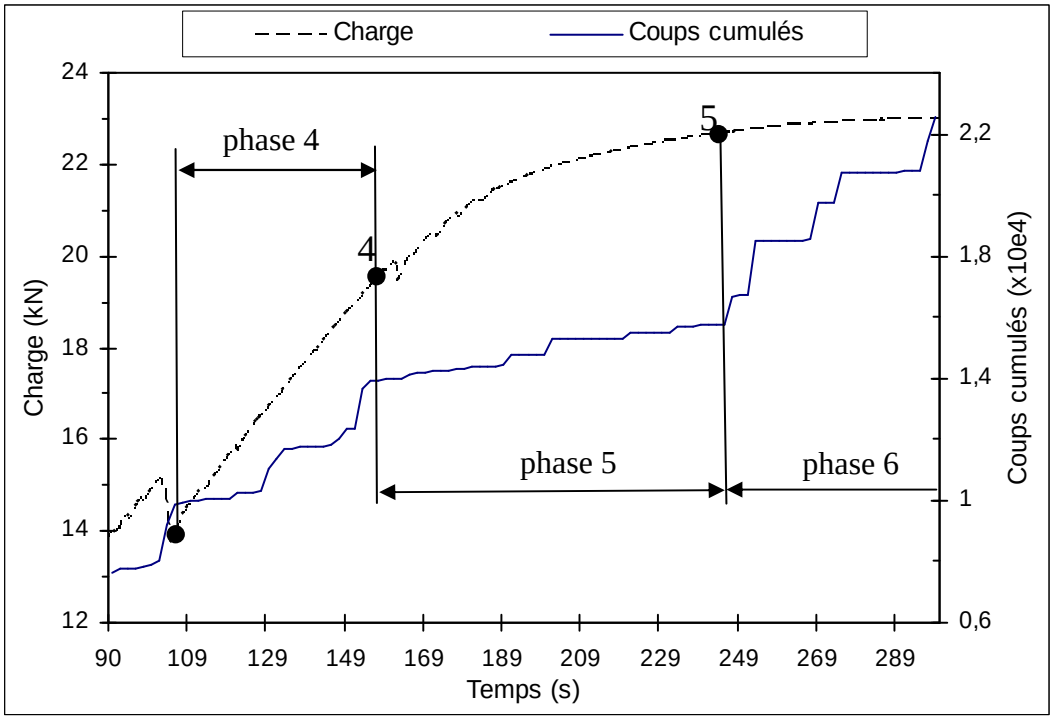


Figure III-29b. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 4+5)*

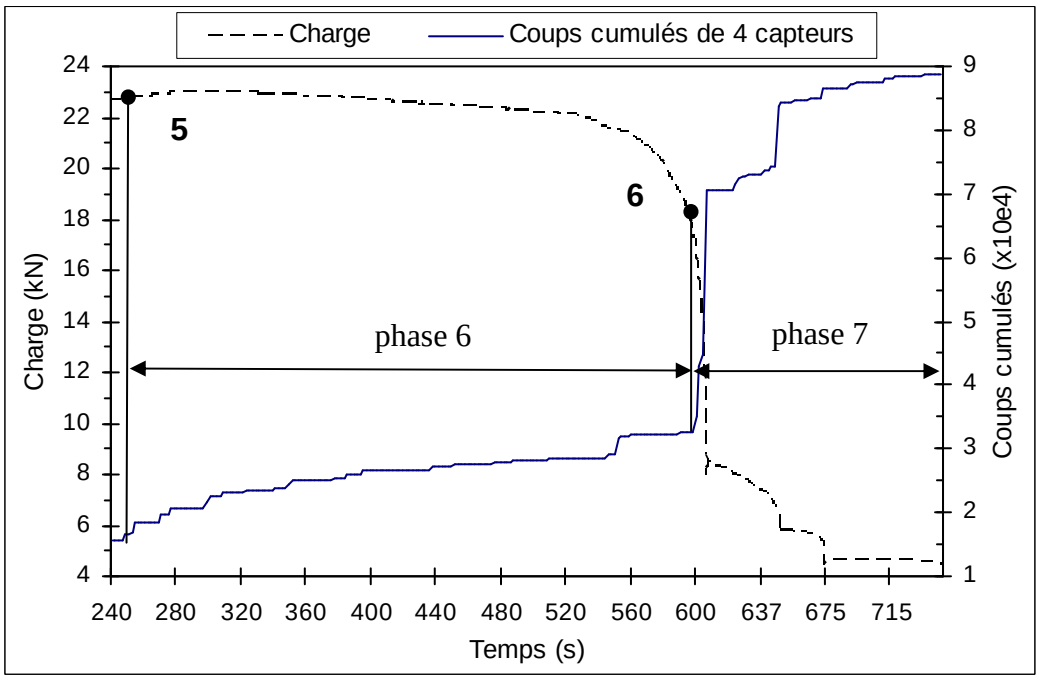


Figure III-29c. *Agrandissement d'une zone du nombre de coups cumulés et charge en fonction du temps (phase 6+7)*

III.1.4. Le cas d'un assemblage à deux fixations verticales

La figure III-30 représente les positions des capteurs sur l'éprouvette à deux fixations verticales, selon la norme usuelle, pour un couple de serrage de 3 daN.m et un jeu de 0,2 mm. Globalement, on note que les résultats obtenus à partir des essais sur des éprouvettes à trois fixations donnent les mêmes tendances au niveau du comportement mécanique global.

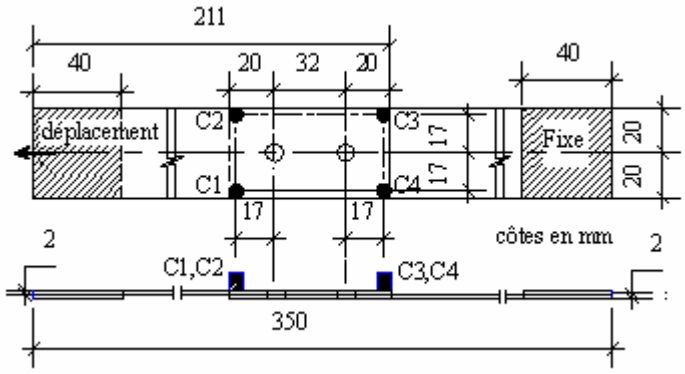


Figure III-30. *Position des quatre capteurs C1 à C4*

Nous remarquons aussi pour le cas des éprouvettes avec 2 fixations verticales que :

- Pour une valeur du jeu de 0.2 mm, il n'existe pas de glissement pur.

- Comme la phase de glissement est grande (la valeur de déplacement vaut 1,1mm), la phase d'élasticité de la structure n'existe plus.

- La force de traction se renforce et atteint sa valeur maximale au point de rupture.

En observant les figures III-31a et b, nous pouvons identifier les phases en analysant les changements de pente de la courbe des énergies cumulées et les valeurs de l'amplitude maximale.

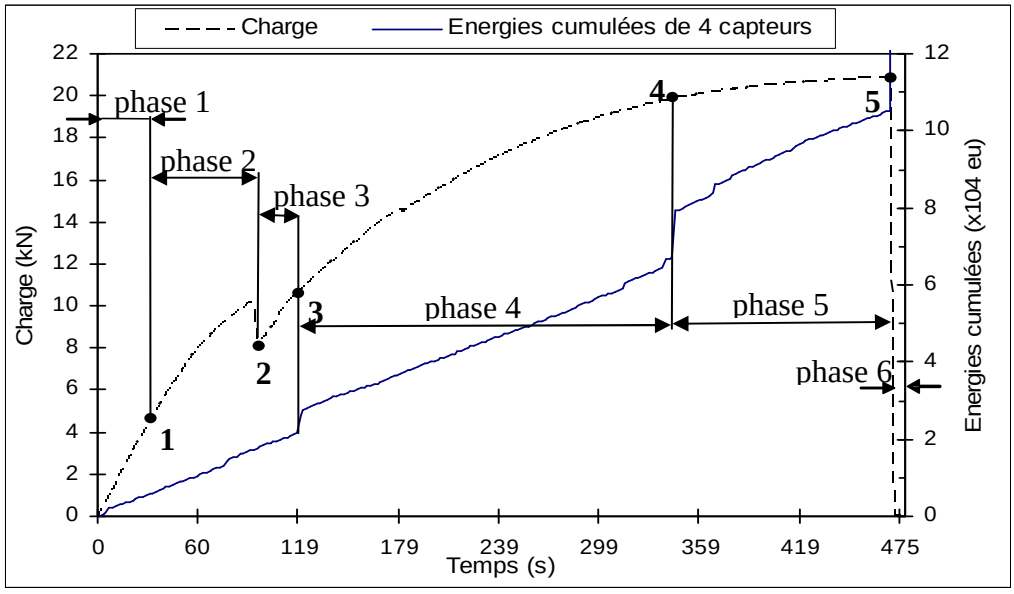


Figure III-31a. *Energie cumulées de 4 capteurs et charge en fonction du temps*

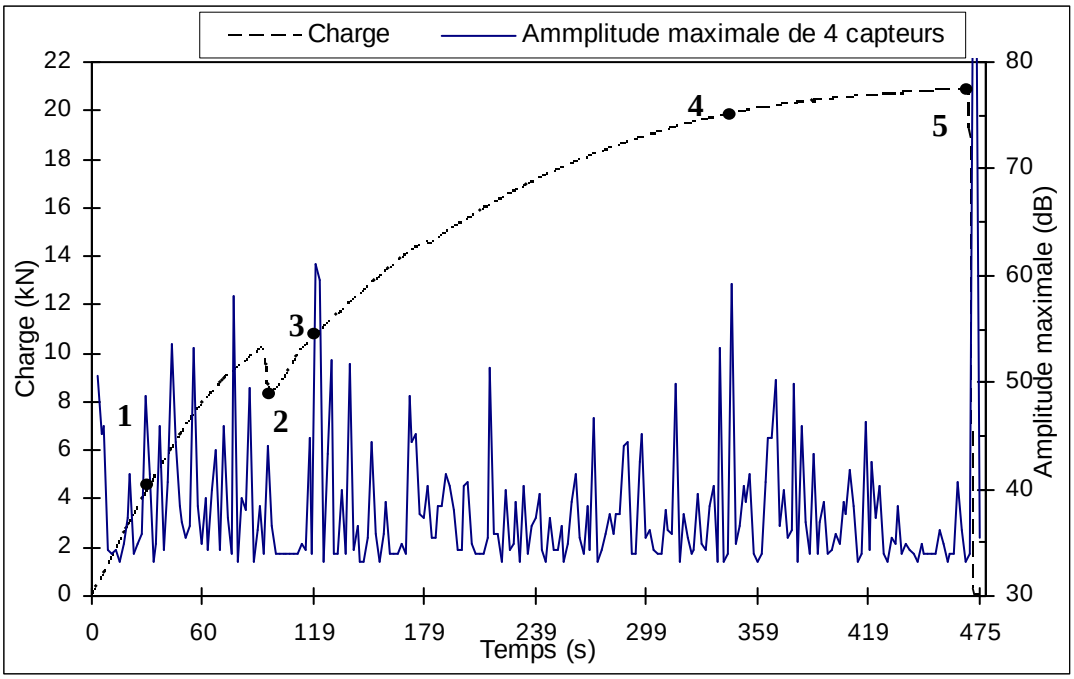


Figure III-31b. *Amplitude maximale de 4 capteurs et charge en fonction du temps*

On constate aussi que le comportement global, dans ce cas, comprend six phases :

i) phase 1 : phase élastique du matériau.

ii) phase 2 : phase d'un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

iii) phase 3 : phase de matage et d'adaptation.

iv) phase 4 : phase de plastification autour des alésages des plaques.

v) phase 5 : phase de la propagation de fissure.

vi) phase 6 : phase de la rupture brutale de l'assemblage.

II.1.5. Conclusions

-A- On constate l'utilité du couplage des ces deux techniques pour définir plus précisément les différentes phases. Dans le cas de l'éprouvette à une fixation selon la norme usuelle**,** huit phases sont identifiées pour le comportement global. Le glissement pur est présent. Les résultats sont portés sur la figure III-32. Globalement, la courbe charge/déplacement est découpée en huit zones où l'on donne une description pour chacune d'elle.

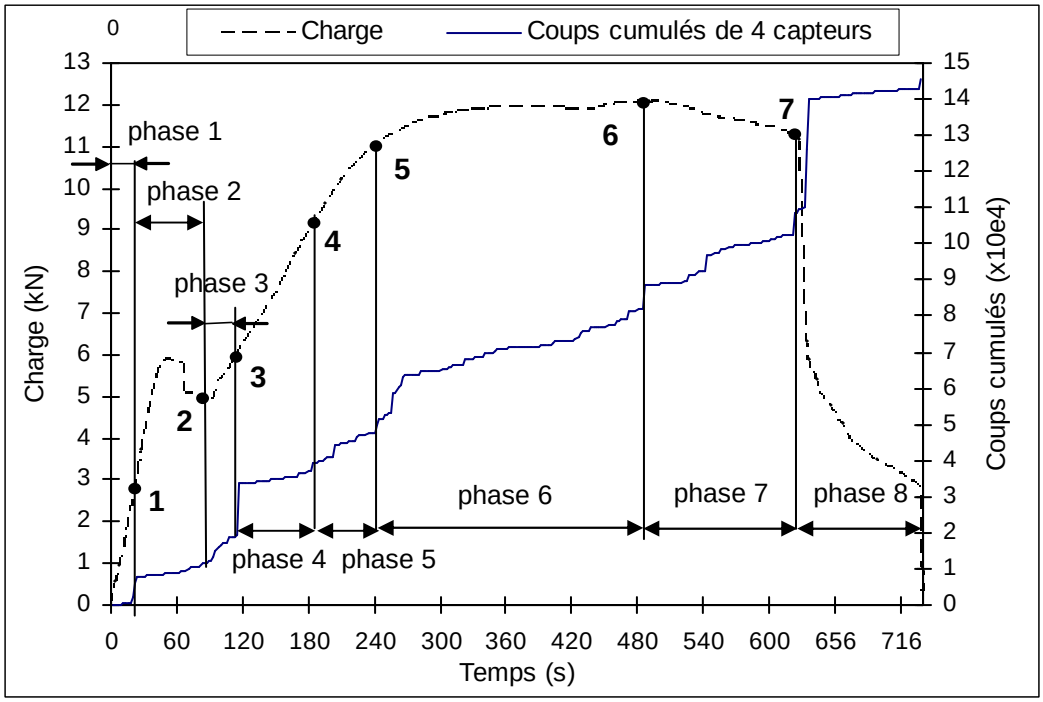


Figure III-32. *Les phases de comportement de l'assemblage boulonné avec jeu*

- Phase 1 : comportement élastique du matériau, qui se présente sous forme d'une partie linéaire dont la pente est similaire au module d'élasticité longitudinal des tôles d'aluminium.

- Phase 2 : caractérise à la fois un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

- Phase 3 : matage entre le corps du boulon et les alésages des plaques.

- Phase 4 : comportement élastique de la structure qui est soumise à une traction avec une flexion secondaire. La pente de cette partie est linéaire et elle est différente de celle observée dans la phase 1 car il s'agit ici de la raideur de la structure.

- Phase 5 : plastification autour des alésages des plaques.

- Phase 6 : propagation stable de la fissure.

- Phase 7 : propagation instable de la fissure.

- Phase 8 : rupture brutale de l'assemblage.

-B- Dans le cas des éprouvettes possédant une et deux fixations horizontales selon la norme NASM, sept phases sont aussi identifiées pour le comportement global. Trois différences sont mises en évidence :

- il n'existe pas, dans la phase 2, de glissement pur,

- la pente de la phase 4 représentative de la structure globale est presque semblable à la pente de la phase 1 caractéristique du comportement élastique des substrats.

- le mode de rupture est un mode de cisaillement pur.

La description des phases que l'on retrouve sur la figure II.33 est donnée ci-dessous :

phase 1 : phase élastique du matériau.

phase 2 : phase d'un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

phase 3 : phase de matage et d'adaptation.

phase 4 : phase élastique de la structure qui est soumise à une traction avec une flexion secondaire.

phase 5 : phase de la plastification autour des alésages des plaques.

phase 6 : phase de la propagation de fissure.

phase 7 : phase de la rupture brutale de l'assemblage.

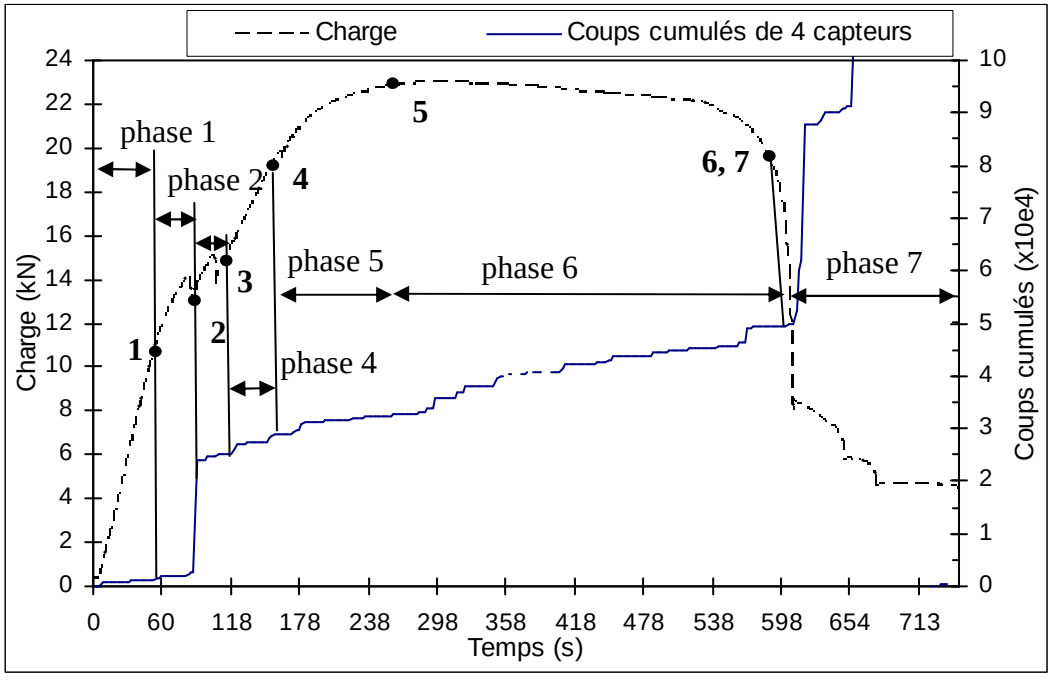


Figure III-33. *Les phases d'un assemblage possédant deux fixations horizontales de norme NASM*

-C- Dans le cas des l'éprouvettes possédant deux ou trois fixations (verticales) selon la norme usuelle, six phases sont identifiées pour le comportement global que l'on retrouve sur la figure II.34 où l'on donne une description pour chacune d'elles :

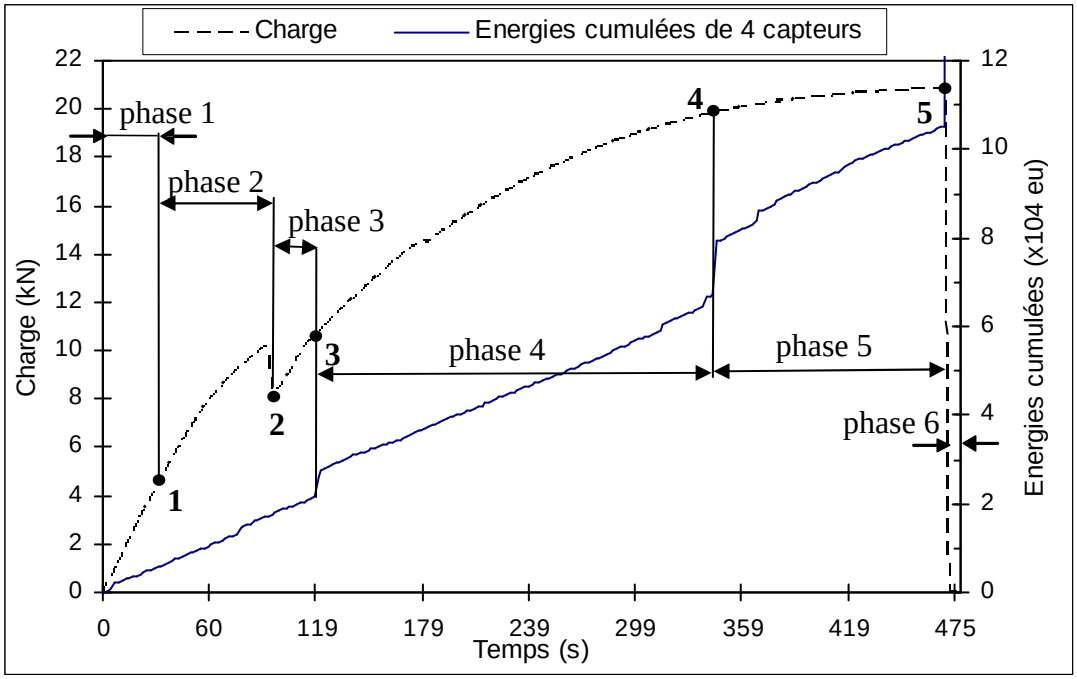


Figure III-34. *Les phases de comportement de possédant deux fixations verticales en norme usuelle*

phase 1 : phase élastique du matériau.

phase 2 : phase d'un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon.

phase 3 : phase de matage et d'adaptation.

phase 4 **:** phase de la plastification autour des alésages des plaques.

phase **5** : phase de la propagation de fissure.

phase **6 :** phase de la rupture brutale de l'assemblage.

Dans ce cas d'éprouvette, le mode de rupture prépondérant est un mode de traction pure, ceci s'explique par les effets de bord décrits par les rapports E/D et W/D.

III.2. Influence des paramètres

III.2.1. Couple de serrage

III.2.1.1 Relation entre le couple de serrage et l'effort de tension dans le boulon

Lors de la mise en place d'un assemblage (assemblage = boulonnage = vis + rondelle+ écrou), il est primordial d'appliquer un couple de serrage adapté. Ce couple de serrage sert à mettre en tension le boulon pour tenir les éléments en contact. La formule de Kellerman et Klein, issue de l'analyse et de l'expérience, met en relation le couple de serrage et l'effort de tension dans le boulon :

$Cs = (p/2\pi + 0{,}583\ d\ \mu_f + D/2\ \mu_t) * F$

En rappelant les définitions suivantes où :

F : effort de tension dans le boulon

C_S : le couple de serrage

p : pas du filetage

d : diamètre moyen à flanc de filet (moyen de filetage)

D : diamètre moyen sous tête de boulon (ou écrou)

μ_f : coefficient frottement dans les filets

μ_t : coefficient de frottement sous tête

$\mu = 0{,}20$: Montage à sec

Nous avons appliqué cette formule dans notre cas pour calculer la relation du couple de serrage et tension dans le boulon. Les données d'entrée sont établies dans le tableau III-1.

Données d'entrée	Valeur	Unité
p : pas de vis	1,25	mm
d : diamètre moyen à flanc de filet (moyen du filetage)	8,0	mm
D : diamètre moyen sous tête	10,6	mm
μ_f : coefficient frottement dans les filets	0,2	
μ_t : coefficient de frottement sous tête et rondelle	0,2	

Tableau III-1. *Les données calculées*

Calcul K après la formule de Kellerman et Klein

$$K = \left(\frac{p}{2\pi} + 0{,}583 d\mu_f + \frac{D}{2}\mu_t \right) = 2{,}232 \text{ (mm)}$$

Les valeurs de la tension dans le boulon en fonction du couple de serrage sont calculées et données dans le tableau III-2.

Un dispositif expérimental, donné par la figure III-35, a été réalisé afin de relever de façon plus exacte les valeurs de tension dans la vis en fonction du couple de serrage appliqué sur l'écrou. Le standard (boulon + rondelle) est identique à celui utilisé pour la fixation des

éprouvettes. Deux types de clef dynamométrique ont été utilisées : une clef dynamométrique à lecture directe (marque INSTRON – FACOM précision ±6%), et une clef de serrage (desserrage) dynamométrique mécanique Dynalec (marque SAM) de précision ±4% (conforme à norme NF EN ISO 6789).



Figure VIII-35. *Montage de caractérisation effort/couple.*

En négligeant l'allongement du dispositif, on relève pour chaque valeur de couple l'effort enregistré par la cellule de force de la machine de traction. On retrouve sur la figure III-36 l'évolution de l'effort de tension dans la vis en fonction du couple de serrage appliqué, avec une courbe de tendance montrant une évolution linéaire entre la force et le couple de serrage.

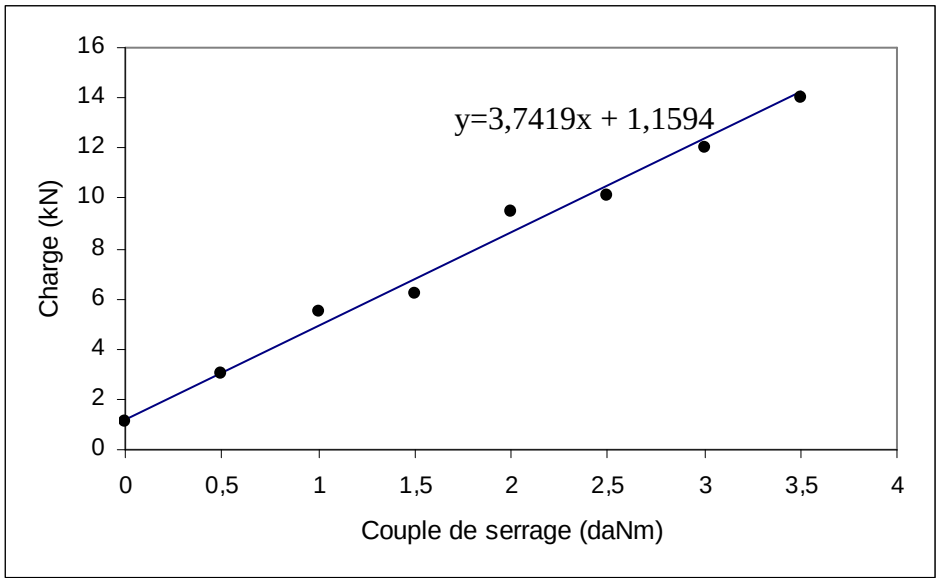


Figure III-36. *Courbe effort/couple (points expérimentaux, droite de régression)*

L'objectif de cette partie expérimentale est d'évaluer les valeurs de tension dans le boulon, qui sont nécessaires pour les calculs numériques. On remarque des écarts faibles sur le tableau III-2 mais non négligeables avec ceux données par la formule de Kellerman et

Klein donnée au début de ce paragraphe. Ces différences peuvent s'expliquer car les morphologies d'assemblage ne sont pas identiques. L'assemblage avec une vis modèle Kellerman et Klein donne un effet de frottement différent entre la tête du boulon et la plaque de celui constitué d'un assemblage boulonné car le frottement se situe alors entre la rondelle et l'écrou.

Couple de serrage (daN.m)	Tension de boulon (KN)		Ecart (%)
	Valeurs calculés	Valeurs expérimentales	
1	4,48	4,90	8,5
1,5	6,72	6 ,77	0,7
2	8,96	8,64	3,5
2,5	11,20	10 ,51	6,1
3	13,44	12,39	7,8
3,5	15,68	14,26	9,0
4	17,92	16,13	9,9

Tableau III-2. *Les valeurs des tensions dans le boulon en fonction du couple de serrage*

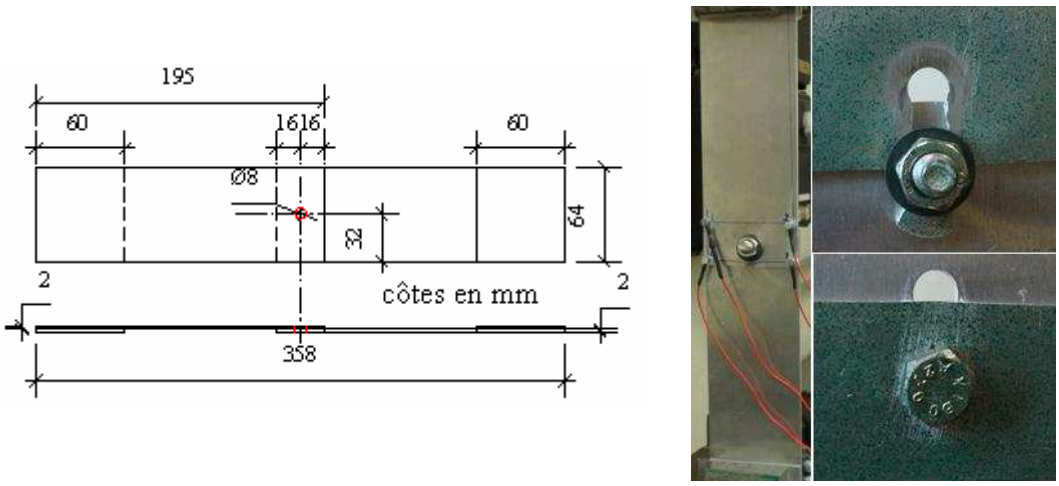
La précision de la valeur de cette tension sera importante dans le chapitre IV qui concerne la simulation numérique.

III.2.1.2 Influence du couple de serrage

Lors du glissement entre deux plaques, les deux paramètres influents sont le coefficient de frottement et le couple de serrage. Le premier est influencé par l'état de surface et la lubrification des pièces. Pour une surface en alliage d'aluminium, le coefficient de frottement vaut globalement 0,2 (montage à sec). L'effort de traction sera d'autant plus important pour obtenir un déplacement relatif des deux substrats que l'effort de serrage est important.

Afin de trouver l'influence du couple de serrage, nous avons réalisé six essais en utilisant six valeurs de couple de serrage : 0 – 2 - 2,5 – 3 - 3,5 - 4 daNm, sur une éprouvette possédant une fixation selon la norme NASM comme indiqué sur la figure III-34a. Les substrats possèdent un diamètre d'alésage de 8mm (correspondant à un jeu de 0.2mm).

Les résultats des essais sont présentés par les courbes de charge–déplacement (figure III-38).



(a) (b)

Figure III-37. *(a)- Eprouvette une fixation de norme NASM (b)- détail du mode de rupture*

Pour chaque courbe, nous déterminons les points particuliers (à savoir les points qui correspondants aux différentes phases du comportement de l'assemblage, notés de 1 à 7) en utilisant simultanément les techniques d'EA et de CID (analyse en détail dans la partie III-3.2).

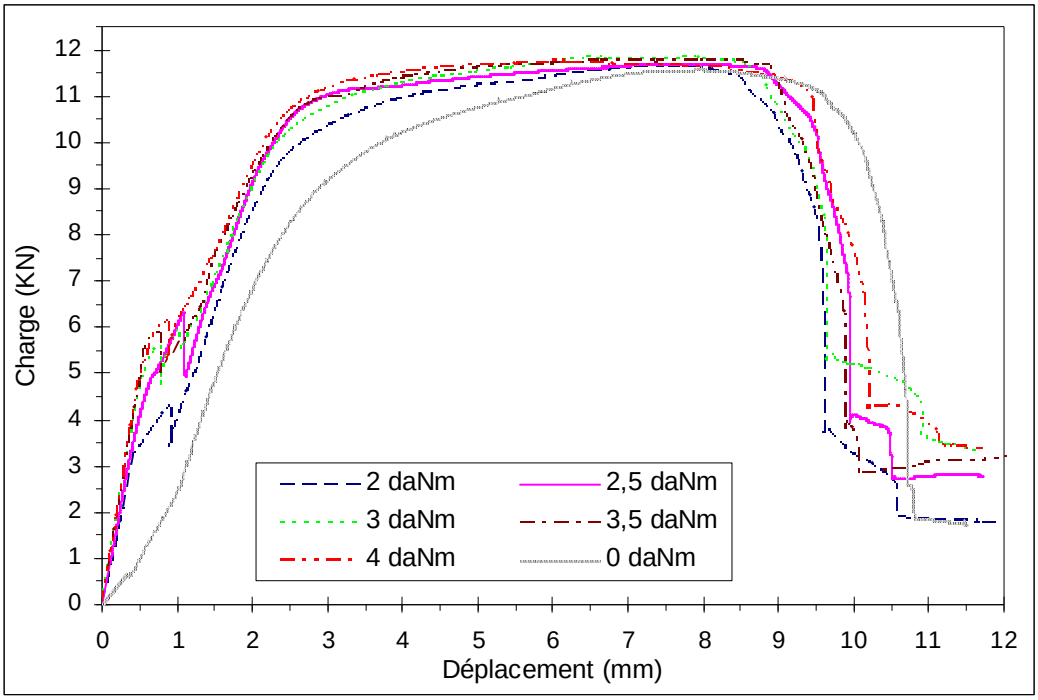


Figure III-38. *Courbe charge – déplacement d'une fixation (norme NASM)*

Le tableau III-3 présente les valeurs de la force de traction et du déplacement des sept points particuliers pour les six essais (correspondant donc à six valeurs de couple de serrage).

- Point 1 : avant glissement
- Point 2 : après glissement
- Point 3 : après matage et adaptation alésage/corps de boulon

- Point 4 : limite d'élasticité
- Point 5 : amorçages
- Point 6 : force de traction maximale
- Point 7 : rupture

Nous remarquons que

- si la valeur du couple de serrage est petite, le phénomène de glissement apparaît plus tôt. Prenons l'exemple d'un couple de serrage de 2 daNm : ce glissement apparaît quand le déplacement atteint la valeur de 0,33 mm, soit une force égale à 2,47 kN et un temps de 20 s. Avec une valeur extrême de 4 daNm, les valeurs correspondantes donnent un déplacement de 0,43 mm, un effort de 4,38 kN et un temps de 26 s.

- même si le jeu fonctionnel vaut 0,2mm la valeur du déplacement total de la phase 2 est plus grande. On relève 0,34 mm de déplacement pour cette phase. Cette différence s'explique car cette phase caractérise à la fois un allongement et un déplacement relatif (dû au glissement) des tôles.

- le couple de serrage n'a pas beaucoup d'influence sur la position des points 4 caractéristique de la fin de la limite d'élasticité de la structure. On relève un déplacement proche de 1,83 mm.

Eprouvette une fixation, diamètre du trou = 8mm, d_{boulon}=7,9mm

Couple de serrage (daN.m)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	Point 6 F (kN) d (mm)	Point 7 F (kN) d (mm)	Jeu= d_2-d_1 (mm)
C_1 = 2,0	F_1=2,47	F_2=3,44	F_3=5,19	F_4=7,72	F_5=10,1	F_6=11,7	F_7=11,3	0,56
	d_1=0,33	d_2=0,89	d_3=1,28	d_4=1,79	d_5=2,79	d_6=7,54	d_7=8,53	
C_2 = 2,5	F_1=3,09	F_2=4,98	F_3=4,96	F_4=8,39	F_5=10,8	F_6=11,7	F_7=11,5	0,34
	d_1=0,35	d_2=0,69	d_3=1,11	d_4=1,82	d_5=2,75	d_6=7,73	d_7=8,84	
C_3 = 3,0	F_1=3,91	F_2=4,82	F_3=6,08	F_4=8,41	F_5=10,6	F_6=11,8	F_7=11,6	0,37
	d_1=0,40	d_2=0,77	d_3=1,27	d_4=1,83	d_5=2,81	d_6=6,46	d_7=8,61	
C_4 = 3,5	F_1=4,08	F_2=4,32	F_3=5,80	F_4=8,75	F_5=10,9	F_6=11,8	F_7=11,6	0,38
	d_1=0,41	d_2=0,79	d_3=1,51	d_4=1,84	d_5=2,84	d_6=7,92	d_7=8,89	
C_5 = 4,0	F_1=4,3	F_2=5,29	F_3=6,24	F_4=8,88	F_5=10,9	F_6=11,7	F_7=11,1	0,45
	d_1=0,43	d_2=0,88	d_3=1,04	d_4=1,83	d_5=2,77	d_6=6,18	d_7=9,45	
C_0 = 0,0	F_1=0,00	F_2=0,59	F_3=2,57	F_4=6,33	F_5=8,57	F_6=11,6	F_7=11,1	0,34
	d_1=0,00	d_2=0,34	d_3=1,01	d_4=1,85	d_5=2,64	d_6=7,81	d_7=9,40	

Tableau III-3. *Les valeurs de force et de déplacement des sept points particuliers*

- la force de traction maximale (points 6) des six courbes est toujours atteinte à 11,8 kN environ. La figure III-34b indique que le mode de rupture est toujours un mode de

cisaillement pur et que l'on observe un plateau dans l'intervalle de déplacement de 3 à 9 mm.

- la valeur du couple de serrage n'a pas beaucoup d'influence sur la valeur de la rupture. Globalement la force de rupture se situe aux alentours de 11,3 kN pour un déplacement de 9 mm.

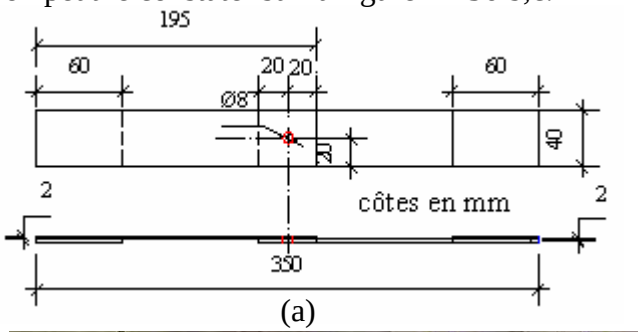
III.2.2. Effets de bord

Nous nous intéresserons aux résultats donnés par six essais réalisés sur une éprouvette à une fixation (norme usuelle). Six valeurs de couple de serrage : 0 – 2 - 2,5 – 3 - 3,5 - 4 daNm sont introduites pour pouvoir comparer ces résultats à ceux donnée au chapitre III-2.1 et portant sur une éprouvette à une fixation (norme NASM). La figure III-39a donne les caractéristiques géométriques de l'éprouvette. On remarque que la largeur des substrats vaut W=40 mm et que les diamètres des alésages valent D=8 mm. On a donc un rapport W/D=5 dans le sens travers. Dans le sens long ce rapport vaut E/D=20/8=2,5 où E représente la distance entre le centre de l'alésage et le bord libre du substrat dans le sens long.

Les résultats présentés au chapitre III-2.1 sont donnés pour une valeur dans le sens transverse W/D=8 et une valeur dans le sens long E/D=2.

On constate qu'il y a dans la norme NASM une largeur W de l'éprouvette plus grande que celle donnée dans la norme usuelle et une valeur de la distance E plus grande dans la norme usuelle que dans la norme NASM.

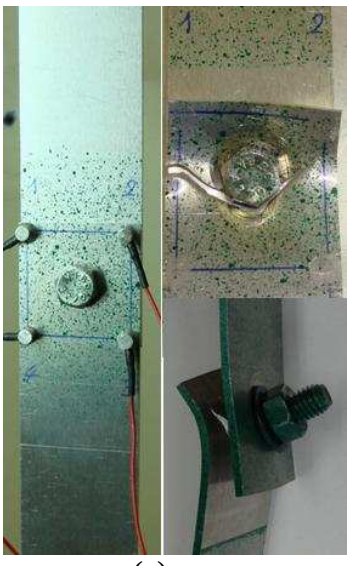
Dans la partie III.2.1, les éprouvettes une fixation à norme NASM donnent un mode de rupture en cisaillement pur alors que l'on a un mode de rupture mixte traction – cisaillement comme on peut le constater sur la figure III-36 b,c.



(a)



(b)



(c)

Figure III-39. *Eprouvette une fixation de norme usuelle et détail du mode de rupture*

La figure III-40 présente les courbes charge – déplacement de ces six essais et le tableau III-4 regroupe les valeurs des forces de traction et de déplacement des 7 points particuliers (comme l'effet de couple de serrage).

Nous constatons que :

- les différentes remarques concernant le couple de serrage (paragraphe III-2.1) sont confirmées.

- Le glissement se compose de deux partie : une première partie relative à un mélange d'allongement des substrats et de déplacement relatif (point 1 à b de la figure III-5), puis une seconde partie relative à un glissement pur (point b à 2 de la figure III-5).

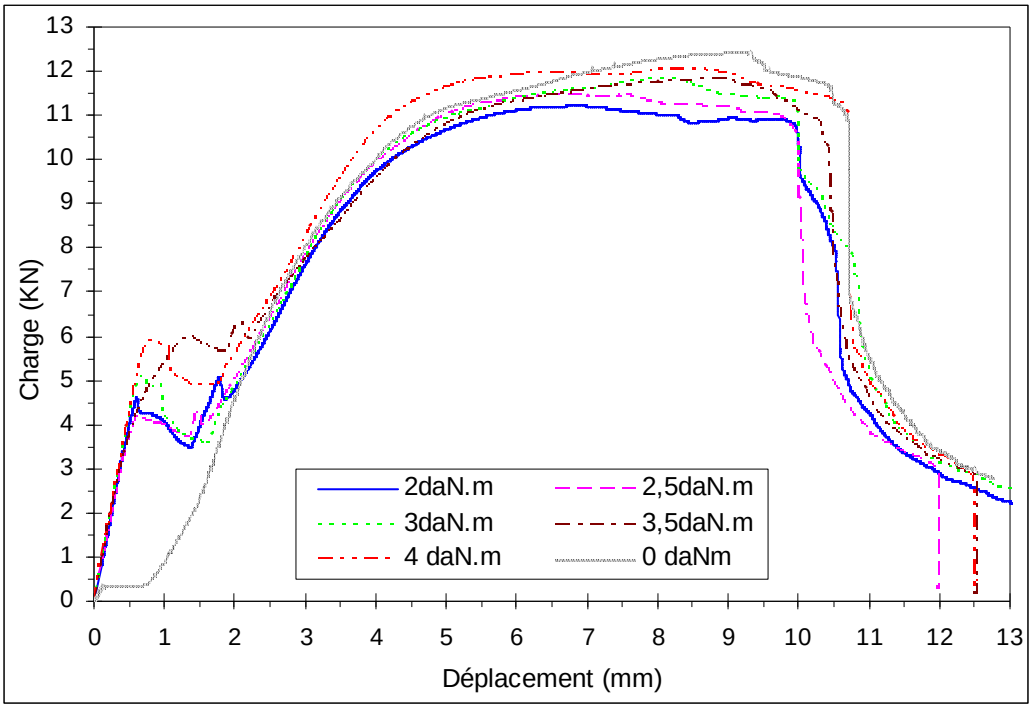


Figure III-40. *Courbe charge – déplacement d'une fixation à norme usuelle*

III.2.3. Influence du jeu

Le jeu relatif dans l'assemblage une fixation correspond à deux fois la différence entre le diamètre du trou et le diamètre du corps du boulon comme indiqué au chapitre II-5. La modification du diamètre des alésages dans les substrats change alors la valeur du jeu.

Plus la valeur du jeu est grande et plus la taille de la zone 2 notée glissement est grande.

L'influence de ce paramètre est mise au jour en réalisant six essais sur une éprouvette d'une fixation selon la norme usuelle (figure III-41) avec une valeur du couple de serrage C = 2,5 daNm. Sur chacun des substrats, les diamètres des alésages prennent les valeurs suivantes : 8 – 8,2 – 8,3 – 8,4 – 8,5 mm.

Eprouvette une fixation, diamètre du trou = 8,4mm, d_{boulon}=7,9mm

Couple de serrage (daN.m)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point b F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	Point 6 F (kN) d (mm)	Point 7 F (kN) d (mm)	Jeu= d_2-d_1 (mm)
C_1 = 2,0	F_1=2,46	F_b=4,51	F_2=3,49	F_3=4,72	F_4=6,97	F_5=8,71	F_6=11,2	F_7=10,9	1,05
	d_1=0,30	d_b=0,58	d_2=1,35	d_3=1,96	d_4=2,77	d_5=3,43	d_6=7,07	d_7=9,87	
C_2 = 2,5	F_1=2,42	F_b=4,21	F_2=3,98	F_3=4,53	F_4=7,05	F_5=9,34	F_6=11,4	F_7=10,8	1,10
	d_1=0,32	d_b=0,63	d_2=1,42	d_3=1,82	d_4=2,72	d_5=3,65	d_6=7,52	d_7=9,9	
C_3 = 3,0	F_1=2,91	F_b=5,09	F_2=3,56	F_3=4,46	F_4=6,75	F_5=9,43	F_6=11,8	F_7=11,2	1,28
	d_1=0,35	d_b=0,68	d_2=1,63	d_3=1,83	d_4=2,67	d_5=3,67	d_6=8,13	d_7=9,97	
C_4 = 3,5	F_1=2,94	F_b=5,99	F_2=5,67	F_3=5,97	F_4=7,34	F_5=9,18	F_6=11,8	F_7=10,9	1,48
	d_1=0,37	d_b=1,38	d_2=1,85	d_3=2,16	d_4=2,8	d_5=3,77	d_6=8,8	d_7=10,3	
C_5 = 4,0	F_1=3,11	F_b=5,49	F_2=4,88	F_3=5,09	F_4=8,05	F_5=10,4	F_6=12,1	F_7=11,5	1,10
	d_1=0,37	d_b=0,67	d_2=1,47	d_3=1,83	d_4=2,93	d_5=3,86	d_6=7,97	d_7=10,2	
C_0 = 0,0	F_1=0,34	-	F_2=0,66	F_3=2,75	F_4=6,37	F_5=8,54	F_6=12,4	F_7=11,4	0,82
	d_1=0,07	-	d_2=0,89	d_3=1,49	d_4=2,34	d_5=3,09	d_6=9,16	d_7=10,3	

Tableau III-4. *Les valeurs de force et de déplacement des sept points particuliers*

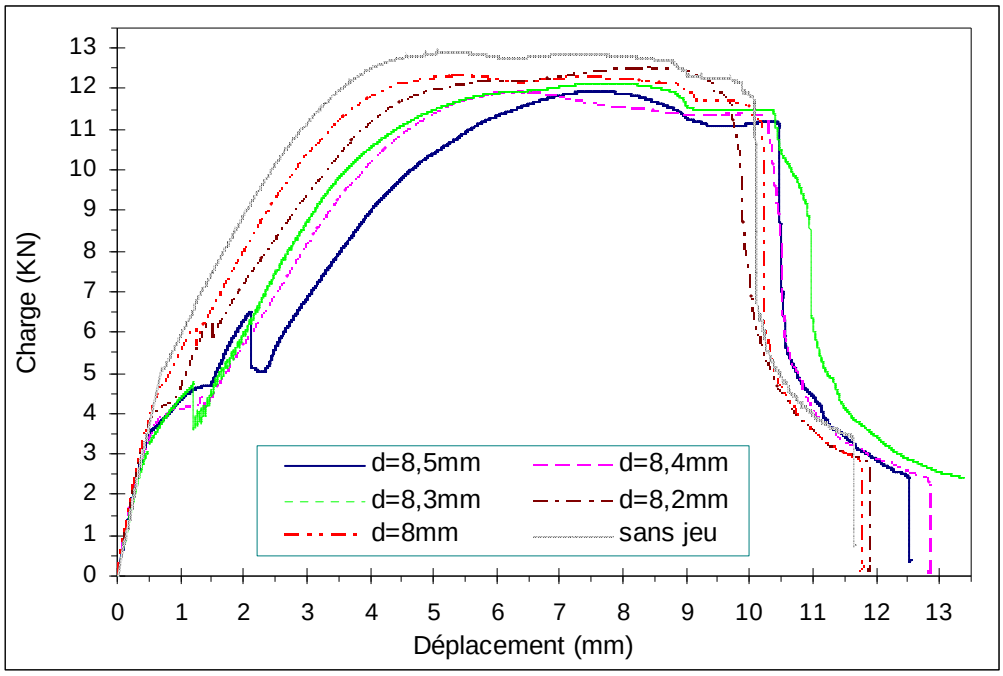


Figure III-41. *Courbe charge – déplacement d'une fixation pour l'influence de jeu*

Le tableau III-5 présente les valeurs de la force de traction et du déplacement de ces sept points particuliers pour ces six essais (correspondant donc à six valeurs de jeu).

Nous remarquons que

- les points notés 1 se situent globalement à une même valeur de déplacement, entre 0,22 et 0,28 mm. Le début de la phase de glissement apparaît à une même valeur de déplacement et ce, quelle que soit la valeur du jeu.

- La position des points notés 2 est fonction de la valeur du jeu. Plus ce jeu est important et plus la taille de cette zone 2 dite zone de glissement est conséquente, donc une valeur de déplacement d_2 grande. On notera par exemple que pour les valeurs extrêmes des jeux (entre 0 et 1mm), la taille de la zone de glissement varie de 0,47 à 1,24 mm.

- les valeurs de charge et de déplacement des points de rupture (notés points 7 et situés à F=11KN et d=10mm) sont presque identiques. Les valeurs du jeu n'ont pas d'influence notoire sur les lieux de ces points.

Eprouvette une fixation, couple de serrage C=2,5 daNm

Diamètre des trous (mm)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	Point 6 F (kN) d (mm)	Point 7 F (kN) d (mm)	dist d_2-d_1 (mm)
8,5	F_1=2,05 d_1=0,25	F_2=4,59 d_2=1,49	F_3=5,91 d_3=2,60	F_4=8,29 d_4=3,67	F_5=9,79 d_5=4,49	F_6=11,9 d_6=7,60	F_7=11,1 d_7=10,5	1,24
8,4	F_1=1,82 d_1=0,23	F_2=4,20 d_2=1,30	F_3=4,08 d_3=1,39	F_4=8,77 d_4=3,27	F_5=10,2 d_5=4,07	F_6=11,9 d_6=6,37	F_7=11,3 d_7=10,3	1,07
8,3	F_1=1,69 d_1=0,22	F_2=4,53 d_2=1,09	F_3=4,98 d_3=1,67	F_4=9,49 d_4=3,07	F_5=10,3 d_5=3,82	F_6=12,1 d_6=8,02	F_7=11,4 d_7=10,4	0,87
8,2	F_1=2,25 d_1=0,27	F_2=4,32 d_2=0,89	F_3=5,80 d_3=1,51	F_4=9,22 d_4=2,93	F_5=10,8 d_5=3,75	F_6=12,5 d_6=8,44	F_7=11,7 d_7=9,67	0,62
8	F_1=2,31 d_1=0,28	F_2=4,70 d_2=0,75	F_3=5,70 d_3=1,26	F_4=8,72 d_4=2,28	F_5=10,7 d_5=3,20	F_6=12,3 d_6=5,55	F_7=11,5 d_7=10,0	0,47
Sans jeu	- -	- -	F_3=5,08 d_3=0,71	F_4=8,74 d_4=1,93	F_5=10,5 d_5=2,60	F_6=12,9 d_6=5,47	F_7=11,7 d_7=10,1	0,00

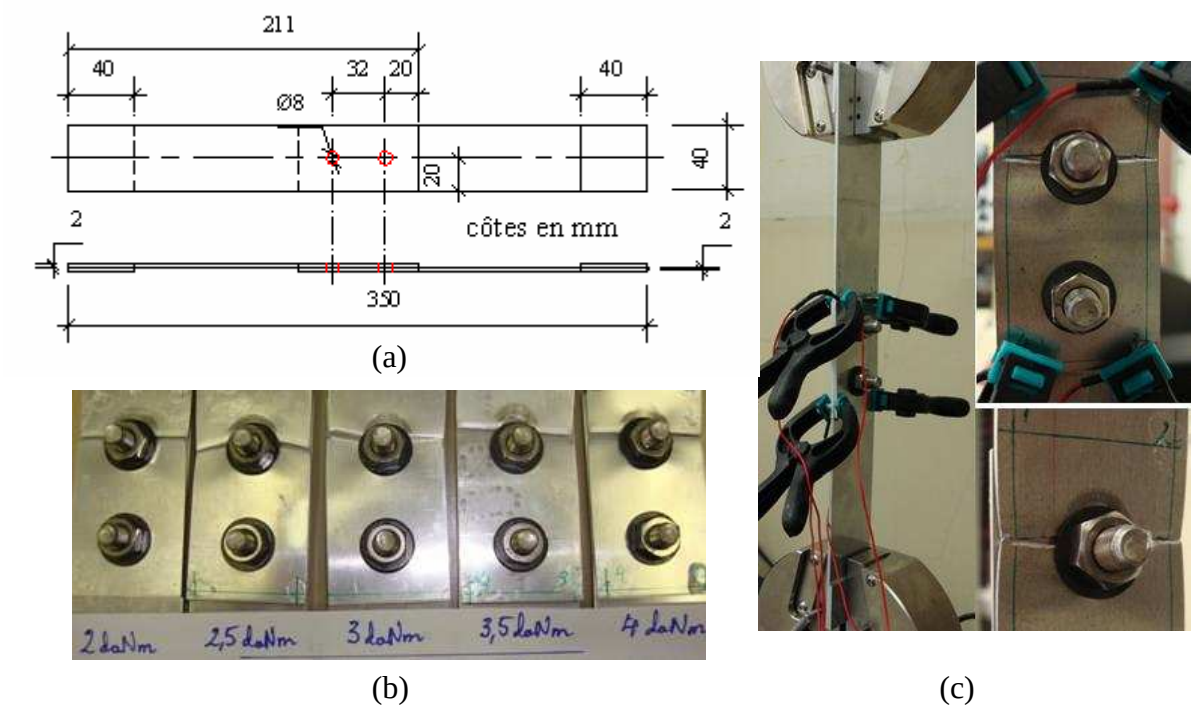
Tableau III-5. *Les valeurs de force et de déplacement des sept points particuliers*

III.2.4. Nombre de fixations

III.2.4.1 Deux fixations verticales

Nous avons réalisé quatre essais, en utilisant quatre valeurs de couple de serrage 2 - 2,5 – 3 - 3,5 daNm., sur une éprouvette à deux fixations verticales selon la norme usuelle comme indiqué sur la figure III-42a. Les substrats possèdent un diamètre d'alésage de 8mm (correspondant à un jeu de 0.2mm).

Les résultats de ces six essais sont présentés par les courbes de charge–déplacement sur la figure III-43.



(a) (b) (c)

Figure III-42. *Eprouvette deux fixations verticales et détail du mode de rupture*

Le tableau III-5 présente les valeurs de la force de traction et du déplacement de cinq points particuliers pour ces quatre essais (correspondant donc à quatre valeurs de couple de serrage).

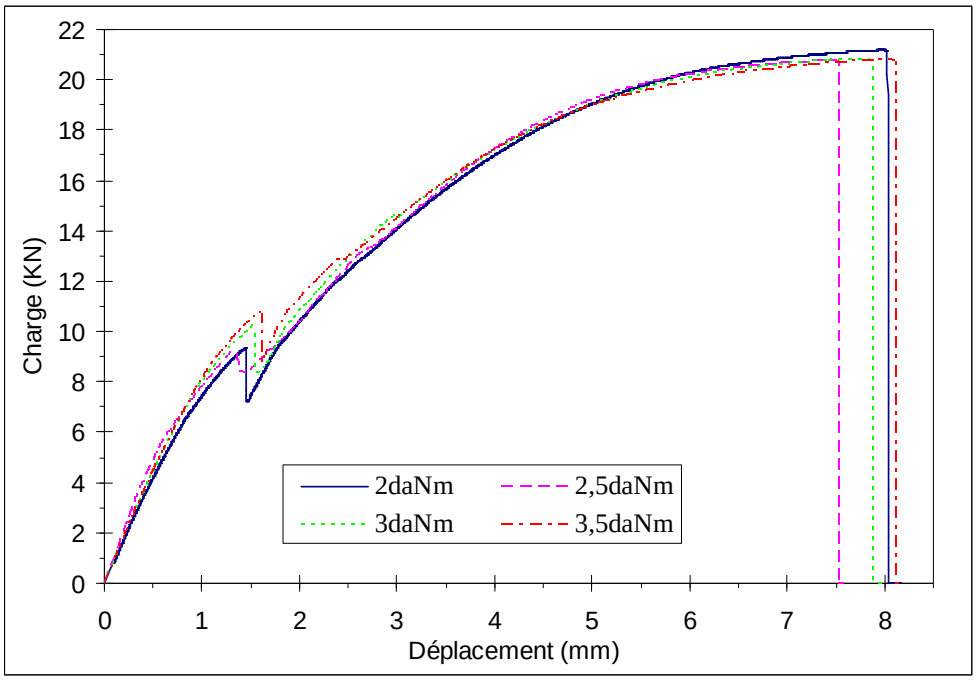


Figure III-43. *Courbe charge – déplacement de deux fixations verticales*

- Point 1 : avant glissement
- Point 2 : après glissement

- Point 3 : après matage et adaptation alésage/corps de boulon
- Point 4 : amorçages
- Point 5 : rupture

Nous remarquons pour le cas d'éprouvette avec 2 fixations verticales que :

- Pour une valeur du jeu vaut 0.2 mm, le glissement pur n'existe pas.

- Comme la phase de glissement est grande (la valeur de déplacement vaut 1,1 mm), la phase d'élasticité de la structure n'existe plus.

- La force de traction augmente et atteint sa valeur maximale au point de rupture (F=20,7 kN).

Deux fixations verticales, $d_{alésage}$ = 8mm, d_{boulon}=7,9mm

Couple de serrage (daNm)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	d_2-d_1 (mm)
C_1 = 2,0	F_1=3,85 d_1=0,46	F_2=7,31 d_2=1,49	F_3=9,41 d_3=1,79	F_4=19,74 d_4=5,5	F_5=21,1 d_5=8,03	1,03
C_2 = 2,5	F_1=4,55 d_1=0,46	F_2=8,43 d_2=1,48	F_3=9,51 d_3=1,78	F_4=19,8 d_4=5,51	F_5=20,6 d_5=7,52	1,02
C_3 = 3,0	F_1=4,39 d_1=0,5	F_2=8,34 d_2=1,58	F_3=10,39 d_3=1,92	F_4=19,8 d_4=5,73	F_5=20,6 d_5=7,88	1,08
C_4 = 3,5	F_1=4,55 d_1=0,51	F_2=8,93 d_2=1,63	F_3=11,1 d_3=1,93	F_4=19,82 d_4=5,83	F_5=20,7 d_5=8,1	1,12

Tableau III-6. *Les valeurs de force et de déplacement des cinq points particuliers*

III.2.4.3 Trois fixations verticales

Quatre essais ont été réalisés, en utilisant quatre valeurs de couple de serrage 2 - 2,5 – 3 - 3,5 daNm., sur une éprouvette à trois fixations verticales selon la norme usuelle comme indiqué sur la figure III-44a. Les substrats possèdent un diamètre d'alésage de 8mm (correspondant à un jeu de 0.2mm).

Les résultats de ces six essais sont présentés par les courbes de charge–déplacement sur la figure III-45.

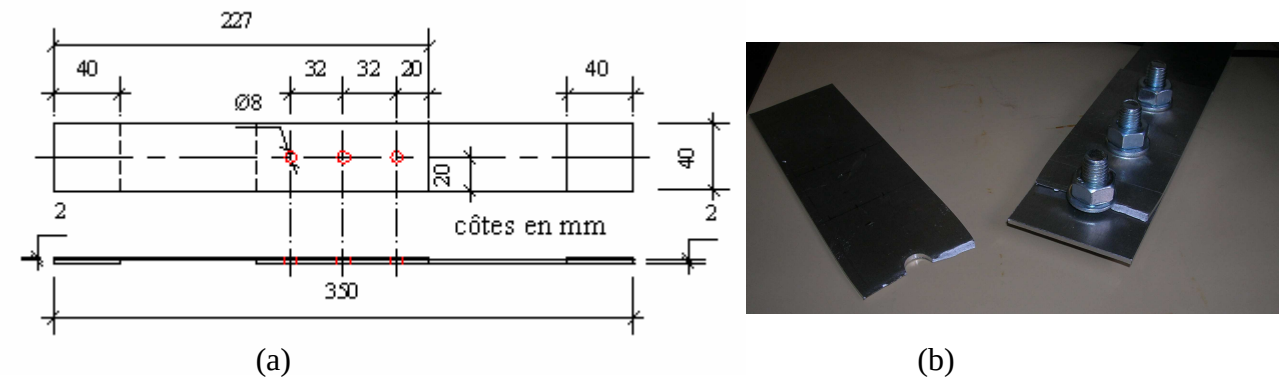


Figure III-44. *Eprouvette trois fixations verticales et détail du mode de rupture*

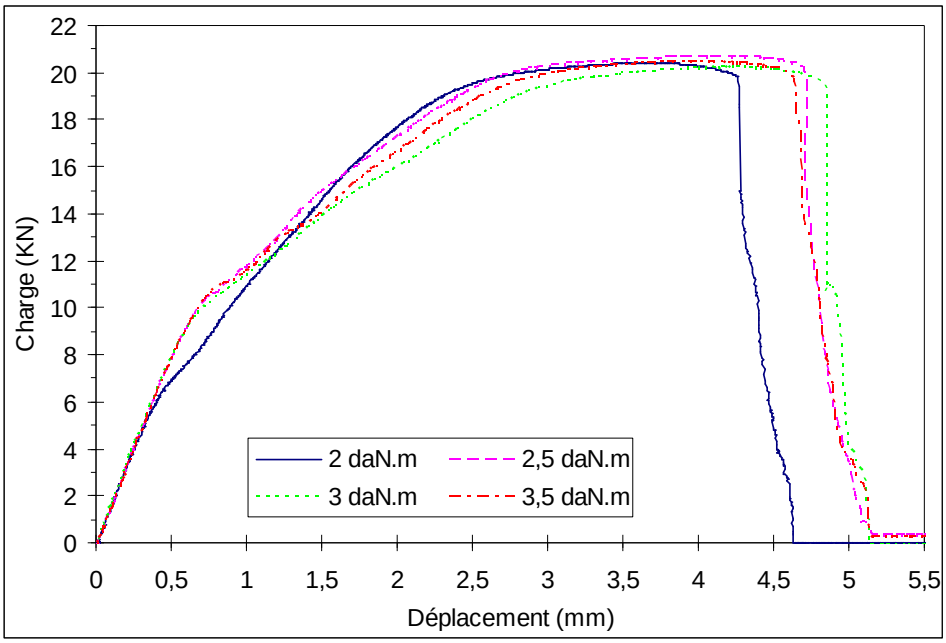


Figure III-45. *Courbe charge – déplacement de trois fixations verticales*

Couple de serrage (daNm)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	d_2-d_1 (mm)
C_1 = 2,0	F_1=5,5	F_2=8,41	F_3=10,7	F_4=19	F_5=19,6	0,35
	d_1=0,36	d_2=0,71	d_3=0,98	d_4=2,31	d_5=4,27	
C_2 = 2,5	F_1=7,09	F_2=10,5	F_3=12,5	F_4=19,7	F_5=20	0,33
	d_1=0,42	d_2=0,75	d_3=1,11	d_4=2,61	d_5=4,71	
C_3 = 3,0	F_1=7,81	F_2=10,2	F_3=12,4	F_4=18,7	F_5=19,3	0,34
	d_1=0,5	d_2=0,84	d_3=1,22	d_4=2,69	d_5=4,85	
C_4 = 3,5	F_1=8,98	F_2=11,5	F_3=13,9	F_4=19,22	F_5=19,9	0,4
	d_1=0,58	d_2=0,98	d_3=1,46	d_4=2,63	d_5=4,61	

Tableau III-7. *Les valeurs de force et de déplacement des cinq points particuliers*

III.2.4.2 Deux fixations horizontales

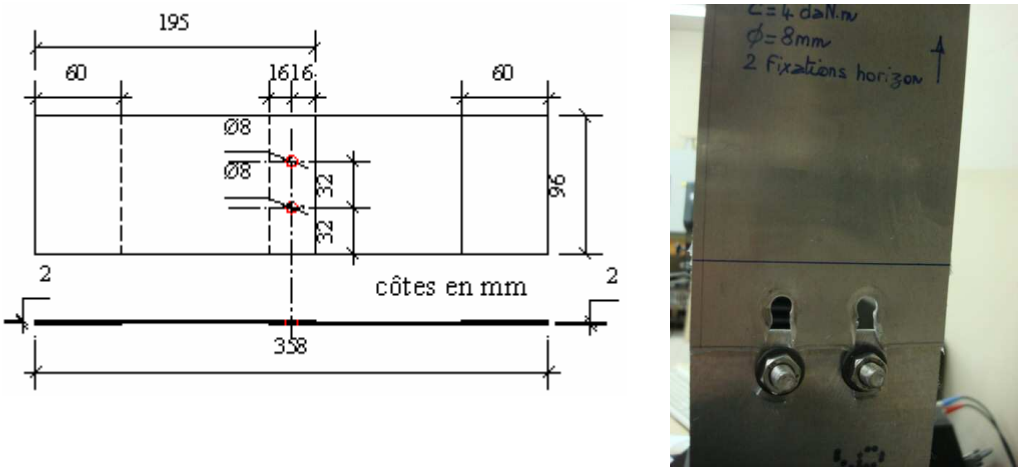


Figure III-46. *Eprouvette deux fixations horizontales et détail du mode de rupture*

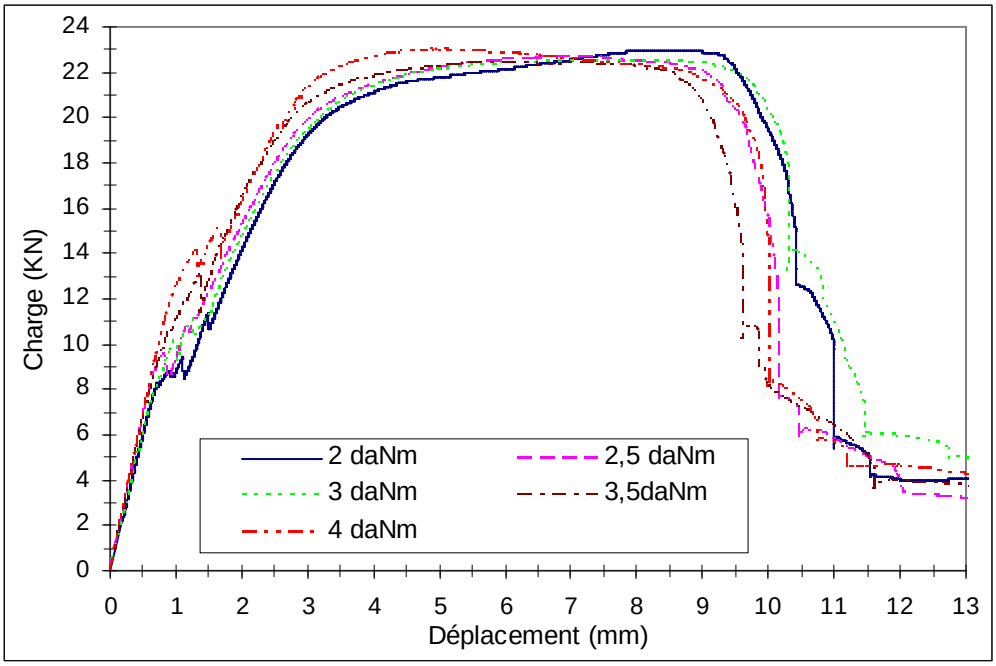


Figure III-47. *Courbe charge – déplacement de deux fixations horizontales*

Eprouvette une fixation, diamètre de trou = 8mm, d_{boulon}=7,9mm

Couple de serrage (daNm)	Point 1 F (kN) d (mm)	Point 2 F (kN) d (mm)	Point 3 F (kN) d (mm)	Point 4 F (kN) d (mm)	Point 5 F (kN) d (mm)	Point 6 F (kN) d (mm)	d_2-d_1 (mm)
C_1 = 2,0	F_1=6,4 d_1=0,52	F_2=8,55 d_2=1,13	F_3=10,82 d_3=1,52	F_4=14,4 d_4=2,03	F_5=20,9 d_5=3,8	F_6=22,6 d_6=9,33	0,61
C_2 = 2,5	F_1=7,91 d_1=0,59	F_2=8,69 d_2=0,93	F_3=10,8 d_3=1,24	F_4=17,1 d_4=2,34	F_5=21,4 d_5=3,9	F_6=21,7 d_6=9,22	0,34

C_3 = 3,0	F_1=7,1	F_2=9,42	F_3=11,08	F_4=17,3	F_5=21,7	F_6=21,9	0,43
	d_1=0,6	d_2=1,03	d_3=1,5	d_4=2,41	d_5=3,9	d_6=9,57	
C_4 = 3,5	F_1=8,1	F_2=10,6	F_3=11,8	F_4=17,1	F_5=22,4	F_6=21,1	0,47
	d_1=0,52	d_2=0,99	d_3=1,38	d_4=2,18	d_5=4	d_6=9,0	
C_5 = 4,0	F_1=7,52	F_2=13,4	F_3=13,08	F_4=17,3	F_5=21,3	F_6=21,9	0,79
	d_1=0,63	d_2=1,42	d_3=1,77	d_4=2,6	d_5=4,1	d_6=9,13	

Tableau III-7. *Les valeurs de force et de déplacement des cinq points particuliers*

III.3. Localisation

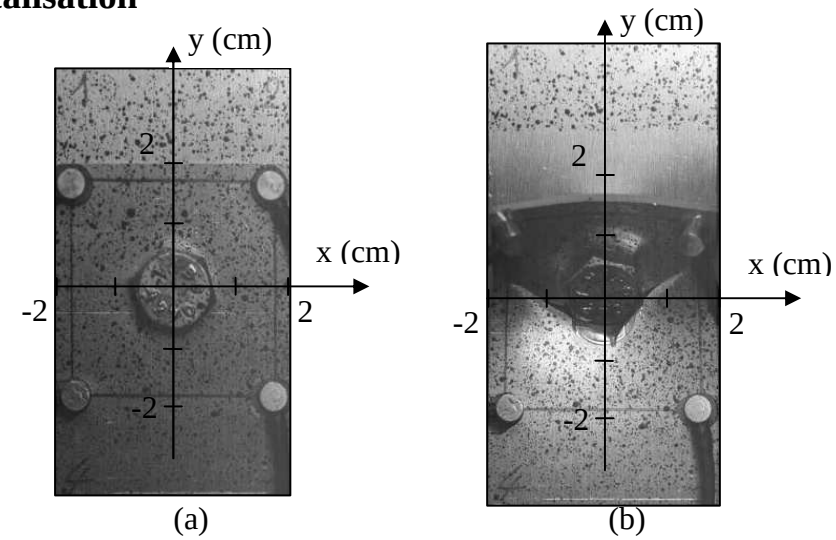


Figure III-48. *Repère de localisation*

En utilisant la technique de la localisation planaire (chapitre II.3.2.7), nous obtenons les lieux des points de localisation dans la zone de recouvrement des deux plaques. Chaque point issu d'un calcul de localisation est déterminé par ses coordonnées en cm (x, y) associé à une erreur de localisation (-1⩽Lucy⩽0,5). L'origine du repère de localisation passe par le centre de l'alésage (figure III-48). On retrouve ce repère au début (figure III-48a) et à la fin (figure III-48b) de l'essai.

Pour une éprouvette à une fixation selon la norme usuelle (W/D=5 avec E/D=2.5 , C=4daN.m, et $d_{alésage}$=8,4mm), la surface utile de2 x 2 cm^2 susceptible de fournir des évènements (donc des points de localisation) est donnée par la position des capteurs. Ces capteurs sont toujours positionnés sur le substrat où se produit la rupture Les figures III-49a et b représentent les coordonnées x et y des localisations en fonction du temps. La paramétrique charge-temps (identique à la figure III-1) est indiquée. Nous remarquons que :

- - Il y a beaucoup de calcul de localisation qui apparaissent dans la phase de matage et ces points se situent en dessous du boulon (suivant la figure III-48 où

les cordonnées y sont négatives). Ces localisations sont crées par des phénomènes physiques comme glissement, le matage ou l'adaptation.

- - Dans la zone élastique (phase 4), il n'y a pas beaucoup de localisation. Les localisations apparaîssent essentiellement après la phase 5 qui est relative à la plastification autour des alésages des plaques, mais surtout la zone 6 qui est la zone de propagation stable de la fissure.

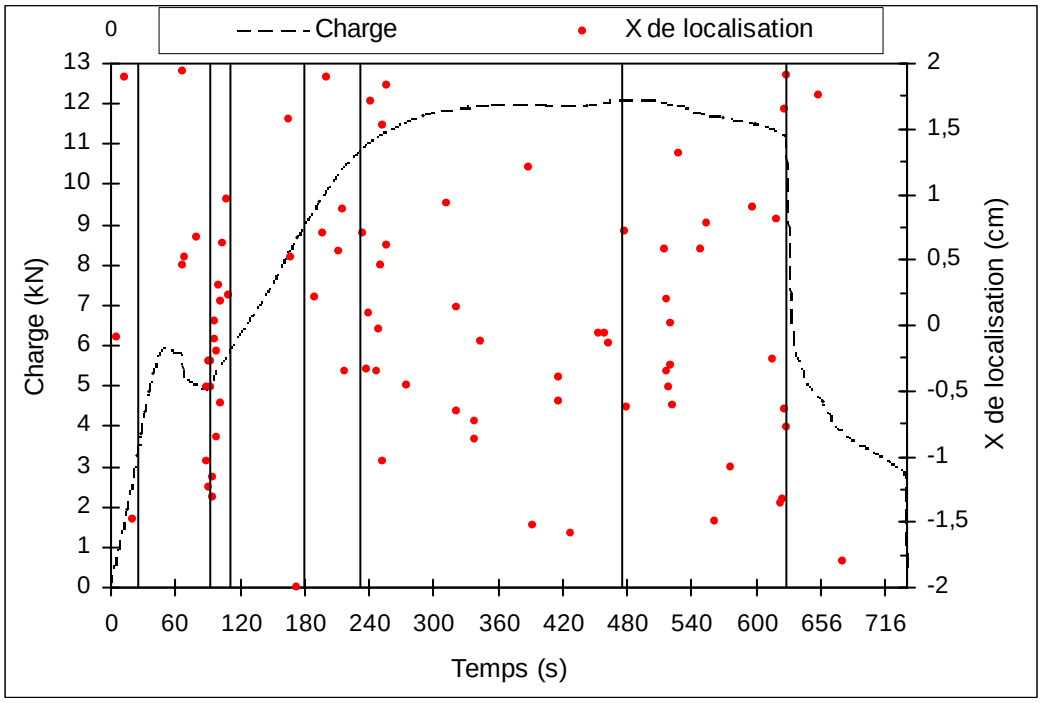


Figure III-49a. *Coordonnées X des localisations en fonction du temps*

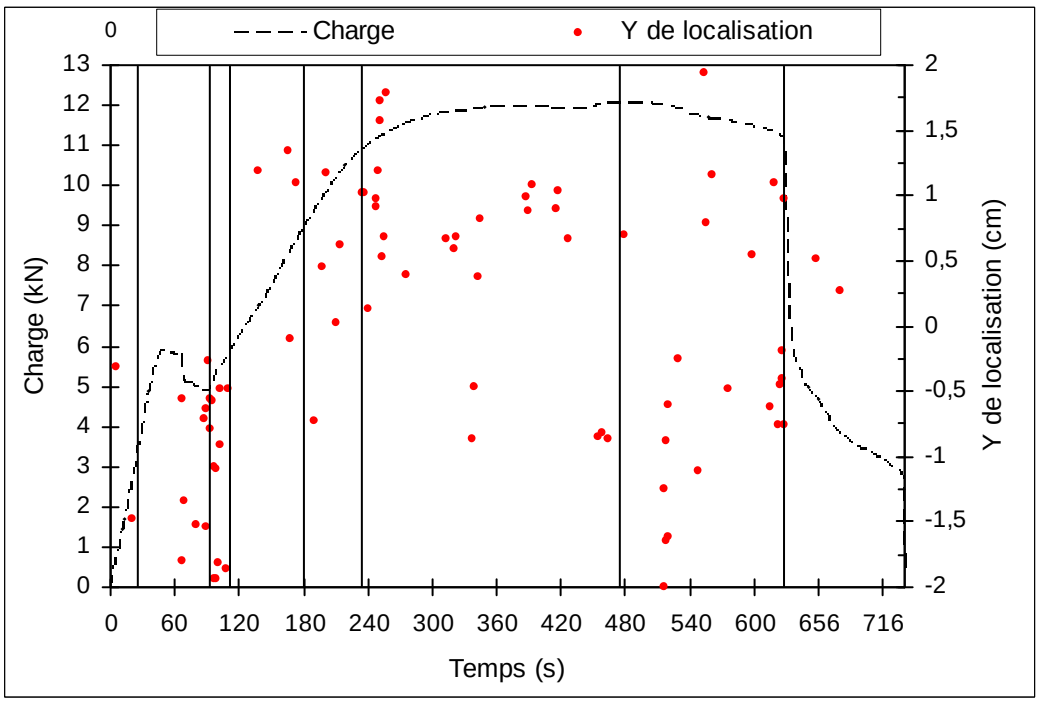


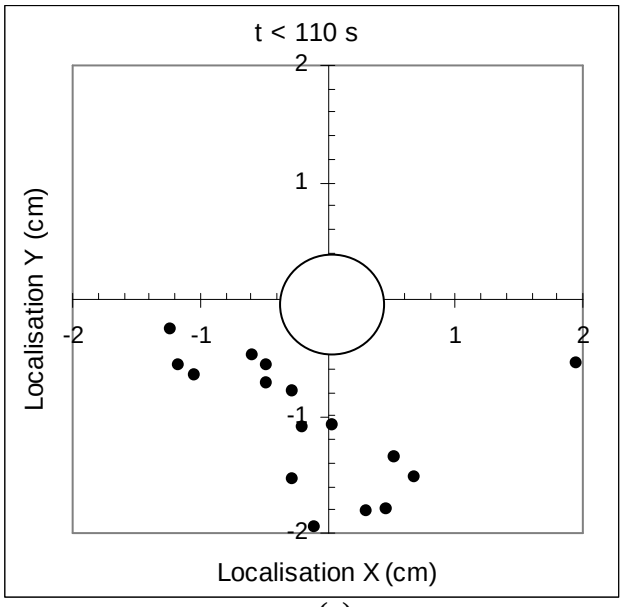
Figure III-49b. *Coordonnées Y des localisations en fonction du temps*

Pour préciser les positions de ces localisations dans le repère, nous avons procédé à un découpage temporel. Les informations recueillies sont affichées pour des intervalles de temps correspondant à l'activité acoustique d'une ou plusieurs phases.

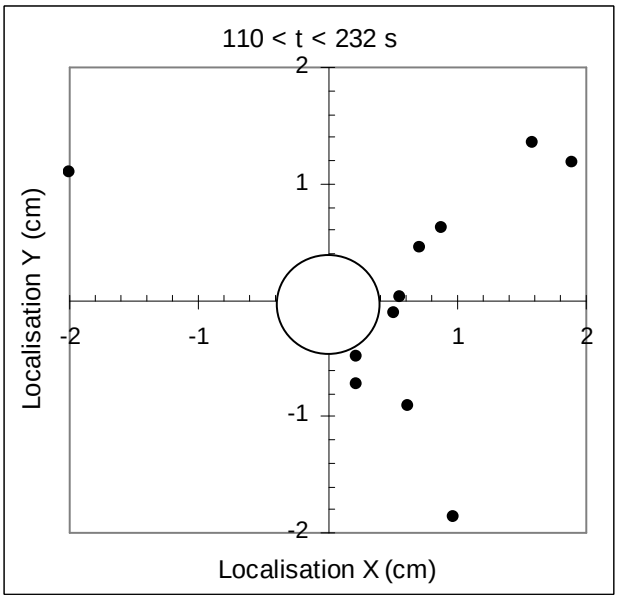
- Avant la phase élastique de la structure (phase 1+2+3 donc un temps < 110 secondes) les localisations se situent au dessous du boulon comme indiquées sur la figure III-50a.

- Dans la phase élastique de la structure (phase 4), les localisations sont quasi inexistantes. Dans la phase plastique (phase 5), les localisations apparaissent au côté droit du boulon (figure III-50b).

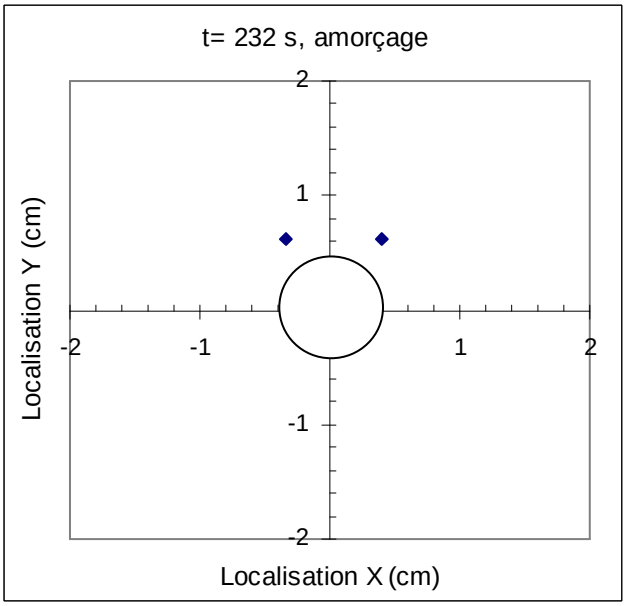
- A 232 secondes, l'amorçage apparaît comme indiqué dans la partie III.1.1. Nous sommes au point 5 de la figure III-8a. Deux localisations apparaissent au dessus du boulon comme indiquées sur la figure III-50c.



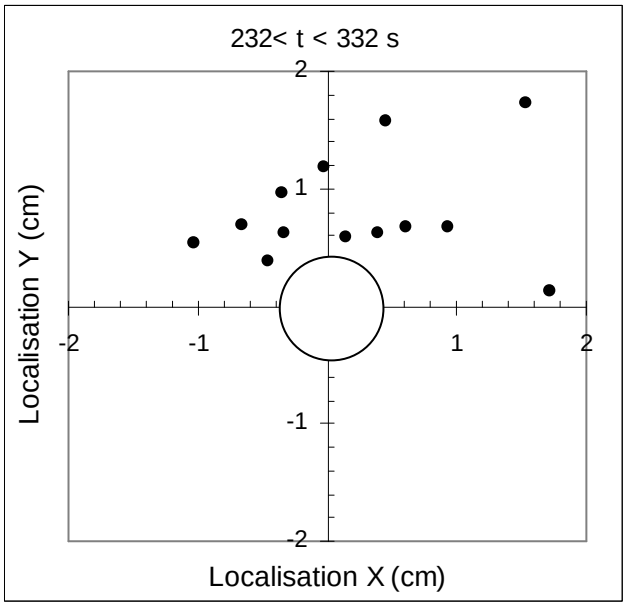
(a)



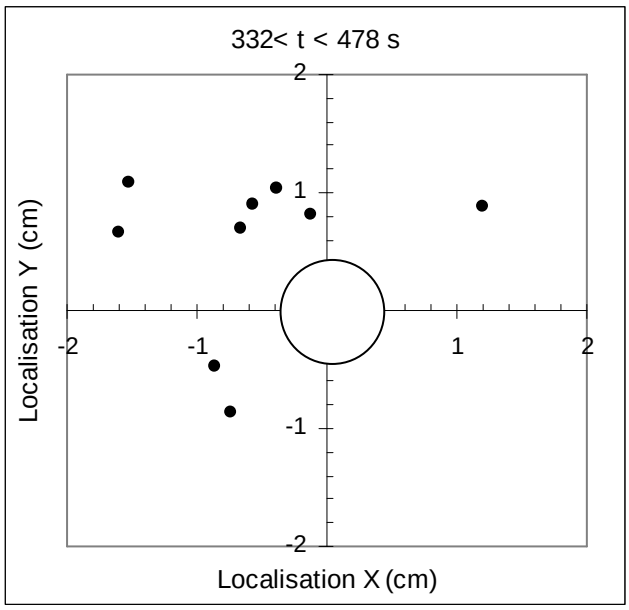
(b)



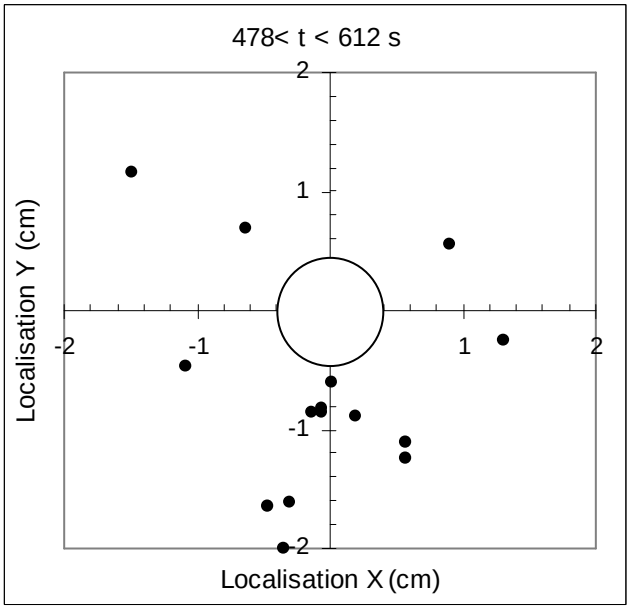
(c)



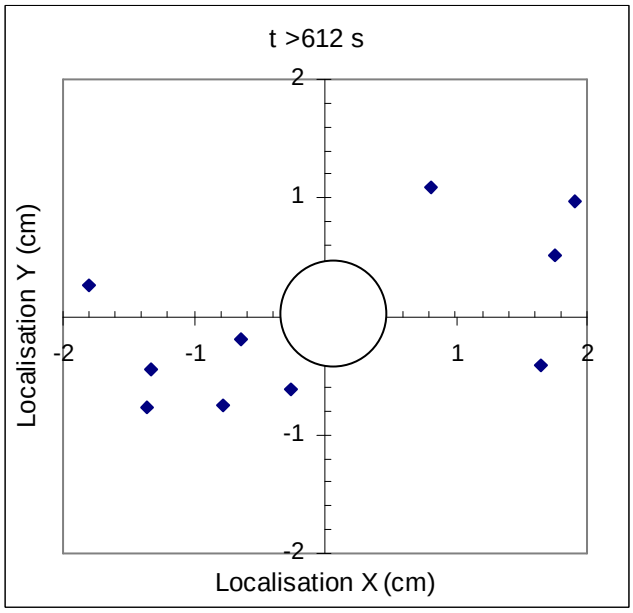
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure III-50. *Localisation planaire dans les différentes phases*

- Dans la phase de propagation stable, les localisations se situent dans un premier temps au dessus du boulon (figure III-50d) en raison de la pression du corps du boulon sur la plaque, puis dans un deuxième temps se propagent vers le bas du boulon (la figure III-50e).

- Dans la phase de propagation instable, les localisations se rassemblent au dessous du boulon pour former un vé et se propager vers les bords libres (droite et gauche) du substrat (figures III-50 f et g).

III.4. Modes de rupture : analyse macro et microscopique

Nous avons réalisé cinq essais interrompus correspondant à la fin de chaque zone caractéristique (points 1, 2, 3, 4 et 5 de la figure III-51, détails donnés dans le Tableau III-8). Ce type de démarche permet d'analyser la chronologie d'endommagement d'un assemblage boulonné afin de conforter et valider les différentes conclusions exposées ci-dessus. En effet, les éprouvettes partiellement sollicitées sont démontées pour effectuer des analyses microscopiques dans différentes zones de l'assemblage en particulier les zones situées au voisinage des alésages dans les deux substrats, situées du côté de la tête du boulon, du côté de la rondelle/écrou et au niveau de l'interface comme indiquées dans la figure III-52.

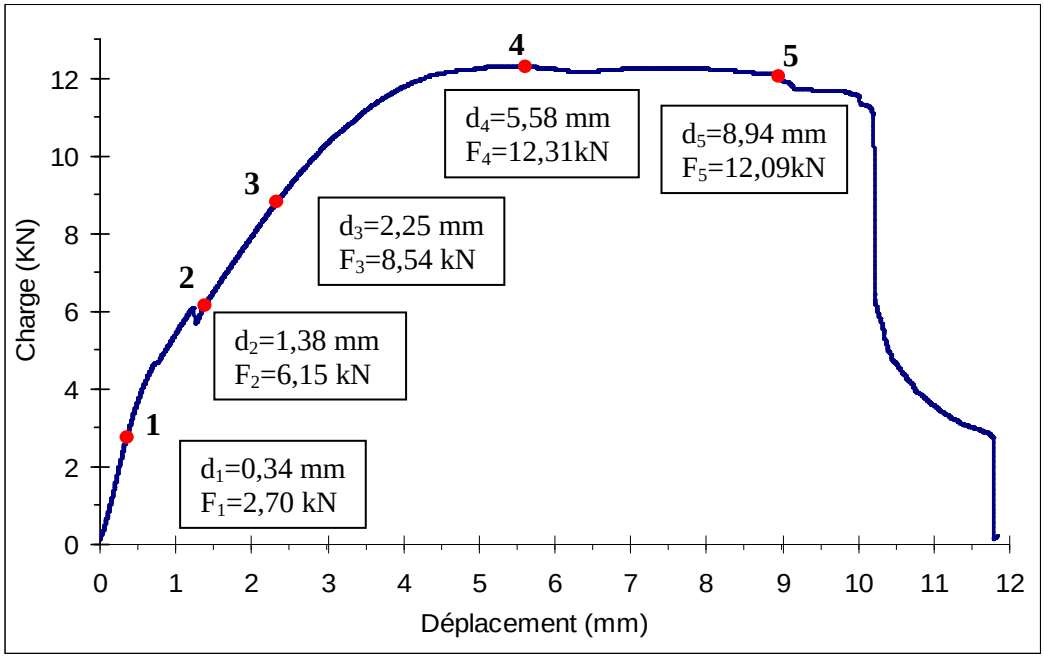


Figure III-51. *Courbe charge/déplacement (points caractéristiques)*

Eprouvette d'une fixation – d trou =8 mm - couple de serrage 2,5 daNm

No essai	Arrêt de l'essai	Déplacement (mm)	Force (KN)
1	Point 1 : Avant glissement	d_1 = 0,34	F_1 = 2,70
2	Point 2 : Après la phase de glissement	d_2 = 1,38	F_2 = 6,15
3	Point 3 : Fin de la phase élastique de la structure	d_3 = 2,25	F_3 = 8,54
4	Point 4 : Effort maximal de traction (Fmax)	d_4 = 5,58	F_4 = 12,31
5	Point 5 : Avant la rupture brutale de l'assemblage	d_5 = 8,94	F_5 = 12,09

Tableau III-8. *Détails des points caractéristiques*

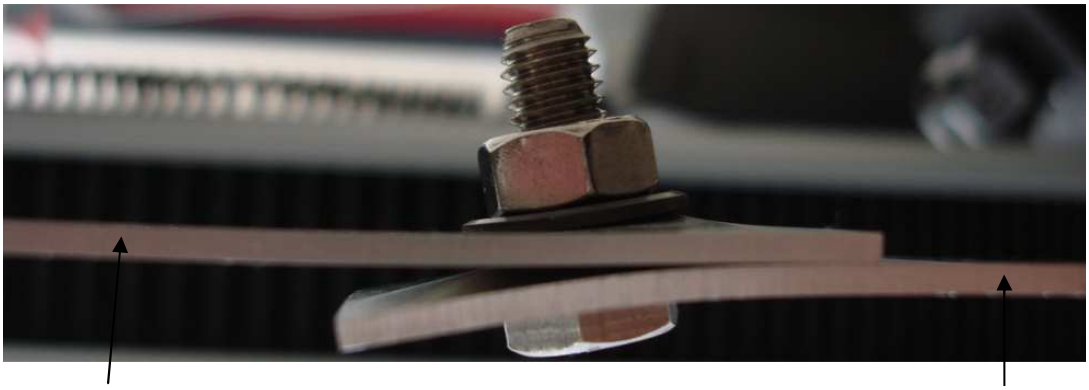


Figure III-52. *Détails des zones d'observations microscopiques*

Au niveau de chaque point, nous présentons la morphologie des dommages occasionnés lors du chargement de l'assemblage :

- point 1 et 2 : durant les phases de comportement élastique de la structure et du glissement, aucune déformation globale de l'assemblage n'est observée (voir photos dans la figure III- 53).



(a) (b)

Figure III-53. *Photos de l'assemblage aux points 1 (a) et 2 (b)*

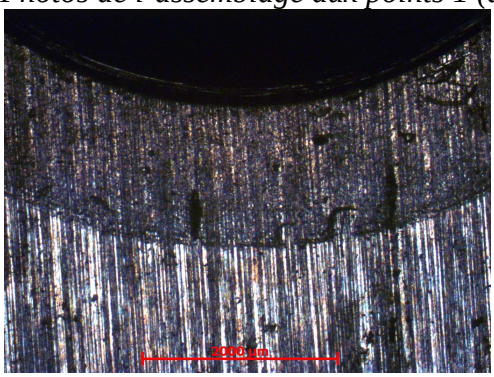


Figure III-54. *Micrographie sous la tête du boulon*

Les observations réalisées dans la zone située sous la tête du boulon révèlent uniquement l'existence d'une zone plastifiée par le matage lors de l'opération de serrage des substrats (Fig. III-54).

- point 3 : L'assemblage présente une déflexion au niveau de l'interface qui est induite par la naissance d'un phénomène de flexion secondaire qui est souvent observé dans le cas

des éprouvettes dont le rapport W/D est petit (ici W/D=5). La figure III-55 montre clairement une ouverture de l'interface des substrats. D'un point de vue microscopique, au voisinage de l'alésage, une zone plastifiée est nettement mise en évidence par les photos de la figure III-56 dans différents endroits aussi bien sous la tête du boulon (plaque1) que sous la rondelle (plaque2).

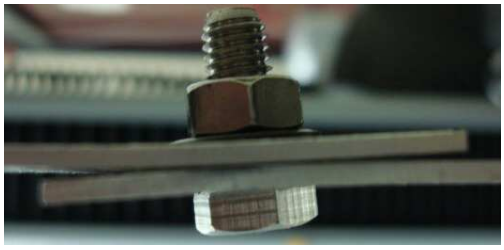
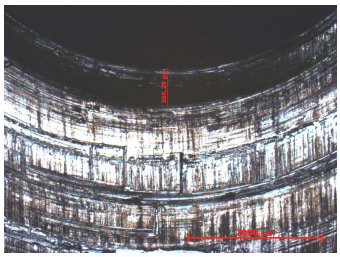
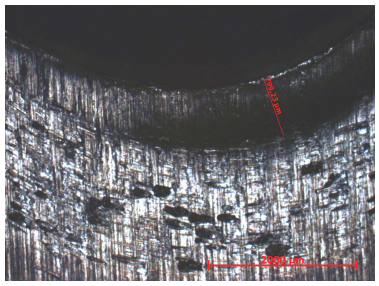


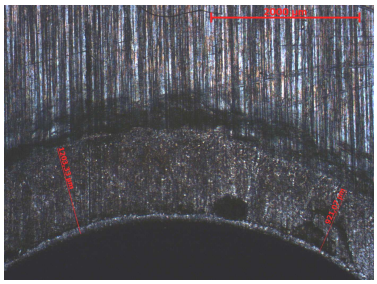
Figure III-55. : *déformation des plaques*



Côté rondelle



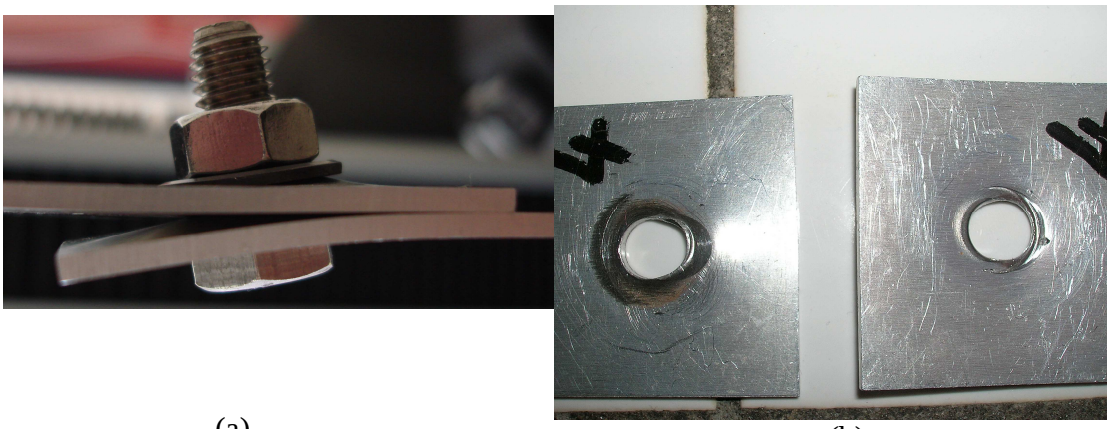
Interface plaque2



Plaque 1

Figure III-56. Micrographies des plaques

- point 4 : Ce point correspond à la fin de la zone de propagation stable de fissure, la déflexion de l'assemblage devient alors conséquente comme le montre la figure III-57a. Sous l'action du corps du boulon, les alésages subissent une grande déformation qui tend à ovaliser l'alésage comme le montre la figure III-57b. A ce stade les contraintes sont importantes, provocant la naissance et la propagation stable de fissures à partir de la zone fortement endommagée aux alentours de l'alésage (Fig. III.58).



(a) (b)

Figure III-57. Macrographies des déformations

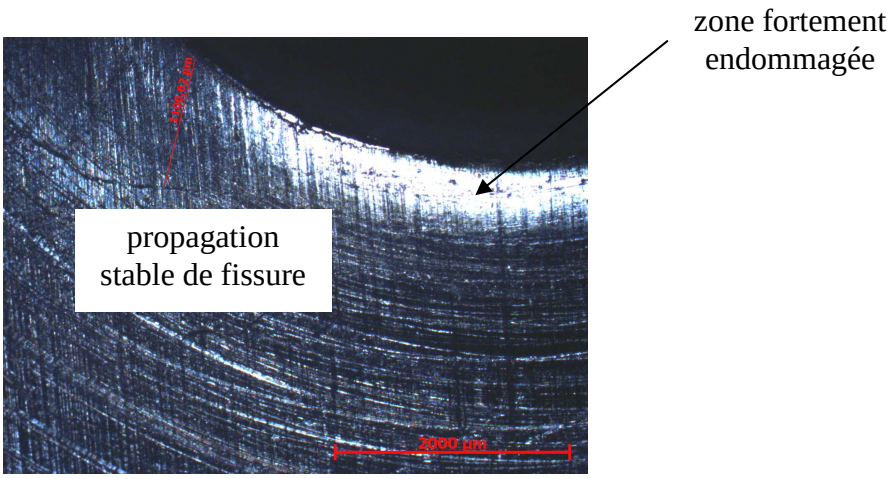
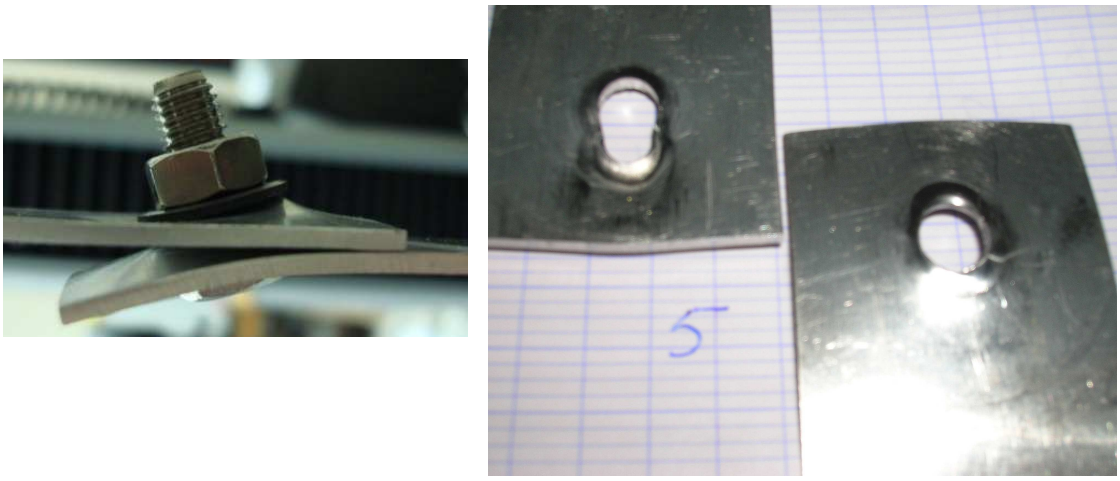


Figure III-58. *Micrographie : zone endommagée et propagation de la fissure*

- point 5 : Ce point correspond à la phase ultime du comportement de l'assemblage accompagné d'une forte déflexion comme le montre la figure III-59 a. Les bords des alésages subissent de fortes déformations provocant à la fois un cisaillement illustré par l'ovalisation du trou et le début de la propagation instable de la fissure visible macroscopiquement comme le montre la figure III-59 b.
La figure III-60 présente la microscopie autour de l'alésage et montre une grande ouverture des lèvres de la fissure.



(a) (b)

Figure III-59. *Déformations globales des plaques et des trous (point5)*

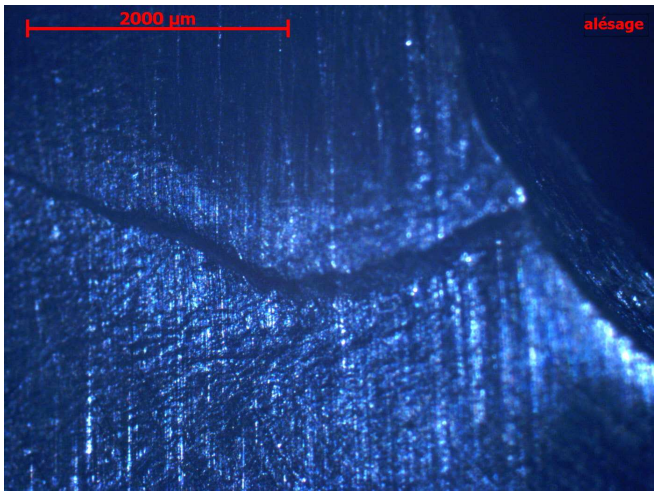


Figure III-60. *Micrographie de l'ouverture de la fissure*

Chapitre IV

ÉTUDE NUMÉRIQUE

IV.1. Objectifs et simulation numérique

IV.2. Description du modèle de l'assemblage boulonné

IV.2.1 Géométrie et maillage

IV.2.2 Comportement des matériaux

IV.2.3. Méthode de modélisation du contact

IV.2.4. Modélisation du serrage

IV.2.5. Les conditions aux limites

IV.3. Simulation numérique

IV.3.1. Comportement global sans endommagement

IV.3.1.1. Condition de calcul d'un assemblage

IV.3.1.2. Effet de bord

IV.3.1.3. Effet du couple de serrage

IV.3.1.4. Validation du champ de déplacements et de déformations numériques

IV.3.1.5. Validation globale

IV.3.2. Comportement global avec endommagement

IV.3.2.1 Modèle d'endommagement énergétique de

Latham et Crockoft

IV.3.2.1.1. Présentation générale du modèle

IV.3.2.1.2. Modélisation numérique du modèle

IV.3.2.2. Modèle de Gurson – Tvergard - Needleman

IV.3.2.2.1. Présentation générale du modèle GTN

IV.3.2.1.2. Modélisation numérique du modèle GTN

IV.4. Comparaison des résultats

IV.1. Objectifs de la simulation numérique

Ce chapitre porte sur la simulation numérique utilisant les éléments finis afin de prédire le comportement global d'un assemblage boulonné. Les calculs ont été réalisés en 3D, à l'aide du code de calcul Ansys® V11.0. Deux approches de calcul ont été réalisées : éléments solides (hexagonaux) et éléments coques (shell). Une description générale du modèle géométrique et du maillage de l'assemblage étudié est présentée. Les différentes conditions aux limites et de chargement sont détaillées en soulignant la prise en compte de toutes les surfaces de contact liées à la spécificité de tel assemblage (on dénombre au total sept surfaces de contact). Dans notre étude, la méthode utilisée est le Lagrangien augmenté.

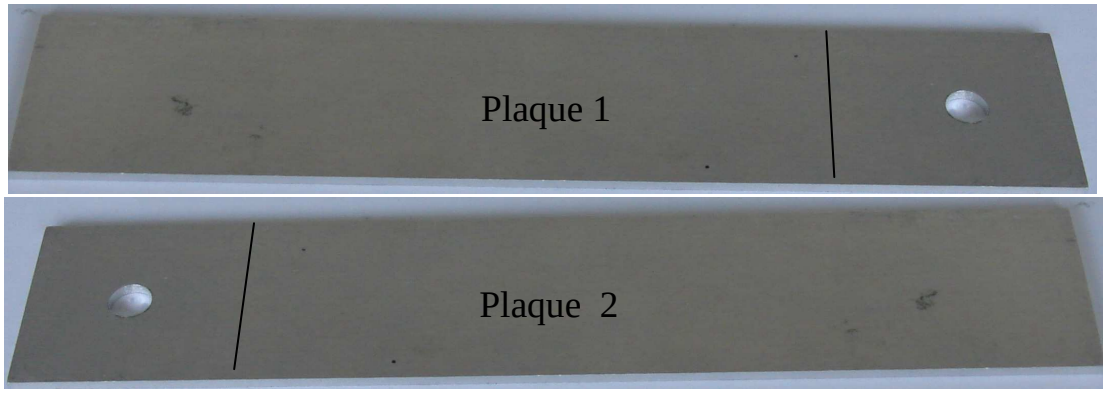
Les calculs sont entrepris aussi bien en élastoplasticité sans endommagement qu'avec endommagement. Ce dernier est effectué en utilisant deux types de modèles : modèle basé sur l'énergie de Latham et Crockoft et un modèle basé sur l'endommagement continu de Gurson modifié. Dans cette partie, les algorithmes de calcul développés sont détaillés. Les résultats numériques sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux. Ceci permettra d'expliquer les différents stades du comportement de l'assemblage mais aussi de valider les modèles et les paramètres choisis.

IV.2. Description du modèle de l'assemblage boulonné

IV.2.1 Géométrie et maillage

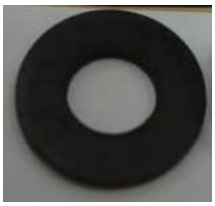
La géométrie adoptée est celle de l'assemblage boulonné à simple recouvrement avec une, deux et trois fixations. Une fixation est modélisée d'après une norme NASM et une norme usuelle (cf chapitreII).

L'assemblage une fixation comprend deux plaques identiques et un assemblage boulonné (noté standard). La plaque est divisée en deux zones : une première zone est celle des substrats sur le recouvrement et une deuxième zone qui correspond aux substrats hors recouvrement (figure IV-1 a). La fixation est constituée de trois parties séparées : le boulon, la rondelle et l'écrou (figure IV-1 b, c, d)



(a)







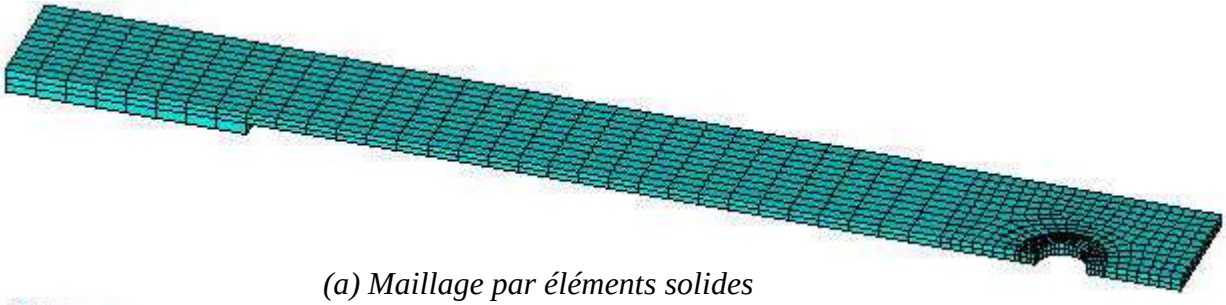
(b) (c) (d)

Figure IV. *Géométrie des plaques et fixation (boulon + rondelle + écrou)*

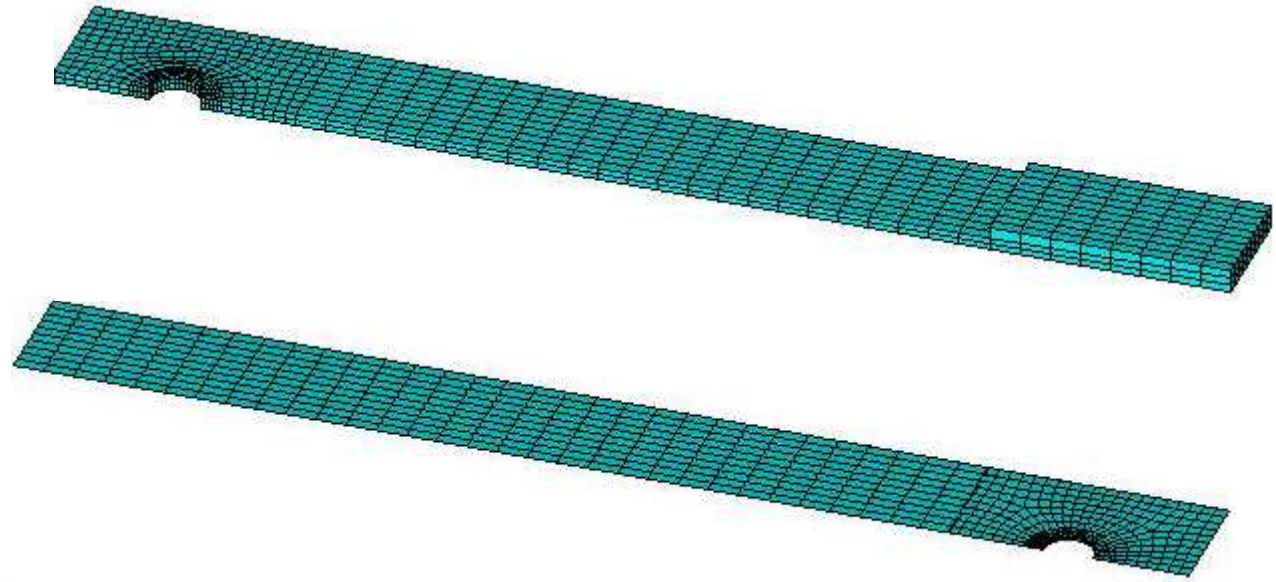
Le maillage est automatiquement généré à partir de la construction de domaines correspondants aux zones géométriques. Les éprouvettes sont modélisées par des éléments volumiques hexagonaux à huit nœuds où chaque nœud possède trois degrés de liberté (déplacements Ux, Uy, Uz) et des éléments coques à 4 nœuds avec 6 degrés libertés (3 déplacements Ux, Uy, Uz et 3 rotations Rx, Ry, Rz). Le maillage de la plaque est divisé en trois parties différentes : une partie autour de l'alésage qui est en dessous de la rondelle et de la tête de boulon où le maillage est raffiné (574 éléments solides ou 480 éléments coques), une partie loin de l'alésage avec un maillage moins raffiné (1766 éléments solides ou 1136

éléments coques) et enfin une partie hors recouvrement avec un maillage plus grossier (2800 éléments solides ou 1320 éléments coques). Pour une raison de facilité, le filetage n'est pas représenté. Le maillage autour des fixations a été raffiné au niveau des zones de contact.

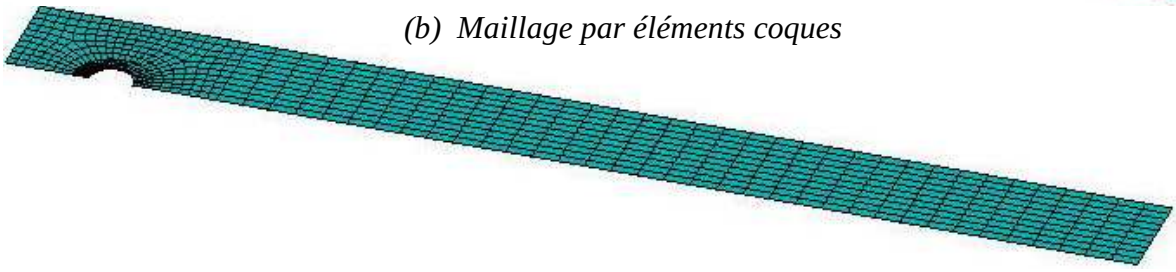
La figure IV-2 illustre le maillage mis au point et optimisé (plaques solides (a), plaques coques « shell » (b) et la fixation (c))



(a) Maillage par éléments solides



(b) Maillage par éléments coques



(c)Maillage de la fixation

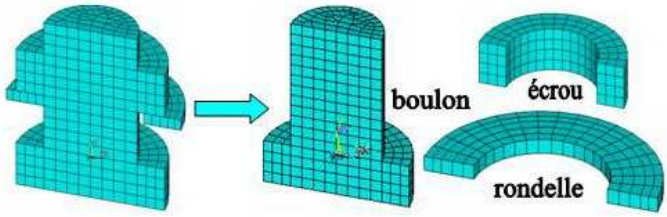


Figure IV-2. *Maillage de l'assemblage boulonné*

IV.2.2 Comportement des matériaux

Le matériau de la plaque (substrat) est un alliage d'aluminium dont le comportement est élastoplastique (voir figure IV-3). Les caractéristiques mécaniques usuelles du matériau sont données dans le tableau VI-1.

E (MPa)	σ_e (MPa)	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{limite_élastique}$ (%)	$\varepsilon_{rupture}$ (%)
69000	260	366	0,41	13,3

Tableau IV-1. *Caractéristiques mécaniques de l'aluminium série 6082 T6*

Le matériau du boulon est en acier avec un module d'Young E = 200000MPa, le matériau de la rondelle a un module d'Young E = 90000 MPa (voir chapitre II). Le boulon, l'écrou et la rondelle sont modélisés par un comportement élastique linéaire.

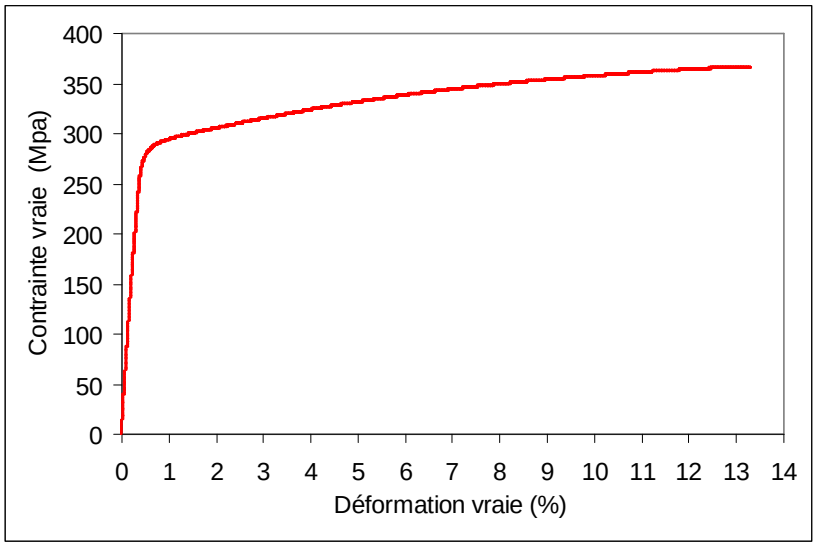


Figure IV-3*. Comportement en traction des substrats en alliage d'aluminium 6082 T6*

IV.2.3 Méthode de modélisation du contact

Les contacts sont définis comme du contact « surface- to- surface" entre des solides flexibles en grandes transformations, avec prise en compte du frottement. L'élément de surface est défini par 4 nœuds où chaque nœud possède trois degrés de liberté (déplacements Ux, Uy, Uz), figure IV-4.

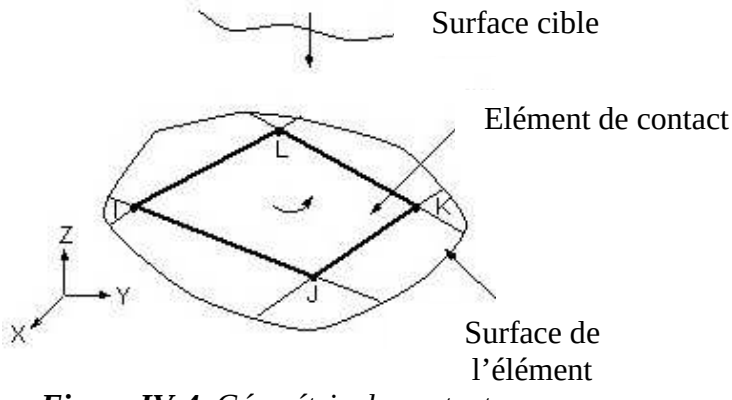


Figure IV-4. *Géométrie de contact*

Sept surfaces de contacts ont été recensées et modélisées : (voir figure IV-5) :

- Contact du recouvrement des deux plaques (CT 1-rouge)
- Contact entre la plaque et la tête du boulon (CT 2-beu d'azur)
- Contact entre la plaque et la rondelle (CT 3-rose)
- Contact entre les plaques et le corps du boulon (CT 4-vert)
- Contact entre la rondelle et le corps du boulon (CT 5-orange)
- Contact entre l'écrou et le corps du boulon (CT 6-bleu)
- Contact entre la rondelle et l'écrou (CT 7-blanc)

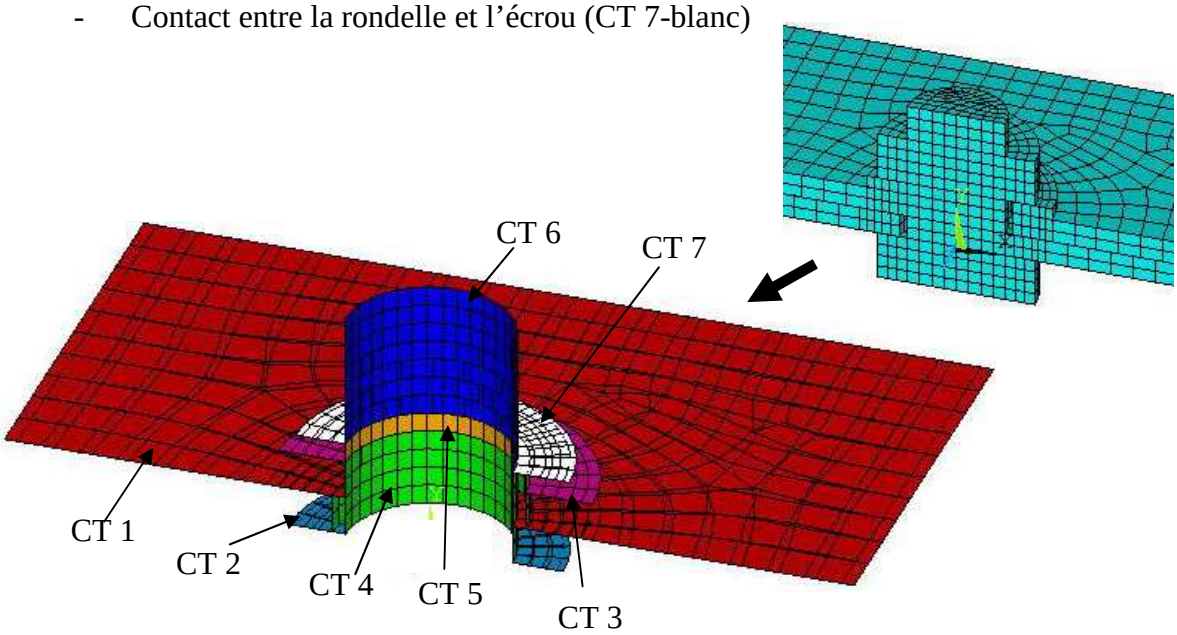


Figure IV-5. *Sept de surface de contact*

Dans l'étude de contact de deux solides, chaque surface de contact d'un solide est antagoniste à une surface d'un autre solide appelée cible. La surface de contact est associée au corps déformable et la surface cible est attribuée au corps rigide. Dans notre cas, les deux surfaces sont flexibles, donc deux surfaces de contact constituent un « contact paire » c'est-à-dire que chaque surface est à la fois une surface de contact et une surface cible.

La profondeur de pénétration est mesurée selon la direction normale de surface de contact au niveau des points d'intégration.

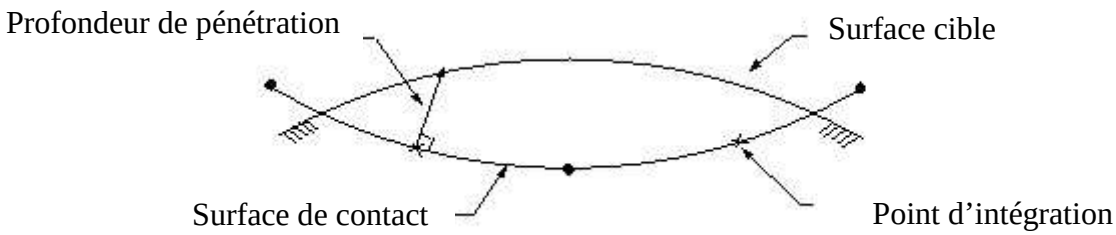


Figure IV-6. *Détail de la distance de pénétration*

L'algorithme de contact utilisé est le Lagrangien augmenté.

Les vecteurs de la traction de contact : $\begin{cases} P \\ \tau_y \\ \tau_z \end{cases}$

P : la pression normale de contact

$$P = \begin{cases} 0 & \text{si } u_n > 0 \\ K_n.u_n + \lambda_{i+1} & \text{si } u_n \le 0 \end{cases}$$

Où $\lambda_{i+1} = \begin{cases} \lambda_i + K_n.u_n & \text{si } |u_n| > \varepsilon \\ \lambda_i & \text{si } |u_n| < \varepsilon \end{cases}$

λ_i : multiplicateur Lagrangien à itération i

ε : tolérance compatible

K_n : la rigidité normale de contact

u_n : ouverture de contact

τ_y : la contrainte tangentielle de contact suivant la direction y

τ_z ; la contrainte tangentielle de contact suivant la direction z

La contrainte tangentielle est calculée par loi de Coulomb

$$\tau_y = \begin{cases} K_s.u_y & \text{si} \quad \tau = \sqrt{\tau_y^{\,2} + \tau_z^{\,2}} - \mu_P < 0 \quad \text{(adhérence)} \\ \mu.K_n.u_n & \text{si} \quad \tau = \sqrt{\tau_y^{\,2} + \tau_z^{\,2}} - \mu_P = 0 \quad \text{(glissement)} \end{cases}$$

Où K_s : la rigidité tangentielle de contact

u_y : la distance de glissement suivant la direction y

μ : le coefficient de frottement

IV.2.4. Modélisation du serrage

Le couple de serrage est modélisé par la tension du boulon qui est égale à un effort de pression appliqué sur l'écrou et un effort de pression appliqué à l'extrémité de la vis (de sens contraire).

Le couple de serrage crée une tension dans la vis et une compression dans l'écrou. C'est cette tension et cette compression qui sont modélisées dans les calculs éléments finis (figure IV-7). Pour étudier l'influence du couple de serrage, cinq valeurs de couple de serrage ont été retenues : 2daN.m - 2,5 daN.m - 3daN.m - 3,5 daN.m et 4da N.m correspondant aux cinq valeurs de tension dans le boulon (cf chapitreIII.2.1). Les données sont précisées dans le tableau IV-2.

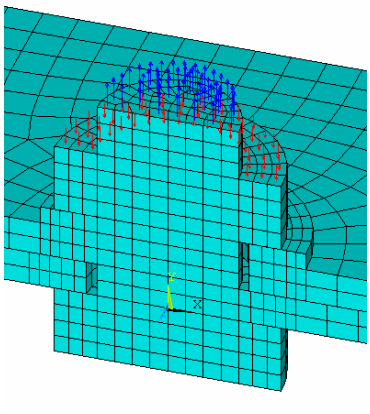


Figure IV-7. *Détail des champs de pressions*

Les pressions appliquées sur l'écrou (couleur rouge) sont données par :

$$p_1 = \frac{F}{S_1}$$ avec S_1 : aire chargée de l'écrou

La tension dans le corps de boulon (la couleur bleue) est donnée par :

$$p_2 = \frac{F}{S_2}$$ avec S_2 : aire chargée du boulon

Couple de serrage (daN.m)	Effort de tension dans le boulon F (N)	Aire S_1 (m^2)	Pression P_1 (Pa)	Aire S_2 (m^2)	Pression P_2 (Pa)
C1 = 2,0	8 643	7,84E-05	1,10E+08	5,03E-05	1,72E+08
C2 = 2,5	10514	7,84E-05	1,34E+08	5,03E-05	2,09E+08
C3 = 3,0	12 390	7,84E-05	1,58E+08	5,03E-05	2,46E+08
C4 = 3,5	14 256	7,84E-05	1,82E+08	5,03E-05	2,84E+08
C5 = 4,0	16 127	7,84E-05	2,06E+08	5,03E-05	3,21E+08

Tableau IV-2. *Les différentes pressions en fonction du couple de serrage*

IV.2.5 Les conditions aux limites

La symétrie par rapport au plan défini par l'axe de la fixation et une droite orthogonale le long du recouvrement (direction longitudinale) est adoptée. Pour réduire le temps de calcul nous avons modélisé uniquement la moitié de l'assemblage par rapport à l'axe de symétrie. Or, les résultats expérimentaux en termes de champs de déplacements et de déformations obtenues par la corrélation d'images ne sont pas tout à fait symétriques. Ceci s'explique par la géométrie de la tête du boulon et de l'écrou qui est dans les deux cas de forme hexagonale. Les sommets et les côtés ne sont pas symétriques par rapport à l'axe de symétrie des plaques. Nous avons testé deux cas : une éprouvette entière centrée (têtes de boulon et d'écrou

symétriques par rapport à l'axe) et une éprouvette entière non symétrique définie par un angle α (figure IV-3).

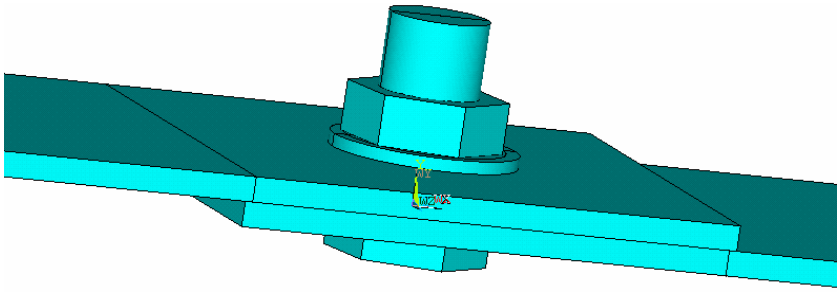


Figure IV-8a. *Modèle de l'éprouvette entière avec écrou et tête de boulon hexagonal*

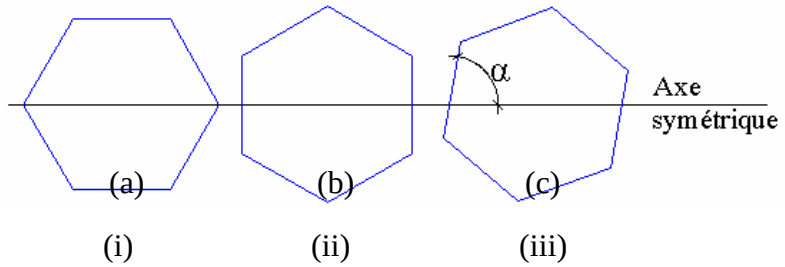


Figure IV-8b. *Position de l'écrou hexagonal par rapport à l'axe de symétrique*

Avec l'écrou et la tête de boulon centrés, les valeurs des déformations et des contraintes sont symétriques avec l'axe de l'éprouvette. Concernant la configuration où l'écrou et la tête de boulon sont décentrés, les valeurs des déformations et des contraintes sont proches de la première configuration (variation de l'ordre de 5%). Cette influence est négligeable et la moitié de l'assemblage sera modélisé pour l'ensemble des simulations. Les comparaisons expériences (C.I.D.) et simulations numériques seront cependant réalisées sur les assemblages modélisés entièrement.

L'assemblage est encastré à une extrémité et chargé en déplacement suivant la direction X dans l'autre extrémité (figure IV-9).

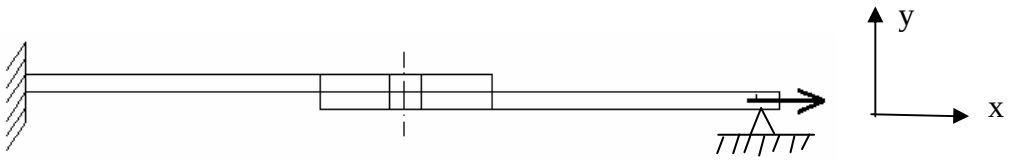


Figure IV-9. *Conditions limites*

IV.3. Simulation numérique

IV-3.1 Comportement global sans endommagement

IV-3.1.1 Condition de calcul d'un assemblage

Pour contrôler les contacts du serrage du boulon, le calcul numérique est divisé en deux étapes (steps) comme indiqué sur la figure IV-10.

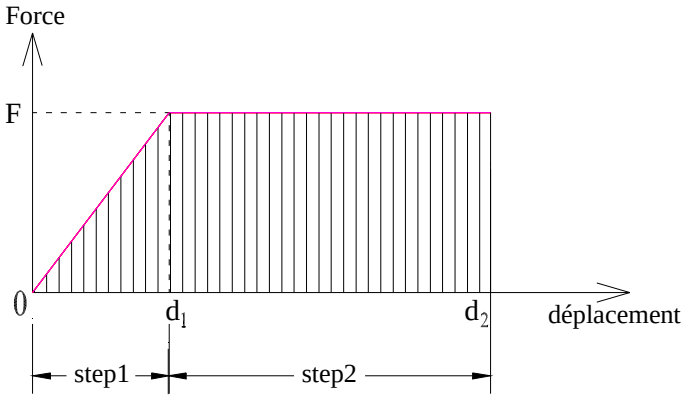


Figure IV-10. *Les deux étapes de calcul*

- Etape 1 : Serrage du boulon : Application de la pression sur écrou et mise en tension du corps du boulon.

- Etape 2 : Déplacement de l'extrémité de la plaque de d_1 à d_2 dans la direction longitudinale.

Dans l'étape 1, le couple de serrage est modélisé par la tension du boulon. Cette tension correspond à une pression sur l'écrou et une pression en sens contraire sur la surface extrémité de la vis : ces deux pressions combinées compriment les deux plaques (Figure IV-11).

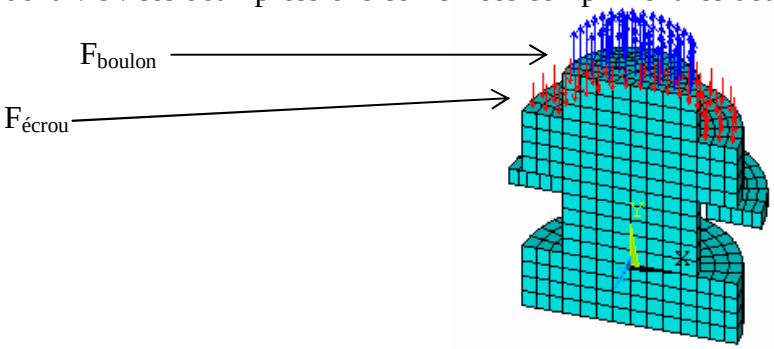


Figure IV-11. *Les pressions sur l'écrou et la vis dans le cas C=4daN.m*

Les résultats de l'étape 1 sont vérifiés par les critères de contacts suivants :

- La force totale des nœuds est égale la tension dans le boulon

- Le déplacement vertical de la fixation est nul

- La valeur de pénétration doit rester inférieure à la tolérance

La figure IV-12 représente l'évolution des contrainte (critère Von Misès) suivant l'axe y (correspondant à l'axe du corps de boulon, donc normal à l'interface) dans la zone de recouvrement des deux substrats à la fin de l'étape 1.

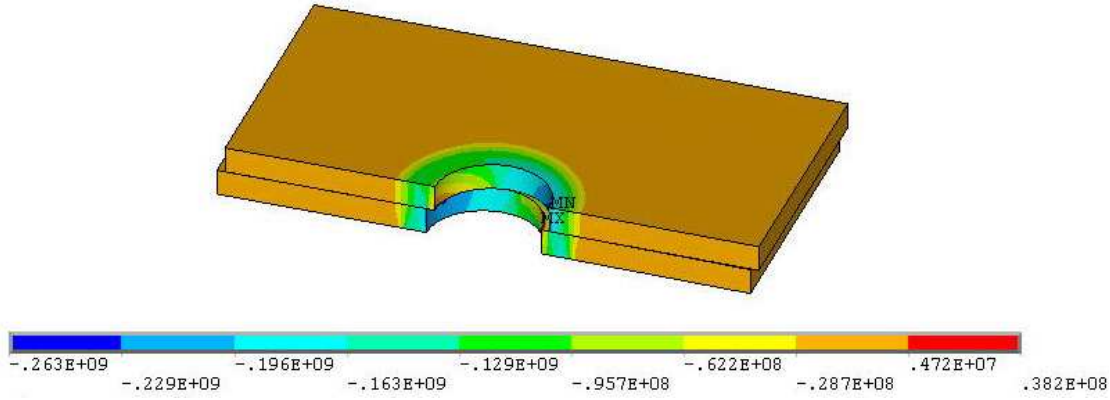


Figure IV-12. *Evolution des contraintes au niveau du recouvrement à la fin de l'étape 1*

Dans l'étape 1, la pression est appliquée selon l'axe y qui correspondant à l'axe du corps du boulon, alors le déplacement suivant l'axe y de l'éprouvette permet de vérifier le « bon passage » du couple de serrage à la pression. La petite valeur de déplacement garanti bien la géométrie de l'éprouvette dans le processus de serrage. La figure IV-13 représente la valeur de déplacement de l'axe y dans le cas d'un couple de serrage maximum de 4daNm. La valeur obtenue est de 0,388 mm qui reste acceptable.

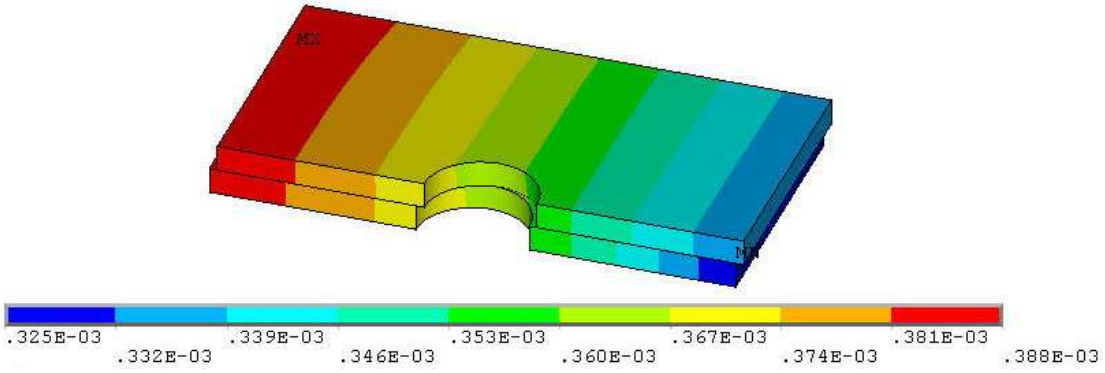


Figure IV-13. *Déplacement selon l'axe Y des deux substrats en recouvrement la fin de étape 1*

L'algorithme de contact « Lagrangien augmenté » impose numériquement toujours une pénétration. Si la valeur de cette pénétration est grande l'erreur sera elle aussi grande. Si cette valeur est petite, la solution pose des problèmes de convergence. Le contrôle de ce paramètre est alors nécessaire. Dans tous les cas, nous avons réglé les paramètres de contact pour obtenir une valeur de pénétration de 1.10^{-6} mètre à la fin de la première étape.

IV-3.1.2 Effet de bord

Les effets de bord sont traités au chapitre III en considérant deux géométries : une éprouvette à une fixation selon la norme NASM et une éprouvette à une fixation selon la

norme usuelle. On constate qu'il y a dans la norme NASM une largeur d'éprouvette (W = 64 mm) plus grande que celle donnée dans la norme usuelle (W = 40 mm). Au contraire, la valeur de la distance entre le centre de l'alésage et le bord libre du substrat dans le sens long dans la norme NASM (E=16 mm) est plus petite que celle donnée dans la norme usuelle (E = 20 mm). Les éprouvettes une fixation selon la norme NASM donnent un mode de rupture en cisaillement pur alors que l'on a un mode de rupture mixte traction – cisaillement dans la norme usuelle.

La figure IV-14a représente l'évolution de la courbe charge – déplacement d'une éprouvette une fixation selon la norme NASM avec un couple de serrage C=2.5 daNm et un jeu j= 0.2 mm. La figure IV-14b est une courbe charge – déplacement dans le cas d'une éprouvette une fixation en norme usuelle, C= 2.5 daN.m, et j=1mm.

Dans les résultats numériques, on trouve une pente de la phase d'élasticité (noté phase 4) de la structure qui est presque identique à la phase d'élasticité du matériau (phase 1). Le type de l'élément solide volumique est en cause. Cet élément à huit nœuds possède trois degrés de liberté (déplacements Ux, Uy, Uz) à chaque nœud, ce qui permet difficilement de représenter la rotation de l'élément.

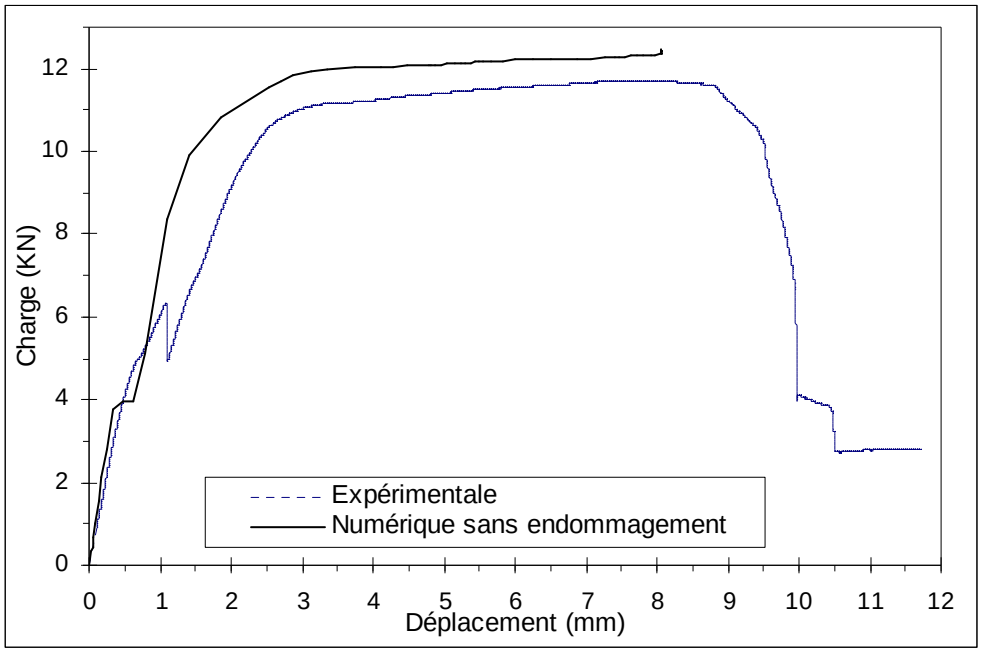


Figure IV-14a. *Courbe charge – déplacement (fixation norme NASM)*

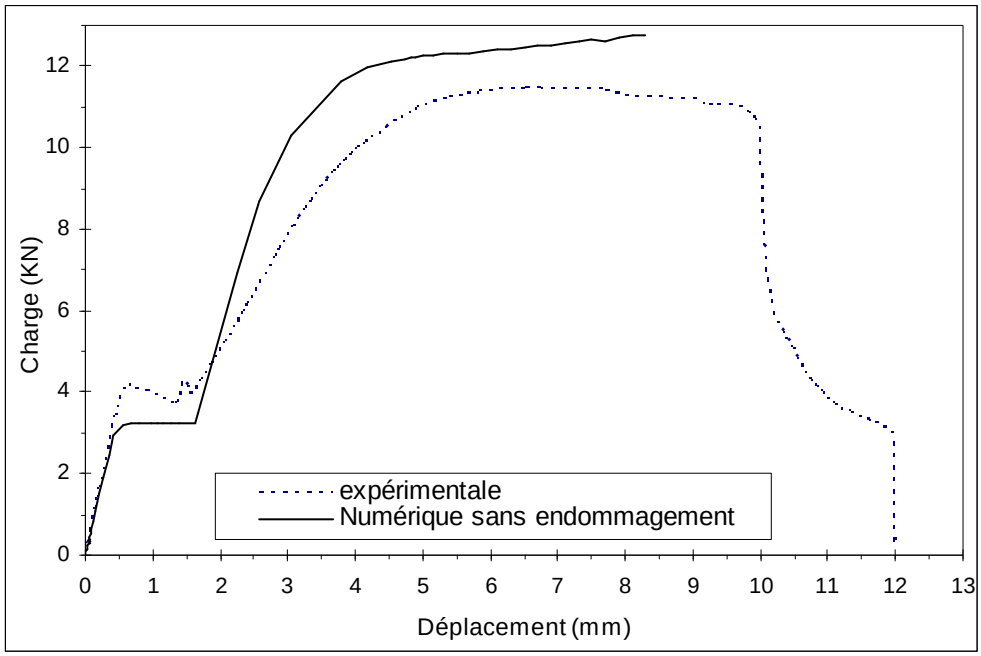


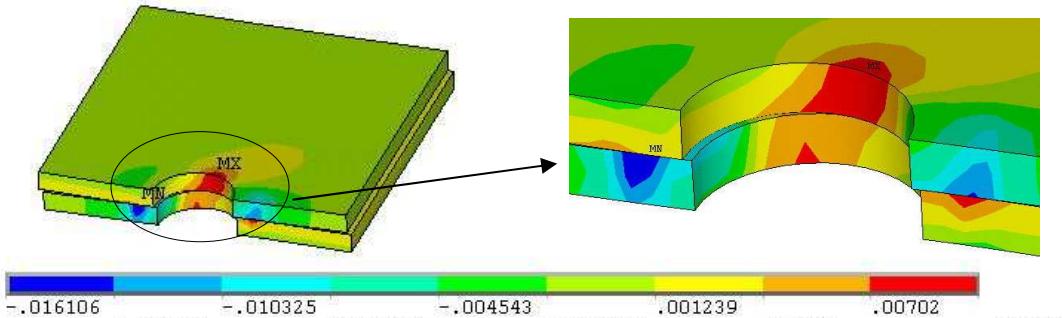
Figure IV-14b. *Courbe charge – déplacement (fixation norme usuelle)*

Les figures IV-15 et IV-16 représentent les déformations selon l'axe longitudinal x et les contraintes de Von Misès au point où le déplacement du substrat déplacé vaut :

- 1,1 mm pour l'éprouvette de norme NASM (relatif à la courbe de la figure IV-14a).

- 2 mm pour l'éprouvette de norme usuelle (relatif à la courbe de la figure IV-14b).

(a)



(b)

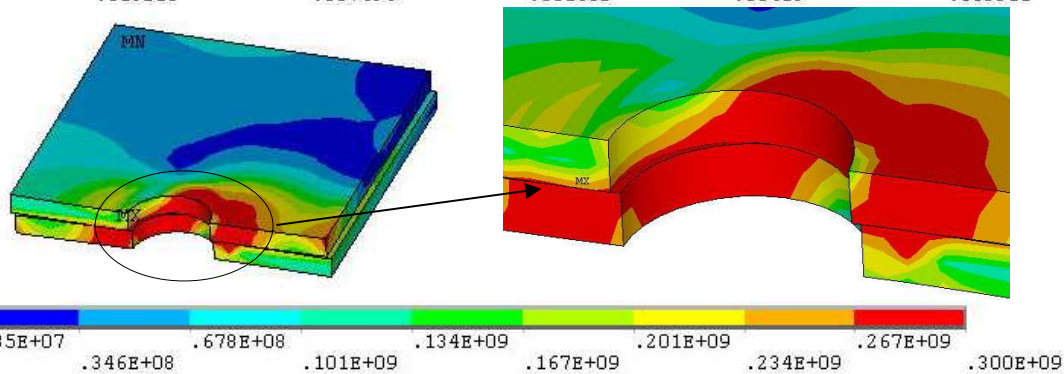


Figure IV-15. (a)-déformations selon l'axe x, (b)-contraintes de Von Misès (norme NASM)

Cette différence s'explique par un écart de jeu entre ces deux géométries de 0,8mm.

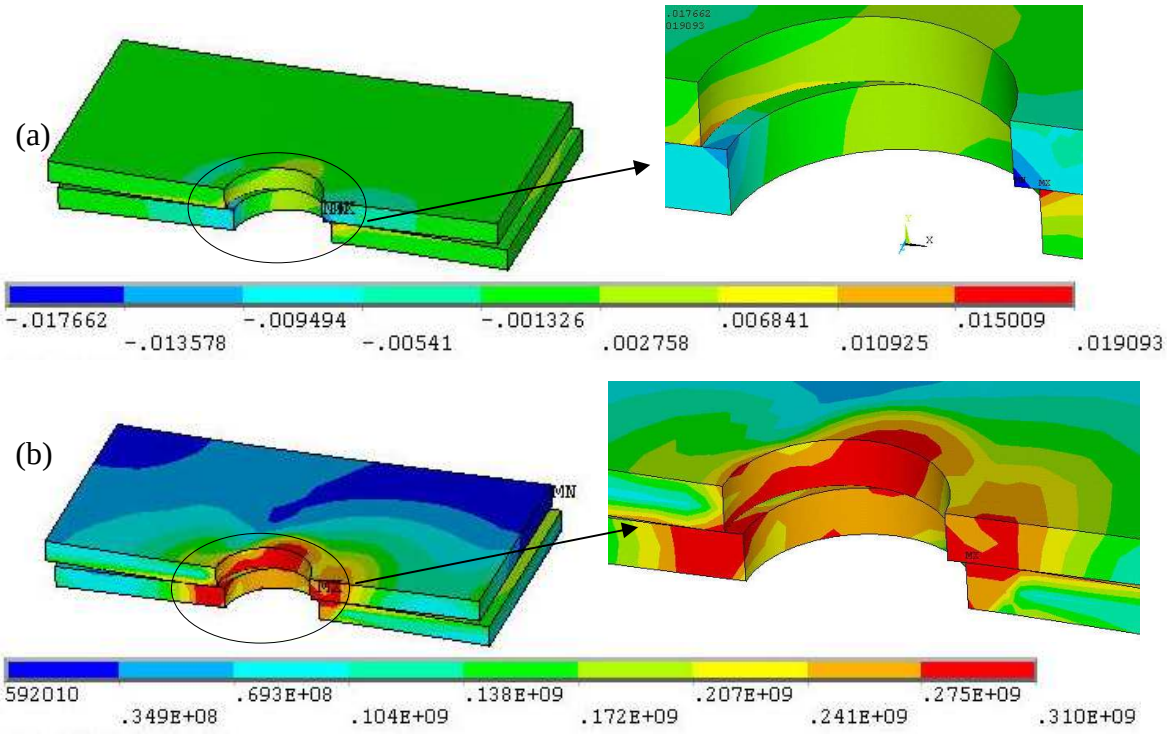
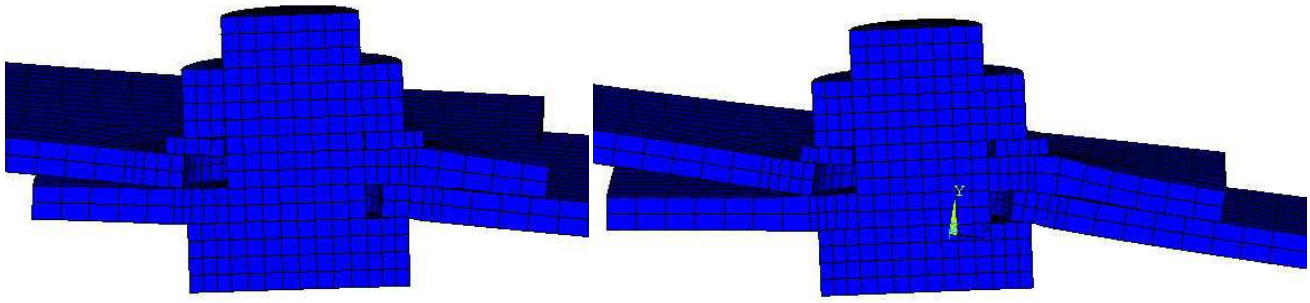


Figure IV-16. (a)-déformations selon l'axe x, (b)-contraintes de Von Misès (norme usuelle)

Sur la figure IV-17, nous remarquons que pour les deux configurations traitées précédemment (figure IV-15 et figure IV-16) les déformations sont plus importantes dans le cas de la norme usuelle par rapport à la norme NASM, traduisant un effet de bord plus important qui favorise une flexion secondaire.



(a) norme NASM *(b) norme usuelle*

Figure IV-17. *Maillage déformé*

IV-3.1.3 Effet du couple de serrage

L'effet du couple de serrage est modélisé numériquement sur une éprouvette à une fixation selon la norme usuelle avec un jeu j = 1mm. Cinq valeurs de couple de serrage : 2 - 2,5 – 3 - 3,5 - 4 daN.m sont introduites pour vérifier leur influence sur le comportement mécanique global. La figure IV-18 représente les courbes charge–déplacement correspondant aux cinq valeurs de couples de serrage. En effet, le couple de serrage influe principalement sur la phase élastique, avant glissement ainsi que sur le niveau de la charge globale.

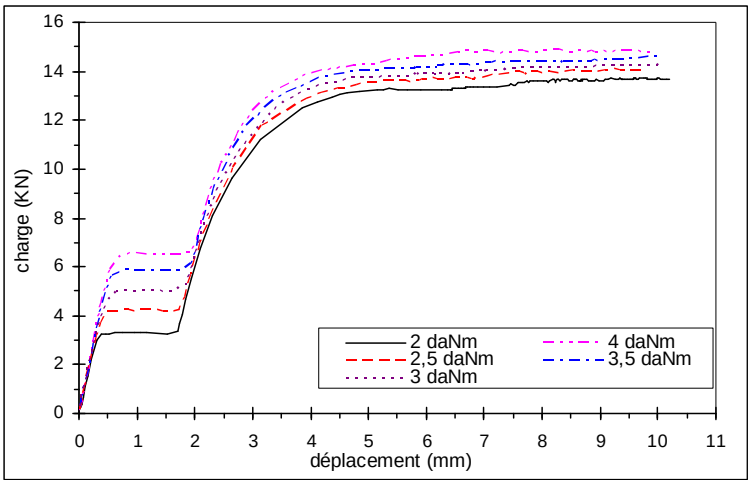


Figure IV-18. *Courbe charge – déplacement en fonction du couple de serrage*

La figure IV-19 donne une comparaison entre les valeurs expérimentales et numériques pour deux couples de serrage (2 et 4 daNm). Les phases élastiques (phases 1) sont correctement décrites par les calculs numériques. Dans la phase de glissement (phases 2), les résultats numériques se traduisent par un palier correspondant à une charge constante contrairement aux résultats expérimentaux où cette transition adhérence/glissement présente une chute progressive. Cette chute est due à la variation du coefficient de frottement statique/dynamique.

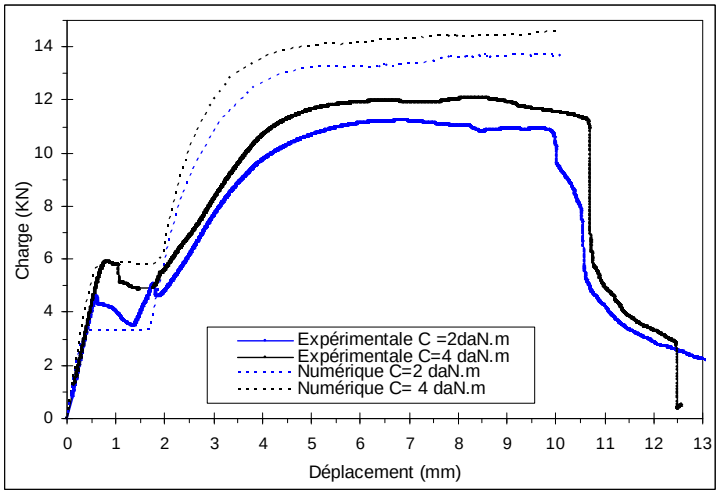


Figure IV-19. *Courbe charge – déplacement en fonction du couple de serrage*

La figure IV-20 représente la contrainte selon l'axe y (direction de la pression) de la zone de recouvrement des deux plaques à la fin de l'étape 1 (étape de serrage du boulon) avec trois valeurs de couple de serrage : 2 -3 et 4 daN.m. On note que les contraintes locales de compression au voisinage du trou dans les plaques augmentent avec le couple de serrage. La non-symétrie des contraintes est due à l'excentricité des trous des plaques dépendant fortement du jeu fonctionnel prévu initialement.

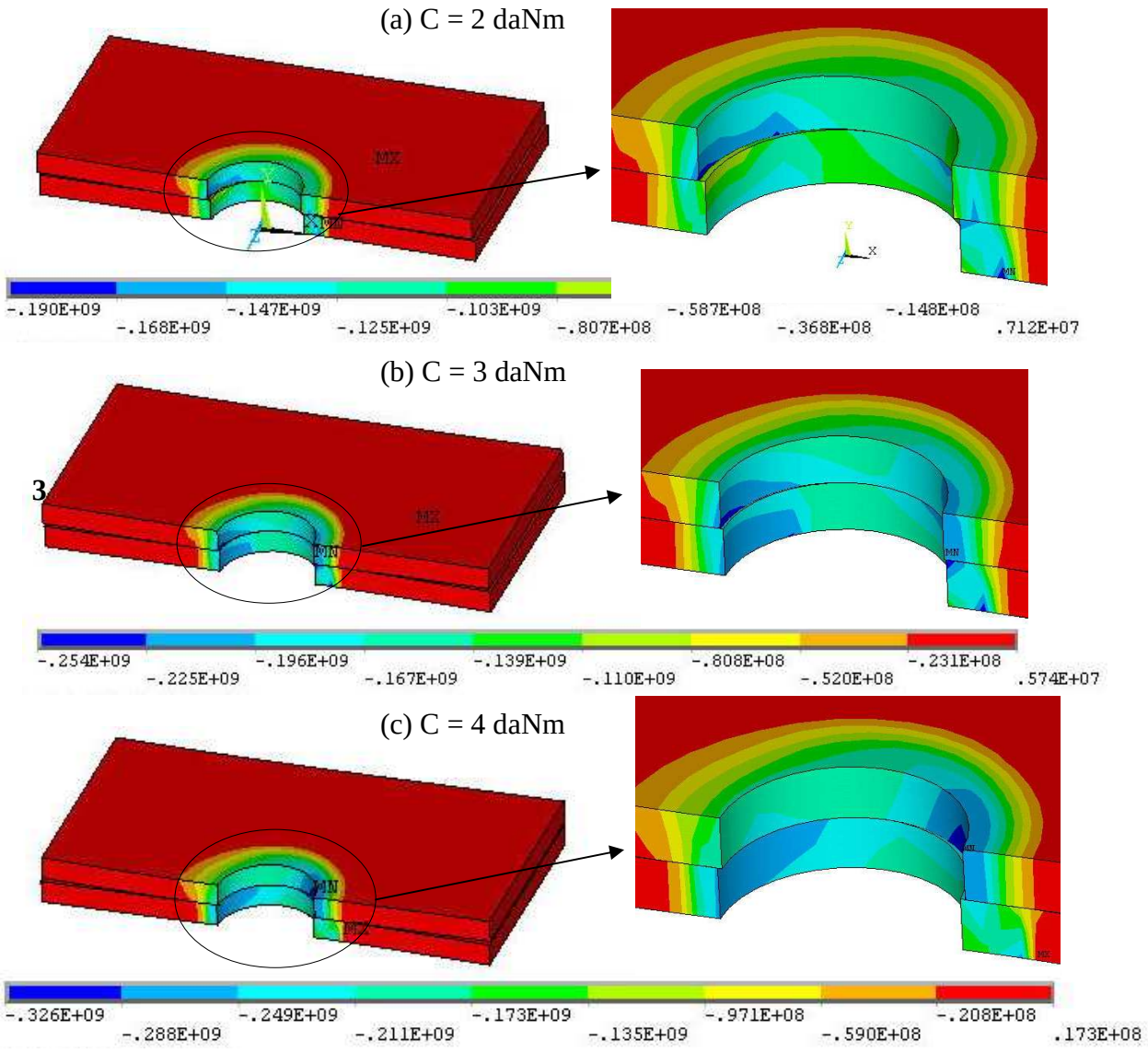


Figure IV-20. *Contrainte selon l'axe y au voisinage du trou en fonction du couple de serrage*

IV-3.1.4 Validation du champ de déplacements et de déformations numériques

Nous utilisons les résultats CID dans le cas d'une éprouvette à une fixation (norme usuelle), avec un couple de serrage C_S=4 daN.m et un jeu j=1mm, pour valider le modèle numérique. Le comportement global est divisé en huit phases (Figure IV-21). Sept points particuliers sont identifiés dans le chapitre III. Les champs de déplacements et de

déformations obtenus par corrélation d'images digitales et par les calculs éléments finis sont représentés dans la figure IV-22de (a) à (m).

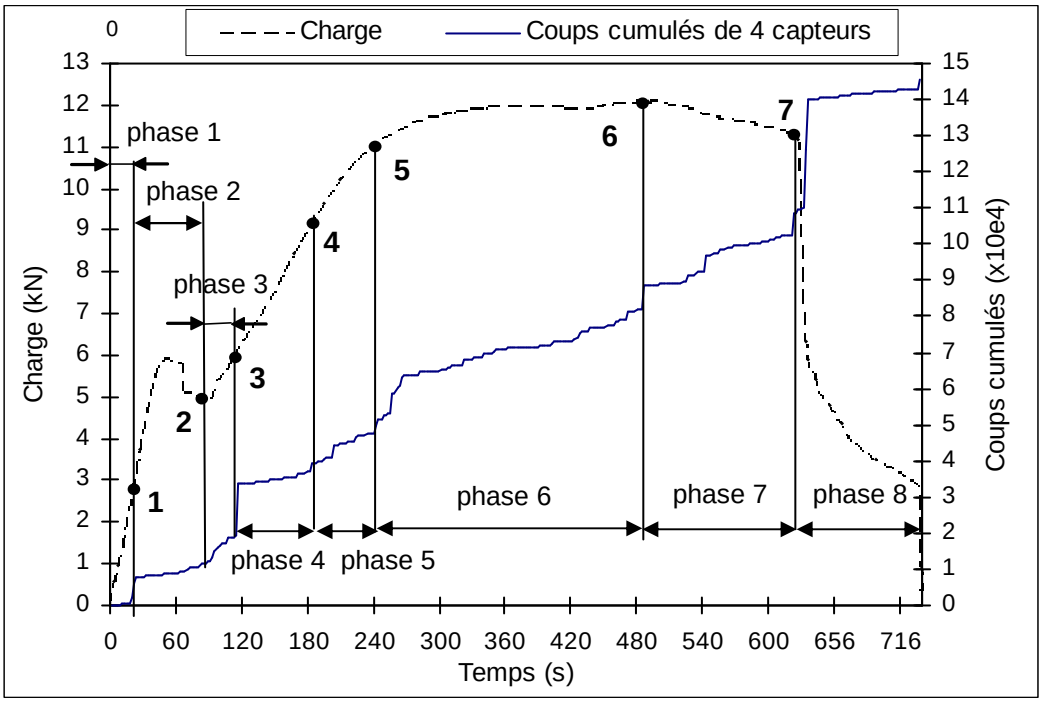


***Figure IV-21**. Les différentes phases de comportement global d'une éprouvette une fixation*

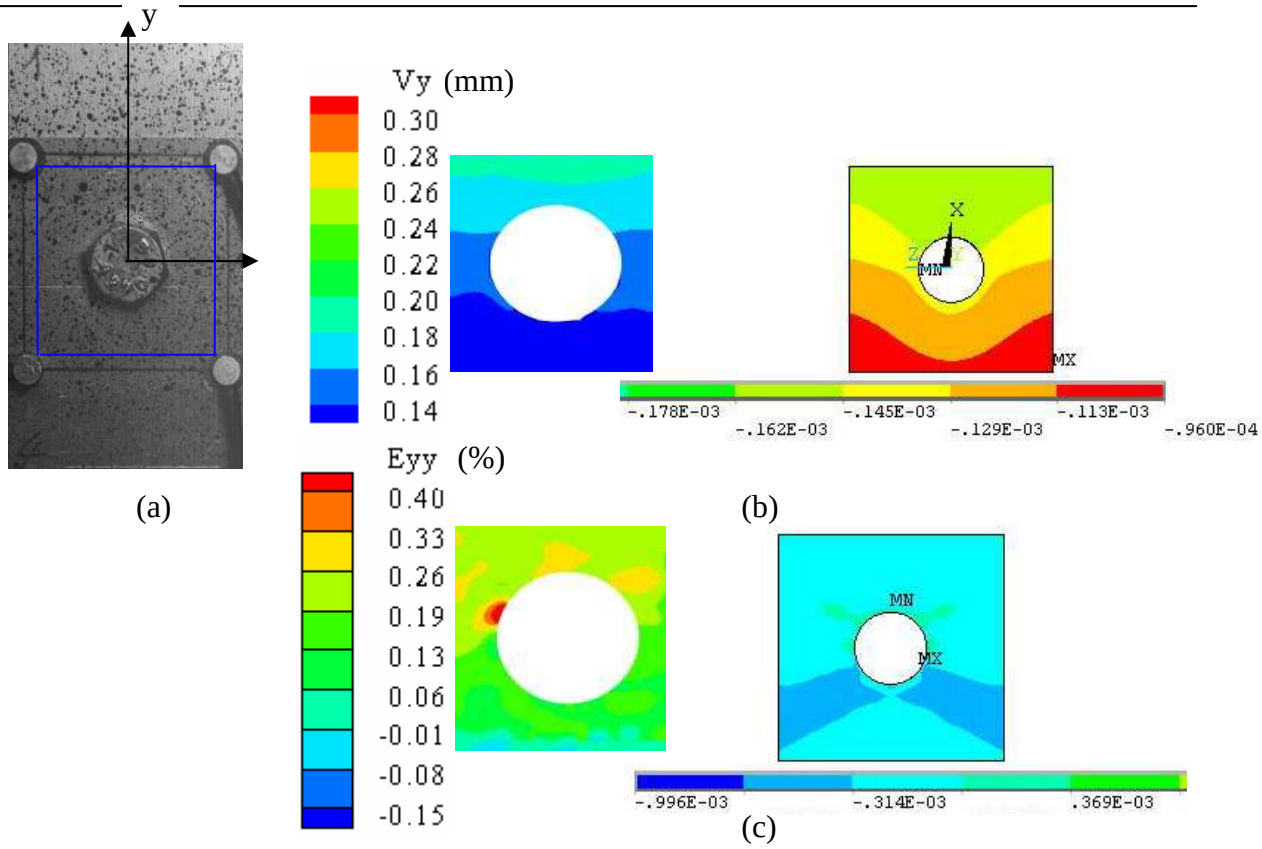


Figure IV-22. *(a)-image réelle, (b)-champ de déplacement au point 1, (c)-champ de déformation au point 1*

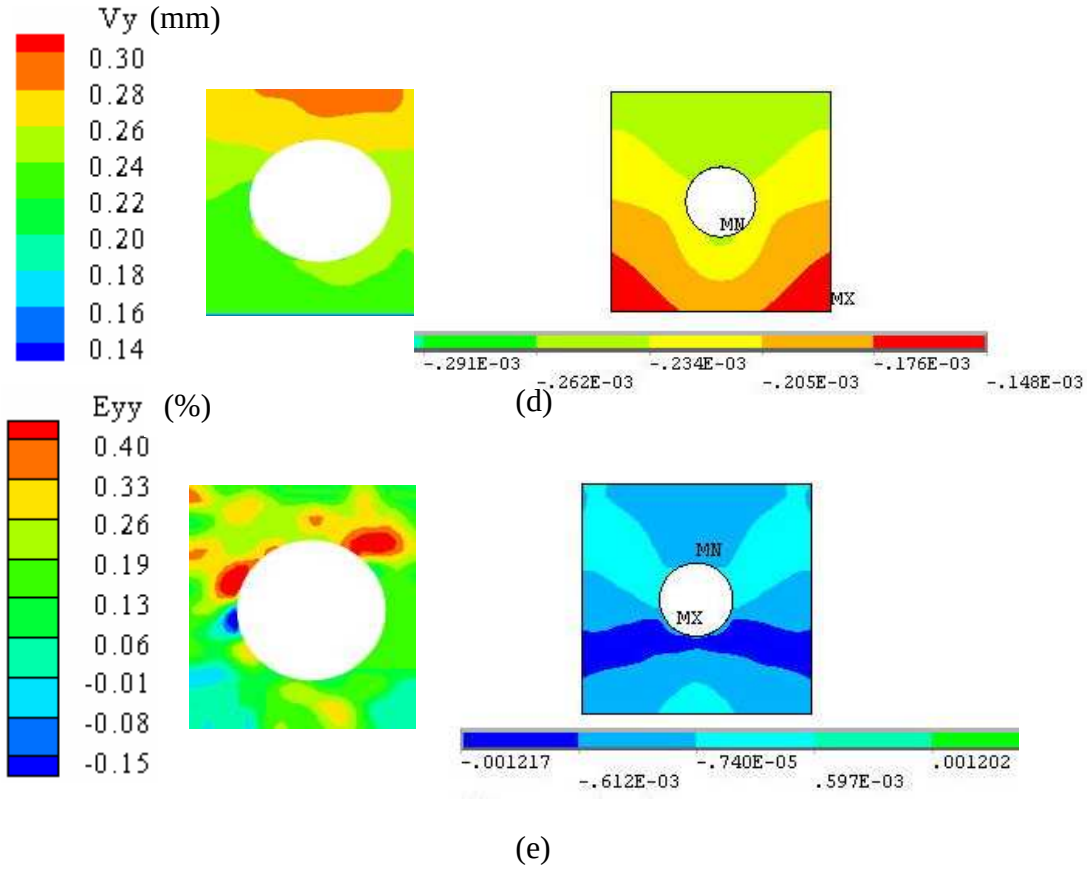
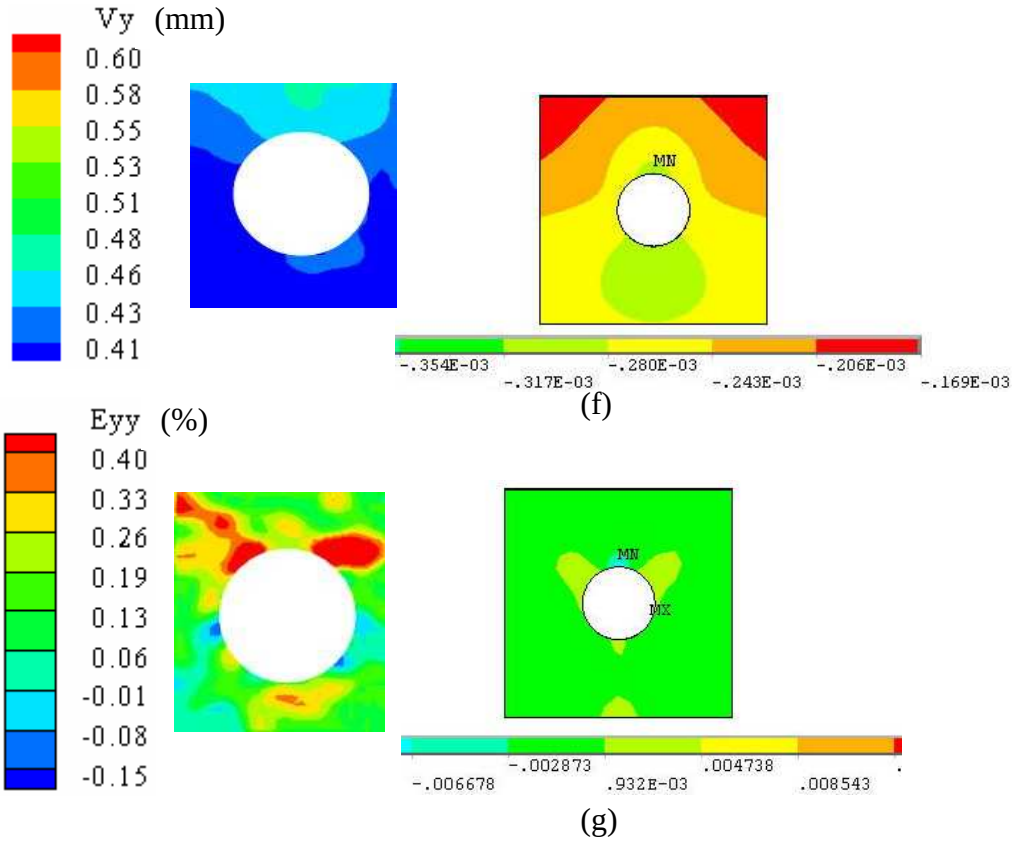


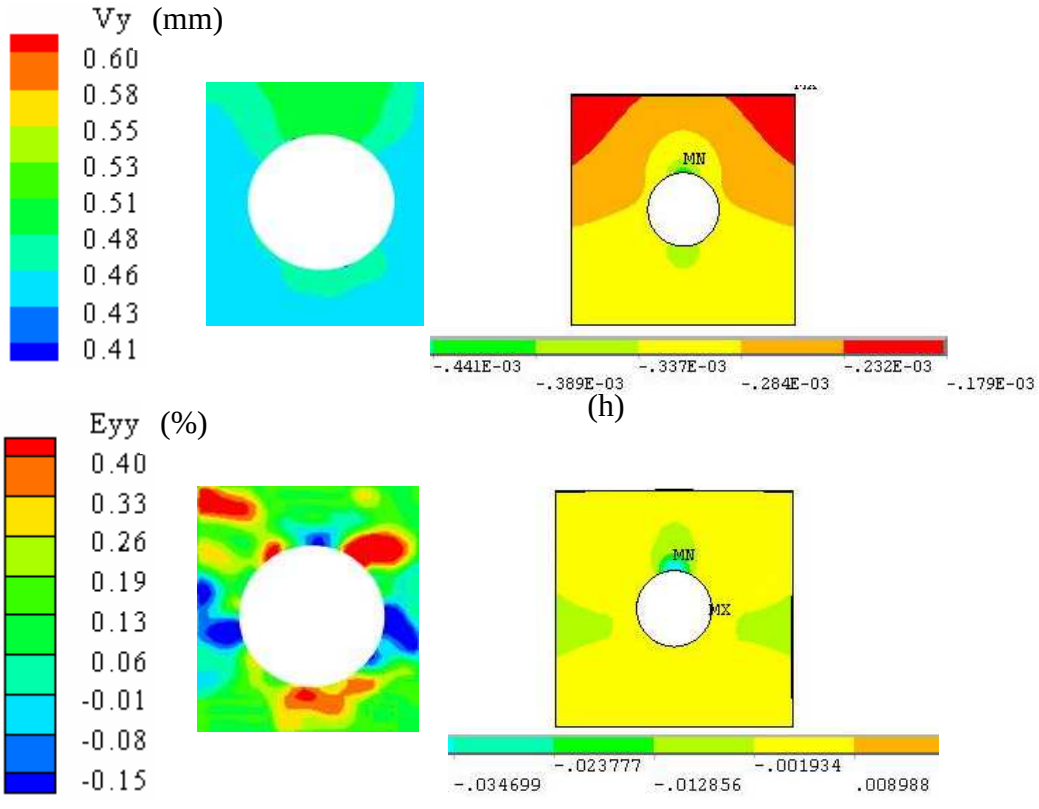
Figure IV-22. *(d)-champ de déplacement au point 2, (e)-champ de déformation au point 2*



(f)

(g)

Figure IV-22. *(f)-champ de déplacement au point 4, (g)-champ de déformation au point 4*



(h)

(i)

Figure IV-22. *(h)-champ de déplacement au point 5, (i)-champ de déformation au point 5*

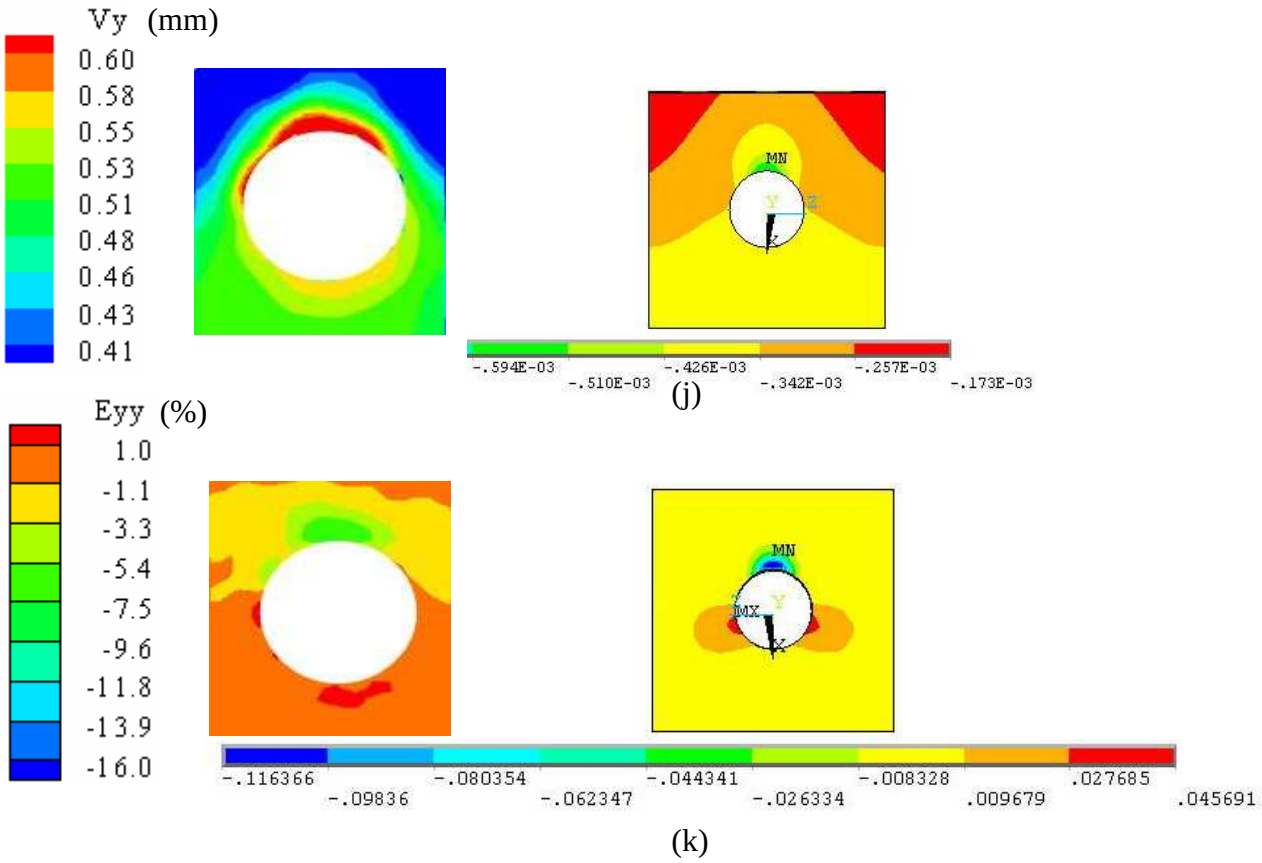


Figure IV-22. *(j)-champ de déplacement au point 6, (k)-champ de déformation au point 6*

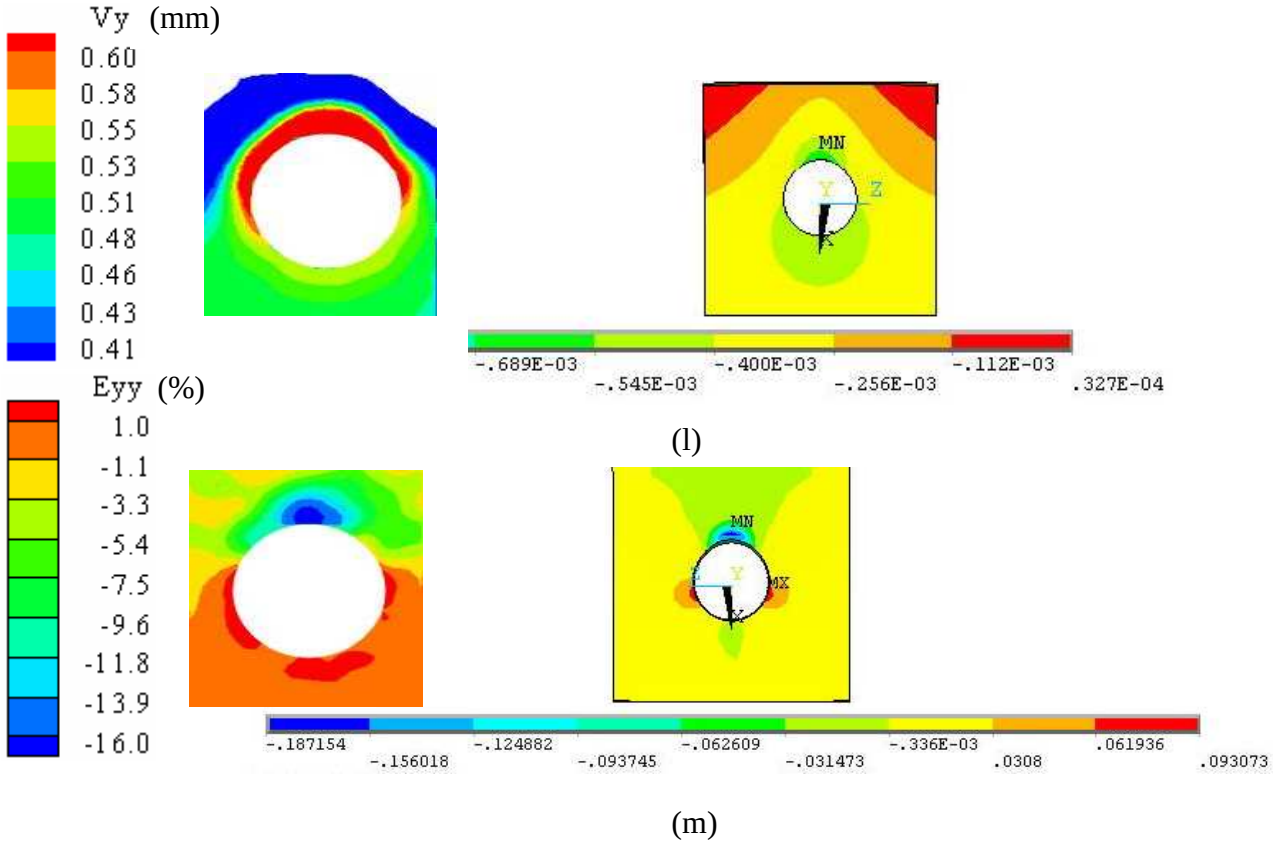


Figure IV-22. *(l)-champ de déplacement au point 7, (m)-champ de déformation au point 7*

IV-3.1.5. Validation globale

Nous avons réalisé cinq essais interrompus correspondant à la fin des cinq étapes spécifiées dans la figure IV-23.

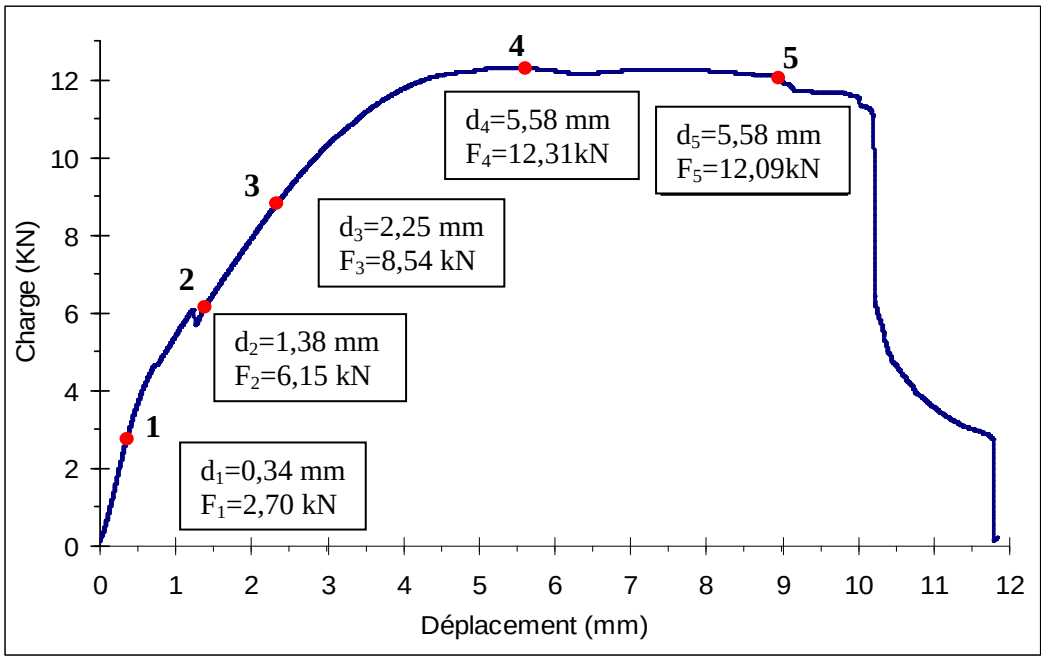


Figure IV.23. *Charge-déplacement : points particuliers*

Le tableau IV-3 fournit les coordonnées des cinq points considérés en vue d'analyser les déformations globales des assemblages dans un objectif de valider les modélisations numériques.

Eprouvette une fixation - $d_{alésage}$ =8 mm - couple de serrage 2,5 daN.m

Numéro de l' essai	Arrêt de l'essai	Déplacement (mm)	Force (KN)
1	Point 1 : Avant glissement	d_1 = 0,34	F_1 = 2,70
2	Point 2 : Après glissement	d_2 = 1,38	F_2 = 6,15
3	Point 3 : Fin de zone élastique structure	d_3 = 2,25	F_3 = 8,54
4	Point 4 : Effort de traction maximal (Fmax)	d_4 = 5,58	F_4 = 12,31
5	Point 5 : Rupture	d_5 = 8,94	F_5 = 12,09

Tableau IV-3. *Valeurs des charges et des déplacements pour les différents points*

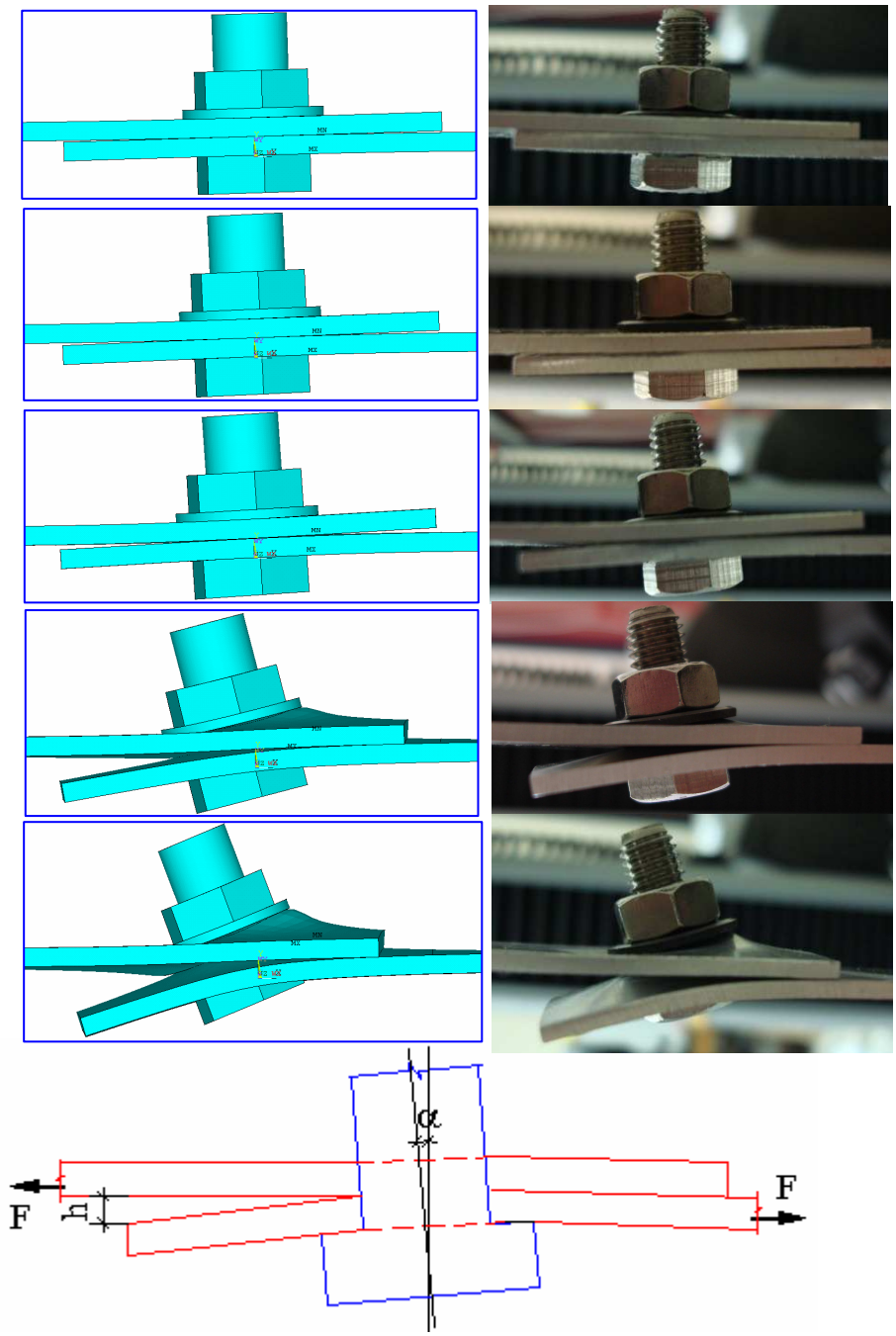


Figure IV.24. *comparaison expérimentale et numérique de la distorsions des plaques aux cinq points particuliers*

No essai		Résultat de la comparaison			
		Déplacement h (mm)		Angle α (degré)	
		Expérimentale	Numérique	Expérimentale	Numérique
1	Point 1	-	0,472	-	2,52
2	Point 2	-	0,737	-	4,47
3	Point 3	1,07	1,147	-	6,62
4	Point 4	3,35	3,401		22,65
5	Point 5	4,85	5,02		33,19

Tableau IV-4. *Valeurs chiffrées de la comparaison expérimentale et numérique*

La figure IV-24 et le tableau IV-4 présentent les valeurs des comparaisons expérimentales et numériques des distorsions globales subies par cet assemblage. Ces distorsions sont représentées par deux paramètres géométriques h et α. On note que les réponses numériques sont en parfaites concordances avec les constatations expérimentales, ce qui confirme la validité de notre modélisation numérique. Par contre, au niveau des courbes charge-déplacement, les résultats éléments finis basés sur un modèle élastoplastique sans endommagement divergent par rapport aux résultats expérimentaux à partir du point 2, ne prenant en compte aussi l'existence d'une flexion secondaire.

IV.3.2. Comportement global avec endommagement

IV-3.2.1 Modèle d'endommagement énergétique de Latham et Cockroft

IV-3.2.1.1. Présentation générale de modèle de Latham et Cockroft

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation numérique de la rupture en utilisant un modèle découplé de la déchirure ductile de Latham et Cockroft (1968) C'est le critère de rupture faisant intervenir l'endommagement sous une forme simplifiée.

L'expression du critère d'énergie de Latham et Cockroft est donnée sous forme mathématique de l'équation suivante :

$$\int_0^{\varepsilon_r} \max(\sigma_1, 0)\, d\varepsilon = \mathrm{C}$$

où σ_1 est la contrainte principale maximale

ε_r est la déformation équivalente à la rupture.

C désigne la valeur critique de l'endommagement.

Pour la modélisation éléments finis, l'intégrale précédente est exprimée sous la forme de la somme : $$\sum_{i=1}^{n} (\sigma_1 . \delta\varepsilon)_i = C$$

où n est le nombre d'étape de la simulation,

σ_1 est la contrainte principale maximale dans l'élément.

C est la valeur critique de l'endommagement

IV-3.2.1.2. Modélisation numérique du modèle de Latham et Cockroft

Ce critère ne fait intervenir qu'un seul paramètre ajustable C, ayant la dimension d'une énergie par unité de volume. La valeur du critère C est considérée comme une constante et est calculée par l'intégrale sur la courbe du comportement du matériau. Pour notre matériau, cette valeur vaut 22 MPa.

Le schéma (Figure IV-25) présente l'algorithme que nous avons implémenté dans le code de calculs par éléments finis. Cet algorithme permet de simuler la propagation de la fissure par dégradation des propriétés des éléments où le critère de rupture est atteint. Ce modèle est découplé et ne permet pas de prendre en compte l'endommagement progressif avant la phase finale de rupture.

La valeur de l'énergie de l'élément est calculée par la formule :

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\{\sigma\}^T\{\varepsilon^{el}\}vol_i + E_e{}^{pl} + E_s$$

Où n : nombre de point de l'intégration

$\{\sigma\}$: vecteur de contrainte

$\{\varepsilon^{el}\}$: vecteur de déformation élastique

vol_i : volume de point d'intégration

E_e^{pl} : énergie de déformation plastique

E_s: énergie de contrainte rigide

Nous remarquons que

- il faut s'assurer de l'équilibre total de la structure après la phase d'élimination des éléments endommagés,
- Pour des problèmes de convergence des calculs, nous avons choisi un incrément maximal de cinq éléments endommagés par incrément de calcul.

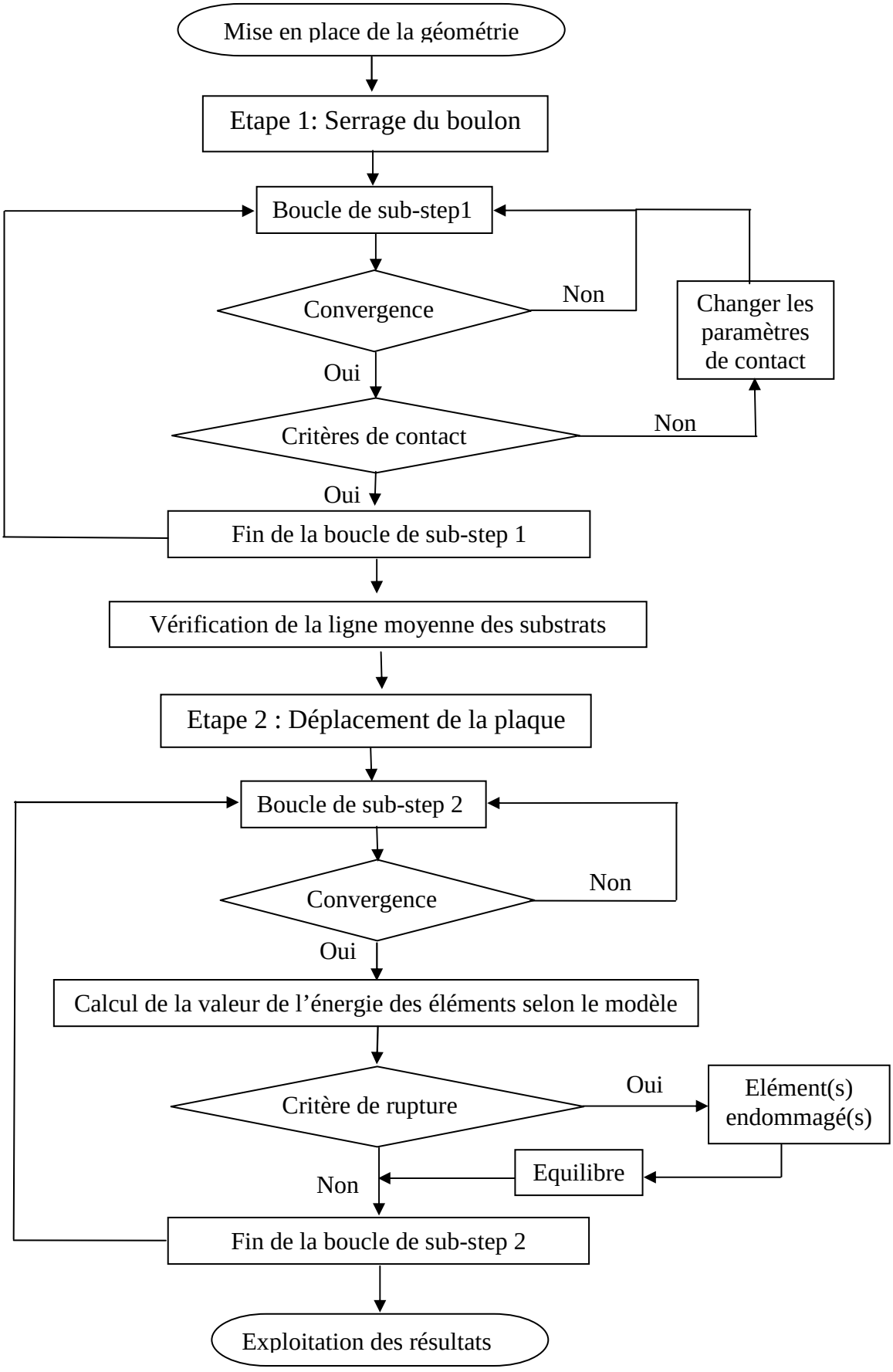


Figure IV-25. *Algorithme de calcul (critère d'énergie)*

Dans l'exemple ci-dessous, le modèle de Latham et Cockroft est utilisé pour calculer l'endommagement en cas d'assemblage une fixation selon la norme usuelle (couple de serrage C= 2 daN.m, jeu j=1 mm). La figure IV-30 montre une amélioration de la simulation du comportement global de l'assemblage par rapport à un simple calcul élastoplastique. En effet, on note qu'à partir de la plasticité globale (point 3) le modèle présente un adoucissement de la courbe P-d avec un comportement instable à un mode de rupture en cascade lié à l'utilisation du modèle découplé. Cependant, le modèle ne permet pas de prendre en considération l'endommagement dû à la plasticité locale engendrant un endommagement progressif (entre le point 2 et 3).

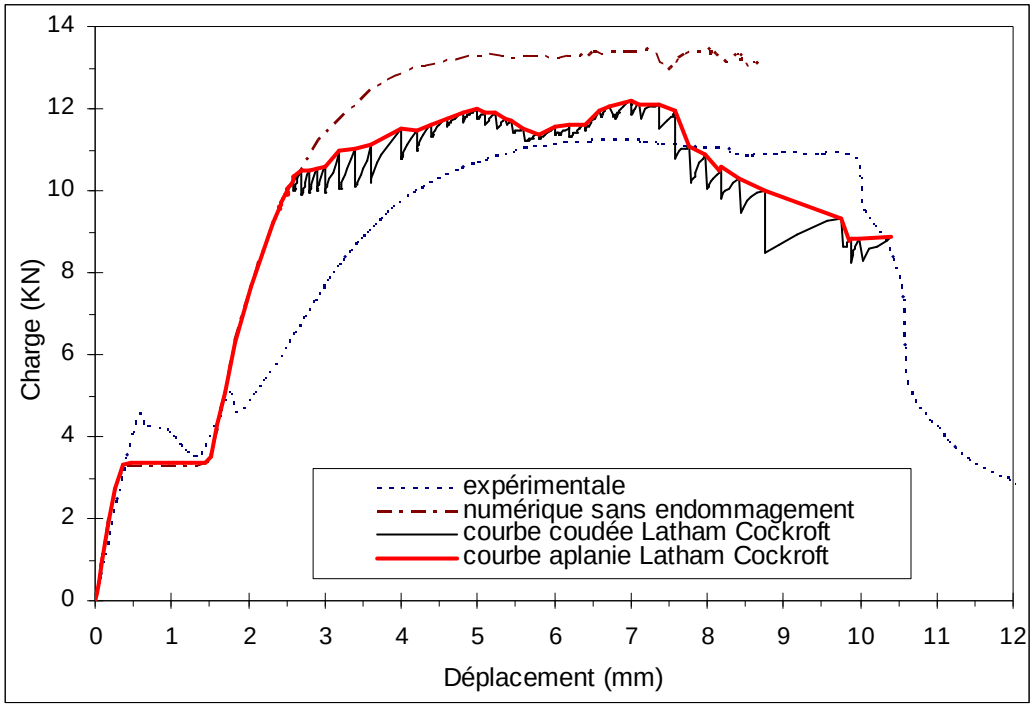


Figure IV-30. *Courbes charge – déplacement de modèle de Latham et Cockroft*

Le tableau IV-5 présente les valeurs de la force de traction et du déplacement des points particuliers données par l'expérience et la simulation numérique.

	Avant glissement F (kN) d (mm)	Après glissement F (kN) d (mm)	Limite élastique F (kN) d (mm)	Amorçage F (kN) d (mm)	F max F (kN) d (mm)	d_2-d_1 (mm)
Expérimentale	F_1=2,46	F_2=3,49	F_3=6,97	F_4=8,71	F_5=11,2	1,05
	d_1=0,3	d_2=1,35	d_3=2,77	d_4=3,43	d_5=7,07	
Numérique	F_1=3,32	F_2=3,35	F_3=6,27	F_4=9,9	F_5=12,2	1,0
	d_1=0,4	d_2=1,42	d_3=1,83	d_4=2,5	d_5=7,0	

Tableau IV-5. *Comparaison des valeurs expérimentales et numériques de force et de déplacement aux points particuliers*

Par ailleurs, nous pouvons souligner les remarques suivantes :

- Le phénomène de matage n'est pas pris en compte par la valeur numérique qui ne pourrait pas représenter la flexibilité de la structure. C'est la raison pour laquelle la pente de la phase d'élasticité de la structure (phase 4) est presque identique à celle donnée par l'élasticité du matériau (phase 1). Les valeurs numériques de déplacement au point de la limite élastique et au point d'amorçage sont inférieures par rapport aux résultats expérimentaux.
- Le point d'amorçage est déterminé au point où le déplacement vaut 2,5 mm. La figure IV-31 représente la contrainte de Von Misès du recouvrement des deux plaques au point d'amorçage. Les éléments endommagés ne sont pas représentés sur les maillages 3D, correspondant à l'avancement de la fissure.

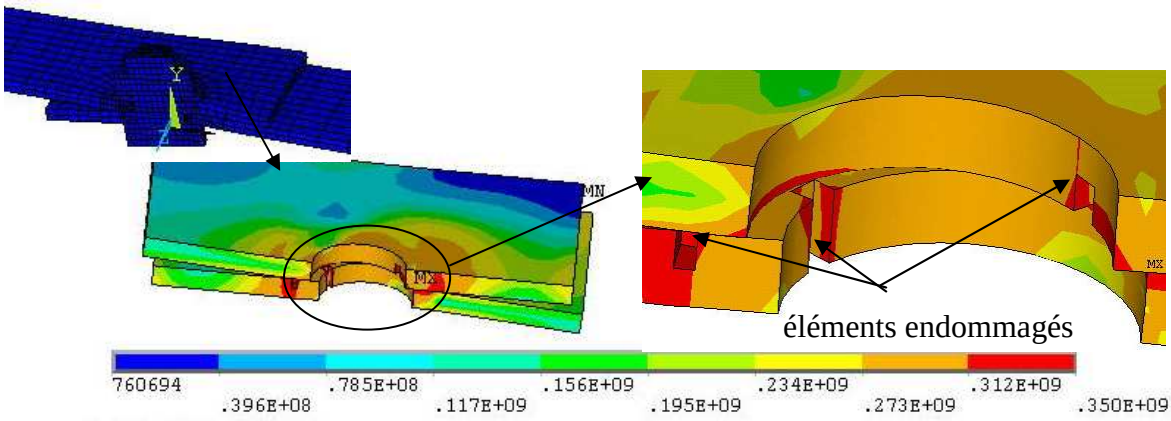


Figure IV-31. *Contrainte de Von Misès au point d'amorçage (déplacement d=2,5mm)*

Les zones proches des points de contact entre le corps du boulon et la peau intérieure des alésages seront endommagées, comme illustrées par la figure IV-32, qui représente la contrainte de Von Misès au niveau du recouvrement des deux substrats pour un déplacement de 5 mm.

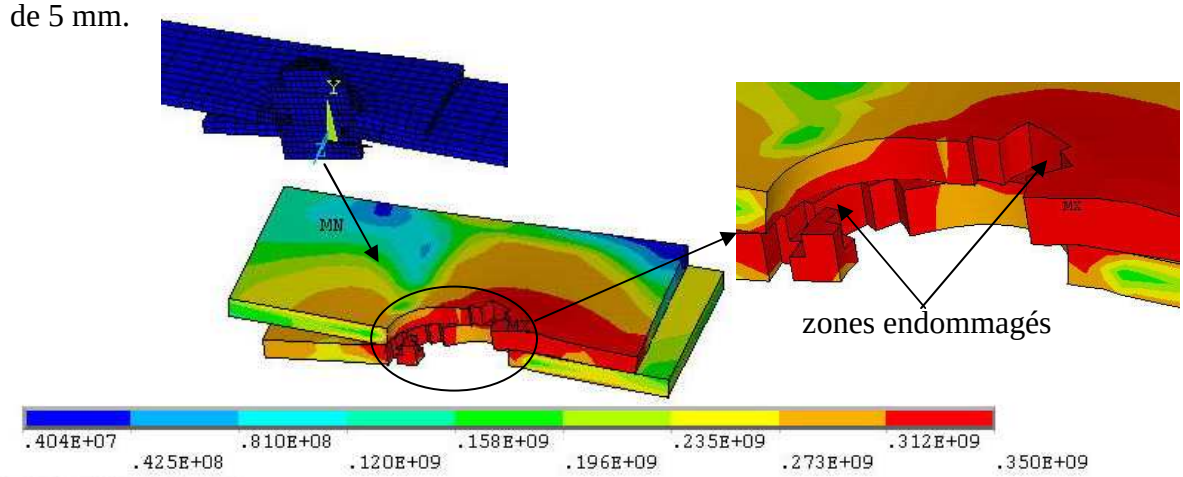


Figure IV-32. *Contrainte de Von Misès pour un déplacement de 5 mm*

Quand la tôle présente une distorsion, les éléments situés globalement dans le plan de symétrie et sur les peaux intérieures des alésages de chaque substrat (vue de dessus figure IV-33a et vue de dessous figure IV-33b), commencent à être endommagés ce qui provoque la propagation instable de la fissure comme le montre la figure IV-33. Cette distorsion suivie d'un endommagement explique le mode de rupture mixte cisaillement- traction.

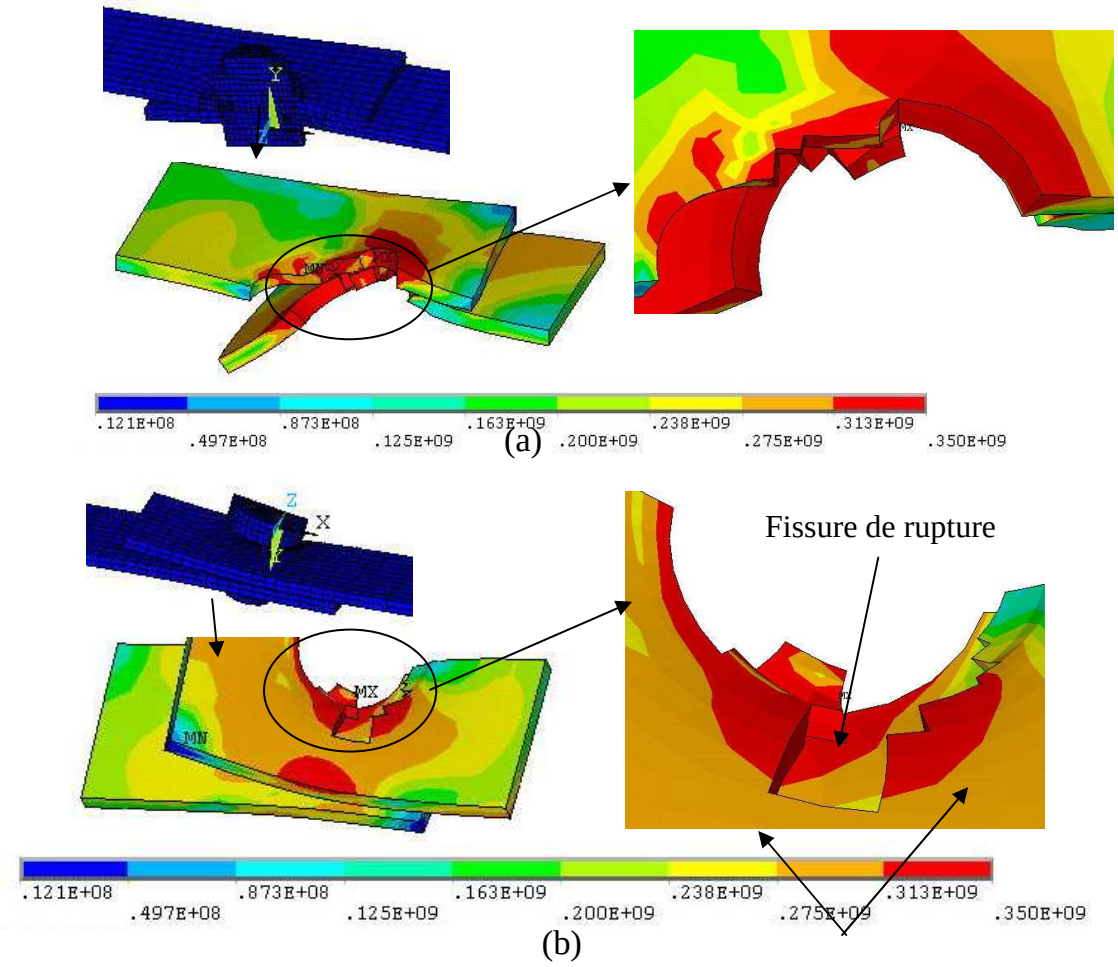


Figure IV-33. *Contrainte de Von Misès pour un déplacement de 8 ,5 mm*

IV-3.2.2 Modèle de Gurson - Tvergaard – Needleman (GTN)

IV-3.2.2.1. Présentation générale du modèle GTN

En 1977, Gurson propose de modéliser la déchirure ductile en utilisant un potentiel plastique appliqué à un solide poreux. Pour tenir compte de la coalescence des cavités, Tvergaard et Needleman ont modifié ce modèle en introduisant la fonction seuil suivante (modèle GTN) :

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^{\ 2}}{\sigma_y^{\ 2}} + 2 f^* . q_1 . \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right) - (1 + q_3 (f^*)^2) = 0$$

avec q_1, q_2, q_3 paramètres constitutifs (où $q_3=(q_1)^2$).

f* représente la fraction volumique modifiée du vide qui est une fonction de f définie par :

$$f^{*} = \begin{cases} f & \text{pour } f \le f_c \\ f_c + \delta\,(f - f_c) & \text{pour } f > f_c \end{cases}$$

avec $$\delta = \frac{f^{*}_{u} - f_c}{f_F - f_c}$$

Où f^{*}_{u} est la valeur ultime de $f^{*}=1/q_1$

f_F la fraction volumique de vides lors de la rupture finale

f_c fraction volumique critique de vides.

La fraction volumique de vide f se décompose en un terme de nucléation de nouvelles cavités $f_{nucléation}$ et un second terme $f_{croissance}$ correspondant à la croissance de cavités déjà existantes. L'évolution de la fraction volumique de cavités est donnée par l'expression suivante :

$$df = df_{nucléation} + df_{croissance}$$

avec $df_{croissance} = (1-f)d\varepsilon^{P}_{kk}$ et

$df_{nuclétion} = A.d\varepsilon^{P}_{eq}$

Où ε^{P}_{kk} est la trace du tenseur de déformation plastique

ε^{P}_{eq} la déformation plastique équivalence

A le paramètre de germination qui est choisi dans l'hypothèse où la nucléation des cavités a lieu au niveau de petites particules (taille de l'ordre du micron) $$A = \frac{f_n}{S_n\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon^{p}_{eq} - \varepsilon_n}{S_n}\right)^2\right]$$

Où f_n : est la faction volumique d'inclusion nucléées au niveau de particules

ε_n : la déformation moyenne à l'apparition de la nucléation des cavités

S_n : la déviation standard correspondante

IV-3.2.1.2. Modélisation numérique de modèle de GTN

Une étude paramétrique a permis de choisir un jeu de paramètres du modèle correspondant à notre matériau (alliage d'aluminium 6082 T6). Les valeurs de huit paramètres (q_1, q_2, q_3, f_0, f_n, ε_n, S_n, f_F et f_c) du modèle GTN sont présentés dans le tableau IV-6.

Paramètres	q_1	q_2	q_3	f_0	f_n	ε_n	S_n	f_c	f_F
Valeur	1,5	1	1	0,001	0,01	0,3	0,1	0,02	0,03

***Tableau IV-6**. Les paramètres* du modèle de GTN

La figure IV-34 présente les courbes expérimentales et numériques obtenues avec et sans endommagement. Le modèle de Gurson modifié, qui introduit la notion de l'endommagement continu, prend en compte la naissance d'un endommagement local à partir de la phase où le corps du boulon se met en contact avec le bord des alésages. Ce modèle présente un grand intérêt pour la prédiction de l'amorçage et la propagation des fissures dans les assemblages boulonnés mais le nombre important des paramètres qui entrent en jeu constitue un inconvénient majeur. Ce constat mérite une étude de sensibilité paramétrique du modèle.

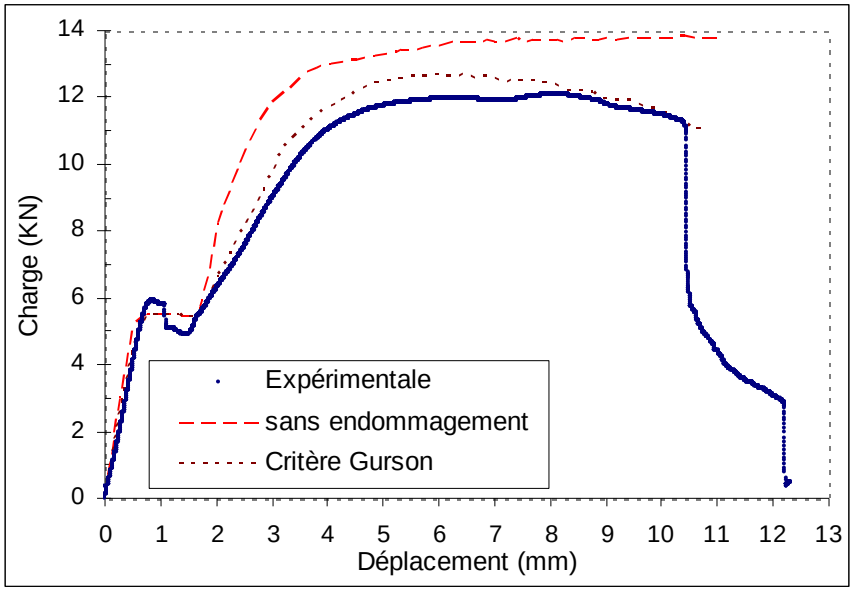
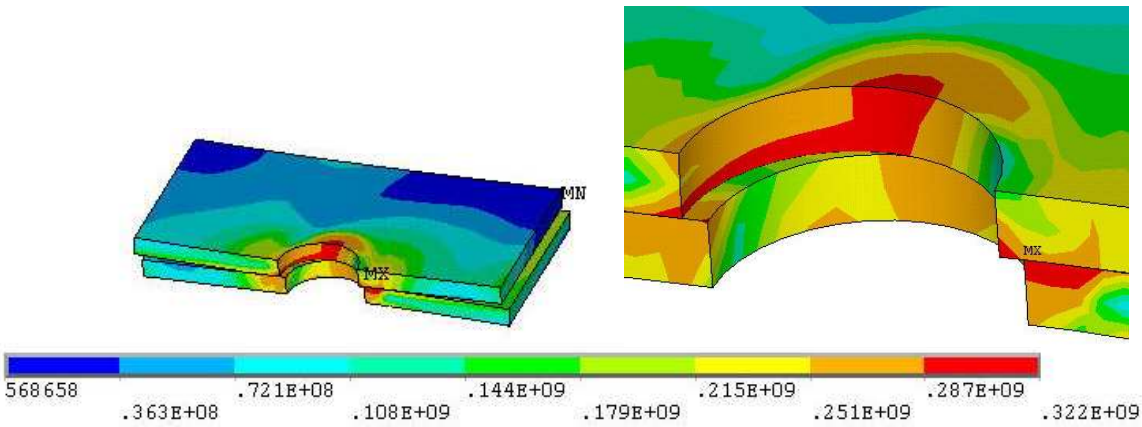
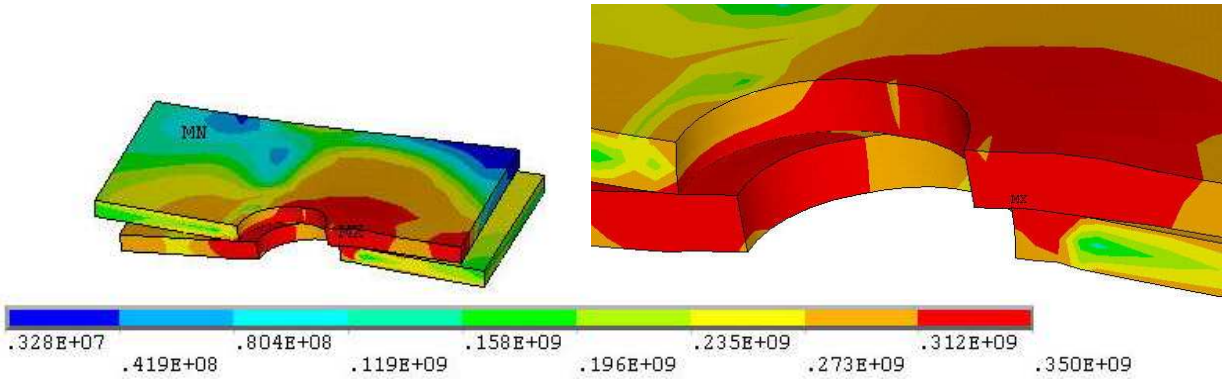


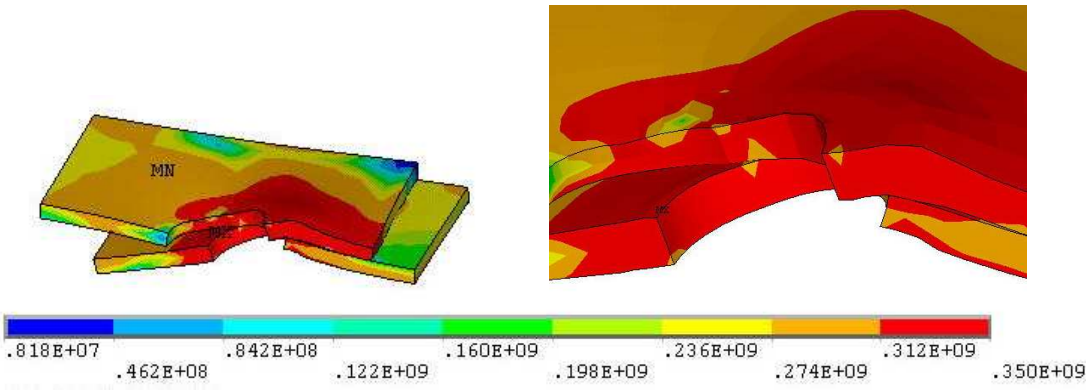
***Figure IV-34.** Courbe charge – déplacement du modèle GTN*



(a)- déplacement de 2mm

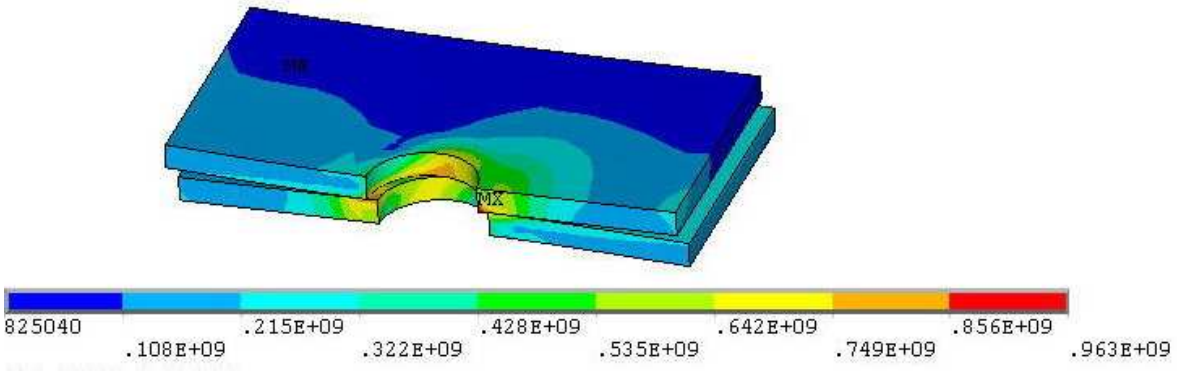


(b)- déplacement de 4mm

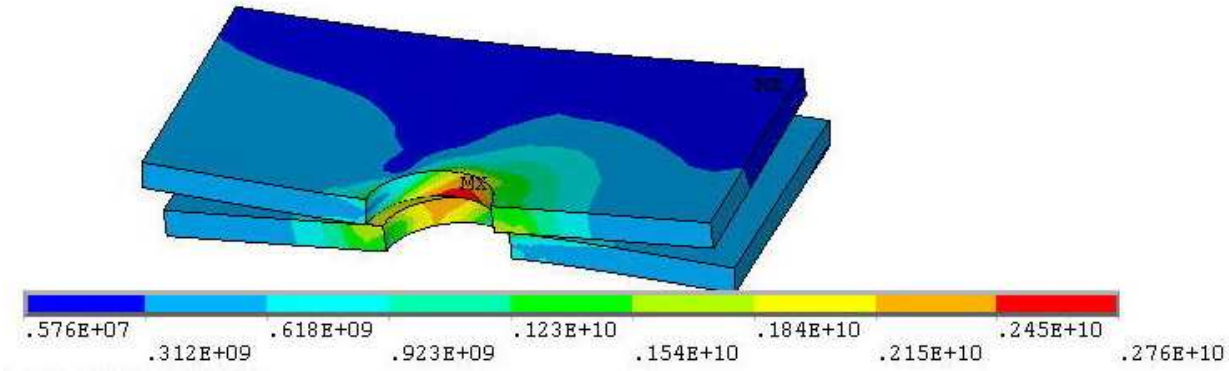


(c)- déplacement de 7,5mm

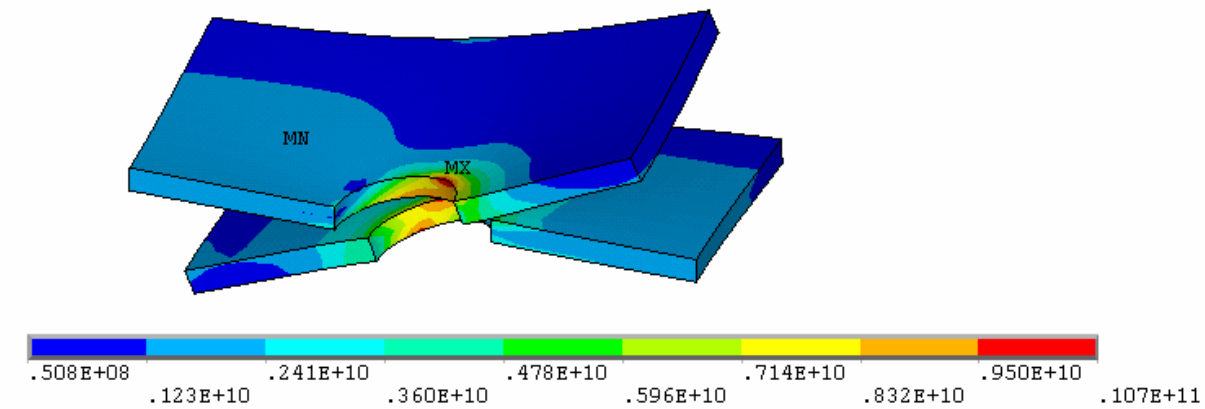
Figure IV-35. *Contraintes de Von Misès (cas sans endommagement) pour différentes valeurs de déplacement*



(a)- déplacement de 2mm



(b)- déplacement de 4mm



(c)- déplacement de 7mm

Figure IV-36. *Contraintes de Von Misès (cas GTN) pou différentes valeurs de déplacement*

IV-3.4. Comparaison des résultats

La figure IV.37 montre une comparaison des résultats numériques selon les trois types de modélisation proposés dans ce chapitre. Ces résultats, donnés pour une configuration bien précise, sont comparés avec les données expérimentales en terme d'évolution de la charge en en fonction du déplacement de l'assemblage. Cette confrontation montre que le modèle élastoplastique sans endommagement et celui découplé basé sur un critère énergétique donnent la même réponse jusqu'au début du domaine plastique. A partir de ce point, le second modèle qui introduit un critère de rupture, prend en compte la perte de la rigidité de la structure et tend à décrire l'endommagement. Ce modèle demeure insuffisant mais mérite d'être développé de part sa simplicité du fait de l'existence d'un critère unique. Le modèle de Gurson modifié, qui introduit la notion de l'endommagement continu, prend en compte la naissance d'un endommagement local à partir de la phase où le corps du boulon se met en contact avec les bords des alésages. Ce modèle présente un grand intérêt pour la prédiction de l'amorçage et la propagation des fissures dans les assemblages boulonnés mais le nombre important des paramètres qui entrent en jeu constitue un inconvénient majeur. Ce constat mérite une étude de sensibilité paramétrique du modèle.

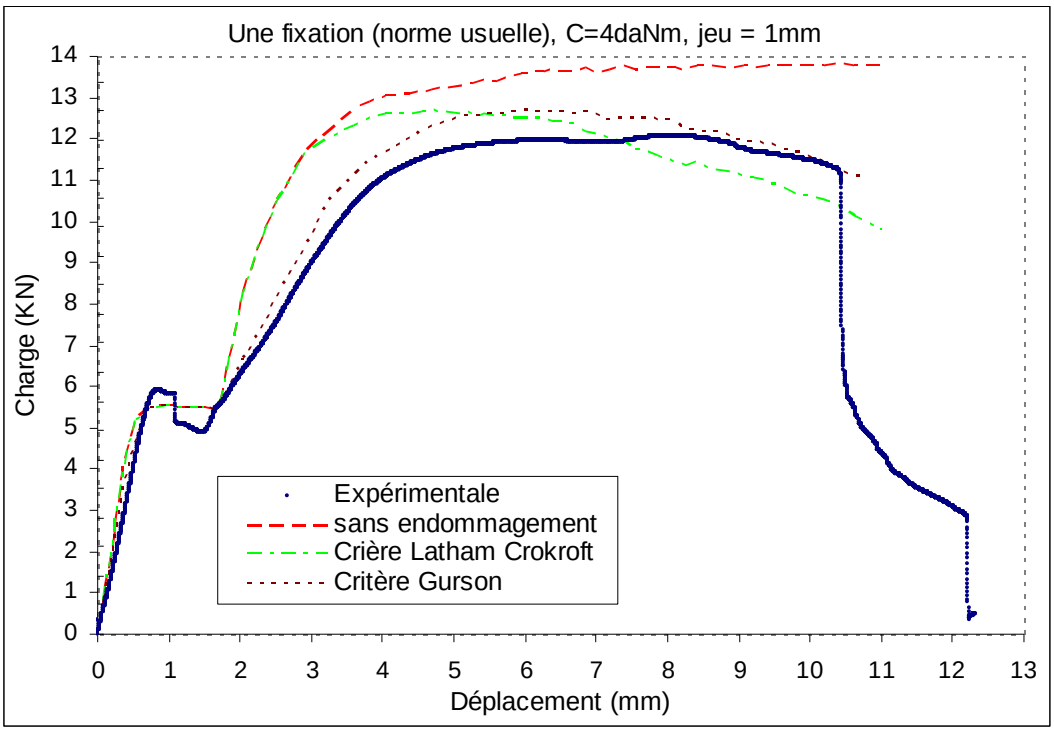


Figure IV-37. *Confrontation des résultats numériques avec les données expérimentales.*

Conclusions générales

A l'issue de notre travail réalisé dans le cadre de cette thèse, qui porte sur l'étude de la rupture et l'endommagement d'un assemblage boulonné constitué de tôles minces d'épaisseur e=2 mm, en alliage d'aluminium 6082 T6, nous pouvons tirer les conclusions principales suivantes :

(i) Sur le plan de l'approche expérimentale :

- Le couplage de la technique d'émission acoustique (EA) et la mesure des champs par caméra à corrélation d'images digitales (CID) a permis de mettre en évidence les différentes phases décrivant le comportement mécanique global d'un assemblage boulonné. Globalement, on peut distinguer sept phases essentielles :

  - phase élastique du matériau, décrite par une portion linéaire décrivant la flexibilité de l'assemblage,
  - phase décrivant à la fois un allongement et un déplacement relatif dû au glissement des tôles correspondant au jeu alésage/boulon,
  - phase de matage et d'adaptation où le corps du boulon agit directement sur les bords des substrats,
  - phase élastique de la structure combinant à la fois une traction avec une flexion secondaire de l'assemblage,
  - phase de la plastification autour des alésages des substrats, conduisant à la naissance de fissures au bord du trou sous la tête du boulon,
  - phase de la propagation stable de fissure où la fissure progresse jusqu'à atteindre une longueur critique,
  - phase de la propagation instable de la fissure conduisant à la rupture brutale de l'assemblage.

- Le couple de serrage exercé sur les boulons tend à allonger la phase élastique mais influe très peu sur le comportement mécanique global d'un assemblage boulonné sollicité en traction-cisaillement. De même, le jeu fonctionnel entre l'alésage et le corps du boulon se traduit par un glissement entre les substrats qui est observable seulement à la fin de la phase élastique.

- Les modes de rupture dépendent des effets du bord, décrits par les rapports E/D et W/D (D diamètre du trou, W largeur des plaques et E distance entre l'axe du trou et le bord libre du substrat). En effet, on peut noter que la diminution du rapport E/D favorise une rupture en cisaillement tandis que la diminution du rapport W/D favorise une rupture en

traction ou une rupture mixte. L'augmentation de ces deux rapports tend à diminuer la flexion secondaire.

(ii) Sur le plan de la simulation numérique :

- La simulation numérique a été effectuée en 3D afin de décrire au mieux le comportement réel d'un assemblage boulonné à simple recouvrement sollicité en traction-cisaillement (substrats, boulon, écrou et rondelle). Toutes les conditions de contact ont été introduites.

- Le couple de serrage a été correctement introduit par l'application d'une compression locale sur le substrat et par une traction du boulon, ce qui permet d'introduire les précontraintes dans les substrats. La valeur du coefficient de frottement μ est ajusté correctement permettant de mieux décrire la fin du domaine élastique.

- La simulation numérique basée sur un modèle élastoplastique permet seulement de décrire la phase élastique du comportement de l'assemblage boulonné. L'endommagement provoqué par la flexion secondaire ainsi que la phase de rupture n'est pas correctement décrite.

- L'utilisation d'un modèle découplé basé sur l'énergie, modèle de Latham et Cockroft, apporte quelques améliorations par rapport au modèle élastoplastique mais il ne génère la phase d'endommagement qu'à partir du début de la plasticité. Ceci limite considérablement ses apports.

- La prise en compte de l'endommagement par le modèle de Gurson modifié (modèle GTN) apporte une nette amélioration au niveau de la simulation numérique puisque l'endommagement est pris en compte à partir du début du phénomène de la flexion secondaire. Cette modélisation a permis une description correcte des différentes phases se produisant au cours du comportement mécanique global d'un assemblage boulonné. Ce qui est intéressant pour la prédiction de la tenue mécanique de telles structures.

Perspectives

Sur la plan expérimental :

- Cette étude a porté sur la tenue mécanique sous sollicitations monotones, il convient de la compléter en abordant le comportement des assemblages boulonnés soumis à des chargements cycliques multiaxiaux en vue de prédire de la durée de vie de telles structures.
- Ce travail a été basé sur le couplage entre deux techniques expérimentales : système d'émission acoustique et la technique du CID. Il serait intéressant d'affiner davantage la complémentarité entre ses deux techniques pour mieux évaluer et suivre le processus d'endommagement aussi bien sous sollicitations monotones que cycliques.

Sur le plan numérique :

- La simulation numérique utilisant le modèle couplé d'endommagement de Gurson modifié (GTN) fait intervenir plusieurs paramètres (paramètres matériaux : f_0, f_n, ε_n, f_c et f_F – paramètres constitutifs : q_1, q_2 et q_3). Ceci ne facilite pas la maîtrise du jeu optimal des paramètres. Une optimisation des paramètres permettrait une utilisation plus aisée de ce type de modèle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ALI07] Mohamad ALI, Bernard LORRAIN, Bernard PUEL, Moussa KARAMA
Etude du comportement d'une liaison mécanique par éléments de fixation
Materials and Design 29 ,2008, pp 1159-1169.

[ALK05] ALKATAN Feras
Modélisation des raideurs des assemblages par éléments filetés précontraints
Thèse N° 809, INSA de Toulouse France, décembre 2005,

[BAR73] BARROIS W.
Calcul en fatigue des éclisses et des bandes de renfort
1973, Note DEP/TA/B N° 132, AEROSPATIALE, Paris, non publié

[BOE] BOEING
Unpublished reports of the Boeing Corporation, Renton, WA

[CHA08] T.N. Chakherlou, R.H. Oskouei, J. Vogwell ,
Experimental and numerical investigation of the effect of clamping force on the fatigue behavior of bolted plates
Engineering Failure Analysis 15 (2008) 563–574

[CHA09_1] T.N. Chakherlou, B. Abazadeh, J. Vogwell,
The effect of bolt clamping force on the fracture strength and the stress intensity factor of a plate containing a fastener hole with edge cracks
Engineering Failure Analysis, Volume 16, Issue 1, January 2009, Pages 242-253

[CHA09_2] T.N. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell,
Experimental and numerical investigations into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints
Engineering Failure Analysis, In Press, Corrected Proof, January 2009.

[COM68] Mc COMBS, W.F, Mc QUEEN, J.C, PERRY, J.L.
Analytical design methods for aircrafts structural joints
January 1968. AFFDL-TR-67-184, Air Force Flight Dynamic Laboratory Wright – Parrerson Air Force Base, Ohio.

[COP00] D.A. COPE, T.E. LACY
Stress intensity determination in lap joints with mechanical fasteners
2000, Proceedings of 41 st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2000-1368, 3-6 avril 2000, Atlanta, GA.

[CRO05] A.D. CROCOMBE, R. WANG, G. RICHARDSON, C.I. UNDERWOOD
Estimating the energy dissipated in a bolted spacecraft at resonance
2006, Computers&Structures, 84, pp 340-350

[ESQ05] ESQUILLOR J., HUET J., LACHAUD F.,
Modélisation par éléments finis d'un assemblage aéronautique en simple cisaillement
2005, XVII Congès Français de Mécanique, Troyes

[GOR90] GORE
Essais sur panneaux raidis à raidisseurs rivés
1990, Marché STPA, AEROSPATIALE, Rapport d'études N°51132

[GUI05] GUILLOT Jean
Modélisation et calcul des assemblages vissés
2005, Techniques de l'Ingénieur, BM5 560, pp 1-20.

[HUE95] J. HUET
Du calcul des assemblages par boulons ou rivets travaillant en cisaillement
1995, AEROSPATIALE Aéronautique CO/Airbus, C.C. Technique

[HUT86] H. HUT
Influence of the fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiple-row joints
1986, Fatigue In mechanical fastened composite and metallic joints, ASTM STP 927, John M. Potter, Ed., Philadelphia, PA, pp221-250

[KHA05] U.A. KHASHABA, H.E.M. SALLAM, A.E. AL-SHORBAGY, M.A. SEIF
Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures
2005, Composite structures 73, pp310-317

[KOF99] K. KOFFI
Etude numérique et expérimentale des éclissages de structures aéronautiques soumis à des chargements de traction et de flexion
1999, Thèse de doctorta, INSA, Toulouse.

[LAN99] Bertrand Langrand, Éric Deletombe a, Éric Markiewicz b, Pascal Drazétic,
Numerical approach for assessment of dynamic strength for riveted joints
1999**,** Aerosp. Sci. Technol. 3 431–446.

[LAN00] Langrand B., Deletpmbe E., Markiewicz E., Drazétic P.
Identification of non linear dynamic behaviour and failure for riveted joint assembly
Shock and vibration 7, 2000, pp. 121-138.

[LAN05] Langrand B
Comportement et modélisation des assemblages ponctuels
2005, Techniques de l'Ingénieur, BM 7 805, pp1-16

[MCC05] C.T. Mc CARTHY, M.A. Mc CARTHY
Three-dimentional finite element analysis of single-bolt, single lap composite bolted joints : part II effects of bolt-clearance
2005, Composite Structures 71, pp159-175

[MIN06] MINGUEZ J.M., VOGWELL J.
Effect of torque tightening on the fatigue strngh of bolted joint
décembre 2006, Engineering failure analysis, Vol 13, issue 8, pp 1410-1421

[MUZ05] MUZEAU J.P.
Constructions métalliques, Assemblages par procédés mécaniques
2005, Techniques de l'Ingénieur, C2 521, pp 1-22

[NEW45] NEWTON, R.E
Electrical analogy for shear lag problems
1945, Soc. Exp. Stress Analysis, Vol II, N°2, pp71-80

[NIU88] M.C-Y. NIU
Airframe structural design
LOCKEED AERONAUTICAL SYSTEMS Co., 1988, Burbanks, Los Angeles/Hong Kong, Technical Book, CO./conmilit press, Ltd, Fracture analysis.

[NIU93] M.C-Y. NIU
Airframe structural design
LOCKEED AERONAUTICAL SYSTEMS Co., 19893, conmilit press, Ltd, Hong-Kong

[NOR] NORMALISATION
Calcul de liaison vissée selon la norme NF 25-030

[PAR06] E. PAROISSIEN
Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés)
Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2006.

[SEN08] SEN Faruk, PARDIL Murat, SAYMAN Onur, BENLI Semih
Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload
Materials and Design, 29 (2008) 1159-1169.

[SWI71] T. SWIFT
Development of the-fail safe design features of the DC-10
Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, 1971, American Society for Testing and Materials, pp. 164-214

[SWI84] T. SWIFT
Fracture analysis of stiffened structure
Damage Tolerance of Metallic Structures : analysis methods and application

ASTM STP 842, 1984, J.B. Chang & J.L. Rudd, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 69-107

[TAT46] M.B TATE , S.J. ROSENFIELD
Preliminary investigation of the loads carried by individual bolted joints
NACA, TN N°1051, Washington, DC 1946.

[TAT47] M.B TATE , S.J. ROSENFIELD
Analytical and experimental investigation of bolted joints
NACA, TN N°1458, Washington, DC 1947

[THE40] P.S THEOCARIS
The stress distribution in a strip loaded in tension by means of a central pin
1940, Journal of applied mechanics, pp 85-90

[VOG44] F.VOGT
The load distribution in bolted or riveted joints in light-alloy structures
RAE, report No. SME 3300, Oct 1944, Royal Aircraft Establishment, Fanborough, or NACA TM 1135.

[VOL38] O. VOLKERSEN
Die Nietkraftverteilung in Zubeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten
1938, Luftfahrtforschung, Vol 15, pp41-47.

PUBLICATIONS

T. DANG HOANG, C. HERBELOT, A. IMAD, *Etude des mécanismes de rupture d'un assemblage boulonné* , 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, Août 2009.

T. DANG HOANG, C. HERBELOT, A. IMAD, *Tenue mécanique d'un assemblage boulonné : approche expérimentale*, 9ème Congrès de Mécanique, Marrakech, Maroc, Avril 2009.

T. DANG HOANG, C. HERBELOT, A. IMAD, *Study of damage mechanisms of a bolted joint: coupling acoustic emission and digital images correlation technique*, Symposium International, Technology Innovation and Transport Systems ITT'09, ENSTA, France, Octobre 2009.

T. DANG HOANG, C. HERBELOT, A. IMAD, *Mechanical behaviour of a bolted structure : experimental investigation and finite element analysis*, article soumis au journal Materials & Design, 2009.

ANNEXES

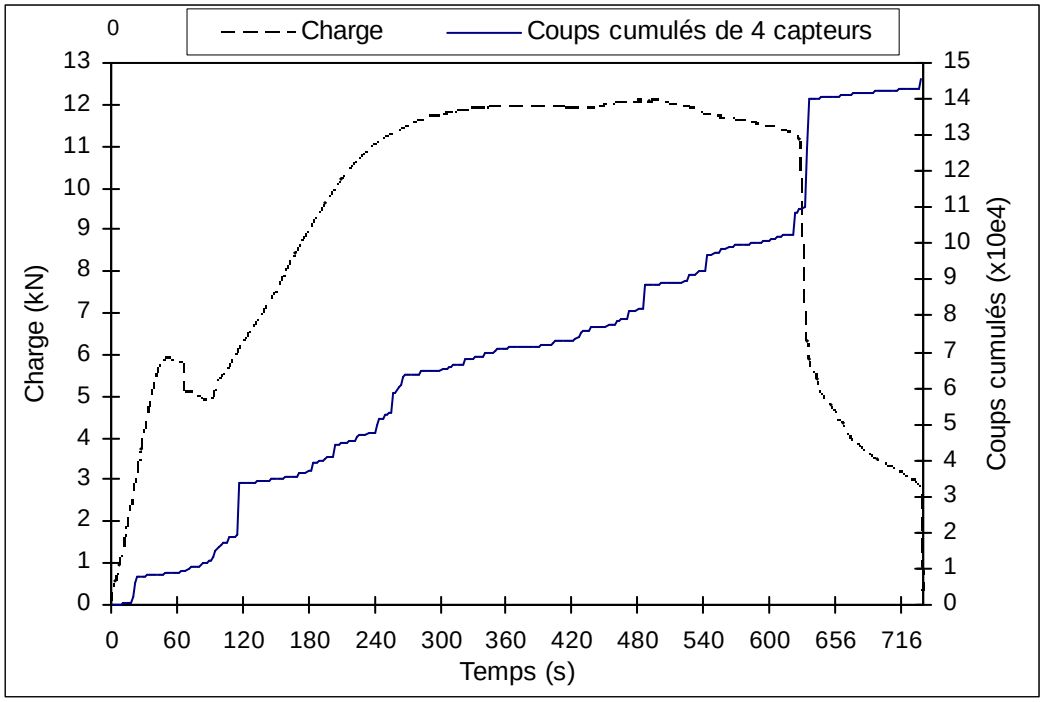


Figure A-1. *Coups cumulés et charge en fonction du temps*

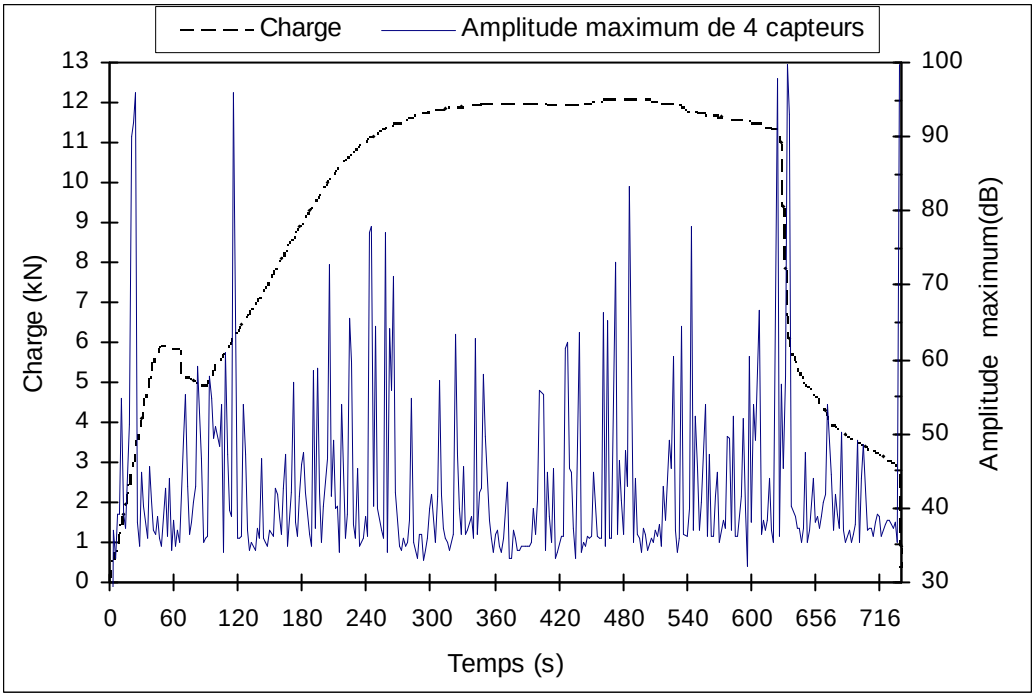


Figure A-2. *Amplitude maximale et charge en fonction du temps*

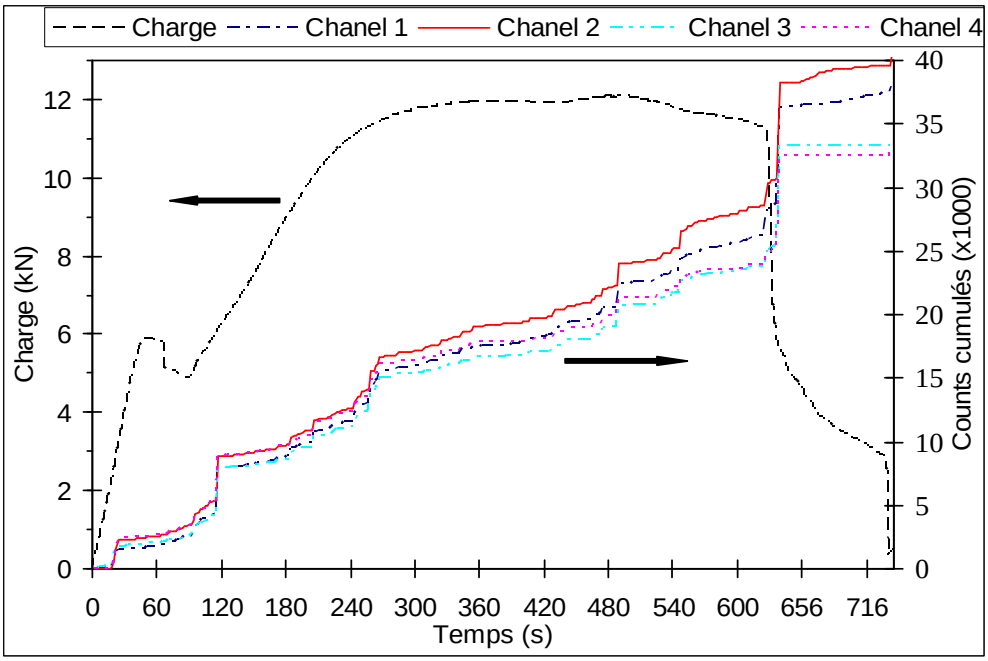


Figure A-3. *Coups cumulés et paramétrique charge en fonction du temps*

Résumé Ce travail porte sur l'étude de la rupture et de l'endommagement d'un assemblage boulonné constitué de tôles minces en alliage d'aluminium 6082 T6, d'épaisseur e=2 mm, en simple recouvrement. Plusieurs configurations d'assemblages (nombre et disposition des fixations) sont étudiées dans le cas de sollicitations monotones, en analysant les effets de bord. L'influence du couple de serrage et du jeu fonctionnel sera pris en compte pour l'étude du comportement global de la liaison. Une approche expérimentale a été mise en œuvre pour analyser la chronologie des mécanismes d'endommagement en utilisant simultanément la technique d'émission acoustique (EA) et la mesure des champs par corrélation d'images digitales (CID). La technique EA a permis de suivre les évolutions des activités acoustiques avec une technique de localisation planaire en permettant de mieux cerner l'amorçage et la propagation des fissures. La technique CID confirme les scénarios d'endommagement en évaluant le champ des déformations en tout point au voisinage de la fixation. La simulation numérique par éléments finis a été utilisée afin de prédire le comportement global de ces assemblages. Les calculs sont réalisés en 3D en utilisant des éléments solides et des éléments coques et sont entrepris aussi bien en élastoplasticité sans endommagement qu'avec endommagement. La prédiction de l'endommagement a été correctement réalisée en utilisant deux modélisations : une modélisation découplée selon le modèle de Latham et Cockroft et une modélisation couplée basée sur le modèle de Gurson modifié.

Mots clefs

assemblage boulonné – comportement mécanique – mécanismes d'endommagement – approche expérimentale – simulation numérique – émission acoustique – corrélation d'images digitales - modélisation

Abstract This study focuses on the study of fracture and damage of a bolted assembly made up of thin sheets of aluminum alloy 6082 T6, thickness e= 2 millimeters, in single recovery. Several configurations of assemblies (number and arrangement of fasteners) are studied in monotonous solicitations, analyzing the effects of board. The influence of torque and clearance will be considered for the study of the behavior of the link. An experimental approach was implemented to analyze the sequence of damage mechanisms simultaneously using the technique of acoustic emission (AE) and measurement of fields by digital image correlation (DIC). EA Technology has tracked the evolution of acoustic activities by planar localization to better identify the initiation and propagation of cracks. The DIC technique confirms the damage scenarios evaluating, the deformation field at any point near the fastener. The finite element technique was used to predict the overall behavior of these assemblies. The calculations are performed in a 3D computer code using solid elements, shell elements and and are undertaken both in élastoplasticité without and with damage. The prediction of damage has been done using two models : modeling decoupled depending on the model of Latham and Cockroft and coupled modeling based on the model of Gurson modified.

Keys words

bolted assembly – mechanical behavior – mechanisms of damage – experimental approach – numerical simulation – acoustic emission – digital image correlation – medeling