



HAL
open science

Construction d'un modèle numérique de substitut de tête humaine sous impact balistique

Nicolas Leconte, Christophe Maréchal, Seddick Shiri, François Bresson,
Thomas Collard

► To cite this version:

Nicolas Leconte, Christophe Maréchal, Seddick Shiri, François Bresson, Thomas Collard. Construction d'un modèle numérique de substitut de tête humaine sous impact balistique. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01717835

HAL Id: hal-01717835

<https://hal.science/hal-01717835>

Submitted on 26 Feb 2018

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.

Public Domain

Construction d'un modèle numérique de substitut de tête humaine sous impact balistique

Nicolas LECONTE¹ *, Christophe MARECHAL¹, Seddick SHIRI¹, François BRESSON², Thomas COLLARD³

¹ Université de Valenciennes, LAMIH/C2S, nicolas.leconte@univ-valenciennes.fr

² Institut National de Police Scientifique, centre de Lille

³ l'Université de Lille, Laboratoire d'Anthropologie Biologique

* Auteur correspondant

Résumé — L'expertise judiciaire concernant les effets physiques d'un tir par arme à feu se limite actuellement à la comparaison avec des cas réels précédemment rencontrés ou avec des cas rapportés dans la littérature. Il s'avère donc nécessaire de développer les connaissances concernant les phénomènes de balistique lésionnelle, afin de lier les paramètres physiques du projectile aux caractéristiques des lésions. Il est donc proposé, dans le cadre du projet ANR SUBSITETE de développer à la fois un substitut physique bio-fidèle de la tête humaine sous impact balistique, et le modèle numérique associé. C'est sur ce dernier que se focalise l'article, en proposant une réflexion sur le choix des techniques numériques, à la fois pour la discrétisation du projectile et pour celle du substitut. La MEF semble être la technique la plus appropriée à la représentation du projectile, au moins lorsqu'il ne se fragmente pas. Des cas tests complémentaires sont nécessaires pour valider une discrétisation pour le substitut, en particulier en ce qui concerne la fragmentation.

Mots clés — Balistique, Substitut de tête humaine, Techniques de discrétisation.

1. Introduction

Toute personne physique victime d'un tir par arme à feu subit des lésions superficielles et internes d'une extrême gravité. Les caractéristiques de ces lésions sont intimement liées aux paramètres physiques du projectile lors de l'impact (calibre, type de projectile, vitesse d'impact, état de stabilité). Malgré cette situation, l'établissement d'un lien biunivoque entre les conditions d'un tir et les effets terminaux observés sur le corps humain est théoriquement envisageable mais ne repose actuellement sur aucune base expérimentale. Cette problématique a été soulevée par l'Institut National de Police Scientifique (INPS). En effet, l'expertise actuelle se limite à une comparaison avec des cas similaires, avec toutes les incertitudes que cela comporte. Les comparaisons sont effectuées avec des cas réels précédemment rencontrés ou avec des cas rapportés dans la littérature scientifique. Les experts en balistique sont conscients des limites de ces comparaisons. Les conclusions se limitent donc en pratique à estimer une distance de tir à partir de plaies superficielles.

Il s'avère donc nécessaire de développer les connaissances concernant les phénomènes de balistique lésionnelle, afin de lier les paramètres physiques du projectile aux caractéristiques des lésions. Le projet ANR SUBSITETE réunit un consortium constitué du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) de Valenciennes, de l'INPS, et le Laboratoire d'Anthropologie Biologique de l'Université de Lille (LAB) dans ce but. Il a pour objectif de développer un substitut physique et numérique de tête humaine comme outil de diagnostic dans le cadre d'expertise judiciaire¹.

D'une part, le projet consiste donc à mettre au point un substitut physique de la tête humaine, c'est-à-dire à sélectionner les matériaux substituants pour les éléments constitutifs de la tête humaine. Thali et

¹ Par ailleurs, cette étude permettra d'améliorer les connaissances concernant les phénomènes de balistique lésionnelle sur la tête.

al. [1] se sont attachés à concevoir un substitut de tête humaine sous impact balistique. Le substitut qu'ils proposent est composé du crâne, du cerveau, et du scalp, et la géométrie de la tête est simplifiée (Fig. 1). En fait, dans ce substitut, le crâne est constitué d'une coque multicouche en polyuréthane (diamètre 190 mm, épaisseur 5-7 mm), et une couche en latex empêche sa fragmentation. Le cerveau est représenté par une sphère pleine en gélatine (10% à 4°C). Finalement, le scalp est constitué d'une couche de silicium contenant des fibres synthétiques.

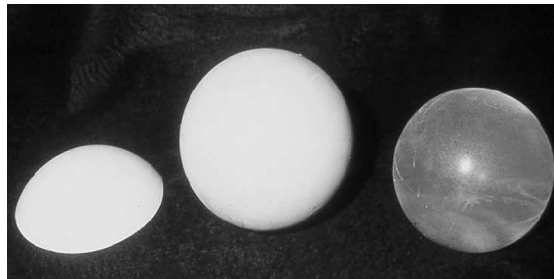


Fig. 1. Exemple de substitut de tête humaine dédié à l'impact balistique [1].

Dans le cadre du projet ANR Substitête, un substitut physique similaire à celui de Thali et al. [1], c'est-à-dire représentant le crâne, le scalp, et le cerveau, est envisagé. Cependant, les matériaux substituants restent à déterminer. En particulier, l'accent est mis sur la caractérisation mécanique des propriétés de l'os crânien humain pour des vitesses statique, dynamique et balistique, car son comportement est jugé le plus prépondérant dans la réponse de la tête sous sollicitation balistique. Par ailleurs, des géométries plus complexes que celles d'une boule sont prévues par la personnalisation de la géométrie.

D'autre part, un second objectif du projet ANR est de développer un modèle numérique du substitut physique de tête humaine sous impact balistique. Cette partie fait l'objet de notre article. Le modèle numérique de substitut de tête humaine sous impact balistique se compose d'un projectile d'une part, et du substitut de tête humaine d'autre part. Dans ce modèle, à la fois le projectile et le substitut de tête humaine sont déformables et susceptibles de se fragmenter. D'ailleurs, les cas réels observés ont montré que les lésions superficielles et internes étaient particulièrement dépendantes de la nature du projectile (Fig. 2). En effet, en fonction de sa nature, le projectile est susceptible de se retourner, de présenter de très fortes déformations plastiques (champignonnage), ou même de se fragmenter.

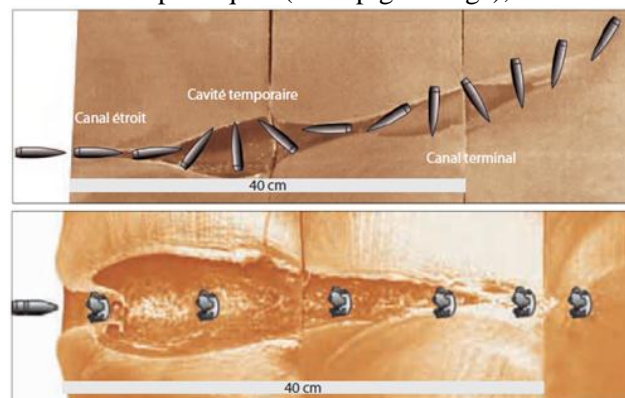


Fig. 2. Exemples de scénarii lors de l'impact balistique, en fonction de la nature du projectile [2].

Il est d'ailleurs important de noter que ce sont surtout les profils de fracture/fragmentation de l'os, et la déformée résiduelle et les éventuels fragments du projectile qui auront un caractère validant en termes de capacité de prédiction pour le modèle numérique de substitut de tête humaine sous impact balistique. En effet, à la fois la déformée et les fragments éventuels du projectile et de la boîte crânienne sont déterminants lors de l'expertise judiciaire.

Pour modéliser le substitut bio-fidèle sous impact balistique, il s'agit alors à la fois de caractériser le comportement des différents matériaux du substitut et du projectile sous sollicitation balistique, et de sélectionner les techniques numériques adaptées à la modélisation du substitut et du projectile. C'est

sur ce dernier point que nous focalisons notre étude. Il s'agit alors d'employer des techniques de discrétisation adaptées à la prise en compte de grandes déformations, de la perforation, et de la fragmentation, en dynamique rapide (tout en conservant des coûts de calcul acceptables). Pour cette classe de problèmes, des codes de calcul explicites sont typiquement requis. Deux techniques alternatives sont identifiées comme candidates potentielles pour la discrétisation du projectile et du substitut : la Méthode des Eléments Finis (MEF), et les Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). La technique SPH a été sélectionnée en particulier pour sa capacité à représenter la fragmentation. Ces deux méthodes sont évaluées de manière indépendante pour la modélisation du projectile et pour la modélisation du substitut.

2. Exemple de projectile : 9mm FMJ

2.1. Description

Le projectile 9mm FMJ « Full Metal Jacket » est fréquemment rencontré dans les affaires judiciaires. La vitesse du projectile lors de l'impact est de l'ordre de 200 à 400 m/s (balistique civile). Le projectile est un bi-matériau laiton-plomb (Fig. 3).

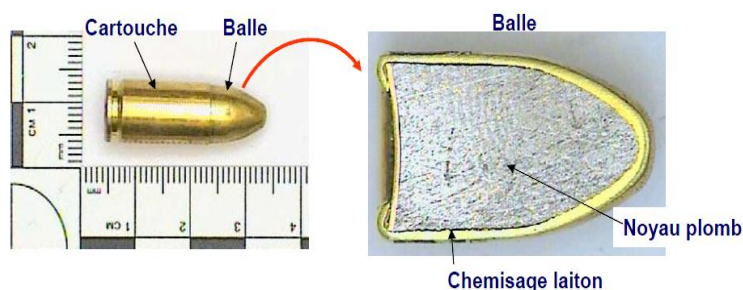


Fig. 3. Dimensions et composition du projectile.

Un modèle numérique du projectile employant la MEF a été proposé précédemment [3]. Cependant, ce modèle n'inclut pas de fragmentation, mais seulement de grandes déformations.

(kg/m^3)	E (GPa)	ν	A (MPa)	B (MPa)	n	C
11300	0.41	0.42	6.29	45.02	0.476	0.0484

Tableau 1. Paramètres matériau de la loi de Johnson-Cook pour le cœur en plomb du projectile [3].

2.2. Cas test : Impact de la barre de Taylor

L'objectif de ce cas test est d'évaluer la discrétisation la plus appropriée à la modélisation du projectile. Le problème de la barre de Taylor consiste en l'impact normal d'une barre cylindrique contre une surface rigide. En particulier, la géométrie, les conditions aux limites, et les propriétés matérielles correspondent à celles proposées pour l'impact d'une barre de cuivre dans la référence [5], car des résultats expérimentaux sont disponibles. La barre est longue de 25.4mm et son diamètre est de 7.6mm. Le comportement de la barre de cuivre est décrit par le modèle de Johnson-Cook (Eq.1). Les coefficients associés à ce modèle sont listés dans le Tableau 2. La vitesse d'impact de la barre est de 190m/s. Le contact entre la barre et la surface rigide est supposé parfait et sans frottement. Le calcul est lancé dans chacun des cas pendant 80 μ s.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

E (kg/m^3)	E (GPa)	ν	A (MPa)	B (MPa)	n	C
8930	117	0.35	157	425	1.0	0.0

Tableau 2. Paramètres matériau de la loi de Johnson-Cook pour le cuivre.

Plusieurs discrétisations sont évaluées. Deux types de formulations EF (même maillage), et trois types de techniques de génération de particules SPH sont testées. En fait, il est possible de générer les particules SPH de deux manières différentes : sur la base d'une géométrie, ou sur la base d'un maillage. Lorsque les particules SPH sont générées sur la base d'un maillage, les particules créées peuvent être placées soit au centre des éléments, soit au centre des éléments finis.

Cinq discrétisations sont donc testées au total (Fig. 4) :

- MEF, élément sous-intégré, 15120 éléments,
- MEF, élément à intégration complète, 15120 éléments,
- SPH, génération de particules au centre de chaque élément, 15120 particules,
- SPH, génération de particules aux nœuds des éléments, 16836 particules,
- SPH, génération à partir de la CAO, 18960 particules.

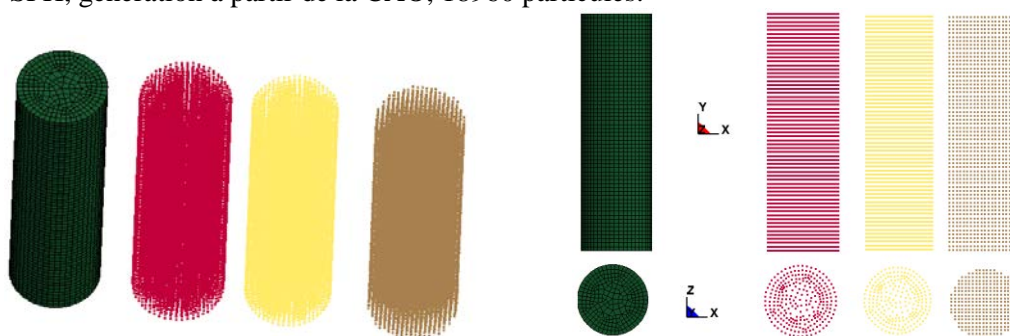


Fig. 4. Discretisation de la barre : discrétisations EF et SPH.

Les résultats obtenus sont présentés en Fig. 5 et dans le Tableau 3. Les déplacements verticaux et radiaux sont présentés, ainsi que les déformées finales associées différentes discrétisations. De plus, les temps de calcul sur un CPU d'un ordinateur muni d'un processeur XEON X5660 à 2,8 GHz sont présentés dans le Tableau 4.

	Déplacement vertical (mm)	Déplacement radial (mm)
Expérimental [5]	9,2	5,9
SPH [5]	9,9	8,0
FEM [5]	9,1	5,6
SOLID (sous-int.)	9,16	5,82
SOLID (int. comp.)	9,17	5,70
SPH (Nœuds)	10,3	11,8
SPH (Centre)	9,7	9,2
SPH (CAO)	9,8	6,7

Tableau 3. Comparaisons des résultats numériques obtenus avec des références numériques et expérimentales.

	TCPU (s)
MEF (sous-int)	104
SPH (centre)	107

Tableau 4. Temps de calcul associés aux discrétisations MEF et SPH.

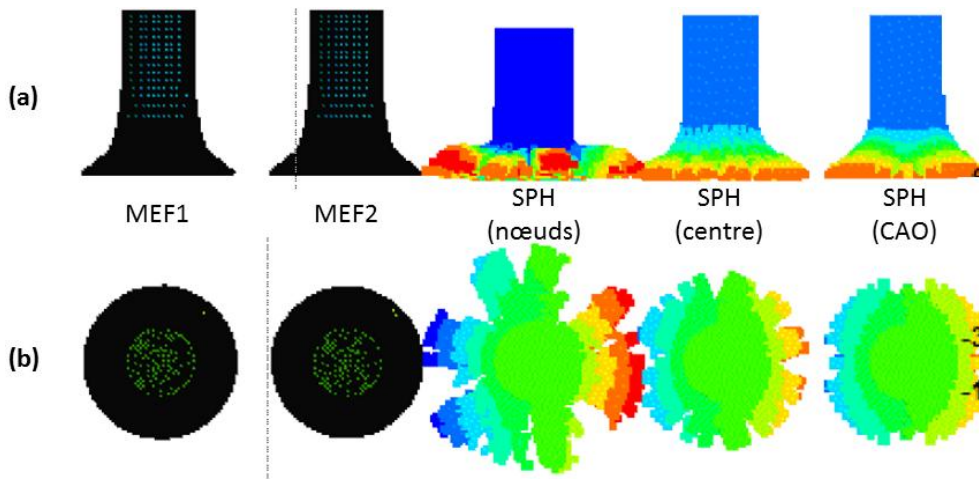


Fig. 5. (a) Déplacement vertical. (b) Déplacement radial.

Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation avec ceux de la littérature, ce qui est rassurant (Tableau 3). Il apparaît que la MEF est dans tous les cas la technique de discrétisation la plus adaptée pour le cas test de la barre de Taylor, pour la taille de maille / densité de particules considérée (environ le même nombre de particules que d'EF). Les résultats obtenus à l'aide de la méthode SPH sont plus éloignés de la référence que ceux fournis par la MEF. Ce résultat est en accord avec ceux de la littérature (Tableau 3). De même, les deux formulations EF fournissent des résultats très similaires, alors que les formulations SPH montrent des écarts significatifs en fonction de la méthode de remplissage choisie. En effet, on remarque que la discrétisation SPH basée sur la CAO est la plus proche des résultats expérimentaux. Il faut noter cependant que cette technique de remplissage n'est disponible que pour des géométries simples. Le remplissage basé sur le centre des éléments finis fournit des résultats intermédiaires en termes d'erreur relative, alors que le remplissage basé sur les nœuds est le plus éloigné. L'évolution des résultats avec la technique de remplissage ne semble pas s'expliquer uniquement par le nombre de particules utilisées pour chaque discrétisation : une convergence des résultats avec le nombre de particules aurait été relativement intuitif. Cependant, les résultats de la discrétisation « particules aux nœuds » sont plus éloignés de la référence que ceux de la discrétisation « particules au centre » des éléments. De plus, des ruptures numériques sont observées dans les discrétisations SPH (Fig. 5). Ces ruptures numériques sont inattendues expérimentalement. Elles sont d'autant plus marquées pour le remplissage aux nœuds. On remarquera également qu'il n'y a pas forcément de relation entre le nombre de particules employées et le « taux » de rupture numérique. Ce résultat est cohérent avec les données du Tableau 2. Par ailleurs, les temps de calcul sont comparables (Tableau 3).

3. Modélisation du substitut

3.1. Description

Le substitut physique est composé du crâne, du cerveau, et du scalp. Il a été choisi de renseigner les caractéristiques du cerveau et de la peau (et de leur matériau substituant) à partir de données de la littérature. En revanche, la réponse de l'os a été jugée prépondérante. Son comportement a donc été caractérisé à partir d'essais, en particulier dynamiques (Fig. 6-7) [4].

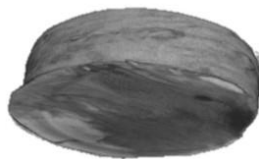


Fig. 6. Exemple d'éprouvette d'os crânien dont le comportement dynamique a été caractérisé.

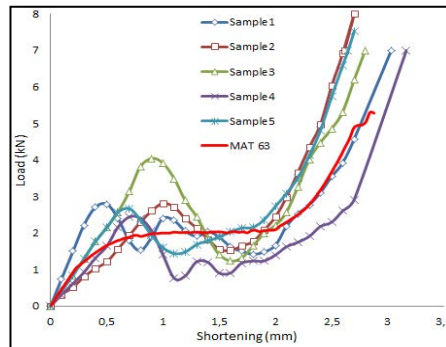


Fig. 7. Loi de comportement identifiée sur la base d'essais dynamiques de compression [4].

Cependant, les essais récents menés sur des échantillons osseux et sur des résines bio-fidèles ont révélé un comportement osseux significativement plus fragile dans la gamme de vitesse de la balistique que dans celle de la dynamique rapide. L'augmentation de la vitesse de déformation entraîne généralement une fragilisation des matériaux, comme dans le cas présent. Il s'agira donc de réévaluer la loi de comportement de l'os afin de prendre en compte la fragilité accrue du comportement osseux aux vitesses de déformation encore plus élevées. Par ailleurs la personnalisation des substituts est envisagée (Fig. 8).

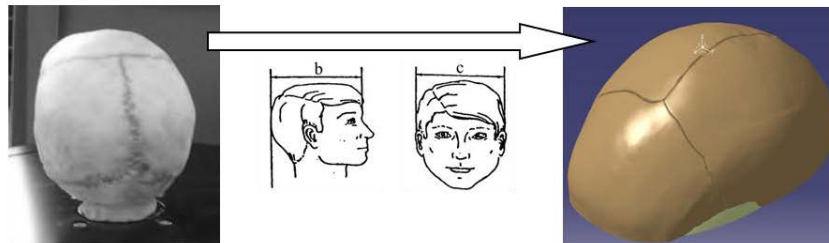


Fig. 8. Substitut personnalisable.

3.2. Cas test : Impact d'une boule rigide sur plaque élasto-plastique

L'objectif de ce cas test est multiple. Il s'agit d'une part d'évaluer les capacités des méthodes de représentation de la rupture / fragmentation associées à la MEF et aux SPH. Pour la MEF, il s'agit d'éroder les éléments lorsqu'un critère défini par l'utilisateur est atteint, alors que la rupture est intrinsèque pour les particules SPH. D'autre part, il s'agit de sélectionner une technique de discrétisation appropriée pour modéliser le substitut. Le problème considéré consiste en l'impact normal d'une boule rigide contre une plaque déformable en cuivre (Tableau 2). Le diamètre de la boule est de 0.1m, alors que les dimensions de la plaque sont de 0.5m par 0.5m. Le comportement de la plaque métallique est décrit par une loi élasto-plastique multi linéaire. La vitesse d'impact du projectile est de 280 m/s. Il est maillé à l'aide de 7000 éléments hexaédriques. Le contact entre le projectile rigide et la plaque est supposé parfait et sans frottement. Le calcul est lancé dans chacun des cas pendant 2.5 ms.

Lorsqu'une discrétisation MEF de la plaque est employée, le maillage est constitué de 100000 EF hexaédriques. Le maillage est raffiné au centre de la plaque, zone de pénétration du projectile, pour favoriser une description précise de la perforation à l'aide de la technique d'érosion (Fig. 9). Ici le critère de rupture choisi est une déformation plastique maximale : les éléments dépassant 40% de déformation plastique sont érodés ($\epsilon_{erosion} = 40\%$).

Lorsqu'une discrétisation SPH de la plaque est employée, un remplissage en particules est effectué au centre des éléments du maillage EF (Fig. 9).

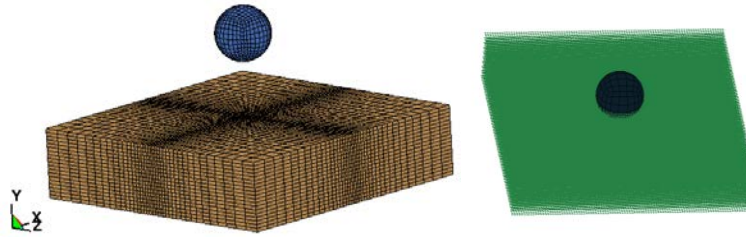


Fig. 9. Discretisation de la plaque : (a) EF et (b) SPH

La configuration déformée montrant le trajet du projectile après perforation de la plaque et les débris qui en résultent et les isovaleurs de la déformation plastique équivalente pour quatre états successifs d'impact, sont montrées respectivement sur les Figs 10, 11.

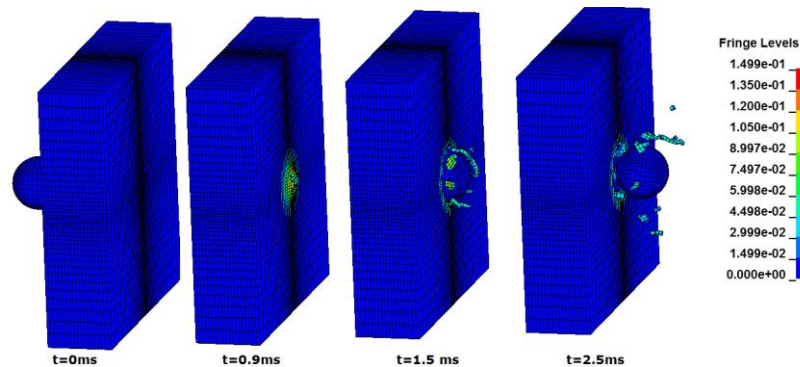


Fig. 10. Répartition de la déformation plastique équivalente (MEF).

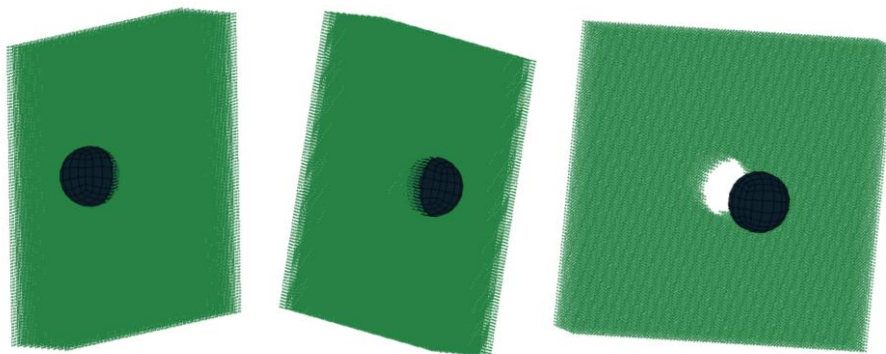


Fig. 11. Perforation de la plaque (SPH).

La capacité de la technique d'érosion à modéliser qualitativement la perforation de la plaque métallique par le projectile est démontrée, pourvu que la taille EF soit suffisamment faible. Les fragments obtenus à l'aide de la discrétisation SPH sont qualitativement moins conséquents. Un réglage plus précis des paramètres de la méthode semble nécessaire. Il s'agira alors de disposer de résultats expérimentaux, provenant d'essais balistiques sur résines pour pouvoir sélectionner la technique numérique la plus adaptée pour représenter la rupture et la fragmentation du substitut.

4. Conclusion et perspectives

La sensibilité de la méthode SPH à la technique de remplissage employée est importante. La méthode de remplissage basée sur une géométrie simple est la plus appropriée pour limiter l'erreur. Cependant, dans le cas de la modélisation de la géométrie d'un projectile et d'un substitut réel, cette option de remplissage ne sera pas disponible. Il serait donc nécessaire de mailler avec un soin particulier la géométrie complexe du substitut, avant d'employer l'une des techniques de remplissage alternative.

Par ailleurs, il semble à ce stade peu propice de discrétiser le projectile en SPH. En effet les grandes déformations du projectile sont surestimées par rapport à la MEF, qui est plus en adéquation avec les résultats expérimentaux. Ce serait particulièrement problématique dans un cas de figure tel que celui du champignonage. Si le projectile est blindé, il n'est certainement pas nécessaire d'avoir recours au SPH, car il ne serait pas susceptible de se déformer de manière significative (ni de se fragmenter). Le seul cas problématique semble donc être celui de la fragmentation du projectile.

A ce stade, la MEF semble être la technique de discrétisation la plus appropriée pour modéliser le projectile, c'est-à-dire au moins tant que le projectile ne se fragmente pas. Des réglages plus poussés semblent nécessaires pour trancher entre la méthode SPH et la MEF pour le substituer.

D'autres cas tests sont prévus pour choisir les techniques de discrétisation les plus adaptées à la modélisation d'un substitut de tête sous impact balistique. En effet, il s'agira d'évaluer la capacité des techniques de discrétisation à représenter la perforation d'un multi-matériau (crâne-cerveau-scalpe). De même, il s'agira également d'évaluer les phénomènes intervenant dans le cadre de l'impact balistique d'une boîte remplie de gélatine dont la paroi est constituée d'un multi-matériau. Par ailleurs, les tests pourront être effectués dans le cadre d'impact normaux ou obliques. Les capacités des discrétisations de type Eléments Discrets (ED) et SPH coque, disponibles dans le code de calcul explicite EUROPLEXUS [6, 7], pourraient également être évaluées. Finalement, des méthodes de couplage pourraient être employées de manière à bénéficier des avantages des différentes techniques de discrétisation (capacité de fragmentation, prise en compte des conditions aux limites, temps de calcul).

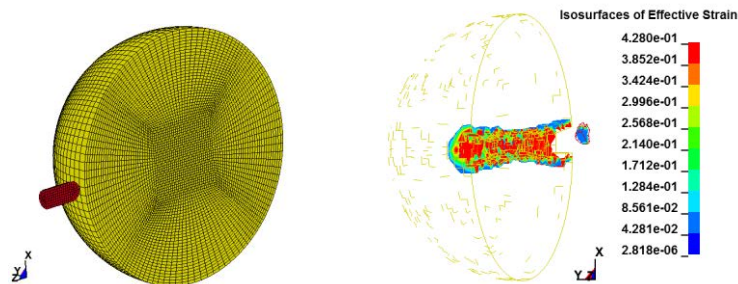


Fig. 12. Maillage EF d'un projectile déformable impactant une boule déformable.

Références

- [1] M.J. Thali, B.P. Kneubuehl, U. Zollinger, R. Dirnhofer, A study of the morphology of gunshot entrance wounds, in connection with their dynamic creation, utilizing the "skin-skull-brain model". *Forensic Science International*, 125, 2002, pp. 190–194.
- [2] Kneubuehl B P, Coupland R M, Rothschild M A, Thali M J, *Wundballistik, Grundlagen und Anwendungen*, 3e éd., Ed. Springer, 2008.
- [3] C. Marechal, F. Bresson, G. Haugou. Development of a numerical model of the 9mm parabellum fmj bullet including jacket failure, *Engineering Transactions*, 59(4), pp. 263-272, 2011.
- [4] J. Halgrin, S. Shiri, C. Marechal, G. Haugou, F. Bresson, T. Colard. Experimental and numerical characterisation of the mechanical behaviour of the cranial bone. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 15(S1), pp. 313-315, 2012.
- [5] S. Ma, X. Zhang, X.M. Qiu. Comparison study of MPM and SPH in modeling hypervelocity impact problems. *International Journal of Impact Engineering*, 36(2), pp. 272-282, 2009.
- [6] F. Caleyron, A. Combescure, V. Faucher, S. Potapov. Une méthode sans maillage pour la modélisation des interactions fluide-structure: Application à la rupture d'un réservoir sous impact, CSMA 2011.
- [7] S. Potapov, V. Faucher. Endommagement et ruine des structures renforcées sous impact, CSMA 2011.