

SIMULATION NUMERIQUE DES EMBOUTIS DE LA CARROSSERIE D'UN VEHICULE SOUMIS A LA FATIGUE

O. BOUSSAID*, M. RABAHALLAH**

* Université de Annaba, Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Maintenance 23 220 Algerie

** Université de Metz, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, 57 000 France

e-mail : oboussaid@yahoo.fr

RESUME

L'aptitude des structures en service et la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau peuvent être envisagées aujourd'hui sans recourir aux procédés classiques, grâce aux puissants outils de calcul et de simulation. La simulation numérique, permet actuellement de visualiser virtuellement le comportement du matériau et entreprendre des analyses quasi quantitatives sur des modèles représentatifs de pièces réelles.

Ce travail propose une méthode de prédiction de la rupture par simulation numérique, grâce au code éléments finis Abaqus, sur des emboutis de la carrosserie des véhicules soumis à la fatigue. Cette méthode, consiste à observer au cours de la simulation l'évolution des champs des déformations et des contraintes. L'apparition d'hétérogénéités de la déformation sur les éléments de la structure maillée, montre qu'une décharge de contrainte, se produit dans les éléments situés en dehors de la localisation, au fur et à mesure qu'on se rapproche de la zone de rupture. La fiabilité de cette méthode constitue un moyen de visualisation de l'apparition de la localisation et par conséquent de la rupture sur des zones critiques, tels que le fond des godets et les coins de certains emboutis en boîte carrée. Cette méthode, qui repose sur l'analyse de l'évolution des champs de contraintes sur la structure maillée en éléments finis, montre bien qu'à l'approche de la rupture, une concentration de contrainte domine sur les éléments situés dans la zone de rupture. Le nombre d'éléments déchargés se révèle être un indicateur pertinent pour localiser la rupture. Les courbes associées fournissent un moyen pratique pour visualiser son emplacement.

1 INTRODUCTION

Les contraintes économiques actuelles conduisent, de plus en plus, les industriels à optimiser leurs fabrications pour en réduire les coûts. Dans ce contexte, les bureaux d'études concevant des produits en masse, pour lesquels un haut niveau de fiabilité est recherché, ne peuvent ignorer le dimensionnement des pièces vis à vis de leur tenue en fatigue, en particulier à grande durée de vie. Ce qui a favorisé l'utilisation de logiciels industriels permettant la simulation du comportement des structures, et permettant une prise de décision facile, d'où un gain de temps et de coût.

La fatigue, très largement rencontrée dans les différents domaines du génie mécanique (aéronautique, automobile, ferroviaire, ...), demeure un point clé du dimensionnement mécanique des structures, car elle représente une grande partie des ruptures de pièces en service. Dans le cas des sollicitations cycliques, le concepteur devra s'assurer de la résistance de la structure et surtout du maintien des fonctionnalités de la pièce après la répétition de ces sollicitations. En effet, bien que la pièce puisse être dimensionnée pour résister à un cycle de chargement, la répétition de tels cycles crée des phénomènes physiques particuliers qui altèrent sa résistance et son bon fonctionnement. Il est donc nécessaire de garantir la tenue de la pièce à la répétition de ces cycles.

La prévention de la rupture par fatigue repose sur la maîtrise de différents ingrédients, dont la connaissance du chargement, le choix du matériau, l'optimisation des formes, la concentration des contraintes, l'état de surface et la maîtrise du processus de fabrication. On assiste alors depuis quelques années, à une prédiction quantitative de la rupture, basée sur des études expérimentales et numériques. Des études ont montré l'influence des inévitables imperfections de la fabrication et les éventuelles inhomogénéités dans le matériau sur l'apparition de la rupture des structures soumises à des chargements variables cycliques ou aléatoires [1], [2], [3], [4], [5].

Statistiquement la plupart des ruptures survenues en service sont, soit des ruptures résultant d'un processus de fissuration progressive sous sollicitations cycliques, soit des déchirures fragiles [6]. Le mode de rupture de type fragile, survient quand des défauts préexistants ou créés pendant le service se manifestent (ligne d'inclusions

intermétalliques par exemple) ou de défauts de type fissure. En régime plastique, la fatigue apparaît plus rapidement; on la qualifie alors de fatigue à faible nombre de cycles. Les ruptures ductiles agissent sans prévenir, c'est-à-dire à très faible déformation plastique. C'est le cas pour des matériaux à haute limite d'élasticité, où la rupture en charge est liée à la propagation quasi instantanée d'une fissure avec une déformation plastique apparente dans la zone de striction. La fatigue oligocyclique prend alors une place de plus en plus importante dans la conception des structures, à un moment où les matériaux, il leur arrive de travailler au delà de leur limite d'élasticité.

2 PROBLEMATIQUE

En raison donc de l'augmentation des limites élastiques des tôles et de la diminution des épaisseurs, les emboutis de la carrosserie des véhicules au cours du processus de fabrication, se situent souvent à la limite de la striction favorable à la rupture. Cet état qu'on désigne par localisation et qu'on définit comme étant une concentration de l'énergie dans une zone affaiblie [7], se caractérise par un amincissement de la tôle, difficile à détecter à l'œil nu. Il ne constitue pas un défaut de fabrication, mais pourrait se révéler comme une imperfection géométrique pouvant favoriser la rupture à la fatigue. Lorsque les structures minces sont fortement sollicitées, leur mouvement est sujet à de grandes amplitudes, pour lesquelles les non linéarités géométriques ne peuvent plus être négligées.

Pièces maitresses dans la conception des véhicules roulants, la carrosserie avec le châssis maintiennent l'ensemble des roues et le système de suspension. La complexité de la géométrie des composants de la carrosserie présentent des parties saillantes (aile, jupe arrière, pavillon, bas de caisse). Le châssis et la carrosserie jouent un rôle important dans la tenue de route d'un véhicule. C'est pourquoi l'analyse de la carrosserie nécessite une approche pluridisciplinaire de l'ingénierie, alliant la vibration des composants au comportement cinématique.

Une étude menée sur des véhicules produits au complexe véhicules industriels de Rouiba (SNVI), ont montré que des cas de rupture de la tôle de ces véhicules en service, est due à la présence d'une localisation née au cours de la mise en forme des emboutis. Ce phénomène, on le retrouve le plus souvent au fond des godets ou au niveau des coins des pièces embouties en boîte carrée. Le comportement est souvent le même à l'apparition de la rupture, ainsi notre étude portera sur la simulation de l'exemple d'un godet, dont le modèle retrouvé continue à servir pour la simulation d'emboutis plus complexes. Ces pièces sont réalisées à partir de tôles minces d'un acier doux appelé XES, d'épaisseur 1 millimètre.

Pour comprendre les manifestations du phénomène de la rupture de la tôle sur ces emboutis, une technique d'analyse d'images est utilisée par la simulation sur le logiciel Abaqus. Des considérations assez simples permettent finalement non pas de déterminer les conditions d'apparition de la rupture mais de la localiser lors de la simulation numérique. Cette technique, fondée sur la détermination des relaxations des contraintes, permet d'étudier minutieusement le déroulement du comportement du matériau lors de l'apparition de la rupture. Elle montre l'influence de la répartition des gradients de contraintes et des déformations dans la pièce à l'approche de la rupture. La méthode permet d'expliquer cette localisation et de la prévoir. Elle consiste donc à observer à travers le résultat de la simulation, l'évolution des champs des déformations et des contraintes. L'apparition d'hétérogénéités de la déformation sur les éléments de la structure maillée, montre qu'une décharge de contrainte, se produit au fur et à mesure dans les éléments situés en dehors de la localisation. Une concentration de contrainte apparaît alors sur les éléments non encore déchargés et la rupture survient sur les derniers éléments qui se déchargent.

3 DESCRIPTION

Bien qu'Abaqus dispose d'une vaste gamme de modèles de comportement de matériaux au sein de sa bibliothèque, aucun critère de localisation n'est implanté dans la version explicite du code éléments finis Abaqus. Par contre, le logiciel dispose d'un moyen efficace de prédire par la simulation numérique la localisation. Tabourot et al. [8] ont proposé une méthode de prédiction du début de localisation jusqu'à l'apparition de la rupture, sans introduire de critère de quelque nature que ce soit. L'apparition de la localisation est accompagnée d'une décharge en contrainte en dehors de la zone de rupture, c'est-à-dire une diminution des valeurs de la contrainte sur des éléments, et une concentration sur d'autres autour de la localisation. La méthode proposée consiste à comparer l'état de la contrainte pour chaque élément entre un instant donné t (le début d'incrément de calcul) et un instant $t+dt$ (la fin des incréments). Il suffit de faire la différence à ces deux instants des deux états de contrainte, et observer le pourcentage d'éléments qui se décharge au fur et à mesure, jusqu'à l'apparition de la rupture.

Le matériau étudié, un acier doux, provient du Complexe Véhicules Industriels de Rouiba, dont Renault Trucks est partenaire. Les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau 1.

Nuance	E (GPa)	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A %	r Coefficient d'anisotropie	n Coefficient d'écrouissage
XES	196	200	380	37	1.8	0.19

Tableau 1 : Caractéristiques du matériau XES

La loi de comportement du matériau Contrainte-Déformation retrouvée [9] est de type :

$$\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (1)$$

où K représente le coefficient de Lankford
n le coefficient d'écrouissage

Des essais d'emboutissage, ayant fait l'objet de précédents travaux [9] ont permis la détermination de la Courbe Limite de Formage du matériau. La méthode utilisée s'inspire de la méthode Marciniak. Le graphique (Fig 1), représente les trajets de chargement correspondants aux différentes sollicitations en mise en forme, qui ont permis le traçage de la courbe et qui représente la limite de la déformation plastique du matériau en mise en forme avant rupture. Cette courbe, définit le trajet critique à l'origine de la majorité des ruptures observées sur les emboutis industriels et qui correspond au trajet de la déformation plane qui traverse l'amplitude la plus faible de la CLF

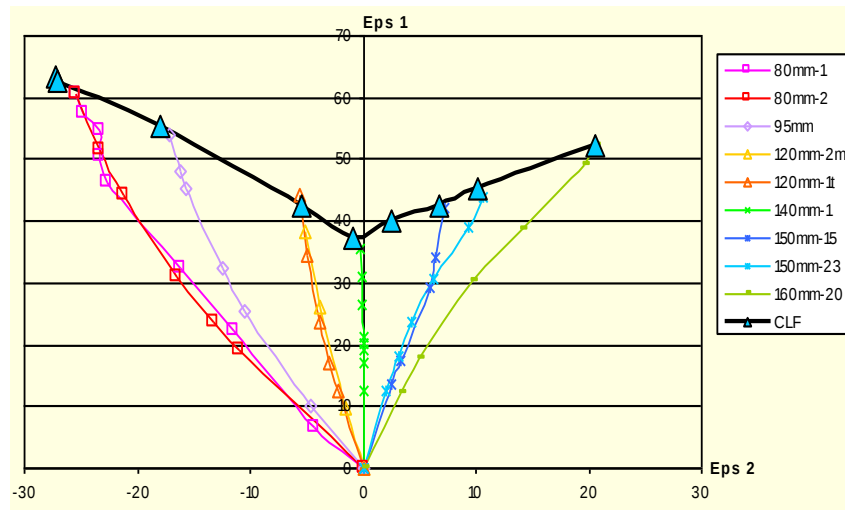


Fig. 1 : Tracé expérimental de la CLF de l'acier XES suivant différents trajets de chargement

4 CONDUITE DE LA SIMULATION

Des simulations ont été réalisées en 3 D sur le logiciel Abaqus/cae avec variation des paramètres du chargement et du contact. La symétrie de la géométrie et du chargement permet une modélisation du quart du procédé. Le maillage en éléments finis est réalisé en C3D8R (Fig. 2).

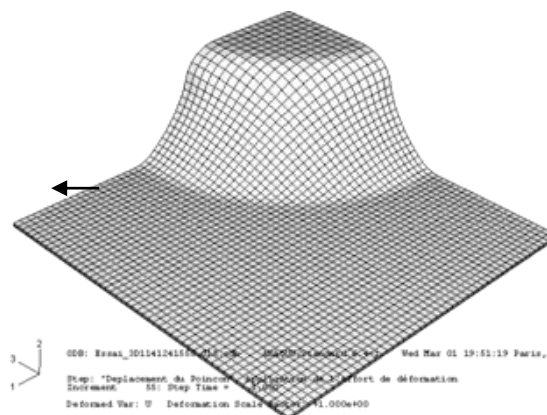


Figure 2 : Image d'un quart d'un godet maillé

L'analyse sur Abaqus donne une longue suite d'incréments (frames) que compte le fichier post-traitement, ainsi on se trouve contraint de limiter l'étude à 50 incrément sélectionnés sur des intervalles égaux, où chaque état de déformation du godet est visualisé sur une image correspondant à l'incrément. En vue de la localisation de la rupture, l'étude du comportement de l'embouti se fera sur le dernier incrément (image) qui correspond à l'amorce de la rupture et une sélection d'une suite d'éléments entourant la zone de rupture est choisie. Le plus souvent, cette suite est choisie sur la ligne médiane de l'éprouvette, suivant la direction X (Fig. 3a) ou en diagonale suivant une direction à 45° (Fig. 3b), selon la zone d'apparition de la rupture.

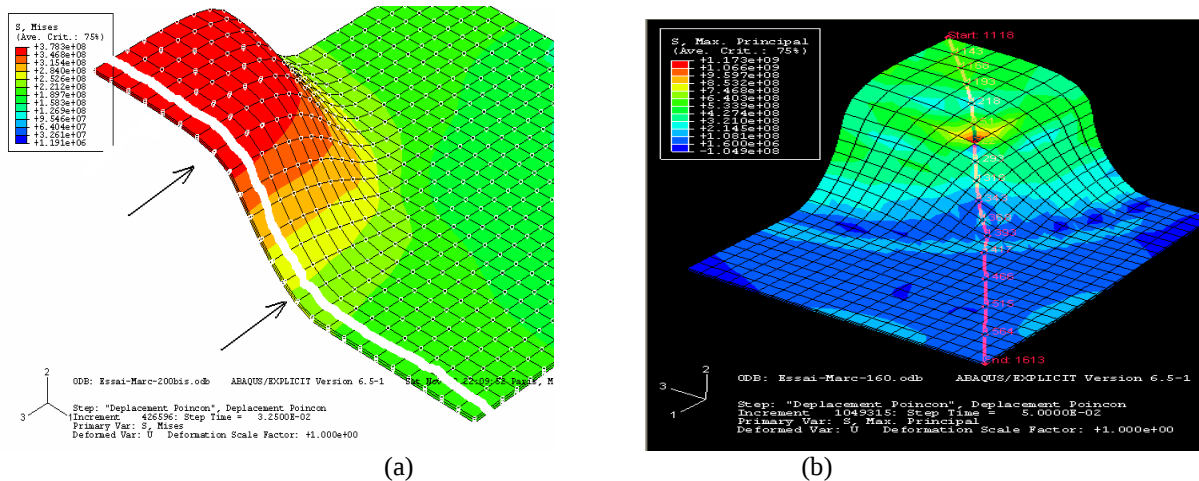


Fig. 3: Choix d'une ligne d'éléments de la pièce en vue de la localisation de la rupture. Le nœud origine est choisi au centre de la pièce entière (Coin supérieur sur le quart de la pièce).

5 RESULTATS

Le premier indice de l'apparition de la localisation est mis en évidence en observant les images représentant l'évolution du champ de la contrainte équivalente sur la tôle. La valeur maximale de la contrainte est caractérisée par une couleur rouge correspondant à une valeur lisible sur le tableau au coin de chaque image.

On relève l'évolution du champ de contrainte équivalente à chaque incrément sélectionné. A travers la variation de ce champ, sur les différents nœuds situés en surface, la localisation est orientée dans la zone où la contrainte maximale se replie. Les images relevées parmi les 20 incrément que constituent le résultat de l'analyse, montre que le champ de la contrainte maximale, se concentre au fur et à mesure sur les éléments situés dans la zone de striction; au même moment on assiste au déchargement élastique des éléments situés en dehors de cette zone. Ce qui montre que les éléments déchargés, cèdent le champ au fur et à mesure aux éléments concernés par la rupture. Une concentration de contrainte apparaît alors sur les éléments non encore déchargés et vont orienter la rupture autour des éléments qui se trouvent dans cette zone (Fig. 4).

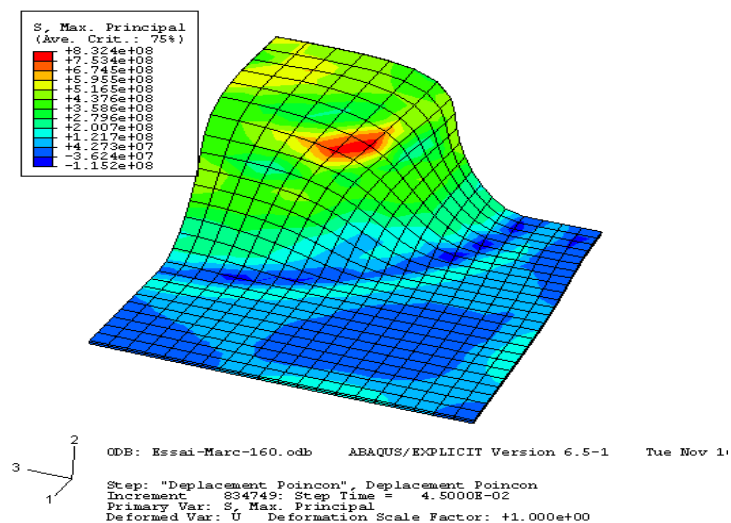


Fig. 4 : Concentration de la contrainte maximale dans la zone de localisation.

L'évolution de la distribution de la contrainte équivalente à l'approche de la rupture, sur deux incréments (le dernier et l'avant dernier) sur une ligne de nœuds où s'est localisée la rupture, montre que la contrainte diminue au fur et à mesure dans les nœuds non concernés par la rupture. La figure montre qu'à l'approche de la rupture, d'abord au cours de l'avant dernier incrément puis au dernier incrément, la contrainte maximale se localise dans un seul élément de la zone, sur l'élément où la contrainte est maximale (Fig.5).

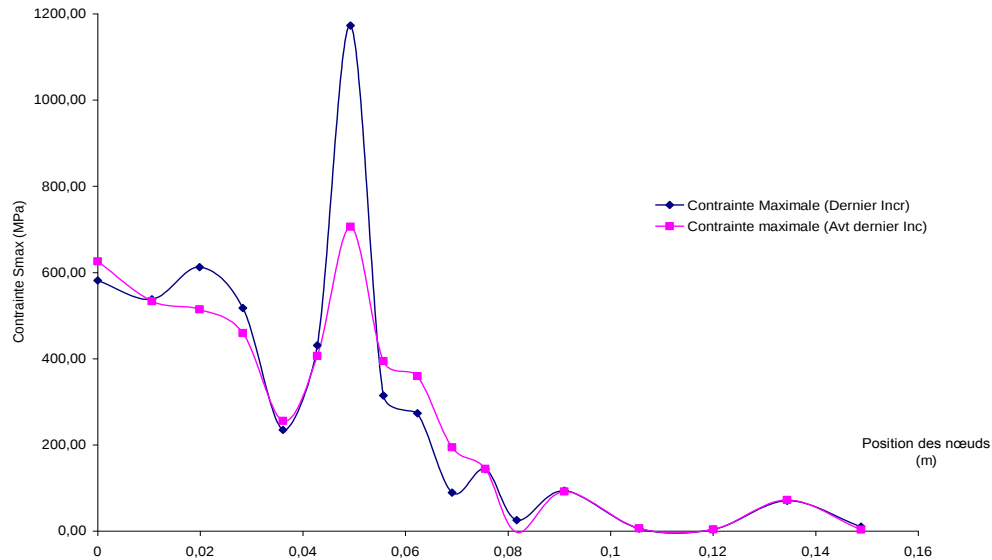


Fig. 5 : Evolution de la distribution de la contrainte équivalente sur la série de nœuds à l'approche de la rupture.

Ces courbes confirment que les éléments se trouvant à la transition du fond du godet avec la paroi verticale sont le siège de la rupture si elle vient à se produire.

De même, en observant la courbe Contrainte-Déformation suivant une des composantes de la contrainte (Fig. 6) et conformément au principe du critère de localisation de Considère, la contrainte atteint sa valeur maximale au point où se produit la striction. La chute de la contrainte correspond à la rupture.

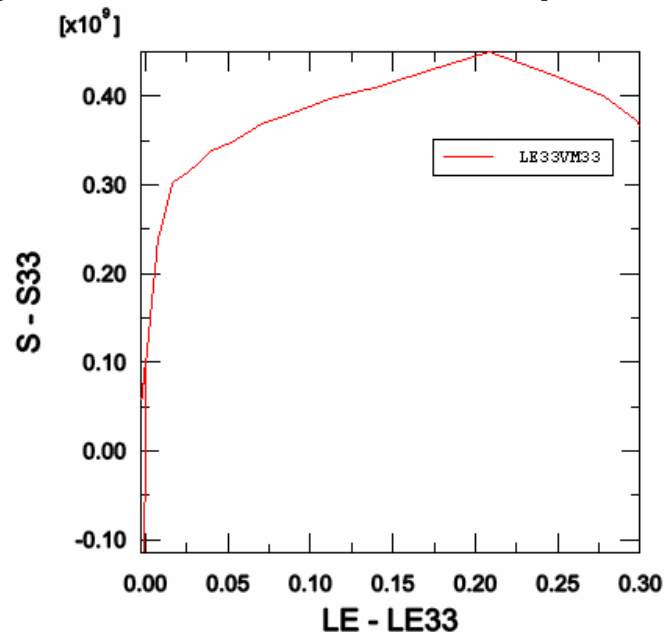


Fig. 6 : Courbe Contrainte-déformation du dernier élément chargé

La première validation de la simulation est effectuée par la comparaison de la géométrie de la localisation de la déformation dans la pièce emboutie virtuellement (Fig. 7) avec la géométrie de la zone de striction du godet produit à l'unité (Fig. 8). La comparaison prouve, que l'endroit d'apparition de la rupture est prédit avec succès. La zone d'apparition de la rupture est communément au niveau de l'arrondi de l'embouti, à l'intersection de la paroi verticale et de la paroi horizontale.

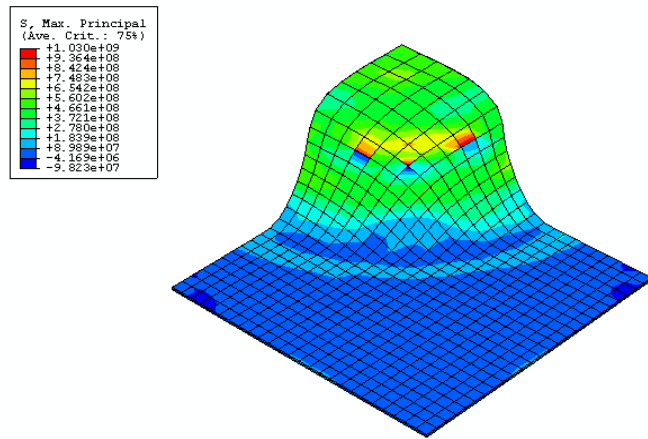


Fig. 7 : Localisation de l'amorce de rupture sur le godet en simulation (zone qui vire au rouge)

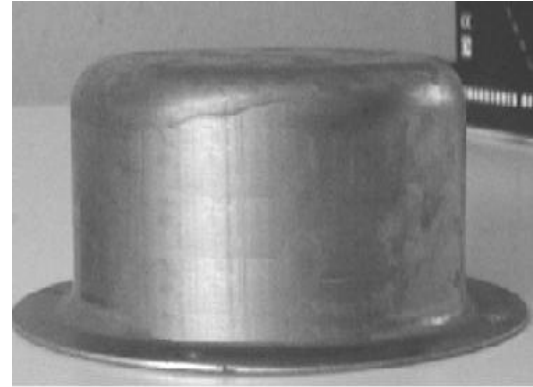


Fig 8 : Godet produit au CVI, présentant une amorce de rupture

6 ANALYSE DES RESULTATS :

L'analyse des résultats des déformations sur les 3 directions principales (Fig. 9) montre que le risque de rupture se situe fortement au niveau des éléments situés au fond du godet.

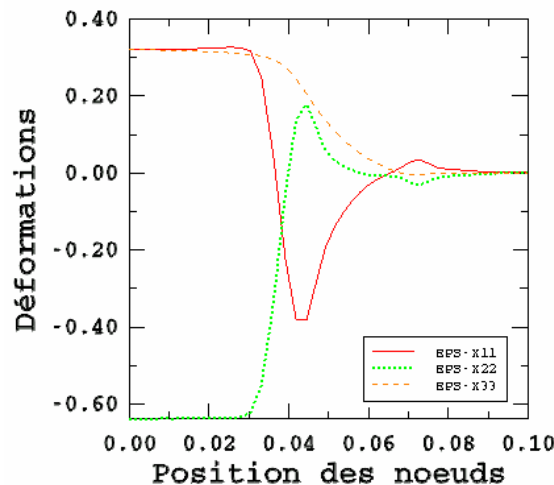


Figure 9: Courbes de déformations principales suivant les 3 directions principales

7 CONCLUSIONS

La simulation en 3D développée avec Abaqus, a permis de visualiser le processus de déformation des emboutis, le comportement du matériau à l'apparition de la rupture et déterminer les zones à fort amincissement local précédant une déchirure. La technique utilisée, fondée sur la détermination des relaxations des contraintes, permet d'étudier minutieusement le déroulement du comportement du matériau lors de l'apparition de la rupture. Les résultats obtenus montrent que le risque de rupture, se situe fortement à la transition entre le fond du godet et la paroi verticale de la pièce, cas de la plus part des déchirures des emboutis. Ceci confirme les résultats expérimentaux à travers la courbe CLF, qui définit le trajet critique à l'origine de la majorité des ruptures observés sur les emboutis industriels et qui correspond au trajet de la déformation plane qui empêche une variation de la largeur, donnant par conséquent l'amplitude la plus faible de la CLF. Connaissant les conditions d'apparition de ce phénomène, les concepteurs ont intérêt à éviter la déformation plane qui empêche une variation de la largeur sinon l'épaisseur variera exactement à l'inverse de la longueur, ce qui pourrait favoriser la rupture.

8 RÉFÉRENCES

- [1] C. C. Lin and L. W. Chen. Large-amplitude vibration of an initially imperfect moderately thick plate. *Journal of Sound and Vibration*, 135(2) :213-224, 1989.
- [2] G. L. Ostiguy and S. Sassi. Effects of initial geometric imperfections on dynamic behaviour of rectangular plates. *Non-linear Dynamics*, 3 :165-181, 1992.
- [3] A. Raman and C. D. Mote Jr. Effects of imperfection on the non-linear oscillations of circular plates spinning near critical speed. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 36 :261-289, 2001.
- [4] V. D. Kubenko and P. S. Koval'chuk. Influence of initial geometric imperfections on the vibrations and dynamic stability of elastic shells. *International Applied Mechanics*, 40 :847-877, 2004.
- [5] R. Munier, C. Doudard, S. Calloch, B. Weber, Fast determination of the influence of a plastic pre-strain on the high cycle fatigue properties of steel sheets from self-heating measurements, LBMS Ensta, ArcelorMittal Research
- [6] [Marie - 99] S. Marie, Approche énergétique de la déchirure ductile, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 1999.
- [7] R. Gourdain, Phénomène de localisation: Application à la double porosité dans les matériaux poreux, Journées CFA 2010
- [8] Tabourot L., Vacher P., Coudert T., Toussaint F., Arrieux R., Numerical determination of strain localisation during finite element simulation of deep drawing operations, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 159, Issue 2, p. 152-158, 2005
- [9] Boussaid O., N. Bourgeois, M. Martiny, G. Ferron, K. Chaoui: "Experimental Characterization of Mild Steel in Deep Drawing", *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, Vol.3, n.3, July 2008