

Comportement des matériaux sous sollicitation dynamique

Auteurs	Critère de rupture	Source
Freudenthal	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \sigma_{eq} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Freudenthal 1950] [Jeunechamps 2008] [Clift 1990]
Cockroft et Latham	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \sigma_1 d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Jeunechamps 2008] [Clift 1990]
Oh	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Oh 1979] [Jeunechamps 2008]
McClintock	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh\left(\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \frac{\sigma_1+\sigma_2}{\sigma_{eq}}\right) + \frac{3}{4} \frac{\sigma_1+\sigma_2}{\sigma_{eq}} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[McClintock 1968] [Jeunechamps 2008] [Clift 1990] [Hor 2011]
Brozzo	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1-p_h)} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Brozzo 1972] [Jeunechamps 2008] [Clift 1990]
Norris	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{1}{3(1-Ap)} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Norris 1978] [Clift 1990] [Jeunechamps 2008]
Oyane	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} 1 + \frac{p_h}{A\sigma_{eq}} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Oyane 1980] [Clift 1990] [Jeunechamps 2008]
Atkins	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{2 + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2}}{2(1-Ap_h)} d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Atkins 1981] [Clift 1990] [Jeunechamps 2008]
Goijaret	$\int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{1}{C_G} \left\langle 1 + \frac{p}{A\sigma_{eq}} \right\rangle d\bar{\varepsilon}^P = C$	[Goijaerts 2001] [Jeunechamps 2008]
Huang	$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}^p_{final}} \frac{\sigma_1}{\sigma_1-p} + C_1 \frac{\sigma_1-s_3}{\sigma_1-\sigma_3} \frac{s_3}{s_1} d\bar{\varepsilon}^P$	[Huang 2009]

Tableau 2.5 – Liste des critères de rupture.

2.2 Moyens expérimentaux de caractérisations du comportement dynamique des matériaux

L'identification du comportement des matériaux est essentiel pour résoudre les problématiques d'impact. Les paramètres des lois de comportement des matériaux sont identifiés à partir d'essais de caractérisation. L'essai le plus simple est l'essai traction. Dans le cas de problèmes dynamiques, il faut alors utiliser des essais spécifiques aux grandes vitesses de déformation. Ce sont souvent des essais d'impact ou des essais sur machine équipée d'un vérin rapide [Deletombe 2013b]. Il est notamment possible de citer l'essai de la barre de Taylor [Taylor 1948], l'essai sur roue inertielle [Viot 2008] et la machine de compression Gleeble [Hor 2011]. Ici, un intérêt particulier est porté à la barre d'Hopkinson ou barre de Kolsky ([Gary 2002], [Hor 2011], [Zhang 2008], [Bouix 2009], [Deletombe 2013b]) et sur les méthodes inverses d'identification des lois de comportement.

2.2.1 Les essais de la barre de Kolsky ou Hopkinson

Une éprouvette est mise entre deux barres. La première barre est appelée barre incidente et la deuxième, barre de transmission. Un impacteur vient impacter la barre incidente et permet ainsi une déformation rapide de l'échantillon. Les mesures sont effectuées grâce à des jauges de déformation placées sur les deux barres. Le comportement du matériau en compression s'obtient pour des vitesses de déformation jusqu'à $10\,000\text{ s}^{-1}$ [Brun 2000].

La figure 2.9 décrit le montage d'une barre d'Hopkinson avec les quantités mesurées. L'onde de déformation élastique $P(t)$ induite par l'impact se déplace dans la barre incidente. La valeur de la déformation est transmise par la jauge de déformation. En arrivant sur l'échantillon, une partie de cette onde est réfléchiée et une autre est transmise. L'équilibre des déformations sur cette face permet de calculer la force et la vitesse particulière. L'onde réfléchiée $N(t)$ dans la barre incidente repasse et est enregistrée par la jauge de déformation.

La force entrante F_e appliquée à l'interface barre incidente - éprouvette peut s'écrire comme la multiplication de l'aire de la section de la barre incidente par la contrainte σ .

$$F_e = A\sigma \quad (2.20)$$

On connaît le comportement élastique de la barre incidente et notamment son module d'Young. La force s'exprime en fonction de la section A , du module d'Young et de la déformation élastique ε , à l'aide de la loi de Hooke :

$$F_e = AE\varepsilon \quad (2.21)$$

On connaît alors la déformation incidente $P(t)$ et réfléchiée $N(t)$. En les soustrayant, il est possible de calculer la déformation ε puis la force F_e à l'interface.

$$\varepsilon = P(t) - N(t) \quad (2.22)$$

$$F_e = AE(P(t) - N(t)) \quad (2.23)$$

Dans le cas de la propagation d'une onde de déformation élastique dans une barre, il est important de dissocier vitesse particulière du/dt et vitesse ondulatoire c_0 . La vitesse du déplacement v de l'interface barre incidente - éprouvette peut s'exprimer [Johnson 1972] :

$$v = \frac{du}{dt} = c_0 \frac{dt}{dx} \frac{du}{dt} = c_0 \frac{du}{dx} \quad (2.24)$$

La déformation s'exprime aussi comme la dérivée de u par x . Ainsi la vitesse à l'interface peut s'écrire en fonction de l'onde de déformation incidente et réfléchiée :

$$v = c_0 \varepsilon = c_0(N(t) - P(t))$$

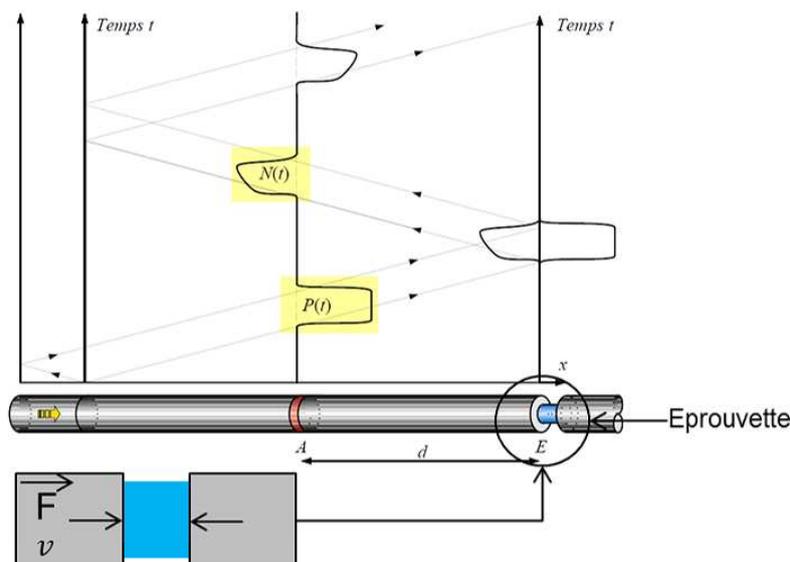


FIGURE 2.9 – Schémas de principe d'une barre d'Hopkinson [Brun 2000].

De même il est possible d'obtenir la force et la vitesse pour l'interface entre l'échantillon et la barre de transmission [Gary 2002]. En effet, la jauge de déformation de la barre de transmission enregistre la déformation transmise $T(t)$ par l'échantillon. Comme pour la barre incidente, la force sortante F_s s'exprime alors :

$$F_s = A E T(t)$$

La vitesse particulière s'exprime aussi en fonction de la déformation et de la vitesse de l'onde de déformation élastique dans la barre :

$$v_s = c_0 T(t)$$

Gary [Gary 2002] fait l'hypothèse de quasi-égalité entre la force sortante F_s et la force entrante F_e dans le cas de matériaux métalliques. Cela permet d'admettre que les états de contraintes sont quasi-homogènes (Figure 2.10). Il est alors possible de calculer la contrainte dans l'éprouvette en divisant la force par la section de l'éprouvette (A_{ec}).

$$\sigma = \frac{F_s}{A_{ec}} = \frac{F_e}{A_{ec}} \quad (2.28)$$

Il est aussi possible d'obtenir la vitesse de déformation au cours de l'essai à partir de la vitesse des faces de l'échantillon. La déformation est alors intégrée car la longueur initiale de l'échantillon l_{ec0} est connue.

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt = \int_0^t \frac{v_s + v_e}{l_{ec0}} dt \quad (2.29)$$

Une courbe contrainte déformation peut alors être tracée. Pothnis [Pothnis 2011] donne un exemple sur un alliage d'aluminium (Figure 2.11).

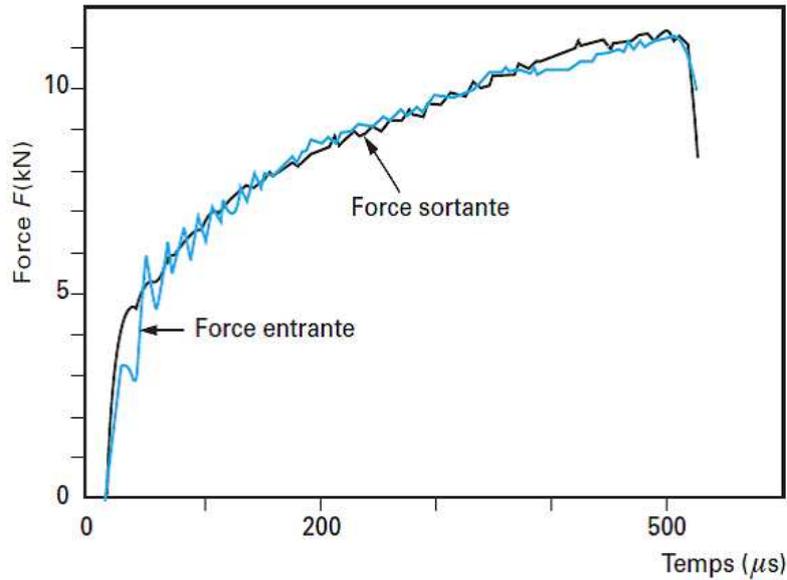


FIGURE 2.10 – Force sortante et force entrante appliquées à l'éprouvette en fonction du temps [Gary 2002]

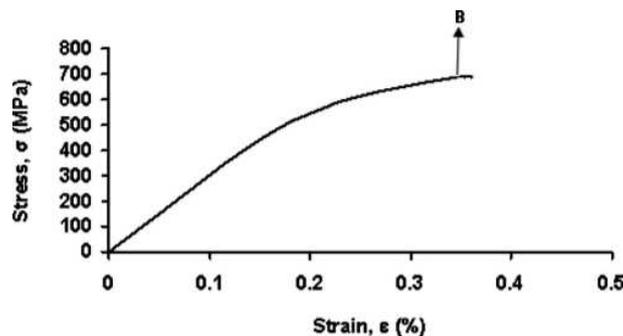


FIGURE 2.11 – Courbe de traction obtenue à l'aide d'une barre d'Hopkinson [Pothnis 2011].

2.2.2 Les éprouvettes de compression

L'essai le plus simple sur barre d'Hopkinson est un essai de mise en compression d'éprouvettes (Tableau 2.6). Jeunechamps [Jeunechamps 2008] effectue des essais de compression sur une barre d'Hopkinson pour caractériser du fer REMCO. Il identifie les paramètres des lois de Zerilli-Armstrong et Johnson-Cook. Les vitesses de déformation maximales sont de 2000 s^{-1} . Cette vitesse $\dot{\epsilon}$ est calculée à partir de la division de la différence de vitesse ΔV entre les deux extrémités de l'éprouvette par la longueur de l'échantillon l_{ec0} : $\dot{\epsilon} = \Delta V / l_{ec0}$. Zhang [Zhang 2008] établit le comportement à l'impact d'un alliage d'aluminium de désignation 2519. Pour cela, il utilise deux types d'éprouvettes cylindriques pour obtenir diverses vitesses de déformation : 630 s^{-1} , 4300 s^{-1} et 5800 s^{-1} . Il étudie aussi l'influence de la température sur le comportement et identifie ainsi une loi de type Cowper-Symonds. Bouix [Bouix 2009] utilise les barres d'Hopkinson pour caractériser des échantillons de mousse en polypropylène de densités variables. Les échantillons sont cylindriques de longueur 10 mm et de diamètre 38 mm. Les vitesses de déformation obtenues

Auteur	Matériaux	Dimension éprouvette	Vitesse de déformation maximale
Jeune-champs 2008	Fer Remco de grande pureté	D = 3.175 mm l=10.16 mm	2000 s ⁻¹
Zhang 2008	Al 2519A-T87	D = 8 mm ou 6 mm l=6 mm ou 4 mm	5800 s ⁻¹
Bouix 2009	Mousse en polypropylène	D = 10 mm l=38 mm	1500 s ⁻¹
Gerlach 2011	Ti6Al4V	D = 7.7 mm l = 41,5 mm	non donnée

Tableau 2.6 – Éprouvettes cylindriques de compression pour les barres d’Hopkinson.

sont de l’ordre de 1500 s⁻¹.

Dans un article, Gerlach [Gerlach 2011] propose une méthode pour atténuer le pic d’ondes de déformation induite par l’impact de la barre incidente par l’impacteur. Pour atténuer ce phénomène, il présente une nouvelle gamme d’éprouvettes cylindriques dont la partie utile comporte des brides plus ou moins nombreuses (Figure 2.12). Les éprouvettes sont en alliage de titane Ti6Al4V.

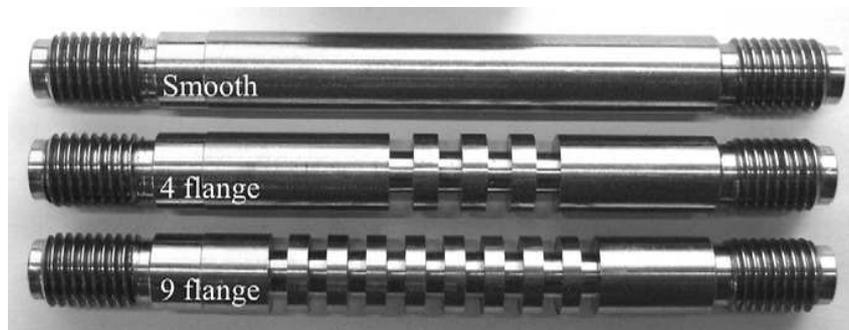


FIGURE 2.12 – Éprouvette de compression modifiée [Gerlach 2011].

Des essais en compression sont donc possibles sur divers matériaux. Cependant les vitesses de déformation qui peuvent être visées sont inférieures à 10⁴ s⁻¹. Un autre moyen de caractérisation doit donc être trouvé pour atteindre des vitesses de 10⁵ s⁻¹.

2.2.3 Les éprouvettes de traction

Les essais sur barre d’Hopkinson sont historiquement des essais de compression dynamique. Des éprouvettes ou des montages spécifiques doivent donc être utilisés pour mettre en traction la zone utile de l’éprouvette. Gary [Gary 2002] évoque le cas de la traction. Il explique que de nombreuses techniques ont été développées mais aucune ne se distingue particulièrement.

Parmi les montages, on peut citer celui utilisé par Arthington [Arthington 2012] pour des essais de traction sur des éprouvettes en alliage de Zirconium, et pour des vitesses de déformation

jusqu'à 5100 s^{-1} . Le montage est composé d'un impacteur inversé : il vient mettre en traction la barre d'Hopkinson (Figure 2.13).

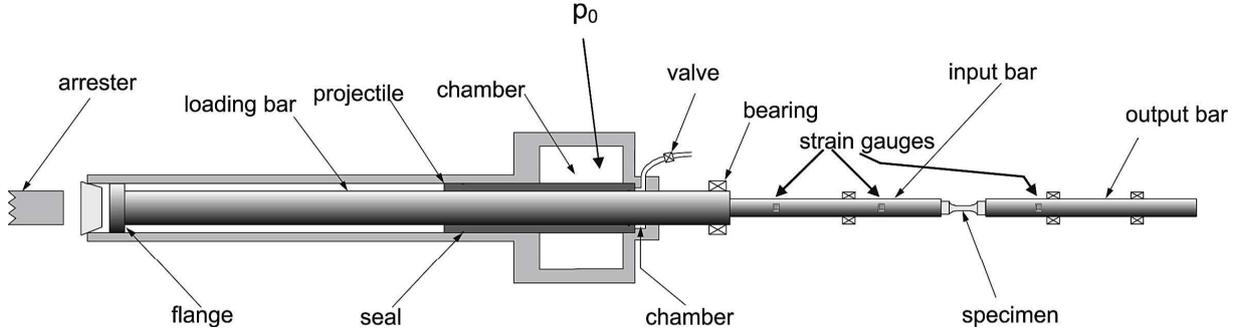


FIGURE 2.13 – Montage de traction d'Arthington [Arthington 2012].

2.2.4 Les éprouvettes de cisaillement ou éprouvettes chapeaux

Introduit par Meyers en 1981, [Meyers 1981]), les éprouvettes de type chapeau permettent une meilleure compréhension des déformations en cisaillement dans les matériaux [Meyers 2001]. Elles sont aussi utilisées pour la caractérisation de matériaux [Hor 2011].

Une éprouvette de type chapeau (Figure 2.14) est une éprouvette cylindrique dont la mise en compression favorise, par un changement brutal de section, la mise en cisaillement d'une zone de l'éprouvette, dite zone de cisaillement. Pour Hor [Hor 2011], cette zone est difficilement prévisible car elle dépend du cycle thermo-mécanique imposé. L'éprouvette chapeau peut être montée sur une barre d'Hopkinson de compression.

Le calcul de la déformation de cisaillement théorique γ_t et de la contrainte de cisaillement théorique τ_t s'effectue à partir de la mesure de la variation de longueur de l'éprouvette Δl et de la force F appliquée à partir des hypothèses suivantes [Hor 2011] :

- La déformation plastique se fait dans la zone de cisaillement de hauteur h et de largeur initiale W (Figure 2.14).

- Les parties supérieures et inférieures de l'éprouvette sont complètement rigides.

$$\tau_t = \frac{F}{\pi h d_m} \quad (2.30)$$

où d_m est le diamètre moyen où se situe la zone de cisaillement.

$$\gamma_t = \frac{\Delta l}{W} \quad (2.31)$$

La vitesse de déformation en cisaillement $\dot{\gamma}_t$ est calculée à partir de la vitesse sur les faces de l'éprouvette v :

$$\dot{\gamma}_t = \frac{v}{W} \quad (2.32)$$

Dans le cas présent, la déformation est une déformation de cisaillement pure. Les tenseurs des contraintes σ_t et des déformations ε_t peuvent donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_t = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{t12} & 0 \\ \tau_{t21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \gamma_{t12} & 0 \\ \gamma_{t21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

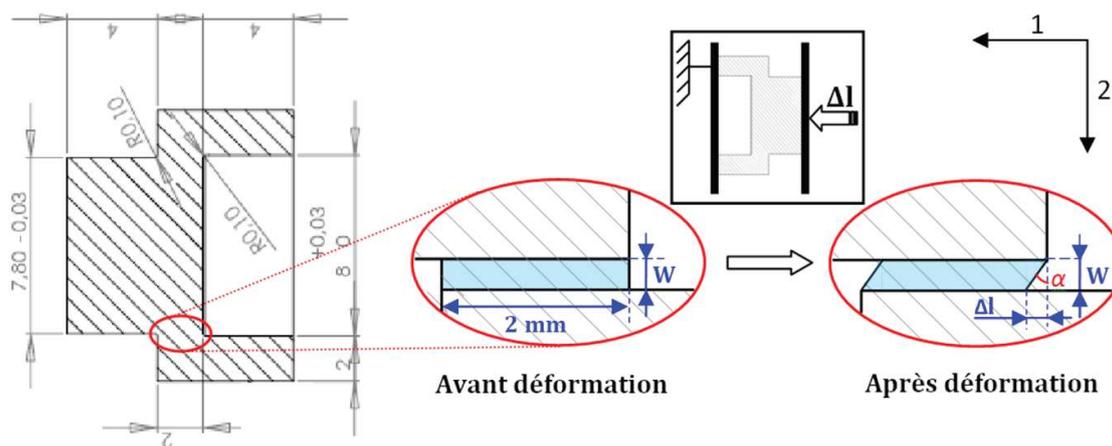


FIGURE 2.14 – Éprouvette de cisaillement avec $h = 2\text{mm}$ [Hor 2011]

Il est possible d'écrire la contrainte σ_{eq} et la déformation équivalente de von Mises ε_{eq} à partir des données théoriques de cisaillement :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3}\tau_t \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_{12} = \frac{\gamma_t}{\sqrt{3}} \quad (2.36)$$

Le tableau 2.7 résume les articles où les auteurs utilisent des éprouvettes chapeaux.

2.2.5 Méthodes inverses d'identification des lois de comportement

Le but des essais de caractérisation est souvent l'identification d'une loi de comportement d'un matériau par méthode inverse. Il est courant que cette identification se base sur un code éléments finis couplé à un algorithme d'identification. Jeanson [Jeanson 2013] identifie les paramètres d'une loi de Johnson Cook pour l'alliage d'aluminium de désignation 1050 par des essais d'expansion de

Auteurs	Type d'étude	Observations	Matériaux
Meyers 2001	Localisation du cisaillement pour un matériau sous sollicitation dynamique : évolution de la microstructure	La localisation des déformations en cisaillement joue un rôle important sous sollicitation dynamique. Les essais avec les éprouvettes chapeaux de Meyers sont facilement reproductibles. Sur une barre d'Hopkinson, les vitesses de déformation en cisaillement sont de l'ordre de 10^5 s^{-1}	Alliage de Titane, acier inoxydable
El-Magd 2006	Caractérisation et modélisation d'alliages d'aluminium 7075, de titane Ti-6Al-4V et de magnésium AZ80	L'éprouvette chapeau est un bon moyen de validation d'une loi de comportement pour une sollicitation en cisaillement.	Alliage d'aluminium 7075,, de titane Ti-6Al-4V et de Magnésium AZ80
Hor 2011	Utilisation d'une éprouvette de type chapeau pour identifier les paramètres d'une loi de comportement	Selon le type de sollicitations utilisées les paramètres de la loi de comportement varient fortement. Il y a auto-échauffement de l'échantillon à grande vitesse de déformation. Les vitesses de déformation en cisaillement atteignent $2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$.	Acier 100Cr6, Acier 42CrMo4, Alliage d'aluminium 2017-T4

Tableau 2.7 – Résumé d'articles sur les éprouvettes de type chapeau.

tubes par magnéto-formage. La méthode d'optimisation utilisée est celle disponible dans le logiciel LS-Dyna, LS-Opt. Celui-ci fournit un jeu de paramètres à un modèle numérique ce qui permet de calculer une fonction coût qui est minimisée par un algorithme d'optimisation hybride (combinaison d'un algorithme de recherche global et local par gradient). Zribi [Zribi 2013] identifie les paramètres d'une loi de comportement de Voce à partir d'essais d'hydroformage de tube en alliage d'aluminium de désignation 6063. La procédure de minimisation utilise un couplage entre une loi de minimisation Simplex de Nelder-Mead [Nelder 1965] et d'un modèle éléments finis sous Abaqus. Ghouati [Ghouati 2001] identifie les paramètres d'une loi de comportement pour un procédé de formage des métaux. Un couplage entre un algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt [Marquardt 1963] et un modèle éléments finis est utilisé. Spranghers [Spranghers 2014] effectue des essais d'explosion sur une plaque en alliage d'aluminium d'épaisseur 3 mm. La déformée de la plaque est relevée à l'aide d'une reconstruction par stéréocorrélation. Un couplage entre un modèle de type coque et un algorithme de type Levenberg-Marquardt est utilisé pour identifier les paramètres de trois lois de comportement : la première est une loi de Cowper-Symonds, la deuxième est une loi de Johnson Cook et la dernière une loi de Cowper-Symonds modifiée. Aguir [Aguir 2011] utilise un couplage entre un code éléments finis et un algorithme d'optimisation par réseau de neurones pour une loi de comportement de Karafillis et Boyce. Nussbaum [Nussbaum 2011] identifie les paramètres de la loi de Johnson Cook à partir d'essai sur une barre de Taylor à l'aide d'un couplage avec des algorithmes de type Monte-Carlo et de type Levenberg-Marquardt. Markiewicz [Markiewicz 1998] identifie le comportement d'un tube à base carré sous impact par méthode inverse. Le matériau suit une loi Cowper-Symonds. L'optimisation utilise un algorithme de BFGS [Fletcher 1980]. Hor [Hor 2011] identifie le comportement de deux aciers (42CrMo4 et 100Cr6) et un alliage d'aluminium (2017 T4) par une méthode inverse à l'aide d'un algorithme de minimisation de Levenberg-Marquardt. Dans l'Annexe J, la méthode inverse, par un couplage entre des simulations éléments finis et un algorithme de minimisation BFGS, utilisée dans la ce travaille est présentée.

2.3 Conclusion sur l'état de l'art

Une bibliographie sur les lois de comportement (élasto-visco-plastique, de rupture par endommagement ductile) adaptées aux problèmes dis dynamiques, c'est à dire à grande vitesse de déformation, a été présentée. Elle a permis de conclure que pour des applications de crash et de perforation, les lois de comportement de Johnson Cook et Johnson Cook à la rupture étaient adaptées. Pour identifier les paramètres de ces lois de comportement, il est courant d'utiliser des essais sur barres d'Hopkinson. Une bibliographie sur les moyens expérimentaux d'identification de lois de comportement a permis de conclure que, pour de grandes vitesses de déformation, il est possible d'utiliser des éprouvettes de cisaillement de type chapeau.