

Les automobiles sont conçues de sorte à garantir l'intégrité physique des occupants en cas d'accident. Cette fonction est entre autres réalisée par des éléments structurels nommés longerons, qui absorbent l'énergie cinétique en se déformant pendant un temps très court, de l'ordre du dixième de seconde. La simulation de ce phénomène nécessite un modèle du comportement du matériau de cette structure qui soit valable aux grandes vitesses de déformation ; pour cette raison, ce modèle est identifié à partir d'essais matériaux spécifiques. Cette ressource présente ces essais et l'identification qui s'ensuit.

## 1 - Introduction

### 1.1 - Les crash-tests automobiles

La sécurité est devenue une prestation fondamentale d'un véhicule automobile et un argument commercial marquant. L'existence de barèmes de classement du comportement d'un véhicule au crash (Euro NCAP) est par exemple connue de tous ; ces barèmes reposent sur des tests [1] consistant, entre autres, à mesurer les accélérations et efforts subis par un mannequin instrumenté dans des conditions de crash décrites précisément. Différents critères sont reliés aux accélérations mesurées en différents points (tête, thorax, membres...).



Figure 1 : Un véhicule en test de crash frontal

Pour assurer la survie des passagers dans le cas d'un impact frontal, il faut ralentir le véhicule sans à-coups (des décélérations trop brutales peuvent entraîner des lésions graves) et sans pénétration de corps étrangers dans l'habitacle. D'un point de vue mécanique, il s'agit de dissiper une quantité importante d'énergie cinétique : un véhicule de 1500 kg roulant à 60 km/h possède une énergie cinétique de 200 kJ. Si l'on considère un effort de freinage constant sur 1 m (distance d'arrêt du véhicule correspondant à la déformation totale observée), on obtient un effort moyen nécessaire pour freiner le véhicule de l'ordre de 200 kN. Cet effort est notamment subi par les longerons, dont traite cette ressource.

### 1.2 - Les éléments de sécurité dans les véhicules

De façon générale, les véhicules possèdent deux catégories de composants de sécurité :

- Les éléments de sécurité active, qui ont pour objectif de donner toutes les aides à la conduite possibles pour éviter qu'un accident se produise ; ce sont par exemple l'ABS (anti-

blocage des roues), l'ESP (contrôle de la trajectoire), le BAS (assistant de freinage d'urgence) ou encore l'anti-patinage ;

- Les éléments de sécurité passive, qui ont pour objectif de limiter autant que possible les conséquences du choc sur l'intégrité physique du conducteur et des passagers ; ce sont par exemple les airbags, les prétensionneurs des ceintures de sécurité ou encore les longerons participant à dissiper l'énergie cinétique du véhicule en cas de choc. C'est sur ces derniers que nous allons concentrer notre attention.

## 2 - Les longerons et le comportement de leur matériau

L'effort résultant d'un choc frontal est repris par les longerons, qui sont des assemblages de tôles métalliques soudées par points. En cas de choc, ces composants doivent absorber l'énergie cinétique en se déformant plastiquement de façon importante, tout en garantissant un maintien correct de l'effort résistant durant le crash. Leur géométrie doit donc être adaptée pour que ces grandes déformations plastiques n'entraînent pas leur rupture.



Figure 2 : Structure des caisses automobiles : distinction entre zone d'absorption et zone de détection

### 2.1 - Les matériaux des longerons

Les composants des caisses des voitures sont généralement réalisés en tôles d'acier, bien que les tôles d'aluminium soient utilisées en raison des gains de masse qu'elles permettent (par exemple, la traverse de la Mégane 2 pèse 3 kg de moins que celle du modèle précédent). Les longerons sont généralement fabriqués à partir de tôles d'acier à hautes limites élastiques, vu les hauts niveaux de contraintes qu'ils subissent.

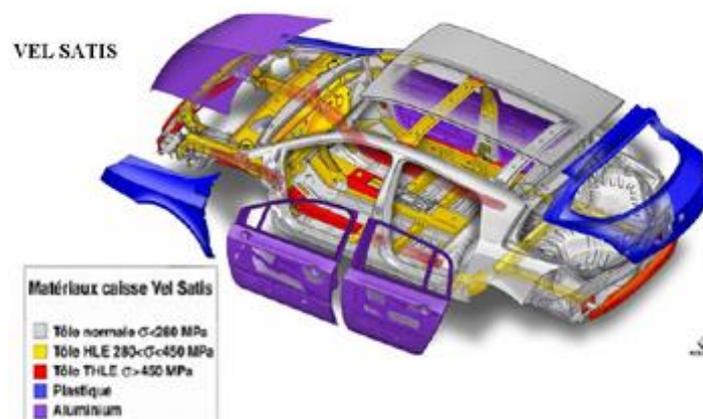


Figure 3 : Quelques matériaux utilisés dans la VelSatis

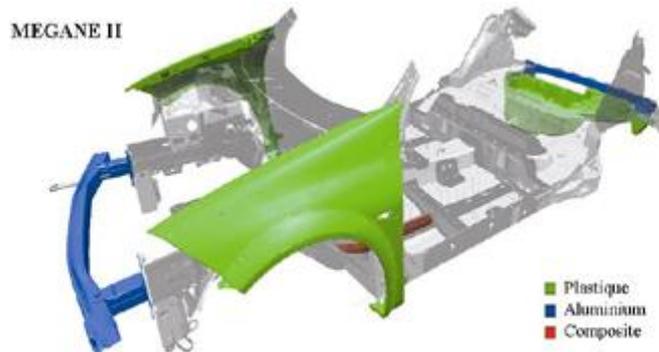


Figure 4 : Quelques matériaux utilisés dans la Mégane 2

## 2.2 - La sensibilité des matériaux aux vitesses de déformation

Pour simuler le comportement des longerons lors d'un crash, il faut garder à l'esprit que la majorité des matériaux sont sensibles à la vitesse de déformation. En effet, la limite d'élasticité et la contrainte d'écoulement (contrainte à laquelle se déroule l'écoulement plastique) augmentent avec la vitesse de déformation, tandis que l'écrouissage (la pente de la courbe de traction une fois la zone élastique quittée) diminue (figure 5). Une autre façon de constater cette dépendance est de remarquer que la contrainte menant à une déformation permanente donnée (par exemple 20%) dépend fortement de la vitesse à laquelle le chargement est appliqué (figure 6).

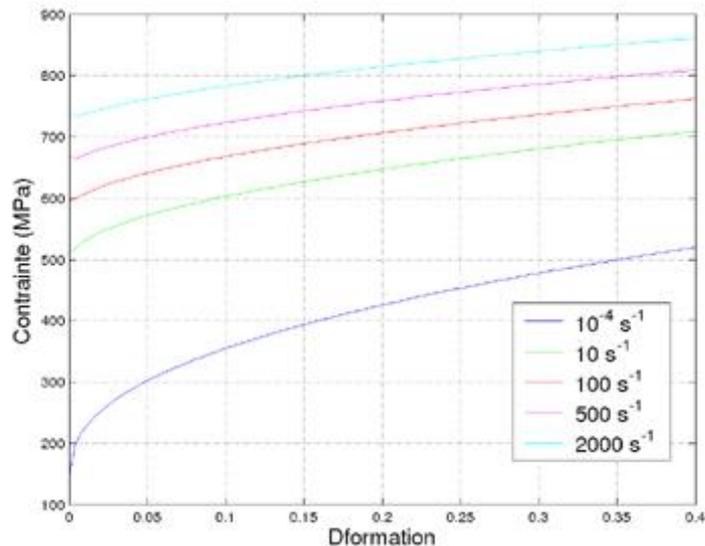


Figure 5 : Réponse typique d'un acier pour différentes vitesses de déformation

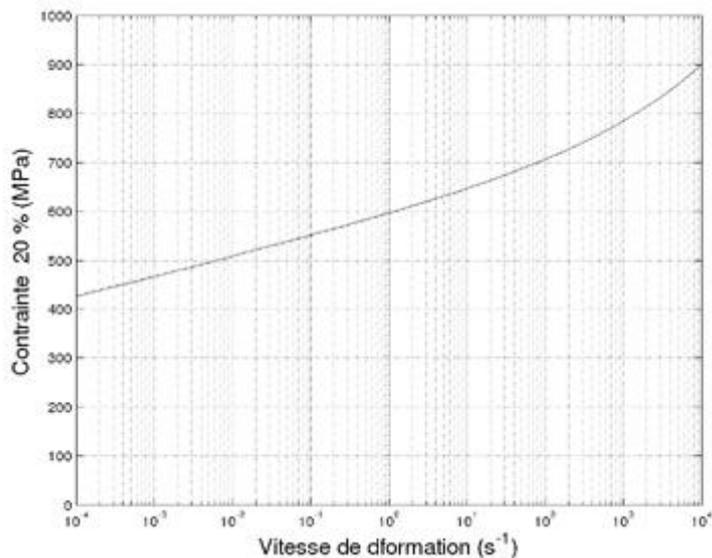


Figure 6 : Evolution de la contrainte à 20% en fonction de la vitesse de déformation

Aussi, pour dimensionner au mieux les longerons composés de tôles métalliques, il est nécessaire de connaître le comportement élastoplastique des tôles qui composent ces pièces non seulement pour des chargements lents, mais aussi pour des chargements rapides.

### 2.3 - Géométrie et déformations des longerons

Les longerons sont des éléments en tôle. Ce sont des colonnes creuses de section rectangulaire. Lors d'un choc, ils se déforment en flambage. Des plis se forment successivement au cours de l'écrasement du tube. La succession de phases de flambage permet de fournir un effort d'écrasement relativement constant, ce qui est recherché pour la survie des passagers. Une courbe typique d'écrasement d'un tube est donnée et commentée dans l'animation ci-dessous (le tube étudié est un tube d'essai de dimension inférieure à celle des longerons implantés sur un véhicule et les valeurs d'efforts sont donc moins importantes que dans le cas réel du crash). Voir « *Annexe : Influence de la géométrie des longerons sur la relation efforts/déplacement* ».

### 2.4 - Le dimensionnement

Il est toujours nécessaire aujourd'hui d'utiliser des prototypes physiques pour la validation du respect des différentes normes de crash. Par contre, en conception, les contraintes de temps et de coût imposent de réduire le nombre de prototypes utilisés en ayant recours à des simulations sous des logiciels de type LSDyna.

Pour dimensionner au mieux ces éléments déformables, il est nécessaire de bien connaître les caractéristiques des tôles dans les conditions du crash, c'est-à-dire pour des vitesses de déformations allant jusque  $1000 \text{ s}^{-1}$ , mais aussi pour des grandes déformations de l'ordre de 80% (valeur observée pour les coins du tube lors de l'écrasement de longerons). Des essais permettant cette caractérisation sont donc mis en place.

Les essais doivent permettre :

- De reproduire au mieux le phénomène physique observé. Il s'agit donc de mettre en place une expérience permettant de déformer des tôles métalliques du matériau considéré à grande vitesse de déformation (essais dynamiques) et en grandes déformations (l'éprouvette doit subir une déformation plastique d'au moins 80% avant de rompre),
- Le résultat final doit se présenter sous la forme d'une mesure fiable permettant de déduire les paramètres de la loi de comportement du matériau en contraintes et déformations (pour être implanté dans le code éléments Finis).

## 3 - Les essais dynamiques sur tôles métalliques

Comment reproduire le phénomène physique et mesurer la réponse de la tôle ?

### 3.1 - Reproduire les grandes vitesses de déformation

Les essais dynamiques nécessitent de disposer de machines spéciales différentes des machines pour essais quasi-statiques. En effet, les machines hydrauliques classiques permettent d'imposer des déplacements à une vitesse de l'ordre du mm/s, valeur incompatible avec le caractère dynamique souhaité.

Les essais dynamiques nécessitent des vitesses de vérin de l'ordre de 10 m/s. Pour imposer de telles vitesses aux différentes parties de l'éprouvette, il existe deux classes de machines :

- Les machines hydrauliques spécialisées,
- Les barres de pression.

## Les machines hydrauliques

Des machines hydrauliques spécialisées à grandes vitesses permettent d'atteindre des vitesses de vérin de 20 m/s. Cependant, avec ce type de machine, il n'est pas possible d'asservir la position du vérin avec la même qualité qu'une machine hydraulique classique. En effet, pour compenser l'insuffisance de débit de groupe, on utilise des accumulateurs de pression d'air, ce qui rend le pilotage difficile à réaliser. D'autre part, pour des grandes vitesses de déplacement du vérin, les têtes d'amarrage des éprouvettes étant de géométrie complexes, les ondes font plusieurs aller-retour dans l'ensemble têtes d'amarrage - éprouvette, ce qui bruite fortement la mesure.

## Les barres de pression (ou barres de Hopkinson)

**Principe :** Les barres de pression ou barres de Hopkinson sont de plus en plus utilisées dans les laboratoires de recherche comme outil pour caractériser la sensibilité à la vitesse de déformation. Elles sont composées de deux barres cylindriques, nommées *barre entrante* et *barre sortante*, entre lesquelles se trouve l'échantillon à tester ; un impacteur vient frapper la barre entrante, ce qui crée une onde de compression qui se propage dans la barre. Cette onde atteint ensuite l'échantillon et le met en compression.

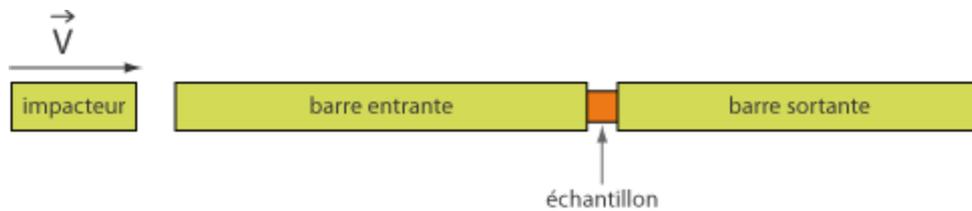
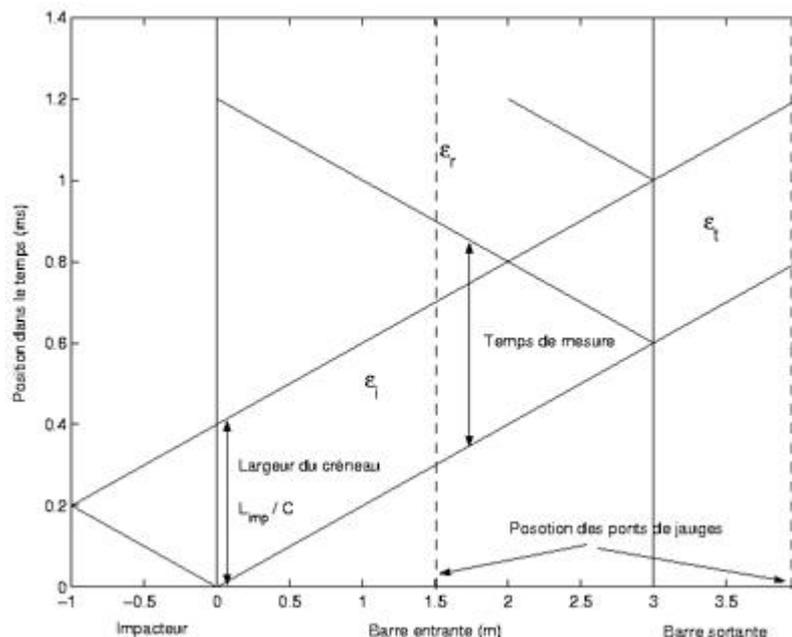


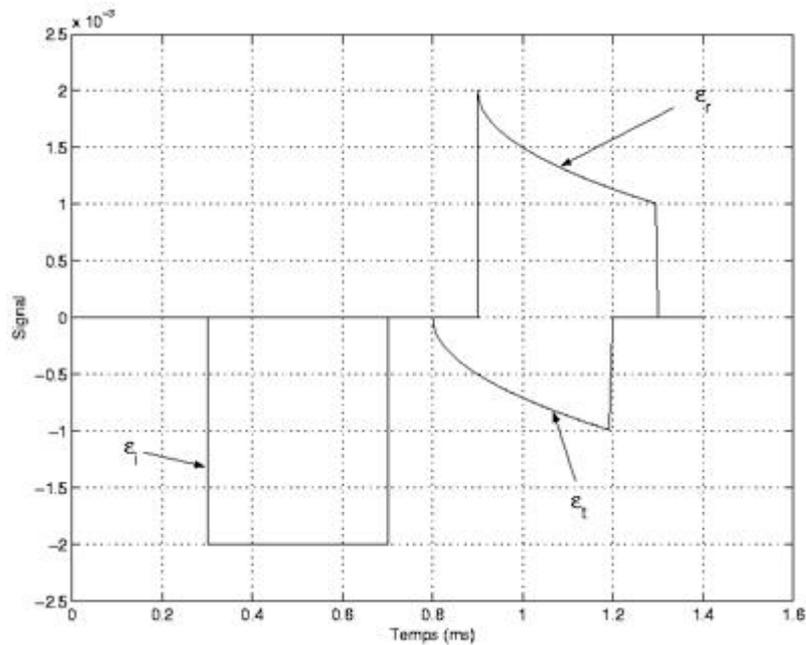
Figure 7 : Les principaux éléments pour l'essai de barres Hopkinson

On mesure les ondes par des points de jauges de déformation placés :

- Au milieu de la barre entrante, pour bien séparer l'onde incidente de l'onde qui se réfléchit à l'extrémité de la barre ; il faut faire l'hypothèse que les ondes ne se dispersent pas, ou bien prédire la dispersion (l'équation de dispersion pour un cylindre élastique infini est connue depuis le 19<sup>ème</sup> siècle) ;
- Quelques diamètres après l'échantillon pour la barre sortante (pour que l'onde soit bien établie).

Les courbes obtenues ont typiquement l'allure suivante :





On constate que l'onde incidente a l'allure d'un créneau dont la durée est égale au temps mis pour faire un aller et retour dans l'impacteur. Arrivée à l'échantillon, une partie se réfléchit et l'autre partie se transmet dans la barre sortante. L' « Annexe : Présentation de l'essai aux barres de Hopkinson » détaille ce qui se produit.

A partir de la mesure des déformations, il est possible de déterminer les efforts exercés sur l'échantillon ; il suffit pour cela d'isoler celui-ci. On obtient les résultats suivants :

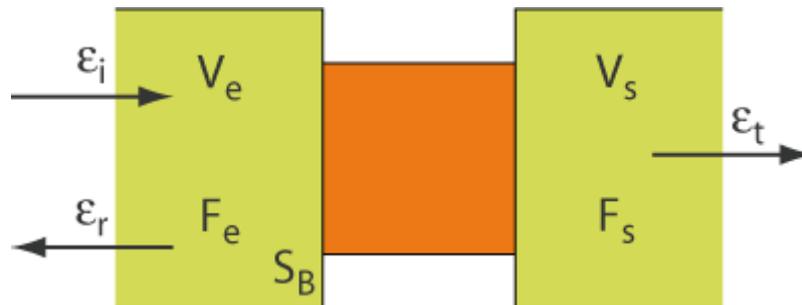


Figure 8 : Les paramètres associés aux ondes

$$F_{entrante} = S_B E (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad \text{et} \quad F_{sortante} = S_B E \varepsilon_t$$

$$V_{entrante} = C_0 (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad \text{et} \quad V_{sortante} = C_0 \varepsilon_t$$

Les efforts sont donnés par les formules ci-dessus ; le raccourcissement de l'échantillon, quant à lui, est calculé par intégration temporelle de la vitesse. On peut ainsi mesurer le comportement mécanique de l'échantillon.

**Longueur et diamètre des barres** : Il est important de noter que le temps de mesure est limité par la longueur de la barre entrante. Pour notre problème, où on doit faire des essais pour des grandes déformations, il est donc nécessaire d'utiliser une barre entrante de grande longueur. La longueur des barres traditionnellement utilisées est de environ 1 m. Les bancs de barres de Hopkinson dont est équipé le LMT-Cachan ont des barres entrantes de longueur de l'ordre de 4 m. Il devient important alors de bien prendre en considération le caractère dispersif des ondes dans leur transport entre le point de mesure et l'interface barre-échantillon (valeur utilisée pour le calcul des forces et vitesses).

Le diamètre des barres dépend de l'essai que l'on souhaite faire, et notamment de l'encombrement de l'éprouvette. Ainsi, un essai sur un matériau dont le volume élémentaire représentatif est grand (comme par exemple les nids d'abeille, ou les mousses métalliques) nécessitera un plus grand diamètre de barre que l'essai d'un acier.

**Matériaux utilisés** : Les matériaux utilisés pour les barres de Hopkinson sont généralement des alliages d'acier à haute limite élastique ou d'aluminium. Des barres en Nylon ou en PMMA existent aussi pour pouvoir tester des matériaux peu résistants.

**Intérêt des barres de Hopkinson** : Le grand intérêt des barres de Hopkinson, réside dans le fait que le chargement de l'éprouvette ne se fait qu'avec une seule onde issue de la barre entrante, ce qui élimine les oscillations que l'on peut obtenir avec une machine hydraulique.

### 3.2 - Reproduire les grandes déformations : les essais de cisaillement

Les essais usuellement utilisés dans l'industrie sont des essais de traction. Ces essais ne donnent les caractéristiques des tôles que pour des faibles déformations, de l'ordre de 15 à 20 % suivant la ductilité de la tôle, ce qui n'est pas en accord avec l'amplitude des déformations lors du crash. Il faut donc mettre en œuvre un essai adapté à la forme particulière des tôles (produits plats) et qui permette d'obtenir des données matériau valides en grandes déformations.

Une solution est de procéder à un essai de cisaillement. En effet, l'apparition de la striction s'opère beaucoup plus tard que pour une sollicitation de traction. Il est possible d'obtenir ainsi des données valides pour des déformations de l'ordre de 100% suivant la ductilité de la tôle. Le LMT-Cachan dispose d'un essai de double cisaillement adaptable à la fois à une machine de compression hydraulique pour les essais aux basses vitesses, et aux barres de Hopkinson pour les essais aux grandes vitesses.

Le montage de double cisaillement est composé de deux pièces cylindriques coaxiales. Ainsi, un déplacement relatif des deux parties cylindriques transforme la compression en cisaillement. Les pièces coaxiales sont en acier auto-trempeant à haute limite élastique spécialement élaboré pour des éléments d'outillage exposés à des contraintes très élevées. L'éprouvette est serrée et maintenue dans le montage grâce à des vis haute résistance et une empreinte constituée de lamelles perpendiculaires à la direction de cisaillement afin d'assurer une adhérence maximale. Le centrage du montage est effectué à l'aide d'un étau spécialement prévu à cet effet. Le chargement est appliqué sur chacune des faces des parties coaxiales.

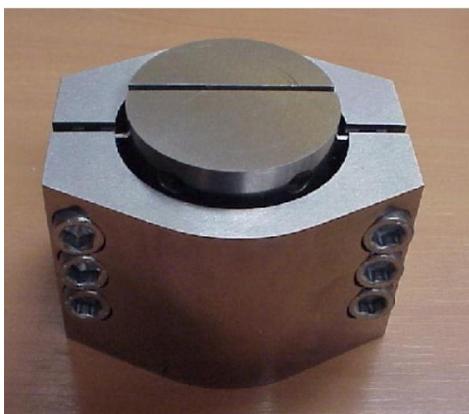


Figure 9 : Montage de cisaillement fermé



Figure 10 : Montage de cisaillement ouvert

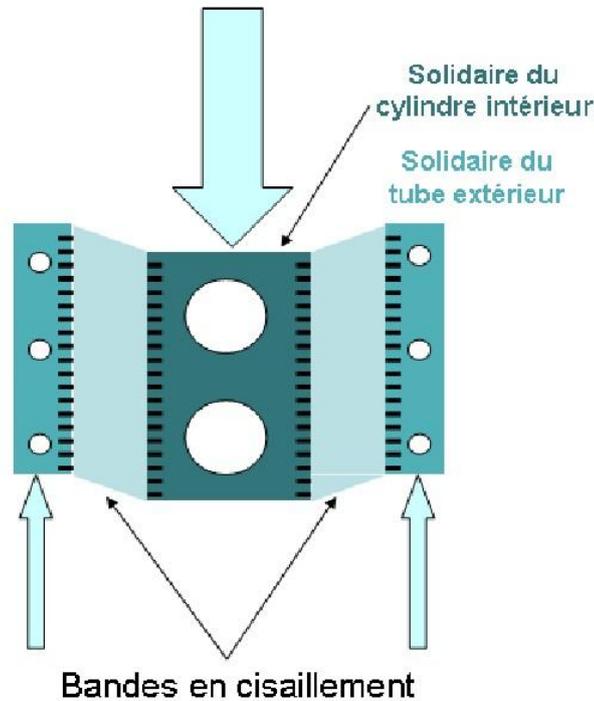


Figure 11 : Schématisation de l'essai de cisaillement par barre de Hopkinson

Un des intérêts de ce montage est de permettre aussi bien un chargement quasi-statique (par exemple avec une machine de compression hydraulique) que dynamique avec des barres de Hopkinson en aluminium (AU4G) de diamètre 60 mm. Il est important de noter que ce montage ne peut fonctionner en dynamique qu'avec ce type de barres. En effet pour éviter des réflexions d'ondes parasites, les pièces du montage et les barres en AU4G de 60 mm de diamètre doivent avoir la même impédance (fonction du matériau et de la dimension de la barre). Les dimensions de la zone cisailée sont de 3mm x 30 mm. En effet, pour avoir un état de déformation homogène dans la zone cisailée, il est nécessaire d'avoir un rapport largeur cisailée - longueur de 1/10. Pour limiter l'effort de cisaillement, il est possible de diminuer la longueur à 20 mm.

L'essai de cisaillement donne des données globales : déplacement relatif des pièces coaxiales et effort correspondant. Pour trouver une courbe déformation-contrainte utilisable dans une simulation par éléments finis, il est nécessaire de faire des hypothèses sur le comportement de la tôle de manière à pouvoir utiliser les résultats de l'essai.

## 4 - L'identification du modèle du comportement du matériau

Pour obtenir une relation déformation / contrainte (objectif initial de l'essai), il faut faire des hypothèses sur le modèle de comportement du matériau nous permettant de relier les grandeurs mesurées (force et déplacement) aux grandeurs souhaitées pour la loi de comportement (déformation et contrainte).

### 4.1 - L'hypothèse d'homogénéité

Il est possible de passer de l'information globale mesurée à une information locale si l'état de déformation et de contrainte dans l'éprouvette est homogène et assimilable à celui résultant d'une sollicitation simple.

Une mesure du champ de déplacement à l'aide d'une technique de corrélation d'images (voir ressource « *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* ») a montré que la forme du champ de déplacement dans l'éprouvette (figure 12) est très proche de celle obtenue théoriquement en cisaillement simple (figure 13).

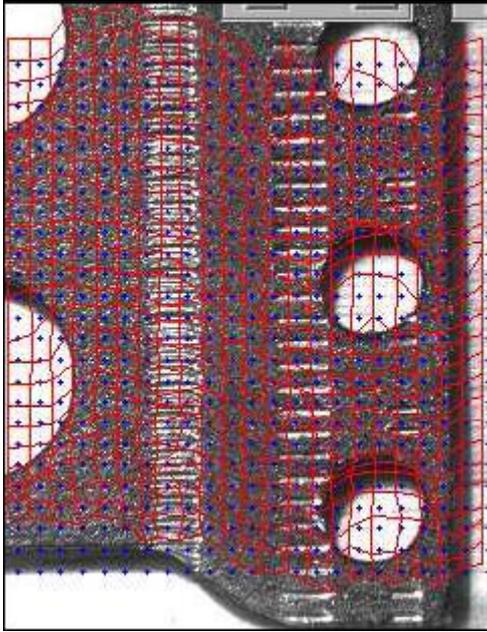


Figure 12 : Mesure des déplacements par corrélation d'images

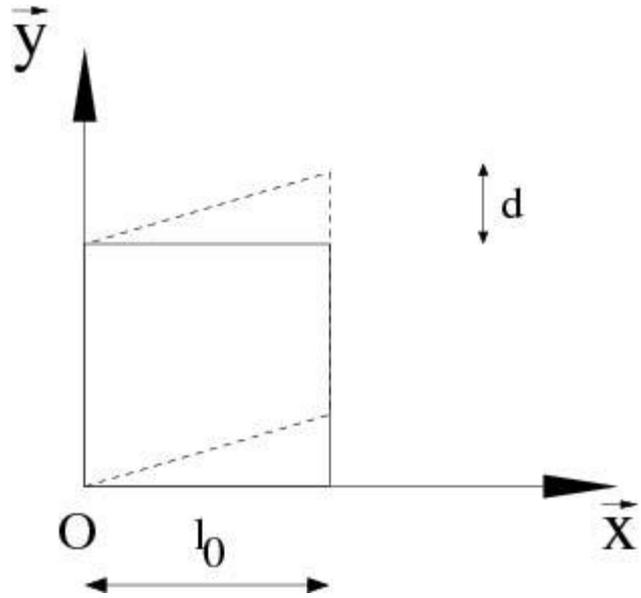
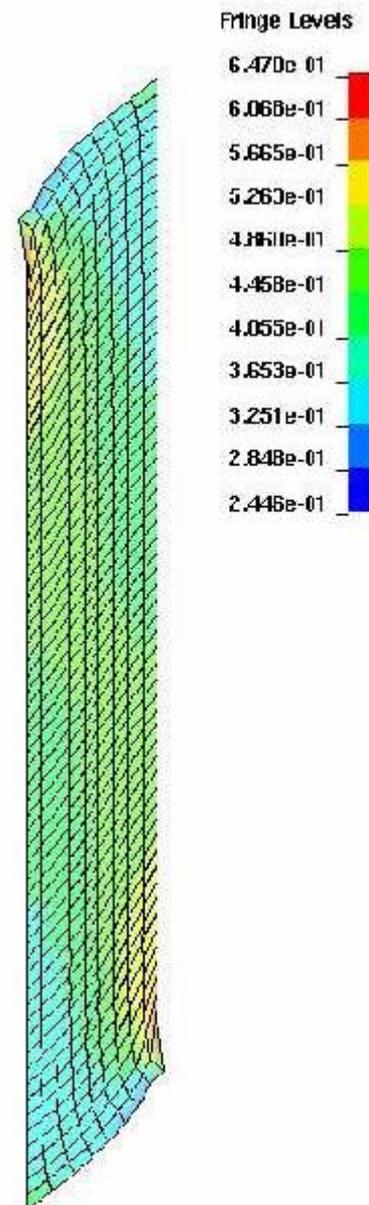


Figure 13 : Déplacement théorique en cisaillement simple

L'essai de cisaillement a ensuite été simulé par éléments finis pour étudier l'effet de la forme de l'éprouvette sur les champs de déformation et de contrainte, en particulier au niveau des bords de la zone cisailée (figure 14). Cette simulation montre que la contrainte est relativement homogène dans l'éprouvette et que les composantes de traction sont faibles par rapport à la composante de contrainte de cisaillement. Les effets de bords peuvent donc être négligés dans le dépouillement, aussi bien au niveau de la déformation que de la contrainte.

Figure 14 : Simulation : effets de bord sur le champ de déformation

Par conséquent, les états de contrainte et de déformation dans l'éprouvette peuvent être déterminés uniquement à partir du déplacement et de l'effort, en considérant que la sollicitation exercée est du cisaillement simple.



## 42 - La représentation des grandes déformations

Il est essentiel de garder à l'esprit que l'hypothèse habituelle des petites perturbations n'est plus valable dans notre cas. Le dépouillement de l'essai de cisaillement doit donc être effectué en grandes déformations. Or, il existe de nombreuses mesures des grandes déformations ayant chacune leurs intérêts et leurs défauts. Toutes ont les caractéristiques suivantes :

- Elles sont égales au tenseur des petites déformations lorsque les déformations sont faibles (i.e. lorsque l'hypothèse des petites perturbations s'applique),
- Elles sont objectives (i.e. elles ne dépendent pas du repère d'observation).

Cependant, pour une vitesse et/ou un déplacement donné, ces mesures conduisent généralement à des valeurs de déformation différentes. Le choix d'une mesure doit donc être effectué avec soin ; un critère important est la compatibilité avec le mode de calcul des déformations utilisé dans le logiciel de simulation par éléments finis.

## 43 - Hypothèses sur le comportement plastique de la tôle

Enfin, il est également nécessaire de faire des hypothèses sur le comportement de la tôle, et notamment le critère de plasticité. Le critère le plus utilisé et le plus implanté dans les logiciels de simulation par éléments finis du commerce (LsDyna, Radioss, PamCrash, Abaqus) est le critère de Von Mises, mais ce critère n'est pas toujours pertinent dans le cas des tôles.

Ce critère est considéré valable lorsque le matériau a un comportement plastique isotrope : les conditions nécessaires de déclenchement ou de poursuite de l'écoulement plastique sont indépendantes de la direction de la sollicitation par rapport à la matière.

Des essais de compression dynamique et de traction dynamique peuvent donc compléter cette analyse et permettre d'obtenir une loi de comportement valide pour les sollicitations observées dans l'écrasement d'un tube creux. Ces essais supplémentaires auront pour objet de choisir un critère de plasticité au plus proche possible des nouvelles observations expérimentales.

L'« *Annexe : Les critères de plasticité - complément* » donne quelques compléments sur les critères de plasticité.

## Références :

[1]: <http://www.euroncap.com/fr>

[8]: <http://www.sematec-metrologie.com/>