



HAL
open science

Etude du comportement de céramiques à blindage sous chargement de compression haute-vitesse par essais d'impact de plaque plan ou sans choc

Julia Genevois

► **To cite this version:**

Julia Genevois. Etude du comportement de céramiques à blindage sous chargement de compression haute-vitesse par essais d'impact de plaque plan ou sans choc. Mécanique des solides [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT : 2023GRALI106 . tel-04524418

HAL Id: tel-04524418

<https://theses.hal.science/tel-04524418>

Submitted on 28 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Énergétique, Procédés, Production

Spécialité :

Unité de recherche : Laboratoire Sols, Solides, Structures et Risques



Etude du comportement de céramiques à blindage sous chargement de compression haute-vitesse par essais d'impact de plaque plan ou sans choc.

Investigation of the behaviour of armour ceramics under high strain-rate compression loading by considering planar or shockless plate-impact experiments.

Présentée par :

Julia GENEVOIS

Direction de thèse :

Pascal FORQUIN

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

Jean-Luc ZINSZNER

INGENIEUR DOCTEUR, CEA Gramat

Co-encadrant

Rapporteurs :

Thibaut DE RESSEGUIER

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Centre Limousin Poitou Charente

Laurent BERTHE

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Ile de France Ouest et Nord

Thèse soutenue publiquement le **19 décembre 2023**, devant le jury composé de :

Pascal FORQUIN

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

Alessandra BENUZZI-MOUNAIX

DIRECTRICE DE RECHERCHE, CNRS Île-de-France Gif-sur-Yvette

Présidente

Thibaut DE RESSEGUIER

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Centre Limousin Poitou Charente

Rapporteur

Laurent BERTHE

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS Ile de France Ouest et Nord

Rapporteur

Alexandre MAITRE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Limoges

Examineur

Julien BAROTH

MAITRE DE CONFERENCES HDR, Université Grenoble Alpes

Examineur

Antonio COSCULLUELA

INGENIEUR DOCTEUR, CEA CESTA

Examineur

Invités :

Benoît Cordeau : INGENIEUR, DG1 Techniques terrestres

Laurent Pierrot : DIRECTEUR RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT, Saint-Gobain



Etude du comportement de céramiques à blindage sous chargement de compression haute-vitesse
par essais d'impact de plaques plan ou sans choc.

*A mes grands-mères,
Lulu et Michèle*

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le mécène de la chaire Brittle Codex, Saint-Gobain, d'avoir financé cette thèse. Sans ces deux organismes, ce travail de recherche n'aurait tout simplement pas été possible. Je tiens également à remercier le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) CESTA pour les échanges enrichissants que l'on a pu avoir.

Bien entendu, ma gratitude va particulièrement à mon directeur de thèse Pascal Forquin et mon co-encadrant de thèse Jean-Luc Zinszner qui ont toujours su m'aiguiller et répondre à mes questions. Merci de m'avoir accompagnée au cours de ces années, de m'avoir encadré dans mes recherches dans les moments d'exaltation, mais surtout dans les moments de doutes qui parfois nous assaillent tout au long de ce travail de marathonien que représente la rédaction d'une thèse.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury présidé par Alessandra Benuzzi-Mounaix, ainsi que les rapporteurs Thibaut De Resseguier et Laurent Berthe pour leurs remarques pertinentes. Je tiens enfin à remercier Alexandre Maitre, Julien Baroth et Antonio Cosculluela pour le temps pris à examiner mon travail et y apporter les corrections nécessaires.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler au sein du laboratoire 3SR sans lesquelles rien n'aurait été possible. Tout d'abord, à la cellule technique, notamment à Pascal Charrier, Jean-Baptiste Chabert et Alexandre Perez qui m'ont aidée, dépannée et sortie de situations parfois délicates ! Merci également aux formidables personnes de l'équipe RV qui m'ont supportée dans tous les sens du terme au cours de tous ces essais ! Grace à vous, Loïc, Florian, les essais ont paru moins longs ! Une pensée reconnaissante pour Charles, toujours présent pour répondre à mes questions numériques et Benoît pour avoir toujours trouvé la solution à tous mes soucis techniques !

Je tiens également à remercier affectueusement tous mes stagiaires sans lesquels ce projet n'aurait pas été possible ! Merci à Marie, Chauhan, Anselme et Théo pour cette belle aventure. Vous avez chacun apporté une touche à cette thèse au cours de vos stages respectifs et vous encadrer a été pour moi un vrai plaisir.

Parce qu'une thèse est aussi une expérience de vie fantastique, je remercie mes collègues et amis du laboratoire pour ces sorties, ces petites pauses thés et ces moments de réconfort, autant de bulles d'oxygène dans les moments de doute. Merci donc à Antoine, Romain, Chiara, Luc, Marilyn, Missom, Menes, Léopold, Guillaume pour ne citer qu'eux !

Je remercie bien évidemment l'ensemble de ma famille pour leur aide et leur soutien tout au long de cette thèse ! Je pense à ma mère bien sûr mais également à ma sœur qui ont été d'un soutien émotionnel infaillible.

Pour finir, car il faut toujours garder le meilleur pour la fin, merci à mon formidable fiancé, Antoine de m'avoir accompagnée durant l'intégralité de cette thèse notamment au cours de sa rédaction compliquée ! Merci pour son amour, sa patience, sa compréhension, son humeur toujours égale, son humour quotidien et plus que tout, merci pour son indéfectible confiance en ma capacité de mener cette thèse à son terme.

Sommaire

1. Introduction et contexte de l'étude	7
1.1 Contexte	7
1.2 Objectifs de la thèse et choix des céramiques étudiées	11
1.3 Présentation des matériaux d'étude	12
1.4 Plan de thèse	17
2. Etat de l'art	18
2.1 Introduction	18
2.2 Caractérisation expérimentale des céramiques	18
2.2.1 Essais quasi-statiques	18
2.2.2 Essais dynamiques	23
2.3 Etude des phénomènes de micro-plasticité au sein des céramiques	35
2.4 Modélisation du comportement de la céramique	38
2.5 Résumé bibliographique	44
3. Mise au point d'essais d'impact de plaques sans choc pour analyse Lagrangienne	45
3.1 Principe de la méthode expérimentale	45
3.2 Présentation du protocole de mesure	46
3.3 Point bibliographique sur les aciers	49
3.3.1 Comportement des aciers sous chargement de compression intense par impact de plaques	49
3.3.2 Procédé de mise en forme des aciers par fabrication additive	51
3.4 Sélection du matériau de la plaque impactrice et du buffer	55
3.5 Dimensionnement numérique des essais pour analyse Lagrangienne	57
3.5.1 Paramètres des simulations numériques	57
3.5.2 Dimensionnement numérique des essais	61
3.6 Essais de validation des plaques impactrices en acier 316L	65
3.6.1 Présentation des essais	65
3.6.2 Validation des plaques impactrices ondulées	67
3.6.3 Analyse Lagrangienne sur acier	70
3.7 Plaques impactrices imprimées en 3D	72
3.7.1 Dimensionnement numérique des plaques impactrices imprimées en 3D	72
3.7.2 Etude de l'influence des méthodes d'impression 3D	75
3.7.3 Etude de l'influence des géométries imprimées en 3D	76

3.7.4	Modélisation d'une analyse Lagrangienne à partir des signaux obtenus lors des essais avec géométries imprimées en 3D	78
3.8	Résultats et discussion	80
4.	Réalisation d'une analyse Lagrangienne à partir d'essais d'impact de plaques sans choc	81
4.1	Introduction	81
4.2	Analyse Lagrangienne sur F99	81
4.2.1	Tests préliminaires : détermination de la HEL	81
4.2.2	Analyse Lagrangienne sur F99	84
4.2.3	Analyse Lagrangienne en configuration inversée sur F99	87
4.2.4	Comparaison avec les essais GEPI	89
4.3	Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD	91
4.3.1	Tests préliminaires : Caractérisation du matériau par essais d'impact de plaques	91
4.3.2	Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD	94
4.4	Conclusions et discussion	96
5.	Essais d'impact de plaques avec jauges de pression	97
5.1	Introduction	97
5.2	Principe d'utilisation des jauges	98
5.2.1	Vérification du facteur de jauge	99
5.2.2	Mise en place des essais	100
5.3	Comparaison des mesures de contraintes axiales par vélocimétrie homodyne et par jauge de pression	102
5.3.1	Test de validation sur acier : mesure de contrainte axiale	102
5.3.2	Tests sur alumine : mesure de contrainte axiale	104
5.4	Mesures de contraintes axiale et radiale par vélocimétrie homodyne et jauge manganin	105
5.5	Conclusions et discussion	108
6.	Modélisation du comportement des céramiques soumises à un impact de plaques	109
6.1	Introduction	109
6.2	Calibration des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour l'alumine F99.7	111
6.3	Comparaison entre données expérimentales et numériques d'essais en configuration lagrangienne et avec jauges sur alumine F99.7	117
6.4	Définition des paramètres des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour le SiC Forceram®	122
6.5	Conclusions et discussion	124

7. Conclusion générale et perspectives	126
<i>Tables</i>	131
Table des figures	131
Index des tableaux	137
Annexes	138
<i>Bibliographie</i>	150
<i>Table des matières</i>	157
Résumé	160
Abstract	161

1. Introduction et contexte de l'étude

1.1 Contexte

L'histoire des matériaux de blindage commence par l'apparition des blindages métalliques, au début du siècle dernier, qui étaient utilisés sous forme de blocs monolithiques ou sous forme de succession de plaques en acier, formant un blindage laminé. Pendant longtemps, l'amélioration des blindages se faisait en augmentant l'épaisseur du matériau de blindage utilisé. Néanmoins, cette technique se heurta à des limites dues à l'augmentation de coût et de poids (Gailly, 1996).

C'est au cours de la guerre du Vietnam que cette problématique resurgit. En effet, notamment dans le cas des unités aériennes, des exigences de poids ainsi que de furtivité se font ressentir afin de mener à bien les opérations (Barron, 1969). Les blindages conventionnels ne pouvaient plus être utilisés. De nouveaux matériaux ont alors été mis au point, pour accroître l'efficacité massique des solutions de protection. Notamment, de nouvelles protections du combattant ont été conçues en recourant à des plaques métalliques relativement légères combinées avec des fibres de verre. Le brevet de Korolick, sorti en 1969 les décrit comme « des stratifiés ou des couches de tissus balistiques en nylon, chevauchant de petites plaques métalliques minces, des plastiques renforcés ou une combinaison de ces matériaux ».

Ces matériaux composites utilisés dans les années 60 ont, par la suite, été améliorés avec l'apparition de nouveaux composites composés de fibres (nylon, fibre de verre) et de céramiques. Ces derniers avaient pour but de fournir une amélioration des propriétés balistiques, notamment en termes de rapport résistance à la pénétration/poids (Roberson, 1995).

De plus, Gailly précise dans son article de 1996 que l'utilisation de céramiques remplaçant les plaques métalliques précédemment utilisées apporte d'autres avantages mécaniques. En effet, les céramiques sont des matériaux durs et très résistants en compression. De plus, il s'agit de matériaux légers à la densité environ deux fois plus faible que l'acier standard. Il a été prouvé que dans le cas de projectiles de petits et moyens calibres à noyau dur (Armor-Piercing projectile) l'utilisation de céramique apportait un gain de masse par rapport à l'acier ou un alliage en aluminium pour une même performance de protection (Figure 1-1, (Forquin, 2003)). Néanmoins, les métaux et les céramiques utilisés en tant que protection conduisent à différents processus de dissipation d'énergie cinétique du projectile. Les métaux vont se déformer plastiquement afin d'absorber l'énergie de l'impact et rompre de manière ductile. A contrario les céramiques conduisent, lors d'un impact à une érosion ou une fragmentation du projectile (Madhu, 2005). De plus, une dissipation d'énergie par déformation du backing complète le processus au sein des blindages bicouches.

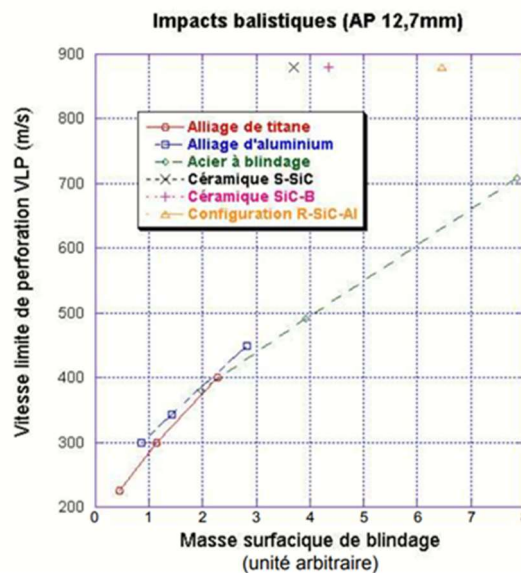


Figure 1-1 : VLP de blindages monolithiques et bi-couche, (Forquin, 2003)

(Rossiquet, 2012) explique dans sa thèse que différentes céramiques sont utilisées dans les configurations de blindage. Elles peuvent être séparées en deux catégories : d'une part, les céramiques non-oxydes (dont les carbures, les nitrures et les borures) se démarquent par de hautes propriétés physiques et de faibles densités. La deuxième catégorie, les céramiques oxydes, notamment l'alumine, se distinguent par leur faible coût et par leurs performances qui restent très correctes pour des applications balistiques.

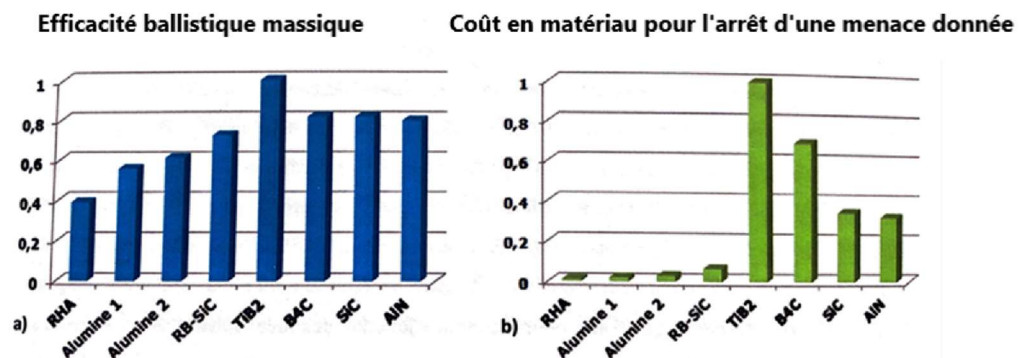


Figure 1-2 : Comparaison des différentes céramiques utilisées pour des applications de type blindage (Rossiquet, 2012)

Ainsi, les céramiques les plus souvent utilisées pour des applications de blindages sont les alumines qui présentent une efficacité balistique massique supérieure à celle des blindages en acier RHA tout en ayant un coût de fabrication modeste. Les céramiques non-oxydes sont plus performantes mais certaines telles que les carbures de bore et de diborures présentent un coût de matière première trop élevé. Le carbure de silicium se distingue quant à lui par d'excellentes performances balistiques massiques combinées à un coût de matière première moins élevé, ce qui en fait un bon candidat pour de nombreuses applications balistiques.

Ces céramiques sont utilisées dans de nombreux domaines en tant que matériau de protection. Elles peuvent être retrouvées dans des protections personnelles comme composant de gilets pare-balles pour les forces de l'ordre ou encore les combattants au sol.

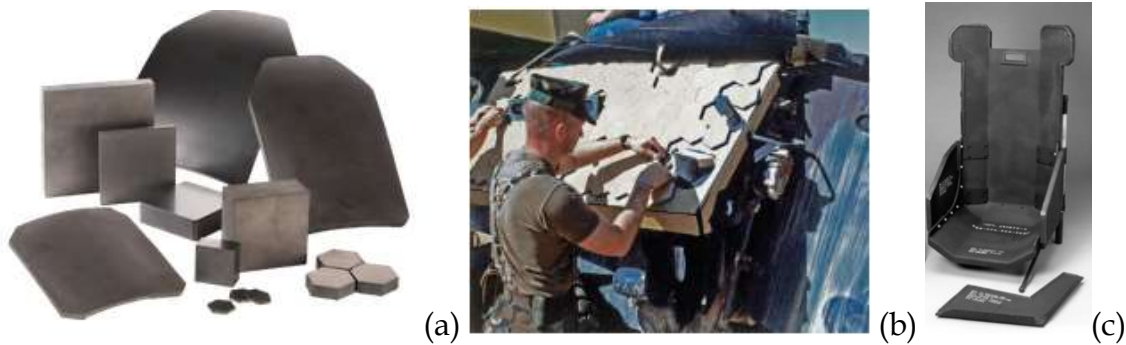


Figure 1-3 : Plaques céramiques en SiC Hexoloy pour protection personnelle et blindage de char (a) ainsi que la mise en place de plaques similaires sur char (b) (QinetiQ). Pour finir siège d'hélicoptère composé de B4C et Kevlar (c) (Gooch, 2011)

Enfin, d'autres utilisations sont possibles que ce soit pour la protection de véhicule militaire ou la mise en place de sur-blindage pour char d'assaut ou pour siège d'hélicoptère blindé.

Lors de l'impact d'un projectile perforant contre un blindage bicouche, la céramique est sollicitée sous un chargement de compression triaxiale puis sous chargement de traction dynamique. L'impact balistique peut-être décomposé en trois phases selon Forquin (Forquin, 2003) :

La première phase correspond à une compression triaxiale très rapide (quelques microsecondes) qui se traduit par des niveaux de pression très élevés (plusieurs GPa à plus d'une dizaine de GPa), ce qui explique la rupture du noyau du projectile. Sous de tels niveaux de chargement, la limite d'élasticité des céramiques est généralement atteinte, ce qui explique que des mécanismes de micro-plasticité couplés à des mécanismes de microfissuration se développent (Coscolluela, 1992) ; (Malaise, 1999).

Deux phases succèdent à cette phase de compression. La deuxième phase correspond à un chargement en traction dynamique dans la céramique conduisant à une fragmentation multiple. Cette fragmentation correspond à un endommagement intense du matériau dont dépend la pénétration du projectile. En effet, cet endommagement intense caractérisé par l'amorçage et la propagation d'un grand nombre de microfissures orientées précède la pénétration du projectile (Forquin et Ando, 2017)

Pour finir, la troisième phase, qui correspond à la phase de pénétration, déplace les fragments présents sur la trajectoire du projectile. Ce dernier, érodé ou fracturé, pénètre dans la céramique pré-fragmentée. Le comportement confiné d'une céramique

pré-fragmentée reste aussi largement inexploré. Les trois phases sont décrites sur le schéma suivant (Figure 1-4 ; (Forquin, 2003)).

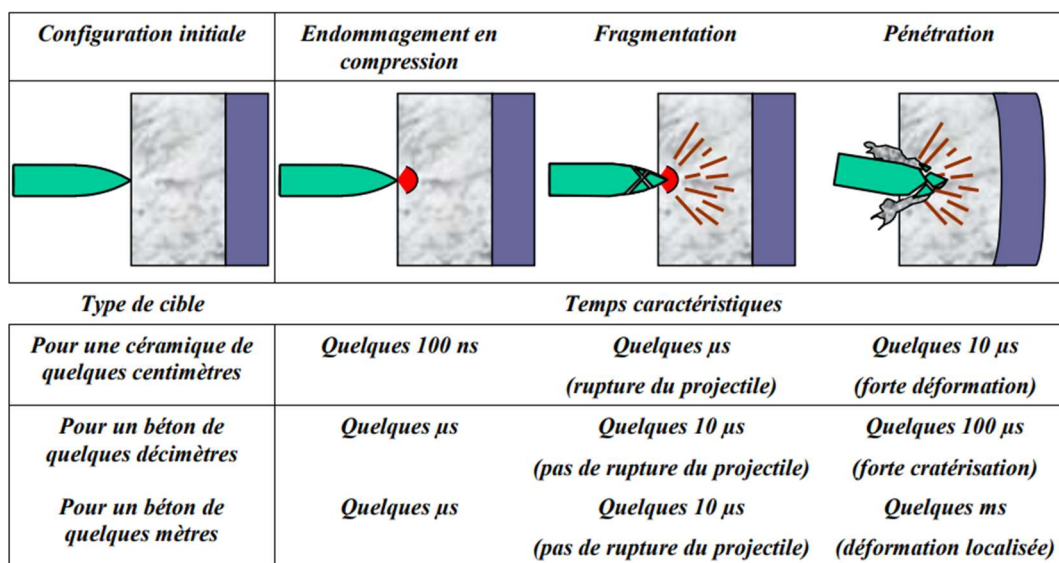


Figure 1-4 : Les différentes phases de chargement d'un impact balistique et leurs temps caractéristiques (Forquin, 2003)

Il existe différents moyens de juger de la performance balistique d'une céramique. L'un de ces moyens consiste à observer la profondeur de pénétration résiduelle du projectile atteinte au sein du backing lors d'un impact sur un blindage bicouche. Ce type d'essai, appelé essai DOP (Depth of penetration), a été développé par Rosenberg (Rosenberg, 1988) et a pour avantage de permettre d'étudier les performances balistiques d'une céramique indépendamment de celles d'un backing souple.

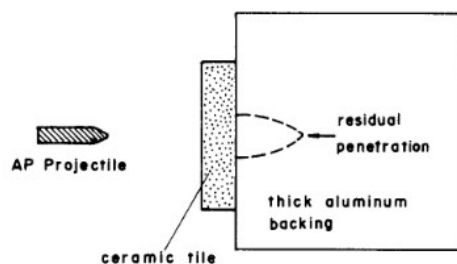


Figure 1-5 : Schéma de la configuration d'essai DOP (Rosenberg, 2015) afin d'établir la performance balistique d'une céramique

Un autre test consiste à mesurer la vitesse résiduelle du projectile après son passage au sein de la céramique à l'aide d'une caméra ultra-rapide (Carton et Roebroeks, 2015). Ce type de test présente l'avantage de ne pas tenir en compte les conditions limites imposées par le backing ainsi que les paramètres dépendant de ce dernier. En effet le backing au sein des essais DOP est considéré comme équivalent à une épaisseur semi-infinie pour limiter les retours d'ondes de détente. Ce faisant, l'essai s'éloigne d'une configuration d'impact balistique réelle où le backing est souple.

Ces types d'essais permettent d'observer si une céramique est performante ou non sans backing, mais ne permettent pas de comprendre quels paramètres matériaux influent sur cette performance. Certaines études ont montré, par exemple, une certaine influence de la dureté sur les performances balistiques des céramiques. Les matériaux les plus durs seraient ceux qui donnent les meilleures performances balistiques d'après Faber (1995). Néanmoins, si d'autres auteurs (Ray, 2005) ont pu confirmer cette tendance, il paraît compliqué de faire un lien direct entre une mesure locale de dureté de grains obtenue en régime quasi-statique et les performances balistiques au vu des conditions de sollicitations intenses et extrêmement rapides que subit la céramique lors de l'essai.

D'autres études ont mis en avant l'influence d'autres paramètres tels que la résistance à la rupture en traction, le module d'Young ou encore la résistance en compression quasi-statique. Ces études soulignent le fait que la céramique possède un comportement complexe qui ne peut pas être expliqué uniquement à l'aide d'une variable matériau. De ce fait, à l'heure actuelle, l'optimisation des céramiques se fait par processus « make-and-shot » c'est-à-dire que les microstructures produites sont directement testées pour caractériser leur performance balistique.

Il apparaît donc essentiel de connaître et de pouvoir caractériser le comportement de la céramique soumise à de haut niveau de contraintes (de l'ordre de celles atteintes lors d'un impact balistique) afin de comprendre le lien entre son comportement mécanique et ses performances balistiques. C'est l'objectif de la présente thèse.

1.2 Objectifs de la thèse et choix des céramiques étudiées

L'objectif de cette étude est la mise au point de nouvelles configurations expérimentales permettant de caractériser sous un fort chargement en compression les matériaux d'études. Le but est de comprendre et caractériser leur réponse mécanique lors de la première phase de chargement de l'impact balistique.

Pour ce faire, deux matériaux céramiques différents ont été soumis à des essais d'impact de plaques avec et sans choc : une alumine appelée F99.7 et une nuance de SiC fournie par Saint-Gobain, le Forceram®. Une autre nuance de SiC provenant du même fournisseur est également évoquée, l'Hexoloy®. Les essais d'impact de plaques sans choc doivent permettre de réaliser une analyse Lagrangienne, un nouveau type d'analyse sous impact de plaques. D'autres configurations comprenant des mesures de vitesses en face arrière par IDF (Vélocimétrie homodyne) combinées à des jauges de pression manganin ont été développées. Le choix de l'alumine pour mettre en place de nouvelles configurations expérimentales s'explique par le fait qu'il s'agit d'un type de matériau communément étudié et largement utilisé comme matériau de blindage. L'un des autres objectifs est également d'évaluer ou d'enrichir des modèles de comportement existants à partir des données récoltées lors de ces essais.

Ce travail a été développé au sein de la chaire Brittle's Codex développée par P. Forquin au sein du laboratoire 3SR (Forquin et al., 2020). Cette chaire créée en 2017 est portée par la Fondation UGA avec le soutien en mécénat de Saint Gobain et LafargeHolcim, et bénéficie d'un partenariat technologique avec le CEA. La chaire a pour but la compréhension du comportement mécanique des matériaux fragiles sous conditions extrêmes. La thèse est également cofinancée par la DGA.

1.3 Présentation des matériaux d'étude

Comme cela a été évoqué précédemment l'étude s'est appliquée à deux matériaux, une alumine et une nuance de carbure de silicium.

Alumine F99.7

Le F99.7 est une alumine dont les échantillons ont été fournis pour cette étude par le CEA CESTA et qui est mise en œuvre dans des configurations de blindage testées à 3SR (projet Rapid Probolics). Cette alumine a fait l'objet de plusieurs publications. C'est notamment le cas de Wallstabe (2011) qui en a étudié le comportement tribologique.

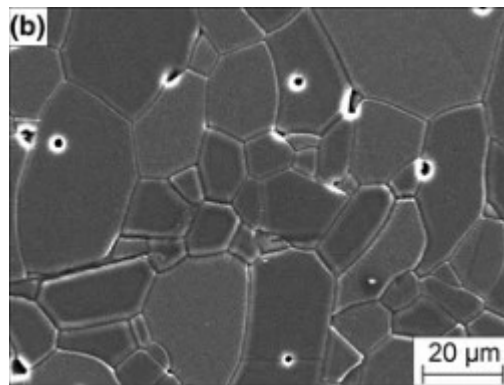


Figure 1-6 : Microstructure de l'alumine F99.7 observée via un microscope MEB, (Wallstabe, 2011)

Il s'agit d'une alumine Al_2O_3 de couleur ivoire, pure à 99.7 % et non poreuse (0 % en volume de porosité ouverte d'après le fournisseur). Elle est composée de grains dont la taille moyenne est de 7,5 μm selon Wallstabe (2011) ou de 10 μm selon la fiche technique du fournisseur. Des observations de quelques échantillons ont été réalisées dans cette thèse à l'aide du MEB Zeiss Gemini GEM500 via électron secondaire de la plateforme CMTC (G-INP). Le but de cette étude était d'observer à l'aide d'imagerie par électrons secondaires le profil de fracture de l'alumine F99.7 (Figure 1-7).

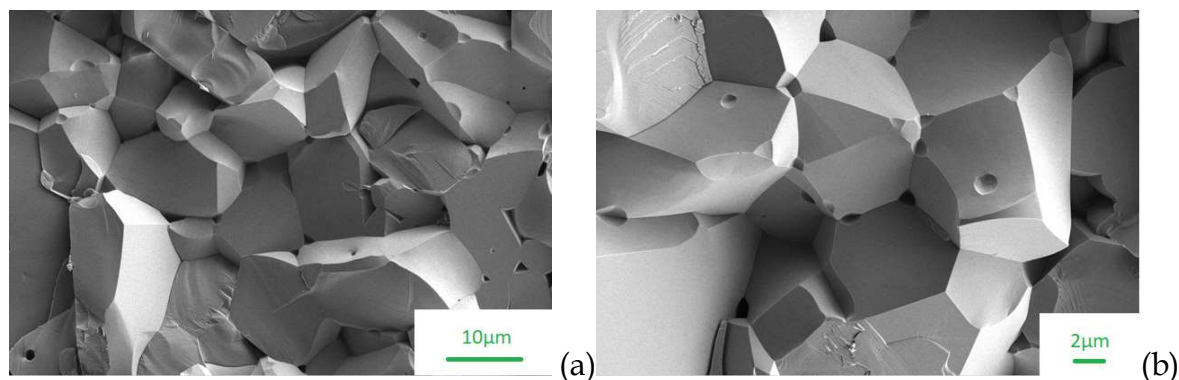


Figure 1-7 : Images en microscopie électronique à balayage de grain d'alumine F99.7 après fracture observé avec EHT (énergie de treshold) de 3.0 kV sous grandissement 1500 (a) et 3000 (b).

Les observations au sein du laboratoire mettent en avant une géométrie très dense avec la présence de petites porosités intra et inter-granulaire de taille inférieure à $1\mu\text{m}$. La taille de grain est plus hétérogène qu'annoncé par la fiche technique fournisseur avec des grains de plus faible taille aux alentours de $10\mu\text{m}$ et des grains de taille plus importante qui avoisinent les $30\mu\text{m}$. Ces derniers restent cependant assez rares dans la microstructure.

Il est intéressant de comparer les propriétés de cette alumine à celles d'autres aluminés telles que l'alumine A16-2 étudiée par Longy (1987) ou la T299 étudiée par Cosculluela (1992). En effet ces deux aluminés sont des aluminés purs à plus de 99,7 % et possèdent les propriétés données dans le Tableau 1-1.

	$d(\mu\text{m})$	$\rho (\text{g/cm}^3)$	Pureté	E(GPa)	ν	$C_{1D\text{wave}}$ (m/s)
<i>F99.7</i> ¹	10	3,90	99,7%	380	0,22	10 574 ²
<i>T299</i>	5	3,86	99,6%	353	0,23	10300
<i>A16-2</i>	4	3,91	99,7%	382	0,23	10670

Tableau 1-1 : Quelques propriétés mécaniques des aluminés F99.7, A16-2 et T299 (Cosculluela, 1992)

Malgré une taille de grain près de deux fois supérieure à celle de l'A16-2 et du T299, l'alumine F99.7 présente des propriétés mécaniques similaire à ces dernières. La pureté et la densité du F99.7 et de l'A16-2 sont identiques, ce qui en fait trois aluminés intéressantes à comparer.

D'autres céramiques seront également étudiées notamment des nuances de SiC.

¹ Données Fournisseur

² Vitesse mesurée au sein du Laboratoire 3SR

Hexoloy® SA et Forceram® SSD

L'étude de ces deux nuances de céramique fait suite aux études menées préalablement dans la thèse de Dargaud (2020), au sein du laboratoire 3SR. Cette thèse a porté sur l'amélioration et la compréhension du lien entre microstructure et mécanismes d'endommagement engendrés sous chargement dynamique pour enrichir un modèle de comportement.

L'Hexoloy® SA est un carbure de silicium produit et fournit par Saint-Gobain. Ce matériau est fabriqué à partir des poudres de SiC-alpha mises en suspension avec des additifs de frittage (notamment des carbures de bore qui sont observés dans la microstructure finale) des agents dispersants et des liants. Par la suite une opération de granulation est conduite afin de mettre en forme la poudre. Cette dernière sera pressée axialement pour obtenir un verre relativement dense. Une étape finale de frittage termine le processus. Cette dernière est effectuée sans pression à des températures supérieures à 2000 °C.

L'Hexoloy® a fait l'objet de plusieurs études. On peut notamment citer Moberlychan (Moberlychan, 1997) qui a étudié l'influence de la phase amorphe du SiC sur certaines de ses propriétés. En effet, contrairement au Forceram® (qui sera abordé plus tard), l'Hexoloy® ne contient pas ou très peu de phase amorphe. Cette étude à montrer que la présence d'une phase amorphe favorisait la propagation intergranulaire des fissures plutôt que transgranulaire. De ce fait, dans le cadre de son étude comparative entre l'Hexoloy® et du ABC-SiC, Moberlychan a montré que la rupture inter granulaire permettait d'augmenter la ténacité du matériau d'un facteur 3.

L'Hexoloy® est composé de grains de taille homogène de 6 µm environ au sein desquels du carbure de bore et du carbone peuvent s'insérer (Rossiquet, 2012), (Zinzsner et al., 2014).

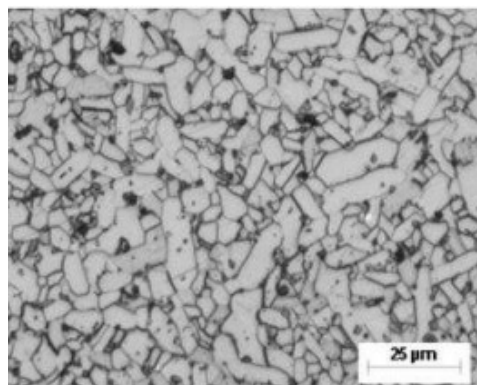


Figure 1-8 : Microstructure d'Hexoloy® SA observée par MEB (Martin, 2004)

Le matériau présente peu de porosités dont la majorité a une taille inférieure à 10 µm.

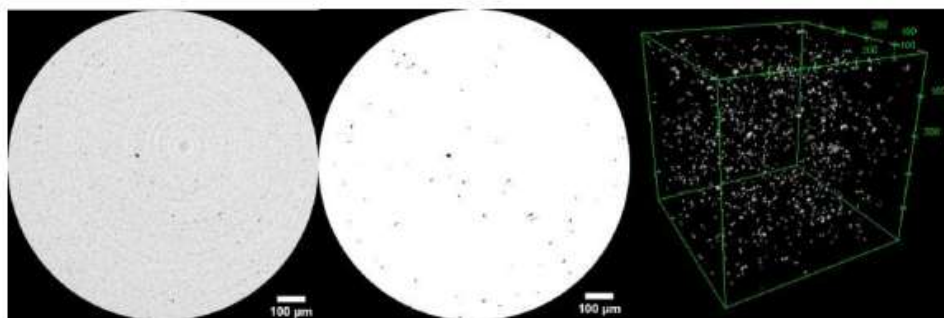


Figure 1-9 : Tranches et reconstructions 3D d'un échantillon d'Hexoloy® SA analysé par microtomographie (Dargaud, 2020)

Les porosités observées correspondent majoritairement à des défauts résiduels liés au frittage. Le matériau est commercialisé par Saint-Gobain pour ses propriétés mécaniques intéressantes qui en font un matériau idéal pour la protection personnelle.

	Hexoloy® SA	Forceram® STD	Forceram® SSD
ρ (g/cm ³)	3.15	2.77	2.82
E_{dyn} (GPa)	430	232	246
ν	0.14	0.14	-
$C_{1D\ wave}$ (m/s)	11680	9150	9340
K_{IC} (MPa. \sqrt{m})	3.0	3.6	-

Tableau 1-2: Propriétés mécaniques principales des SiC d'étude fournie par Saint-Gobain (Dargaud, 2020)

L'Hexoloy® présente un Module d'Young plus élevé que celui des alumines. A contrario le Forceram® présente un module d'Young plus faible que celui des alumines et une densité particulièrement peu élevée. Le Forceram® est également un carbure de silicium produit et commercialisé par Saint-Gobain. Il existe deux gammes de Forceram® le STD et le SSD. Le SSD est un produit qui n'est pour le moment pas commercialisé contrairement au STD. La principale différence entre les deux matériaux provient du procédé d'élaboration qui conduit à une distribution différente des porosités que ce soit en termes de fraction volumique globale ou de distribution locale.

Le Forceram® est principalement constitué d'une matrice de liant céramiques, de grains de SiC de différentes tailles (représentant 68 % du volume) et d'un important volume poreux (10 %). La phase liante est générée in situ par un processus de réaction solide-gaz. Des grains fins de SiC viennent se former au sein de cette phase qui vient s'immiscer entre les plus gros grains de SiC densifiant le produit final. Le Forceram® SSD présente une porosité ouverte réduite de 9 % par rapport à son homonyme.

La microstructure des deux Forceram[®] est extrêmement hétérogène avec une microstructure remarquable à plusieurs échelles.

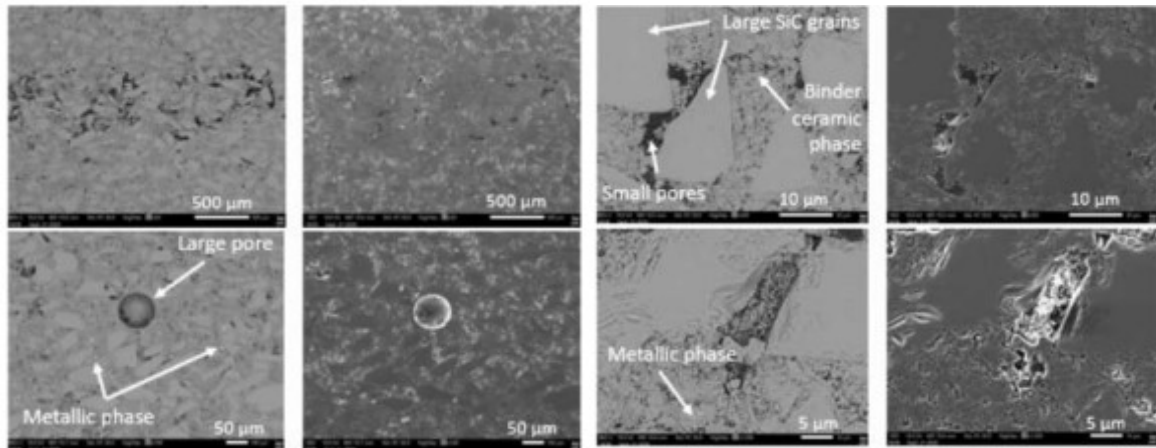


Figure 1-10 : Image MEB de Forceram[®] SSD sous quatre différentes optiques via BSE (backscattered electrons) et SE (scanning électrons) pour observer le contraste chimique

Dans un premier temps des grains de SiC assez larges de 50 μm à 150 μm et venant du matériau à vert sont observables. Ces derniers sont accompagnés de porosités pouvant parfois atteindre jusqu'à 70 μm. Une autre phase céramique secondaire est présente et contient des grains de SiC de plus petite taille. Cette phase céramique ne permet pas la densification complète de la microstructure. De ce fait un réseau poreux est également présent à plus faible échelle. Enfin, des zones métalliques résiduelles sont visibles en blancs sur la Figure 1-10.

Dans la gamme du Forceram[®] STD un plan de porosité appelé parting-line est présent dans le plan de symétrie des échantillons. Ce plan de porosité est moins présent au sein du Forceram[®] SSD selon les études tomographiques menées par Dargaud (2020) qui ont révélé un plan de 500 μm d'épaisseur au sein d'un carreau de 7 mm d'épaisseur.

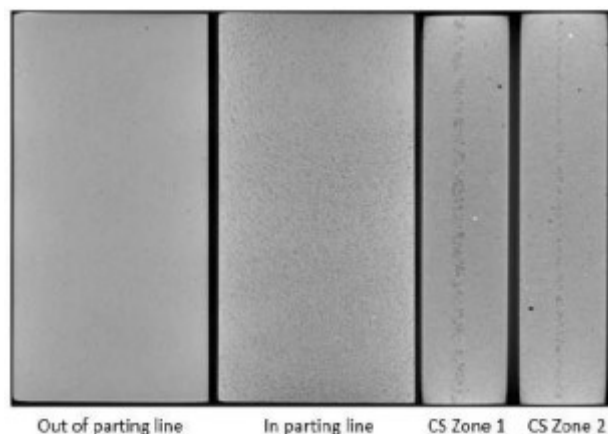


Figure 1-11 : Tranches d'un morceaux de Forceram[®] SSD sous tomographie (Dargaud, 2020)

Le plan de porosité correspond à 0,07 % du volume des échantillons de Forceram[®] SSD. Très peu de porosités sont observées aux abords de ce plan médian. La répartition

de la phase métallique est quant à elle homogène à travers l'échantillon. (Dargaud, 2020).

L'alumine F99.7 ainsi que le Forceram[®] SSD ont servi de matériaux d'études dans les différents travaux expérimentaux de ce projet. L'alumine étant un matériau homogène dont la LEH (Limite Élastique d'Hugoniot) est relativement modeste, ce matériau a servi de référence pour la mise au point de configuration expérimentale. Par la suite, certaines de ces configurations expérimentales ont été appliquées à des nuances de SiC du fait de leur forte utilisation dans le domaine de la protection balistique. L'Hexoloy[®] est un produit commercialisé depuis la fin du vingtième siècle et bien connu. C'est pourquoi il est intéressant de le comparer au Forceram[®] qui, par sa microstructure particulière, se révèle être un candidat particulièrement intéressant.

1.4 Plan de thèse

Le deuxième chapitre présente un état de l'art concernant l'étude des céramiques soumises à des chargements de compression. Les différentes techniques expérimentales existantes sont présentées pour caractériser le comportement en compression des céramiques. Les phénomènes de plasticité générés dans de telles conditions sont exposés. Les différents modèles de comportement utilisés pour décrire la réponse mécanique des céramiques dans ces conditions sont évoqués.

Dans le troisième chapitre, les éléments nécessaires à la réalisation des essais d'impact de plaques sans choc (plaques impactrices ondulées, buffer) sont étudiés expérimentalement et numériquement. Les moyens expérimentaux mis en œuvre sont décrits. Le protocole expérimental d'essai d'analyse Lagrangienne est testé sur acier afin de valider la méthode.

Dans le quatrième chapitre, les essais par impact de plaques plan et par impact de plaques sans choc sont pratiqués sur les céramiques. Par la suite, une configuration permettant de réaliser une analyse Lagrangienne est considérée. Les résultats obtenus par cette nouvelle méthode sont comparés à d'autres techniques présentent dans la littérature.

Au cours du cinquième chapitre, des essais avec jauges de pression permettant l'obtention de profil de contraintes radiale et axiale sont présentés. Des essais préliminaires sont mis en place sur un acier. Pour finir, des expériences sont menées sur la céramique F99.7 afin de pouvoir obtenir des données supplémentaires sur la contrainte équivalente au cours des essais d'impact de plaques.

Le sixième chapitre porte sur l'identification ou l'enrichissement de 2 modèles de plasticité à partir des différents résultats obtenus au cours de cette thèse sur les céramiques étudiées. L'étude numérique menée ainsi que sa confrontation avec les données expérimentales sont au cœur de ce chapitre.

2. Etat de l'art

2.1 Introduction

Au cours de la première phase de l'impact balistique, la céramique va subir un chargement de compression triaxiale intense suivie d'un chargement en traction dynamique conduisant à la fragmentation du matériau (Forquin, 2003). Il est donc nécessaire de pouvoir caractériser le comportement des céramiques soumises à chacun de ces chargements.

Une première partie de cet état de l'art porte sur les méthodes de caractérisation expérimentale et sur les moyens d'essais permettant de caractériser le comportement des céramiques. Les moyens d'essais évoqués sont dans un premier temps ceux utilisés pour des essais quasi-statiques puis ceux mis en œuvre pour des essais dynamiques permettant de caractériser les céramiques à différentes vitesses de déformation. La liste des moyens d'essais présentés est non-exhaustive et se focalise tout particulièrement sur les essais d'impact de plaques qui sont au cœur de cette étude. Par la suite, une courte étude bibliographique concerne les phénomènes de plasticité observables sous haut niveau de contrainte. Pour finir, une discussion est proposée sur les modèles de comportement existants pour caractériser les matériaux céramiques lors d'essais balistiques.

Afin de caractériser les propriétés physiques des céramiques et d'étudier leur comportement, divers tests et moyens d'essais peuvent être mis en place.

2.2 Caractérisation expérimentale des céramiques

2.2.1 Essais quasi-statiques

Dans le cadre d'impact balistique, la céramique est sollicitée par un chargement dynamique transitoire. Cependant même dans le cas d'application balistique il reste important de connaître le comportement de la céramique soumis à un chargement quasi-statique. Une comparaison avec des essais dynamiques permet de caractériser les effets résultant de la vitesse de déformation.

2.2.1.1 Essais de dureté

Les essais de dureté sont l'une des méthodes les plus rapides et les moins coûteuses pour définir les propriétés mécaniques des matériaux en se focalisant généralement sur un petit volume. Il existe de nombreuses méthodes (Marten, Shore, Brinell, Moss, Meyer Rockwell...) pour définir la dureté d'un matériau. (Verdins, Kanaska, 2013). La technique la plus répandue des essais de dureté appliqué aux

céramiques est l'essai par indentation. Ce dernier consiste à appliquer une charge fixe sur un pénétrateur en diamant et à mesurer, à l'aide d'un microscope ou d'une loupe, la dimension de l'indentation résultante sur la surface du matériau d'essai après déchargement. Cela peut se traduire par la formule :

$$H = \frac{P}{A} = \alpha \frac{P}{d^2} \quad 2-1$$

où H représente la dureté, P la charge appliquée, A la surface de contact avec l'indentateur, d la longueur des diagonales (selon les géométries utilisées) et α un facteur correctif. Dans le cadre des essais de dureté Vickers $\alpha = 1.8544$ dans le cadre d'essais de type Knoop $\alpha = 14,23$.

Parmi les différentes géométries de pénétrateurs utilisées pour les essais de dureté, le pénétrateur Vickers est le plus usuel. La dureté n'est pas une constante physique ; sa valeur dépend non seulement du matériau testé, de la charge appliquée mais aussi de la méthode d'essai. Ainsi, la dureté dépend des propriétés mécaniques du matériau notamment de sa limite d'élasticité. Néanmoins, ces propriétés ont un impact plus ou moins important selon la méthode de dureté utilisée. Parfois des variations dans les mesures de dureté sont également visibles pour une même méthode. A titre d'exemple, lors de tests de dureté Vickers sur différentes céramiques l'effet de taille d'empreinte est généralement observé : lorsqu'une charge très faible est utilisée, la dureté mesurée est généralement élevée ; avec une augmentation de la charge d'essai, la dureté mesurée diminue (Gong et Wu, 1999). D'autre part, les tests comme les tests Vickers ou les essais Rockwell (avec une géométrie de pointe différente) font apparaître des écarts importants selon les utilisateurs. Néanmoins, il est possible de réduire l'influence de l'expérimentateur et de réduire la dispersion entre les laboratoires (si la réponse à la dureté des matériaux testés n'implique pas d'écaillage ou de fissuration) à l'aide de formations adéquates (Ullner et al., 2001).

2.2.1.2 Essais de compression simple

Les essais de compression simple regroupent différents montages expérimentaux ayant pour but de solliciter les céramiques en contrainte uniaxiale sous un chargement quasi-statique ou dynamique. Un des problèmes de cet essai appliqué aux céramiques réside dans les niveaux de contrainte de compression élevés à atteindre, tout en minimisant les contraintes de tractions. En effet, la contrainte à rupture en compression est environ dix à vingt fois plus élevée qu'en traction pour la plupart de ces matériaux. Les essais de compression simple ont été abordés par de nombreux auteurs tel que Lankford (1977), qui a notamment étudié l'effet de la température sur la résistance en compression simple. Ce dernier a montré que la rupture par compression à température ambiante dans l'alumine poly-cristalline dépend de la vitesse de déformation. De plus, l'auteur a observé que la température tout comme la vitesse de déformation pouvait influencer l'amorçage des microfissures provoquant la rupture. A basse température (<400 K) les points d'intersection des

jointes de grains et des marches de maclage semblent être le lieu d'amorçage. A contrario pour des températures au-delà de 1000 K, une rupture est provoquée de manière intergranulaire.

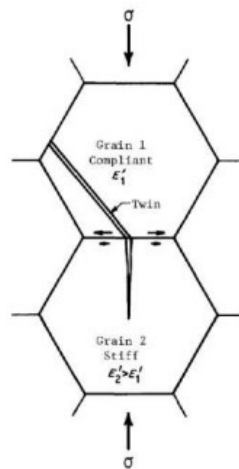


Figure 2-1 : Jonction entre les joints de grains et les macles (Lankford, 1989)

Plusieurs paramètres influencent le niveau de contrainte à rupture telles que la géométrie de l'éprouvette, les précautions prises au niveau du contact enclume/éprouvette ainsi que les dimensions des éprouvettes. Ainsi, au cours de sa thèse, Cosculluela (1992) a testé différentes géométries d'éprouvette de compression et en a déduit que la géométrie cylindrique n'était pas forcément la plus optimale pour étudier la compression. En effet, les résultats obtenus avec une géométrie cylindrique peuvent être influencés par les conditions de contact. C'est pour cela que de nouvelles géométries d'éprouvette ont été proposées. Ainsi en 1989, un nouveau test, utilisant un échantillon en forme d'haltère, a été développé et a permis de mesurer avec succès la résistance de Al_2O_3 , B_4C , TiB_2 et SiC (Tracy, 1989). Par la suite, une géométrie diabolo mise au point par Denoual (1998) a été analysée numériquement et appliquée à 2 nuances de SiC dans la thèse de Forquin (2003). Cette géométrie évite toute influence des conditions de contact éprouvette/enclume sur la résistance en compression simple mesurée.

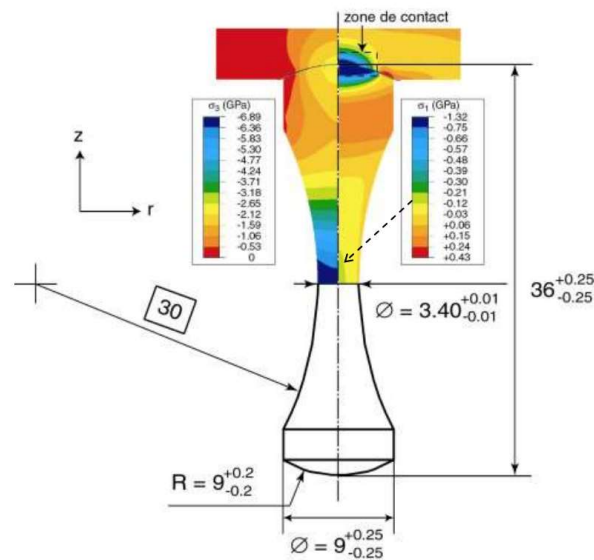


Figure 2-2 : : Géométrie utilisée par (Forquin, 2003) et isocontours associés aux 3^{ème} et 1^{ère} contraintes principales

Les avantages d'une telle géométrie sont d'obtenir des contraintes radiales et orthoradiales négatives ou nulles au niveau du ligament, afin de s'assurer que la rupture n'est pas induite par des contraintes de traction. De plus, la contrainte axiale dans le ligament est environ 50 fois plus élevée que les autres contraintes ce qui assure un état de contrainte quasi-uniaxiale dans cette zone. Finalement, la forme diabolo de l'éprouvette permet de réduire les conditions de contact au sein des têtes de l'éprouvette.

Néanmoins, même avec une telle géométrie, la rupture due au chargement de compression n'est pas assurée. Une analyse par imagerie ultra-rapide et pas simulation numérique couplée à une approche probabiliste a permis à Forquin (2003) de conclure que la rupture des échantillons serait due à des contraintes de traction induites causées par la présence de défauts de rugosité.

La géométrie diabolo n'est donc pas une géométrie parfaite, mais elle permet d'éviter une rupture prématurée en raison de contraintes de traction au cœur de l'échantillon. Ce type de géométrie pourrait d'ailleurs être adapté et utilisé au cours d'autres essais tels que des essais triaxiaux.

2.2.1.3 Essais triaxiaux

Les essais de compression triaxiale sont réalisés en appliquant dans un premier temps une pression hydrostatique à l'échantillon à laquelle s'ajoute un chargement axial dans un deuxième temps. Ainsi, cet essai permet de caractériser la contrainte déviatoire (différence des contraintes principales) maximale en fonction de la pression de confinement. Heard et Cline (1980) ont caractérisé la résistance en compression triaxiale de céramiques telles que l'alumine ou le BeO par l'intermédiaire d'éprouvettes cylindriques et à l'aide de pression de confinement atteignant jusqu'à 1 GPa, le tout à température ambiante (25°C). Certains des résultats obtenus peuvent être observés sur la Figure 2-3.

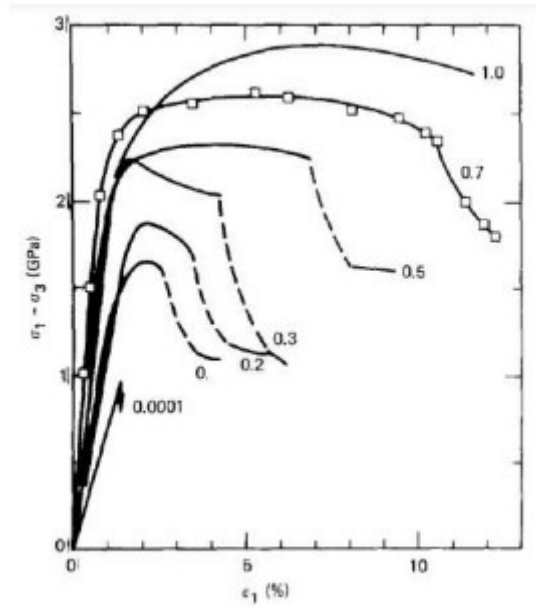


Figure 2-3 : Résultats obtenus par Heard et Cline (1980) à l'aide d'essai triaxiaux sur un échantillon de BeO sous des pressions de confinement allant de 0 à 1 GPa

Ces résultats montrent que l'application d'une pression hydrostatique, même modérée, peut jouer un rôle important sur le comportement de certains matériaux comme le BeO. On peut observer que pour un matériau qui est d'ordinaire fragile à température ambiante, un comportement plastique apparaît sous fort confinement. Plus récemment, Brannon et Lee (2005) ont pratiqué ce genre d'essais sur des SiC à température ambiante à partir d'échantillons cylindriques et à une pression de confinement de 350 MPa. Le chargement axial de l'échantillon a été réalisé à une vitesse de déformation de $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Les déformations axiales et latérales ont été mesurées à l'aide de rosettes de jauge de déformation collées sur l'échantillon. Un résultat typique de courbe contrainte/déformation peut être observé sur la Figure 2-4.

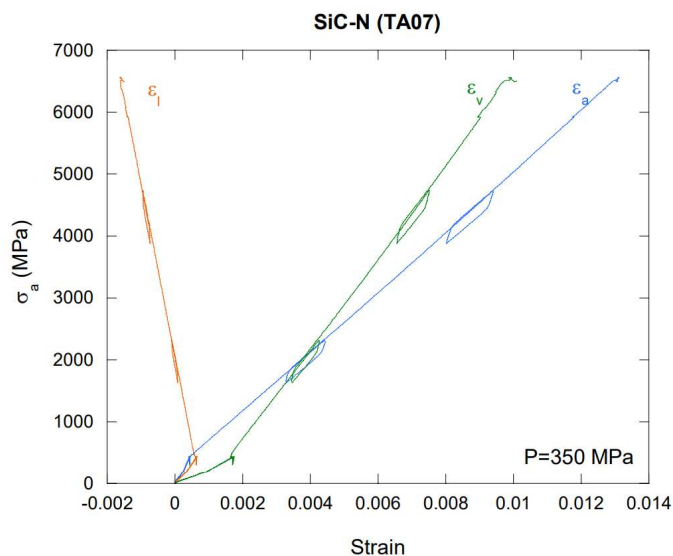


Figure 2-4 : Comportement d'une céramique SiC soumise à un essai triaxial selon (Brannon, Lee, 2005)

Ces courbes se composent de trois parties. La première correspond à une compression hydrostatique de l'échantillon jusqu'à une pression de confinement ici de 350 MPa. La seconde partie correspond à la réponse linéaire élastique sous essai triaxial, jusqu'à ce que la contrainte limite soit atteinte. La dernière partie correspond à la rupture de l'échantillon. Le faciès de rupture des échantillons de l'expérience a montré que les fractures sont orientées majoritairement dans la direction axiale. Néanmoins, le réseau de fractures axiales est connecté à un plan de rupture en cisaillement.

2.2.2 Essais dynamiques

Les essais dynamiques sont utilisés pour générer des chargements à haute vitesse de déformation. Le but poursuivi dans ces essais est de déterminer si les propriétés mécaniques comme la limite d'élasticité sont dépendantes de la vitesse de chargement.

2.2.2.1 Essais aux barres de Hopkinson

Les essais SHPB de compression aux barres de Hopkinson ont été développés au milieu du XX^{ème} siècle par Kolsky en 1949. Ces essais permettent de déterminer la résistance en compression uniaxiale des matériaux à hautes vitesses de déformation (supérieures à 100 s⁻¹). C'est pourquoi ces essais sont considérés comme des essais dynamiques. Ce type d'essais a été appliqué aux céramiques par Cosculluela (1992). Le montage est constitué d'une barre d'entrée et d'une barre de sortie. Un troisième barreau, appelé « impacteur » impacte la barre d'entrée générant une onde de compression élastique transmise en partie au matériau testé et à la barre de sortie. L'auteur s'est servi de ces essais pour déterminer la résistance en compression simple des céramiques. Le matériau des barres est choisi de manière qu'elles restent élastiques (petites déformations) même si l'échantillon lui-même peut être soumis à des déformations importantes. Cela signifie que des jauges de déformations peuvent être utilisées de manière répétée pour mesurer les signaux dans les barres. L'expression de la contrainte nominale dans l'échantillon est alors la suivante (Li et al., 2020.) :

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad 2-2$$

où A_s (m²) est la section transversale de l'échantillon, A_0 (m²) est la section transversale de la barre de sortie et ε_t est la déformation transmise résolue dans le temps.

D'autre part, les barres SHPB peuvent servir de support à de nombreuses autres expériences permettant d'appliquer d'autres chargements que la compression simple. Par exemple, Farbaniec (2017) a développé un essai afin d'appliquer un état de contraintes biaxial sur la céramique en utilisant un confinement (Figure 2-5).

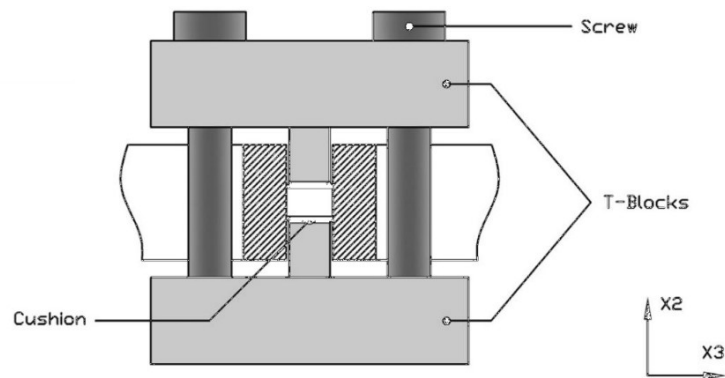


Figure 2-5 : Schématisation des configurations permettant un état de contrainte biaxiale lors d'essais par barres de Hopkinson (Farbaniec, 2017)

D'autres auteurs tel que Chen (Chen and al., 2010) ont mis au point une configuration expérimentale permettant d'appliquer un chargement triaxial.

Si les bancs d'essais SHPB constituent des outils faciles d'utilisation, ils s'avèrent peu adaptés pour étudier le comportement des céramiques. En effet utilisés en compression simple, ils présentent le même défaut de leur contrepartie quasi-statique à savoir qu'un doute persiste sur la cause de rupture des échantillons : la rupture est-elle due à des contraintes de compression, à des contraintes de traction induite ou bien à des défauts de surface de l'éprouvette ?

2.2.2.2 Essais d'expansion sphérique divergente

Les essais d'expansion sphériques pyrotechniques sont des essais permettant de soumettre un matériau à la propagation d'une onde longitudinale sphérique divergente. Ces essais génèrent des niveaux de contrainte proches de ceux occasionnés par impact balistique, et peuvent être divisés en plusieurs phases. Durant la première phase, un état de déformation uniaxiale est appliqué. Une activité microplastique apparaît et contribue à l'effondrement des pores initiaux (Malaise, 1997). Pendant la deuxième phase de chargement, un état de compression axiale et de biextension perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde laisse s'amorcer de se propager les microfissures. Certains auteurs tel que Malaise ont proposé une modélisation de ce genre d'essai à partir de données expérimentales relevées soit à l'aide de mesures d'interférométries laser soit à l'aide de jauges manganin piezorésistives.

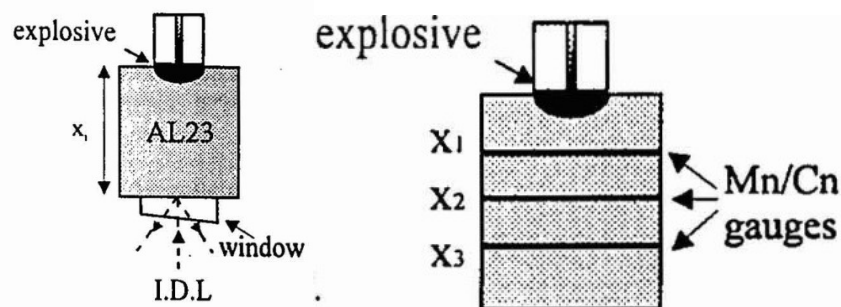


Figure 2-6 : Schématisation des expérimentations d'expansion sphérique divergente de (Malaise, 1997)

D'autres auteurs ont également mis en place des essais d'ondes sphériques divergentes avec un dispositif expérimental permettant de récupérer l'échantillon après l'essai au moyen d'un sarcophage en acier qui entoure l'échantillon (Collombet et Tranchet, 1994). Ces essais en configuration fermée ont permis d'analyser les mécanismes d'endommagement en compression et en traction avec notamment la présence d'une activité microplastique observée au voisinage de l'explosif. Cette activité a été observée par Malaise (1999) à travers la présence d'activation de plans de glissement au sein du SiC ainsi que par Cosculluela (Cosculluela, 1992) à travers la présence de maillage et de dislocations au sein de l'alumine.

Néanmoins, même si ce genre d'essais permet de recréer des niveaux de contrainte proches de ceux d'impacts balistiques, ils restent compliqués à mettre en place. De plus, ce genre d'essai ne permet pas d'appliquer un chargement contrôlé sur les céramiques à tester.

2.2.2.3 Essais d'impact de plaques

A. Essai d'impact de plaques plan avec mesure interférométrique

L'impact de plaques est une expérience qui consiste à projeter une plaque nommée plaque impactrice contre une seconde plaque cible. L'expérience fait intervenir de hautes vitesses de déformation (de l'ordre de 10^{-5} s^{-1}) et constitue la méthode expérimentale la plus utilisée pour caractériser la résistance à l'écaillage (Dargaud, 2020) et la Limite d'Elasticité d'Hugoniot des matériaux fragiles sous choc (Gautam et al., 2017). La limite d'élasticité d'Hugoniot (LEH ou HEL, Hugoniot Elastic Limit) est définie comme la contrainte axiale seuil à partir de laquelle un comportement inélastique est observé à l'échelle macroscopique. Cette dernière peut être déterminée à l'aide d'une mesure de vitesse matérielle en face arrière de la plaque impactée (en l'absence de matériau fenêtre) selon la formule suivante (Taylor et Rice, 1963) :

$$\sigma_{LEH} = \frac{1}{2} \rho_0 C_L U_{LEH} \quad 2-3$$

où σ_{LEH} est la LEH (en Pa), ρ_0 la masse volume initiale du matériau (en kg/m^3), C_L la célérité des ondes longitudinales (en m/s) et U_{LEH} la vitesse particulière du matériau mesurée en face arrière (également appelée vitesse matérielle) correspondant à la LEH (en m/s).

La vitesse particulière peut être effectuée à l'aide d'un système d'interférométrie laser, tel que le VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector), ou système d'interférométrie PDV (Photonic Doppler Velocimetry), qui peut être pointé sur la surface arrière de l'échantillon impacté pour enregistrer la vitesse matérielle. Dans le cas où un matériau fenêtre est utilisé une correction d'impédance doit être appliquée :

$$\sigma_{LEH} = \frac{Z_c + Z_f}{2} U_{LEH} \quad 2-4$$

où Z_c l'impédance mécanique du matériau cible et Z_f l'impédance mécanique du matériau fenêtre.

L'utilisation de matériau fenêtre est courante dans les expériences d'impact de plaques (Kipp et Grady, 1989). En effet, l'utilisation d'un matériau fenêtre permet de limiter les ondes de détente dans le matériau à caractériser. Ces ondes de détente modifient notamment les caractéristiques des ondes plastique incidentes. Ainsi, en l'absence de fenêtre, seule la partie élastique du signal est directement exploitable. Différents matériaux peuvent être utilisés en tant que matériaux fenêtre, il faut néanmoins que ces derniers soient transparents dans la gamme de longueur d'onde du laser utilisé (1550nm en PVD, 532nm pour le VISAR) et qu'ils aient une impédance proche du matériau cible pour minimiser l'amplitude de l'onde réfléchi à l'arrière du matériau d'étude. De ce fait, le LiF, le quartz et le saphir (Jensen et al., 2007) peuvent être considérés comme matériau fenêtre tout comme le spinelle. Des travaux antérieurs ont utilisé également du PMMA pour remplir cette fonction (Bourne et al., 1995).

La vitesse à la LEH est facilement observable sur le profil de vitesse en face arrière comme on peut le voir sur la Figure 2-7.

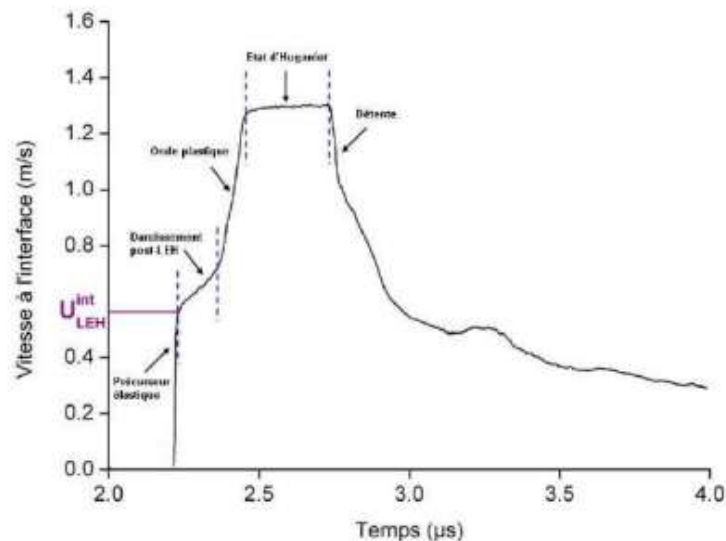


Figure 2-7 : Signal typique de vitesse de la surface arrière du matériau d'étude lors d'un essai d'impact de plaques

Sur la Figure 2-7, sont représentées les différentes étapes observées lors d'un l'impact de plaques tel que le décrit Grady et Moody (1996) : dans un premier temps le précurseur élastique précède la rupture de pente caractéristique de la LEH. Par la suite un durcissement post LEH est observé suivi d'une onde plastique. Pour finir l'état d'Hugoniot est atteint avant la phase de détente.

D'autres auteurs se sont également intéressés à la limite d'élasticité d'Hugoniot. C'est le cas notamment de Fujii (2003) qui a étudié le lien entre la LEH et d'autres paramètres telles que la vitesse de la plaque impactrice au cours d'impact de plaques. Après avoir fait varier divers paramètres tels que la vitesse d'impact et le type de la plaque impactrice, ce dernier en a déduit que la LEH changeait peu quelles que soient les conditions d'impact. Ainsi la contrainte d'Hugoniot ne dépend quasiment pas de la vitesse d'impact. Il semblerait néanmoins que le matériau de la plaque impactrice joue un léger rôle puisqu'une plaque impactrice en tungstène pour la même vitesse d'impact génère une contrainte plus élevée qu'une plaque impactrice en cuivre. Selon l'auteur, ce résultat viendrait de l'impédance de choc plus élevé du tungstène.

Si ce genre d'essais permet de caractériser la limite d'élasticité de l'échantillon testé, l'utilisation de l'interférométrie laser comme seul diagnostic de mesure ne permet pas d'accéder à l'évolution de la contrainte équivalente (écrouissage). Pour cela, une instrumentation par jauge de contrainte peut être utilisée en complément de l'interférométrie laser.

B. Essais d'impact de plaques avec jauges

L'impact de plaques plan génère un chargement en déformation uniaxiale. Dans ce cas, en supposant un critère de plasticité de von Mises ou de Tresca (qui sont identiques dans ce cas précis), la contrainte équivalente est donnée par la formule :

$$\sigma_{eq} = |\sigma_x - \sigma_y| \quad 2-5$$

Dans le cas d'impact de plaques classique, la contrainte longitudinale est obtenue par mesure d'interférométrie. A contrario, la contrainte radiale nécessite la mise en place d'une configuration à base de jauges de pression par exemple.

Parmi les jauges les plus utilisées, on retrouve les jauges de pression manganin (Bourne et al., 1995). Le manganin est un alliage ternaire composé de manganèse (10 à 15 %) de nickel (2 à 6 %) et de cuivre. Il est utilisé au sein de jauge de pression pour ses propriétés piezorésistives, et sa résistivité peu sensible à la température. Son utilisation au sein d'essai de pression dynamique remonte aux années 60 par Fuller et Price (1962). L'utilisation de jauges de pressions se fait grâce à la mise en place d'un pont de Wheatstone rapide qui permet de détecter une variation relative de résistance de la jauge de 50 % en 3,5 nanosecondes (Bosca et al., 1981).

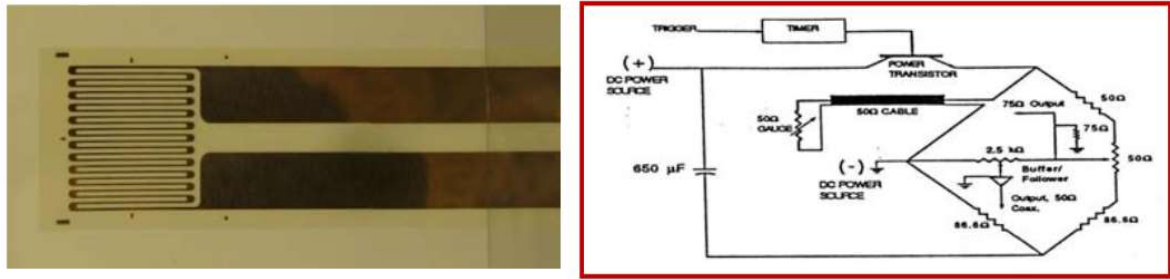


Figure 2-8 : Photo des jauges utilisées par Bosca et al., 1981 lors de ses essais et schématisation du circuit en pont de Wheatstone utilisé

Certains auteurs tels que Gautam (2017) ont comparé des mesures de LEH effectuées au sein de l'alumine obtenue par méthode VISAR et par la mise en place de ces jauges au cours d'essais d'impact de plaques explosives. Les auteurs ont trouvé une LEH de 12,4 GPa avec jauges comparée à la valeur de 11,9 GPa obtenus par mesure VISAR.

D'autres auteurs tels que Bourne (1995) se sont servis de ces essais pour obtenir la contrainte équivalente de céramiques S-SiC et SiC-B au sein d'impact de plaques. Pour ce faire, une configuration expérimentale spécifique a été adoptée. En effet, la difficulté de l'utilisation des jauges de pression repose sur leur utilisation in-situ qui ne doit pas modifier l'état de contrainte dans la cible.

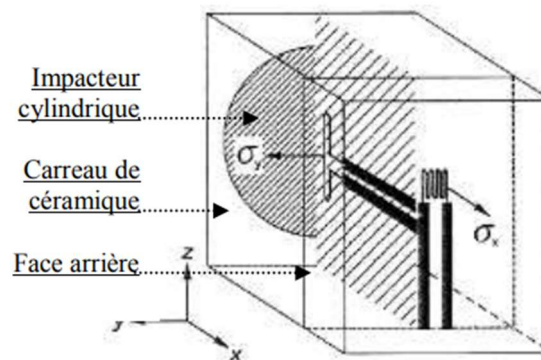


Figure 2-9 : Schématisation de la configuration expérimentale utilisée par Bourne pour ces essais d'impact de plaques avec jauges de pression

À la suite de ces tests, la contrainte équivalente des deux nuances de SiC a pu être déduite. L'auteur conclut que contrairement au SiC-B la résistance au cisaillement du S-SiC diminue sensiblement au cours du temps. La perte de résistance au cisaillement du S-SiC au-delà de la LEH est attribuée à une fissuration en mode II du matériau rendue possible par la micro-plasticité générée à la LEH (Bourne et al., 1990).

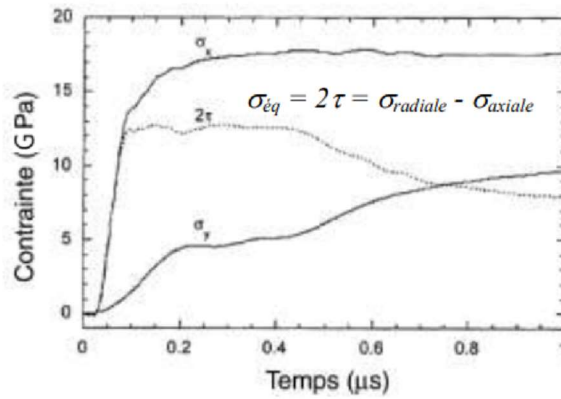


Figure 2-10 : Résultats de mesures de jauges de contraintes obtenus par (Bourne et al. 1995) au cours d'essais d'impact de plaques sur SiC.

Une autre méthode permettant d'obtenir la contrainte équivalente est l'impact de plaques inclinées.

C. Essais d'impact de plaques inclinées

La configuration expérimentale pour ce genre d'essais est quelque peu différente. La cible est composée d'un matériau céramique, l'alumine dans le cas des essais de Sundaram (Sundaram et Clifton, 1998), pris en étau entre deux plaques de fortes duretés. L'ensemble possède un angle θ vis-à-vis de l'axe du tube de lancement. La plaque impactrice possède la même inclinaison que la plaque cible.

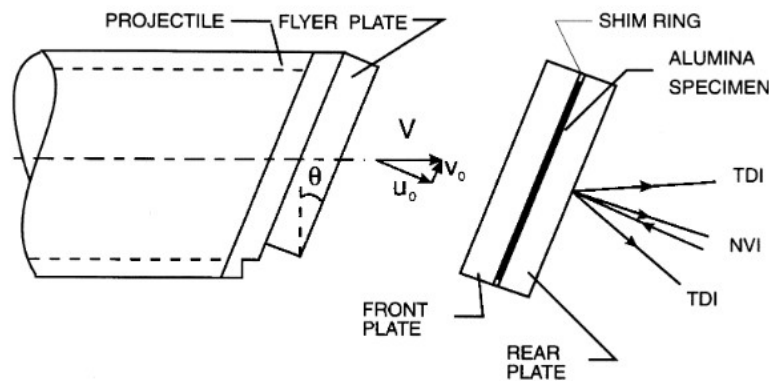


Figure 2-11 : Schématisation de la configuration d'essais d'impact de plaques inclinées

Ce genre de technique utilisée permet de créer à la fois une onde de compression et une onde de cisaillement et donc de mesurer indirectement la contrainte équivalente (Sundaram et Clifton, 1998).

Si la mise en place de jauges ou l'utilisation d'impact de plaques inclinées permet d'obtenir des informations sur l'état de contrainte équivalente, ce genre d'essais ne permet pas d'avoir accès à l'ensemble du chemin de chargement du matériau. C'est ce que permet l'analyse Lagrangienne. Néanmoins, cette analyse nécessite pour ce faire d'appliquer une rampe de chargement correspondant à un impact sans choc.

D. Essais d'impact de plaques sans choc (shockless)

En présence d'un choc, le matériau passe directement d'un état initial à un état final (état choqué ou état d'Hugoniot). Les états intermédiaires situés sur l'équation d'état ne sont donc pas accessibles. Ainsi, la caractérisation sous choc d'un matériau nécessite de réaliser de nombreux essais. La génération d'une rampe de chargement (essais dits shockless) permet d'accéder de manière continue à l'ensemble des états intermédiaires, ce qui présente ainsi un avantage indéniable par rapport aux essais d'impact de plaques classiques. En effet, sans plaque impactrice adaptée, l'essai correspondant à un choc c'est à dire à une adiabatique dynamique : on passe instantanément d'un état initial à un état final. De ce fait, il est impossible de suivre tout le chemin de chargement. À l'inverse, les essais sans choc sont isentropes, ce qui permet de suivre la réponse du matériau soumis au chargement d'une rampe de compression (Figure 2-12).

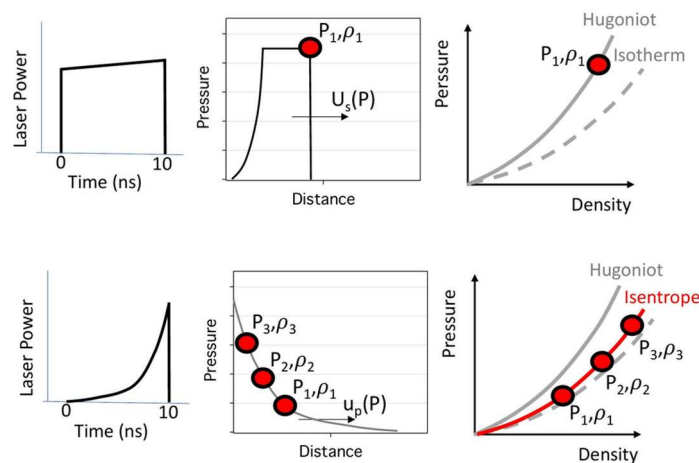


Figure 2-12 : Chemin de compression thermodynamique à l'intérieur d'un échantillon de géo-matériau dans le cadre de compression dynamique par laser, avec (a) et sans choc (b) (Duffy, 2019)

Divers auteurs ont étudié la possibilité d'effectuer des impacts sans choc à l'aide d'essais d'impact de plaques.

Certains auteurs tel que Hall (2008) ont mis au point une technique permettant de générer un gradient de densité sur les plaque impactrices. Pour ce faire de l'aluminium et du cuivre sont appliqués sur une base de plaque impactrice en cuivre à l'aide de projection thermique.

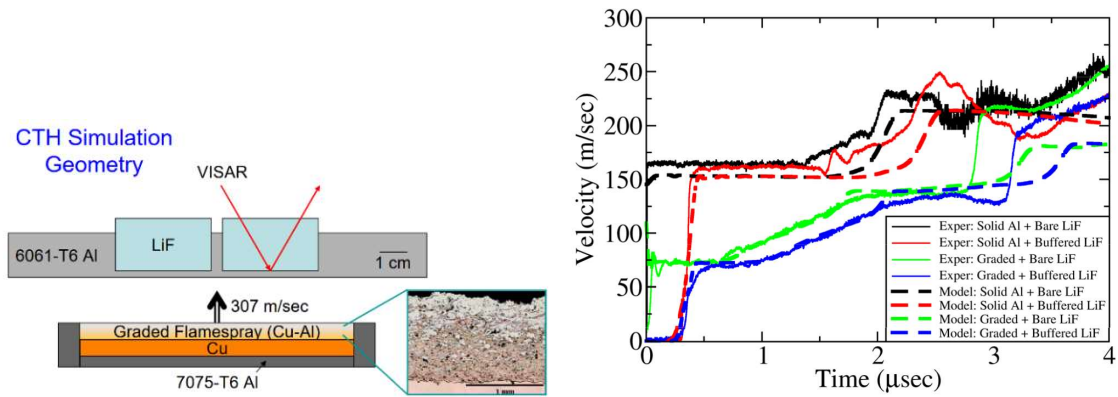


Figure 2-13 : Schématisation des essais de Hall et résultats de mesures de vitesse en face arrière obtenus

Le but de ces essais était de faire varier le choc reçu par la cible en faisant varier la microstructure de la plaque impactrice.

D'autres auteurs se sont basés sur des géométries permettant un accroissement de la surface de contact entre la plaque impactrice et un buffer au cours du tir en s'appuyant sur la mise au point de géométries spécifiques de la plaque impactrice. En effet, passer d'un contact ponctuel ou linéique à un contact surfacique permet de créer une rampe de chargement dans le matériau.

Certains auteurs tels que Taylor (2014) se sont intéressés à la création de la plaque impactrice en alumine pouvant être utilisée au sein de lanceurs à gaz. Avec une telle géométrie, une rampe de chargement a bien été générée lors de l'impact.

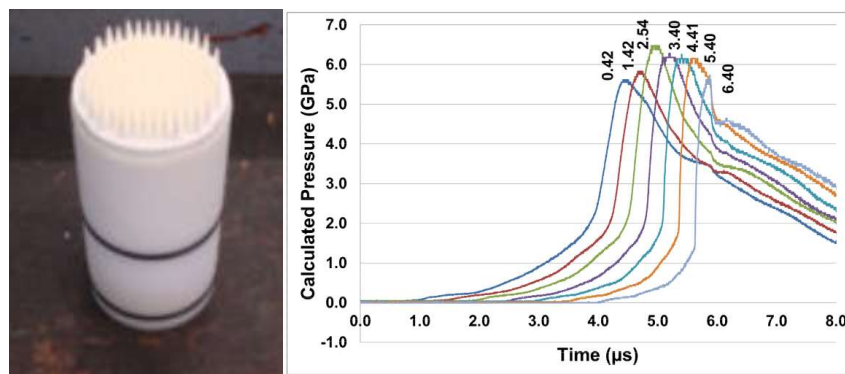


Figure 2-14 : Plaque impactrice utilisée par Taylor et résultats expérimentaux obtenus

D'autres auteurs ont travaillé avec des géométries similaires afin d'obtenir des impacts sans choc (Cotton et al., 2015). Ces derniers ont travaillé avec une plaque impactrice en acier inoxydable imprimée en 3D.

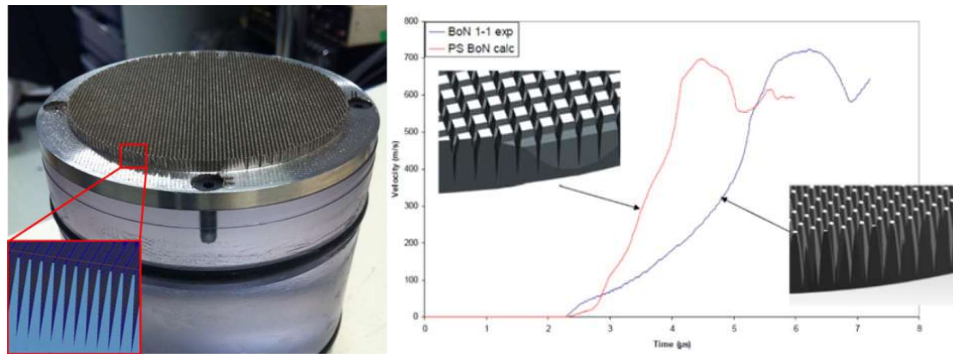


Figure 2-15 : Plaque impactrice utilisée par Cotton et résultats expérimentaux obtenus

Les auteurs ont observé que la conception de leur géométrie a permis de produire une rampe régulière sur les cibles de tantale avec un choc initial minimal lors de l'impact.

D'après Forquin (Forquin et Zinszner, 2017) l'impact de plaques sans choc permet d'effectuer une analyse Lagrangienne et d'avoir ainsi accès à la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale du matériau. Leur technique repose sur l'utilisation brevetée d'une plaque impactrice ondulée comme illustré sur la Figure 2-16 (Brevet : Forquin, 2016).

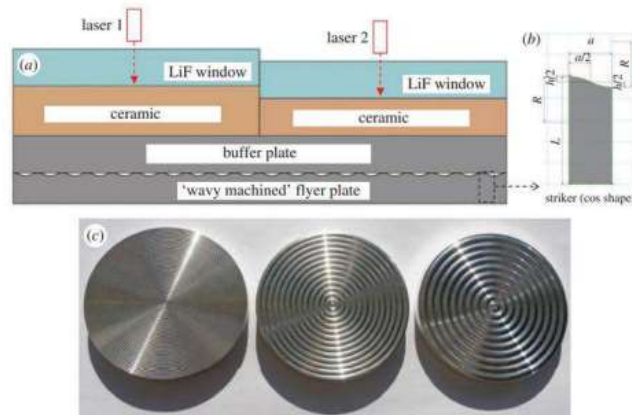


Figure 2-16 : Proposition de configuration permettant de réaliser une analyse lagrangienne à partir d'essais d'impact de plaques sans choc

Ces essais reposent également sur l'utilisation d'un buffer permettant d'homogénéiser le champ de contrainte sur la largeur de l'échantillon. Cela permet d'obtenir un état de contrainte dans la céramique quasi-homogène dans la direction radiale (orthogonale à la direction axiale) (Forquin et Zinszner, 2017) . Cette configuration un peu particulière comprend deux céramiques d'épaisseur différente permettant de réaliser une analyse Lagrangienne.

Une autre technique permettant de réaliser des rampes de chargement repose sur l'utilisation des techniques à haute puissance pulsée (HPP). Cette technique est employée notamment au CEA Gramat à l'aide de la machine d'essais GEPI (Hérel, 2006).

2.2.2.4 Essais à haute puissance pulsée

A. Le cas GEPI

La machine GEPI est basée sur les technologies des hautes puissances pulsées (HPP). Ce générateur applique le concept de ligne en bande : deux électrodes planes en aluminium, séparées par des feuilles diélectriques et reliées localement par un court-circuit sont soumises à un courant intense focalisé sur la zone de charge. Ce courant intense et focalisé est créé par un ensemble de condensateurs et peut atteindre une intensité de l'ordre de 2,8 à 3,5 MA. Un tel courant va provoquer un champ magnétique intense qui va engendrer une pression magnétique sur chacune des électrodes par effet Laplace. Ce genre de configuration permet d'appliquer une rampe de chargement car la décharge du courant n'est pas instantanée.

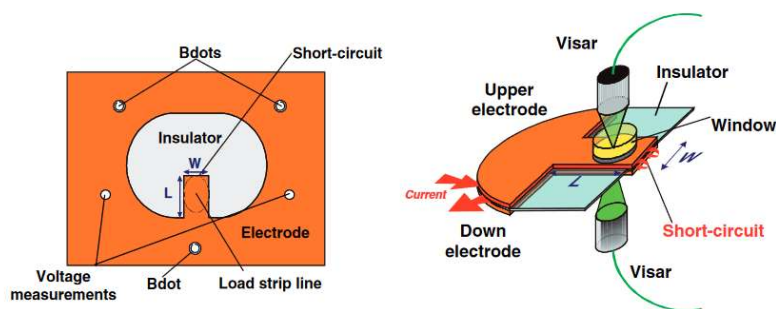


Figure 2-17 : Schématisation du procédé GEPI

La machine GEPI a été développée courant 2001 (Héreil et Avrillaud, 2006) et n'est pas unique en son genre. Elle a été, en effet, inspiré par la Z-machine, aux Etats-Unis dont certains essais remontent à la fin des années 90 (Jamesl et al., 1999). Ces essais, notamment, avaient pour but de créer une rampe de chargement au sein d'échantillons en fer au cours d'essais de compression afin d'observer les changements de phase. Au cours de ces premiers tests, une compression dynamique isentropique de 300 kbar a été appliquée sur du fer ce qui a permis d'observer le changement de phase $\alpha \rightarrow \epsilon$ aux alentours de 130kbar.

Concernant la machine GEPI, cette dernière est généralement consacrée aux expériences de compression : au cours de ces expériences, le pulse de compression est transmis par l'intermédiaire des électrodes à 2 échantillons de céramique d'épaisseur différente avant d'atteindre les fenêtres LiF. En l'absence de ces fenêtres placées en contact des carreaux de céramique, la réflexion de l'onde de compression sur la surface libre pourrait conduire à une rupture en traction de la céramique.

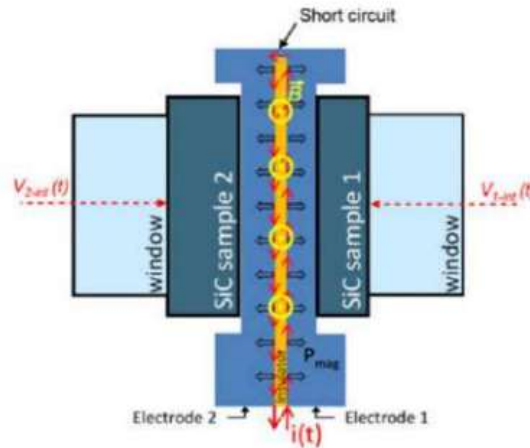


Figure 2-18 : Schématisation de la configuration d'analyse Lagrangienne obtenue par essai GEPI

La configuration présentée sur la Figure 2-18 permet d'appliquer la méthode d'analyse lagrangienne. Zinzsner (2012) a utilisé des éprouvettes de 3 et 4 mm pour une largeur de 15mm. L'amplitude du chargement appliqué à la céramique dépend de l'intensité du courant, et de l'inverse de la largeur d'électrode. Il est ainsi nécessaire, pour atteindre des niveaux de pression très élevés (et dépassant la LEH du matériau), de diminuer fortement la largeur des électrodes et donc la largeur de l'échantillon.

B. L'analyse Lagrangienne

L'analyse Lagrangienne a été développée par différents auteurs (Cowperthwaite, Williams, 1971) ; (Seaman, 1974.). Cette méthode permet de déterminer la réponse du matériau sur l'ensemble du trajet de chargement, ce qui n'est pas possible avec un impact de plaques où seul un point de cette courbe est obtenu par essai. La méthode de dépouillement de l'analyse lagrangienne est basée sur une comparaison de signaux de vitesse obtenus sur chacun des carreaux d'épaisseur différente (Figure 2-18). Par la suite, l'intégration des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie est nécessaire. Toutefois, pour pouvoir réaliser cette technique, il est essentiel que le chargement subi par chacun des deux matériaux soit identique.

Le matériau étant soumis à une déformation uniaxiale, la première étape consiste en une détermination de la vitesse d'onde C_L en fonction de la vitesse particulière mesurée au cours de l'expérience. Ce dernier calcul est possible car la vitesse $u(t)$ est mesurée sur deux matériaux d'épaisseur différente. Par la suite, des corrections sont faites, que ce soit en appliquant un décalage temporel entre les deux signaux dû à la différence d'épaisseur ou encore en appliquant une correction d'impédance due à l'utilisation de matériaux fenêtres (en LiF dans la thèse de (Zinzsner, 2012)).

Il est par la suite possible de calculer certains paramètres thermodynamiques, et de déterminer l'ensemble du chargement du matériau à l'aide des formules suivantes :

$$d\sigma = -\rho_0 C_L(u_p) du_p \quad 2-6$$

$$dv = -\frac{1}{\rho_0 C_L(u_p)} du_p \quad 2-7$$

$$de = -\frac{\sigma}{\rho_0 C_L(u_p)} du_p \quad 2-8$$

$$d\varepsilon = -\frac{du_p}{C_L(u_p)} \quad 2-9$$

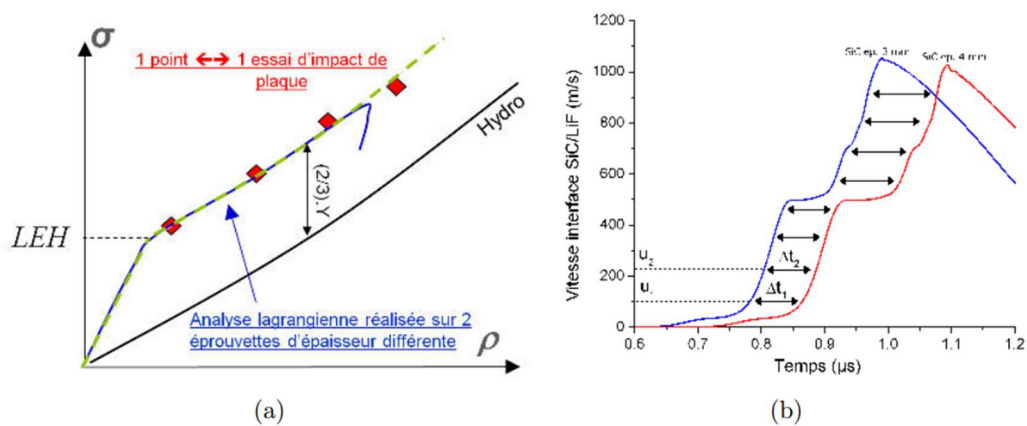


Figure 2-19 : Illustration de la technique d'analyse lagrangienne (Zinzsner, 2012)

La caractérisation expérimentale des céramiques permet d'étudier leur comportement et d'analyser certains phénomènes notamment les mécanismes de microplasticité. En effet, si la céramique est définie comme un matériau fragile sous un chargement classique, au cours de la première phase de chargement d'un impact balistique la céramique est soumise à des déformations plastiques qui s'expliquent par des phénomènes de microplasticité à l'échelle microscopique. Ces mécanismes doivent être analysés.

2.3 Etude des phénomènes de micro-plasticité au sein des céramiques

Les mécanismes de microplasticité générés dans les céramiques sont relativement variés. Il est possible d'observer ces phénomènes en réalisant un confinement autour de la céramique à l'aide d'une configuration de type sarcophage (Horsfall et al., 2010).

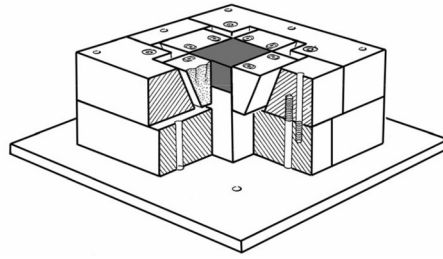


Figure 2-20 : Dispositif de confinement utilisé pour maintenir les échantillons d'alumine durant des essais balistiques. (Horsfall et al., 2010)

Ce type de configuration a été mise en place pour caractériser des alumines par essais balistiques. Le sarcophage est composé de blocs de calage réglables afin d'assurer le confinement dans le plan du carreau d'alumine. Un bloc peut être placé dans un espace à l'arrière du dispositif afin de permettre la mesure de la profondeur de pénétration résiduelle. D'autres auteurs, tel que (Coscolluela, 1992), ont observé des mécanismes d'empilement de dislocations - mécanismes caractéristiques de la plasticité lors d'essais d'expansion sphérique pyrotechnique. Ce dernier a constaté ce genre de phénomène au sein d'alumines lors d'essais de compression-décompression. Les dislocations observées au sein des différentes alumines étudiées se localisent généralement au sein des gros grains à proximité des pores.



Figure 2-21 : Image obtenue par microscopie électronique par transmission de dislocation au sein d'une alumine

La porosité a un effet important sur les phénomènes de plasticité. En effet, d'après Longy (Longy et Cagnoux, 1989), la porosité a un effet sur les contraintes locales appliquées à chaque grain. Plus la porosité est importante plus les contraintes appliquées sur le grain seront donc élevées. Un matériau poreux aura donc une LEH et un seuil de plasticité plus faible que sa contrepartie dense. D'autre part, ces auteurs ont aussi observé qu'une augmentation de la taille de grain est synonyme de la même manière d'une diminution de la LEH. Ce phénomène semble suivre la loi de

Hall-Petch qui indique que plus les grains d'un matériau sont fins plus la limite d'élasticité de ce dernier est élevée.

Coscolluela (1992) au cours de ses essais a également observé des mécanismes de maillage au cours de ses travaux notamment au cours d'essais d'onde sphérique divergente sur alumine AL-23. Durant ces essais l'explosif est au contact d'un bâti en acier contenant l'alumine. Il n'est pas le seul à avoir observé de tels phénomènes de micro-plasticité puisque Lankford (1989) en a également observé dans ses travaux sur de l'alumine confinée lors d'essais SHPB.

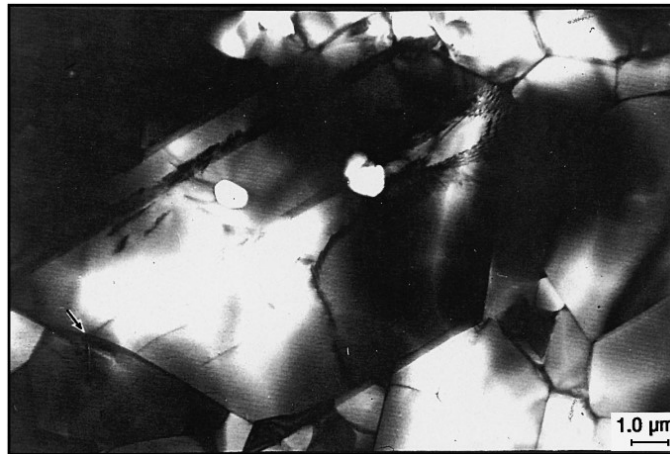


Figure 2-22 : Image obtenue par microscopie électronique à transmission de mécanismes glissement au sein d'une céramique (Lankford et al. 1998)

Il a également constaté des phénomènes de glissement et a conclu que les mécanismes de microplasticité et les mécanismes de microfissurations sont liés. En effet, la rencontre d'une macule avec un joint de grains constitue une initiation facile de fissure comme cela est illustré sur la Figure 2-23.

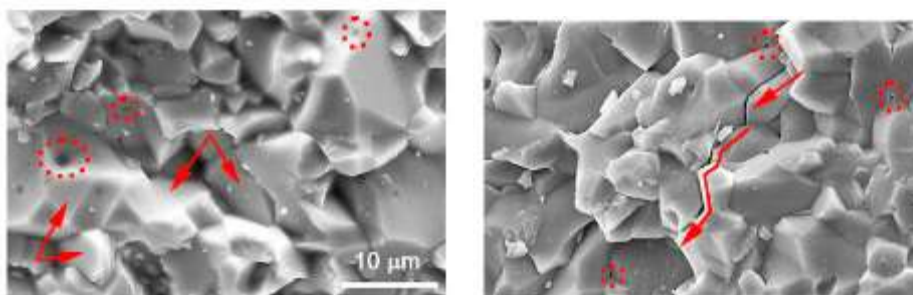


Figure 2-23 : Images obtenue au MEB de Microcracking (Huang et al. 2022)

Les phénomènes de microplasticité générés au cours d'un tir balistique exercent une influence sur le comportement du matériau au cours de l'impact. Il est donc nécessaire de pouvoir définir ce comportement à travers des modèles numériques. Ces modèles sont essentiels pour pouvoir dimensionner les essais et vérifier la cohérence de leurs résultats. À l'heure actuelle, il existe plusieurs modèles de comportement permettant de décrire le comportement dynamique des céramiques.

2.4 Modélisation du comportement de la céramique

Il existe plusieurs modèles permettant de modéliser les céramiques soumises à un chargement de compression intense.

On peut distinguer les modèles macroscopiques, tel que le modèle de Rajendran (Rajendran et Grove 1996) qui permet de décrire le comportement des céramiques soumises à un impact, des modèles mésoscopiques.

Parmi les modèles les plus utilisés, le modèle de Holmquist se démarque par sa capacité à restituer le comportement des matériaux fragiles soumis à de très grandes vitesses de déformation et sous hautes pressions de confinement.

Il existe plusieurs variations du modèle dit de Holmquist. La première version, communément appelée JH1, décrit le comportement des céramiques intactes ou endommagées. Le modèle est donc assez binaire puisque la céramique se trouve dans l'un de ces deux états. Le second modèle, noté JH2 propose un adoucissement du comportement du matériau notamment en fonction de la déformation plastique. Pour cela une variable d'endommagement a été ajoutée au modèle JH1 initial. Enfin, la dernière version du modèle, le JHB permet de prendre en compte les changements de phases créés lors d'un impact (Holmquist et Johnson, 2003).

A. Modèle JH1

Le modèle JH1 est le premier modèle mis au point par Holmquist pour décrire le comportement des céramiques sous sollicitations dynamiques (Johnson et Holmquist, 1992). Les lois de comportements sont définies par trois segments délimités par T (pour $P=0$), S_1 ($P=P_1$) et S_2 ($P=P_2$). La pente de ces segments α , et la contrainte de saturation S_{max}^f permettent de compléter ce modèle présenté en Figure 2-24.

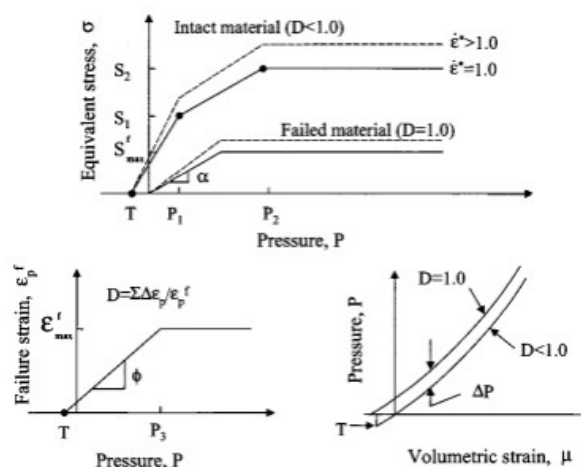


Figure 2-24 : Schématisation du modèle de comportement JH1

T représente la contrainte hydrostatique maximale du matériau en tension. C'est une constante définie en fonction du matériau. S1, S2 et P1, P2 définissent le comportement intact du matériau pour une vitesse de déformation de 1 s⁻¹. Sous essai d'impact de plaques, les vitesses de déformations sont de l'ordre de 10⁵ s⁻¹. La contrainte du matériau intact varie donc en fonction des vitesses de déformations appliquées.

$$\sigma = \sigma_0 \left(1.0 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad 2-10$$

Ainsi la constante C caractérise l'influence de la vitesse de déformation sur la contrainte équivalente du matériau intact. $\dot{\epsilon}_0$ est définie comme la vitesse de déformation de référence et vaut 1,0 s⁻¹. Cette constante C est établie à l'aide d'essais de compression uniaxiaux (Holmquist, 2002). Les constantes S1, S2 et P1, P2 sont donc définies par interpolation à partir d'essais de compression simple et d'impact de plaques.

B. Modèle JHB

Le modèle JHB (pour Johnson, Holmquist, Beissel) prend en compte les changements de phases. Il s'agit du modèle d'Holmquist le plus récent (Johnson et Holmquist, 2003). De plus c'est ce modèle qu'a utilisé Holmquist à de maintes reprises pour caractériser le comportement du carbure de silicium sous impact de plaques, notamment dans un article de 2008 qui présente la simulation numérique de carbures de silicium soumis à des impacts avec détente et re-compression par choc (Holmquist et Johnson, 2008). Le modèle JHB tel qu'il peut être trouvé dans les différents articles de Holmquist est décrit sur la Figure 2-25.

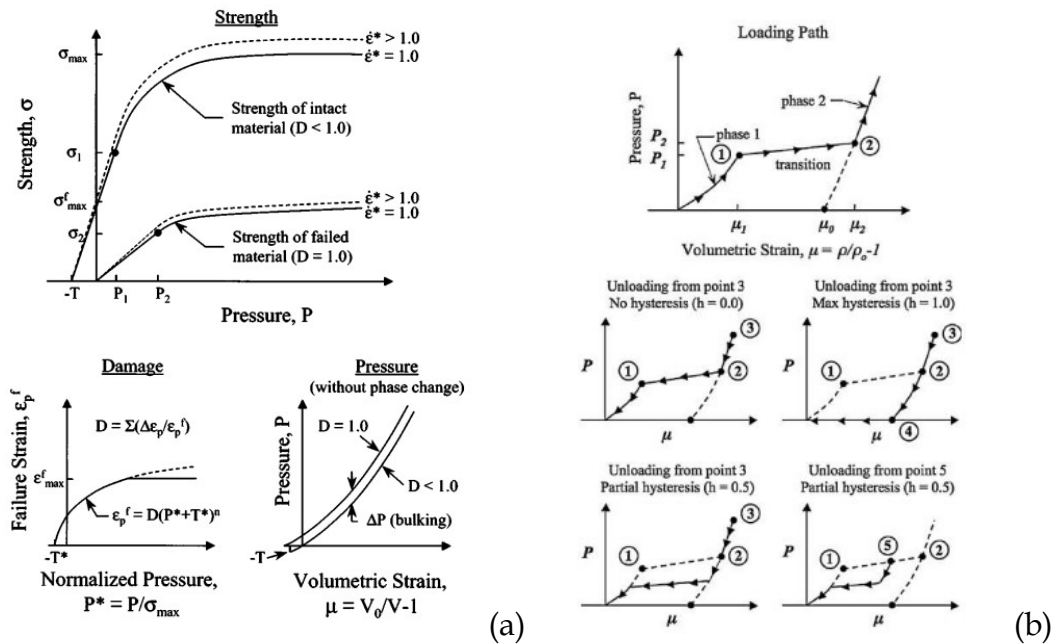


Figure 2-25 : Schématisation du modèle de comportement JHB sans changement de phase (a) et avec changement de phase (b) (Johnson et Holmquist, 2003)

La contrainte d'écoulement au sens de von Mises dépend de la pression P , de la vitesse de déformation et de la variable d'endommagement D définie par :

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad 2-11$$

Le matériau est intact lorsque $D=0$ et la valeur est fixée à $D=1$ pour un matériau entièrement endommagé. Pour une vitesse de déformation de $1,0 \text{ s}^{-1}$, la contrainte seuil est linéaire allant de 0 pour une pression de traction de $P=-T$ jusqu'à σ_i pour une pression P_i , T étant la tension hydrostatique maximale que le matériau peut supporter. Pour les pressions supérieures à P_i , la contrainte seuil est représentée par :

$$\sigma = \sigma_i + (\sigma_{max} - \sigma_i) \{1.0 - \exp[-\alpha_i(P - P_i)]\} \quad 2-12$$

$$\alpha_i = \sigma_i / [(\sigma_{max} - \sigma_i)(P_i + T)] \quad 2-13$$

La loi d'écoulement du matériau endommagé prend une forme similaire. Pour une vitesse de déformation différente de $1,0$ elle s'écrit :

$$\sigma = \sigma_0(1.0 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad 2-14$$

où C est une constante sans dimension. L'expression générale de la déformation à rupture est la suivante :

$$\varepsilon_p^f = D_1(P^* + T^*)^n \quad 2-15$$

où D et n sont des constantes sans dimension et $T^* = T/\sigma_{max}$, P^* représentant la pression adimensionnée. La pression hydrostatique, sans changement de phase est illustrée dans la partie inférieure droite de la Figure 2-25. Lorsque le matériau n'est pas endommagé ($D=0$) la pression s'écrit :

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad 2-16$$

où K_2, K_3 sont des constantes, K_1 est le module de compressibilité et $\mu = (\rho_0/\rho) - 1$.

Lorsque $D=1.0$, une pression supplémentaire doit être rajouté, ΔP . Ce terme se calcule à l'aide de l'énergie élastique interne (du déviateur des contraintes) U , qui est aussi valable dans les deux autres modèles de JH :

$$U = \sigma^2 / 6G \quad 2-17$$

où σ est la contrainte équivalente de von Mises et G le module de cisaillement élastique. On notera ΔU la différence d'énergie entre l'énergie initiale et l'énergie à rupture ($D = 1$). On note β la fraction de l'énergie interne perdue convertie en énergie hydrostatique potentielle, μ_f la valeur finale de μ . On obtient alors comme expression :

$$\Delta P = -K_1 \mu_f + \sqrt{(K_1 \mu_f)^2 + 2\beta K_1 \Delta U} \quad 2-18$$

Dans le cas d'un changement de phase tel que décrit sur la Figure 2-25, de nouvelles expressions sont nécessaires.

C. Modèle JH2

Le modèle JH2 tire sa particularité du fait qu'il existe une variable d'endommagement. C'est donc un modèle moins binaire que le JH1 qui ne prend en compte que les états intacts et fragmentés. La variable d'endommagement peut être définie de manière suivante :

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon_p^f} \quad 2-19$$

où ε_p^f la déformation plastique maximale à rupture. Cette dernière peut être définie de la manière suivante :

$$\varepsilon_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad 2-20$$

On définit une pression normalisée :

$$P^* = \frac{P}{P_{LEH}} \quad 2-21$$

où P_{HEL} la pression à la limite élastique d'Hugoniot. Pour la céramique intacte, le critère d'écoulement s'écrit :

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad 2-22$$

où T^* est la pression hydrostatique maximale normalisée en traction de la céramique intacte, P^* est la pression normalisée, et A, N et C sont des constantes matériaux.

Une forme similaire est définie pour la céramique complètement fragmentée :

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad 2-23$$

où B, M et C sont des constantes matériaux. On note que $M=1$ est une valeur souvent choisie dans la littérature. Le critère de l'équation précédente est alors linéairement dépendant à la pression. Le critère d'écoulement pour une céramique partiellement endommagée s'écrit :

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad 2-24$$

Toutes ces formules sont illustrées sur la Figure 2-26.

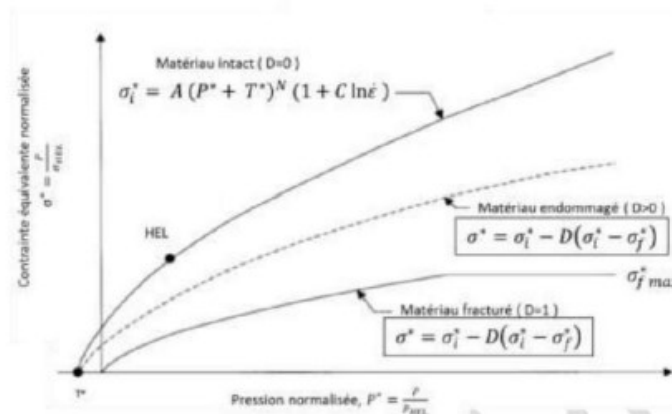


Figure 2-26 : Schématisation du modèle de comportement JH2

Néanmoins, l'application du modèle nécessite de caractériser le comportement de la céramique intacte et totalement endommagée pour déterminer les états intermédiaires. Les paramètres sont difficiles à caractériser et une analyse inverse est le plus souvent utilisée pour leur détermination.

Une récente étude de Ibne Islam (2020) compare les différents modèles JH1, JH2 et JHB dans le cas d'un impact balistique. Pour ce faire, les auteurs ont simulé un montage expérimental dans lequel une plaque de SiC de 4,5 mm d'épaisseur impacte à incidence normale une autre plaque de SiC de 9 mm d'épaisseur à 2,259 km/s. La plaque cible

de 9 mm d'épaisseur est soutenue par un bloc de fluorure de lithium (LiF) de 25,4 mm d'épaisseur.

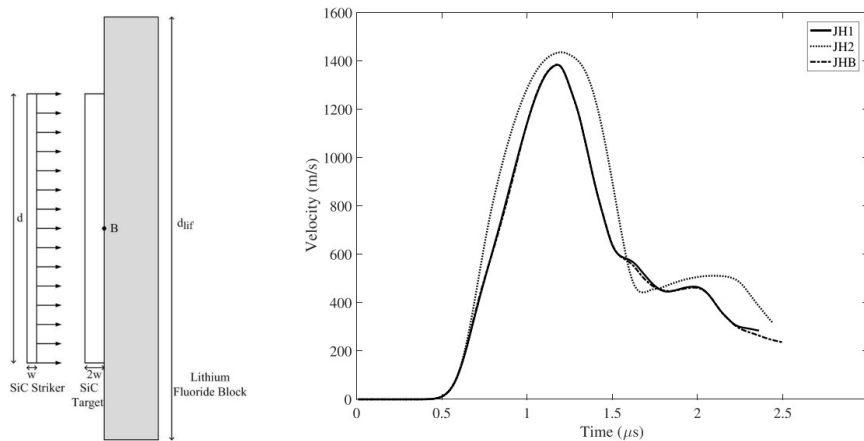


Figure 2-27 : Configuration expérimentale et résultats obtenus lors de la comparaison des modèles de Holmquist pour simuler un impact de plaques su SiC (Ibne Islam, 2020)

Les modèles JH1 et JHB prédisent des profils temporels de vitesse similaires concernant la vitesse du point B. Ces derniers diffèrent des résultats obtenus par le modèle JH2. L'auteur a calculé les différences maximales entre les trois profils de vitesse une fois que la vitesse atteint 50 % de la vitesse maximale. Les amplitudes de vitesse obtenues avec JH1 et JH2 diffèrent au plus de 7,8 % et de 75,2 %, respectivement par rapport à celle obtenue avec JHB. L'auteur conclut son article en expliquant que si les 3 simulations donnent des résultats intéressants, les modèles JH1 et JHB sont plus proches de la réalité en ce qui concerne la position du plan d'écaillage dans les essais d'impact de plaques et la propagation de fissures et la zone conoïde pour le problème de pénétration. D'une manière générale, le modèle JH2 décrit assez mal la fragmentation dynamique et la fissuration en traction. Néanmoins, cela reste un bon modèle pour modéliser le comportement en compression des céramiques.

2.5 Résumé bibliographique

Malgré leur comportement fragile, les céramiques sont couramment utilisées au sein des systèmes de blindage présents dans le domaine de la protection personnelle vis-à-vis d'impact de petits et moyens calibres. Au cours d'un impact balistique, la céramique va être notamment soumise à une première phase de compression intense de l'ordre de plusieurs GPa. Ce chargement peut entraîner des phénomènes de microplasticité et de microfissuration au sein du matériau. Ces phénomènes seront d'autant plus présents si la limite d'élasticité d'Hugoniot est atteinte ou dépassée dans le matériau. Toutefois, les essais d'impact balistique restent difficiles à instrumenter et le comportement intrinsèque de la céramique ne peut être établi sans recourir à des essais de laboratoire spécifiques.

Afin de pouvoir caractériser le comportement des céramiques, différentes méthodes expérimentales ont été développées. Parmi tous ces essais, l'impact de plaques fait partie des techniques les plus intéressantes. Une mesure de vitesse matérielle en face arrière au cours de l'essai permet de déduire la limite élastique d'Hugoniot du matériau. Toutefois cette mesure ne permet pas d'avoir accès à l'évolution de la contrainte radiale et donc de la contrainte équivalente. Une instrumentation à l'aide de jauges permet d'avoir accès à ces informations. Cependant les comparaisons entre mesure de vitesse en face arrière et l'instrumentation avec jauges restent peu présentes dans la littérature. En outre, les essais d'impact de plaques présentent l'inconvénient de ne communiquer des informations que sur la LEH et l'état de contrainte final présent dans la céramique. Les états de contraintes intermédiaires sont donc non renseignés. D'autres essais permettent d'avoir accès à l'ensemble du chemin de chargement du matériau : ce sont les essais de compression isentropique (sans choc) réalisés à l'aide d'une rampe de pression. Ces essais peuvent être réalisés à l'aide de hautes puissances pulsées comme sur le moyen d'essai GEPI. Néanmoins ce genre de méthode possède des limites que ce soit sur la taille d'échantillons possibles ou sur le coût unitaire des essais. D'autres part, les courants importants mis en jeu ne permettent pas la mise en œuvre de jauges de contrainte. C'est pour cela qu'en 2017, Forquin et Zinszner ont théorisé l'application de l'analyse Lagrangienne au cours d'un essai d'impact de plaques sans choc. Si les essais d'impact de plaques sans choc, notamment à l'aide de géométries particulières ou de gradients de densité, ont déjà été étudiés par certains auteurs, la mise en place d'une configuration permettant l'analyse Lagrangienne n'a jamais été testée. C'est l'enjeu du chapitre suivant.

3. Mise au point d'essais d'impact de plaques sans choc pour analyse Lagrangienne

3.1 Principe de la méthode expérimentale

Les essais d'impact de plaques sans choc présentés dans ce chapitre visent à caractériser le comportement plastique de céramiques sous chargement de compression.

La technique expérimentale de caractérisation est basée sur les travaux numériques menés par Forquin (Forquin et Zinszner, 2017) selon la configuration visible sur la Figure 3-1.

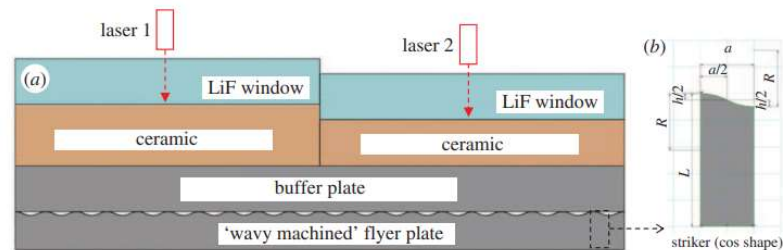


Figure 3-1 : Technique expérimentale basée sur une plaque impactrice usinée ondulée qui permet un adoucissement du front montant du pulse permettant d'effectuer une analyse lagrangienne

Dans un premier temps, les différentes pièces de ces essais notamment le buffer et la plaque impactrice doivent être dimensionnés. Néanmoins, ces dimensions dépendent également des matériaux utilisés. Le matériau de la plaque impactrice et du buffer doit posséder des propriétés cohérentes avec les niveaux de contraintes attendus lors d'essais d'impact de plaques à haute vitesse. Une fois le matériau et la géométrie de la plaque impactrice et du buffer sélectionnés et caractérisés, des essais de vérification ont été menés afin de valider que la configuration permet de procéder à une analyse lagrangienne. Les différents essais ont été réalisés à l'aide du lanceur à gaz présent au sein du laboratoire 3SR.

3.2 Présentation du protocole de mesure

3.2.1.1 Présentation du moyen d'essai

L'installation principale servant à caractériser les échantillons soumis à des essais d'impact de plaques est un lanceur à gaz de 11 m de long (dont un tube de 6 m) présent au sein du laboratoire 3SR (plateforme ExperDYN) (Forquin, 2018).

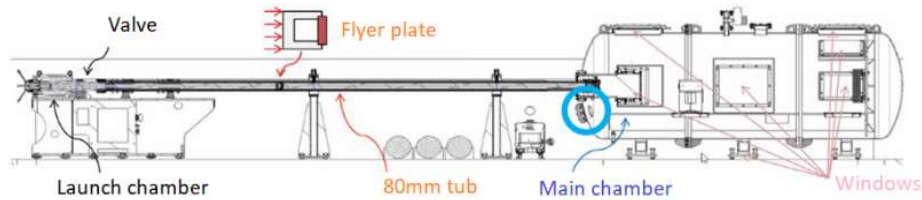


Figure 3-2 : Schématisation du lanceur à gaz présent au sein du laboratoire 3SR (plateforme ExperDYN)

Ce dernier est composé (de gauche à droite sur la Figure 3-2) d'un réservoir de 15 litres servant à accueillir une pression d'azote ou d'hélium pouvant atteindre jusqu'à 400 bars, d'une vanne rapide servant au déclenchement du tir, d'un tube de diamètre 80 mm au sein duquel la plaque impactrice placée dans son sabot en polycarbonate est accélérée et d'une chambre principale de 12 m³ hébergeant une chambre secondaire.

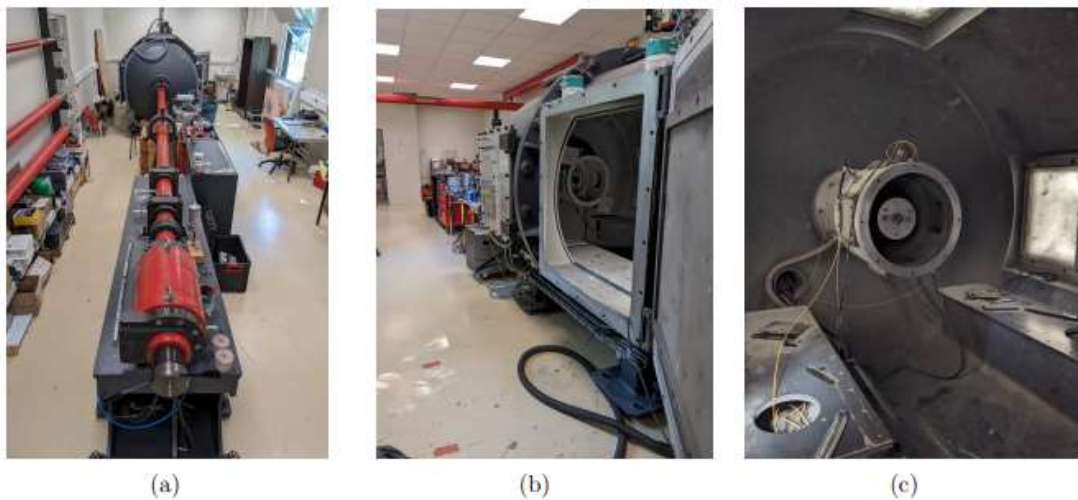


Figure 3-3 : Photos du lanceur à gaz multicalibre de la plateforme ExperDYN

Le logiciel César est utilisé pour déterminer la pression à imposer au sein du réservoir afin que le projectile atteigne la vitesse désirée. Le projectile est donc composé d'un sabot en Polycarbonate et d'une plaque, la plaque impactrice, le total pesant de 400 à 600 g.

Cet ensemble peut être envoyé jusqu'à une vitesse de 1100 m/s. Pour atteindre de telles vitesses, un vide poussé entre 0,5 et 1 mbar est imposé dans la chambre secondaire et le tir est effectué avec de l'hélium.



Figure 3-4 : Ensemble sabot/plaque impactrice fixé à la vanne rapide

La cible quant à elle est disposée au sein de la chambre secondaire. L'ensemble buffer - échantillon cible - matériau fenêtre si besoin- est fixé sur un support en aluminium. L'ensemble à analyser est séparé du support par une mousse haute densité de 6mm d'épaisseur qui permet d'assurer une rupture d'impédance entre la cible et le support.

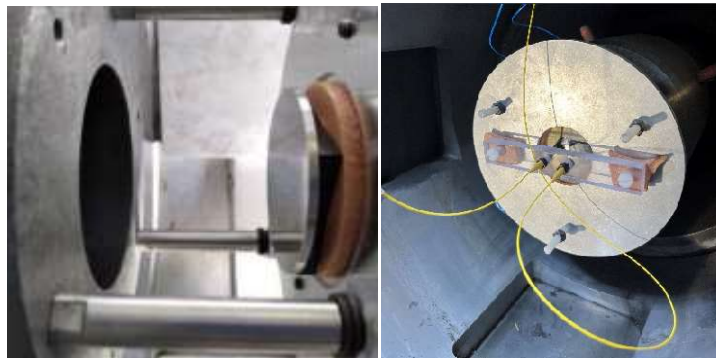


Figure 3-5 : Mise en place de la cible au sein de la chambre secondaire face à la sortie du tube de lancement

Ce support est relié à la bouche du tube du lanceur de gaz au moyen de trois vis en nylon. Lors des essais d'impact de plaques, il est essentiel d'ajuster le positionnement angulaire de la cible afin d'assurer un impact plan. Dans le laboratoire 3SR, ce paramètre est réglé à l'aide d'un laser parfaitement aligné sur l'axe du tube et d'un miroir mis en contact avec la cible. Il assure un positionnement avec un défaut angulaire de l'ordre du milliradian. A l'arrière de la cible, une barrette en PMMA est fixée sur le même support en aluminium ce qui permet de placer les têtes optiques, principale source de mesure des essais d'impact de plaques.

La chambre secondaire est ensuite scellée avec un film Mylar pour assurer l'étanchéité entre les chambres principale et secondaire. Les câbles électriques BNC (dans le cas de mesures avec jauges) et les fibres optiques sont acheminés à travers un passage étanche pour maintenir un vide élevé dans la chambre secondaire avant le tir jusqu'à l'impact.

3.2.1.2 Présentation des mesures relevées

Un système de vélocimétrie Doppler à photons (PDV) est utilisé comme principale source de mesure pour les essais d'impact de plaques. En effet, ce type de système permet de mesurer la vitesse matérielle sur une large plage de vitesses (jusqu'à 2 km/s

dans le cas présent) avec une résolution temporelle élevée (jusqu'à environ 1 ns) (Zellner et Vunni, 2013), ce qui correspond aux besoins de mesure dans le cas présent.

En outre, ce système de mesure présente des avantages par rapport à d'autres techniques tel que le VISAR (Barker et Hollenbach, 1972), notamment un rapport signal/bruit est assez faible pour les techniques de vélocimétrie homodyne. Un court résumé de la technique IDF (Vélocimétrie homodyne) peut être trouvé en ANNEXE A.

Dans le cadre des tests effectués au laboratoire 3SR, un détecteur artisanal fourni par le CEA Gramat est utilisé. Il est alimenté par une source lumineuse provenant d'un laser à fibre dopée à l'erbium de longueur d'onde 1550 nm à une puissance fixée à 100 mW. Ce signal laser est divisé en deux, un signal de référence et un autre signal qui va se réfléchir sur la surface mobile de notre échantillon. Par la suite, les deux signaux interférant, le détecteur génère un signal (en V). Ces signaux générés sont enregistrés par deux oscilloscopes à large bande passante (Tektronix DPO 7254 et Keysight DSOS254A. Par la suite un Lecroy 8208HD sera également utilisé).

L'amplitude de la vitesse matérielle mesurée est déduite de la fréquence du signal résultant de cette interférence. La sonde utilisée pour obtenir le signal est placée à une distance focale de 20 mm perpendiculairement à la surface réfléchissante de l'échantillon.

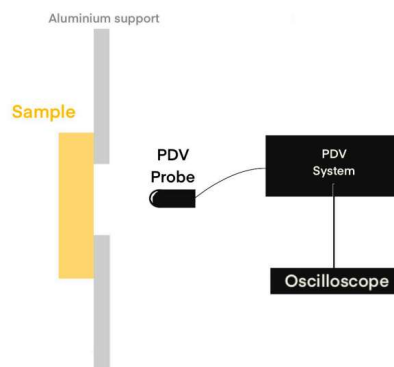


Figure 3-6 : Schématisation du montage pour effectuer des mesures PDV à l'arrière de l'échantillon

D'autre part, la vitesse d'impact du projectile est déduite des signaux enregistrés à l'aide de deux diodes laser, distantes de 30 mm, placées en amont de la cible dans la chambre secondaire. Ces dernières sont appelées « barrières de vitesse ». Ces signaux sont également utilisés pour déclencher les mesures des deux oscilloscopes.

La fréquence d'échantillonnage des oscilloscopes est fixée à 10 GS/s (100 ps/pt). Les signaux enregistrés sont ensuite convertis en profils de vitesse grâce à la méthode d'analyse par transformée de Fourier. Les différentes opérations de traitement des données sont effectuées à l'aide du logiciel WAVE développé par le CEA

La première étape dans la mise en œuvre d'essai d'impact de plaques pour analyse Lagrangienne repose sur le choix du matériau de l'ensemble buffer/plaque impactrice.

La limite d'élasticité des deux plaques doit être suffisamment élevée. En effet, la technique mise en œuvre repose sur une déformation d'une surface ondulée. Cette déformation doit s'opérer à un niveau de chargement appliqué à la cible suffisamment élevé pour conserver un intérêt. L'impédance doit également être la plus élevée possible pour générer des niveaux de contrainte élevés. L'acier étant facile à usiner et offrant une limite d'élasticité élevée, il a été décidé d'utiliser ce type de métal.

3.3 Point bibliographique sur les aciers

3.3.1 Comportement des aciers sous chargement de compression intense par impact de plaques

Lors d'essais d'impact de plaques sur aciers, ou plus généralement lorsque de l'acier est mis en jeu au sein d'essai d'impact de plaques il arrive, selon les contraintes atteintes, que l'acier change de phase. Un changement de phase notamment intervient dans certaines nuances d'aciers avant 1000 m/s, il s'agit de la transition $\alpha \Rightarrow \epsilon$ (Dyachkov et al., 2020). Cette transition correspond au palier numéroté 2 de la Figure 3-7.

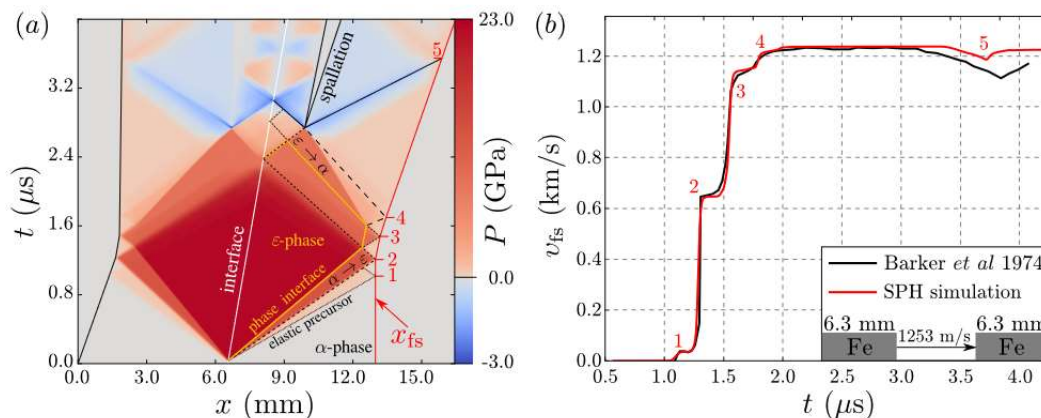


Figure 3-7 : Courbe typique de vitesse matérielle obtenue lors d'un essai d'impact de plaques sur acier avec changement de phase

Au cours de sa thèse, Doubax (Doubax, 1992) a étudié les changements de phases de l'acier Mars soumis à un impact de plaques. Ce dernier a observé un changement de phase $\alpha \Rightarrow \epsilon$ pour des vitesses d'essai allant de 810 à 1544 m/s.

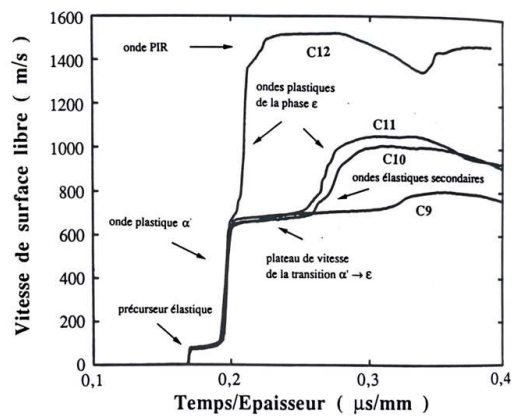


Figure 3-8 : Courbes de vitesse de surface libre obtenues lors des différents essais (Doubax, 1992)

D'autres auteurs tel que Barker (1974) ont observé des effets similaires sur du fer et avaient conclu que la transition $\alpha \Rightarrow \epsilon$ avait notamment lieu lors d'essais d'impact de plaques aux alentours de 13 GPa. Pour obtenir ce résultat ce dernier a effectué lors de ses essais une mesure de vitesse de surface libre VISAR et en remontant à la vitesse matérielle par la formule de B&H :

$$u_1 = \frac{1}{2} \left[u_{s11} + \frac{C_L - C_1}{C_1} u_e \right] \quad 3-1$$

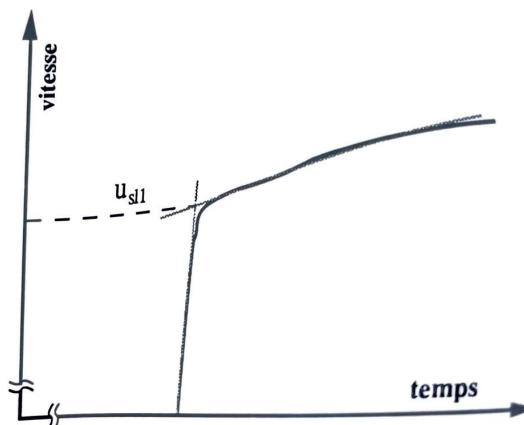


Figure 3-9 : Schéma illustrant l'obtention du changement de pente sur la mesure de vitesse en face arrière via la méthode de B&H

Où U_e est la vitesse matérielle correspondant au précurseur élastique, U_{s11} est la vitesse de surface libre et C_1 la célérité de l'onde plastique α . Avec cette technique de mesure, Doubax (1992) a obtenu une contrainte de changement de phase pour l'acier aux alentours de 13,3/13,8 GPa. Il l'a par la suite comparé à la mesure de la transition de phase obtenue pour les mêmes essais avec une méthode d'analyse différente, celle de Grady :

$$u_1 = \frac{C_L u_{s11} + (C_1 - C_L) u_e}{C_1 + C_L} \quad 3-2$$

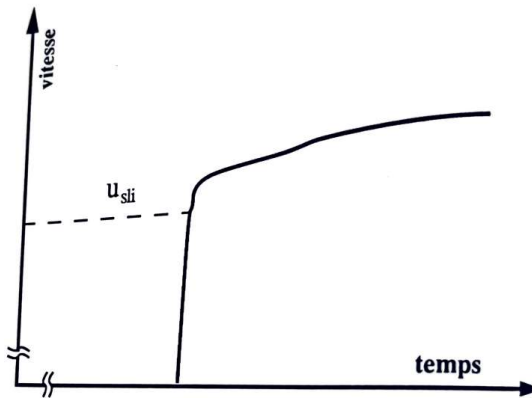


Figure 3-10 : Schéma illustrant l'obtention du changement de pente sur la mesure de vitesse en face arrière via la méthode de Grady

Dans le cas de cette formule l'auteur obtient une contrainte allant de 13,6GPa à 14,4GPa lors de ces essais.

3.3.2 Procédé de mise en forme des aciers par fabrication additive

Il existe plusieurs moyens permettant de mettre en forme les buffers ou les plaques impactrices. Tout d'abord on peut recourir aux méthodes classiques d'usinages et autres méthodes soustractives. Ces méthodes, tel que le tournage, permettent d'obtenir des géométries présentant un relief en surface avec une tolérance de l'ordre de 0,01 mm. Toutefois, ces méthodes d'usinage recèlent un certain nombre de limitations en termes de géométrie de surface pouvant être générée.

Une alternative consiste à utiliser des plaque impactrices imprimées en 3D. La fabrication additive est définie comme l'ensemble des procédés permettant de fabriquer par ajout de matière, couche par couche un objet physique à partir de sa contrepartie numérique (Chniouel, 2019). Durant sa thèse, (Chniouel, 2019) détaille les différents procédés de mise en forme par fabrication additive d'aciers. La première catégorie concerne la fusion sur lit de poudre qui s'oppose au dépôt de matière sous énergie concentrée comprenant le dépôt de fils et de poudre. Les différentes techniques sont détaillées dans la Figure 3-11.

Catégorie	Source d'énergie	Exemple de technologie	
Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion)	Faisceau laser	SLM (Selective laser Melting) DMLS (Direct Métal Laser Sintering)	
	Faisceau d'électrons	EBM (Electron Beam Melting)	
Dépôt de matière sous énergie concentrée (Direct Energy Deposition)	Dépôt de poudre	Faisceau laser	LDMD (Laser Direct Metal Deposition)
		Plasma	
	Dépôt de fil	Faisceau d'électrons	EBM (Electron Beam Melting)
		Faisceau laser	LWAM (Laser Wire Additive Manufacturing)
		Faisceau d'électrons	EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)
		Arc électrique	WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing)

Figure 3-11 : Tableau récapitulatif des différentes techniques de fabrication additives pour acier

A. Fusion sur lit de poudre (PBF)

Comme son nom l'indique, les procédés de fusion sur lit de poudre s'appuient sur de la fusion sélective appliquée couche par couche par le moyen d'un laser. Il existe plusieurs procédés de mise en forme par lit de poudre : le frittage laser direct des métaux (DMLS), la fusion sélective au laser (SLM) et la fusion par électron (EDM). (Frazier, 2014)

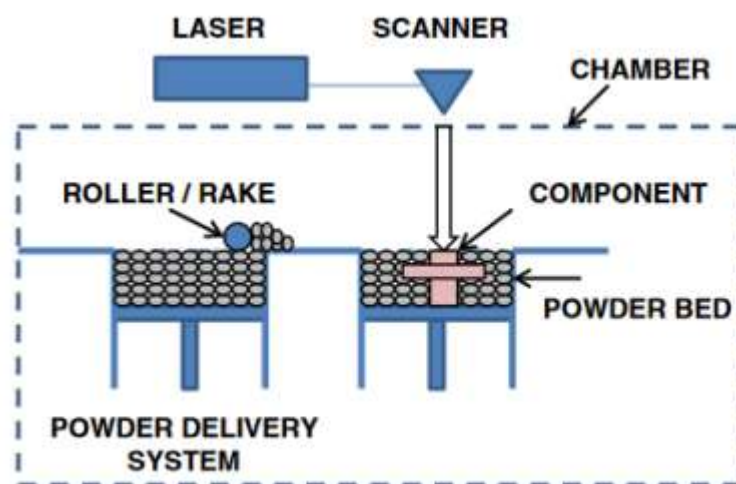


Figure 3-12 : Présentation de la technique de fabrication additive par fusion sur lit de poudre

Chniouel (2019) explique que la fusion sur lit de poudres permet d'avoir une bonne précision et une bonne résolution. Néanmoins, pour éviter les contraintes résiduelles

dues au processus de fusion et de solidification rapide, un post-traitement est nécessaire. D'autre part, ce genre de procédé peut créer des hétérogénéités dans la microstructure. C'est notamment l'étude qu'ont menée Charmi (2021) et Bedmar (2021). Ces derniers ont mis en avant l'anisotropie provoquée par l'impression additive d'acier 316L. Dans un premier temps, des porosités peuvent être induites. Dans un second temps, l'orientation d'impression exerce une influence sur la microstructure et engendre des propriétés anisotropes dans le matériau. Ainsi Charmi (2021) en a conclu que le plan $\langle 110 \rangle$ était à privilégier lors de l'impression de pièce en acier 316L et que les pièces imprimées de cette façon possédaient une densité proche de 99 %.

B. Le Jet de liant

La technique de jet de liant est une technique de fabrication additive ayant pour particularité de demander un recuit de la pièce. En effet contrairement à la fusion sur lit de poudres, un liant est projeté sur un lit de poudres couche par couche. Par la suite, la pièce à cru est frittée (Mostafaei, 2021).

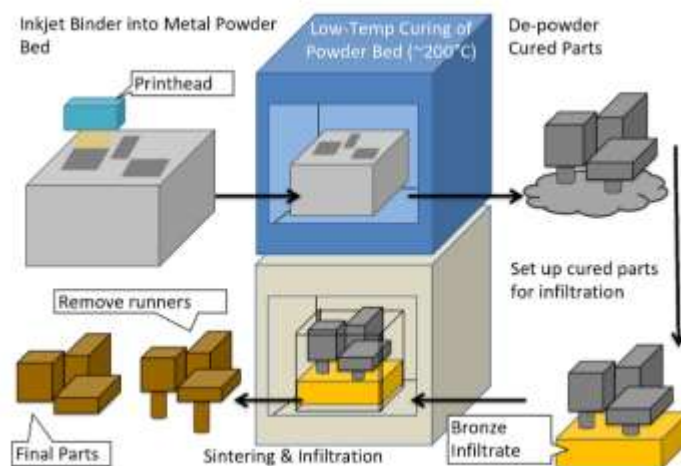


Figure 3-13 : Présentation de la technique de fabrication additive par jet de liant

Cette technique offre d'après l'auteur des avantages notamment vis-à-vis des volumes pouvant être imprimés. De plus, cette technique a l'avantage, par rapport à la fusion, de ne pas recourir à un changement de phase et donc d'éviter les tensions résiduelles au sein du matériau. D'autre part, cette technique est la seule à fournir des pièces à grains équiaxiaux et donc de conserver les propriétés isotropiques du matériau d'étude.

C. Extrusion par dépôt de fil en fusion (FDM)

La dernière grande catégorie est l'extrusion par dépôt de fil. Cette méthode est la plus populaire lorsqu'il s'agit d'imprimer des polymères. Néanmoins, il est également possible de fabriquer des pièces en acier avec cette technique. Pour ce faire, un mélange d'acier et de polymères est déposé à l'aide d'une buse couche par couche. Par la suite

la partie polymère est retirée lors de la phase d'ébavurage et la pièce est frittée. (H. Gong et al., 2018).



Figure 3-14 : Présentation de la technique d'impression FDM

Les propriétés matériaux dépendent des paramètres d'impression et de frittage. (Wagner et al., 2022). Néanmoins, ce type d'impression permet de laisser des contraintes résiduelles plus faibles que les techniques de type SLM. Pour un même matériau, deux techniques de fabrication additive différentes produisent donc deux microstructures distinctes, avec les propriétés qui leur sont propres. Cela peut être observé sur la Figure 3-15, pour un acier 316L fabriqué à partir de FDM(a) et de SLM(b) (H. Gong et al., 2018).

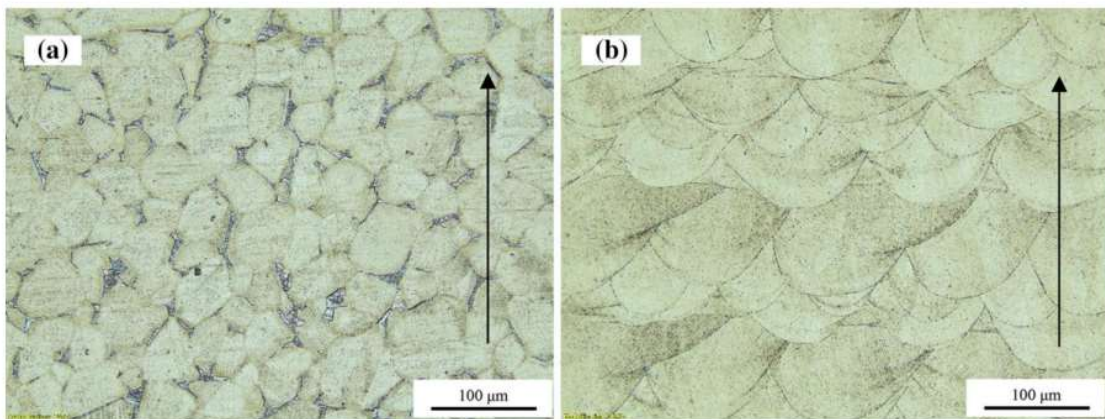


Figure 3-15 : Observation au MEB d'acier 316L produit par FDM(a) et SLM(b)

On observe que, malgré des porosités plus importantes dues aux phases d'ébavurage et de frittage, l'acier obtenu par FDM présente l'avantage d'avoir une microstructure plus isotrope. Néanmoins, comme évoqué plus tôt, il est possible d'effectuer des traitements thermiques afin de corriger l'anisotropie des pièces produites en SLM (Gray, 2015).

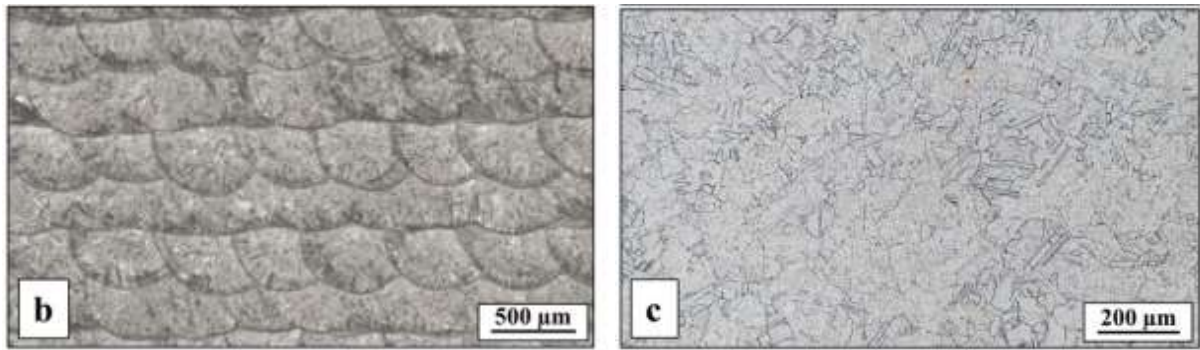


Figure 3-16 : Acier 316L produit par SLM avant (b) et après traitement thermique (Gray, 2015)

Dans le cas des travaux de Gray sur le 316L, ce dernier a montré que le recuit des structures permettait d'avoir une réponse sous choc de l'acier obtenue par fabrication additive plus proche du matériau usiné.

Ainsi il existe plusieurs techniques de mise en œuvre, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. Les avantages des techniques de fabrication additive reposent sur une grande liberté de conception à partir de modèles numériques et la possibilité d'une production relativement rapide, ce qui peut permettre des ajustements lors de certaines campagnes d'essais. Néanmoins, un certain nombre de problèmes peut se poser, notamment l'obligation dans certains cas d'un post-traitement, ou concernant l'état de surface qui peut laisser à désirer. Mirzababaei (2019) explique que dans le cas de l'acier 316L inoxydable austénitique, la fabrication additive conduit à une limite d'élasticité, une résistance à la traction et une dureté ultime plus élevées et une ductilité inférieure. Les données de l'acier 316L obtenu par fabrication soustractive et additive peuvent être trouvés en ANNEXE B.

Une fois renseigné sur les caractéristiques des aciers, certains d'entre eux ont été choisis pour être testés en essais d'impact de plaques.

3.4 Sélection du matériau de la plaque impactrice et du buffer

Dans un premier temps, il est nécessaire de choisir un matériau composant le buffer et la plaque impactrice. Pour ce faire, différents matériaux ont été envisagés. L'ensemble buffer/plaque impactrice devait présenter une limite d'élasticité suffisamment élevée et être facilement usinable afin d'obtenir les géométries d'ondulation de surface souhaitées. Il s'agit également d'éviter un changement de phase afin de ne pas perturber le signal mesuré en face arrière de la céramique. Plusieurs matériaux ont donc été testés à l'aide du laveur à gaz présent au sein du laboratoire 3SR.

Cependant, étant donné la vitesse d'impact très élevée nécessaire pour tester les céramiques en compression (plus de 800 m/s), un acier ne présentant pas de transformation de phase sous de tels niveaux de chargement doit être envisagé. Pour ce faire différents aciers ont été testés en configuration miroir : une plaque d'acier de 5

mm d'épaisseur et de 50 mm de diamètre est envoyé sur une plaque similaire du même acier (Figure 3-18). Le but est de déterminer si le changement de phase habituellement présent aux alentours de 700 m/s dans le cas d'impact de plaques a lieu. Trois nuances d'aciers ont été testées, l'acier 316L, l'acier Stavax et l'acier 1,45425.




Nom de l'acier	Dimensions de la cible	Vitesses atteintes	Observation d'un palier 700m/s
STAVAX	5mm par 70mm 	819m/s	OUI
316L	5mm par 70mm 	891m/s	NON
Acier 1,45425	5mm par 70mm 	897m/s	--

Tableau 3-1 : Liste des différents tests réalisés afin de trouver un acier sans changements de phase.

Le dernier test effectué sur acier 1,45425 n'a pas été concluant. En effet un souci au niveau des barrières de vitesses a empêché le déclenchement des mesures sur oscilloscope.

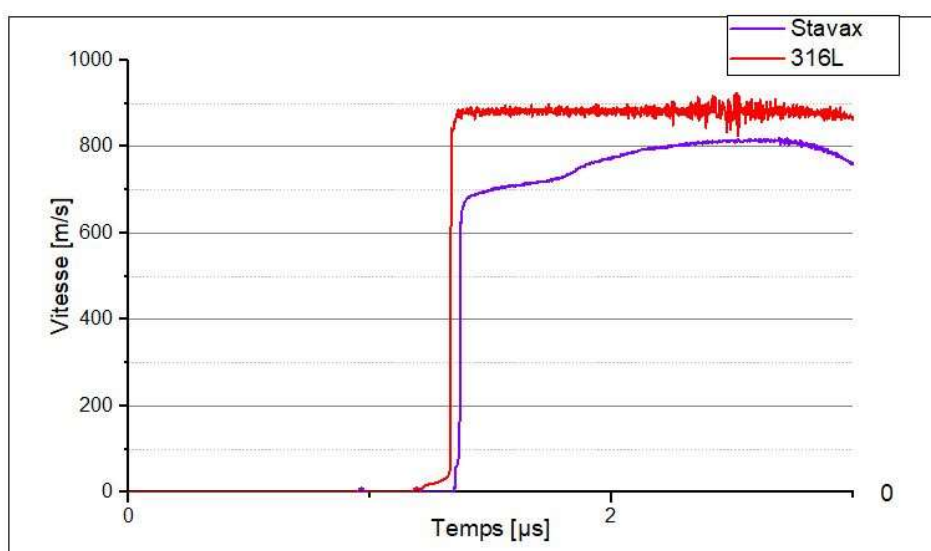


Figure 3-17 : Comparaison des mesures de vitesse en face arrière obtenue pour des essais miroirs avec deux types d'acier

Concernant l'échantillon de Stavax, Le changement de phase est présent et visible Figure 3-17. Ce dernier s'effectue pour un $u_{11} = 654,5\text{m/s}$ ou un $u_{sl1} = 620,5\text{m/s}$. Par la méthode de B&H cela correspond donc à une contrainte de 13,4 GPa ainsi que 13,4

GPa selon la méthode de Grady (Doubax, 1992). Ces contraintes de transitions de phases sont similaires à celles obtenues par Doubax au sein de sa thèse portant sur l'acier Mars (comprise entre 13,3GPa et 14,4GPa).



Figure 3-18 : Etat avant et après le test d'impact de plaques de l'ensemble cible (gauche), du support en aluminium et du projectile (droite) incluant la plaque impactrice et le sabot

A contrario, aucun changement de phase n'est observé sur le profil de vitesse de l'essai pratiqué sur acier 316L qui a, de plus été impacté à plus haute vitesse. L'acier 316L est un acier inoxydable austénitique largement utilisé dans les secteurs de l'industrie naval, de l'énergie, de l'aérospatiale et de la médecine en raison de ses propriétés combinant résistance mécanique et résistance à la corrosion (Elkaseer et al., 2019).

Au vu des différents résultats il a donc été décidé de produire les buffers et les plaques impactrices en acier 316L. La géométrie ondulée des plaques impactrices a fait l'objet d'un dimensionnement numérique présenté ci-après.

3.5 Dimensionnement numérique des essais pour analyse Lagrangienne

3.5.1 Paramètres des simulations numériques

Un dimensionnement numérique des essais a été entrepris dans le but d'optimiser les dimensions de la plaque impactrice et du buffer. En effet, les contraintes atteintes au sein du matériau d'étude suite à l'utilisation de la plaque impactrice ondulée doivent au cours des essais être suffisantes pour dépasser la LEH, et le buffer doit homogénéiser les contraintes générées au sein de la céramique.

L'article de (Forquin et Zinszner, 2017) a servi de base à ce travail de dimensionnement. Concernant la géométrie de la plaque impactrice, la géométrie 2 présente dans cet article a été choisie. Cette dernière est détaillée Figure 3-19.

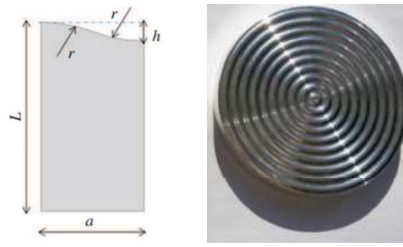


Figure 3-19 : Géométrie des plaques impactrices ondulées et schéma d'une demi-période de largeur (a) égale à 2 mm, de hauteur d'ondulation (h) de 0,5 mm et caractérisée par un rayon de courbure (r) de 2,125 mm et une épaisseur totale (L) égale à 5 mm.

Concernant le diamètre de la plaque impactrice, ce dernier doit être choisi pour que les ondes de détente radiales n'atteignent pas la zone de mesure à l'arrière de la céramique durant le temps de l'essai. Le temps utile de l'essai peut être déduit par la formule suivante :

$$T_{release} = \frac{\phi_{striker}}{2C_{ceram}} \quad 3-3$$

où $T_{release}$ correspond au temps pour que les ondes atteignent le centre de la cible et C_{ceram} correspond à la vitesse d'onde dans la direction radiale dans la céramique. Le diamètre du tube de lancement étant de 80 mm, le diamètre de plaque impactrice est fixé égal à 70 mm afin de pouvoir fixer la plaque impactrice dans le sabot en Polycarbonate. Avec un tel diamètre, si on considère une vitesse d'onde dans la céramique aux alentours de 10 000 m/s, un temps de 3,5 μ s est obtenu avant que la mesure des ondes en face arrière ne soit perturbée.

De même, le temps de chargement sera inférieur ou égal au temps d'aller-retour d'onde dans le projectile :

$$T_{load} = < \frac{2e_{striker}}{c_L} \quad 3-4$$

où $e_{striker}$ correspond à l'épaisseur du projectile et c_L à la vitesse des ondes longitudinale au sein du projectile. En considérant, comme dans l'étude préliminaire de (Forquin et Zinszner, 2017) une épaisseur de 5 mm et sachant que la vitesse des ondes au sein de l'acier 316L est de 5780 m/s (Keller, 2018) on obtient un temps de chargement d'environ 2 μ s. Il s'agit de vérifier numériquement que cette épaisseur de 5mm est suffisante.

D'autre part, il reste à définir une épaisseur de buffer qui soit suffisamment importante pour homogénéiser le champ de contraintes et assez faible pour éviter toute influence des ondes de détente.

Paramètres matériaux

Le comportement plastique de l'acier a été modélisé à l'aide du modèle de plasticité Johnson-Cook (Johnson et Gordon, 1983) qui décrit le comportement d'érouissage plastique en fonction de la vitesse de déformation et de la température.

$$\sigma = (A + B(\varepsilon_{pl})^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{tr}}{T_{melt} - T_{tr}} \right)^m \right) \quad 3-5$$

- σ est la contrainte d'écoulement (MPa),

- ε_{pl} est la déformation plastique équivalente à laquelle σ est calculée

- $\dot{\varepsilon}_{pl}$ est la vitesse de déformation plastique (s^{-1})

- $\dot{\varepsilon}_{ref}$ est la vitesse de déformation plastique de référence

- T est la température d'analyse actuelle ($^{\circ}C$)

- T_{tr} est la température transitoire ($^{\circ}C$)

- T_{melt} ($^{\circ}C$) est la température de fusion du matériau pour laquelle la contrainte d'écoulement est nulle.

A , B , C , n et m sont des constantes du matériau. Pour l'acier 316L, ces paramètres sont énumérés dans le tableau suivant.

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	T_{melt}
490	600	0.21	0.60	0.015	1663,15

Tableau 3-2 : Paramètres J-C de l'acier 316L (Elkaseer et al., 2019)

Concernant la céramique d'étude il a été choisi de modéliser le F99 avec un modèle élasto-plastique parfait. Concernant le matériau fenêtre le LiF a été utilisé. Par la suite une étude de sélection de matériau a été effectuée afin de déterminer le matériau fenêtre le plus propice aux essais. Le matériau fenêtre utilisé dans l'article de Forquin (Forquin et Zinszner, 2017) a été choisi dans un premier temps.

Les paramètres considérés dans la simulation numérique sont détaillés dans le Tableau 3-3.

Nom	Densité [g cm ⁻³]	G [GPa]	E [GPa]	ν	σ_y [MPa]	ϵ_p	C_0 [m s ⁻¹]	s	γ_0
F99 ³	3880		380	0.22	5120	0			
LiF ⁴	2638	49			360	0	5150	1.35	1.69

Tableau 3-3 : Paramètres matériaux utilisés au sein des essais de dimensionnement

La modélisation numérique s'est concentrée sur une tranche de demi-période de la plaque ondulée pour des raisons de symétrie.

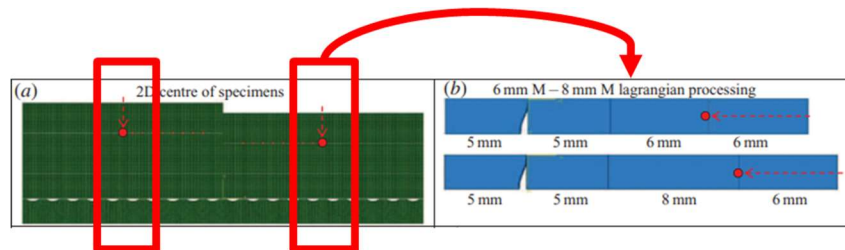


Figure 3-20 : Modélisation de la configuration considérée pour analyse lagrangienne

Pour ce faire, l'étude a été réalisée à l'aide du logiciel aux éléments finis Abaqus-explicit. Le type d'élément considéré pour chaque solide (plaque flyer, tampon et échantillon) est un élément à intégration réduite à 8 nœuds (C3D8R). Ces éléments sont mis en contact via un contact de type penalty. Une vitesse initiale de 850 m/s est imposée à la plaque impactrice. Différentes variables ont été mesurées comme la vitesse en face arrière en trois points (Figure 3-21) ainsi que les contraintes et les déformations au sein de la céramique (étoile sur la Figure 3-21).

³ Données issues de la fiche de données (datasheet) du fournisseur

⁴ Données issue de (P. Forquin et Zinszner 2017)

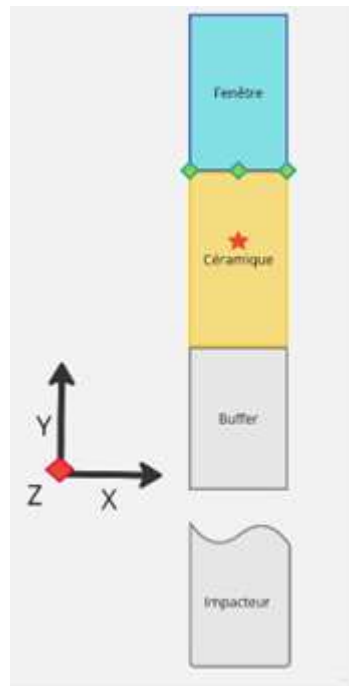


Figure 3-21 : Schématisation des différents blocs solides pour le dimensionnement des impacts de plaque. L'étoile rouge correspond au point de mesure des contraintes et déformations, les losanges verts correspondent aux mesures de vitesse en face arrière

La géométrie de l'ondulation correspond à la géométrie 2 décrite Figure 3-19. Concernant les conditions limites, les déplacements selon X et Z ont été bloqués sur les faces afin de décrire une situation de « plaque infinie ». Le blocage des déplacements selon X et Z permet de reproduire numériquement un chargement en déformation uniaxiale (identique au comportement de la céramique lors des essais).

3.5.2 Dimensionnement numérique des essais

La première question qui se pose porte sur l'influence du maillage. La simulation numérique ne prend en compte qu'une demi-période (Figure 3-20) de largeur 2 mm et de 0,5 mm d'épaisseur. Afin d'avoir une représentation la plus fine possible du déplacement des ondes il est nécessaire d'avoir un maillage assez fin dans la direction Y. Concernant la direction X, il faut s'assurer d'avoir un nombre suffisamment de maille pour pouvoir étudier l'effet d'homogénéisation des contraintes au sein de la céramique.

Un maillage de l'ordre de 0,2 mm a été choisi pour la suite des tests de dimensionnements. Cette valeur a été déduite de l'étude de (Forquin et Zinszner, 2017) qui testé trois tailles de maille différentes de 0,1 à 0,3 mm pour lesquelles la convergence en maillage avait été atteinte.

Par la suite comme évoqué précédemment, différentes épaisseurs de buffer ont été testées : 3mm, 5mm, 7mm. La configuration est la même que celle présenté en Figure 3-21. Les mesures de vitesses en face arrière sont observées sur la Figure 3-22.

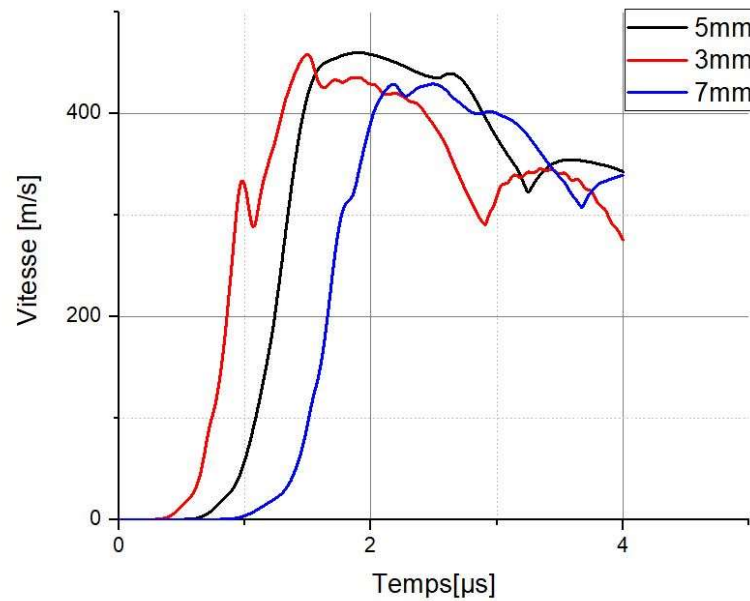


Figure 3-22 : Mesure de vitesse en face arrière obtenue par simulation numérique pour différentes configurations avec différentes tailles de buffer

Au cours de ces essais les contraintes en compression ont également été analysées. Dans un premier temps il peut être remarqué que dans le cas d'un buffer de faible épaisseur (3 mm) la contrainte axiale n'est pas appliquée de manière homogène à la céramique.

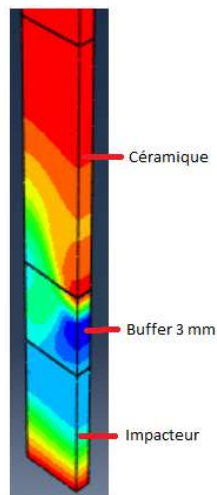


Figure 3-23 : Champ de contraintes axiales observé par simulation numérique avec un buffer de 3mm

A contrario lorsque le buffer est de plus grande épaisseur tel que 5 mm l'état de contrainte apparaît plus homogène dans la direction radiale Figure 3-23:

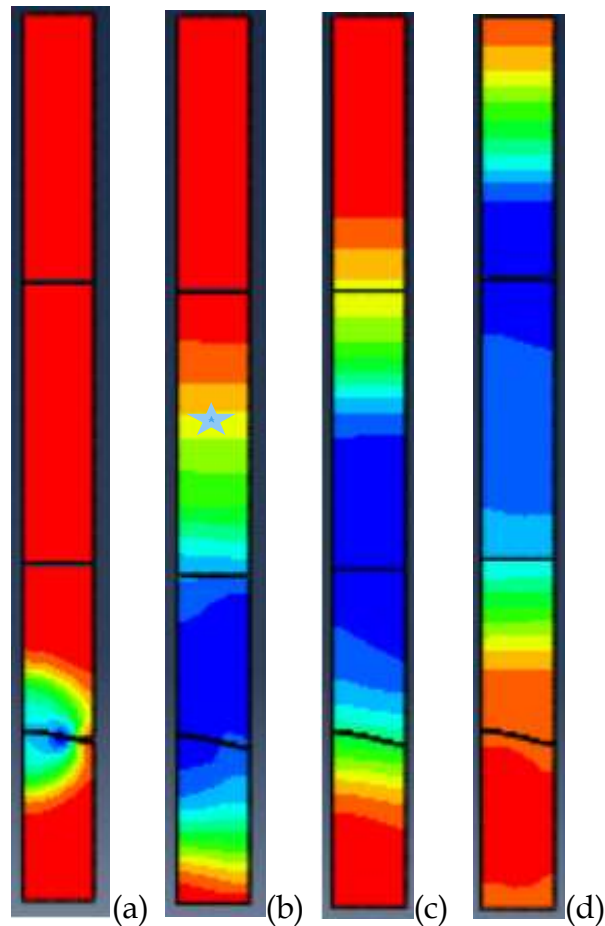


Figure 3-24 : Champ des contraintes axiales dans la cible à différents instants : 0,3 μs (a), 1,5 μs (b), 2,1 μs (c), 3,2 μs (d). L'onde de compression est représentée en bleu, le rouge correspond à la contrainte nulle.

Sur la Figure 3-24 les contraintes de compression sont représentés en bleu-vert.

Plusieurs phénomènes sont observables au cours de l'impact.

- [1] Dans un premier temps, suite au contact entre la plaque impactrice et le buffer une onde de compression se crée.
- [2] Par la suite, l'onde se propage jusqu'au point de mesure numérique représenté par l'étoile ce qui provoque la première pente de contrainte (Figure 3-25)
- [3] Une partie de l'onde est réfléchié à l'interface entre la fenêtre et la céramique.
- [4] L'onde est par la suite réfléchié sur la face arrière du matériau fenêtre.
- [5] L'onde de détente atteint le point de mesure provoquant une chute du niveau de contrainte axiale en ce point.

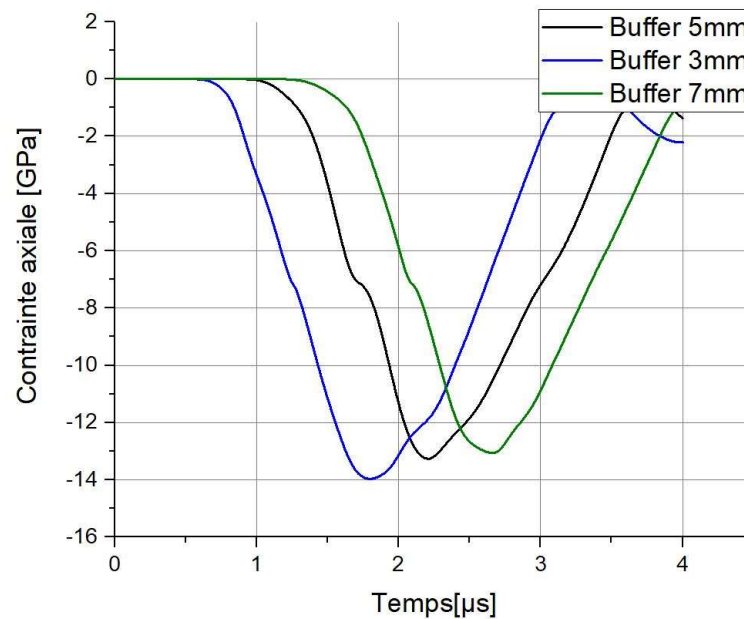


Figure 3-25 : Contraintes axiales au sein de la céramique pour différentes épaisseurs de buffer

Il est observé que, passé les 2 premières microsecondes, une chute des contraintes de compression au sein du matériau a lieu.

Le matériau fenêtre utilisé par défaut pour l'étude numérique de Forquin (Forquin et Zinszner, 2017) été le LiF. Néanmoins si ce dernier est couramment utilisé au sein d'essais d'impact de plaques (Vogler, 2004) ce n'est pas la seule alternative. En effet certains expérimentateurs utilisaient également le PMMA (Bourne et al., 1995). D'autres part, le saphir peut être un matériau fenêtre intéressant au vu de sa transparence dans la gamme de longueur d'onde du matériel de mesure (1550 nm). De plus son impédance proche des céramiques en fait un matériau intéressant. Les trois matériaux ont donc été comparés en considérant une loi de comportement de type élasto-plastique avec les propriétés suivantes Tableau 3-4 :

Nom	Densité [g cm ⁻³]	G [GPa]	E [GPa]	ν	σ_y [MPa]	ϵ_p	C_0 [m s ⁻¹]	s	γ_0
Saphir	3900		435	0.28	11000	0			
LiF	2638	49			360	0	5150	1.35	1.69
PMMA	1200		3,3	0,35	70	0			

 Tableau 3-4 : Propriétés du LiF⁵, du PMMA⁶ et du Saphir⁷ utilisées dans les simulations numériques

⁵ Données issue de (Forquin et Zinszner, 2017)

⁶ Données issues de datasheet fournisseurs

⁷ Données issues de la datasheet Saint-Gobain et [Munsen et Lawrence, 1979]

Les différentes simulations ont été effectuées avec la même configuration que précédemment. Les mesures de déformations plastiques et des contraintes axiales peuvent être comparées sur la Figure 3-26.

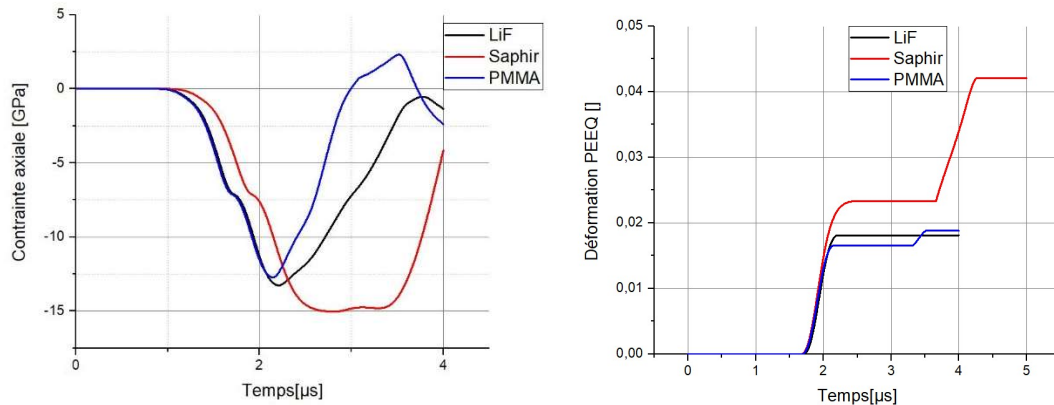


Figure 3-26 : Contrainte axiale et déformation plastique en fonction du matériau fenêtre utilisé au centre de la céramique issue de la modélisation

Il est observé que le saphir contrairement aux deux autres matériaux fenêtres permet d'atteindre des niveaux de contrainte axiale et de déformation plastique plus élevés dans la céramique. Cela est dû à l'impédance très élevée du saphir qui est proche de celle des céramiques notamment du SiC. D'autre part, la déformation plastique au sein de la céramique avec un matériau fenêtre en saphir est plus de deux fois supérieurs avec le saphir.

C'est pourquoi le saphir a été choisi comme matériau fenêtre lors des essais de compression par impact de plaques.

Il a donc été décidé de faire usiner des pièces suivant la géométrie dite géométrie 2 en acier 316L de 5 mm d'épaisseur et des buffers de 5 mm d'épaisseur également usiné dans le même matériau. Des matériaux fenêtres en saphir sont utilisés.

3.6 Essais de validation des plaques impactrices en acier 316L

3.6.1 Présentation des essais

L'essai « A1 » est un essai d'impact de plaques plan classique. Une plaque impactrice ondulée est utilisée dans l'essai « A2 ». L'essai « A3 » est réalisé avec une cible constituée de 2 plaques collées dans le de vérifier que la colle époxy utilisée lors du montage des cibles n'avait pas d'influence sur les mesures relevées à haute vitesse. Il s'agit d'une colle Araldite couplée à un durcisseur Araldure. L'épaisseur de colle est inférieure à 0,1 mm à la suite d'un collage réalisé avec minutie.

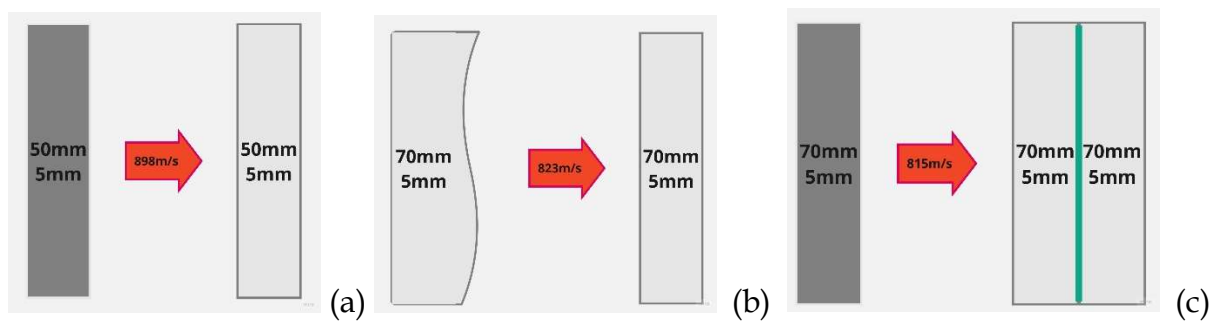


Figure 3-27 : Schéma des différents essais de mise en place pour permettre l'analyse Lagrangienne sur céramique. Essais « A1 » (a), « A2 » (b) et « A3 » (c).

Pour donner suite à ces essais, il a été décidé de se servir du 316L comme matériau d'étude afin de réaliser une première analyse Lagrangienne sur cet acier. Afin d'étudier au mieux le matériau les deux premier test « A1 » et « A2 » ont été réitérés avec une vitesse d'impact plus faible afin de vérifier le comportement de la plaque impactrice ondulée à faible vitesse. De plus afin de se rapprocher de la configuration expérimentale nécessaire à la réalisation d'une analyse Lagrangienne des buffers ont également été rajoutés aux essais. Les deux tests ainsi effectués seront nommés « A4 » et « A5 ».

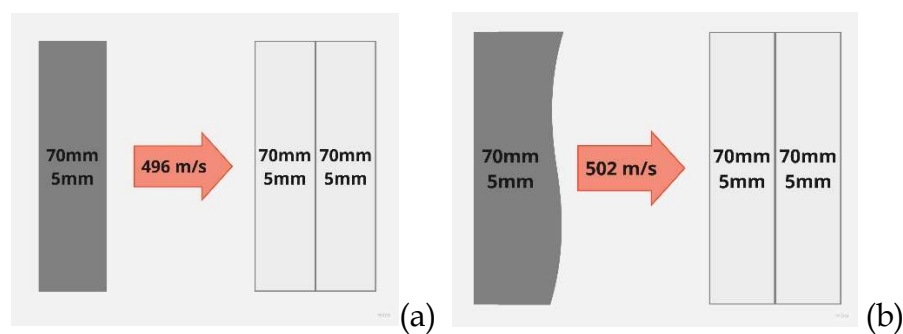


Figure 3-28 : Schéma des différents essais de mise en place pour permettre l'analyse Lagrangienne sur 316L. Essais « A3 » (a) et « A5 » (b).

En outre, une configuration a été mise en place afin de pouvoir réaliser une analyse Lagrangienne sur acier 316L. Cette analyse Lagrangienne a pour but de vérifier que le programme implémenté pour faire l'analyse fonctionne correctement et permet d'obtenir une courbe de contrainte axiale-déformation axiale pour un matériau connu tel que cet acier. Cet essai sera nommé essai « A6 ».

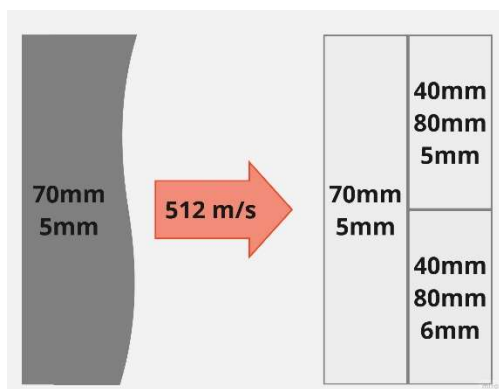


Figure 3-29 : Schéma de l'essai pour l'analyse Lagrangienne sur 316L

3.6.2 Validation des plaques impactrices ondulées

Le résumé des configurations évoquées plus tôt peut être retrouvées dans le tableau ci-dessous.

Nom du test	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Plaque impactrice	Plan 50 × 5mm	Wavy 70 × 5 mm	Plan 70 × 5 mm	Plan 70 × 5 mm	Wavy 70 × 5 mm	Wavy 70 × 5 mm
Cible	316L 50 × 5 mm	316L 70 × 5 mm	316L 2 - 70 × 5mm	316L 2 - 70 × 5mm	316L 2-70 × 5mm	316L 40×80×5 40×80×6
Vitesse d'impact [m/s]	898	823	815	496	501,6	512

Tableau 3-5 : Résumé des différents essais effectués sur aciers 316 L

Le premier objectif était de tester l'effet de la géométrie ondulée de la plaque impactrice. Les résultats expérimentaux des essais « A1 » et « A2 » peuvent être observés sur la Figure 3-30. La vitesse d'impact, d'environ 850 m/s, a été choisie pour atteindre la même gamme de contraintes que dans les expériences qui seront menées ultérieurement sur des matériaux céramiques. Pour ce faire, une pression d'environ 280 bars de gaz hélium est utilisée dans le réservoir pour accélérer le projectile à la vitesse d'impact souhaitée et le tir est effectué avec un vide restreint dans la chambre principale, de l'ordre de 1 mbar. La vitesse à l'arrière de l'échantillon a été mesurée grâce à une sonde optique et au système de vélocimétrie. Le logiciel Wave développé au CEA a été utilisé pour traiter les signaux d'interférométrie et obtenir le signal de vitesse mesuré.

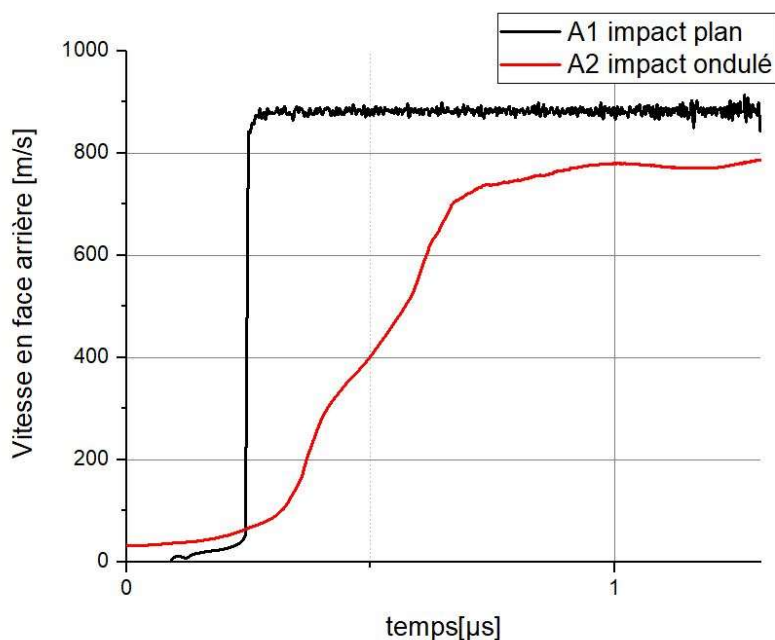


Figure 3-30 : Comparaison des essais A1 et A2 pratiqués avec plaque impactrice plane ou ondulée en acier 316L sur une cible en acier 316L

Lors de l'essai avec plaque impactrice plane, un front de montée très raide est observé, ce dernier est presque instantané. En revanche, lors de l'utilisation de la plaque ondulée, le temps de montée est beaucoup plus long, de l'ordre de 0,8 μs. Un temps de montée aussi long est souhaitable pour pouvoir effectuer une analyse lagrangienne. Ce premier résultat est donc positif.

Le test « A3 » effectué afin de tester l'influence de la colle sur la mesure de vitesse en face arrière est représentée sur Figure 3-31.

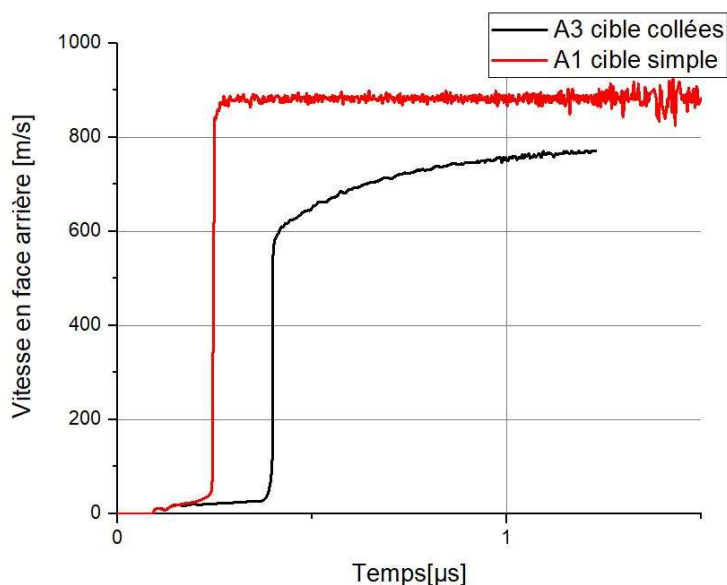


Figure 3-31 : Comparaison des tests A1 et A3 pour observer l'influence de la colle sur le montage

On peut observer une allure de vitesse en face arrière similaire. Il semblerait donc que la colle présente peu d'influence sur la mesure réalisée. Il est donc possible de conserver cette colle pour faire des montages permettant de réaliser des analyses Lagrangienne. Avant d'effectuer le test en analyse lagrangienne sur acier, deux autres tests à plus basse vitesse ont été menés pour étudier la réponse en déformation uniaxiale de l'acier 316L.

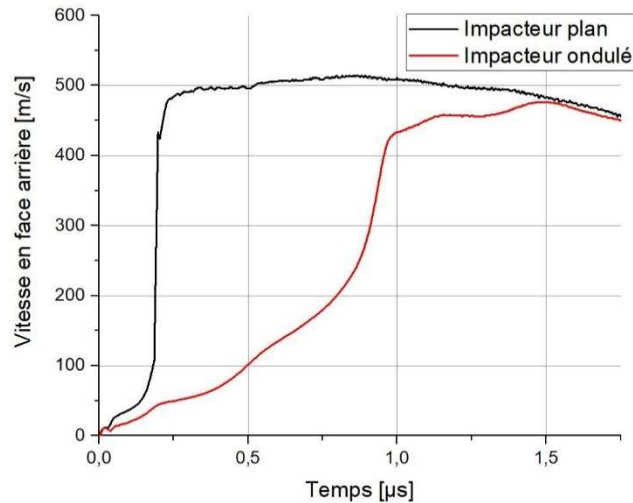


Figure 3-32 : Tests A4 et A5 réalisés avec impacteur plan et ondulé sur une cible constituée d'un buffer et d'un échantillon de 316L

Les essais « A4 » et « A5 » conduisent à des observations similaires aux essais « A1 » et « A2 ». En effet, un temps de montée de près de 1 μs est observé avec la plaque impactrice ondulée. Il est intéressant d'observer l'influence de la vitesse d'impact sur le temps de montée. En effet, pour une vitesse d'impact plus faible, on obtient un temps de montée plus long de 0,2 μs pour l'essai A5 par rapport à l'essai A2 (tous deux effectués avec une plaque impactrice ondulée). Cela peut signifier un temps d'écrasement lorsque la vitesse est réduite. Ce temps peut être approximé par :

$$T_{\text{front montant}} = T_{\text{écrasement}} \approx \frac{h_{\text{ondulation}}}{V_{\text{impact}}} \quad 3-6$$

Ceci confirme qu'il est possible de moduler le temps du front montant en jouant sur la hauteur de l'ondulation comme postulé par Forquin (Forquin et Zinszner, 2017). D'autre part, il est possible de comparer l'essai « A5 » avec une simulation numérique afin de vérifier si l'effet de la plaque impactrice ondulée est bien celui attendu. La comparaison est visible Figure 3-33.

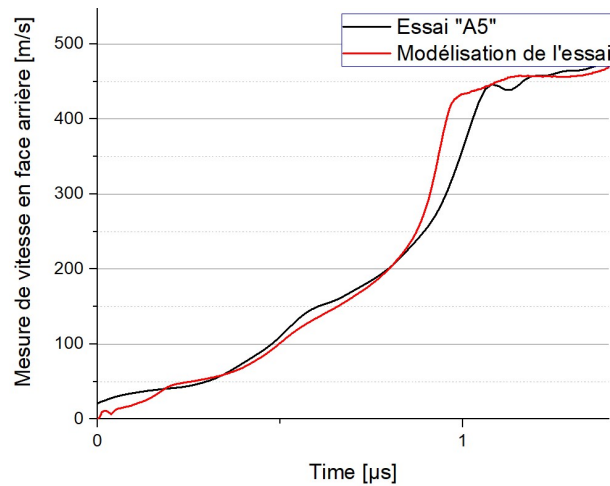


Figure 3-33 : Comparaison entre résultat expérimental du test « A5 » et sa modélisation numérique

La bonne cohérence entre résultats expérimentaux et numériques confirme qu'il est possible de prédire le comportement de la plaque impactrice ondulée et d'approximer le temps de montée résultant de l'utilisation de cette dernière.

Les essais avec plaque impactrice plane ont permis de déduire une LEH concernant la nuance d'acier utilisée. Cette dernière serait aux alentours de $1,2 \pm 0,3$ GPa. Ce résultat est comparable à ce qui peut être trouvé dans la littérature. En effet, (Klimova-Korsmik et al., 2021) a obtenu des LEH pour une autre gamme d'acier allant de 1 à 2 GPa selon le traitement thermique appliqué. Il est intéressant de vérifier cette valeur de LEH par l'analyse Lagrangienne.

3.6.3 Analyse Lagrangienne sur acier

Une configuration à double épaisseur permettant de pratiquer une analyse Lagrangienne sur l'acier a été mise en place. Deux échantillons d'épaisseurs différentes de 5 et 6 mm ont été collés sur un buffer, l'ensemble étant impacté avec une plaque impactrice ondulée. Une mesure de vitesse en face arrière est pratiquée sur ces deux échantillons. La vitesse d'impact est de 512 m/s. Par la suite, les données ont été traitées à l'aide du logiciel Wave afin de déterminer la courbe de vitesse en face arrière à partir des signaux mesurés. Deux courbes de vitesses en face arrière obtenues (Figure 3-34) sont utilisées comme données d'entrée du programme d'analyse Lagrangienne, disponible en ANNEXE C.

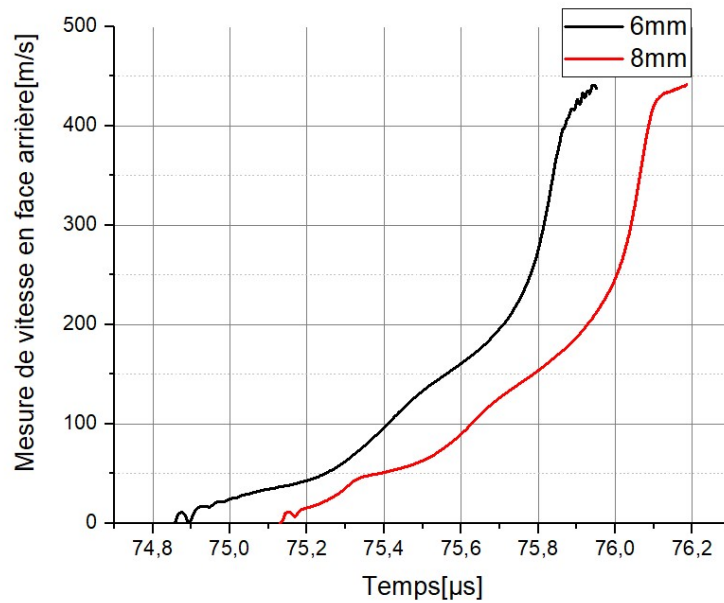


Figure 3-34 : Vitesse en face arrière mesurée sur les deux échantillons d'acier d'épaisseurs différentes permettant une analyse Lagrangienne de l'essai.

Après un ajustement des pieds de courbes, une analyse Lagrangienne peut être pratiquée permettant de déduire la réponse (contrainte axiale-déformation axiale) selon un trajet de chargement en déformation uniaxiale du matériau.

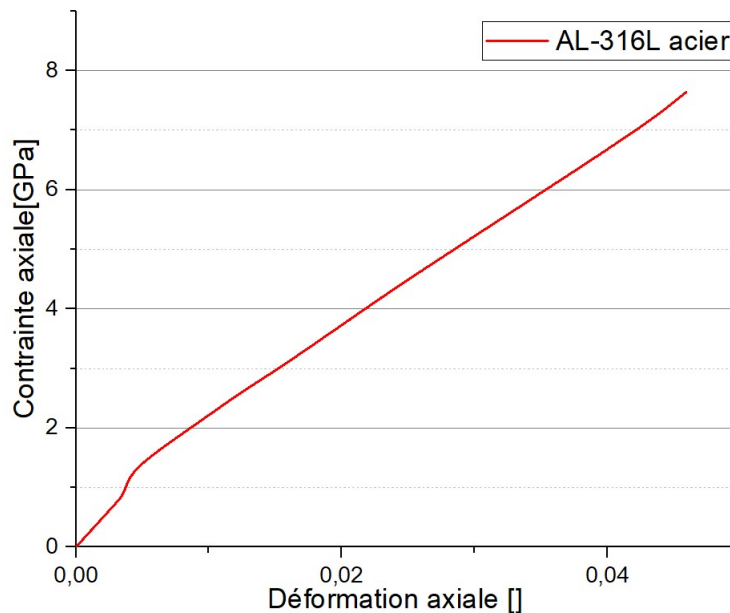


Figure 3-35 : Résultat de l'analyse Lagrangienne effectuée sur acier 316L à partir d'un essai d'impact de plaques sans choc

On observe sur cette courbe une rupture de pente caractéristique de la LEH. Cette dernière s'élève ici après analyse à $1,25 \pm 0,3$ GPa. Cette valeur est similaire à celle obtenue à la suite du précurseur élastique par impact de plaques plan. Cet essai valide le traitement par analyse Lagrangienne afin d'obtenir la réponse en déformation uniaxiale du matériau. Cette méthode sera appliquée par la suite aux céramiques.

Une géométrie de plaque impactrice caractérisée par une hauteur de rugosité de surface différente peut permettre plus de précision sur les résultats d'analyse Lagrangienne en fournissant un temps de montée plus long. Ces nouvelles géométries peuvent être obtenues grâce aux techniques de fabrication additives.

3.7 Plaques impactrices imprimées en 3D

Il a été observé que la géométrie usinée et présentée précédemment donne des résultats satisfaisants. Néanmoins, il est intéressant d'étudier l'intérêt de modifier la durée de la rampe de chargement. En effet, un temps de montée plus long peut exercer une influence sur les résultats d'analyse Lagrangienne.

Il a donc été décidé de tester d'autres géométrie de plaque impactrice. De nouvelles géométries sont rendues accessibles grâce à la technologie de fabrication additive de pièces en métal. De plus, l'acier 316L fait partie des aciers qu'il est possible d'imprimer facilement.

Une partie des résultats présentés dans ce sous-chapitre a été obtenue au cours du stage de Anselme JAOSIDY.

3.7.1 Dimensionnement numérique des plaques impactrices imprimées en 3D

3.7.1.1 Paramètres de simulation

Dans un premier temps, une étude numérique a été entreprise afin de tester plusieurs géométries et de retenir les plus intéressantes. Les simulations ont été effectuées sous le logiciel Abaqus en mode dynamique-explicite. Il a été choisi de ne pas prendre en compte les matériaux fenêtrés dans ces simulations afin de pouvoir comparer leur résultat à l'essai effectué dans la partie précédente. La céramique choisie est la F99 avec les paramètres similaires à ceux qui avaient pu être évoqués dans la Partie 3.4 (Tableau 3-2). Les paramètres de l'acier 316L ont été conservé ainsi que les conditions limites et les contacts de type « penalty ».

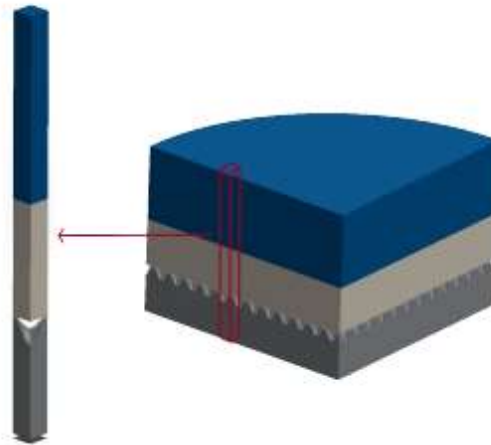


Figure 3-36 : Modèle utilisé sur Abaqus en considérant les conditions de symétrie

Les modifications effectuées sur la configuration d'essai se sont portées uniquement sur la topologie du relief de surface de la plaque impactrice. Différentes topologies de surface ont été testées numériquement tel que des pics, des formes sinusoïdales similaires à celles de la géométrie 2 ou encore des géométries boîtes à œufs. Pour chacune des géométries, on notera h la hauteur du motif, c la période ou le côté du motif et L l'épaisseur totale de la plaque impactrice.

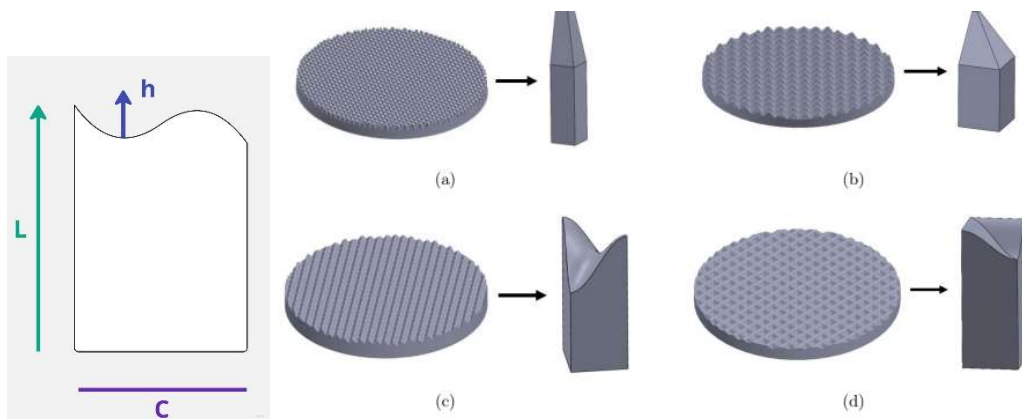


Figure 3-37 : Variations des différents paramètres géométriques des plaques impactrices

3.7.1.2 Résultats

Les simulations permettent d'obtenir la vitesse en face arrière de la céramique et les contraintes axiales en différents points de la céramique. Le but est d'obtenir une contrainte assez élevée pour s'assurer de dépasser le LEH de la céramique tout en obtenant un temps de montée plus ou moins important (le temps de montée est calculé entre 5 % et 95 % du maximum de la courbe). Il faut également que la courbe soit la plus linéaire possible pour faciliter l'analyse Lagrangienne.

Au total 13 géométries ont été testées numériquement, ces dernières peuvent être trouvées en ANNEXE D. Les résultats pour les géométries les plus intéressantes sont représenté sur les graphiques et courbes suivantes :

Géométrie	h	c	L	Temps de montée [μs]	Contrainte Max [GPa]
GEO 2	0.5	1	5	0,64	24,9
8	1	2	5	1,02	14,8
13	2	2	5	1,5	12,42
27	3	1	5	1,89	9,0
34	3	2	5	2	10,9

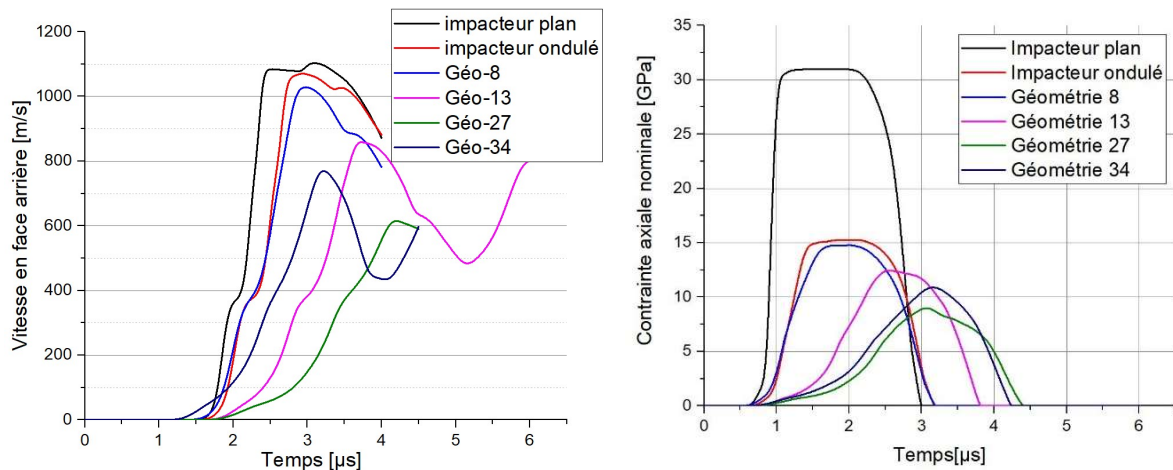


Tableau 3-6 et Figure 3-38: Résultats de simulations numériques réalisées en considérant différentes géométries de plaque impactrice pouvant être produite par fabrication additive

Il est observé que la plaque impactrice plane permet d'obtenir les contraintes les plus élevées et constitue un bon moyen de caractériser la LEH d'un matériau à haute LEH (>15 GPa). En outre, plus le temps de montée est important plus la contrainte maximale atteinte est faible. Ainsi, il est donc nécessaire de faire un compromis.

Il a été décidé de ne considérer que les configurations produisant une contrainte maximale minimum à 10 GPa afin de s'assurer d'atteindre la LEH de l'alumine (qui est aux alentours de 7 GPa).

La géométrie ondulée 2 déjà étudiée au laboratoire avec de l'acier 316L usinée par tournage a d'abord été testée avec plusieurs procédés de fabrication additive : le jet de liant, le DMLS et le filament ultrafuse 316LX. Ensuite, deux géométries permettant d'avoir des taux de chargement différents ont été testées expérimentalement. Il s'agit

des géométries 13 et 34 qui permettent d'atteindre respectivement des taux de contrainte axiale de 5,6 et 11,5 GPa. μs^{-1} .

3.7.2 Etude de l'influence des méthodes d'impression 3D

Les plaques impactrices imprimées 3D ont été commandées à la société Sculpteo. Une analyse par microtomographie a été menée pour analyser les défauts géométriques et caractériser les défauts microstructuraux incorporés par le procédé.

Concernant le procédé de SLM avec un filament d'ultrafuse l'analyse d'un échantillon de plaque de 5 mm d'épaisseur a permis observer un ajout de porosités (Figure 3-39).

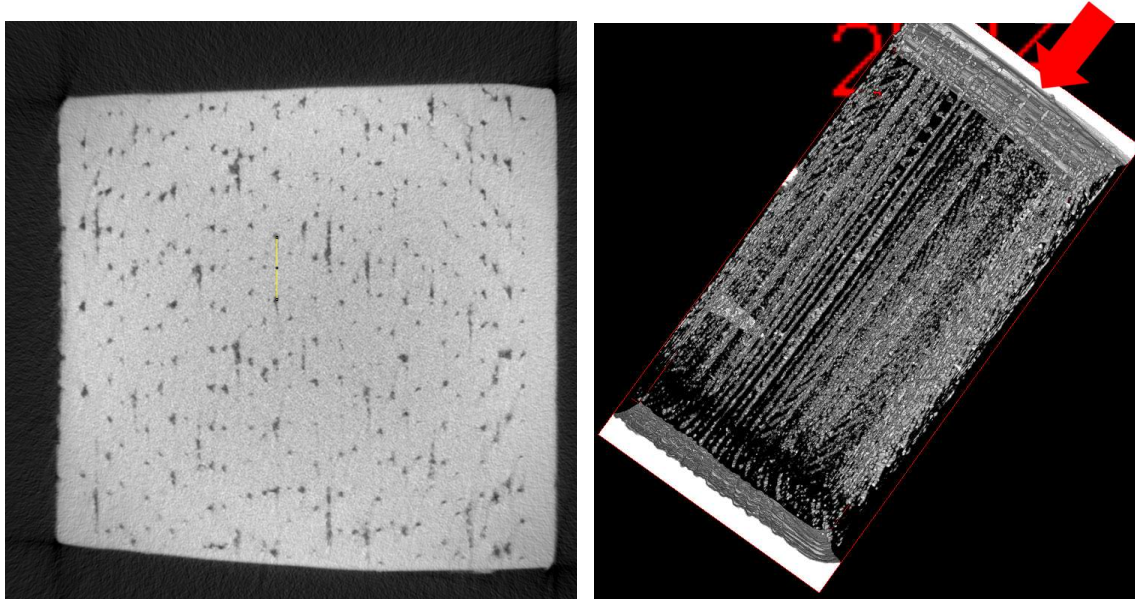


Figure 3-39 : Observation de plan de porosités au sein d'un échantillon d'acier de 5mm imprimé par technique SLM, ultrafuse.

L'impression de la pièce a laissé des plans de porosités entre chaque couche de fils d'ultrafuse. A contrario, sur une pièce imprimée par la technique de DMLS ces plans ne sont pas observables et la pièce paraît plus dense.

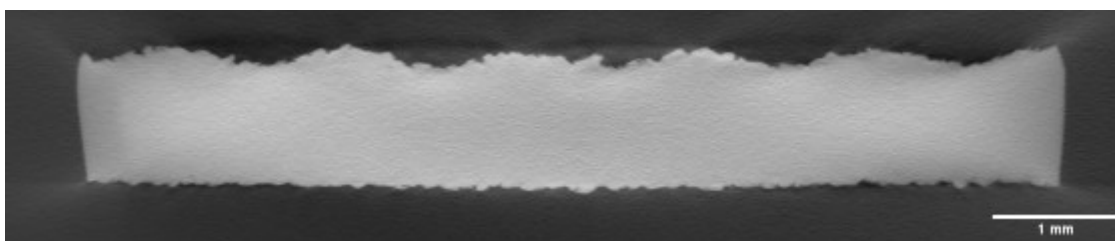


Figure 3-40 : Observation d'une pièce imprimée par DMLS

Les échantillons obtenus par technique de jet de liant n'ont hélas pas pu être observé correctement et n'ont pas été étudiés. En effet, les pièces reçues après recuit possédaient des dimensions non conformes à celles qui avaient été commandées. Ainsi, le diamètre total était de 39 mm au lieu des 50 mm convenus.

Différents essais d'impact de plaques ont été pratiqués avec la géométrie 2 et en considérant 2 modes de fabrication additive. La mesure de vitesse en face arrière d'un buffer en acier 316L usiné de 50 mm d'épaisseur a été relevée. Le résultat est disponible sur la Figure 3-41.

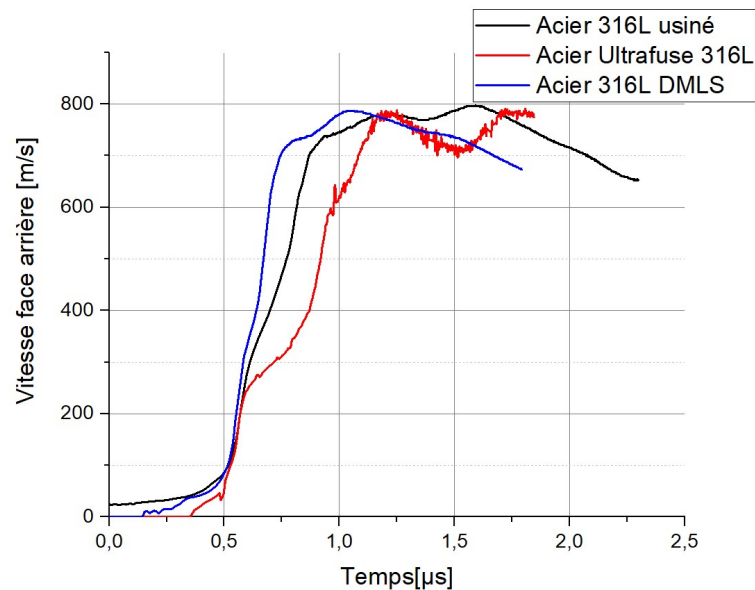


Figure 3-41 : Mesure en face arrière obtenue lors d'essais d'impact de plaques pour une même géométrie avec différents types de fabrication additive

On observe que les courbes de vitesse en face arrière obtenues pour des plaques impactrices usinées par tournage et imprimée par DMLS sont assez proches. Toutefois, le temps de montée obtenu lors de l'essai avec une plaque imprimée par DMLS est légèrement plus court. On déduit qu'il n'y a pas ou très peu de porosités au sein de cette microstructure comme cela avait déjà été pressenti lors de l'analyse tomographique. A contrario les plans de porosités observés dans la plaque imprimée à l'aide du mode ultrafuse en s'écrasant en même temps que la surface ondulée se déforme lors de l'impact permet d'obtenir un temps de montée plus long.

Une étude de l'influence de la géométrie de la plaque impactrice a eu lieu afin de vérifier son influence sur la rampe de chargement générée dans la cible. Cette étude étant faite en parallèle de celle portant sur la méthode d'impression 3D, le processus de fabrication le moins coûteux a été sélectionné pour fabriquer les autres géométries qui ont donc été réalisées par DMLS.

3.7.3 Etude de l'influence des géométries imprimées en 3D

Dans le cas des géométries particulières ces dernières ont également été passées au tomographe, notamment la géométrie 34 qui présentait le motif le plus fin.

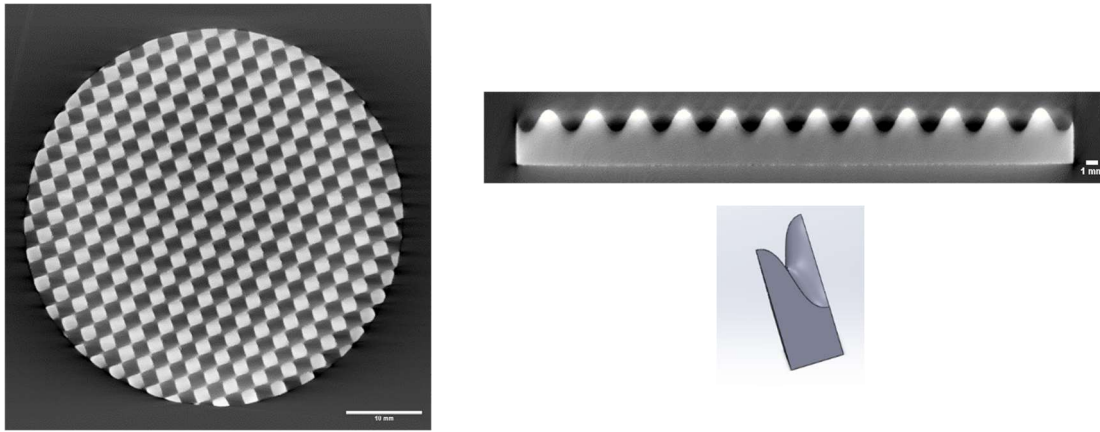


Figure 3-42 : Géométrie 34 imprimée en 3D et observée au microtomographe échelle 10mm (a) et 1mm(b) et modèle CAO d'une période (c)

Il peut être observé que la géométrie 34, assez épaisse est conforme au modèle 3D et conserve une bonne planéité. La mesure sur les images tomographiques donne un h de 3,0 mm et un côté de 2,01 mm pour des valeurs imposées au modèle 3D de 3 et 2 mm. Le diamètre, quant à lui, est mesuré à 50,14 mm pour 50 mm demandé. Cet échantillon respecte donc parfaitement le modèle. Des essais dans des conditions similaires à celles de la partie précédente ont été effectués avec les trois géométries sélectionnées : La géométrie 2 de référence, la géométrie 13 et la géométrie 34 qui sont deux géométries « boîte à œufs ».

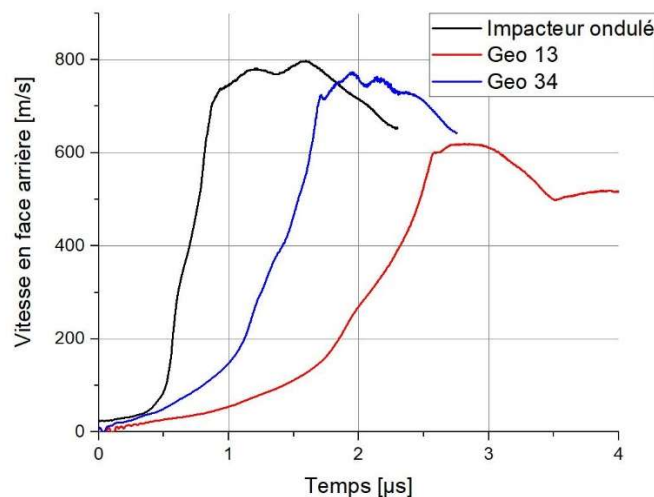


Figure 3-43 : Mesure en face arrière obtenue lors d'essais d'impact de plaques pour une même technique de fabrication additive avec différentes géométries

Pour les différentes géométries imprimées en 3D, on observe une courbe assez proche de la simulation numérique. On passe ainsi d'un temps de montée de 0,72 μ s avec une plaque impactrice ondulé de géométrie 2 à un temps de montée de 1,95 μ s avec la géométrie 34. Cependant, la courbe n'est pas parfaitement linéaire lors de la montée ce qui peut poser un problème pour obtenir une analyse Lagrangienne correcte. Le résumé des différents essais peut être trouvé dans le tableau ci-dessous.

<i>Plaque impactrice utilisée</i>	Vitesse de tir atteinte [m.s⁻¹]	Temps de montée [μs]
<i>Géo 2 forgé</i>	823	0,72
<i>Géo 2 DMLS</i>	819	0,52
<i>Géo 2 Jet de liant</i>	--	--
<i>Géo 2 Ultra-fuse</i>	805	0,68
<i>Géo 13-DMLS</i>	817	1,40
<i>Géo 34-DMLS</i>	785	1,95

Tableau 3-7 : Résultats des différents essais d'impact de plaques obtenus avec des plaques impactrices obtenues par fabrication additives

Au vu des résultats des différents essais pour maximiser le temps de montée, il faudrait réaliser des essais par analyse Lagrangienne en utilisant une plaque impactrice en géométrie 34 ou 13 imprimée grâce à des filaments ultrafuse. Il faut cependant vérifier qu'une analyse lagrangienne est possible avec de telles géométrie de plaque impactrice.

3.7.4 Modélisation d'une analyse Lagrangienne à partir des signaux obtenus lors des essais avec géométries imprimées en 3D

Afin de vérifier que les plaques impactrices des nouvelles géométries peuvent être utilisées pour réaliser une analyse Lagrangienne sur céramiques, les courbes expérimentales de mesures de vitesses en face arrière ont été implémentées comme données d'entrée de simulations numériques. La courbes de vitesse mesurées en face arrière du buffer relevé lors des essais a été appliqué au buffer durant un « step » en dynamique explicit sous abaqus.

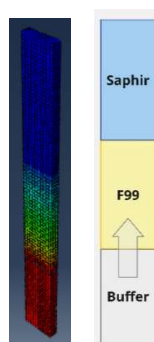


Figure 3-44 : Schéma de l'implémentation de nouvelles courbes au sein d'une simulation pour vérifier s'il est possible de réaliser une analyse Lagrangienne

Pour ce faire la configuration utilisée dans la simulation numérique a été modifiée en supprimant la plaque impactrice tout en conservant le buffer, la céramique en F99 et le matériau fenêtre en saphir.

Deux simulations numériques ont été réalisées avec des épaisseurs de céramique de 6 mm et 8 mm. Les courbes de vitesse obtenues en face arrière de la céramique ont été utilisées comme données d'entrée du programme d'analyse lagrangienne déjà abordée lors de la partie précédente. Le résultat obtenu pour les deux courbes peut être observé Figure 3-45.

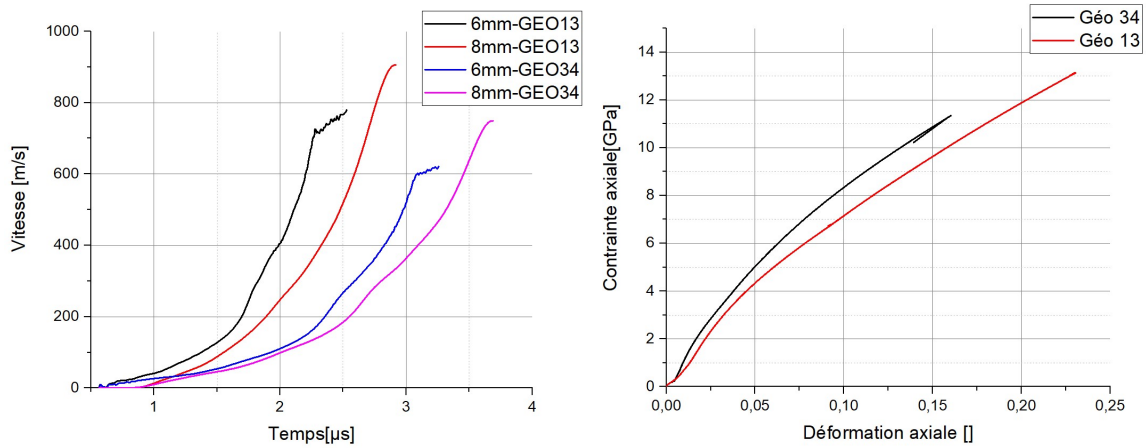


Figure 3-45 : Résultats de 2 analyses Lagrangiennes réalisées à partir des vitesses en face arrière mesurées dans des simulations numériques utilisant le chargement expérimental des essais d'impact réalisés avec les plaques impactrices de géométries 13 et 34

Il peut être observée que les courbes ont une allure quelque peu différente. En effet, la partie plastique obtenue à partir de la géométrie 13 est plus linéaire. La rupture de pente lors de la transition élastique-plastique est également plus marquée.

3.8 Résultats et discussion

Pour conclure, suite à une série d'essais en considérant différents matériaux, il a été décidé de choisir l'acier 316L comme élément composant la plaque impactrice et le buffer. À la suite d'une campagne de dimensionnement numérique, les dimensions finales de ses éléments ont été sélectionnées. Il a fallu vérifier expérimentalement que les plaques impactrices remplissaient leurs rôles c'est-à-dire que ces dernières permettaient un lissage du front d'onde et un temps de montée suffisant. Ces conditions sont en effet essentielles pour pouvoir réaliser une étude d'analyse lagrangienne à partir d'impact de plaques. Cet effet de lissage du front montant a bien été observé au cours d'essais pratiqués avec cible en acier et plaque impactrice ondulé ayant abouti à un temps de montée de $0,8 \mu\text{s}$. A la suite de cet essai, il a été décidé de réaliser un premier essai sur acier pour tester la méthode d'analyse Lagrangienne. Cette analyse a été effectuée et a permis notamment de déterminer la LEH de l'acier 316L de l'ordre de $1,25 \pm 0,3 \text{ GPa}$, ce qui est cohérent avec la LEH obtenue impact de plaques plan.

En parallèle, afin de tester d'autres géométries plus complexes difficiles à obtenir par des méthodes d'usinage classiques, différentes géométries pouvant être obtenues par fabrication additive d'aciers 316L ont été conçues. Le but a été de trouver numériquement une géométrie permettant d'obtenir un front de montée lisse, un temps de montée assez long et des contraintes suffisantes pour permettre aux matériaux d'études de dépasser sa LEH.

Les géométries retenues par simulations numériques ont par la suite été réalisées par impression 3D. Ces essais ont permis de conclure que la géométrie 13 et la méthode d'impression ultrafuse semblaient les plus intéressantes. Ces méthodes et géométries devraient permettre dans le futur d'améliorer les résultats d'analyse lagrangienne obtenue. Cependant, l'étude d'impression 3D ayant été réalisée en fin de thèse, la géométrie 2 définie lors de la partie 3.5 a été utilisée pour les études suivantes. Cela ouvre cependant des pistes d'amélioration pour des essais futurs.

Après avoir vérifié qu'il était possible de réaliser une analyse lagrangienne à partir de données obtenues par impact de plaques, il a fallu réaliser ces essais sur les différentes céramiques d'étude. La caractérisation par impact de plaques et les essais en configuration d'analyse lagrangienne pratiqués sur ces céramiques font l'objet de la partie suivante.

4. Réalisation d'une analyse Lagrangienne à partir d'essais d'impact de plaques sans choc

4.1 Introduction

Le but étant de caractériser des céramiques destinées à des applications de défense, différentes céramiques décrites dans la première partie de ce rapport ont été soumises à des essais dynamiques. Il s'agit de l'alumine F99.7 ainsi qu'un grade de SiC produit par le partenaire industriel Saint-Gobain, le Forceram® SSD. Avant de pratiquer des essais en configuration d'analyse Lagrangienne sur ces différents échantillons, des tests préliminaires ont été menés afin de déterminer la LEH de ces matériaux par impact de plaques plan. Par la suite ces différentes céramiques ont été soumises à des essais en configuration d'impact de plaques sans choc avec : une plaque impactrice ondulée de géométrie dite 2, un buffer en acier 316L et en considérant deux céramiques d'épaisseur différentes ainsi que deux carreaux en saphir accolés en face arrière de ces céramiques. Le moyen d'essai utilisé pour cette campagne expérimentale est le lanceur à gaz du laboratoire 3SR décrit plus haut.



Figure 4-1 : Photographie du montage vu de profil obtenu pour réaliser une analyse Lagrangienne à partir d'un essai d'impact de plaques

Ces résultats seront par la suite comparés à ceux de la littérature, ceux obtenus par d'autres moyens d'essais. Une conclusion sera alors faite sur les essais sans choc combinés à l'analyse Lagrangienne comme moyen d'obtention de la réponse mécanique en déformation uniaxiale.

4.2 Analyse Lagrangienne sur F99

4.2.1 Tests préliminaires : détermination de la HEL

Le matériau étudié le plus sollicité par impact de plaques dans cette thèse est la nuance d'alumine F99.7. Dans un premier temps, le but a été de caractériser cette céramique

en dynamique en effectuant quelques impacts de plaque plan afin de déterminer sa LEH.

Pour ce faire, différents essais ont été réalisés, avec différents impacteurs, en cuivre ou acier et la présence ou non d'un matériau fenêtre. Il peut être intéressant de constater l'influence de ces différents paramètres sur la LEH selon les essais présentés dans le tableau suivant (Tableau 4-1).

Test	F1	F2	F3	F4	F5
Plaque impactrice	Plan Cuivre 70× 5mm	Plan 316L 70× 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm
Cible	F99 80 × 50 × 8mm	F99 80 × 50 × 8mm	F99 80 × 50 × 8mm	F99 60 × 40 × 6mm	F99 60 × 40 × 6mm 60 × 40 × 8mm
Vitesse d'impact [m.s⁻¹]	812	583,02	603,28	880,28	862
Buffer	-	-	Plan 316L 70× 5mm	Plan 316L 70× 5mm	Plan 316L 70× 5mm
Saphir	-	30x30 7.8mm	30x30 7.8mm	30x30 7.8mm	2-30x30 7.8mm

Tableau 4-1: Liste non exhaustive des différents essais d'impact effectués sur Alumine F99.7

La mesure de vitesse en face arrière des essais « F1 » et « F2 » après traitement est visible sur la Figure 4-2.

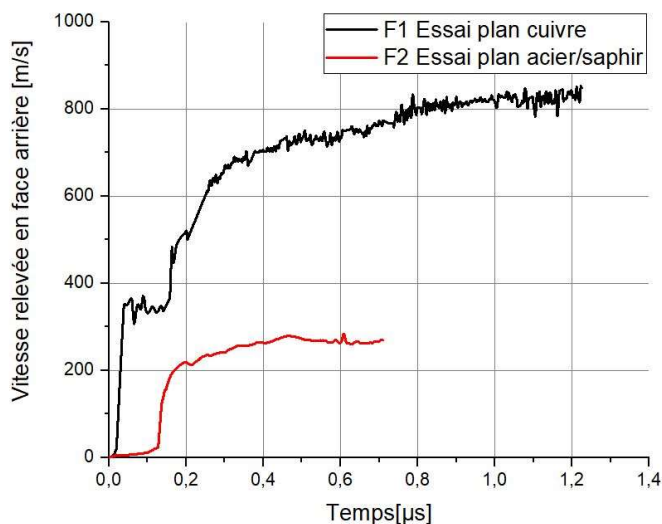


Figure 4-2: Comparaison des essais F1 et F2, impact de plaques plan réalisé avec un impacteur en cuivre et une plaque impactrice plane en acier avec une fenêtre en saphir

Il peut être observé que l'essai « F1 » avec un impacteur en cuivre fait apparaître un palier net sur la mesure de vitesse (vitesse d'environ 350 m/s) en face arrière correspondant à la LEH du matériau. Néanmoins comme évoqué dans la partie 3, ce matériau n'a pas été retenu pour la suite des essais avec impacteur ondulé. Il est possible de déduire une valeur de Limite d'élasticité d'Hugoniot à partir de ces courbes. Une LEH de $6,8 \pm 0,2$ GPa est obtenue à partir de l'essai « F1 ». Cette valeur est

proche des valeurs obtenues pour d'autres alumines. En effet, (Coscolluela, 1992) a déduit une valeur de 6,3 GPa pour une alumine de type Al₂O₃ et (Longy, 1987) une valeur de 8,2 GPa pour une alumine de type A16-2.

Un palier est aussi présent sur la courbe de l'essai « F2 » avec une mesure à l'interface entre le saphir et la céramique. Ce dernier est situé aux alentours de 250m/s avant l'état d'Hugoniot. En prenant en compte la correction d'impédance entre la face arrière de la céramique et le saphir, il est possible de déduire une LEH de $7,0 \pm 0,3$ GPa à partir de cet essai. Il peut être remarqué que cette valeur est proche de la valeur obtenue précédemment.

Différents tests ont également été effectués sur des échantillons de F99.7 avec des plaques impactrices ondulées pour étudier le temps de chargement appliqué à la céramique. Ces essais préliminaires sont nécessaires pour la mise en place de l'analyse Lagrangienne. En effet, pour effectuer une analyse lagrangienne, la trajectoire thermodynamique doit être différente de la rampe adiabatique dynamique.

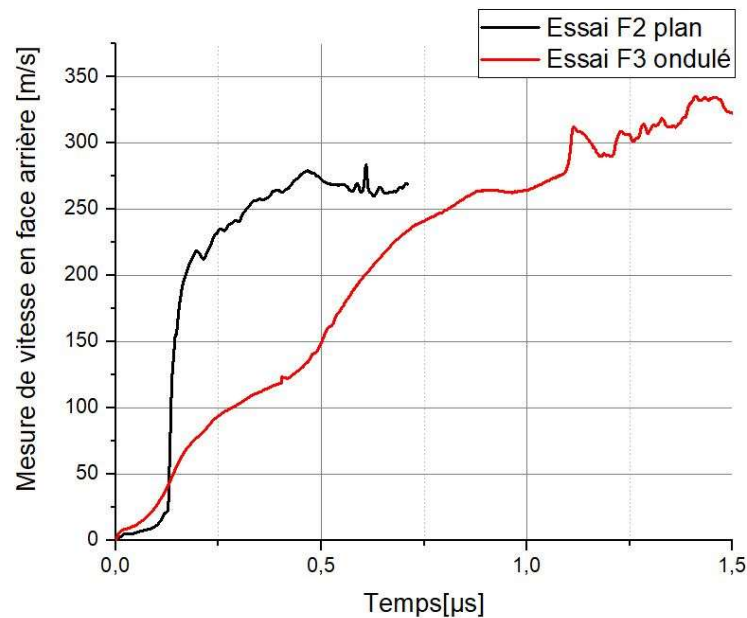


Figure 4-3 : Comparaison des essais F2 et F3, impact plan réalisé avec un impacteur plan avec saphir (583 m/s) et une plaque impactrice ondulée en acier avec un saphir (603 m/s).

La comparaison des deux courbes de la Figure 4-3 montre que l'utilisation d'une plaque impactrice ondulée exerce une forte influence sur le temps de montée. En effet, le temps de montée est presque 1 μs plus long qu'avec une plaque plane.

Ainsi, l'utilisation d'une plaque ondulée permet d'augmenter le temps de montée, qui est un paramètre essentiel pour garantir que l'analyse lagrangienne peut être effectuée à partir des résultats de l'essai d'impact de plaques.

Il peut être intéressant par la suite d'observer l'influence de la vitesse d'impact sur le temps de montée. En effet, dans la partie 3, il a été observé qu'une vitesse d'impact plus élevée pouvait résulter en un temps de montée plus long. C'est pour cela qu'un

autre essai, l'essai « F4 » a été comparé à l'essai « F3 ». Il s'agit du même essai mais à une vitesse de 880 m.s⁻¹.

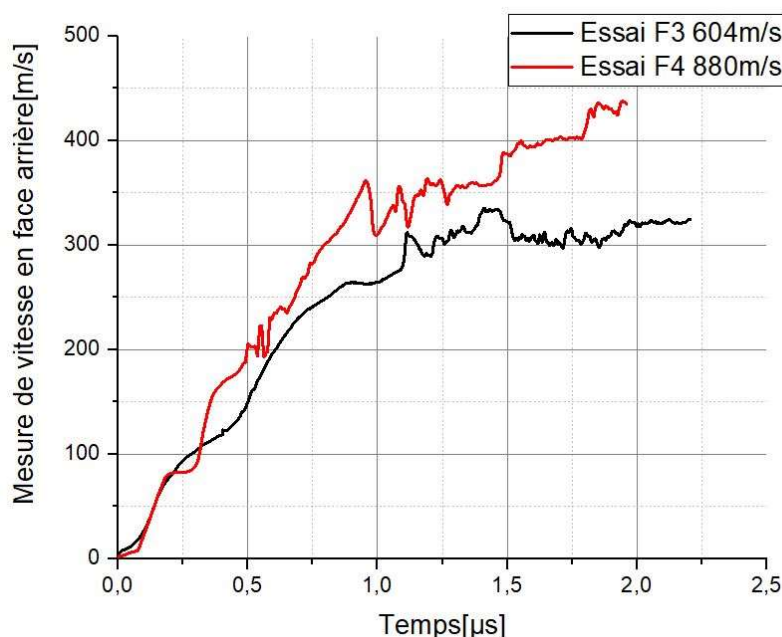


Figure 4-4 : Comparaison des essais F3 et F4, impact ondulé réalisé à une vitesse de 604 m.s⁻¹ et un autre à une vitesse de 880 m.s⁻¹

On peut observer que le temps de montée est légèrement plus long dans le test « F4 » (880 m.s⁻¹) que dans le test « F3 » (603 m.s⁻¹). En effet, un temps de montée d'environ 2 µs est nécessaire pour atteindre la valeur maximale de vitesse à l'interface. Ces résultats sont encourageants en vue de procéder à une analyse Lagrangienne à partir d'impact de plaques ondulée sur de l'alumine F99.7.

4.2.2 Analyse Lagrangienne sur F99

Des configurations permettant de procéder à une analyse Lagrangienne ont été mises en place. Pour ce faire la configuration suivante a été utilisée pour les différents essais.

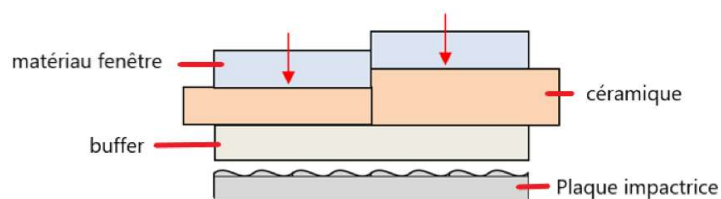


Figure 4-5 : Schématisation du montage d'impact de plaques pour analyse Lagrangienne

Le test a été réalisé dans la configuration visible Figure 4-5 à une vitesse d'impact de 862 m.s⁻¹. Par la suite, le logiciel Wave a été utilisé pour obtenir les courbes de mesure de la vitesse en face arrière.

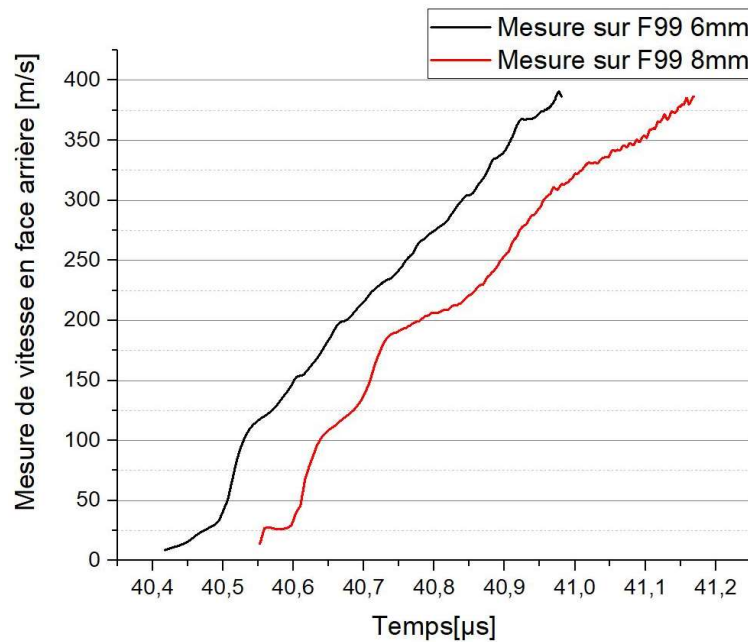


Figure 4-6 : Mesure de vitesse en face arrière des céramiques obtenues au cours de l'essai d'impact de plaques sur des céramiques de 6mm et 8mm d'épaisseurs

Dans un premier temps, un décalage temporel entre les courbes est observé, correspondant à la différence d'épaisseur entre les deux échantillons utilisés dans l'essai. Les pieds de courbe sont légèrement différents sur les relevés des deux échantillons. Ceci peut s'expliquer par la faible capacité des types de mesures PDV à estimer la vitesse pour des vitesses faibles ($50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). C'est pour cela que l'analyse Lagrangienne n'est effectuée qu'à partir d'une certaine vitesse. En dessous de cette vitesse fixée par l'expérimentateur, le comportement de la céramique est jugé comme élastique, c'est-à-dire que :

$$\sigma_{ax} = M \cdot \varepsilon_{ax} \quad 4-1$$

$$M = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad 4-2$$

Où M correspond au module d'élasticité en déformation uniaxiale.

Par la suite, la phase élastique est clairement visible à travers le parallélisme des deux courbes de vitesse. L'analyse Lagrangienne est effectuée à partir des courbes de vitesse données Figure 4-6.

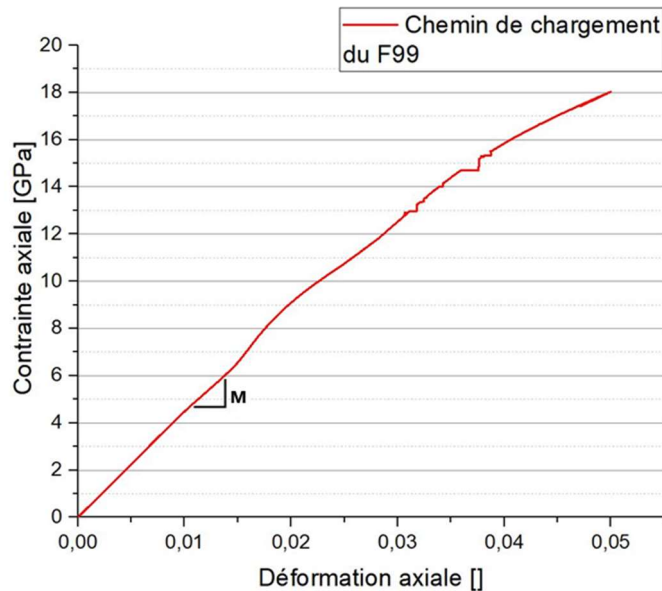


Figure 4-7 : Contraintes axiale en fonction de la déformation axiale obtenue suite à l'analyse Lagrangienne sur matériau F99.7

La transition élasto-plastique n'apparaît pas de manière marquée. Néanmoins, une tendance se dégage. En traçant les deux asymptotes relatives aux parties élastique et plastique, il est possible de trouver la LEH. Cette méthode permet de caractériser la LEH comme la contrainte pour laquelle les effets microscopiques ont une influence non négligeable à l'échelle macroscopique. Dans le cas de cet essai, la valeur LEH obtenue de $9,0 \pm 0,4$ GPa est un peu plus élevée que celle obtenue par impact de plaques plan. En effet, les différents essais précédents ont permis de trouver une LEH du matériau proche de 7 GPa, mais l'analyse lagrangienne surestime cette LEH ce qui peut s'expliquer par un écrouissage très progressif post-LEH.

A partir des résultats d'analyse Lagrangienne il est également possible d'estimer une contrainte équivalente à l'aide de l'équation d'état. L'équation d'état utilisée est une équation d'état de type Murnaghan dont les paramètres n , Γ et C_v sont ceux de l'alumine AL23 (Base de données matériaux Théia - OURANOS V6.0). La densité initiale et le module de compressibilité sont adaptés à l'alumine F99.7.

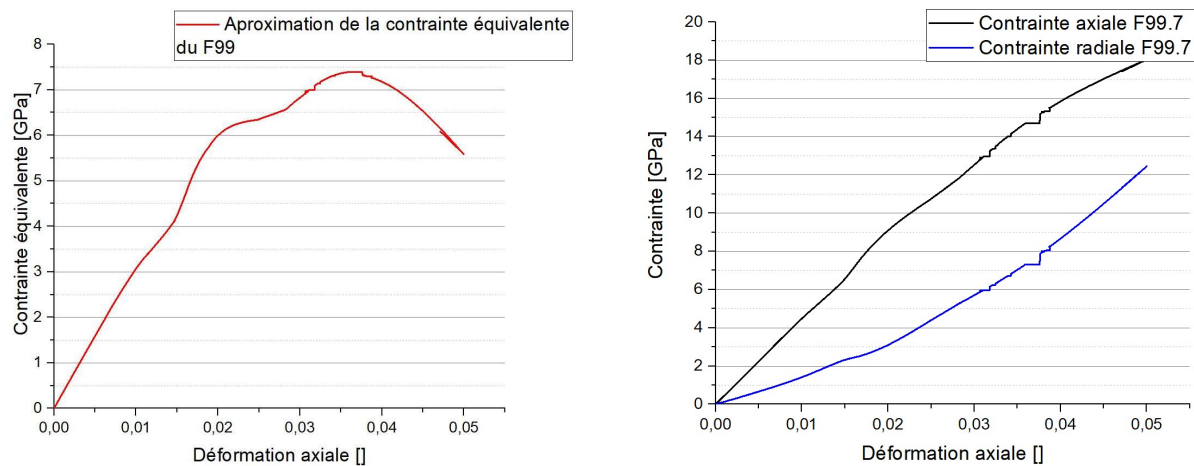


Figure 4-8 : Contrainte équivalente et contrainte radiale en fonction de la déformation axiale obtenu à partir d'analyse Lagrangienne sur essai issu d'impact de plaques sur alumine F99.7.

Il peut être observé que la contrainte équivalente atteint un niveau maximal compris entre 7,2 et 7,4 GPa. La contrainte équivalente diminue pour des déformations élevées ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'un endommagement en compression dans le matériau après un certain niveau de déformation plastique. L'obtention de la contrainte équivalente permet de remonter directement à la contrainte radiale en fonction de la déformation radiale. Néanmoins, la forme particulière bombée visible à 40,75 μ s (Figure 4-6) sur l'échantillon 8mm n'a pas de sens physique et a une énorme influence sur l'analyse Lagrangienne. De ce fait, d'autres essais sont ainsi nécessaires.

Afin de confirmer ce résultat, un deuxième essai a été réalisé en considérant une configuration de l'article (Forquin et Zinszner, 2017) selon laquelle il est possible d'utiliser un buffer ondulé et non une plaque impactrice ondulée.

4.2.3 Analyse Lagrangienne en configuration inversée sur F99

Pour cette nouvelle configuration une vitesse de 859 m.s⁻¹ a été considérée.

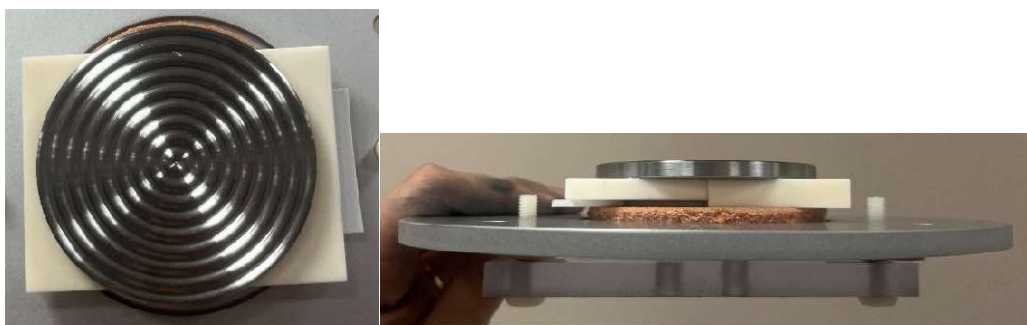


Figure 4-9 : Photographie du montage des cibles permettant une analyse lagrangienne suite à un montage inversé du buffer et la plaque impactrice

Les résultats de mesure de vitesses en face arrière utilisés pour l'analyse Lagrangienne sont reportés sur la Figure 4-10.

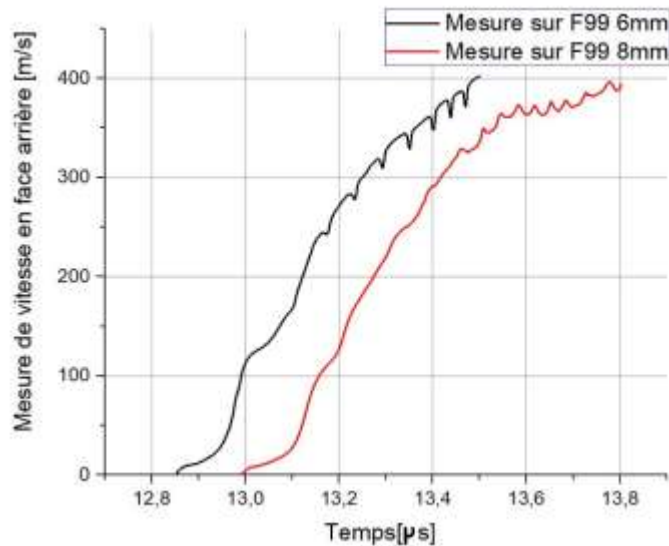


Figure 4-10 : Courbes de vitesse en face arrière relevées à l'interface entre le matériau fenêtre et les échantillons de F99.7 d'épaisseurs 6mm et 8mm dans le montage dit « inversé »

Les courbes de vitesses en face arrière possèdent une allure moins lisse avec notamment la présence d'oscillation dans la partie relative à la réponse plastique. Ces courbes ont donc dû être lissées afin de pouvoir réaliser une analyse Lagrangienne à partir de ces résultats. Les oscillations ne sont pas dû aux traitements numériques mais sont présentes physiquement sur les données relevées après le tir.

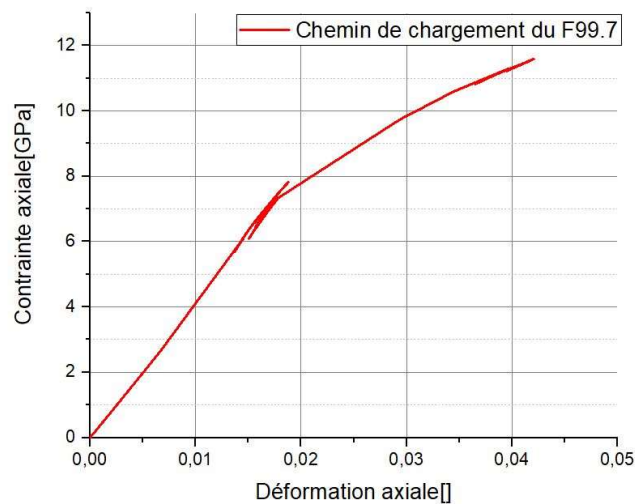


Figure 4-11 : Chemin de chargement obtenu suite à l'analyse Lagrangienne sur F99.7 en configuration inversée

D'autre part, la courbe d'analyse Lagrangienne est quelque peu différente de celle obtenue dans la partie précédente. Ici, la rupture de pente est plus marquée. De plus, le chevauchement de courbes rend la lecture de la LEH plus complexe. La LEH calculée à la suite de cet essai s'élève à $7,3 \pm 0,3$ GPa. Cette valeur est plus cohérente que celle trouvée précédemment.

4.2.4 Comparaison avec les essais GEPI

Les résultats précédant peuvent être comparés à des essais GEPI effectués sur une autre alumine similaire, l'alumine A98. Ces résultats proviennent d'un rapport interne du CEA GRAMAT (Erzar et Zinszner, 2018). L'alumine A98 est une alumine pure à 98% qui possède des propriétés élastiques légèrement différentes comparées à celles de la F99.7 (Tableau 4-2).

<i>Grandeur</i>	<i>Valeur A98</i>	<i>Valeur F99.7</i>
$CL[m/s]$	10570	10 574
$E[GPa]$	366	380
ν	0,242	0,22
<i>Pureté</i>	98%	99,7%

Tableau 4-2 : Comparaison des propriétés des alumine A98 et F99.7

Deux essais de compressions ont été réalisés avec des largeurs d'électrode de 20 et 25 mm sur des échantillons de 3 mm et 4 mm en configuration d'analyse Lagrangienne pour essais GEPI.

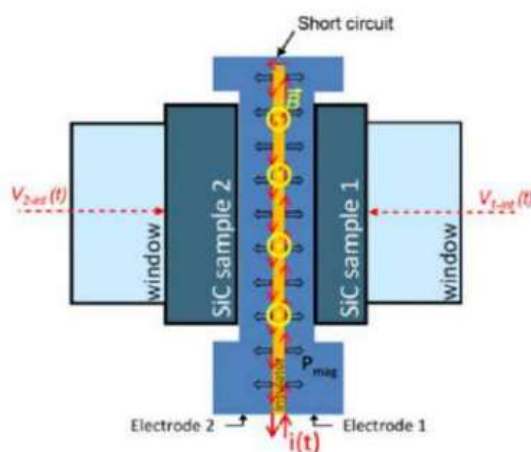


Figure 4-12 : Configuration mise en œuvre dans un test GEPI pour pouvoir effectuer une analyse Lagrangienne

Dans le cas de ces essais, du LiF a été sélectionné en tant que matériau fenêtre. Ces deux tests ont permis d'atteindre des niveaux de contraintes de 11 GPa et 14 GPa. Les mesures de vitesses en face arrières des deux alumines à travers la fenêtre en LiF sont affichés sur la Figure 4-13.

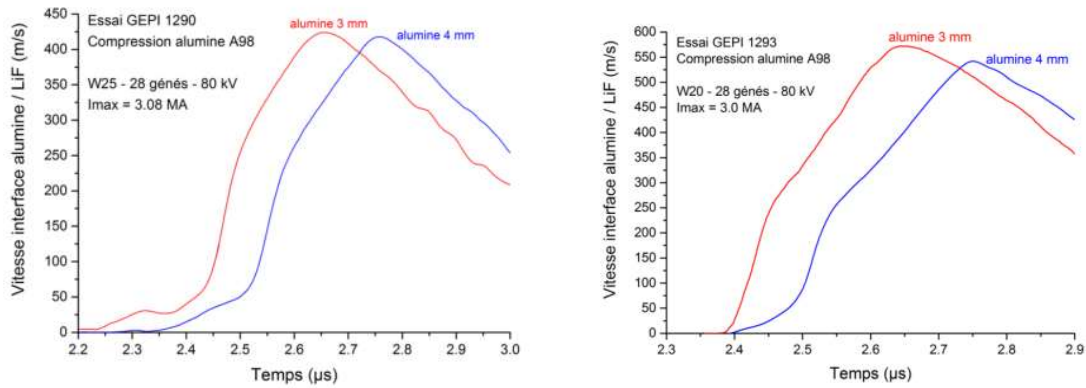


Figure 4-13 : Comparaison des mesures de vitesse en face arrière relevées pour deux aluminés d'épaisseur différentes au cours d'essai GEPI

Une analyse Lagrangienne a pu être effectuée à partir d'une vitesse de 60 m/s. Pour des vitesses plus basses, le comportement est considéré comme élastique.

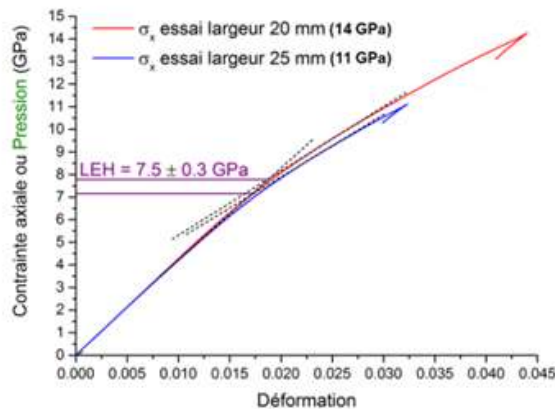


Figure 4-14: Résultats obtenus par essai GEPI (CEA-Gramat) pour une alumine A98 post-traitée par analyse Lagrangienne

À l'instar des premiers résultats obtenus sur F99.7 la transition entre le comportement élastique et plastique est peu franche. En se basant sur les deux essais GEPI une valeur de LEH de $7.5 \pm 0,3$ GPa a été trouvée par le CEA. Cette valeur est similaire aux valeurs trouvées par les essais effectués au sein du laboratoire 3SR et notamment la valeur de $7,4 \pm 0,4$ GPa obtenue lors du second essai en configuration inversée. De plus ces valeurs correspondent également à l'ordre de grandeur de LEH qui peut être trouvé au sein de l'alumine AD995 de $6,71 \pm 0,08$ GPa dont la pureté se rapproche de celle de la F99.7 (Dandekar, 1994).

Il semble donc que la méthode d'impact de plaques sans choc développée à 3SR donne des résultats similaires aux essais GEPI avec analyse Lagrangienne. Par la suite d'autres matériaux d'études ont été testés. C'est notamment le cas du Forceram®, nuance de SiC de Saint-Gobain qui a été à l'heure actuelle que peu étudiée dans le monde scientifique.

4.3 Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD

4.3.1 Tests préliminaires : Caractérisation du matériau par essais d'impact de plaques

Le Forceram® est un matériau particulier de par sa microstructure hétérogène comme cela a pu être abordé dans la partie 1. D'autre part, il se décompose en deux nuances, le Forceram® premium STD et le Forceram® improved SSD. Les essais se sont focalisés sur le Forceram® SSD pour des raisons de disponibilité. Néanmoins, quelques tests ont été effectués sur STD afin de servir de comparaison.

Test	C1	C2	C3	STD	C4	C5
Flyer plate	Plan 316L 50× 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm	Géo-2 316L 3D-printed 70 × 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm	Géo-2 316L 50 × 5mm	Géo-2 316L 70 × 5mm
Cible	SSD 50× 50× 8	SSD 80× 40× 7	SSD 50× 50× 8	STD 50× 50× 7	SSD 50× 50× 8	SSD 80× 40× 7
Vitesse d'impact [m/s]	791	820	805	812	756	800
Buffer	-	Plan 316L 70× 5mm	Plan 316L 70× 5mm	-	-	Plan 316L 70× 5mm
Saphir	-	-	-	-	30x30 7.8mm	30x30 7.8mm

Tableau 4-3: Liste non exhaustive des essais effectués sur Forceram par impact de plaques

Dans un premier temps il est possible de comparer l'utilisation d'une plaque impactrice ondulée sur le Forceram®. Pour cela deux essais aux alentours de 800m.s⁻¹ ont été effectués, dans un premier temps sans matériau fenêtre. La comparaison d'un impact plan et sans-choc peut être observée Figure 4-15.

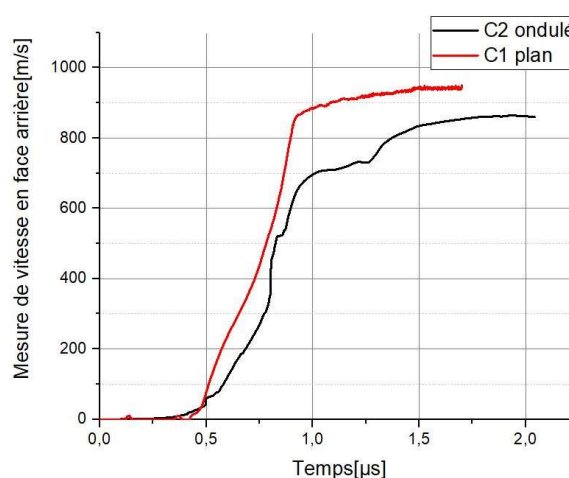


Figure 4-15 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière de carreau de Forceram pour un impact plan C1 et sans choc C2

Un temps de montée de l'ordre de $0,4 \mu\text{s}$ est observé sur l'impact « C1 » correspond à être un impact plan. On constate qu'il est impossible de distinguer le précurseur élastique et donc de déduire une LEH au vu de l'allure de la courbe contrairement au cas du F99.7. Un temps de montée plus long est observé sur l'essai avec une plaque impactrice ondulée. Ce dernier approche $1 \mu\text{s}$ environ, ce qui est un résultat prometteur pour pouvoir réaliser une analyse Lagrangienne. Un autre test a été effectué dans une configuration similaire avec un impacteur de même géométrie mais obtenu par impression 3D d'ultrafuse afin d'observer l'influence de plans de porosités au sein de l'impacteur sur l'allure de la courbe Figure 4-16.

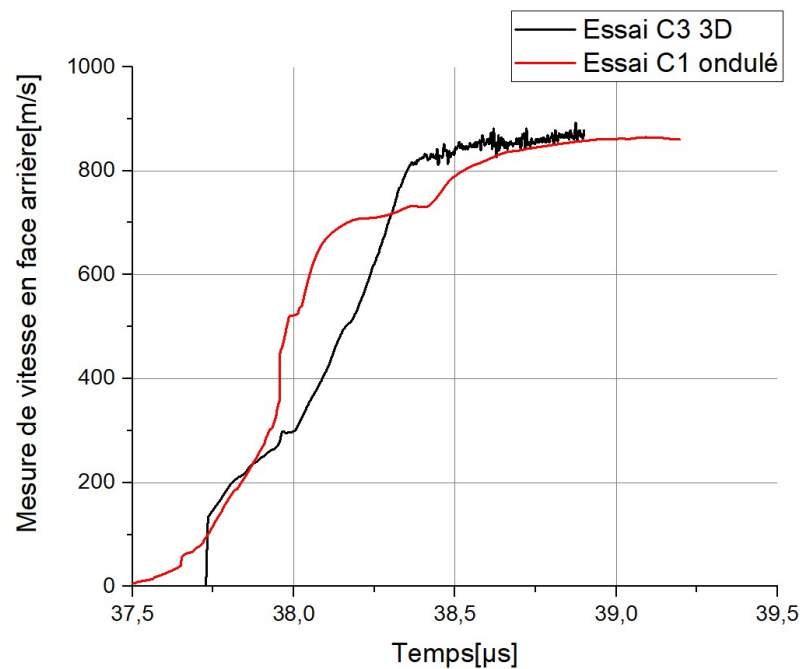


Figure 4-16 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière de carreau de Forceram pour un impact avec impacteur ondulé C2 et imprimé en 3D C3

Le temps de montée ne paraît pas plus long avec l'impacteur obtenu par ultrafuse mais la courbe semble plus linéaire, ce qui peut faciliter le travail d'analyse Lagrangienne. Il peut donc être intéressant d'utiliser ce genre de plaque impactrice dans de futurs essais.

Il est nécessaire de savoir d'où vient le comportement du Forceram® SSD. Pour se faire, l'essai « C1 » d'impact plan sur Forceram® SSD a été comparé à un essai réalisé au sein du CEA GRAMAT sur une autre nuance de SiC, L'Hexoloy® SA. Ce matériau est en effet déjà commercialisé et a été l'objet de plusieurs études. Un autre essai a également été mené sur l'autre gamme de Forceram® produite par Saint-Gobain, le Forceram® STD. Ce dernier présente une « parting line » plus importante ainsi qu'une répartition de porosités différentes. Les microstructures des trois matériaux peuvent être retrouvées Figure 4-17.

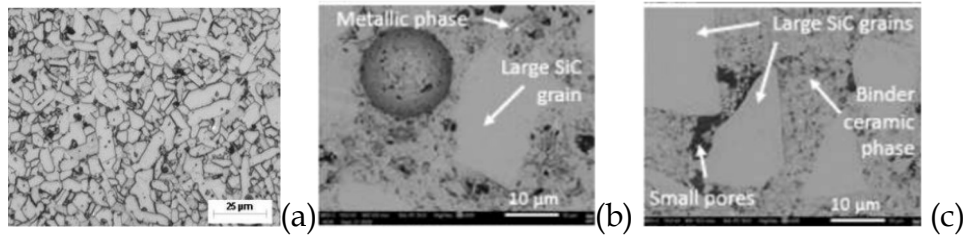


Figure 4-17 : Microstructure de trois SiC produits par Saint-Gobain, l'Hexoloy® SA, le Forceram® SSD et le Forceram® STD

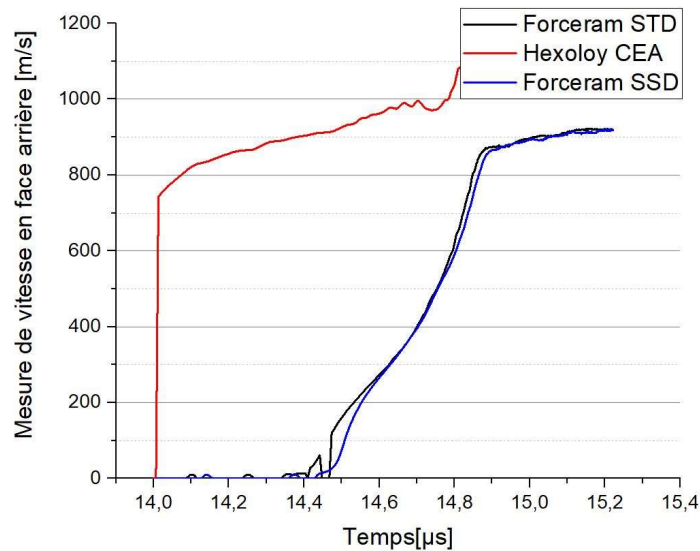


Figure 4-18 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière dans le cas d'un Forceram® SSD (essai « C1 ») d'un Hexoloy® (essai réalisé au CEA-Gramat) et d'un Forceram® STD soumis à un impact plan

Le profil particulier obtenu lors de l'essai « C1 » peut s'expliquer selon 3 hypothèses :

- La structure hétérogène du matériau
- Les porosités présentes au sein du matériau
- Le plan de porosité ou « parting line »

Néanmoins, le plan de porosité ainsi que la distribution de porosités au sein du matériau sont différentes pour les deux nuances de Forceram® le SSD et STD. Un comportement similaire se dégage des deux nuances de Forceram®. Il peut donc être supputé que c'est la microstructure hétérogène du Forceram® qui est responsable du temps de montée observé sur les 2 Forceram®. Les hétérogénéités de tailles différentes possèdent des propriétés élastiques différentes des hétérogénéités peuvent causer une dispersion d'ondes.

Par la suite, des tests ont été effectués afin de voir si les tendances perçues au cours des essais précédents persistées avec la présence de matériaux fenêtres en saphir. Un nouvel impact plan et un nouvel impact ondulé ont été effectués dans des conditions similaires aux tests « C1 » et « C2 ».

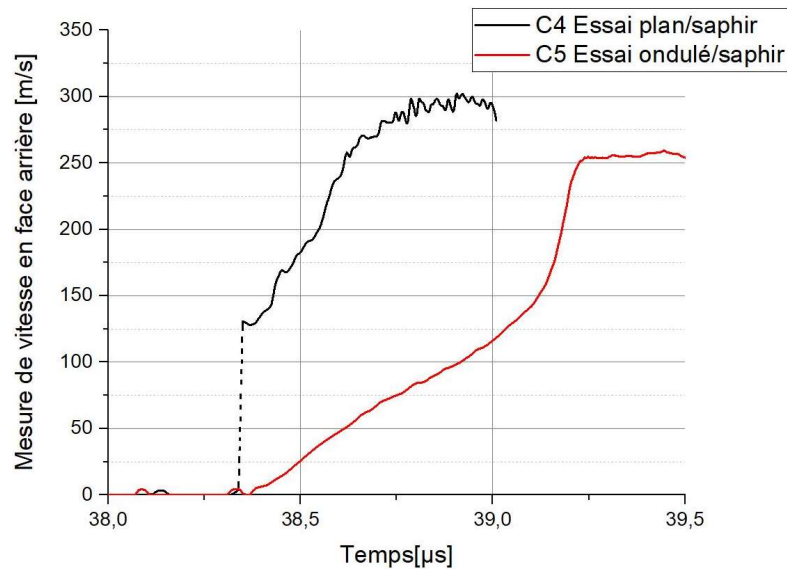


Figure 4-19 : Comparaison des mesures de vitesses à l'interface Forceram/saphir pour un essai avec impacteur plan « C4 » avec impacteur ondulé C5

Il apparaît clairement que le temps de montée de l'impact plan n'est pas instantané. D'autre part, un temps de montée de 0,85 μs est observé sur l'impact avec impacteur ondulé, ce qui confirme la possibilité d'effectuer une analyse Lagrangienne sur de tels échantillons.

4.3.2 Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD

La configuration de l'essai mise en œuvre pour réaliser une analyse Lagrangienne reste la même que celle utilisée pour le F99.7.

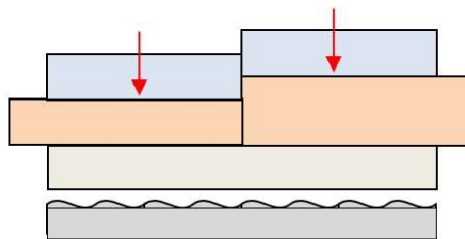


Figure 4-20 : rappel de la configuration pour essais d'impact de plaques permettant de réaliser une analyse Lagrangienne.

Un essai a été effectué, à l'aide de deux échantillons de Forceram® SSD de 7 mm et 9 mm, à une vitesse de 800 m.s⁻¹. La mesure de vitesse en face arrière de la céramique à l'interface céramique/saphir a été relevée à l'aide du système de mesure de vélocimétrie homodyne et des oscilloscopes permettant une mesure de 10 Gs/s. Les courbes issues de l'analyse par le logiciel Wave sont reportées sur la Figure 4-21.

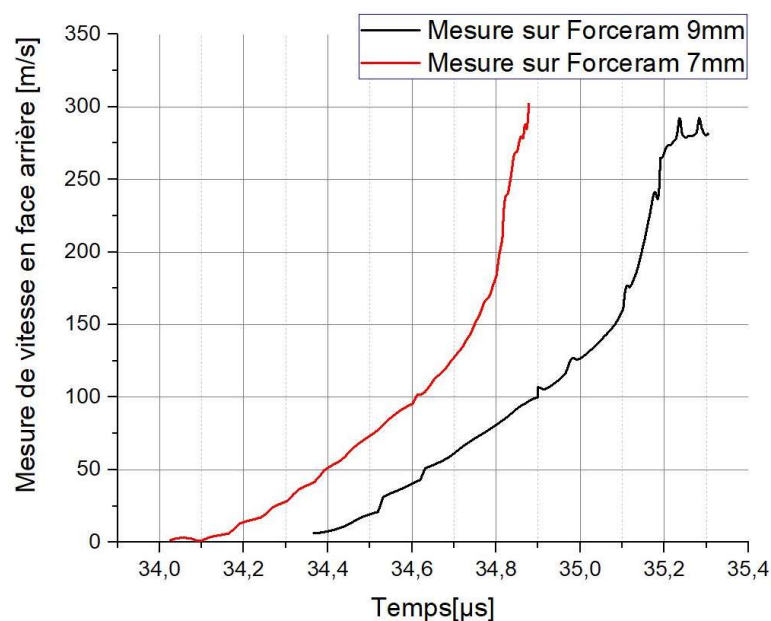


Figure 4-21 : Relevé des mesures de vitesse en face arrière des céramiques à travers saphir obtenu sur deux échantillons d'épaisseurs 7mm et 9mm lors d'essai d'impact de plaques à 800m/s

Les courbes perdent leur parallélisme dès 100m.s⁻¹. Ce phénomène s'explique par un comportement non élastique. Le traitement par analyse Lagrangienne abouti aux courbes de la Figure 4-22.

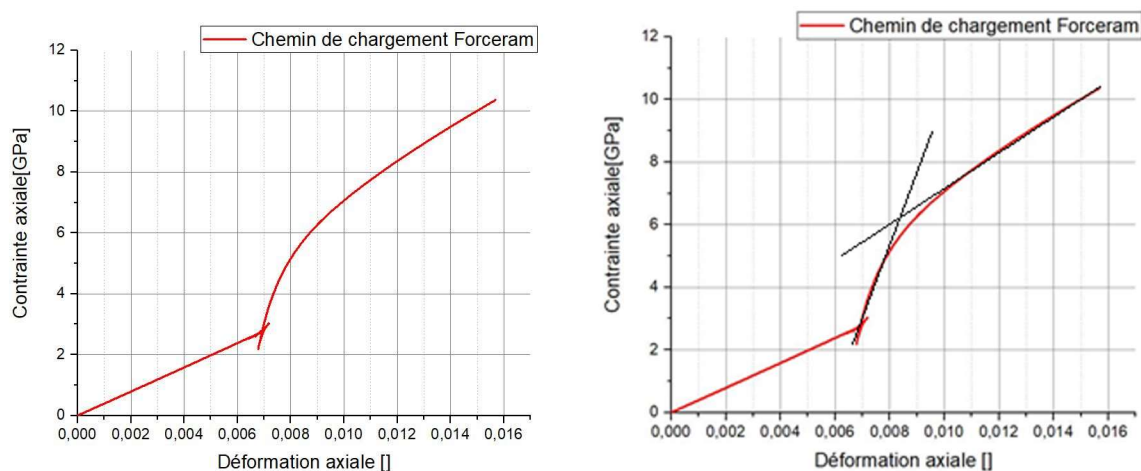


Figure 4-22 : Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale du Forceram[®] SSD obtenue après analyse Lagrangienne suite à un essai d'impact de plaques sans choc.

Dans un premier temps, on observe une rupture de pente et un raidissement qui n'était pas observé avec l'alumine. Ce comportement pourrait correspondre à un effondrement de porosité pour une contrainte axiale de $2,8 \pm 0,3$ GPa. Par la suite, on observe un deuxième changement de pente. Il est possible d'estimer une LEH du Forceram[®] SSD aux alentours de $6,2 \pm 0,3$ GPa. Cette valeur est relativement faible comparée aux autres SiC tels que l'Hexoloy[®]. En effet pour cette gamme de SiC Zinzsner (Zinzsner, 2015) a trouvé, à l'aide d'une méthode d'analyse Lagrangienne par essais GEPI, une valeur de 15,1 GPa. De nombreux paramètres microstructuraux peuvent expliquer la différence de comportement entre l'Hexoloy[®] et le Forceram[®].

4.4 Conclusions et discussion

Les premiers essais d'impact de plaques plan ont permis de caractériser la LEH de l'alumine F99.7 et par la suite d'autres essais avec impacteurs ondulés ont montré une forte élévation du temps de montée des signaux de vitesse en face arrière. Enfin, des tests en configuration d'analyse Lagrangienne ont été effectués. Pour réaliser ces tests, deux céramiques d'épaisseurs différentes de 6 et 8 mm ont été utilisées dans la cible et impactées par un impacteur ondulé (buffer plan) ou par un impacteur plan (buffer ondulé). Les mesures de vitesse à l'interface entre céramiques et matériaux fenêtres ont été relevées et traitées.

Une analyse Lagrangienne a pu être effectuée. Il apparaît que ces analyses donnent des résultats cohérents avec d'autres tests effectués sur l'alumine A98 réalisés avec le moyen d'essai GEPI. En effet, l'allure de la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale de l'alumine F99.7 est similaire à celle de l'alumine A98. On note une transition peu marquée entre le domaine élastique et le domaine plastique en raison d'un écrouissage. D'autre part, la valeur de LEH de $7,4 \pm 0,4$ GPa trouvé avec l'alumine F99.7 est proche de la valeur de LEH de 7,5 GPa obtenue sur l'alumine A98.

Dans un second temps, un protocole similaire a été appliqué sur une gamme de SiC, Le Forceram®. Il a été observé que l'impact plan, en raison de l'absence de précurseur élastique, ne permet pas de déterminer la LEH d'un tel matériau. De ce fait après avoir testé l'influence de plaques impactrices ondulées sur ce matériau, une configuration d'analyse Lagrangienne a été mise en œuvre. À partir des vitesses en face arrière mesurées à l'interface entre les céramiques et le matériau fenêtres une LEH de $6,2 \pm 0,3$ GPa a pu être déduite. Si cette LEH peut sembler faible pour un SiC ce résultat peut s'expliquer par la structure poreuse et les inclusions du Forceram®.

Pour conclure, l'impact sans choc avec analyse lagrangienne permet, à partir d'un seul essai d'impact de plaques, de remonter à la réponse en déformation uniaxiale du matériau. Ces résultats sont similaires à ceux acquis par essais GEPI. D'autre part comme cela a pu être observé avec le Forceram®, ce genre d'essais permet d'obtenir des informations sur le comportement de matériaux fortement hétérogènes, ce que ne permet pas un essai d'impact de plaques plan. Ainsi, la LEH du Forceram® a pu être déduite.

5. Essais d'impact de plaques avec jauges de pression

5.1 Introduction

Des expériences ont été réalisées dans les années 90 avec des jauges piezorésistives de types manganin dans le but de caractériser le profil de contrainte dans des cibles de céramique sollicitées sous choc. C'est notamment le cas de (Bourne et al., 1995) qui en a utilisé au sein d'essais d'impact de plaques sur SiC ou de (Coscolluela A., 1992) qui les a mis en place au cours d'essais d'expansion sphérique appliqués à des alumines.

Néanmoins, ce genre de mesure de contraintes n'a que très peu été comparé au sein d'une configuration expérimentale d'impact de plaques avec des mesures de vitesse en face arrière. Pourtant, ce type de mesure permet d'obtenir des informations sur le profil de contrainte radiale et/ou axiale tandis que les mesures par interférométrie de type vélocimétrie homodyne ne donnent accès qu'au niveau de contrainte axiale.

Dans cette étude, une première configuration expérimentale a été appliquée à un acier 316L avant de servir à caractériser l'alumine F99.7.



Figure 5-1 : Photographie de la jauge utilisée Vishay J2M-SS-110FB-048

Concernant les jauges utilisées, des jauges Vishay de type J2M-SS-110FB-048 dont la documentation est donnée en Annexe E sont utilisées. Ces jauges sont composées de 84 % de cuivre, 12 % de manganèse et 4 % de nickel. Le facteur de jauge donné par le constructeur est de $0,0027 \Omega/(\Omega \cdot \text{kbar})$: ainsi, une pression de 1kbar résulte dans un changement de résistance d'approximativement $0,135 \Omega$ pour une résistance initiale de 50Ω . De ce fait, ce genre de jauges est adapté à des configurations expérimentales présentant un niveau de contrainte élevée.

Des tests préliminaires permettant de vérifier le facteur de jauges des jauges choisies ont été effectués.

5.2 Principe d'utilisation des jauges

Les jauges piezorésistives produisant une variation de résistance avec la pression appliquée, un circuit en pont de Wheatstone (WS) a été utilisé pour mesurer cette variation de résistance. D'autre part, les différents éléments du circuit électrique ont été reliés au moyen de câbles d'impédance 50 Ω pour éviter les problèmes d'adaptation d'impédance au sein du circuit.

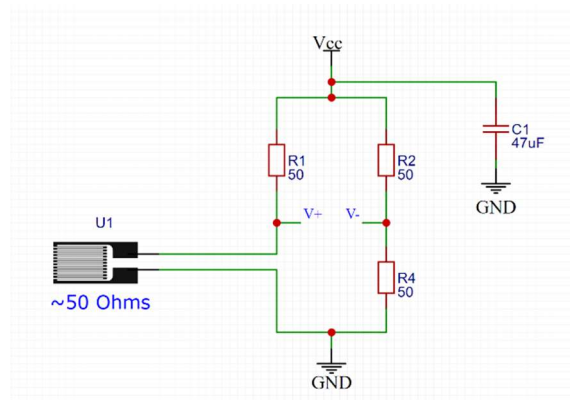


Figure 5-2 : Schématisation du circuit pont de *Wheatstone* utilisé

Le circuit ainsi utilisé permet de convertir directement la variation de résistance de la jauge en pression mesurée. La capacité C_1 est mise en place afin d'éviter les ondulations de courant qui peuvent déstabiliser V_{cc} , la tension d'entrée. Le V_{out} mesuré correspondant à la tension de sortie est la différence entre $V+$ et $V-$. $U1$ représente la jauge de contrainte de résistance R . Dans un premier temps la variation de résistance est calculée :

$$V_{out} = V_{cc} \frac{\Delta R}{R_1 + \Delta R} - \frac{1}{2} V_{cc} \quad 5-1$$

où V_{cc} est la tension d'alimentation du circuit imposée à l'aide d'une alimentation externe, R_1 est la résistance présente en série de la jauge et ΔR la variation de résistance de la jauge.

Par la suite la variation de résistance est convertie en contrainte normale au plan contenant la jauge :

$$\sigma = \frac{\Delta R}{U_1} / GF \quad 5-2$$

où GF est le facteur de jauge et $U1$ la résistance initiale de la jauge.

Afin de pouvoir calculer la contrainte à partir de la mesure de tension effectuée sur le circuit il est donc nécessaire de connaître le facteur de jauge du produit utilisé.

5.2.1 Vérification du facteur de jauge

Afin de vérifier le facteur de jauge donné par le fabricant, des essais ont été réalisés sous régime quasi-statique à l'aide d'une presse. Lors de cet essai, la force axiale permet de remonter à la contrainte axiale (en supposant une contrainte uniforme) et un système de mesure permettant de relever en parallèle la variation de résistance de la jauge a été mis en œuvre. Une photographie de la configuration expérimentale est présentée sur la Figure 5-3.

La jauge a été collée entre deux cylindres d'acier de 6 mm de diamètre. Un niveau de chargement croissant a été appliqué par la presse en 190 s jusqu'à atteindre une contrainte nominale de compression de 2 GPa environ. La tension d'alimentation permettant d'alimenter le pont de Wheatstone en continu a été fixée par un générateur de tension à $V_{cc} = 1$ V.

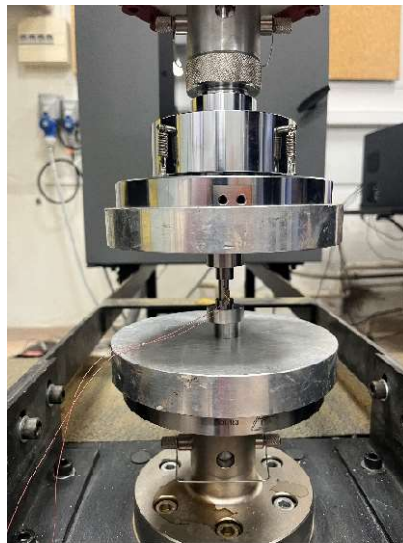


Figure 5-3 : Photographie de la configuration expérimentale utilisée pour vérifier le facteur de jauge.

Le résultat d'un de ces tests est présenté sur la Figure 5-4.

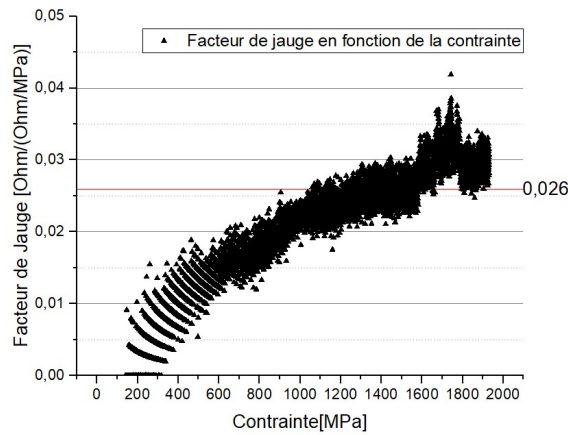


Figure 5-4 : Mesure des différents facteurs de jauges en fonction de la contrainte axiale appliquée sur la jauge

Les jauges sont faites pour être opérationnelles à partir d'une valeur de contrainte seuil. Ainsi le constructeur précise que le type de jauge utilisée ne fonctionne qu'à partir d'une contrainte supérieure à $1,4 \pm 0,2$ GPa. L'essai (Figure 5-4) montre qu'en dessous d'une valeur de $1,4 \pm 0,2$ GPa le facteur de jauge est hétérogène et qu'au-delà le facteur de jauge converge vers une valeur constante. Ainsi, le test donne une valeur moyenne de facteur de jauge de $0,026 \Omega / (\Omega \cdot \text{MPa})$, valeur qui se rapproche de la donnée du fournisseur de $0,027 \Omega / (\Omega \cdot \text{MPa})$.

Il a donc été choisi pour l'exploitation des résultats de prendre en compte le facteur de jauge de $0,026 \Omega / (\Omega \cdot \text{MPa})$ trouvé expérimentalement.

5.2.2 Mise en place des essais

Les essais d'impact de plaques avec jauge de pression ont été effectués à l'aide du lanceur à gaz présenté au préalable. Différentes configurations ont été mises en place, les configurations dites « axiales » permettant une mesure de la contrainte axiale et les configurations dites « radiales » afin de mesurer la contrainte radiale.

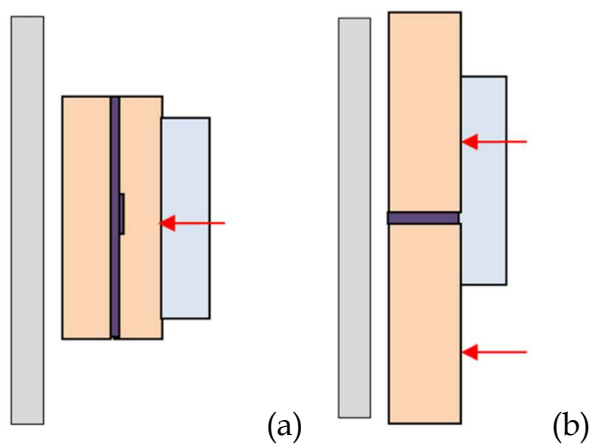


Figure 5-5 : Type de configurations mises en œuvre pour les essais avec jauge, la configuration axiale (a) et radiale (b). Les flèches rouges représentent les mesures par vélocimétrie homodyne et les parties violettes les mesures de jauge

La configuration dite axiale permet de comparer le niveau de contrainte axiale déduit de la mesure de vitesse obtenue avec le système de mesure vélocimétrie homodyne pointé vers l'arrière du matériau cible avec la mesure de contrainte effectuée « au centre » du matériau cible par jauge piezorésistive. Pour ce faire, la jauge est collée à l'aide d'une colle époxy entre deux plaques de matériau céramique identiques. D'autre part, la soudure de la jauge et les câbles liant cette dernière au système de mesure sont protégés par un tube en acier. Un système de câbles BNC 50 Ω est mis en place dans la chambre secondaire, où est fixé la cible, jusqu'au pont de Wheatstone situé à l'extérieur du lanceur.

Ce dernier dispose de deux voies de sortie reliées à un oscilloscope 8 voies de type Lecroy (8208HD). Le système de déclenchement d'acquisition des signaux est le même que celui du système de vélocimétrie homodyne, ce qui permet de synchroniser les deux mesures.

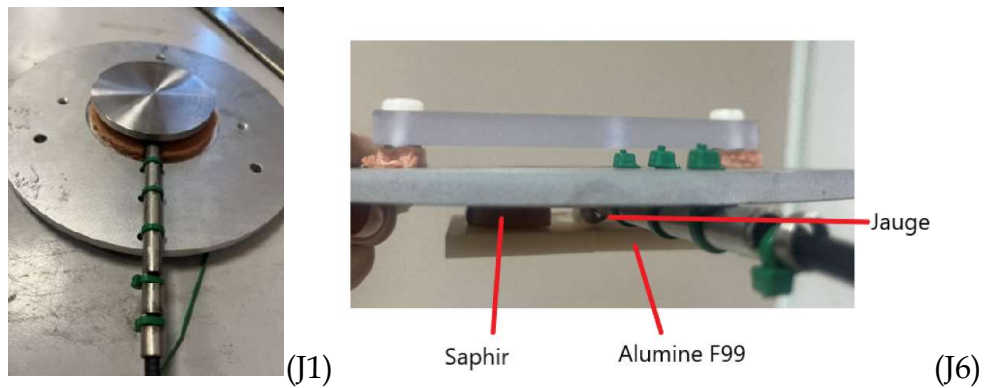


Figure 5-6 : Photographie des cibles « J1 » (configuration axiale) et « J5 » avec saphir (configuration radiale) et de leur montage.

La configuration dite radiale permet d'obtenir à la fois une contrainte radiale par mesure de la déformation de la jauge et la contrainte axiale déduite de la mesure de vitesse matérielle obtenue par le système de mesure par vélocimétrie homodyne. L'ensemble des essais utilisant ces deux configurations sont présentés dans le Tableau 5-1.

<i>Nom</i>	Type de configuration	Matériau	Plaque Impactrice	Vitesse d'impact [m.s ⁻¹]	Fenêtre en saphir	Tension d'alimentation V _{cc}
<i>J1</i>	Axiale	316L	Plane 5mm 316L	322,1	Non	1V
<i>J3</i>	Axiale	F99.7	Plane 5mm 316L	614,0	Non	30V
<i>J5</i>	Radiale	F99.7	Plane 5mm 316L	595,6	Non	30V

Tableau 5-1 : Tables des différents essais effectués au cours des tests avec jauges de pression sur acier et alumine F99.7

Les essais sur aciers sont réalisés afin de vérifier le système de mesure mis en place.

5.3 Comparaison des mesures de contraintes axiales par vélocimétrie homodyne et par jauge de pression

5.3.1 Test de validation sur acier : mesure de contrainte axiale

Dans un premier temps, un test a été effectué en configuration dite axiale. La jauge a été positionnée entre deux échantillons d'acier 316L d'épaisseur 5 mm. Cet ensemble a été impacté à 322 m/s. Une tête optique a été utilisée en face arrière de la cible afin de déduire la contrainte axiale. Le but est de comparer la contrainte maximale obtenue lors de l'essai par les deux méthodes de mesures (vélocimétrie et jauges de pression).

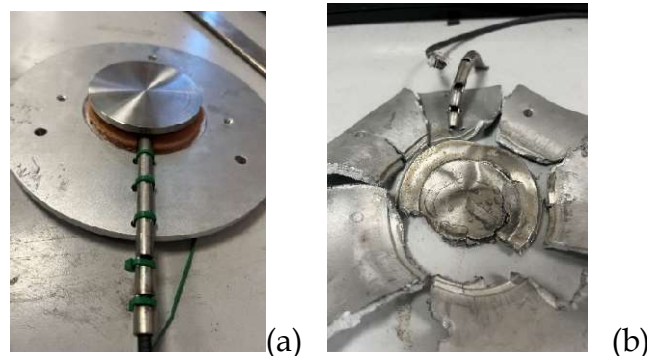


Tableau 5-2 : Photographies des cibles de l'essai J1, test avec jauge et mesure de vitesse en face arrière avant l'essai (a) et après l'essai (b)

La mesure de la jauge initialement en Volt est convertie en contrainte axiale par le biais des formules 5-1 et 5-2. La mesure donnée par vélocimétrie homodyne est convertie en vitesse par le biais de transformés de Fourier via le logiciel Wave. Par la suite, il est possible d'obtenir une mesure de la σ_{LEH} atteinte à partir de cette courbe de vitesse. Pour ce faire, la formule suivante est appliquée :

$$\sigma_{LEH} = \rho_0 \times Cl \times \frac{U_{LEH}}{2} \quad 5-3$$

où ρ_0 est la masse volumique initiale du matériau cible, Cl la vitesse des ondes longitudinales au sein du matériau, U_{LEH} est la vitesse mesurée en surface libre lors à la LEH.

Les résultats de la mesure de pression et de face arrière pour l'essai « J1 », essai de mesure de jauge entre deux échantillons d'acier sont présentés Figure 5-7.

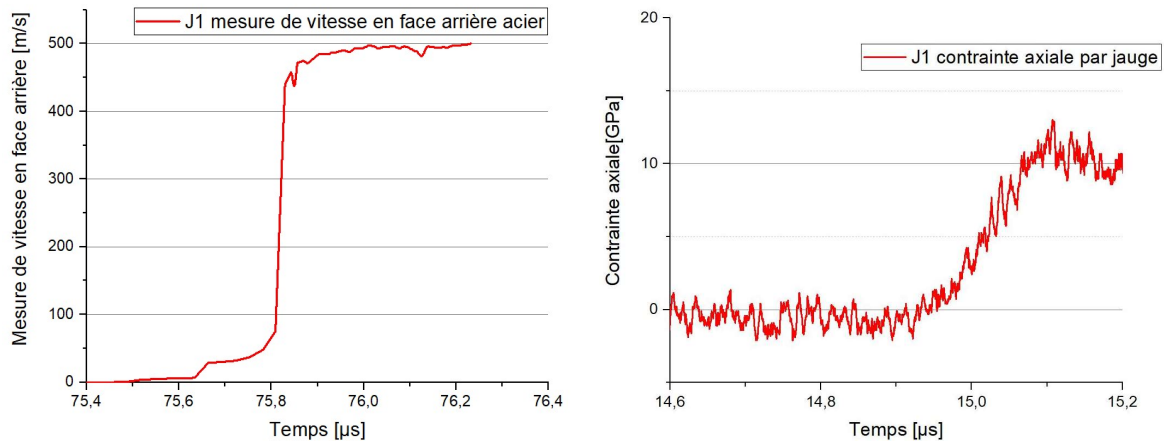


Figure 5-7 : J1- Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur 316L à 322m/s

La courbe de mesure de vitesse en face arrière de la cible est cohérente avec les mesures obtenues dans la partie 3. La limite d'élasticité d'Hugoniot est visible à faible vitesse et le choc plan donne un temps de montée très court. La limite d'élasticité d'Hugoniot obtenue à la suite de cet essai est de $1,6 \pm 0,3$ GPa.

La courbe de mesure avec jauge est bruitée. En effet, pour cet essai, la tension d'entrée V_{cc} choisie pour alimenter le circuit du pont de Wheatstone est de 1 V. Il a été choisi par la suite de doubler cette valeur pour les prochains essais en configuration axiale afin d'améliorer le rapport signal/bruit. Le palier de la LEH n'est que très peu visible sur la courbe. Néanmoins, il est possible d'observer une augmentation de la contrainte au cours du choc. La moyenne des vitesses post-chocs observée sur la courbe Figure 5-7 donne une contrainte axiale obtenue de l'ordre de 10,1 GPa.

Cet essai a permis d'obtenir une mesure de la contrainte axiale par jauge de pression et mesure de vitesse en face arrière. Néanmoins, des modifications sont réalisées pour permettre une mesure plus aisée des essais sur alumine F99.7 avec utilisation de jauges.

5.3.2 Tests sur alumine : mesure de contrainte axiale

Différents tests ont été effectués sur l'alumine F99.7. Dans un premier temps, de manière similaire à l'essai « J1 » sur acier, une jauge est placée entre deux céramiques identiques d'épaisseur 8mm. La mesure de vitesse matérielle est faite à l'arrière de la seconde céramique. Les résistances de $50\ \Omega$ au sein du circuit présenté Figure 5-2 ont été remplacées par deux résistances $100\ \Omega$ en parallèle afin de garder la même valeur de résistance totale. Cela permet d'assurer que les résistances présentes résistent mieux à la valeur de tension plus importante qui va être appliquée dans le circuit. L'alimentation utilisée au cours des essais précédant servira à déclencher par le biais d'un pulse de tension court de l'ordre de $100\ \mu\text{s}$ une autre alimentation de tension 30 V qui alimente le circuit de type pont de Wheatstone.

L'essai est effectué à une vitesse de $614\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les résultats sont présentés sur la Figure 5-8.

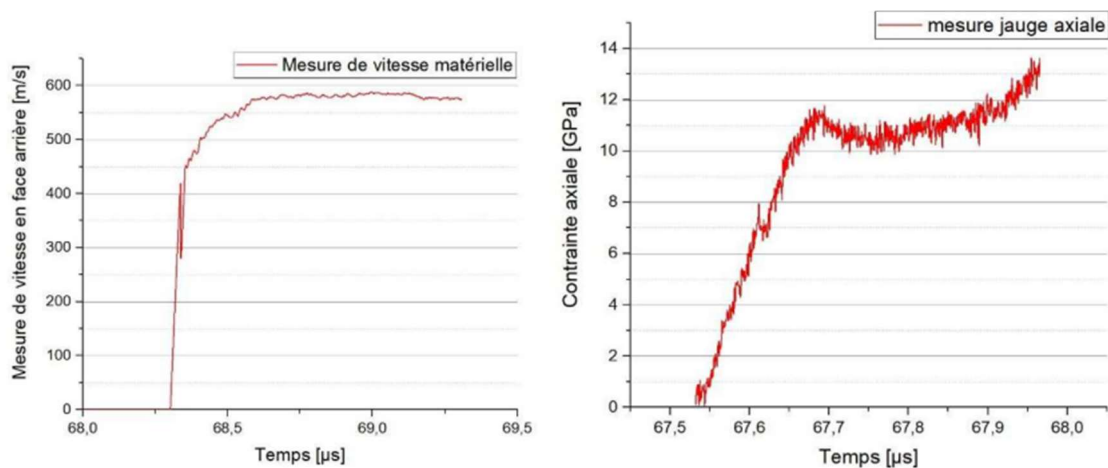


Figure 5-8 : J3-Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur F99.7 à 623 m/s.

La mesure de vitesse matérielle montre que la fin du précurseur élastique intervient autour de $418\ \text{m/s}$ ce qui correspond à une LEH aux environs de $8,5\ \text{GPa}$. Cette valeur semble être quelque peu supérieure à celles qui ont été obtenues au cours d'autres tests en laboratoire mais reste cohérente. La mesure avec jauge de pression révèle un cours palier aux alentours de $6,9\ \text{GPa}$ qui peut correspondre à la LEH de l'alumine F99.7. L'auteur Gautam (Gautam et al., 2017) a lui aussi effectué une comparaison entre mesure de vitesse en face arrière et jauge de contraintes sur alumine. Ce dernier a trouvé une valeur plus élevée de LEH à partir de ses mesures par jauge ($12,4\ \text{GPa}$) comparées aux mesures obtenues par dispositif VISAR ($11,9\ \text{GPa}$). Une étude numérique de l'essai « J3 » sera effectuée au sein de la partie suivante.

Les valeurs de tension mesurées aux bornes de la jauge étant dépendantes de la valeur d'alimentation V_{cc} du circuit, il a été décidé de garder la valeur de 30V mise en place lors de l'expérimentation précédente. Différents tests ont donc conduit à une mise en œuvre différente de la mesure.

5.4 Mesures de contraintes axiale et radiale par vélocimétrie homodyne et jauge manganin

L'essai sur alumine F99.7 a été réalisé à 596 m.s^{-1} pour une tension d'entrée du circuit $VCC=30 \text{ V}$. La jauge est placée entre deux échantillons d'alumine de 6 mm d'épaisseur. Les résultats sont présentés Figure 5-9.

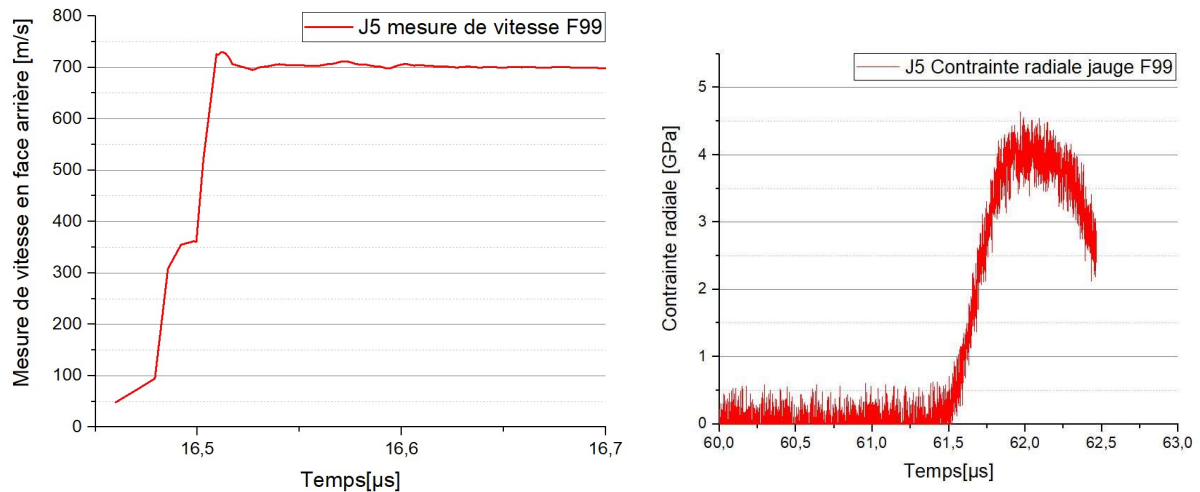


Figure 5-9 : J5-Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur alumine F99.7 à 596 m/s .

Le profil du front de monté observable sur la mesure de vitesse en face arrière sur la Figure 5-9 traduit un choc comme cela peut être attendu avec plaque impactrice plane. Deux paliers sont observables sur le profil de mesure de vitesse en face arrière. Le premier aux alentours de 365 m/s et le second aux alentours de 700 m.s^{-1} . Le premier palier permet de déterminer une LEH de $7,4 \pm 0,3 \text{ GPa}$. Cette mesure est cohérente avec les valeurs obtenues dans les chapitres précédents. La mesure de contrainte radiale obtenue grâce à la mesure de jauge est quant à elle très lisible. La contrainte radiale mesurée au cours de cet essai entre les échantillons d'alumine est en moyenne aux alentours de $4,0 \text{ GPa}$.

Il est possible d'estimer les valeurs de contrainte radiale et de contrainte équivalente lors de la LEH en fonction de la contrainte axiale à la LEH grâce aux formules :

$$\sigma_{rad} = \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \right) \sigma_{ax} \quad 5-4$$

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) \sigma_{ax} \quad 5-5$$

Les contraintes radiales et équivalentes ont été calculées pour les différents tests évoqués au préalable permettant d'obtenir une LEH. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5-3.

<i>Nom Essai</i>	<i>Configuration</i>	σ_{axial} [GPa]	σ_{eq} [GPa]	σ_{radial} [GPa]
F3	Plan/Saphir	7	5,0	2,0
F5	AL	9,0	6,5	2,5
F6	AL	7,4	5,3	2,1
J3	Plan	8,5	5,5	2,2
J5	Plan	7,4	5,3	2,1

Tableau 5-3 : Calcul des contraintes radiales et équivalentes suite aux différents essais d'impact de plaques.

La mesure de contrainte radiale mesurée au cours de l'essai « J5 » est différente de celle calculée. Néanmoins, la valeur mesurée de 4 GPa peut excéder la contrainte radiale de la LEH.

Si la mesure de la LEH est le plus souvent effectué à l'aide de mesures par vélocimétrie qui présentent l'avantage de ne pas être intrusive et au sein de la cible, les mesures avec jauges présentent l'avantage indéniable d'avoir accès à la contrainte équivalente au sein du matériau.

En effet cette dernière résulte de la valeur absolue de la différence entre la contrainte axiale et radiale :

$$\sigma_{eq} = |\sigma_x - \sigma_y| \quad 5-6$$

D'autre part, à l'aide des contraintes axiales et radiales mesurées il est possible d'obtenir la contrainte équivalente en comparant les deux essais « J3 » et « J5 ».

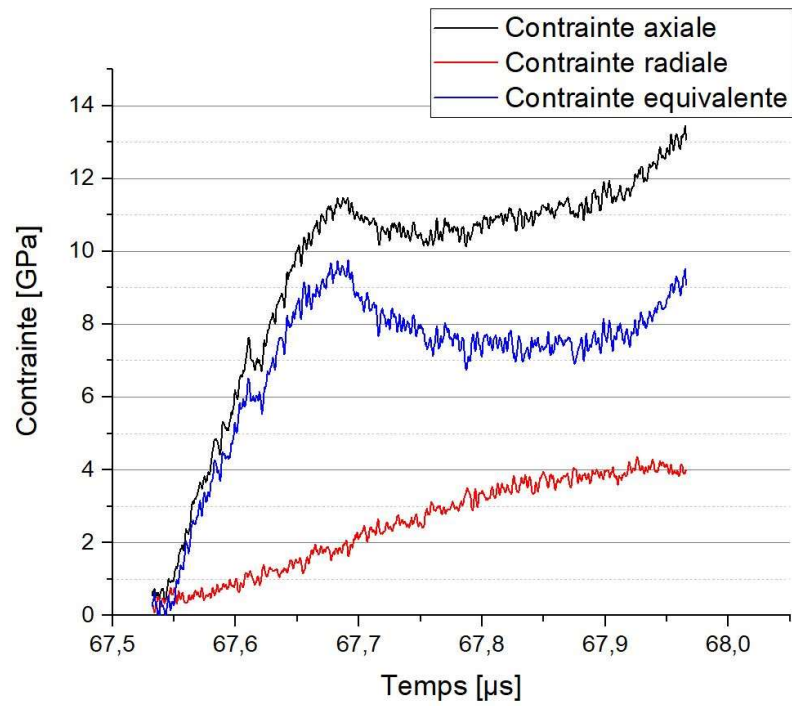


Figure 5-10 : Comparaison des essais en configuration radiale et axiale, et contrainte équivalente calculée résultant des deux essais.

Les simulations numériques permettront de confronter ce résultat expérimental.

5.5 Conclusions et discussion

Les essais d'impact de plaques plan avec mesure par vélocimétrie homodyne couplée à une mesure de pression par jauge manganin ont permis de comparer les deux méthodes de mesures. Dans un premier temps un essai d'impact de plaques plane sur acier 316L a été effectué. Il ressort de cet essai une mesure de LEH de l'acier 316L cohérente avec les essais effectués Partie 3. D'autre part, la mesure de jauge permet d'obtenir une valeur de contrainte axiale maximale de 10 GPa. Néanmoins, la LEH ne semble pas être clairement visible sur la courbe. Cet essai a cependant validé la méthode de mesure par jauge couplée à des mesures vélocimétrie homodyne. Cette configuration a été appliquée à un essai sur alumine F99.7 par la suite. La contrainte axiale a été obtenue par mesure de vitesse matérielle et par jauge. Une LEH de 6,9 GPa a été obtenue pour la mesure par vélocimétrie homodyne contre une LEH de 8,5 GPa par jauge.

Les jauges de pression permettent aussi une mesure de l'évolution de la contrainte radiale au cours de l'essai, ce qui n'est pas possible avec des mesures interférométriques. Une mesure de contrainte radiale par jauge couplée à une mesure de contrainte axiale par vélocimétrie homodyne a été mise en place sur une cible en alumine F99.7. Au cours de ce test une contrainte radiale de l'ordre de 4 GPa est relevée ainsi qu'une contrainte axiale à la LEH de l'ordre de 7,4 GPa. Si la valeur de contrainte axiale à la LEH relevée au cours de l'essai est cohérente avec les valeurs obtenues précédemment, une vérification numérique est nécessaire afin de s'assurer de la valeur de contrainte radiale mesurée.

6. Modélisation du comportement des céramiques soumises à un impact de plaques

6.1 Introduction

La modélisation du comportement des matériaux est essentielle afin de pouvoir dimensionner correctement les essais et de vérifier la cohérence de leurs résultats ainsi que de réaliser une prévision numérique des performances. C'est pour cela que posséder un modèle de comportement le plus précis possible du matériau étudié est nécessaire. Dans le cas des céramiques à blindage, afin de simuler des essais balistiques, les modèles de type JH2 (Johnson-Holmquist) ou encore JHB (Johnson-Holmquist-Beissel) sont parmi les plus souvent utilisés. Ces modèles se distinguent par la présence de deux lois de comportements distinctes, la loi du matériau intact et la loi du matériau endommagé.

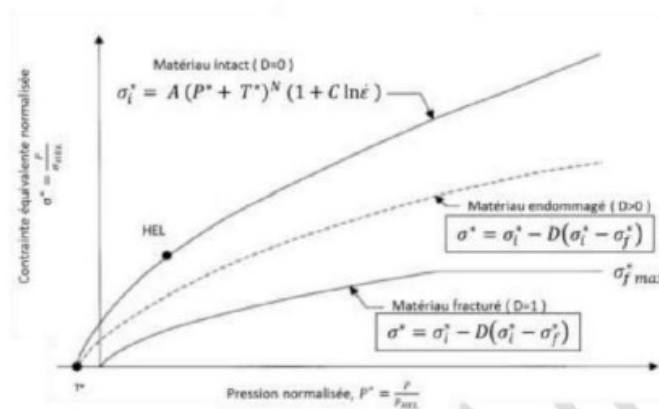


Figure 6-1 : Schématisation du modèle de comportement JH2

L'objectif de ce chapitre est de proposer une identification des paramètres de deux lois de comportement pour les matériaux précédemment étudiés par approche inverse en s'appuyant sur quelques essais. Par la suite, les modèles de comportement étant établis, ils seront mis en œuvre pour simuler d'autres essais, ce qui permettra de vérifier la cohérence des résultats obtenus en configuration Lagrangienne et avec jauges.

Les essais d'impact de plaques en compression ne font généralement intervenir que la loi du matériau intact. En effet comme cela a pu être observé au niveau de la Figure 4-7 le matériau ne subit que de faibles niveaux de déformation plastique lors d'essai d'impact de plaques en compression. C'est pourquoi, il peut être considéré que dans la phase de compression le matériau n'est pas endommagé en compression.

Pour le modèle de comportement JH2, les paramètres à identifier sont ceux de la loi du matériau intact qui est décrite, pour rappel, par la formule suivante :

$$\sigma t^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \quad 6-1$$

où T^* est la pression hydrostatique maximale normalisée en traction de la céramique intacte, P^* est la pression normalisée, et A , N et C des constantes dépendantes du matériau.

Il y a donc trois paramètres à identifier pour chaque matériau céramique considéré, les constantes A , N et C . Néanmoins, Johnson et Holmquist (Holmquist et Johnson, 2008) ont démontré que dans le cas de certaines céramiques, en l'occurrence le B_4C , le matériau est beaucoup plus sensible aux variations de pression qu'aux variations de la vitesse de déformation.

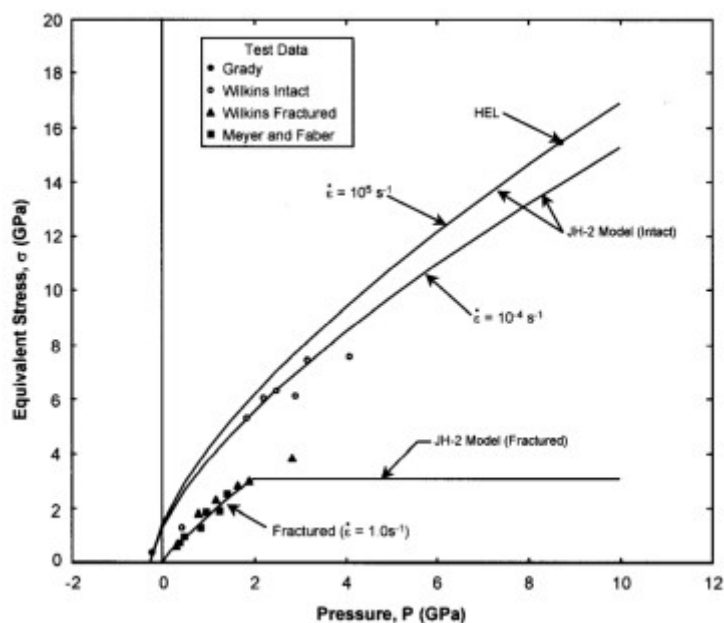


Figure 6-2 : Définition du modèle JH2 pour du B_4C pour différentes valeurs de vitesse de déformation (Holmquist et Johnson, 2008)

En effet, sur la Figure 6-2, il peut être observé que les auteurs prévoient une élévation de contrainte équivalente de seulement 10 % en passant d'une vitesse de déformation quasi-statique de 10^{-4} s^{-1} à une vitesse de déformation d'impact de plaques de 10^5 s^{-1} . Afin de simplifier l'étude paramétrique, et de ne pas prendre en compte l'influence de la vitesse de déformation, la valeur $C = 0$ a été considérée.

Différents sets de valeurs seront testés pour A et n afin de calibrer le modèle de comportement de type JH2. Afin que la courbe de comportement du matériau intact passe par la LEH, la valeur de A est fixée en fonction de la valeur de n par la formule suivante :

$$A = \frac{1}{(1 + T^*)^n} \quad 6-2$$

D'autres part, le σ_{LEH} est celui trouvé suite aux analyse Lagrangienne de la Partie 4. La pression hydrostatique à la LEH est liée à la LEH selon la formule :

$$P_{LEH} = \sigma_{LEH} * \frac{1 + \nu}{3(1 - \nu)} \quad 6-3$$

La contrainte équivalente de von Mises σ_{LEH}^{eq} peut également être déduite à partir de la valeur de σ_{LEH} par la formule suivante :

$$\sigma_{LEH}^{eq} = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \sigma_{LEH} \quad 6-4$$

Le modèle JH2 a été appliqué aux deux matériaux d'étude, Le F99 et le Forceram SSD ainsi qu'un modèle élasto-plastique avec écrouissage en fonction de la déformation plastique. Ce dernier est une version simplifiée du modèle étudié par (Tranchet, 1994) appliqué à l'alumine A16-2. Ce modèle suit une loi de Ludwick adaptée aux alumines en déformation uniaxiale.

$$\sigma_{eq} = \sigma_{LEH}^{eq} + f C_2 \varepsilon_p^{n_2} \quad 6-5$$

où σ_{eq} représente la loi d'écoulement plastique, σ_{LEH}^{eq} le seuil d'écoulement plastique initial, f correspond à un coefficient de correction lié à la porosité de l'alumine ou du Forceram, C_2 et n_2 sont des paramètres d'écrouissage et ε_p traduit la déformation plastique équivalente.

Ces différents paramètres sont identifiés par la suite pour deux des matériaux d'étude, l'alumine F99.7 et le Forceram SSD.

Les différents essais sont modélisés par éléments finis via le logiciel Abaqus en « dynamic-explicit ». Les détails de la modélisation sont présentés dans la partie suivante.

6.2 Calibration des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour l'alumine F99.7

Dans un premier temps différents essais ont été choisis afin de calibrer les paramètres n et A des différents modèle JH2 de l'alumine F99.7, ainsi que le coefficient n_2 du modèle élasto-plastique avec écrouissage. Le but est par la suite de confronter ces modèles aux résultats obtenus par analyse Lagrangienne ou encore par mesure par jauges de contraintes.

L'alumine F99.7 a été modélisée avec les paramètres présents au sein du Tableau 6-1.

JH2			
Paramètre	Valeur	Unité	Reference
Rho	3,880E+03	kg/m3	Fournisseur
E	3,800E+11	Pa	Fournisseur
v	2,200E-01		Fournisseur
HEL	7,400E+09	Pa	Essai D'AL
Tmax	7,300E+08	Pa	Cronin
a	0,9012		
n	0,6000		A faire varier
c	0,000E+00		-
Eps0	1,000E+00		-
SigImin	2,300E+08	Pa	-
SigImax	5,313E+09	Pa	Calculé
D1	1,000E+00		-
D2	0,000E+00		-
Élasto-plastique			
n	0,3		A faire varier
C2	1,00E+10	Pa	Tranchet
f	8,40E-01		Tranchet
Y0	5,31E+09	Pa	Calculé
xk1	2,2619E+11	Pa	Calculé
G	1,557E+11	Pa	Calculé

Tableau 6-1 : Présentation des différentes paramètres utilisés pour modéliser l'alumine F99.7 au cours des différentes simulations numériques du présent chapitre.

La loi du matériau endommagé n'est pas prise en compte. Les paramètres (D1 et D2) liés à la variable d'endommagement sont tels que le comportement du matériau suit la loi du matériau intact du modèle JH2 tout au long de l'essai. La valeur de LEH retenue est celle obtenue après l'analyse Lagrangienne effectuée sur l'essai en configuration inversée. Dans le cas des données du modèle élasto-plastique avec écrouissage, ces dernières ont été prises dans la thèse de (Tranchet, 1994) qui a étudié la modélisation de l'alumine A16-2. Aucune loi d'état n'est prise en compte pour se concentrer sur les modèles de comportements.

Le but, dans un premier temps, est de valider la réponse du modèle JH2 et du modèle élasto-plastique avec écrouissage avec le logiciel Abaqus. Pour ce faire un élément 2D simple de 0,2 mm de côté est soumis à un chargement en vitesse de 2 m/s pendant une durée de 10 μ s appliquée sur une des faces du cube, les autres faces étant soumises à un déplacement nul sur la normale (symétrie) comme illustré Figure 6-3. La vitesse ainsi que le temps total de la modélisation ont été appliqués de manière à ce que la simulation ne soit pas soumise à une accélération tendant vers l'infini. Cette méthode de vérification a notamment été employée par Cronin (Cronin et al., 2003).

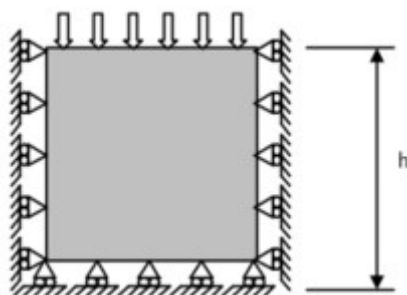


Figure 6-3 : Schématisation de la modélisation de vérification d'implémentation des modèles de comportement, (Cronin et al., 2003)

La courbe de contraintes équivalentes de Mises en fonction de la pression a été relevée pour $n=0,6$. La courbe de la Figure 6-4 montre que le modèle respecte bien un comportement élastique jusqu'à la LEH puis suit la courbe enveloppe du modèle JH2.

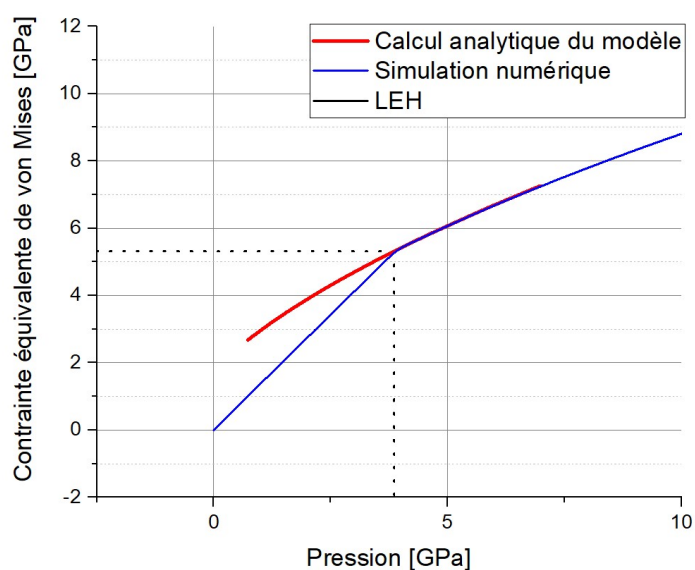


Figure 6-4 : Vérification de l'implémentation du modèle JH2 sous Abaqus pour une alumine F99.7 et comparaison avec la courbe enveloppe du modèle JH2 (Formule 6.1)

Plusieurs paramètres n du modèle JH2 ont été considérés pour identifier ce paramètre par approche inverse. Les essais « F2 » et « F3 » effectués sur alumine F99.7 servent de référence pour cette identification.

Pour rappel, il s'agit de deux essais d'impact de plaques réalisés avec mesure de vitesse en face arrière à l'interface entre l'alumine et le saphir servant de matériau fenêtre. La plaque impactrice plane en acier d'épaisseur 5 mm était projetée à une vitesse de 583 m/s dans le cas de l'essai « F2 » tandis qu'une plaque impactrice ondulée de même épaisseur impactait la cible à une vitesse de 603 m/s dans le cas de l'essai « F3 ».

Les différentes simulations sont réalisées avec le logiciel Abaqus-explicit et les pièces sont représentées en 3D. Tout comme les simulations numériques qui ont été présentées dans la Partie 3, il a été choisi de s'appuyer sur les conditions de symétrie et de ne modéliser qu'une demi-période comme cela est représenté sur la Figure 6-5.

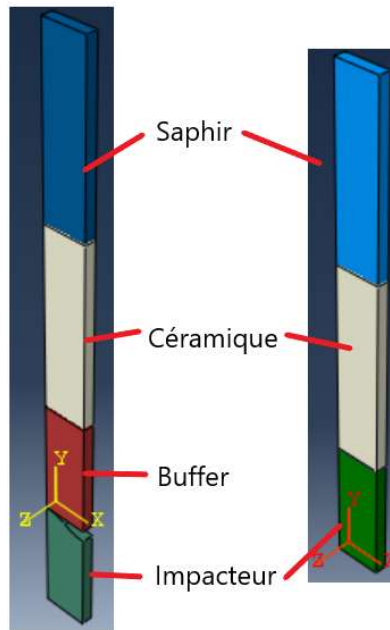


Figure 6-5 : Représentation de la tranche modélisée lors des simulations numériques.

Le type d'élément considéré pour chaque solide (plaque flyer, buffer, échantillon et matériau fenêtre) est un élément à intégration réduite à 8 nœuds (C3D8R). Ces éléments sont mis en contact via un contact de type « penalty ». Une vitesse initiale est appliquée à l'impacteur de manière à correspondre à la vitesse mesurée par les barrières de vitesse Optospeed au cours des essais. Les déplacements des faces sont bloqués dans les directions X et Z. La paramètre d'amortissement linéaire a été fixé à 0,08. Dans le cadre des essais avec impacteur ondulé un maillage de 0,2 mm correspondant au maillage utilisé dans la Partie 3 a été choisi. Dans le cadre des essais plan, afin de mieux retranscrire le choc un maillage plus fin de l'ordre de 0,05 mm par 0,02 mm a été retenu.

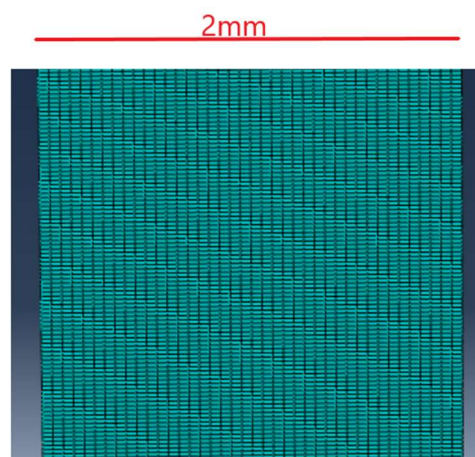


Figure 6-6 : Représentation du maillage utilisé pour modéliser les essais d'impact plan. La dimension des mailles est de 0.005mm par 0.002mm

Les paramètres de l'acier sont rappelés. Une loi d'état est prise en compte pour le matériau.

ρ (g/cm ³)	G(GPa)	C0 (m/s)	S	Gamma γ	A (MPa)	B (MPa)	N	M	Melting T (K)
8,0	92,1	4570	1,49	2,2	490	600	0,21	0,6	1663,15

Tableau 6-2 : Paramètre de l'acier 316L (Elkaseer et al., 2019) utilisés lors des modélisations d'essais

Concernant la céramique, le but étant d'identifier la valeur de la constante n au sein du modèle JH2 et de la constante n au sein du modèle élasto-plastique avec écrouissage, différentes valeurs de ces paramètres ont été testées.

<i>Modèle de comportement</i>	Numéro de simulation	Valeur de n
<i>JH2</i>	1	0,6
	2	0,4
	3	0,8
<i>EP</i>	4	0,21
	5	0,15
	6	0,25
	7	0,215
	8	0,19

Tableau 6-3 : Récapitulatifs des différentes valeurs testées afin d'identifier chaque modèle de comportement par approche inverse pour Alumine F99.7

Les autres paramètres matériaux sont présentés Tableau 6-1. Les résultats des différentes simulations numériques effectuées ont été comparés et sont visibles sur la Figure 6-7.

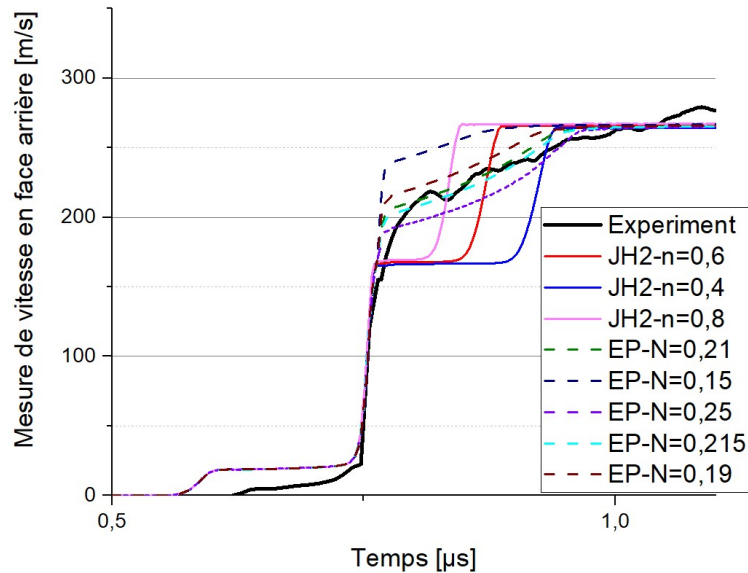


Figure 6-7 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau alumine F99.7 vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai F2.

Dans un premier temps, il est possible d'observer sur les simulations effectuées avec le modèle JH2 que, plus n est petit, plus le plateau correspondant à la LEH est important. D'autre part un n trop important ne restitue pas correctement le plateau supérieur où convergent les courbes de vitesse. Ainsi un n de 0,6 semble apporter un compromis entre la durée des paliers et le temps de monter de l'essai. A contrario, le modèle élasto-plastique avec écrouissage s'adapte beaucoup plus à l'allure de la courbe expérimentale. C'est notamment le cas de l'essai possédant un $n=0,215$.

Le modèle élasto-plastique avec écrouissage semble donc être plus adapté à des modélisations d'essais d'impact de plaques plan. Les mêmes paramètres sont utilisés pour modéliser l'essai « F3 » qui correspond à un essai avec une plaque impactrice ondulée.

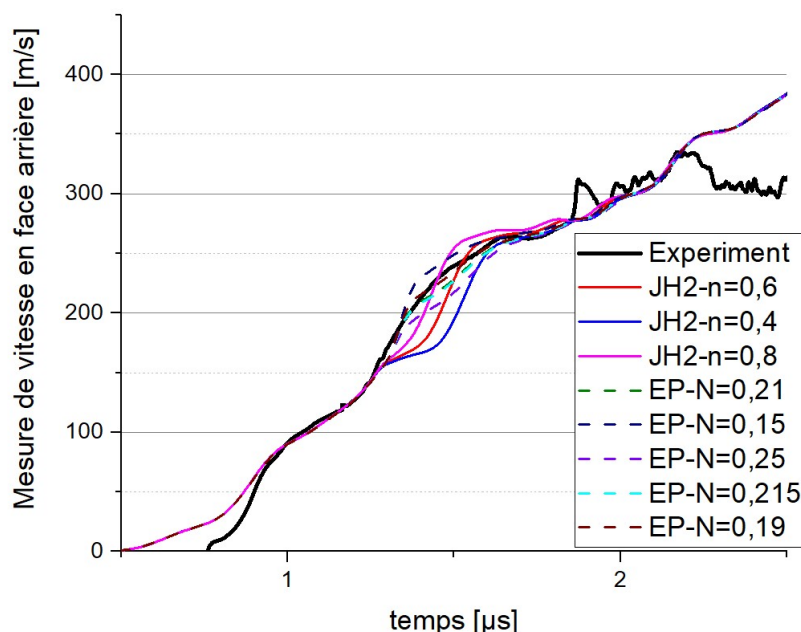


Figure 6-8 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau alumine F99.7 vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai F3.

Dans le cas d'impact de plaques sans choc, les deux modèles JH2 et EP permettent d'obtenir des résultats plus proches de la courbe expérimentale qu'avec l'impact plan. L'identification de n est plus difficile cependant, car ce paramètre a moins d'influence. De manière similaire à ce qui peut être observé en impact de plaques plan, le modèle élasto-plastique avec écrouissage approche mieux la courbe expérimentale. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle élasto-plastique avec écrouissage est plus sensible à la déformation plastique qui varie pendant l'essai. La valeur de $n=0,215$ obtenue à partir de la modélisation de l'essai « F2 » semble ici convenir également. Il a donc été décidé, par la suite, de simuler les essais expérimentaux effectués pour analyse lagrangienne et les essais avec jauges à l'aide du modèle élasto-plastique avec écrouissage pour une valeur de n égale à 0,215 et avec le modèle JH2 avec une valeur de n égale à 0,6.

6.3 Comparaison entre données expérimentales et numériques d'essais en configuration lagrangienne et avec jauges sur alumine F99.7

Les différents essais appliqués à l'alumine F99.7 qui ont fait l'objet d'une simulation numérique sont listés dans le Tableau 6-4.

Nom de l'essai	Configuration et vitesse[m/s]	Plaque impactrice	Cible	Fenêtre en saphir
F5	AL-862	Ondulé 316L 70 × 5mm	F99 60 × 40 × 6mm 60 × 40 × 8mm	OUI
J3	Axiale-614	Plane 316L 70 × 5mm	F99 50 × 6mm 50 × 6mm	NON
J5	Radiale-596	Plane 316L 70 × 5mm	F99 60 × 40 × 8mm 60 × 40 × 8mm	NON

Tableau 6-4 : Récapitulatif des essais expérimentaux réalisés sur F99.7 étudiés au cours de ce chapitre

Les simulations sont effectuées avec les mêmes paramètres que ceux détaillés dans la sous-partie 6.2. Les vitesses d'impact et les épaisseurs des céramiques sont adaptées selon les données du Tableau 6-4.

Dans un premier temps, le but est de pouvoir comparer les résultats des essais avec analyse lagrangienne aux résultats de la simulation numérique. Pour ce faire, la vitesse matérielle en face arrière à l'interface entre la céramique et le saphir à l'arrière de deux céramiques d'épaisseur différentes, ici 6 mm et 8 mm, est exploitée.

Les profils de vitesse en face arrière sont données Figure 6-9. Ici, deux modèles de comportements sont testés, JH2 avec une valeur fixée à $n=0,6$ et EP avec un écrouissage $n=0,215$.

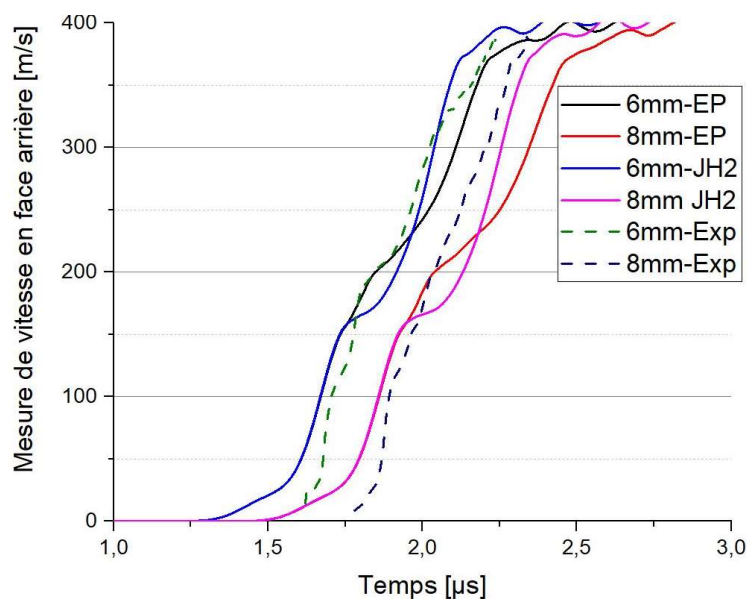


Figure 6-9 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai F5. Vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps.

Les courbes provenant de la même simulation semblent presque parallèles entre elles. Une légère différence peut être observée sur les plateaux lors du passage de la phase élastique à plastique. Ces données numériques ont ensuite été utilisées comme données d'entrée du programme d'analyse Lagrangienne afin d'observer la courbe de contrainte axiale en fonction de la déformation axiale obtenue (Figure 6-10).

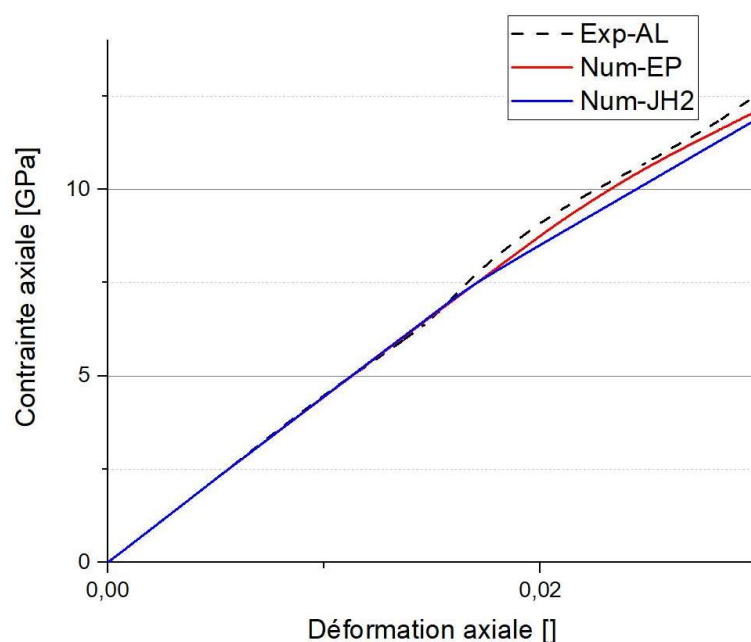


Figure 6-10 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai F5. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

Le modèle élasto-plastique semble donner une réponse plus proche des mesures expérimentales dans la phase plastique. A nouveau, cela peut s'expliquer par le fait que le modèle a une plus grande sensibilité à la déformation plastique. Dans un second temps, il peut être intéressant de comparer les résultats obtenus expérimentalement avec jauges à leur contrepartie numérique. Pour ce faire, les mesures de contrainte axiale effectuées dans l'essai « J2 » sont comparées aux données de calcul relevées au point de mesure visible sur la Figure 6-11.

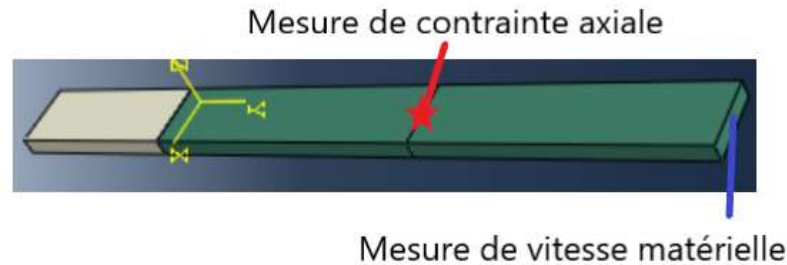


Figure 6-11 : Position du point de mesure de la contrainte axiale dans la simulation numérique de l'essai J2

De plus, les mesure de contrainte radiale et de vitesse matérielle effectuée lors de l'essai « J5 » sont comparées aux données de calcul relevées aux points de mesure visible sur la Figure 6-12.

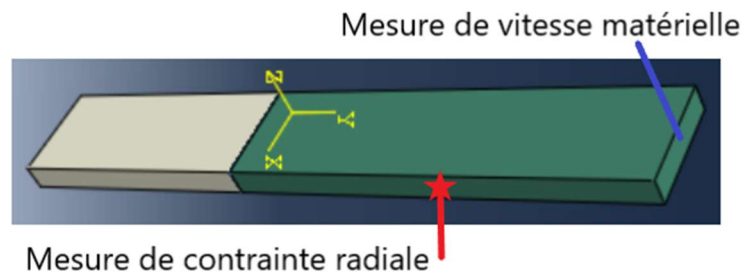


Figure 6-12 : Position du point de mesure de la contrainte radiale dans la simulation numérique de l'essai J5

Les données acquises par simulation numérique sont confrontées aux données expérimentales. Ces dernières ont été obtenues par mesure de vitesse matérielle ainsi que par mesure à l'aide de jauge de contrainte. Les données de contrainte axiale obtenues au cours de l'essai « J2 » sont comparées à celles obtenues par simulation numérique pour les deux lois de comportements retenues sur la Figure 6-13.

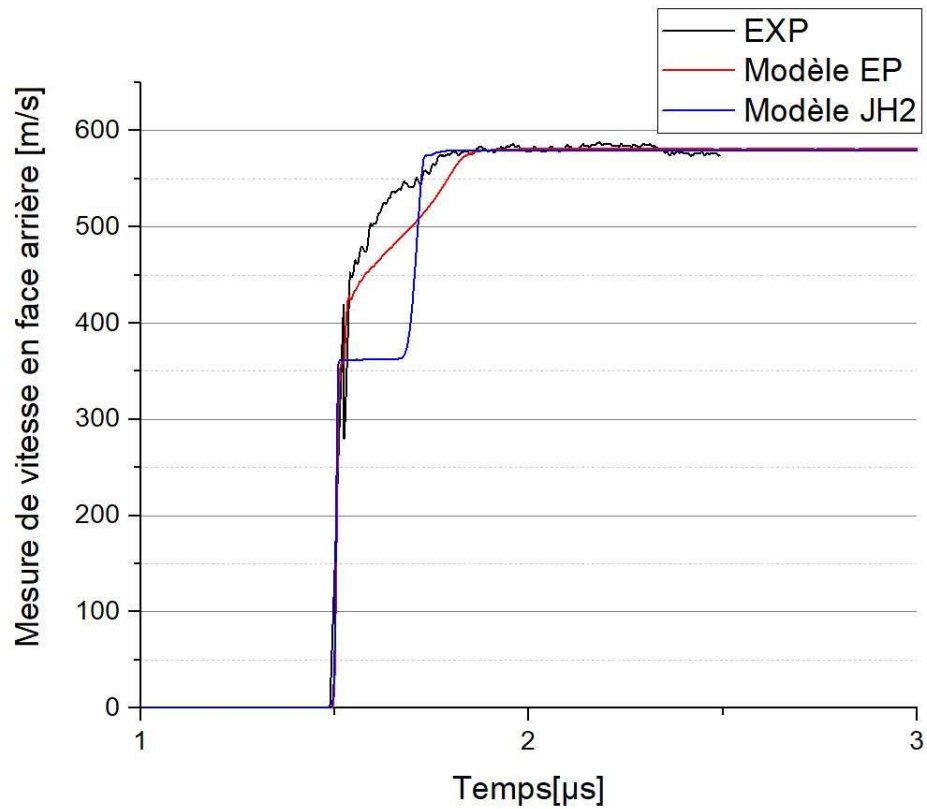


Figure 6-13 : Simulation de l'essai JH2 et comparaison de vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps pour les modèles JH2 et EP

Il peut être observé que le plateau d'Hugoniot est bien retranscrit par les deux modèles de comportement, que ce soit le modèle EP (élasto-plastique) ou le JH2. Néanmoins, le modèle EP correspond plus au profil expérimental avec notamment une transition élasto-plastique se rapprochant plus du cas réel. Une comparaison entre les mesures de jauges relevées expérimentalement et le relevé numérique des contraintes est également effectuée.

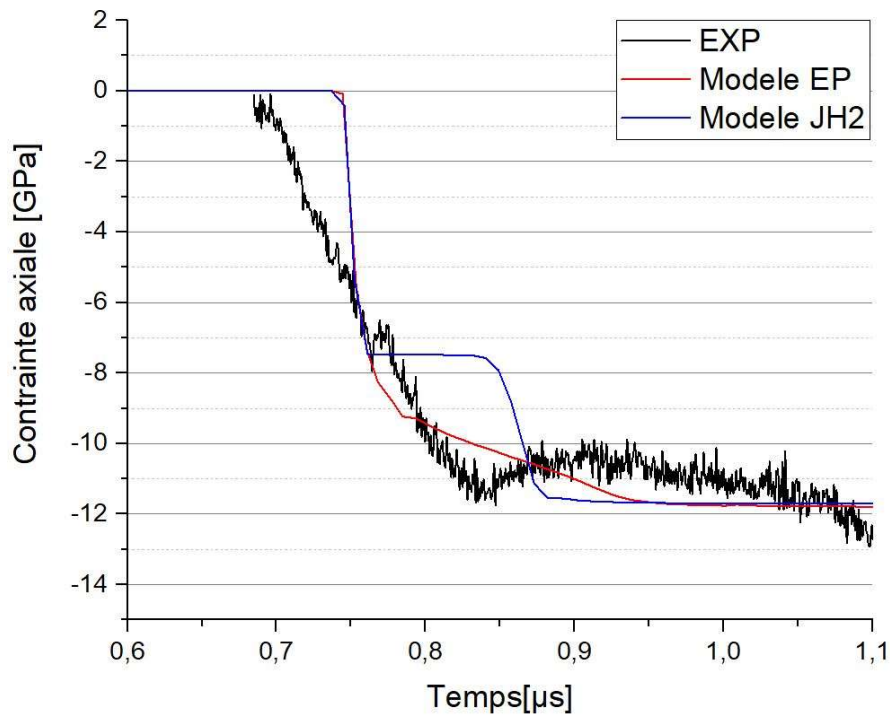


Figure 6-14 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai J2. Contrainte axiale en fonction du temps.

Le profil de contrainte axiale donné par la jauge diffère légèrement de ceux obtenus numériquement. Néanmoins malgré une pente moins raide que ce qui peut être attendu numériquement, le palier de contrainte se situe dans les niveaux prévus par les simulations numériques aux alentours d'une dizaine de GPa. Les données de l'essai avec jauge de contrainte radiale sont comparées à la simulation numérique sur les Figure 6-15 et Figure 6-16.

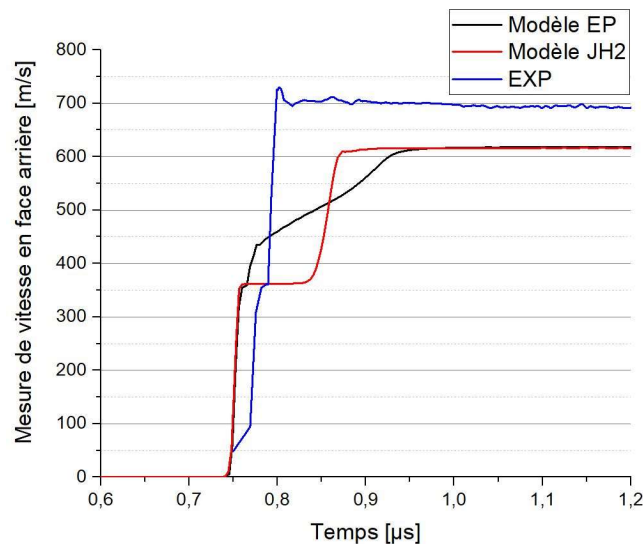


Figure 6-15: Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai 52. Vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps.

La mesure de vitesse en face arrière fait apparaître un palier caractéristique de la LEH visible sur la courbe expérimentale. Ce dernier est bien au même niveau de celui observé avec le modèle de comportement JH2. Néanmoins, le plateau maximum de vitesse n'est pas reproduit. En effet ce dernier est plus haut que celui prédit par les calculs. Cette différence peut être corrigée en prenant en compte une loi d'état pour la

céramique. La mesure de la contrainte radiale donnée par simulation numérique est effectuée à la mi-hauteur de la cible en alumine. Le montage de la cible expérimentale étant délicat, la position exacte de la jauge au sein du montage expérimental n'est pas connue exactement.

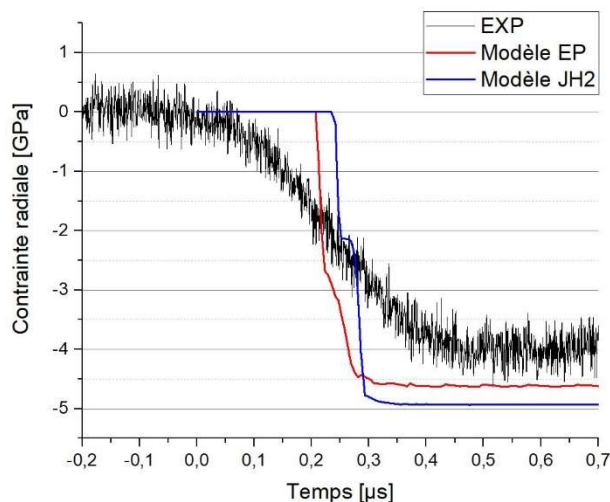


Figure 6-16 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai J5. Contrainte radiale en fonction du temps.

Il peut être observé que la valeur de contraintes radiales mesurée expérimentalement avec la jauge de contrainte est cohérente avec la valeur obtenue par les simulations numériques bien que le temps de réponse de la jauge semble plus long. Ces simulations numériques permettent de s'assurer de la cohérence entre les prévisions numériques et résultats expérimentaux obtenus.

6.4 Définition des paramètres des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour le SiC Forceram®

Les paramètres matériaux considérés pour le Forceram® sont donnés dans le Tableau 6-5.

JH2			
Paramètre	Valeur	Unité	Reference
Rho	2,820E+03	kg/m3	Fournisseur
E	4,110E+11	Pa	Fournisseur
ν	1,400E-01		Fournisseur
HEL	6,200E+09	Pa	Essai D'AL
Tmax	6,100E+08	Pa	-
a	0,8864		
n	0,6000		A faire varier
b	0,2955		-
Eps0	1,000E+00		-
Sig1min	4,000E+10	Pa	-
Sig1max	5,191E+09	Pa	Calculé
D1	1,000E+00		-

D2	0,000E+00		-
Élasto-plastique			
n	0,3		A faire varier
C2	1,00E+10	Pa	Tranchet
f	9,40E-01		Tranchet
Y0	5,19E+09	Pa	Calculé
k1	1,903E+11	Pa	Calculé
G	1,803E+11	Pa	Calculé

Tableau 6-5 : Présentation des différentes valeurs utilisées pour modéliser du SiC Forceram® SSD au cours des différentes simulations numériques du chapitre.

La LEH choisie au sein de ces modélisations correspond à la LEH obtenue suite à l'analyse Lagrangienne présentée au sein de la Partie 4. Les essais simulés sont les essais « C4 » et « C5 » qui correspondent à deux essais d'impact de plaques réalisés avec mesure par vélocimétrie homodyne relevée à l'interface entre le saphir et le Forceram®. L'essai « C4 » correspond à un essai avec choc et l'essai « C5 » correspond à un essai d'impact de plaques sans choc.

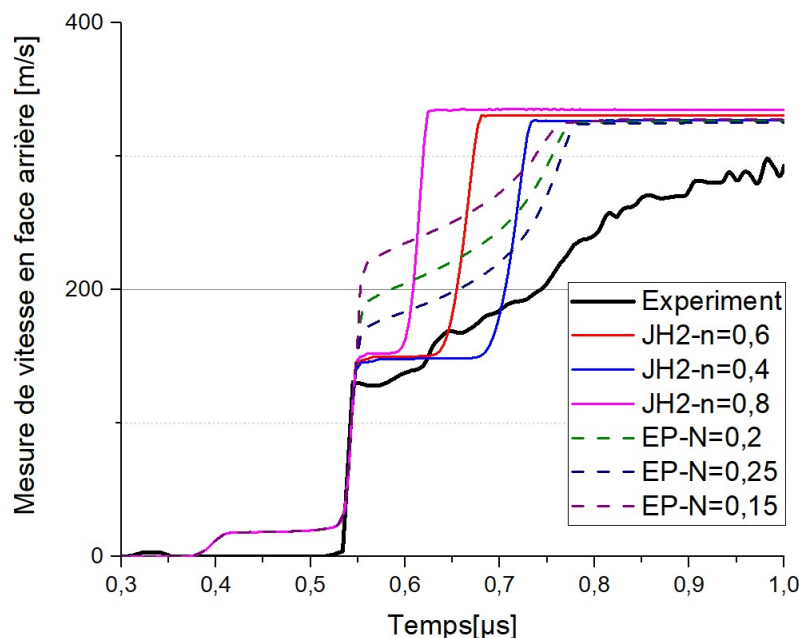


Figure 6-17 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau du matériau Forceram® vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai « C4 ».

Il peut être observé que le choc visible sur la mesure par vélocimétrie homodyne ne permet pas d'avoir accès au pied de courbe expérimental. Néanmoins un plateau est présent aux alentours de 140 m/s. Ce plateau est un peu plus bas que celui prédit par les simulations numériques. Néanmoins la longueur du plateau suggère que le paramètre n associé à la modélisation JH2 serait plus petit que celui qui a été défini pour l'alumine. D'autre part, si le modèle JH2 arrive à reproduire ce plateau, le modèle élasto-plastique quant à lui reproduit mieux l'allure de la courbe post-plateau malgré un certain décalage en vitesse. Ainsi la courbe obtenue par le modèle élasto-plastique $n = 0,25$ est presque parallèle à la courbe expérimentale.

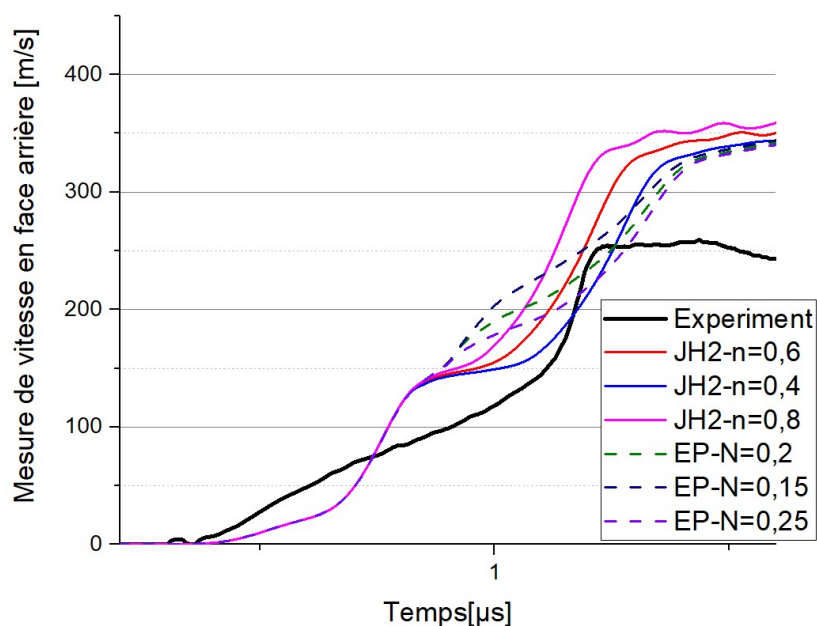


Figure 6-18 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau du matériau Forceram® vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai C5.

Concernant l'impact sans choc « C5 », les simulations numériques ne semblent pas être en mesure de donner une représentation très satisfaisante de l'essai. Cela peut être dû à la microstructure particulière extrêmement hétérogène et poreuse du Forceram® qui conduirait à un phénomène de lissage, ce qui atténuerait les variations de pente sur le front montant. De plus, étant donnée la forte porosité présente au sein de cette microstructure, on peut supposer qu'une loi de compaction permettrait d'affiner les calculs.

6.5 Conclusions et discussion

Les essais d'impact de plaques plan et ondulé ont été utilisés pour identifier certains paramètres de 2 modèles de comportement : le modèle JH2 et élasto-plastique avec écrouissage. Ce travail d'identification a été effectué sur les matériaux alumine F99.7 et Forceram® SSD. Notamment, une valeur de la constante n du modèle JH2 a été identifiée aux alentours d'une valeur de 0,6 pour l'alumine F99.7. Cette valeur est cohérente avec les valeurs obtenues pour d'autres aluminés. D'autre part une valeur de n du modèle élasto-plastique avec écrouissage a été identifiée aux alentours de 0,215 pour ce même matériau.

Une fois identifiés, ces modèles de comportement ont par la suite été utilisés pour simuler certains essais réalisés sur l'alumine F99.7 présentés dans les parties précédentes. Un essai pour analyse Lagrangienne a notamment été modélisé avec les 2 modèles JH2 et élasto-plastique. De plus, une analyse Lagrangienne a été pratiquée à partir des courbes de signaux de vitesse matérielle relevée en face arrière de la céramique, ce qui a permis de comparer les courbes de contrainte axiale en fonction de la déformation axiale aux résultats expérimentaux. Les résultats des calculs obtenus sont cohérents avec les données expérimentales.

Des essais avec jauges ont également été simulés. Dans le cas de ces essais, un écart plus important est parfois noté entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques. De plus, le profil de vitesse en face arrière prédit par simulation diffère de celui observé au cours des essais. Néanmoins, ces essais permettent de confirmer la cohérence des prévisions numériques en comparaison des données expérimentales obtenues au cours de la thèse. En effet, le niveau de contrainte radiale obtenue au cours des essais avec jauge de contrainte est bien restitué par le calcul.

Cependant, si ces modèles semblent bien décrire le comportement de l'alumine, ils se révèlent insuffisants pour décrire le comportement du SiC Forceram®. En effet, la microstructure extrêmement hétérogène de ce dernier nécessiterait d'être prise en compte. De plus, une loi de compaction devrait être envisagée.

7. Conclusion générale et perspectives

Malgré leur comportement fragile, les matériaux céramiques sont couramment utilisés comme matériaux de protection en association avec un backing. Toutefois, la céramique possède un comportement complexe et sa performance balistique ne peut être reliée qu'à une unique variable matériau. C'est pour cela qu'une stratégie de « make-and-shout » est utilisée pour tester directement les performances d'une microstructure au sein d'un assemblage par essais balistiques. Les essais balistiques restent difficiles à instrumenter et le comportement de la céramique ne peut pas être établi sans recourir à des essais spécifiques de laboratoire. Au cours d'un impact balistique, la céramique va être notamment soumise à une première phase de compression intense correspondant à des pressions de l'ordre de plusieurs GPa. Afin d'étudier le comportement des céramiques sous de telles conditions de chargement, différents moyens d'essais expérimentaux ont été développés. Parmi ces moyens, les essais d'impact de plaques sont particulièrement intéressants du fait des hautes pressions et des hautes vitesses qu'ils permettent d'atteindre. C'est pourquoi ces essais ont été considérés dans cette thèse.

Au cours de ces essais, la mesure de vitesse matérielle en face arrière de la cible permet de déduire notamment la Limite Élastique d'Hugoniot, appelée LEH. A la LEH, si le comportement pré-LEH de la céramique est élastique linéaire isotrope, la contrainte radiale est connue. Cette mesure ne donne hélas pas d'information sur l'évolution de la contrainte radiale et de la contrainte équivalente au-delà du seuil de plasticité. Une instrumentation avec jauge de contrainte permet de remonter à cette information. Cependant les 2 types de mesure, par interférométrie laser et par jauge de contrainte sont rarement comparés dans la littérature. D'autre part, les essais d'impact de plaques plan ne permettent pas de pratiquer une analyse dite Lagrangienne, contrairement aux essais avec rampe comme ceux réalisés sur la machine GEPI. Toutefois, les essais par puissance pulsée présentent d'autres limitations en ce qui concerne la taille des échantillons et le coût de mise en œuvre. D'autre part, l'utilisation de courants de fortes intensités rend la mise en place de jauge de contrainte et donc la mesure de la contrainte radiale impossible.

C'est pour cela qu'en 2017, Forquin et Zinszner (Forquin et Zinszner, 2017) ont théorisé l'application de l'analyse Lagrangienne à un essai d'impact de plaques sans choc. Le but est de réaliser une compression isentropique et de créer une rampe de chargement par l'utilisation d'une plaque impactrice ondulée. Si les essais d'impact de plaques sans choc ont déjà été réalisés dans la littérature, une configuration permettant une analyse Lagrangienne n'a jamais été testée.

Une campagne numérique de dimensionnement a été entreprise afin de pouvoir mettre en place ces essais. Dans un premier temps, des essais d'impact plan ont conduit à retenir l'acier 316L comme matériau composant la plaque impactrice et le buffer. Cet acier a été sélectionné en raison de sa limite d'élasticité suffisamment élevée

et de son usinage facile. De plus, cet acier présente l'avantage de ne pas changer de phase aux niveaux de chargement auxquels ont été testées les céramiques considérées. Des essais d'impact de plaques acier sur acier avec plaque impactrice ondulée ont permis vérifier la formation d'une rampe de chargement lors de l'utilisation de ces plaques impactrices. L'utilisation d'une telle géométrie de plaque a permis d'atteindre un temps de montée de l'ordre de $0,8 \mu\text{s}$. Suite à ces résultats, une première configuration permettant de réaliser une analyse Lagrangienne sur acier a été mise en œuvre. Cette dernière a permis d'obtenir l'ensemble de la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale de l'acier 316L. Une LEH à $1,25 \text{ GPa}$ a également été obtenue, valeur cohérente avec la littérature. En parallèle, une étude a été conduite pour vérifier l'intérêt de nouvelles géométries de plaques impactrices générées par fabrication additive de l'acier 316L. Ces géométries ont été évaluées numériquement et ont permis de vérifier qu'il était possible d'obtenir un front montant plus lisse, avec un temps de montée aussi long tout en générant des contraintes suffisantes lors de l'impact afin que le matériau cible soit sollicité au-dessus de sa LEH. Ces géométries ont été imprimées en 3D. Il en est ressorti qu'une géométrie sinusoidale imprimée avec un filament ultrafuse devrait permettre par la suite d'améliorer les résultats d'analyse Lagrangienne.

L'étude des céramiques à blindage, plus particulièrement l'alumine F99.7 et le SiC Forceram® SSD a commencé par des essais d'impact plan afin de déterminer leur LEH. Il en est ressorti que l'alumine F99.7 possédait une LEH aux alentours de $7,0 \text{ GPa}$. Les essais d'impact plan ont été moins probants pour déterminer la LEH du Forceram® SSD. En effet aucun plateau élastique n'est visible sur la mesure de vitesse matérielle effectuée au cours de l'essai. De plus, une série d'essais avec plaques impactrices ondulées a permis de vérifier que le temps de montée sur alumine F99.7 était augmenté de presque $1 \mu\text{s}$. Ce changement est beaucoup moins marqué sur les essais sur Forceram® due à l'allure particulière de la courbe de vitesse matérielle obtenues lors des essais d'impact plan.

Par la suite, une configuration permettant de réaliser une analyse Lagrangienne a été mise en œuvre sur les deux matériaux. Concernant l'alumine F99.7 une première configuration a permis d'obtenir la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale du matériau. L'allure de la courbe montre une transition peu marquée entre le domaine élastique et plastique. Cette allure est similaire à celle qui peut être observée dans la littérature concernant d'autres aluminés telle que l'alumine A98. Une configuration dite « inversée » a également été testée afin d'observer si une analyse lagrangienne était possible avec un buffer ondulé et un impacteur plan. Le résultat a été concluant et une LEH de $7,4 \text{ GPa}$ a pu être déduite de cet essai. Cette valeur est proche des $7,5 \text{ GPa}$ obtenue pour l'alumine A98. Une analyse Lagrangienne a également été mise au point sur Forceram® SSD afin de déterminer la LEH du matériau. Une LEH de $6,2 \text{ GPa}$ a été obtenue. Si cette valeur peut sembler un peu faible pour un SiC, cela peut être dû au fait que la microstructure est poreuse et contient des inclusions. Ce résultat explique le comportement particulier qui a été remarqué lors des essais d'impact de plaques plan. D'autre part le fait qu'un autre Forceram®, le STD, présente un comportement similaire malgré une porosité différente dans le plan

médian du carreau (parting line) semble indiqué que c'est la microstructure plus que les porosités en son sein qui est responsable de cette réponse particulière du matériau.

Par la suite, des essais avec mesure de contrainte par jauge ont été mis en place. Les jauges utilisées ont pu être installées entre deux plaques de céramiques afin de mesurer la contrainte axiale ou radiale. Ces données sont complémentaires des mesures de vitesse matérielle en face arrière. Pour ce faire, un circuit électrique a été développé en utilisant un pont de Wheatstone. Un premier test de vérification effectué sur acier 316L instrumenté avec une jauge de pression et une mesure de vitesse matérielle en face arrière, a permis d'obtenir une valeur de LEH pour l'acier 316L de 1,6 GPa.

Ultérieurement, des tests ont été effectués sur alumine F99.7. Un premier test a permis de combiner une mesure de contrainte axiale avec jauge de contrainte et une mesure de vitesse matérielle. Au cours de ce test, un palier de LEH de 8,5 GPa a été trouvé avec la mesure de vitesse matérielle contre 6,9 GPa pour la mesure de contrainte par jauge. Un des autres intérêts des essais avec jauge est la mise en place de jauges permettant de mesurer la contrainte radiale au sein du matériau. Une seconde configuration permettant de déterminer cette contrainte tout en mesurant la contrainte axiale en face arrière a été mise en place. Au cours de cet essai, la LEH relevée par mesure de vitesse matérielle a été de 7,4 GPa. La mesure de contrainte radiale montre un plateau aux alentours de 4,0 GPa.

Afin de pouvoir vérifier la cohérence des différentes mesures expérimentales obtenues, deux modèles de comportement ont été calibrés pour les deux céramiques d'études, l'alumine F99.7 et le Forceram®. Ces modèles sont le modèle JH2 et un modèle élasto-plastique avec écrouissage. Les LEH identifiées par analyse Lagrangienne ont été prises en compte. Afin de compléter la calibration des modèles, une approche inverse a été effectuées en s'appuyant sur 2 essais avec impacteur plan et ondulé effectués sur F99.7 et sur Forceram®. Pour ce faire, le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus a été mis en œuvre.

Le profil de vitesse matérielle en face arrière numérique a été comparé au profil expérimental pour les différents essais. L'identification du modèle de comportement a été faite en faisant varier le coefficient décrivant la sensibilité à la pression du comportement du matériau intact dans le cas du modèle JH2. Néanmoins, dans le cas de l'alumine F99.7, il est observé que le modèle JH2 n'était pas le modèle le plus adapté pour modéliser des essais d'impact de plaques. En effet, le modèle EP donne des profils de vitesse se rapprochant davantage des données expérimentales en particulier avec un coefficient d'écrouissage de $n=0,215$. Concernant le Forceram®, aucun des deux modèles étudiés n'a permis de modéliser de manière satisfaisante le comportement du matériau. Cela est probablement dû à sa microstructure particulière.

Par la suite, la cohérence des résultats expérimentaux obtenus par analyse lagrangienne et par mesure de jauge a été vérifiée à l'aide de simulations numériques. Les modèles de comportement du F99.7 identifiés au préalable, le JH2 avec $n=0,6$ et l'EP avec $n=0,215$ ont été utilisés. L'analyse Lagrangienne a été effectuée à partir de

signaux de vitesse matérielle en face arrière relevées sur la simulation numérique. Les résultats obtenus étaient cohérents avec ceux expérimentaux.

D'autres essais réalisés en configuration lagrangienne et avec mesure de jauge ont été simulés afin de vérifier la cohérence entre les résultats expérimentaux et les prévisions numériques. De plus, une analyse Lagrangienne a été effectuée à partir de signaux de vitesse matérielle en face arrière relevés dans la simulation numérique. Le résultat obtenu était cohérent avec celui expérimental. Les deux essais avec jauges sur alumine F99.7 ont également été simulés et un écart plus important a été noté entre profils expérimentaux et profils numériques. Toutefois, les simulations numériques ont permis de confirmer l'ordre de grandeur des résultats obtenus avec jauge. La contrainte radiale mesurée avec jauge de 4,0 GPa s'est révélée cohérente avec les prévisions numériques de l'essai qui donnaient des valeurs entre 4,3 GPa et 5,0 GPa.

Pour conclure, la thèse a permis la mise en place de plusieurs configurations expérimentales. Dans un premier temps les configurations permettant d'effectuer une analyse Lagrangienne. Ces dernières ne sont pas aisées, le moindre bruit sur les signaux relevés de vitesse en face arrière peuvent fausser l'analyse. En effet, ces analyses requièrent des signaux « parfaits ». L'amélioration de ces signaux passe par la rectification de la géométrie des plaques impactrices notamment par la mise en place de techniques d'impressions 3D. Une des perspectives futures est l'utilisation des géométries étudiées au cours de cette thèse au sein d'essais d'impact de plaques permettant l'analyse Lagrangienne. Comme cela a été observée, une modification de la géométrie du buffer peut également être intéressante et constitue une des voies possibles d'amélioration des essais.

Des configurations avec jauges de pression couplées à des mesures vélocimétriques ont également été mises en place. La difficulté de cette configuration repose sur la mise en place des jauges au sein du montage expérimental afin de pouvoir mesurer la contrainte orthoradiale à la jauge. La configuration validée, la mise en place de ces essais adaptés à d'autres matériaux, ainsi que la mise en place d'essais avec matériaux fenêtres constituent une perspective d'étude.

Pour finir, l'implémentation de modèles de comportement a eu lieu afin de modéliser les configurations expérimentales développées au cours de la thèse. Deux modèles de comportement ont été testés, le modèle JH2 et le modèle elasto-plastique avec écrouissage. Ces modèles peuvent être améliorés dans le cas des simulations de l'alumine F99.7. En effet, une équation d'état de type Mie-Grüneisen peut être ajoutée afin d'affiner la modélisation. Cette dernière doit cependant être adaptée afin de tenir en compte de la LEH du matériau. Concernant la modélisation du Forceram, ou de toutes autres céramiques inhomogènes, l'utilisation d'un logiciel permettant d'attribuer des propriétés physiques et mécaniques différentes à chaque sous-ensemble matériau peut être implémenté.

D'autres perspectives sont ouvertes à l'issue de ces travaux de thèse. Un premier essai combinant la configuration permettant de réaliser une analyse Lagrangienne avec une

mesure de jauge radiale a été réalisé sur acier. Si cet essai n'a pas été concluant, ce genre de configuration pourrait être appliqué à des céramiques. D'autre part, d'autres essais permettraient de compléter l'analyse développée au cours de cette thèse. Dans un premier temps, des essais triaxiaux permettraient d'améliorer la modélisation notamment en régime quasi-statique. Enfin une étude des phénomènes de micro-plasticité suite aux essais d'impact de plaques pourrait être intéressante. Cette étude requiert la mise en place d'un sarcophage permettant à la céramique impactée de garder sa cohérence après impact. Par la suite, des analyses par micro-tomographie et par microscopie en transmission permettraient d'observer ces phénomènes.

Tables

Table des figures

Figure 1-1 : VLP de blindages monolithiques et bi-couche, (Forquin, 2003) _____	8
Figure 1-2 : Comparaison des différentes céramiques utilisées pour des applications de type blindage (Rossiquet, 2012) _____	8
Figure 1-3 : Plaques céramiques en SiC Hexoloy pour protection personnelle et blindage de char (a) ainsi que la mise en place de plaques similaires sur char (b) (QinetiQ). Pour finir siège d'hélicoptère composé de B4C et Kevlar (c) (Gooch, 2011)	9
Figure 1-4 : Les différentes phases de chargement d'un impact balistique et leurs temps caractéristiques (Forquin, 2003) _____	10
Figure 1-5 : Schéma de la configuration d'essai DOP (Rosenberg, 2015) afin d'établir la performance balistique d'une céramique _____	10
Figure 1-6 : Microstructure de l'alumine F99.7 observée via un microscope MEB, (Wallstabe, 2011) _____	12
Figure 1-7 : Images en microscopie électronique à balayage de grain d'alumine F99.7 après fracture observé avec EHT (énergie de treshold) de 3.0 kV sous grandissement 1500 (a) et 3000 (b). _____	13
Figure 1-8 : Microstructure d'Hexoloy® SA observée par MEB (Martin, 2004) _____	14
Figure 1-9 : Tranches et reconstructions 3D d'un échantillon d'Hexoloy® SA analysé par microtomographie (Dargaud, 2020) _____	15
Figure 1-10 : Image MEB de Forceram® SSD sous quatre différentes optiques via BSE (backscattered électrons) et SE (scanning électrons) pour observer le contraste chimique _____	16
Figure 1-11 : Tranches d'un morceaux de Forceram® SSD sous tomographie (Dargaud, 2020) _____	16
Figure 2-1 : Jonction entre les joints de grains et les macles (Lankford, 1989) _____	20
Figure 2-2 : : Géométrie utilisée par (Forquin, 2003) et isocontours associés aux 3 ^{ème} et 1 ^{ère} contraintes principales _____	21
Figure 2-3 : Résultats obtenus par Heard et Cline (1980) à l'aide d'essai triaxiaux sur un échantillon de BeO sous des pressions de confinement allant de 0 à 1 GPa _____	22
Figure 2-4 : Comportement d'une céramique SiC soumise à un essai triaxial selon (Brannon, Lee, 2005) _____	22
Figure 2-5 : Schématisation des configurations permettant un état de contrainte biaxiale lors d'essais par barres de Hopkinson (Farbaniec, 2017) _____	24
Figure 2-6 : Schématisation des expérimentations d'expansion sphérique divergente de (Malaise, 1997) _____	24
Figure 2-7 : Signal typique de vitesse de la surface arrière du matériau d'étude lors d'un essai d'impact de plaques _____	26
Figure 2-8 : Photo des jauges utilisée par Bosca et al., 1981 lors de ses essais et schématisation du circuit en pont de Wheatstone utilisé _____	28
Figure 2-9 : Schématisation de la configuration expérimentale utilisé par Bourne pour ces essais d'impact de plaques avec jauges de pression _____	28
Figure 2-10 : Résultats de mesures de jauges de contraintes obtenus par (Bourne et al. 1995) au cours d'essais d'impact de plaques sur SiC. _____	29

Figure 2-11 : Schématisation de la configuration d'essais d'impact de plaques inclinées _____	29
Figure 2-12 : Chemin de compression thermodynamique à l'intérieur d'un échantillon de géo-matériau dans le cadre de compression dynamique par laser, avec (a) et sans choc (b) (Duffy, 2019) _____	30
Figure 2-13 : Schématisation des essais de Hall et résultats de mesures de vitesse en face arrière obtenus _____	31
Figure 2-14 : Plaque impactrice utilisée par Taylor et résultats expérimentaux obtenus _____	31
Figure 2-15 : Plaque impactrice utilisée par Cotton et résultats expérimentaux obtenus _____	32
Figure 2-16 : Proposition de configuration permettant de réaliser une analyse lagrangienne à partir d'essais d'impact de plaques sans choc _____	32
Figure 2-17 : Schématisation du procédé GEPI _____	33
Figure 2-18 : Schématisation de la configuration d'analyse Lagrangienne obtenue par essai GEPI _____	34
Figure 2-19 : Illustration de la technique d'analyse lagrangienne (Zinzner, 2012) _	35
Figure 2-20 : Dispositif de confinement utilisé pour maintenir les échantillons d'alumine durant des essais balistiques. (Horsfall et al., 2010) _____	36
Figure 2-21 : Image obtenue par microscopie électronique par transmission de dislocation au sein d'une alumine _____	36
Figure 2-22 : Image obtenue par microscopie électronique à transmission de mécanismes glissement au sein d'une céramique (Lankford et al. 1998) _____	37
Figure 2-23 : Images obtenue au MEB de Microcracking (Huang et al. 2022) _____	37
Figure 2-24 : Schématisation du modèle de comportement JH1 _____	38
Figure 2-25 : Schématisation du modèle de comportement JHB sans changement de phase (a) et avec changement de phase (b) (Johnson et Holmquist, 2003) _____	39
Figure 2-26 : Schématisation du modèle de comportement JH2 _____	42
Figure 2-27 : Configuration expérimentale et résultats obtenus lors de la comparaison des modèles de Holmquist pour simuler un impact de plaques su SiC (Ibne Islam, 2020) _____	43
Figure 3-1 : Technique expérimentale basée sur une plaque impactrice usinée ondulée qui permet un adoucissement du front montant du pulse permettant d'effectuer une analyse lagrangienne _____	45
Figure 3-2 : Schématisation du lanceur à gaz présent au sein du laboratoire 3SR (plateforme ExperDYN) _____	46
Figure 3-3 : Photos du lanceur à gaz multicalibre de la plateforme ExperDYN _____	46
Figure 3-4 : Ensemble sabot/plaque impactrice fixé à la vanne rapide _____	47
Figure 3-5 : Mise en place de la cible au sein de la chambre secondaire face à la sortie du tube de lancement _____	47
Figure 3-6 : Schématisation du montage pour effectuer des mesures PDV à l'arrière de l'échantillon _____	48
Figure 3-7 : Courbe typique de vitesse matérielle obtenue lors d'un essai d'impact de plaques sur acier avec changement de phase _____	49
Figure 3-8 : Courbes de vitesse de surface libre obtenues lors des différents essais (Doubax, 1992) _____	50
Figure 3-9 : Schéma illustrant l'obtention du changement de pente sur la mesure de vitesse en face arrière via la méthode de B&H _____	50

Figure 3-10 : Schéma illustrant l'obtention du changement de pente sur la mesure de vitesse en face arrière via la méthode de Grady _____	51
Figure 3-11 : Tableau récapitulatif des différentes techniques de fabrication additives pour acier _____	52
Figure 3-12 : Présentation de la technique de fabrication additive par fusion sur lit de poudre _____	52
Figure 3-13 : Présentation de la technique de fabrication additive par jet de liant ____	53
Figure 3-14 : Présentation de la technique d'impression FDM _____	54
Figure 3-15 : Observation au MEB d'acier 316L produit par FDM(a) et SLM(b) ____	54
Figure 3-16 : Acier 316L produit par SLM avant (b) et après traitement thermique (Gray, 2015) _____	55
Figure 3-17 : Comparaison des mesures de vitesse en face arrière obtenue pour des essais miroirs avec deux types d'acier _____	56
Figure 3-18 : Etat avant et après le test d'impact de plaques de l'ensemble cible (gauche), du support en aluminium et du projectile (droite) incluant la plaque impactrice et le sabot _____	57
Figure 3-19 : Géométrie des plaques impactrices ondulées et schéma d'une demi-période de largeur (a) égale à 2 mm, de hauteur d'ondulation (h) de 0,5 mm et caractérisée par un rayon de courbure (r) de 2,125 mm et une épaisseur totale (L) égale à 5 mm. _____	58
Figure 3-20 : Modélisation de la configuration considérée pour analyse lagrangienne _____	60
Figure 3-21 : Schématisation des différents blocs solides pour le dimensionnement des impacts de plaque. L'étoile rouge correspond au point de mesure des contraintes et déformations, les losanges verts correspondent aux mesures de vitesse en face arrière _____	61
Figure 3-22 : Mesure de vitesse en face arrière obtenue par simulation numérique pour différentes configurations avec différentes tailles de buffer _____	62
Figure 3-23 : Champ de contraintes axiales observé par simulation numérique avec un buffer de 3mm _____	62
Figure 3-24 : Champ des contraintes axiales dans la cible à différents instants : 0,3 μ s (a), 1,5 μ s (b), 2,1 μ s (c), 3,2 μ s (d). L'onde de compression est représentée en bleu, le rouge correspond à la contrainte nulle. _____	63
Figure 3-25 : Contraintes axiales au sein de la céramique pour différentes épaisseurs de buffer _____	64
Figure 3-26 : Contrainte axiale et déformation plastique en fonction du matériau fenêtre utilisé au centre de la céramique issue de la modélisation _____	65
Figure 3-27 : Schéma des différents essais de mise en place pour permettre l'analyse Lagrangienne sur céramique. Essais « A1 » (a), « A2 » (b) et « A3 » (c). _____	66
Figure 3-28 : Schéma des différents essais de mise en place pour permettre l'analyse Lagrangienne sur 316L. Essais « A3 » (a) et « A5 » (b). _____	66
Figure 3-29 : Schéma de l'essai pour l'analyse Lagrangienne sur 316L _____	67
Figure 3-30 : Comparaison des essais A1 et A2 pratiqués avec plaque impactrice plane ou ondulée en acier 316L sur une cible en acier 316L _____	68
Figure 3-31 : Comparaison des tests A1 et A3 pour observer l'influence de la colle sur le montage _____	68
Figure 3-32 : Tests A4 et A5 réalisés avec impacteur plan et ondulé sur une cible constituée d'un buffer et d'un échantillon de 316L _____	69

Figure 3-33 : Comparaison entre résultat expérimental du test « A5 » et sa modélisation numérique	70
Figure 3-34 : Vitesse en face arrière mesurée sur les deux échantillons d'acier d'épaisseurs différentes permettant une analyse Lagrangienne de l'essai.	71
Figure 3-35 : Résultat de l'analyse Lagrangienne effectuée sur acier 316L à partir d'un essai d'impact de plaques sans choc	71
Figure 3-36 : Modèle utilisé sur Abaqus en considérant les conditions de symétrie	73
Figure 3-37 : Variations des différents paramètres géométriques des plaques impactrices	73
Tableau 3-6 et Figure 3-38: Résultats de simulations numériques réalisées en considérant différentes géométries de plaque impactrice pouvant être produite par fabrication additive	74
Figure 3-39 : Observation de plan de porosités au sein d'un échantillon d'acier de 5mm imprimé par technique SLM, ultrafuse.	75
Figure 3-40 : Observation d'une pièce imprimée par DMLS	75
Figure 3-41 : Mesure en face arrière obtenue lors d'essais d'impact de plaques pour une même géométrie avec différents types de fabrication additive	76
Figure 3-42 : Géométrie 34 imprimée en 3D et observée au microtomographe échelle 10mm (a) et 1mm(b) et modèle CAO d'une période (c)	77
Figure 3-43 : Mesure en face arrière obtenue lors d'essais d'impact de plaques pour une même technique de fabrication additive avec différentes géométries	77
Figure 3-44 : Schéma de l'implémentation de nouvelles courbes au sein d'une simulation pour vérifier s'il est possible de réaliser une analyse Lagrangienne	78
Figure 3-45 : Résultats de 2 analyses Lagrangiennes réalisées à partir des vitesses en face arrière mesurées dans des simulations numériques utilisant le chargement expérimental des essais d'impact réalisés avec les plaques impactrices de géométries 13 et 34	79
Figure 4-1 : Photographie du montage vu de profil obtenu pour réaliser une analyse Lagrangienne à partir d'un essai d'impact de plaques	81
Figure 4-2: Comparaison des essais F1 et F2, impact de plaques plan réalisé avec un impacteur en cuivre et une plaque impactrice plane en acier avec une fenêtre en saphir	82
Figure 4-3 : Comparaison des essais F2 et F3, impact plan réalisé avec un impacteur plan avec saphir (583 m/s) et une plaque impactrice ondulée en acier avec un saphir (603 m/s).	83
Figure 4-4 : Comparaison des essais F3 et F4, impact ondulé réalisé à une vitesse de 604 m.s ⁻¹ et un autre à une vitesse de 880 m.s ⁻¹	84
Figure 4-5 : Schématisation du montage d'impact de plaques pour analyse Lagrangienne	84
Figure 4-6 : Mesure de vitesse en face arrière des céramiques obtenues au cours de l'essai d'impact de plaques sur des céramiques de 6mm et 8mm d'épaisseurs	85
Figure 4-7 : Contraintes axiale en fonction de la déformation axiale obtenue suite à l'analyse Lagrangienne sur matériau F99.7	86
Figure 4-8 : Contrainte équivalente et contrainte radiale en fonction de la déformation axiale obtenu à partir d'analyse Lagrangienne sur essai issu d'impact de plaques sur alumine F99.7.	87
Figure 4-9 : Photographie du montage des cibles permettant une analyse lagrangienne suite à un montage inversé du buffer et la plaque impactrice	87

Figure 4-10 : Courbes de vitesse en face arrière relevées à l'interface entre le matériau fenêtre et les échantillons de F99.7 d'épaisseurs 6mm et 8mm dans le montage dit « inversé »	88
Figure 4-11 : Chemin de chargement obtenu suite à l'analyse Lagrangienne sur F99.7 en configuration inversée	88
Figure 4-12 : Configuration mise en œuvre dans un test GEPI pour pouvoir effectuer une analyse Lagrangienne	89
Figure 4-13 : Comparaison des mesures de vitesse en face arrière relevées pour deux alumines d'épaisseur différentes au cours d'essai GEPI	90
Figure 4-14: Résultats obtenus par essai GEPI (CEA-Gramat) pour une alumine A98 post-traitée par analyse Lagrangienne	90
Figure 4-15 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière de carreau de Forceram pour un impact plan C1 et sans choc C2	91
Figure 4-16 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière de carreau de Forceram pour un impact avec impacteur ondulé C2 et imprimé en 3D C3	92
Figure 4-17 : Microstructure de trois SiC produits par Saint-Gobain, l'Hexoloy® SA, le Forceram® SSD et le Forceram® STD	93
Figure 4-18 : Comparaison des mesures de vitesses en face arrière dans le cas d'un Forceram® SSD (essai « C1 ») d'un Hexoloy® (essai réalisé au CEA-Gramat) et d'un Forceram® STD soumis à un impact plan	93
Figure 4-19 : Comparaison des mesures de vitesses à l'interface Forceram/saphir pour un essai avec impacteur plan « C4 » avec impacteur ondulé C5	94
Figure 4-20 : rappel de la configuration pour essais d'impact de plaques permettant de réaliser une analyse Lagrangienne.	94
Figure 4-21 : Relevé des mesures de vitesse en face arrière des céramiques à travers saphir obtenu sur deux échantillons d'épaisseurs 7mm et 9mm lors d'essai d'impact de plaques à 800m/s	95
Figure 4-22 : Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale du Forceram® SSD obtenue après analyse Lagrangienne suite à un essai d'impact de plaques sans choc.	95
Figure 5-1 : Photographie de la jauge utilisée Vishay J2M-SS-110FB-048	97
Figure 5-2 : Schématisation du circuit pont de <i>Wheatstone</i> utilisé	98
Figure 5-3 : Photographie de la configuration expérimentale utilisée pour vérifier le facteur de jauge.	99
Figure 5-4 : Mesure des différents facteurs de jauges en fonction de la contrainte axiale appliquée sur la jauge	100
Figure 5-5 : Type de configurations mises en œuvre pour les essais avec jauge, la configuration axiale (a) et radiale (b). Les flèches rouges représentent les mesures par vélocimétrie homodyne et les parties violettes les mesures de jauge	100
Figure 5-6 : Photographie des cibles « J1 » (configuration axiale) et « J5 » avec saphir (configuration radiale) et de leur montage.	101
Figure 5-7 : J1- Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur 316L à 322m/s	103
Figure 5-8 : J3- Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur F99.7 à 623 m/s.	104

Figure 5-9 : : J5-Résultats des mesures de vitesses en face arrière (a) et des mesures par jauge manganin (b) obtenu lors d'un impact de plaques plane sur alumine F99.7 à 596m/s. _____	105
Figure 5-10 : Comparaison des essais en configuration radiale et axiale, et contrainte équivalente calculée résultant des deux essais. _____	107
Figure 6-1 : Schématisation du modèle de comportement JH2 _____	109
Figure 6-2 : Définition du modèle JH2 pour du B4C pour différentes valeurs de vitesse de déformation (Holmquist et Johnson, 2008) _____	110
Figure 6-3 : Schématisation de la modélisation de vérification d'implémentation des modèles de comportement, (Cronin et al., 2003) _____	113
Figure 6-4 : Vérification de l'implémentation du modèle JH2 sous Abaqus pour une alumine F99.7 et comparaison avec la courbe enveloppe du modèle JH2 (Formule 6.1) _____	113
Figure 6-5 : Représentation de la tranche modélisée lors des simulations numériques. _____	114
Figure 6-6 : Représentation du maillage utilisé pour modéliser les essais d'impact plan. La dimension des mailles est de 0.005mm par 0.002mm _____	114
Figure 6-7 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau alumine F99.7 vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai F2. _____	116
Figure 6-8 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau alumine F99.7 vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai F3. _____	116
Figure 6-9 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai F5. Vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps. _____	118
Figure 6-10 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai F5. Contrainte axiale en fonction de la déformation axiale. _____	118
Figure 6-11 : Position du point de mesure de la contrainte axiale dans la simulation numérique de l'essai J2 _____	119
Figure 6-12 : Position du point de mesure de la contrainte radiale dans la simulation numérique de l'essai J5 _____	119
Figure 6-13 : Simulation de l'essai JH2 et comparaison de vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps pour les modèles JH2 et EP _____	120
Figure 6-14 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai J2. Contrainte axiale en fonction du temps. _____	121
Figure 6-15: Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai 52. Vitesse matérielle relevée en face arrière en fonction du temps. _____	121
Figure 6-16 : Comparaison des modèles de comportement sur Alumine F99.7 JH2 et EP au cours d'une modélisation de l'essai J5. Contrainte radiale en fonction du temps. _____	122
Figure 6-17 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau du matériau Forceram® vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai « C4 ». _____	123
Figure 6-18 : Comparaison des différents modèles de comportements du matériau du matériau Forceram® vis-à-vis de la courbe expérimentale de l'essai C5. _____	124

Index des tableaux

Tableau 1-1 : Quelques propriétés mécaniques des alumines F99.7, A16-2 et T299 (Coscolluela, 1992)	13
Tableau 1-2: Propriétés mécaniques principales des SiC d'étude fournie par Saint-Gobain (Dargaud, 2020)	15
Tableau 3-1 : Liste des différents tests réalisés afin de trouver un acier sans changements de phase.	56
Tableau 3-2 : Paramètres J-C de l'acier 316L (Elkaseer et al., 2019)	59
Tableau 3-3 : Paramètres matériaux utilisés au sein des essais de dimensionnement	60
Tableau 3-4 : Propriétés du LiF, du PMMA et du Saphir utilisées dans les simulations numériques	64
Tableau 3-5 : Résumé des différents essais effectués sur aciers 316 L	67
Tableau 3-6 et Figure 3-38: Résultats de simulations numériques réalisées en considérant différentes géométries de plaque impactrice pouvant être produite par fabrication additive	74
Tableau 3-7 : Résultats des différents essais d'impact de plaques obtenus avec des plaques impactrices obtenues par fabrication additives	78
Tableau 4-1: Liste non exhaustive des différents essais d'impact effectués sur Alumine F99.7	82
Tableau 4-2 : Comparaison des propriétés des alumine A98 et F99.7	89
Tableau 4-3: Liste non exhaustives des essais effectués sur Forceram par impact de plaques	91
Tableau 5-1 : Tables des différents essais effectués au cours des tests avec jauges de pression sur acier et alumine F99.7	102
Tableau 5-2 : Photographies des cibles de l'essai J1, test avec jauge et mesure de vitesse en face arrière avant l'essai (a) et après l'essai (b)	102
Tableau 5-3 : Calcul des contraintes radiales et équivalentes suite aux différents essais d'impact de plaques.	106
Tableau 6-1 : Présentation des différentes paramètres utilisés pour modéliser l'alumine F99.7 au cours des différentes simulations numériques du présent chapitre.	112
Tableau 6-2 : Paramètre de l'acier 316L (Elkaseer et al., 2019) utilisés lors des modélisations d'essais	115
Tableau 6-3 : Récapitulatifs des différentes valeurs testées afin d'identifier chaque modèle de comportement par approche inverse pour Alumine F99.7	115
Tableau 6-4 : Récapitulatif des essais expérimentaux réalisés sur F99.7 étudiés au cours de ce chapitre	117
Tableau 6-5 : Présentation des différentes valeurs utilisées pour modéliser du SiC Forceram® SSD au cours des différentes simulations numériques du chapitre.	123

Annexes

Annexe A : Utilisation des mesures par Vélométrie homodyne (Barbier, 2017)

Le centre CEA Gramat utilise pour ses mesures de vitesses dynamiques, notamment au niveau de la machine GEPI, des interféromètres fibrés. Ces derniers sont appelés IDF pour interféromètres Doppler Fibrés. Ces interféromètres ont une configuration de type Michelson semblable à ce qui peut être trouvé dans les systèmes de mesures PDV.

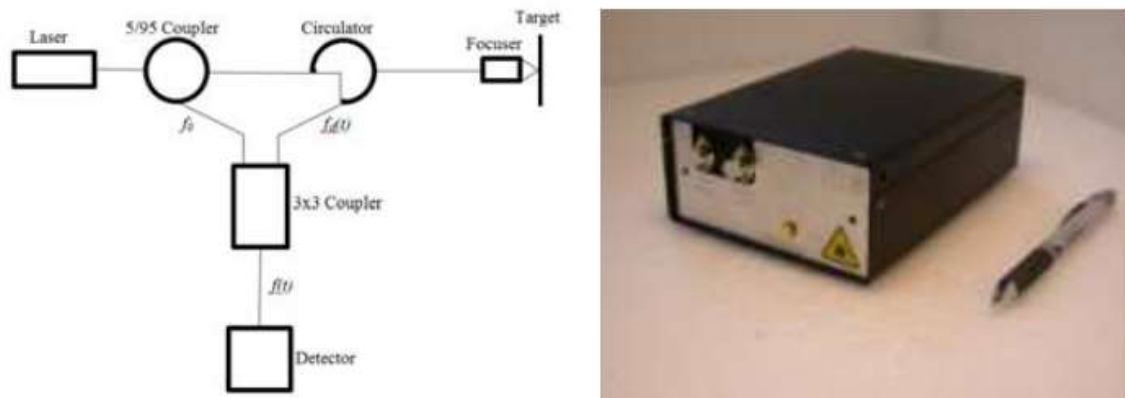


Figure A-1 : Principe de fonctionnement de mesure par vélocimétrie homodyne

Un faisceau laser, nommé f_0 sur la Figure A-1 est pointé vers la surface dont on souhaite mesurer la vitesse. Par effet Doppler, l'onde réfléchie contre cette surface en mouvement présente une variation temporelle de sa fréquence $f(t)$ qui est directement corrélée à la vitesse de la cible par l'équation suivante :

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} \times f(t) = \frac{\lambda}{2} \times (f_D(t) - f_0) \quad \text{A-1}$$

où $v(t)$ est la vitesse de la surface cible, λ la longueur d'onde du laser qui est fixée à 1550nm dans le cas du laser utilisé au sein du laboratoire 3SR, $f_D(t)$ la fréquence Doppler.

Afin de connaître la vitesse de la cible il suffit ainsi de connaître $f_D(t)$. Deux photo-détecteurs vont mesurer l'intensité lumineuse en sortie de l'interféromètre. Cette intensité lumineuse peut être directement lié à la variation temporelle de la fréquence d'onde par la formule suivante :

$$i(t) = i_0(t) + i_d(t) + 2\sqrt{i_0(t) \times i_d(t)} \times \cos(2\pi \int_0^t (f_D(t) - f_0) dt + \varphi_0) \quad \text{A-2}$$

Où $i_0(t)$ est l'intensité du signal lumineux de la branche de référence, $i_d(t)$ l'intensité résultante suite à la réflexion contre la surface cible, φ_0 le déphasage entre les deux signaux évoqués.

Annexe B : Propriétés de l'acier 316L

L'acier 316L est un acier austénitique inoxydable. Sa structure cristalline cubique face centrée lui confère entre autres une excellente dureté (222 HV). Il possède la composition suivante :

C	Mn	Si	Cr	Co	Ni	Mo	Fe
0.03	0.95	0.5	15.7	0.19	10	2.2	Balance

Tableau B-1 : Composition de l'acier 316L (Elkaseer et al., 2019)

Il peut être défini par les propriétés physiques suivantes :

Grade	Densité [kg/m ³]	E [GPa]	ν	Résistance à la traction [MPa]	Limite d'élasticité 0.2% [MPa]
316L	8000	193	0.3	515	205

Tableau B-2 : Propriétés de l'acier usiné 316L (Elkaseer et al., 2019)

Cet acier peut également être usiné par fabrication additive. Les différences microstructurales observées sur les matériaux imprimés en 3D affectent un certain nombre de propriétés. Ainsi, le travail sur le procédé LENS et des essais dynamiques avec barres d'Hopkinson a montré que, malgré un comportement similaire de l'acier 316L imprimé en 3D vis-à-vis de sa contrepartie usinée, une légère différence a été observée au sein du module d'Young et de la dureté. Ainsi, une dureté de 11 HRC a été trouvée en moyenne pour l'acier 316L obtenue par fabrication additive contre 16 HRC pour de l'acier manufacturé. D'autre part, le module d'Young obtenu était également plus faible aux alentours de 174 GPa. (Bevan et al., 2017)

Par ailleurs d'autres auteurs ont montré que le sens d'impressions 3D de l'acier exerçait également une influence sur ses propriétés du fait de l'anisotropie du matériau résultant (Charmi et al., 2021) (Smith et al., 2018).

Velocity	Sample	Density [g cm ⁻³]	Yield stress [MPa]	Strain at yield [%]	Strain rate [s ⁻¹]
(177 ± 3) m s ⁻¹	AM-V	7.34 ± 0.03	518	0.21	6.45 x 10 ²
	AM-H	7.30 ± 0.04	583	0.24	7.73 x 10 ²
	CM	7.42 ± 0.01	440	0.18	6.02 x 10 ²
(243 ± 3) m s ⁻¹	AM-V	7.34 ± 0.03	531	0.22	6.65 x 10 ²
	AM-H	7.30 ± 0.04	592	0.25	7.51 x 10 ²
	CM	7.42 ± 0.01	412	0.17	5.55 x 10 ²

Tableau B-3 : Valeurs obtenus par test de Taylor sur trois échantillons d'aciers, usinés « CM » et obtenus par fabrication additive selon deux directions d'impression différentes et orthoradiales, V et H (Smith et al., 2018).

Annexe C : Programme d'analyse Lagrangienne

Sous MatLab

```
clear all
close all
[FileName,PathName] = uigetfile('*.txt','sélectionnez le
fichier texte');
fid=fopen(fullfile(PathName,FileName),'rt');

%Prendre le fichier sous forme de matrice. Le fichier doit
posséder dans cette ordre les données : t pour plaque fine, v2
plaques fines, t plaque plus épaisse, v2 plaque plus épaisse

fich=fscanf(fid,'%f',[4,inf]);
t6=fich(1,:);
V6=fich(2,:);
t8=fich(3,:);
V8=fich(4,:);

fclose(fid);

%Definition de i, Vmax et N. N peut être changé pour avoir une
courbe plus ou moins précise
%mettre les propriétés
%Hexoloy
%rho=3145;
%E=410000000000;
%v=0.14;
%F99
N=300;
rho=3880;
E=380000000000;
v=0.22;

Vmax=max(V8);
Nmax=size(V8);
Vi=1:N;
Vi=Vi.*Vmax/N;
Cl=(E/rho/(1-v)*(1+v)*(1-2*v)).^0.5;

%Si pas de matériau fenêtre=LiF

Zlif6= 2640*(5150+1.35.*V6);
Zlif8= 2640*(5150+1.35.*V8);

%Si pas de matériau fenêtre
%Zlif6=0;
%Zlif8=0;

Zech=rho*Cl;

%différence entre les 2 épaisseurs
c=0.002;
```

```
Dt=1:N;
V8rect=1:Nmax;
V6rect=1:Nmax;

%initiation pour avoir Cli[0]
V8rect=((Zech+Zlif8)/(2*Zech)).*V8;
V6rect=((Zech+Zlif6)/(2*Zech)).*V6;

ti6=1:N;
ti8=1:N;

%test acier

[t6,ind1] = unique(t6);
[t8,ind2] = unique(t8);
[V6,ind3] = unique(V6);
[V8,ind4] = unique(V8);

%Si LiF
ti6=interp1(V6rect,t6,Vi);
ti8=interp1(V8rect,t8,Vi);

%ti6=interp1(V6 ,t6 ,Vi);
%ti8=interp1(V8 ,t8 ,Vi);

Dt=ti8-ti6;
Cli=c./Dt;

%Calcul de dV, dSigma,depsilon
Dv=zeros(N);
for n=1:99
    Dv(n)=Vi(n+1)-Vi(n);
end

%N
DS=zeros(N);
DE=zeros(N);

for n=1:99
    DS(n)=-rho*Cli(n+1).*Dv(n);
    DE(n)=-Dv(n)/Cli(n+1);
end

%Par la suite, calcul de Sigma et epsilon
S=0:99;
E=0:99;

for n=1:99
    S(n+1)=S(n)+DS(n);
    E(n+1)=E(n)+DE(n);
end
```

Annexe D : Géométries d'impacteurs utilisées

Le résumé des différentes géométries peut être observé au sein du Tableau D-1.

Géométrie	h	c	L	Temps de montée (μs)
GEO2	0.5	1	5	0,64
8	1	2	5	1,02
12	1	2	5	0,96
13	2	2	5	1,5
15	2	1	5	1,44
23	2	0,5	0,5	1,5
24	2	0,5/1	5	1,5
25	1	0,5	5	0,92
26	0,5	0,5	5	0,72
27	3	1	5	1,89
29	1	4	5	1,05
34	3	2	5	2
35	1	1	5	0.97

Tableau D-1 : Résumé des différentes géométries utilisées lors des simulations de plaques impactrices imprimées en 3D.

Les différentes géométries sont obtenues en ne prenant en compte que la tranche d'une plaque impactrice.

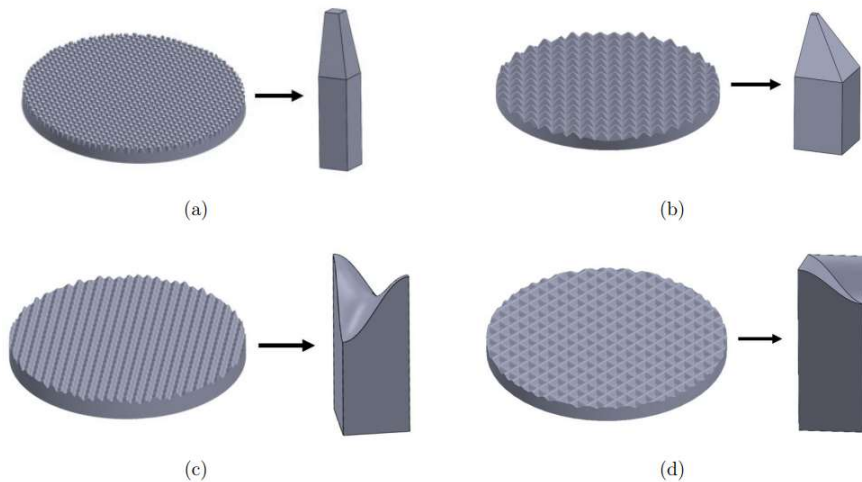

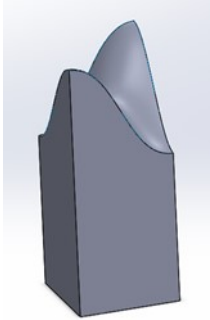


Figure D-1 : Modélisation 3D de plaques impactrices ondulées

Pour chacune des géométries modélisées, la hauteur du motif est appelée h , la période ou coté du motif est appelé c et l'épaisseur totale est notée L .

<i>Géométrie</i>		h [mm]	$c1$ [mm]	$c2$ [mm]	L [mm]
<i>Ondulée</i>		0,5			5
13		2	2	2	5
12		1	2	2	5
15		2	1	1	5

23



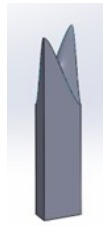
2

0,5

0,5

5

24



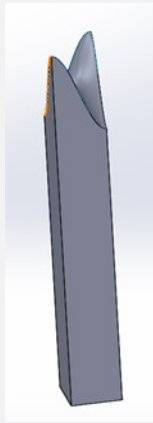
2

0,5

1

5

25



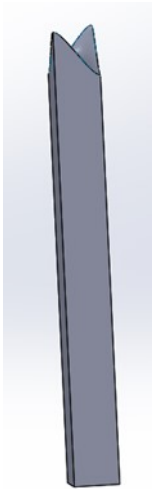
1

0,5

0,5

5

26



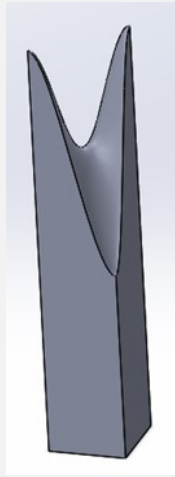
0,5

0,5

0,5

5

27



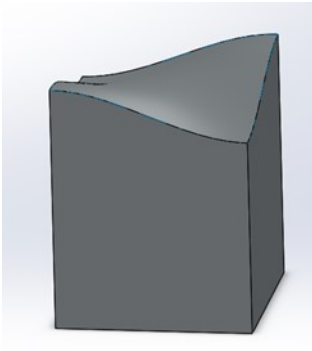
3

1

1

5

29



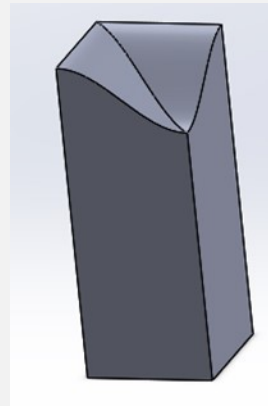
1

4

4

5

8



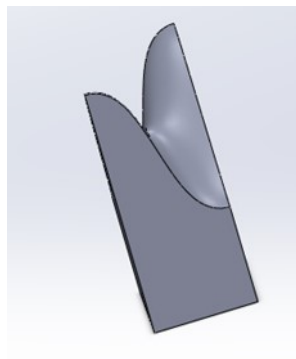
1

2

2

5

34



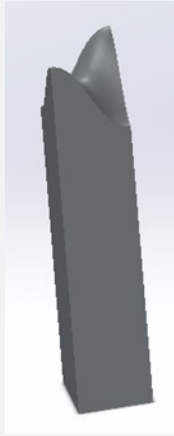
3

2

2

5

35



1

1

1

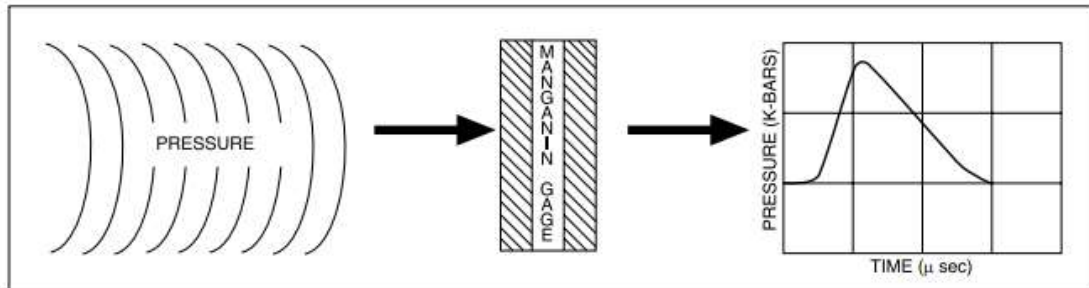
5

Annexe E : Jauges de pression utilisées



Manganin Patterns

Special Use Sensors – Manganin Pressure Sensor



FOR HIGH-PRESSURE MEASUREMENTS
SHOCK WAVE PROPAGATION • BLAST EFFECT • EXPLOSIVE-FORMING STUDIES
HIGH HYDROSTATIC PRESSURES

Manganin is a copper-manganese-nickel alloy with a low strain sensitivity, but a relatively high sensitivity to hydrostatic pressure. Resistance change as a function of applied pressure is linear to extremely high pressures. This characteristic has been utilized in the construction of high-range fluid pressure cells using manganin wire for many years.

Manganin gages are used extensively in high-pressure shock wave studies ranging from 1 to over 400 kilobars (1 bar = 14.5 psi = 100 000 N/m²). In conventional applications, the gage is bonded between two flat metallic or polymer plates.

Micro-Measurements offers a large selection of gages for shock wave studies, manufactured from specially treated shunt stock manganin foil. The ultrathin construction offers several advantages over the wire type, including:

- Improved repeatability from gage to gage, due to precisely defined grids manufactured from the same lot of foil.
- Faster response times (nanosecond rise times have been recorded).
- Smaller, high resistance grids.
- Minimal distortion of the pressure wave when mounted in high-modulus materials.

TECHNICAL INFORMATION

Nominal pressure sensitivity of Micro-Measurements manganin foil gages is 0.27% per kilobar (0.0027 ohm/ohm/kb). Long signal transmission cables, low signal levels, and high electrical noise complicate

the measurement. Most of these gages are designed for impedance matching to 50-ohm coaxial cable. The 210AW pattern illustrated has been used with excitation currents exceeding 6 amperes for periods to 100 microseconds.

The 580SF pattern was designed specifically for investigating the effects of sweeping explosive waves. With the target intentionally tilted at a small angle to the wave front, the pressure wave traverses the grid in the direction toward the leads.

Micro-Measurements manufactures manganin foil gages in several backing materials. The backing material is normally selected to minimize the mechanical impedance mismatch within the target.

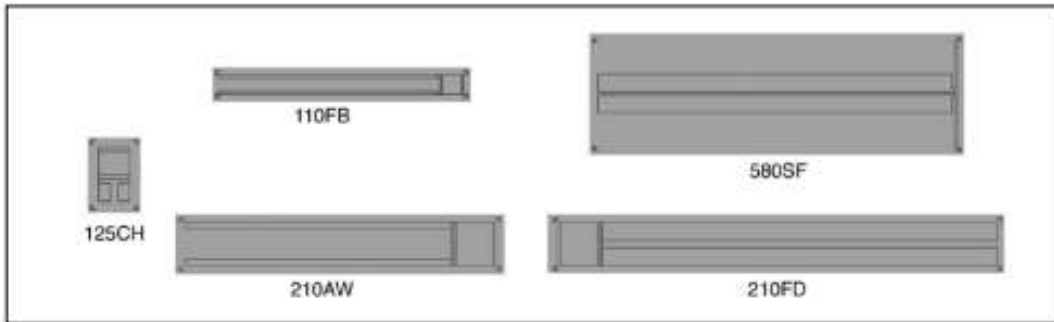
L backing is a glass-fiber-reinforced epoxy-phenolic approx. 0.002 in (0.050 mm) thick. Although commonly used in the 1- to 15-kilobar range, its usefulness is not limited to this extent. The backing is ideal for use in quartz-phenolic transducers since it does not present a significant impedance discontinuity. L-backed gages may be used in high-mechanical-impedance materials with the understanding that rise-time limitations may exist due to an impedance mismatch between the sensor and the test material. An encapsulated version (Option SP60), with only the tab ends exposed for soldering, is available.


N2 backing is nominally 0.0008 in (0.020 mm) thick polyimide film. This backing is rugged, highly flexible, and easy to handle. It is suited to very-low-kilobar pressure ranges.

J2 backing is an encapsulated version of the N2, with the ends of the tabs exposed.

Manganin Patterns

Special Use Sensors—Manganin Pressure Sensor



GAGE DESIGNATION	 RoHS COMPLIANT	FOIL THICKNESS	DIMENSIONS				inch millimeter	
			OVERALL PATTERN		ACTIVE GRID		TAB LENGTH	
			Length	Width	Length	Width		
LM-SS-110FB-048 LM-SS-110FB-048/SP60 N2M-SS-110FB-048 J2M-SS-110FB-048		0.0002	1.380	0.125	0.110	0.125	1.240	
		0.005	35.05	3.18	2.79	3.18	31.49	
LM-SS-125CH-048 LM-SS-125CH-048/SP60 N2M-SS-125CH-048 J2M-SS-125CH-048		0.0002	0.290	0.175	0.125	0.175	0.100	
		0.005	7.37	4.45	3.18	4.45	2.54	
LM-SS-210AW-048 LM-SS-210AW-048/SP60 N2M-SS-210AW-048 J2M-SS-210AW-048		0.0005	1.750	0.250	0.210	0.250	1.500	
		0.013	44.45	6.35	5.33	6.35	38.10	
LM-SS-210FD-050 LM-SS-210FD-050/SP60 N2M-SS-210FD-050 J2M-SS-210FD-050		0.0005	2.500	0.250	0.210	0.250	2.250	
		0.013	63.50	6.35	5.33	6.35	57.15	
LM-SS-580SF-025 LM-SS-580SF-025/SP60 N2M-SS-580SF-025 J2M-SS-580SF-025		0.0004	2.018	0.600	0.580	0.008	2.000	
		0.010	51.26	15.24	14.73	0.20	50.80	

† All resistance values are ±1%, measured on the tab near the grid.

Bibliographie

- Barbier, Laura Le. 2023. "Etude théorique de l'interférométrie à rétro-injection optique en vue d'applications en dynamique des matériaux". Thèse de Doctorat, Université de Toulouse
- Barker, L. M. Et Hollenbach, R. E. 1972. " Shock wave study of the $\alpha \rightleftharpoons \epsilon$ phase transition in iron." *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no 11, p. 4872-4887. »
- Barker, L. M., et R. E. Hollenbach. 1972. "Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface ". *Journal of Applied Physics* 43 (11): 4669-75. <https://doi.org/10.1063/1.1660986>.
- Barron. 1969. "Body armor for aircrewmembers." *Army Natick Labs Ma Clothing and Personal Life* 758
- Base de données matériaux Théia - OURANOS V6.0
- Bedmar, Javier, Ainhoa Riquelme, Pilar Rodrigo, Belen Torres, et Joaquin Rams. 2021. "Comparison of Different Additive Manufacturing Methods for 316L Stainless Steel ". *Materials* 14 (21): 6504. <https://doi.org/10.3390/ma14216504>.
- Bevan, M. A., A. A. H. Ameri, D. East, D. C. Austin, A. D. Brown, P. J. Hazell, et J. P. Escobedo-Diaz. 2017. " Mechanical Properties and Behavior of Additive Manufactured Stainless Steel 316L ". In *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2017*, édité par Shadia Ikhmayies, Bowen Li, John S. Carpenter, Jian Li, Jiann-Yang Hwang, Sergio Neves Monteiro, Donato Firrao, et al., 577-83. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51382-9_63.
- Bosca, G., J. David, L. Allay, J.M. Darmon, et Y. Victor. 1981. " Piézorésistivité du manganin et de l'ytterbium déposés par pulvérisation cathodique ". *Revue de Physique Appliquée* 16 (7): 387-95. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01981001607038700>.
- Bourne, N K, Z Rosenberg, D J Johnson, J E Field, A E Timbs, et R P Flaxman. 1995. "Design and Construction of the UK Plate Impact Facility ". *Measurement Science and Technology* 6 (10): 1462-70. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/6/10/005>.
- Brannon, Rebecca, Moo Lee, et David Bronowski. 2005. " Uniaxial and Triaxial Compression Tests of Silicon Carbide Ceramics under Quasi-Static Loading Condition. " *SAND2004-6005*, 920770. <https://doi.org/10.2172/920770>.
- Carton, Erik, et Geert Roebroeks. 2015. " Testing Method for Ceramic Armor and Bare Ceramic Tiles ". In *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, édité par Jerry C LaSalvia, 1-12. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119040590.ch1>.
- Charmi, A., R. Falkenberg, L. Ávila, G. Mohr, K. Sommer, A. Ulbricht, M. Sprengel, R. Saliwan Neumann, B. Skrotzki, et A. Evans. 2021. " Mechanical Anisotropy of Additively Manufactured Stainless Steel 316L: An Experimental and Numerical Study ". *Materials Science and Engineering: A* 799 (janvier): 140154. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140154>.
- Chen, W. W., & Song, B. 2010. "Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications." *Springer Science & Business Media*.

- Chniouel, Aziz. 2015. "Etude de l'élaboration de l'acier inoxydable 316L par fusion laser sélective sur lit de poudre: influence des paramètres du procédé, des caractéristiques de la poudre, et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques." Thèse de Doctorat, Paris-Saclay
- Collombet et Tranchet. 1994. " Damage behaviour of alumina submitted to a divergent spherical wave." *Le Journal de Physique IV*, 4(C8), C8-641.
- Coscolluela A. 1992. "Plasticité, endommagements et ruptures des aluminés sous sollicitations dynamiques triaxiales : influence de la taille de grains." Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.
- Cotton, Matthew, David Chapman, Ron Winter, Ernie Harris, et And Daniel Eakins. 2015. "Tailored Ramp Wave Generation in Gas Gun Experiments ". Édité par E. Cadoni. *EPJ Web of Conferences* 94: 01065.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401065>.
- Cowperthwaite, M., et R. F. Williams. 1971. " Determination of Constitutive Relationships with Multiple Gauges in Nondivergent Waves ". *Journal of Applied Physics* 42 (1): 456-62. <https://doi.org/10.1063/1.1659623>.
- Dandekar, D. P. 1994. "Shock response of AD995 alumina." *AIP conference proceedings*. Vol. 309. No. 1. American Institute of Physics.
- Dargaud, Marielle. 2020 "Experimental and Numerical Analysis of the Failure Modes Induced in Ceramic Materials under Dynamic Loading". Thèse de Doctorat, Grenoble UGA.
- Denoual. 1998. "Approche probabiliste du comportement à l'impact du carbure de silicium : application aux blindages moyens." Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan .
- Doubax Francis. 1992. "Caractérisation et modélisation de la transformation polymorphique et de l'endommagement dynamique de l'acier mars" Thèse de Doctorat, Université de Toulouse
- Duffy. 2019. "Ultra-high pressure dynamic compression of geological materials". *Frontiers in Earth Science*, 2019, vol. 7, p. 23.
- Dyachkov, S A, D K Ilnitsky, A N Parshikov, et V V Zhakhovsky. 2020. "The Model of Iron Properties for Plate Impact and Explosive Compression Simulations". *Journal of Physics: Conference Series* 1556 (1): 012032.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1556/1/012032>.
- Elkaseer, Ahmed, Ali Abdelaziz, Mohammed Saber, et Ahmed Nassef. 2019. " FEM-Based Study of Precision Hard Turning of Stainless Steel 316L ". *Materials* 12 (16): 2522. <https://doi.org/10.3390/ma12162522>.
- Erzar, et Zinszner. 2018. " Rapport technique, Caractérisation du comportement dynamique des matériaux de blindage Nexter Systems face à des munitions de petit calibre " *Rapport CEA*
- Faber. 1995. "Faber, I., Seifert, K., Meyer, L. W., 1995. Correlation between the mechanical data of ceramics and their protective power against impact loading." *Tech. Rep. EB 6/95 part. 3*, Technical University Chemnitz-Zwickau.
- Farbaniec, L., J. D. Hogan, K. Y. Xie, M. Shaeffer, K. J. Hemker, and K. T. Ramesh. 2017. "Damage Evolution of Hot-Pressed Boron Carbide under Confined Dynamic Compression." *International Journal of Impact Engineering* 99: 75–84.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.008>

- Forquin. 2016. " P. Forquin. Procédé et dispositif pour mesurer la résistance des matériaux solides par impact de plaques sans choc", October 11 2016. Patent UGA, INPI, N°1000369617. »
- Forquin, 2018. " Forquin P., 2018. <https://3sr.univ-grenoble-alpes.fr/sites/3sr/files/Mediatheque/lab/equipements/its-experdyn-pforquin2018.pdf> ".
- Forquin, Ando. 2017. " Forquin P, Ando E. Application of microtomography and image analysis to the quantification of fragmentation in ceramics after impact loading." *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* 2017 Jan 28;375(2085):20160166. doi: 10.1098/rsta.2016.0166. PMID: 27956503; PMCID: PMC5179965.
- Forquin, et al. 2020. "The Brittle's CODEX chair", DYMAT Winter School 2020, 9-14 February 2020, in Les Houches School of Physics, France
- Forquin P. 2003. "Endommagement et fissuration de matériaux fragiles sous impact balistique, rôle de la microstructure", Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan
- Forquin Pascal, et Jean-Luc Zinszner. 2017. " A Pulse-Shaping Technique to Investigate the Behaviour of Brittle Materials Subjected to Plate-Impact Tests ". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 375 (2085): 20160333. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0333>.
- Frazier, William E. 2014. " Metal Additive Manufacturing: A Review ". *Journal of Materials Engineering and Performance* 23 (6): 1917-28. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- Fujii, Keisuke, Noma, Toshihito, Masamura, Osami, et al. 2001. "Dynamic mechanical properties of materials measured by plate impact experiments (Si₃N₄, SiC and TiB₂)". *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 2001, vol. 44, no 2, p. 251-258.
- Fuller, P. J. A. Et Price, J. H. 1962. "Electrical conductivity of manganin and iron at high pressures". *Nature*, 1962, vol. 193, no 4812, p. 262-263.
- Gautam, P.C., Rajneesh Gupta, A.C. Sharma, et Manjit Singh. 2017. " Determination of Hugoniot Elastic Limit (HEL) and Equation of State (EOS) of Ceramic Materials in the Pressure Region 20 GPa to 100 GPa ". *Procedia Engineering* 173: 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.058>.
- Gong, Haijun, Cameron Crater, Ana Ordonez, Craig Ward, Madison Waller, et Charles Ginn. 2018. " Material Properties and Shrinkage of 3D Printing Parts Using Ultrafuse Stainless Steel 316LX Filament ". Édité par Guanghsu Chang. *MATEC Web of Conferences* 249: 01001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824901001>.
- Gong, Jianghong, Jianjun Wu, et Zhenduo Guan. 1999. " Examination of the Indentation Size Effect in Low-Load Vickers Hardness Testing of Ceramics ". *Journal of the European Ceramic Society*, 19(15), 2625-2631
- Gooch, William A. 2011. " Overview of the Development of Ceramic Armor Technology: Past, Present and the Future ". In *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, édité par Jeffrey J. Swab, Sujanto Widjaja, et Dileep Singh, 193-213. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118095256.ch18>.
- Grady, D. E. Et Moody, R. L. 1996. "Shock Compression Profiles In Ceramics". *Sandia National Lab.(Snl-Nm), Albuquerque, Nm (United States)*.

- Gray Iii, G. T., Livescu, V., RIGG, P. A., et al. 2015. "Structure/property (constitutive and dynamic strength/ damage) characterization of additively manufactured 316L SS". In : *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences, 2015. p. 02006.
- Hall, A C, R L Williamson, J Wise, D A Urrea, J F McCloskey, T J Roemer, et D E Beatty. 2008. "Graded-Density Thermal Spray Coatings for Light Gas Gun Flyer Plates "(No. SAND2008-0616P). *Sandia National Lab.*(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- Heard, Cline. 1980. "Mechanical behaviour of polycrystalline BeO, Al₂O₃ and AlN at high pressure". *Journal of Materials Science*, 15, 1889-1897.
- Hérelil. 2006. "Hérelil, P.-L. Et Avrillaud, G. Dynamic material characterization under ramp wave compression with GEPI device." In : *Journal de Physique IV (Proceedings)*. EDP sciences, 2006. p. 535-540.
- Hérelil, P.-L., et G. Avrillaud. 2006. " Dynamic Material Characterization under Ramp Wave Compression with GEPI Device ". *Journal de Physique IV (Proceedings)* 134 (août): 535-40. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134082>.
- Holmquist et Johnson. 2008. "Response of boron carbide subjected to high-velocity impact". *International Journal of Impact Engineering*, 35(8), 742-752.
- Holmquist, T. J. Et Johnson, G. R. 2008. "Response of boron carbide subjected to high-velocity impact." *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, no 8, p. 742-752.
- Holmquist, Timothy J. Et Johnson, Gordon R. 2002. "Response of silicon carbide to high velocity impact". *Journal of applied physics*, 2002, vol. 91, no 9, p. 5858-5866. » s. d.
- Holmquist, T.J., et G.R. Johnson. 2008. " Response of Boron Carbide Subjected to High-Velocity Impact ". *International Journal of Impact Engineering* 35 (8): 742-52. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.08.003>.
- Horsfall, I, M R Edwards, et M J Hallas. 2010. " Ballistic and Physical Properties of Highly Fractured Alumina ". *Advances in Applied Ceramics* 109 (8): 498-503. <https://doi.org/10.1179/174367610X12804792635341>.
- Huang, J.Y., J.C. Yuan, T.T. Zhu, T. Zhong, Y.F. Xu, et S.N. Luo. 2022. "Dynamic Compressive Strength of Alumina Ceramics ". *Ceramics International* 48 (24): 36371-82. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.196>.
- Islam, Md Rushdie Ibne, ZHENG, J. Q., et BATRA, Romesh C. 2020. "Ballistic performance of ceramic and ceramic-metal composite plates with JH1, JH2 and JHB material models." *International Journal of Impact Engineering*, 2020, vol. 137, p. 103469.
- Jamesl, E M, N D Browningl, Y Xinl, J L Reno, et A G Baca. 1999. " Atomic Resolution Microscopy of Semiconductor Defects and Interfaces ". In *CONFERENCE SERIES-INSTITUTE OF PHYSICS* (Vol. 164, pp. 11-14). Philadelphia; Institute of Physics; 1999.
- Jensen, B. J., D. B. Holtkamp, P. A. Rigg, et D. H. Dolan. 2007. " Accuracy Limits and Window Corrections for Photon Doppler Velocimetry". *Journal of Applied Physics* 101 (1): 013523. <https://doi.org/10.1063/1.2407290>.
- Johnson, et Gordon. 1983. "JOHNSON, Gordon R. A Constitutive Model and Data for Metals Subject to Large Strains, High Strain Rate and High Temperatures." In : *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, The Hague. 1983.
- Johnson, et Holmquist. 1992. " JOHNSON, G. R. et HOLMQUIST, T. J. A computational constitutive model for brittle materials subjected to large

- strains, high strain rates, and high pressures. In : Shock wave and high-strain-rate phenomena in materials". *CRC Press*, 1992. p. 1075-1082. », 1992.
- Johnson. 2003. "Johnson, Gordon R., Holmquist, Timothy J., et BEISSEL, Stephen R. "Response of aluminum nitride (including a phase change) to large strains, high strain rates, and high pressures." *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no 3, p. 1639-1646.
- Keller, C. 2018. " Définition d'un protocole de mesure de contraintes résiduelles dans les aciers par ondes ultrasonores "
- Kipp, M E, et D E Grady. 1989. " Shock Compression and Release in High-Strength Ceramics ". *SAND-89-1461*, 5777672. <https://doi.org/10.2172/5777672>.
- Klimova-Korsmik, Olga, Gleb Turichin, Ruslan Mendagaliyev, Sergey Razorenov, Gennady Garkushin, Andrey Savinykh, et Rudolf Korsmik. 2021. "High-Strain Deformation and Spallation Strength of 09CrNi2MoCu Steel Obtained by Direct Laser Deposition ". *Metals* 11 (8): 1305. <https://doi.org/10.3390/met11081305>.
- Lankford, J., W.W. Predebon, J.M. Staehler, G. Subhash, B.J. Pletka, et C.E. Anderson. 1998. "The Role of Plasticity as a Limiting Factor in the Compressive Failure of High Strength Ceramics ". *Mechanics of Materials* 29 (3-4): 205-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(98\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(98)00023-4).
- Lankford, James. 1977. "Compressive Strength and Microplasticity in Polycrystalline Alumina ". *Journal of Materials Science* 12 (4): 791-96. <https://doi.org/10.1007/BF00548172>.
- Lankford, 1981. "Temperature-Strain Rate Dependence of Compressive Strength and Damage Mechanisms in Aluminium Oxide ". *Journal of Materials Science*, 16, 1567-1578.
- Li, Haoyang, Calvin Lo, Geneviève Toussaint, et James D Hogan. 2020 "DYNAMIC FRACTURE AND FRAGMENTATION OF BORON CARBIDE ADVANCED CERAMICS ".
- Longy, F. 1987. "LONGY, François. Déformation et endommagement de céramiques soumises à un choc intense: aspects macro et micromécaniques." 1987. Thèse de doctorat. Limoges.
- Longy, F., et J. Cagnoux. 1989. "Plasticity and Microcracking in Shock-Loaded Alumina ". *Journal of the American Ceramic Society* 72 (6): 971-79. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.tb06254.x>.
- Madhu. 2005. "Madhu, Vemuri, et al. " An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact." *International journal of impact engineering* 32.1-4 (2005): 337-350. »
- Malaise. 1999. "Réponse d'une céramique à l'impact d'un barreau à grande vitesse (1500 m/s). Croisement essais dynamiques-modélisation numérique." Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux.
- Malaise, F., J.-Y. Tranchet, et F. Collombet. 1997. "Behaviour Modelling of Two Aluminas in Divergent Spherical Pyrotechnical Experiments ". *Le Journal de Physique IV* 07 (C3): C3-681-C3-686. <https://doi.org/10.1051/jp4:19973116>.
- Martin, SR. 2004. "Experimental Characterization of the Effect of Microstructure on the Dynamic Behavior of SiC." PhD thesis, Georgia Insti

- Mirzababaei. 2019. "A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel," *English, Journal of Manufacturing and Materials Processing*, t. 3, n o 3, p. 82, sept. 2019 », 2019.
- Moberlychan, W J, J J Cao, et L C De Jonghe. 1998 "THE ROLES OF AMORPHOUS GRAIN BOUNDARIES AND THE B₂a TRANSFORMATION IN TOUGHENING SiC ". *Acta materialia*, 46(5), 1625-1635.
- Rajendran, A.M., et D.J. Grove. 1996. "Modeling the Shock Response of Silicon Carbide, Boron Carbide and Titanium Diboride ". *International Journal of Impact Engineering* 18 (6): 611-31. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(96\)89122-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(96)89122-6).
- Ray. 2005. "Ray, D., Flinders, R., Anderson, A., Cutler, R., 2005. Effect of room-temperature hardness and toughness on the ballistic performance of SiC-based ceramics". *Ceram. Sci. Eng. Proc.* 26 (7), 131-142.
- Roberson. 1995. «Roberson, C. J. "Ceramic materials and their use in lightweight armour systems." Proceedings Lightweight Armour System Symposium." Cranfield: Royal Military Collegue of Science. 1995.
- Rosenberg. 1988. "The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles." *International journal of impact engineering* 7.3 (1988): 357-362.
- Rossiquet, Gilles. 2012. "Carbure de silicium pour application blindage: élaboration et étude du comportement à l'impact." Thèse de doctorat. Dijon.
- Seaman, Lynn. 1974. "Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves." *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no 10, p. 4303-4314.
- Smith, Liam C., David J. Chapman, Paul A. Hooper, Glenn Whiteman, et Daniel E. Eakins. 2018. "On the Dynamic Response of Additively Manufactured 316L ". In , 060007. St. Louis, MO, USA. <https://doi.org/10.1063/1.5044804>.
- Sundaram, Sairam, et Rodney J Clifton. 1998. "The Influence of a Glassy Phase on the High Strain Rate Response of a Ceramic ". *Mechanics of Materials*.
- Taylor, John W., et Melvin H. Rice. 1963. " Elastic-Plastic Properties of Iron ". *Journal of Applied Physics* 34 (2): 364-71. <https://doi.org/10.1063/1.1702614>.
- Taylor, P, M Goff, P J Hazell, J Leighs, D Wood, et G J Appleby-Thomas. 2014. "Ramp Wave Generation Using Graded Areal Density Ceramic Flyers and the Plate Impact Technique ". *Journal of Physics: Conference Series* 500 (14): 142016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/500/14/142016>.
- Tracy, C. A., & Quinn, G. D. 1994. "Fracture toughness by the surface crack in flexure (SCF) method". In *Proceedings of the 18th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials – B: Ceramic Engineering and Science Proceedings* (pp. 836-845).
- Vogler. 2004. " Dynamic behavior of boron carbide ". *Journal of applied physics*, 95(8), 4173-4183.
- Wagner, Marius A., Jona Engel, Amir Hadian, Frank Clemens, Mikel Rodriguez-Arbaizar, Efrain Carreño-Morelli, Jeffrey M. Wheeler, et Ralph Spolenak. 2022. " Filament Extrusion-Based Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel: Effects of Sintering Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties ". *Additive Manufacturing* 59 (novembre): 103147. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103147>.
- Wallstabe, R. 2011. "On the Tribological Behaviour of SiC and Alumina Mated Against Different Steels Under Dry Sliding Conditions ". *Tribology Letters* 44 (2): 247-57. <https://doi.org/10.1007/s11249-011-9843-1>.

- Zellner, M.B., et G.B. Vunni. 2013. " Photon Doppler Velocimetry (PDV) Characterization of Shaped Charge Jet Formation ". *Procedia Engineering* 58: 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.05.012>.
- Zinzsner, J-L. 2014. " Identification des paramètres matériau gouvernant les performances de céramiques à blindage ". These de doctorat, Université de Lorraine.

Table des matières

1. Introduction et contexte de l'étude	7
1.1 Contexte	7
1.2 Objectifs de la thèse et choix des céramiques étudiées	11
1.3 Présentation des matériaux d'étude	12
1.4 Plan de thèse	17
2. Etat de l'art	18
2.1 Introduction	18
2.2 Caractérisation expérimentale des céramiques	18
2.2.1 Essais quasi-statiques	18
2.2.1.1 Essais de dureté	18
2.2.1.2 Essais de compression simple	19
2.2.1.3 Essais triaxiaux	21
2.2.2 Essais dynamiques	23
2.2.2.1 Essais aux barres de Hopkinson	23
2.2.2.2 Essais d'expansion sphérique divergente	24
2.2.2.3 Essais d'impact de plaques	25
A. Essai d'impact de plaques plan avec mesure interférométrique	25
B. Essais d'impact de plaques avec jauges	27
C. Essais d'impact de plaques inclinée	29
D. Essais d'impact de plaques sans choc (shockless)	30
2.2.2.4 Essais à haute puissance pulsée	33
A. Le cas GEPI	33
B. L'analyse Lagrangienne	34
2.3 Etude des phénomènes de micro-plasticité au sein des céramiques	35
2.4 Modélisation du comportement de la céramique	38
A. Modèle JH1	38
B. Modèle JHB	39
C. Modèle JH2	41
2.5 Résumé bibliographique	44
3. Mise au point d'essais d'impact de plaques sans choc pour analyse Lagrangienne	45
3.1 Principe de la méthode expérimentale	45
3.2 Présentation du protocole de mesure	46
3.2.1.1 Présentation du moyen d'essai	46
3.2.1.2 Présentation des mesures relevées	47

3.3	Point bibliographique sur les aciers _____	49
3.3.1	Comportement des aciers sous chargement de compression intense par impact de plaques _____	49
3.3.2	Procédé de mise en forme des aciers par fabrication additive _____	51
A.	Fusion sur lit de poudre (PBF) _____	52
B.	Le Jet de liant _____	53
C.	Extrusion par dépôt de fil en fusion (FDM) _____	53
3.4	Sélection du matériau de la plaque impactrice et du buffer _____	55
3.5	Dimensionnement numérique des essais pour analyse Lagrangienne ____	57
3.5.1	Paramètres des simulations numériques _____	57
3.5.2	Dimensionnement numérique des essais _____	61
3.6	Essais de validation des plaques impactrices en acier 316L _____	65
3.6.1	Présentation des essais _____	65
3.6.2	Validation des plaques impactrices ondulées _____	67
3.6.3	Analyse Lagrangienne sur acier _____	70
3.7	Plaques impactrices imprimées en 3D _____	72
3.7.1	Dimensionnement numérique des plaques impactrices imprimées en 3D 72	
3.7.1.1	Paramètres de simulation _____	72
3.7.1.2	Résultats _____	73
3.7.2	Etude de l'influence des méthodes d'impression 3D _____	75
3.7.3	Etude de l'influence des géométries imprimées en 3D _____	76
3.7.4	Modélisation d'une analyse Lagrangienne à partir des signaux obtenus lors des essais avec géométries imprimées en 3D _____	78
3.8	Résultats et discussion _____	80
4.	Réalisation d'une analyse Lagrangienne à partir d'essais d'impact de plaques sans choc _____	81
4.1	Introduction _____	81
4.2	Analyse Lagrangienne sur F99 _____	81
4.2.1	Tests préliminaires : détermination de la HEL _____	81
4.2.2	Analyse Lagrangienne sur F99 _____	84
4.2.3	Analyse Lagrangienne en configuration inversée sur F99 _____	87
4.2.4	Comparaison avec les essais GEPI _____	89
4.3	Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD _____	91
4.3.1	Tests préliminaires : Caractérisation du matériau par essais d'impact de plaques 91	
4.3.2	Analyse Lagrangienne sur Forceram® SSD _____	94
4.4	Conclusions et discussion _____	96

5. Essais d'impact de plaques avec jauges de pression	97
5.1 Introduction	97
5.2 Principe d'utilisation des jauges	98
5.2.1 Vérification du facteur de jauge	99
5.2.2 Mise en place des essais	100
5.3 Comparaison des mesures de contraintes axiales par vélocimétrie homodyne et par jauge de pression	102
5.3.1 Test de validation sur acier : mesure de contrainte axiale	102
5.3.2 Tests sur alumine : mesure de contrainte axiale	104
5.4 Mesures de contraintes axiale et radiale par vélocimétrie homodyne et jauge manganin	105
5.5 Conclusions et discussion	108
6. Modélisation du comportement des céramiques soumises à un impact de plaques	109
6.1 Introduction	109
6.2 Calibration des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour l'alumine F99.7	111
6.3 Comparaison entre données expérimentales et numériques d'essais en configuration lagrangienne et avec jauges sur alumine F99.7	117
6.4 Définition des paramètres des modèles de comportement JH2 et élasto-plastique avec écrouissage pour le SiC Forceram®	122
6.5 Conclusions et discussion	124
7. Conclusion générale et perspectives	126
<i>Tables</i>	131
Table des figures	131
Index des tableaux	137
Annexes	138
<i>Bibliographie</i>	150
<i>Table des matières</i>	157
Résumé	160
Abstract	161

Résumé

Les matériaux céramiques sont largement utilisés dans la composition de blindages ou de structures de protection, car ils permettent, à performances égales, un gain de masse important par rapport à leurs homologues en acier. Dans ces conditions, ils subissent des chargements extrêmes conduisant à des mécanismes de microplasticité et d'endommagement sous fort confinement et sous haute vitesse. Pour bien comprendre le comportement de ces matériaux il est nécessaire de procéder à une caractérisation du comportement mécanique sous des conditions de vitesse et de pression représentatives. Plusieurs techniques expérimentales sont utilisées pour étudier le comportement dynamique des céramiques sous fort confinement. Parmi elles, figure la technique d'essai d'impact de plaques. Au cours de cet essai, une plaque impactrice (souvent constituée d'un matériau métallique) frappe le matériau cible, et certaines propriétés mécaniques telles que la limite élastique d'Hugoniot (HEL) ainsi que la courbe d'Hugoniot du matériau peuvent être déduites grâce au profil de vitesse mesuré en face arrière de la cible. Néanmoins, ce test présente l'inconvénient de générer une discontinuité de l'état de contrainte sans passer par les états de contrainte et de densité intermédiaires.

L'un des objectifs de cette thèse a été de développer et de mettre en œuvre une configuration expérimentale d'impact de plaques sans choc permettant de pratiquer une analyse Lagrangienne. Les différentes campagnes expérimentales sont effectuées à l'aide du lanceur présent au sein du laboratoire 3SR. L'utilisation de plaques impactrices ondulées permettant de générer une rampe de chargement a été validée à l'aide d'essais sur acier 316L qui présente l'avantage de ne pas changer de phase dans les gammes de contraintes étudiées. Par la suite deux céramiques, l'alumine F99.7 et le SiC Forceram, ont été étudiées dans cette configuration. Ces essais, couplés à l'utilisation de la technique d'analyse lagrangienne, ont permis d'obtenir la courbe de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale au-delà de la HEL.

Parallèlement aux essais sans choc, des configurations d'impact de plaques plan ont été développées pour caractériser les profils temporels de contraintes axiales et radiales dans la céramique. Cette configuration repose sur l'utilisation de jauges piezorésistives en Manganin. Ces essais ont été pratiqués sur des cibles en acier puis en alumine. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par mesure de vitesse en face arrière pratiqués pendant ces mêmes essais.

L'ensemble des résultats expérimentaux de la thèse ont été comparés à des simulations numériques par éléments finis s'appuyant sur un modèle de plasticité de type JH2 ou élastoplastique avec écrouissage. Ces calculs ont permis d'identifier par approche inverse les paramètres du modèle de comportement de la céramique permettant de mieux appréhender le comportement mécanique de ces matériaux sous de telles conditions de chargement. Néanmoins, d'autres essais, notamment des essais triaxiaux, pourront être envisagés afin de compléter l'identification d'un modèle de comportement pour ces microstructures sous des pressions intermédiaires de confinement.

Abstract

Ceramic materials are widely used in armour or protective structures, providing weight saving at equivalent performance in comparison to their steel counterparts. In these conditions, they experience extreme damage, micro-plasticity and fragmentation mechanisms. To fully understand these behaviours, characterization under high-strain-rate compression tests need to be carried out. Several experimental techniques, such as the plate-impact test, are used to investigate the dynamic behaviour of ceramic under high compressive loading. Throughout this experiment, a flyer plate (often made of a metallic material) impacts the target. Using the rear side velocity measured at the back of the target, some mechanical properties such as the HEL (Hugoniot Elastic Limit) as well as the Hugoniot curve of the material can be deduced. Nevertheless, this test does not provide a controllable loading-rate in the target and the hardening behaviour cannot be directly deduced.

One of the aims of this thesis was to develop and implement an experimental shockless plate-impact configuration that enables to conduct a Lagrangian analysis. Various experimental campaigns were carried out using the 3SR laboratory launcher. The use of wavy flyer plates to generate a loading ramp was validated using tests on 316L steel, which has the asset of not changing phase in the studied stress domain. Two ceramics, F99.7 alumina and Forceram SiC, were then studied in this configuration. These tests coupled with Lagrangian analysis enable to obtain the curve of axial stress as a function of axial strain beyond the HEL.

At the same time, other plate impact configurations were developed to characterise the temporal profiles of axial and radial stresses in the ceramic. This configuration is based on the use of Manganin piezoresistive gauges. These tests were carried out on steel and alumina targets. The results were compared with those obtained by rear side velocity measurements during the same test.

All the experimental results from the thesis were compared with finite element numerical simulations based on a JH2-type plasticity model. These calculations were used to identify the model parameters of the ceramic behaviour thanks to an inverse approach. It provides a better understanding of the mechanical behaviour of these materials under such loading conditions. Nevertheless, other tests, in particular triaxial tests, could be considered in order to complete the identification of parameters of a constitutive law for these microstructures under intermediate confinement pressures.