

Simulation numérique de la propagation d'une onde de choc issue d'une explosion en champ libre et son interaction avec un modèle biomécanique humain

M. Bodo¹, S. Roth¹

¹ Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F90010 Belfort, France, {michele.bodo,sebastien.roth}@utbm.fr

Résumé — Les chargements liés à l'explosion sont fréquents dans le domaine militaire avec des conséquences plus ou moins sévères sur les structures en interaction avec cette sollicitation. Dans le contexte de protection du combattant, la compréhension de ce phénomène physique est important dans l'élaboration de systèmes de protection et pour prévenir les traumatismes liés aux chargements du "blast primaire". Dans ce contexte, ce papier décrit l'étude numérique d'une onde de souffle et son interaction avec un modèle biomécanique du corps humain, en utilisant les notions de similitudes.

Mots clés — Explosion, Similitudes, Biomécanique.

1 Introduction

La détonation d'une charge explosive consiste en une libération soudaine d'énergie qui génère une onde de souffle appelée en anglais blast, qui se propage à partir de la source d'explosion[1]. Les ondes de souffle s'apparentent à des ondes de chocs se propageant à des vitesses élevées et mettant en évidence des surpressions importantes. La compréhension de ce phénomène non linéaire et son interaction avec le corps humain est donc nécessaire afin de réduire les risques de blessures dans les domaines militaire ou civil.

Les effets de l'explosion sur le corps humain sont généralement classifiés en quatre catégories : le blast primaire dû à la surpression, le blast secondaire lié à la projection et l'accélération des objets de l'environnement de la charge explosive qui peuvent heurter le corps et provoquer des traumatismes contondants ou pénétrants, les effets du blast tertiaire sont dus aux flux d'air chauds et à la propagation des gaz entraînant la projection des victimes à terre ou contre des structures environnantes, et enfin les effets du blast quaternaire sont essentiellement des brûlures, l'asphyxie, l'inhalation des gaz toxiques [2]. Nous nous intéressons principalement dans cette étude aux effets du blast primaire liés à l'onde de souffle elle-même et donc à la surpression qui affecte particulièrement les organes corporels contenant du gaz comme les poumons, l'oreille interne et le tube digestif.

Pour étudier les risques de blessures du corps humain suite à l'explosion, la littérature liste un certain nombre d'études qui peuvent être séparées en deux catégories. La première catégorie concerne les tests expérimentaux utilisant des animaux avec des capteurs pour mesurer les paramètres mécaniques [3]. Pour palier aux problèmes éthiques liés à l'utilisation d'animaux dans les expérimentations, la deuxième catégorie concerne des simulations numériques avec les modélisations de l'environnement explosif couplé à des modèles biomécaniques [4].

Outre ces modèles numériques, des analyses semi-empiriques ont également été développées permettant de décrire l'onde de souffle. Ces analyses sont basées sur une distance réduite fonction de la distance à l'explosif et de la masse de TNT et prennent en compte des paramètres physiques et mécaniques des configurations de l'explosion, comme le type d'explosif, la masse, la distance à l'explosif, la surpression relative en interaction avec le sol ou d'autres structures.

En se basant sur la distance réduite et sur les notions de similitude, ce travail consiste à modéliser l'onde de pression en champ libre, par la méthode des éléments finis. L'interaction de l'onde de choc avec un modèle biomécanique du thorax humain appelé HUByx est également modélisée en se basant sur un test expérimental de la littérature. Les résultats sont évalués en termes de pics de pression dans les organes

internes qui peuvent être à l'origine de sévères traumatismes thoraciques.

2 Méthodes

2.1 Onde de pression et similitudes

2.1.1 Caractéristiques de l'onde de souffle

Le terme onde de souffle est utilisé pour décrire l'onde de choc résultant d'une détonation. La propagation en espace libre peut être représentée par l'équation de Friedlander.

$$P = P^+ \cdot \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) \cdot e^{\left(\frac{-bt}{T^+}\right)} \quad (1)$$

où P est la pression en fonction du temps, P^+ est le pic de surpression, T^+ est la durée de la surpression et b une constante. L'évolution de la pression statique en un point de l'espace, au passage de l'onde de blast est donnée par la Figure 1.

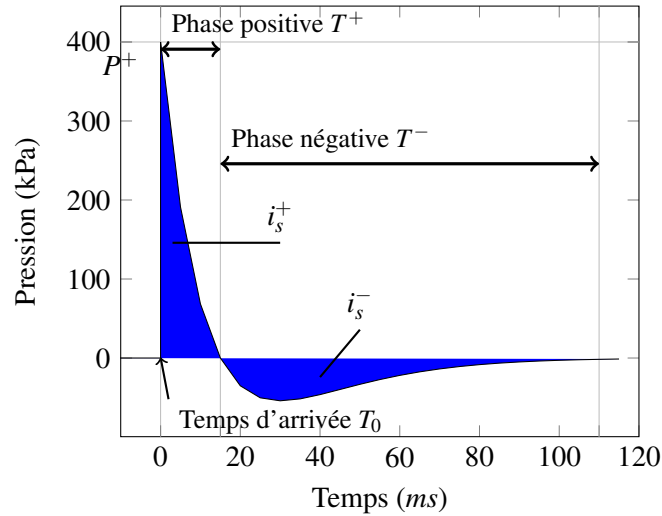


FIGURE 1 – Evolution de pression au passage de l'onde de choc avec $P^+ = 400\text{kPa}$, $T = 15\text{ms}$ et $b = 1$

L'évolution de la pression au cours du temps comporte une phase de surpression et une phase de dépression par rapport à la pression ambiante.

2.1.2 Lois de similitude

Afin de déterminer les caractéristiques d'une onde de choc issue d'une détonation à une échelle réelle en se basant sur des essais effectués à l'échelle réduite, les lois de similitudes sont utilisées. Ces lois ont d'abord été introduites par Hopkinson [5] avant d'être généralisées par Sachs [5].

En ce qui concerne la similitude de Hopkinson [6], les conditions de l'air ambiant (pression, température, densité, célérité du son) sont invariables entre l'échelle réelle et l'échelle réduite. La pression (P), l'impulsion réduite ($\frac{I}{E^{\frac{1}{3}}}$) et la durée réduite ($\frac{t}{E^{\frac{1}{3}}}$) sont des fonctions de la taille réduite de la source ($\frac{R_0}{E^{\frac{1}{3}}}$) et de la distance réduite λ .

$$\lambda = \frac{r}{E^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

La similitude d'Hopkinson est illustrée par la Figure 2. Un observateur situé à une distance r du centre de la source sphérique d'explosion d'énergie E et de rayon R_0 , sera soumis à une onde de choc avec les amplitudes ΔP^+ et ΔP^- , de durées positive et négative t^+ et t^- , d'impulsions positive et négative I^+ et I^- . Un observateur placé à la distance kr du centre de la source d'explosion d'énergie k^3E et de rayon kR_0 sera soumis à une onde de choc avec les mêmes amplitudes ΔP^+ et ΔP^- , de durées positive et négative kt^+ et kt^- et d'impulsions positive et négative kI^+ et kI^- . Les distances et les temps sont multipliés par un même facteur, k . La distance réduite λ (voir Eq 2) est souvent introduite comme paramètre de similitude.

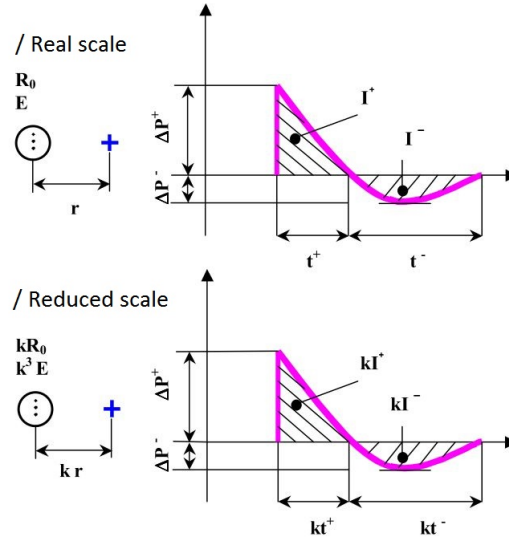


FIGURE 2 – Similitude d'Hopkinson entre une explosion réelle et sa modélisation à échelle réduite, extrait de Trelat [6]

Les similitudes d'Hopkinson vont servir de base pour modéliser la configuration réduite d'explosion à partir d'une configuration réelle du test de Merkle et al. [7]. Outre ces similitudes plusieurs modèles ont été développés permettant de caractériser la surpression maximale générée par la détonation de charges explosives solides, le TNT dans notre cas. Ces modèles ont été établis sous forme d'équation et sont basés sur la distance réduite Z [$m.kg^{-\frac{1}{3}}$].

$$Z = \frac{r}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

avec r la distance au centre de la charge explosive et, W est la masse de charge explosive en kg de TNT.

2.1.3 Équations semi-empiriques

Brode (1955) [8] a introduit les equations suivantes pour les champs proches, moyens et lointains :

$$P_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad bar; \quad (P_s > 10 bar) \quad (4)$$

$$P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad bar; \quad (0.1 < P_s < 10 bar) \quad (5)$$

Newmark et Hansen (1961) [9, 10, 11] ont proposé :

$$P_s = 6784. \frac{W}{R^3} + 93. \left(\frac{W}{R^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

avec R en m et W en tonnes de TNT.

Henrych (1979) [12] a introduit d'autres expressions :

$$P_s = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad bar; \quad (0.05 \leq Z(m.kg^{-\frac{1}{3}}) \leq 0.30) \quad (7)$$

$$P_s = \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad bar; \quad (0.3 \leq Z(m.kg^{-\frac{1}{3}}) \leq 1) \quad (8)$$

$$P_s = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad bar; \quad (1 \leq Z(m.kg^{-\frac{1}{3}}) \leq 10) \quad (9)$$

Baker(1983)[13] a proposé une approche générale avec les équations suivantes :

$$P_s = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2 \right]^{0.5} \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2 \right]^{0.5} \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad bar \quad (10)$$

Mills (1987) [6] a établi la relation suivante :

$$P_s = \frac{108}{Z} - \frac{114}{Z^2} + \frac{1772}{Z^3} \quad 10^{-2} \text{ bar} \quad (11)$$

Les équations 4 à 11 ont été utilisés pour valider nos résultats numériques de propagation de l'onde de choc en espace libre.

2.2 Modèle éléments finis de la propagation de l'onde pression

2.2.1 Propagation en champ libre

La formulation eulérienne a été utilisée pour la modélisation du milieu aérien afin d'éviter les distorsions du maillage liées à la très forte sollicitation. Le maillage consiste en un block fluide de dimension $2.8m * 1.8m * 2.8m$ avec 4 708 440 éléments briques.

La loi hydrodynamique a été utilisée pour modéliser l'explosif et l'air, dont l'équation d'état est donnée par la relation 12.

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (12)$$

L'air étant considéré comme un gaz parfait, l'équation 12 devient alors :

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (13)$$

avec $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$. E est l'énergie interne massique ρ et ρ_0 sont les masses volumiques instantanée et initiale.

$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, and $C_4 = C_5 = (\gamma - 1)$. Dans notre simulation, $\gamma = 1.403$, $E = 0.2MPa$ et $\rho_0 = 1.22 \cdot 10^{-6} g/mm^3$.

L'explosif a été modélisé avec l'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee. Cette équation décrit le phénomène thermomécanique de l'explosion.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_1 \cdot V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega E}{V} \quad (14)$$

avec A, B, R_1, R_2 et ω les paramètres de l'équation d'état. V est le volume relatif et E l'énergie interne de l'explosif par unité de volume.

Le premier objectif est de comparer les surpressions obtenues avec deux explosifs de masses différentes en équivalent TNT. Deux simulations numériques ont été réalisées : la première utilise une masse de C4 de $m_1 = 2268g$ qui correspond à une masse de $3.039kg$ en équivalent TNT, c'est la masse de référence utilisée dans l'expérimentation de Merkle et al. [7]. La deuxième simulation à échelle réduite utilise une masse d'explosif $m_2 = 0.098kg$ de TNT. Les profils de pression seront donnés pour des distances $d_1 = 2.30m$ pour le modèle à échelle réelle et une distance $d_2 = 0.73m$ pour le modèle à échelle réduite. Les deux configurations de calcul sont résumées dans le tableau ci-après :

TABLE 1 – Propriétés de l'explosif dans les deux configurations de simulation

	Modèle réel	Modèle réduit
Masse de la charge l'explosif en equivalent TNT (kg)	3.039	0.098
Distance au centre de l'explosif (m)	2.30	0.73

La masse m_2 a été obtenue en utilisant l'équation 15.

$$\frac{d_1}{(m_1)^{\frac{1}{3}}} = \frac{d_2}{(m_2)^{\frac{1}{3}}} \quad (15)$$

2.2.2 Interaction avec le modèle biomécanique

Le modèle éléments finis HUByx (Hermaphrodite Universal Biomechanics yx-model) illustré dans les figures 3 à 5 a été utilisé pour évaluer le pic de pression dans les différents organes du corps. Le modèle HUByx a été développé au sein de notre laboratoire de recherche et a déjà été validé pour des impacts automobiles et en balistiques grâce à des tests expérimentaux de la littérature [14, 15]. Le profil de pression obtenu lors de la simulation à l'air libre a été utilisée comme chargement pour la reproduction numérique du test de Merkle [7].

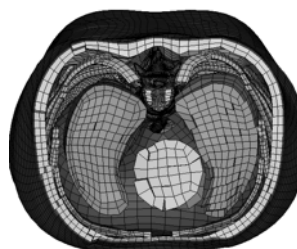
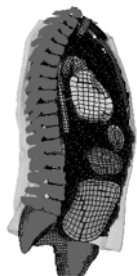


FIGURE 3 – Vue de coupe du modèle HUByx FIGURE 4 – Section transverse du modèle HUByx

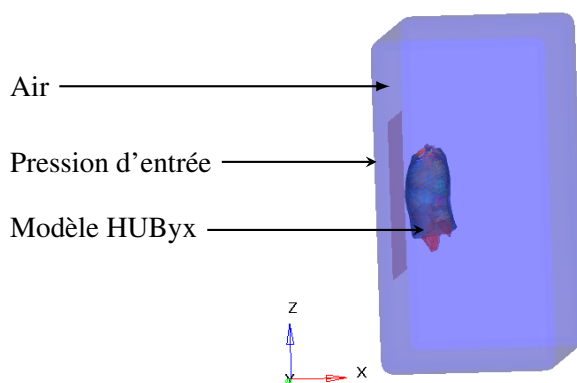


FIGURE 5 – Le modèle HUByx et son environnement

Les lois matériaux utilisées pour le modèle HUByx sont présentées dans le tableau 2.

TABLE 2 – Lois matériaux implémentées dans le modèle biomécanique HUByx.

Tissues	Material model	Density (g/mm^3)	Bulk Modulus (MPa)	Short time shear modulus (G)	Long time shear modulus (G)	Beta (β)	Young's Modulus (MPa)	Poisson ratio	Yield stress (MPa)
Soft tissues	Visco-elastic Boltzman	0.001	744	0.065	0.1				
Aorta	Elastic	0.001					25	0.3	
Trachea	Elastic	0.001					25	0.3	
Diaphragm	Elastic	0.001					3	0.3	
Muscles	Elastic	0.001					1-10	0.3	
Skin	Elastic	0.001					31.5	0.45	
Inter-organs space / fat	Elastic	0.001					0.5	0.45	
Abdomen/ intestine	Elastic	0.001					0.5	0.45	
Spongy bone	Elastic	0.001					50	0.4	
Cortical bone	Elastic-plastic Johnson-Cook	0.001					14000	0.3	70
Cartilage	Elastic	0.001					50	0.3	
Intervertebral disc	Elastic	0.00125					5	0.3	

3 Résultats

3.1 Comparaison de pic de pression pour différentes distances réduites

La figure 6 montre l'évolution de pic de pression en fonction de différentes distances réduites pour les deux configurations d'explosion à l'air libre, présentées dans le tableau 1. La courbe en trait plein représente le modèle réel et la courbe en trait discontinu le modèle numérique réduit. Les deux courbes sont superposables.

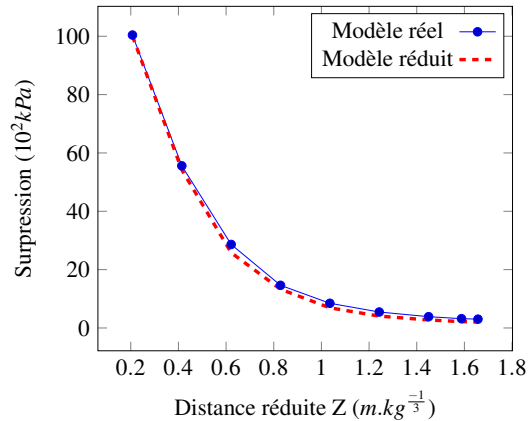


FIGURE 6 – Comparaison entre les modèles numériques réel et réduit basés sur les charges expérimentales de Merkle et al.[7]

3.2 Validation de la propagation en champ libre et comparaisons avec les modèles analytiques

La courbe d'évolution du pic de pression en fonction des distances réduites obtenues en figure 6 a été tracée avec les courbes issues des équations semi-empiriques de la littérature (Equations 4 -11).

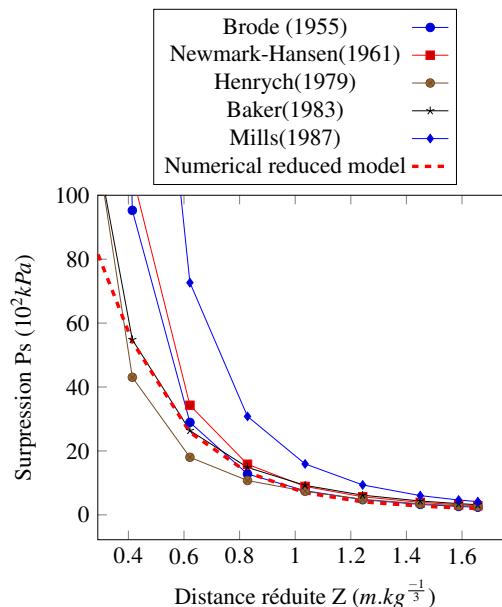


FIGURE 7 – Comparaison du modèle numérique réduit avec les modèles semi-empiriques de la littérature pour les mêmes distances réduites.

Pour les différentes distances réduites représentées, notre modèle numérique correspond bien aux modèles de la littérature.

3.3 Interaction de l'onde de choc avec le modèle HUByx

Le profil de pression résultant de la simulation dans l'air a été utilisé comme chargement pour simuler l'interaction de l'onde avec le modèle éléments finis HUByx. L'onde se propage alors dans le modèle et les pics de pressions sont mesurés dans le poumon gauche, l'estomac et le foie conformément aux expérimentations de Merkle. Les résultats du pic de surpression dans les organes sont comparés aux résultats expérimentaux de Merkle [7].

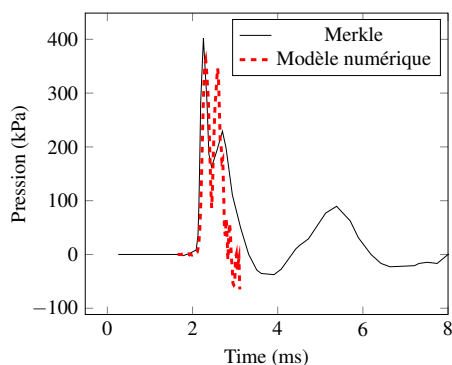


FIGURE 8 – Évolution de la pression dans le poumon gauche en fonction du temps

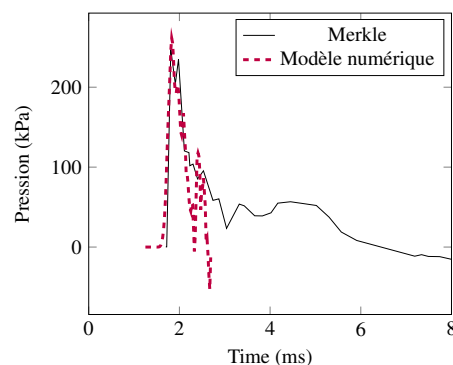


FIGURE 9 – Évolution de la pression dans l'estomac en fonction du temps

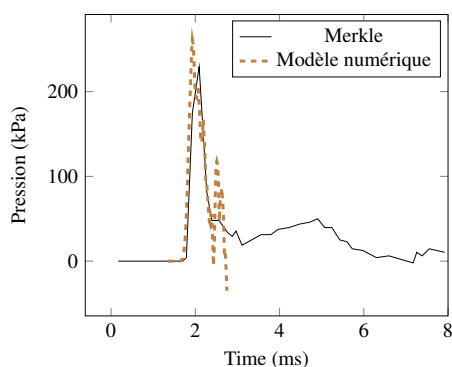


FIGURE 10 – Évolution de la pression dans le côté droit du foie en fonction du temps

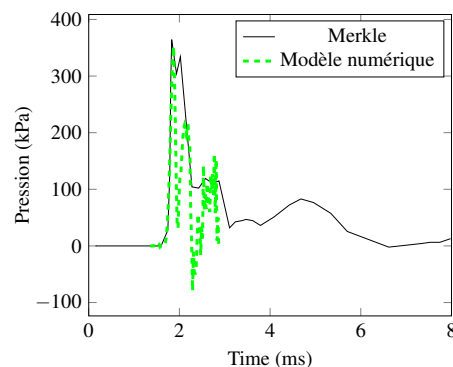


FIGURE 11 – Évolution de la pression dans le côté gauche du foie en fonction du temps

4 Discussion

Les courbes d'évolution du pic de pression en fonction de différentes distances réduites obtenues avec les configurations réelles et réduites d'explosion de TNT sont assez proches, cela permet de valider numériquement le concept de similitude d'ondes de détonation.

En plus de la validation numérique de la propagation de l'onde de choc dans l'air grâce aux modèles semi-empiriques de la littérature, cette étude va plus loin dans le concept de similitude en utilisant la pression obtenue dans une configuration "réduite" (voir Table 1) comme chargement lors de l'interaction avec un modèle EF humain. La réalisation de cette interaction s'est faite grâce au test expérimental de Merkle. En effet, Merkle a utilisé un modèle substitut du torse humain (Human Surrogate Torso Model - HSTM) lors d'une charge explosive de C4 et les réponses du HSTM ont été mesurées à l'aide des capteurs de pression dans le poumon gauche, l'estomac et le foie [7].

Nos résultats de simulation s'accordent bien avec les résultats expérimentaux de Merkle aussi bien en termes de pic de pression que de durée de surpression. Il est à noter que nous nous sommes intéressés uniquement au premier pic de pression, sachant qu'il est considéré dans la littérature comme le principal

risque du blast primaire [16].

La réflexion de l'onde de pression n'a pas été pris en compte dans cette étude, cet aspect pourrait faire partie d'une étude supplémentaire.

Même si cette étude s'intéresse à l'interaction entre une onde de choc et un modèle biomécanique humain, le même principe pourrait très bien s'appliquer à d'autres structures pouvant être soumis à un chargement explosif comme les structures mécaniques ou les bâtiments.

5 Conclusion

Une étude numérique sur la validation de la propagation de l'onde de choc en espace libre et son interaction avec un modèle du thorax humain a été réalisé. L'utilisation des lois de similitudes a permis de réaliser un modèle de propagation d'onde de choc issue d'une explosion à échelle réduite à partir d'un modèle à échelle réelle. Les résultats obtenus ont permis de valider numériquement le concept de similitude.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Franche-Comté pour le financement de ce travail.

Références

- [1] Kai-Uwe Schmitt, Peter F. Niederer, Duane S. Cronin, Markus H. Muser, and Felix Walz. *Trauma Biomechanics : An Introduction to Injury Biomechanics*. Springer Science & Business Media, 2014.
- [2] Ralph G. DePalma, David G. Burris, Howard R. Champion, and Michael J Hodgson. Blast Injuries. *The New England Journal of Medicine*, 352 :1335–1342, 2005.
- [3] I. Gerald Bowen, E. Royce Fletcher, and Donald R. Richmond. Estimate of Man's tolerance to the direct effects of air blast. *LOVELACE FOUNDATION FOR MEDICAL EDUCATION AND RESEARCH ALBUQUERQUE NM.*, 1968.
- [4] X G Tan, R Kannan, and Andrzej J Przekwas. A Comparative Study of the Human Body Finite Element Model Under Blast Loadings. In *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, number November, pages 829–836, 2012.
- [5] Patrice Bailly. *Chocs et impacts sur les matériaux et les structures*. Lavoisier edition, 2013.
- [6] Sophie Trelat. *Impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2006.
- [7] Andrew Merkle, J. Roberts, Alexis Wickwire, I. Wing, M. Carboni, B. DeCristofano, and M. Maffeo. Evaluation of the human surrogate torso model response to ideal and complex blast loading conditions. In *Personal Armour Systems Symposium (PASS)*, pages 678–687, Quebec City, Canada, 2010.
- [8] Harold L Brode. Numerical Solutions of Spherical Blast Waves. *Journal of Applied Physics*, 26(6) :766–775, 1955.
- [9] T Ngo, P Mendis, A Gupta, and J Ramsay. Blast loading and blast effects on structures — an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7 :76–91, 2007.
- [10] Hrvoje Draganić and Vladimir Sigmund. Blast loading on structures. *Tehnički vjesnik*, 19(3) :643–652, 2012.
- [11] Aristide Awoukeng-goumtcha, Karine Thorat-pierre, and Sébastien Roth. Toward a powerful tool for the prediction of human body trauma under extreme loadings through finite element simulations. *Proceedings of Personal Armour System Symposium (PASS) 2014, Cambridge, UK*, 2014.
- [12] Josef Henrych and Rudolf Major. *The Dynamics of Explosion and Its Use*. Elsevier, No(Amsterdam), 1979.
- [13] Wilfried E. Baker, P.A. Cox, P.S. Westine, J.J Kulesz, and R.A. Strehlow. *Explosion hazards and evaluation. Fundamental Studies in Engineering*, Elsevier, 1983.
- [14] Sébastien Roth, Fabien Torres, Philippe Feuerstein, and Karine Thorat-Pierre. Anthropometric dependence of the response of a Thorax FE model under high speed loading : Validation and real world accident replication. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 110(2) :160–170, 2013.
- [15] Aristide Awoukeng Goumtcha, Michèle Bodo, Lorenzo Taddei, and Sébastien Roth. From military to civil loadings : Preliminary numerical-based thorax injury criteria investigations. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, jul 2015.
- [16] Maria a. Mayorga. The pathology of primary blast overpressure injury. *Toxicology*, 121(1) :17–28, 1997.