

Assemblage de tôles minces par clinchage en construction métallique

Modélisation numérique et analytique du comportement

Par **Carlo PIETRAPERTOSA**

Fonction : Ingénieur de recherche à l'Université de Liège

Anne Marie HABRAKEN

Fonction : Maître de recherches du F.N.R.S

Jean-Pierre JASPART

Fonction : Directeur de recherches du F.N.R.S – Professeur adjoint à l'Université de Liège

Introduction

Le clinchage est une technique d'assemblage mécanique de tôles métalliques. Le principe de base est de connecter deux tôles métalliques par emboutissage entre un poinçon et une matrice. La tôle subit localement une déformation plastique à froid, formant un point de connexion. Le formage à froid est utilisé comme technique d'assemblage.

Dans le cadre d'un large projet européen sur les systèmes d'assemblage pour la production automatisée d'éléments en acier standards pour la construction, le clinchage a été étudié à l'Université de Liège : des modèles numériques simulant le processus de clinchage ont été développés et une étude approfondie sur le comportement d'un point clinché soumis à un effort de cisaillement a été réalisée. A cet égard, des essais de cisaillement sur assemblages simples, avec seulement un ou deux points clinchés, ont été effectués et reproduits numériquement grâce au logiciel de calcul par éléments finis LAGAMINE [1]. Sur base des conclusions de ces études, un modèle analytique de résistance d'un point clinché soumis à cisaillement a été développé.

Des essais, modèles numériques et développements analytiques ont également été réalisés pour des assemblages clinchés complets soumis au cisaillement et/ou à la flexion. Un des objectifs de la recherche est en effet de développer des formules permettant d'estimer rapidement la résistance et la rigidité d'assemblages clinchés.

Tout assemblage de construction est constitué de une ou plusieurs composantes (boulons en traction, semelle de poutre comprimée, etc.). Pour évaluer le comportement de l'assemblage, la méthode des composantes [2] recommande d'isoler chaque composante et d'étudier son comportement séparément. Pour des assemblages simples, la résistance de correspond à celle de la composante la plus faible. Cette méthode dite « des composantes » a été adoptée dans les Eurocodes en constructions métallique et mixte. Elle peut être appliquée aux assemblages clinchés. Dans ces assemblages, une seule composante est identifiée : le point clinché soumis à cisaillement (on la nommera « clinch » par la suite). L'analyse du comportement d'un clinch est donc primordiale pour déterminer le comportement d'un assemblage complet à clinches multiples.

Le présent article est consacré à l'étude du comportement de la composante « clinch en cisaillement ». Les aspects expérimentaux, numériques et analytiques de

la recherche y sont présentés. D'abord, une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est réalisée dans le but de valider les modèles. Grâce aux essais et simulations numériques, une série de paramètres sont identifiés et les modes de ruine sont analysés. Tous ces éléments sont enfin utilisés pour développer une formulation analytique de la résistance de la composante « clinch en cisaillement ».

1 Description technique

1.1 Définition du clinchage

Le clinchage est une méthode d'assemblage de tôles minces. Les tôles sont déformées localement pour être solidarisées, sans un élément additionnel tel que colle ou connecteur mécanique. Le clinchage est une méthode d'assemblage intéressante car il peut être utilisé pour assembler des tôles de matériaux et d'épaisseurs différentes. Un autre avantage est que l'assemblage est réalisé sans source de chaleur et demande donc moins d'énergie. La méthode peut, si elle est bien maîtrisée, remplacer le soudage par point.

Il existe deux types de clinchage : un clinchage réalisé avec un poinçon circulaire, le clinch étant réalisé uniquement par déformation plastique (figure 1) et un clinchage rectangulaire avec une incision locale (figure 2). L'étude rapportée dans cet article ne traite que du clinch circulaire sans incision. Le clinchage peut être réalisé aussi bien à l'atelier que sur chantier.

1.2 Procédés de clinchage

L'outillage de clinchage est constitué d'une matrice et d'un poinçon montés sur une machine de type presse. Le procédé de clinchage et un point clinché avec ses différents paramètres géométriques sont présentés aux figures 1 et 2, respectivement pour le type circulaire sans incision et le type rectangulaire avec incision.

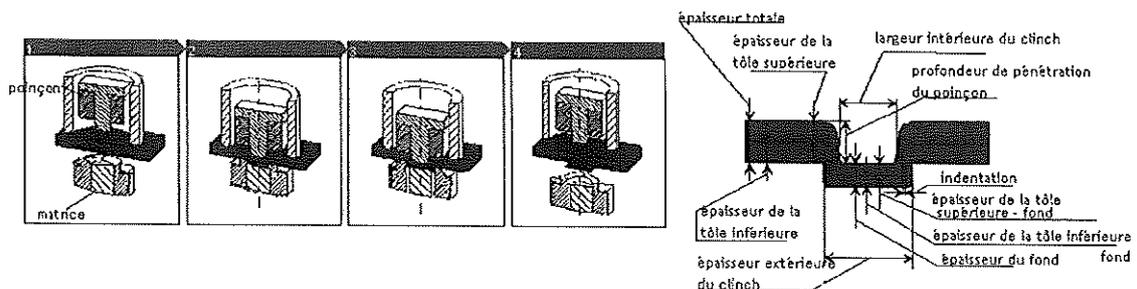


Figure 1 - Clinch circulaire sans incision

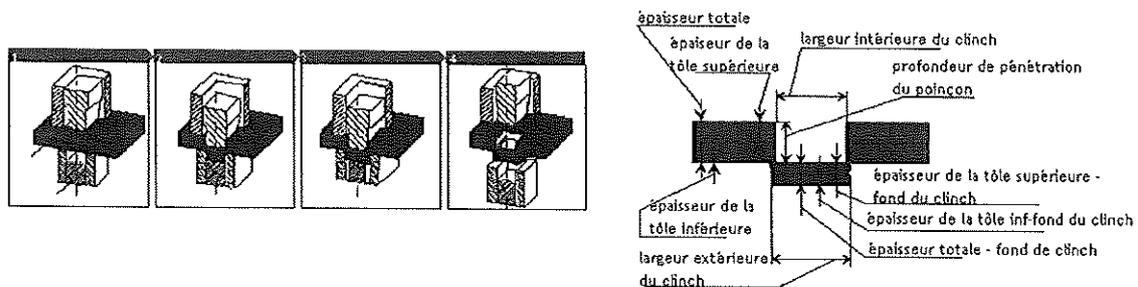


Figure 2 - Clinch rectangulaire avec incision

L'épaisseur des tôles pouvant être assemblées par clinchage varie entre 0,2 et 4mm. Les deux tôles ne doivent pas nécessairement être de même épaisseur. La force nécessaire pour effectuer un assemblage par clinchage dépend du matériau et de la taille de l'outillage ; pratiquement, elle varie entre 10 et 100kN. Une micrographie d'un clinch circulaire est présentée à la figure 3.

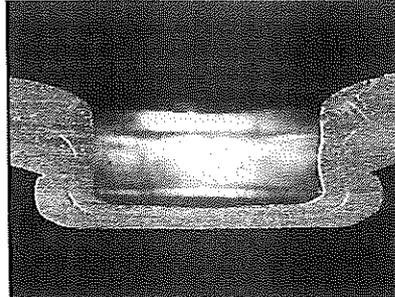


Figure 3 - Micrographie d'un clinch circulaire

1.3 Exemples d'utilisation en construction

En construction, avec le développement progressif de la maison uni-familiale en acier, la technique d'assemblage par clinchage est promise à un bel avenir. En effet, ces maisons en acier sont fabriquées avec des éléments en parois minces. Le clinchage convient donc parfaitement à l'assemblage de ces éléments. Les figures 4 et 5 présentent quelques exemples d'assemblages par clinchage dans des éléments de maisons uni-familiales.

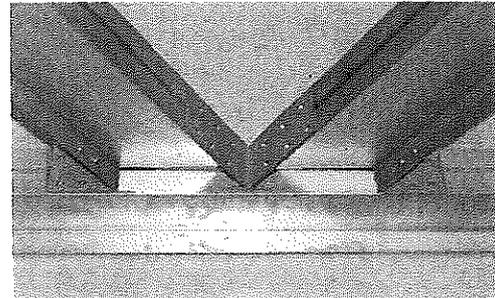
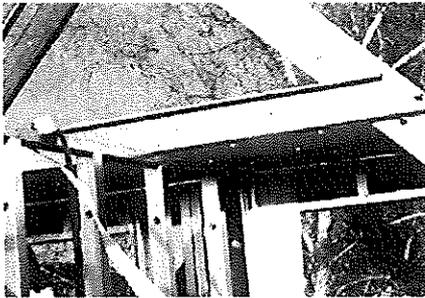


Figure 4 - Éléments de charpente et de parois minces assemblés par clinchage

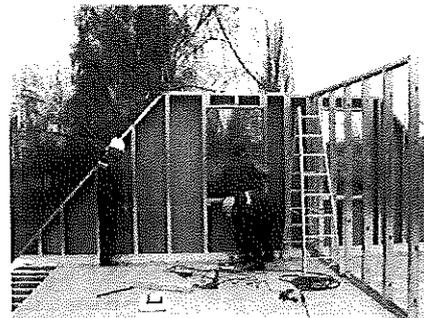
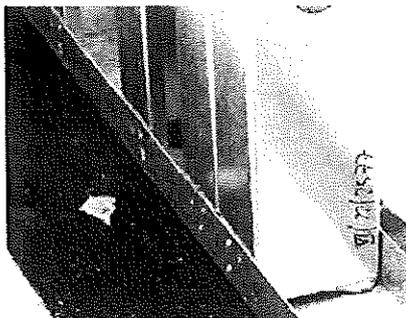


Figure 5 - Éléments de parois pour maisons uni-familiales assemblés par clinchage

2 Essais expérimentaux

Une phase expérimentale est souvent nécessaire lorsqu'un phénomène physique doit être modélisé. L'expérimentation permet en effet d'avoir une vision réaliste du phénomène étudié, ce qui est primordial pour une modélisation correcte.

2.1 But des essais

Le principal objectif des essais est la mise au point d'un outil numérique permettant de simuler comportement jusqu'à la ruine d'un clinch soumis à cisaillement. Dans cette optique, les essais ont été minutieusement instrumentés, réduisant ainsi le nombre d'hypothèses à formuler dans le travail numérique. Par ailleurs, grâce à ces essais, l'influence de certains paramètres régissant la réponse de l'assemblage a pu être mise en évidence. Enfin, l'observation des modes de ruine et l'analyse des courbes charge-déplacement a permis de se faire une première idée sur le comportement de la composante étudiée.

2.2 Description de la phase expérimentale

Une campagne de trente-deux essais a été menée au laboratoire M&S de l'Université de Liège. Les éprouvettes d'essais ont été réalisées avec deux outils de clinchage différents : une machine de laboratoire et un outil de chantier. Pour obtenir, dès la phase expérimentale, des informations sur l'influence de paramètres importants, deux épaisseurs différentes, deux nuances d'acier différentes et quatre configurations géométriques différentes (avec 1 ou 2 points clinchés) ont été choisies pour réaliser les éprouvettes.

Le dispositif d'essai est illustré à la figure 6. Les éprouvettes sont fixées entre deux pinces et soumises à une force de traction qui cisaille le clinch. Le chargement est effectué en déplacement contrôlé. Les éprouvettes sont d'abord chargées légèrement, puis déchargées, avant que l'essai ne soit mené à son terme ; cela permet d'éliminer tout phénomène parasite (mise en place de l'éprouvette, etc...).

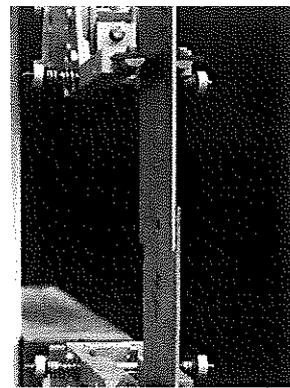
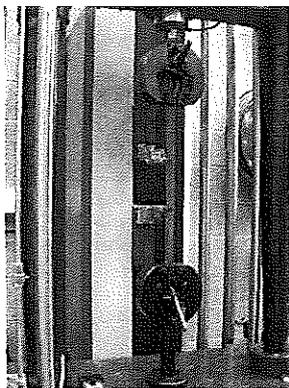


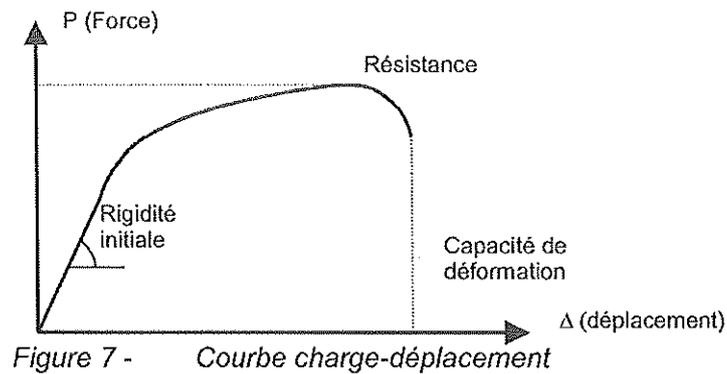
Figure 6 - Dispositif expérimental

2.3 Résultats des essais et conclusions

Les deux informations principales fournies par ces essais sont la courbe charge-déplacement de la composante « clinch en cisaillement » et son mode de ruine.

2.3.1 Courbes charge-déplacement

Chaque essai fournit une courbe charge-déplacement telle que représentée à la figure 7. Les trois principales caractéristiques d'un assemblage peuvent être estimées à partir de ce type de courbe : la rigidité initiale, la résistance et la capacité de déformation.



Ces caractéristiques sont analysées en fonction des différents paramètres (épaisseurs des tôles, géométrie du clinch, nuance d'acier, etc.). Mais le nombre limité d'essais ne permet pas de tirer des conclusions définitives quant au comportement de la composante. C'est pourquoi le développement de modèles numériques pour effectuer une étude paramétrique est essentiel. Les courbes d'essais sont principalement utilisées pour calibrer et valider les modèles numériques.

2.3.2 Modes de ruine

Les essais permettent également de détecter les différents modes de ruine. Le mode de ruine influence évidemment le comportement de la composante, tant au niveau de sa résistance qu'au niveau de sa ductilité (certains modes de ruine sont plus fragiles que d'autres). Lors de ces essais, trois modes de ruine différents ont été observés :

- Déboîtement des tôles sans rupture (figure 8.a)
- cisaillement partiel de la partie supérieure du clinch suivie du déboîtement des tôles (figure 8.b)
- plein cisaillement de la partie supérieure, avec déformation importante de la partie du clinch restant dans la cavité de la tôle inférieure (figure 8.c)



Figure 8 - Modes de ruines

Ces modes de ruines dépendent de la configuration de l'éprouvette (simple ou double clinch, épaisseur de tôle, etc....).

3 Etude numérique

L'objectif final de l'étude numérique est de simuler l'essai de cisaillement d'un point clinché ; l'outil numérique, après validation, peut être alors utilisé pour analyser le comportement mécanique de la composante « clinch en cisaillement ». Toutes les informations obtenues grâce aux simulations numériques sont ensuite utilisées pour le développement des modèles analytiques.

3.1 Procédure de modélisation

Pour simuler numériquement l'essai en cisaillement, une série de données sont nécessaires, telle la géométrie réelle du clinch, les contraintes résiduelles et les déformations dues au clinchage lui-même. Pour avoir une bonne estimation de ces paramètres, qui sont difficilement mesurables sur une éprouvette, une solution est de simuler numériquement le procédé de clinchage. La stratégie qui a été suivie pour l'étude numérique est la suivante:

1. La première étape consiste à simuler le procédé de clinchage. Un modèle axisymétrique est considéré (figure 9). Le but est d'obtenir la forme géométrique réelle du clinch et de pouvoir prendre en compte les contraintes et déformations engendrées par l'emboutissage de l'acier.

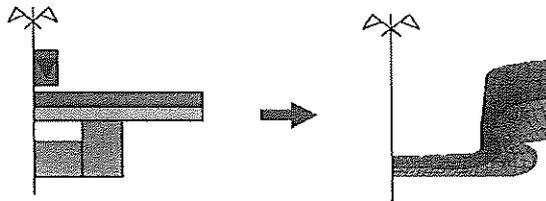


Figure 9 - Simulation du procédé de clinchage

2. L'étape suivante consiste à récupérer les résultats de la simulation précédente (géométrie, état de contrainte et déformations) et les introduire dans un modèle 3D pour la simulation de l'essai de cisaillement. Cela implique d'étendre les résultats obtenus pour un modèle 2D axisymétrique à un maillage 3D (figure 10).

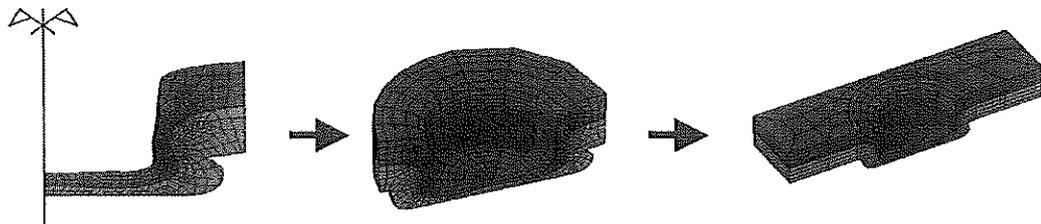


Figure 10 - Maillage de l'éprouvette d'essai

3. Une fois que le maillage 3D de l'éprouvette est réalisé, l'étape finale consiste à simuler le cisaillement du clinch. Cette ultime étape fournit le comportement de la composante via la courbe P- Δ et une série d'autres informations concernant les déformations, les déplacements et la distribution de contraintes dans le clinch (figure 11).

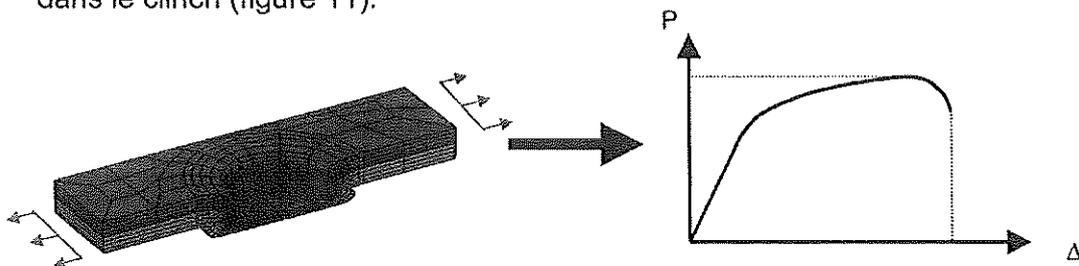


Figure 11 - Simulation de l'essai de cisaillement

Toutes les étapes de l'étude numérique sont réalisées avec le logiciel

d'éléments finis LAGAMINE. Les propriétés mécaniques réelles de l'acier (mesurée en laboratoire) ainsi que la géométrie réelle des éprouvettes ont été introduites dans les modèles. Comme le montre la figure 11, le maillage a été densifié à l'endroit où les deux tôles sont en contact dans le clinch.

3.1.1 Simulation du procédé de clinchage

Le but de cette étape est de simuler le procédé de clinchage pour obtenir une forme de clinch réelle (figures 3 et 9). Plusieurs difficultés sont apparues lors de cette étape. La matrice est divisée en deux demi-cercles et lorsque le poinçon pénètre dans la matrice, celle-ci s'ouvre (figure 12). En réalité, le mouvement latéral des demi-matrices n'est pas totalement libre mais régi par un ressort.

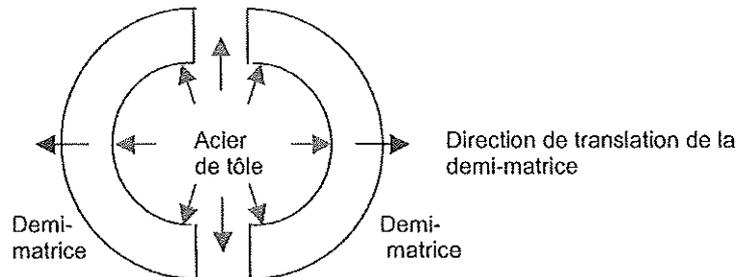


Figure 12 - Mouvement latéral des demi-matrices

Cette restriction au mouvement latéral doit pouvoir être évaluée et modélisée par un ressort extensionnel dans le modèle numérique. Mais la raideur de ce ressort est très compliquée à évaluer. Après de nombreuses tentatives, les résultats de cette simulation ne se sont pas révélés satisfaisants, les résultats étant trop éloignés de la réalité. Finalement, un maillage 3D a directement été créé à partir des micrographies du clinch (figure 3).

3.1.2 Réalisation du maillage 3D.

Pour réaliser le modèle 3D, un maillage 2D correspondant à la géométrie réelle de la section du clinch est réalisé à partir des micrographies (figure 13). Cette méthode néglige les contraintes et déformations résiduelles issues du procédé de clinchage.

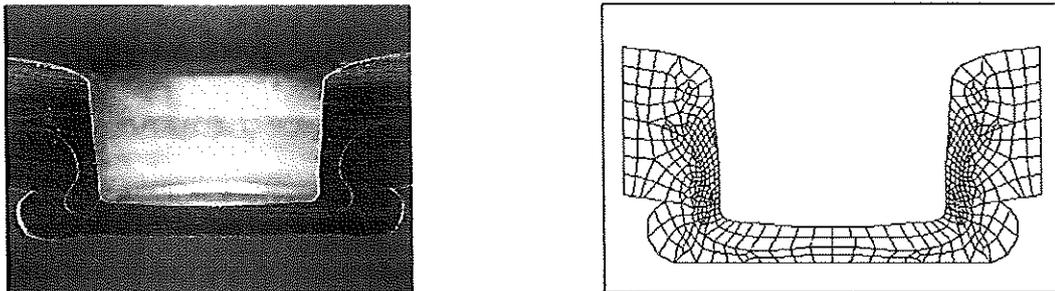


Figure 13 - Maillage 2D du clinch

Ce maillage est ensuite étendu en trois dimensions (figure 10) et ce en deux étapes. La densité d'éléments à considérer n'est pas la même partout : la zone où se développent les forces de contact en cours de cisaillement requiert une densité accrue d'éléments (figures 11 et 15).

Par raison de symétrie, seule la moitié de l'éprouvette a été modélisée. Des éléments solides 3D à grande déformation sont utilisés (éléments JET3D de

LAGAMINE [3]). Les éléments de contact mécanique CFI3D [4] sont utilisés dans les zones où les deux tôles sont en contact. Une loi de frottement de Coulomb est associée à cet élément. Pour réaliser ce modèle, 3936 éléments solides JET 3D et 396 éléments de contact ont été nécessaires. Un déplacement de 1mm est imposé une extrémité de l'éprouvette, à la tôle inférieure; à l'autre extrémité, les nœuds de la tôle supérieure sont bloqués selon les trois degrés de liberté (chargement dans le plan).

3.2 Validation de l'outil numérique

Les résultats des simulations devraient idéalement correspondre aux résultats expérimentaux.

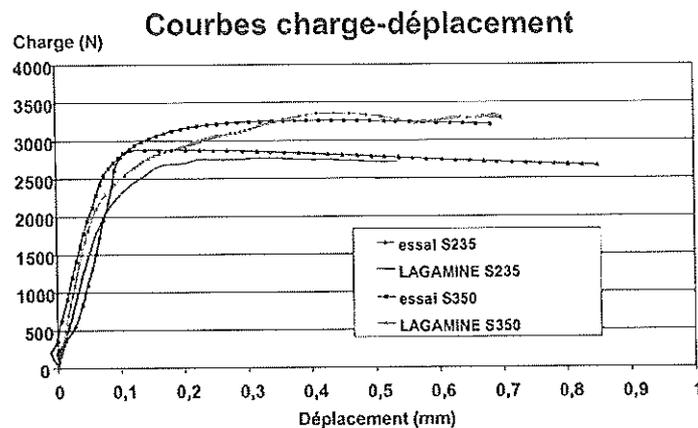


Figure 14 - Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

La figure 14 présente la comparaison des courbes P- Δ expérimentales et numériques pour deux essais différents. Les courbes présentées correspondent à des clinches réalisés avec des tôles de 1,5mm d'épaisseur et des nuances d'acier différentes : S235 et S355. Les courbes présentées à la figure 14 montrent que les simulations numériques donnent des résultats proches de ceux des essais. Le modèle numérique adopté est ainsi validé.

3.3 Etude du comportement par voie numérique

Les courbes de comportement représentées à la figure 14 représentent le comportement réel de la composante « clinch en cisaillement ». La formulation analytique du comportement réel est très complexe car un nombre important de paramètres entrent en jeu. Quelques hypothèses simplificatrices doivent impérativement être formulées pour le développement d'un modèle analytique. Ce modèle de base pourra par la suite être amélioré afin de se rapprocher du comportement réel.

Les deux principaux modes de ruine sont le déboîtement du clinch et son cisaillement complet. Les autres modes de ruine ne sont qu'une combinaison des deux précédents. Dans un assemblage multi-clinches complet, une série de contraintes empêchent le mode de ruine par déboîtement de se produire. Il apparaît principalement dans les essais à un seul clinch où la déformation de l'assemblage a tendance à faire naître des effets de traction transversale dans le clinch (excentricité des efforts appliqués à la tôle au niveau de l'assemblage). D'un point de vue pratique, le mode de ruine par cisaillement revêt donc davantage d'intérêt. A cette fin, lors de la simulation numérique, tout déplacement perpendiculaire à la direction

de chargement est bloqué, empêchant ainsi le mode de ruine par déboîtement d'apparaître. La figure 15 illustre le comportement réel du clinch et le comportement « imposé » en cisaillement pur. Ce nouveau modèle permet d'étudier le mode de ruine rencontré en pratique. Les résultats du calcul numérique montre que les contraintes à la ruine sont exclusivement des contraintes de cisaillement et qu'il s'agit d'une ruine plastique. Ils permettent aussi de localiser la section critique du clinch dans laquelle se produit la ruine. Les simulations montrent que, dans cette section, il y a une distribution uniforme de contraintes de cisaillement dont la valeur est égale à $\sqrt{3}$ * la limite ultime de l'acier. La section cisailée peut également être identifiée. Ces dernières informations obtenues grâce aux modèles numériques sont à la base du modèle analytique.

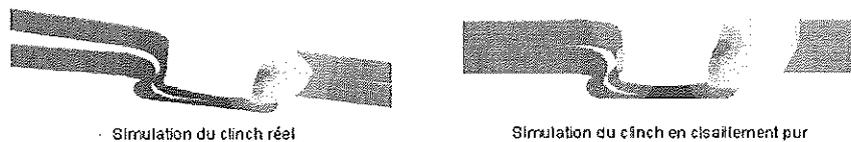


Figure 15 - Simulations numériques du clinch - coupes

4 Développements analytiques

La formulation analytique de la résistance du clinch en cisaillement est l'étape ultime de la recherche. Le modèle théorique est basé sur les hypothèses suivantes :

- le clinch est soumis au cisaillement pur, sans autre phénomène parasite.
- la ruine se produit dans la partie du clinch formé par la tôle supérieure dans la section définie par h_{cr} (figure 16).
- la partie du clinch formé par la tôle inférieure est considérée comme totalement rigide.

Ces hypothèses ont été validées par les simulations numériques.

Sur base de ces hypothèses, un modèle analytique de résistance en cisaillement peut être établi (formule 1):

$$(1) R_c = \pi t_{cr} (t_{cr} + d) \frac{f_u}{\sqrt{3}}$$

Modèle analytique de la résistance d'un clinch en cisaillement

Dans cette formule:

- f_u = résistance ultime de l'acier
- t_{cr} = l'épaisseur de la tôle supérieure déformée au niveau de la section critique h_{cr} (figure 16)
- d = diamètre intérieur du clinch, qui peut être assimilé au diamètre du poinçon.

La détermination du paramètre t_{cr} peut apparaître problématique car il doit être mesuré sur le clinch. Cependant, une base de données peut être établie par le constructeur. Ce paramètre ne dépendant que de la nuance d'acier, de l'outillage de clinchage et de l'épaisseur des tôles.

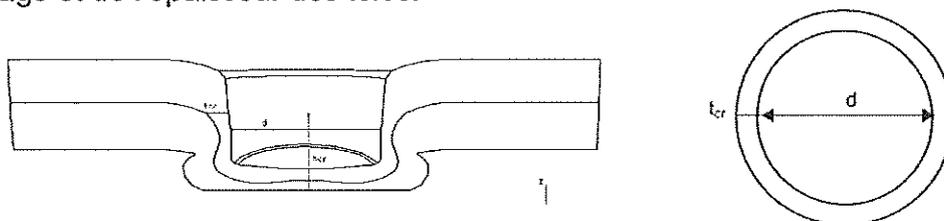


Figure 16 - Définition des paramètres

Le tableau 1 permet une comparaison entre les résultats numériques et analytiques pour différentes nuances d'acier. Ces résultats sont assez proches.

Matériaux	$R_c = \pi t_{cr}(t_{cr} + d) \frac{f_c}{\sqrt{3}}$	Simulations numériques	%
$f_y = 495\text{N/mm}^2$	3781 N	3792 N	0,3%
$f_y = 368\text{N/mm}^2$	2811 N	2960 N	5%
$f_y = 235\text{N/mm}^2$	1795 N	2000 N	10%

5 Conclusions et perspectives

Dans cet article, il a été montré que le clinchage est une technique d'assemblage qui peut être fort intéressante en construction. Mais pour que l'assemblage clinché soit adopté par les constructeurs, sa résistance doit pouvoir être évaluée de manière aisée. Cette recherche a permis de fonder les bases d'une méthode d'évaluation de la résistance des assemblages clinchés.

En effet, bien que la simulation du procédé de clinchage n'ait pas pu être menée à bien et que la stratégie de départ pour la modélisation numérique n'a pas pu être intégralement suivie, l'outil numérique développé dans le cadre de cette recherche s'avère capable de reproduire les résultats expérimentaux de manière satisfaisante. Les modèles numériques, une fois validés, ont alors permis de mettre en évidence les phénomènes physiques qui régissent le comportement de la composante étudiée. Ainsi, grâce au modèle éléments finis, un modèle analytique de cisaillement a pu être développé et validé.

Pour finaliser et valider complètement le modèle analytique, une étude paramétrique devra être réalisée à l'aide de l'outil numérique. Les hypothèses établies pour élaborer le modèle doivent être vérifiées pour un grand nombre de configurations.

Enfin, dès qu'un modèle analytique est établi pour prédire la résistance de la composante « clinch en cisaillement », il est alors assez simple de prédire la résistance d'un assemblage multi-clinches complet grâce à la méthode des composantes [2].

Bibliographie

- (1) "An automatic remeshing technique for finite element simulation of forming processes", AM. Habraken, S. Cescotto. International Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol.30, Number 8, (December 1990), 1503-1525
- (2) "Study of the semi-rigidity of beam-to-column joints and its influence on the resistance and stability of steel building", J.P. Jaspard. PhD thesis, Liège University, M&S Department.
- (3) "An Element with Hourglass Control for the Large Deformation Analysis in Three-Dimension", K.P. Li, S. Cescotto, P. Jetteur. Proc. of 3rd Int. Conf. on Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, 6-10. April 1992
- (4) "Contact between deformable solids, the fully coupled approach", A.M. Habraken, S. Cescotto. Mathematical and Computer Modelling, 28, n° 4-8, 1998
- (5) "Novel jointing systems for the automated production of light gauge steel elements", ECSC RDT Steel Research Programme, PR252. 2004