

Sujet de thèse

Université d'inscription : Université Polytechnique Hauts de France

Collaborations : Ministère de l'intérieur- CREL / AID (Agence Innovation Défense) / ICB – UMR CNRS 6303 (laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne) / LAMIH – UMR CNRS 8201 (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines) / IRBA (Institut de Recherche Biomédicale des Armées).

Financement : Agence Innovation Défense / Ministère de l'intérieur – CREL

Merci d'envoyer votre candidature à :

- remi.delille@uphf.fr
- Sebastien.roth@utbm.fr

1. Titre ou intitulé de la thèse

Contribution à la prédiction du risque lésionnel de la tête lors de chocs localisés à travers la caractérisation et la modélisation d'impacts balistiques non pénétrants.

2. Objet de la thèse

L'objectif de cette thèse est de contribuer au développement d'un outil de prédictions de blessures de la tête lors d'impacts balistiques non pénétrants. Cette étude développera un outil permettant d'interpréter (en terme lésionnel) les essais sur la tête physique BLSH (Ballistic Load Sensing Headform) utilisée pour l'évaluation des risques lésionnels dans divers contextes tels que les effets arrière du casque, les impacts de projectiles cinétiques à létalité réduite, et plus généralement tous les chocs localisés.

3. Descriptif de la thèse

Les casques de protection balistique sont conçus pour protéger le personnel des forces de l'ordre et de l'armée lors d'impacts en déjouant les menaces entrantes (menaces contondantes, balistiques ou explosives) sans infliger de blessures graves ou mortelles à la tête. Le développement d'une nouvelle génération de casques en matériaux composites avec une haute performance balistique et un faible poids, tels que l'UHMWPE, a amélioré la protection balistique et les aspects ergonomiques pour les forces de l'ordre. Cependant, un inconvénient de ces casques légers est qu'ils augmentent la déformation de la face arrière (BFD, Back Face Deformation) du casque, augmentant ainsi le risque de traumatisme, également connu sous le nom BHBT (Behind Helmet Blunt Trauma). Le BHBT est un type de blessure balistique non pénétrante causée par la BFD de la coque du casque qui peut mettre la vie en danger des forces de l'ordre et de l'armée. Étant donné la nature hautement dynamique et les mécanismes complexes impliqués lors des impacts, il est difficile d'étudier les mécanismes du BHBT.

Les méthodes actuellement utilisées dans l'industrie et dans les normes existantes, telles que la STANAG 2920 et la VPAM HVN, pour évaluer le risque de BHBT reposent sur des mesures effectuées sur des empreintes laissées dans des fausses têtes fabriquées à partir de matériaux déformables tels que la plastiline ou le savon. Cependant, il est important de noter que cette approche, bien que courante, présente des limites significatives et peut être considérée comme minimale dans son efficacité, soulevant des questions sur la validité des résultats obtenus. Cette méthode peut être insuffisante dans la mesure où elle ne capture peut-être pas de manière exhaustive la complexité des interactions entre la coque du casque et la tête lors d'un impact. Les empreintes laissées dans des matériaux déformables peuvent ne pas refléter pleinement la diversité des facteurs impliqués dans le BHBT, notamment la dynamique complexe de la déformation de la coque du casque et son impact sur la tête en situation réelle. En outre, la validité limitée de cette méthode soulève des préoccupations quant à la précision des évaluations de risques BHBT. Les propriétés mécaniques des matériaux déformables peuvent différer de manière significative de celles du crâne humain, et par conséquent, les résultats obtenus peuvent ne pas être représentatifs des véritables risques encourus par le porteur du casque. Par conséquent, il devient impératif d'explorer des approches plus robustes et sophistiquées, telles que l'utilisation de têtes physiques instrumentées ou des modèles numériques avancés, pour obtenir des évaluations plus précises et représentatives du BHBT. Ces méthodes pourraient offrir une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents et contribuer à améliorer la conception des casques de protection, en minimisant de manière plus efficace le risque de traumatisme.

Le ministère de l'intérieur, pour évaluer les casques de protection, utilise une tête physique BLSH (Ballistic Load Sensing Headform) développée par la société Biokinetics.



Figure 1: Biokinetics Ballistic Load Sensing Headform instrumentés de 7 cellules d'effort piézoélectrique

Le BLSH diffère des autres substituts de tête par son instrumentation. La BLSH utilise principalement des réseaux de capteurs piézoélectriques implantés en différentes régions (frontale, pariétale / occipitale et pariétale / temporale) et recouverts d'une peau en polyuréthane, qui permettent de mesurer la force d'impact. Cette mesure est particulièrement pertinente dans le cas du BHBT où la coque du casque en se déformant vient percuter la tête en générant une sollicitation localisée. La BLSH peut également être équipée de capteurs d'accélération linéaires et angulaires au centre de la tête. Quatre zones sont étudiées : avant, arrière, côtés droit et gauche.

La difficulté est de prédire à quoi correspond en termes de traumatisme (du crâne ou du cerveau) une valeur d'effort mesurée. En effet, il est difficile de corrélérer directement les valeurs d'efforts avec un traumatisme. L'objectif de cette thèse est donc de développer un ou plusieurs critères de blessures pour des essais sur BLSH. Pour cela il faudra s'aider de la simulation numérique, de rapports de cas et d'essais sur PMHS (Post Mortem Human Subjects).

4. Programme de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un consortium impliquant le Centre de Recherche et d'Expertise de la Logistique du Ministère de l'Intérieur, le laboratoire LAMIH de l'Université Polytechnique Hauts de France, le laboratoire ICB de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et l'IRBA (Institut de Recherche Biomédicale des Armées). La collaboration entre ces entités remonte à plusieurs années, marquée par la réalisation de deux thèses (celles du Dr. Anthony BRACQ et du Dr. Martin CHAUFER), ainsi qu'une thèse en cours (celle d'Elodie DANCEREL-BOURLON). Ces travaux antérieurs ont significativement contribué à l'élaboration d'outils de prédiction des blessures du corps humain, notamment sur des organes tels que les poumons, le cœur et le squelette thoracique, dans le contexte des traumatismes thoraciques non pénétrants.

Cette thèse proposée traitera donc :

➤ Etude du comportement et de la rupture de l'os crânien et modélisation numérique

- Développement d'un critère de rupture numérique (par la méthode des Eléments Finis) de l'os du crâne humain dépendant de la zone osseuse sollicitée. Ce critère sera identifié à l'aide d'essais existants réalisés sur éprouvettes osseuses (instrumentées de jauges de déformation et corrélations d'images) issues de PMHS.

Le développement d'un critère de rupture basé sur la méthode des éléments finis pour l'os du crâne humain constitue une avancée significative dans la compréhension des mécanismes de traumatisme crânien. Ce critère vise à déterminer les seuils de contrainte et de déformation spécifiques à différentes zones osseuses du crâne, fournissant ainsi des informations cruciales pour la conception et l'évaluation de dispositifs de protection. Pour établir ce critère, des essais ont été réalisés sur des éprouvettes osseuses provenant de Post Mortem Human Subjects (PMHS). En particulier, le LAMIH dispose d'une campagne d'essais d'éprouvettes testées en flexion 3 points à 1 m/s (103 échantillons prélevés sur 7 SHPM). Certaines de ces éprouvettes ont été instrumentées avec des jauges de déformation, permettant une mesure précise des déformations subies par l'os du crâne lors de sollicitations mécaniques. En parallèle, des corrélations d'images ont été employées sur la tranche (l'épaisseur) des éprouvettes pour obtenir le champ de déformation détaillée, enrichissant ainsi les données recueillies.

L'utilisation d'éprouvettes issues de PMHS revêt une importance particulière, car elles reproduisent de manière plus fidèle les propriétés mécaniques de l'os humain. Ces essais ont permis de générer des données expérimentales fondamentales, décrivant le comportement mécanique de l'os du crâne dans des conditions de contrainte spécifiques. Ces données expérimentales serviront de base pour calibrer et valider le modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis.

Le critère de rupture ainsi élaboré sera capable de prendre en compte la variabilité des réponses mécaniques selon les zones osseuses sollicitées. Cette approche différenciée permettra une modélisation plus précise des risques de fracture et de traumatisme en fonction de la localisation de l'impact sur le crâne. Une telle précision dans la caractérisation du comportement mécanique de l'os du crâne est essentielle pour améliorer l'efficacité des dispositifs de protection et réduire les risques de blessures crâniennes.



Figure 2: Exemple de cartographie de prélèvement d'éprouvettes et essais de flexion trois points.

➤ **Recherche d'un critère lésionnel par reconstitution de cas réels**

- Définition de critères de blessures de la tête (crâne et cerveau) en développant un ou plusieurs modèles de têtes EF. Pour cela, il sera nécessaire de répliquer des cas de la littérature issus principalement du domaine balistique.
- Définition de courbes de probabilité d'une rupture de l'os et/ou d'un traumatisme crânio-cérébral en fonction des mesures (efforts et le cas échéant accélérations) issues de la tête physique BLSH (Ballistic Load Sensing Headform)

La définition de critères de blessures pour la tête, englobant à la fois le crâne et le cerveau, repose sur le développement de modèles de têtes basés sur la méthode des éléments finis (EF). Ce processus complexe implique la reproduction fidèle de situations réelles issues de la littérature, notamment dans les domaines automobile et balistique. L'objectif est de créer des modèles EF capables de simuler de manière précise les mécanismes de blessures observés dans ces contextes spécifiques. Pour ce faire, des cas de la littérature, décrivant des accidents ou des impacts balistiques, seront minutieusement répliqués dans les modèles de têtes EF. Ces modèles intègrent des paramètres biomécaniques, des propriétés matérielles et des conditions de chargement spécifiques à chaque situation, permettant ainsi de capturer la diversité des traumatismes crâniens et cérébraux observés dans la réalité. Une étape cruciale consiste à définir des critères de blessures, notamment des seuils de contrainte, de déformation et d'accélération, qui sont susceptibles de déclencher des lésions au niveau du crâne et du cerveau. Ces mécanismes et seuils de blessures « cliniques » sont à corréliser avec les résultats des modèles EF, comparant les données simulées à l'anamnèse et aux données expérimentales disponibles dans la littérature. Parallèlement, pour affiner ces critères, des courbes de probabilité sont établies en fonction des mesures issues de la tête physique BLSH. La BLSH, équipée de capteurs piézoélectriques et d'accéléromètres, permet de recueillir des données en temps réel lors d'impacts. Ces mesures, combinées avec des modèles statistiques avancés, contribuent à définir des courbes probabilistes, offrant une vision plus nuancée des risques de rupture osseuse et de traumatisme crânio-cérébral en fonction des forces appliquées. En résumé, cette approche multidisciplinaire combine la modélisation EF avec des données expérimentales de la BLSH pour définir des critères de blessures de la tête. Cette méthodologie intégrée contribue à une meilleure compréhension des mécanismes de blessures, favorisant ainsi le développement de dispositifs de protection plus efficaces dans le domaine balistique.

➤ **Intégration de la variabilité humaine**

- Prise en compte de la variabilité inter-individuelle des têtes en développant les différents critères proposés auparavant pour les différentes familles de crânes (dolichocéphales, mésocéphale, brachycéphale) ; vers de la personnalisation du crâne humain.

La prise en compte de la variabilité inter-individuelle des têtes constitue une étape essentielle dans le développement de critères de blessures plus précis et adaptés à la diversité anatomique humaine. Pour ce faire, les critères précédemment établis sont étendus à différentes familles de crânes, notamment les dolichocéphales (« gros » crânes), les mésocéphales (crânes de forme moyenne) et les brachycéphales (« petits » crânes), reflétant ainsi la variabilité morphologique naturelle observée dans la population. Chaque famille de crânes présente des caractéristiques anatomiques distinctes, telles que la forme du crâne, l'épaisseur de l'os, la densité, et d'autres paramètres biomécaniques. Ces critères anatomiques spécifiques sont pris en compte dans les modèles de têtes basés sur la méthode des éléments finis, afin de mieux représenter la réponse mécanique propre à chaque type de crâne. La personnalisation du crâne humain implique une adaptation précise des critères de blessures en fonction des caractéristiques individuelles de chaque sujet. Cette approche reconnaît que la réponse aux forces appliquées peut varier considérablement d'une personne à une autre en raison de différences anatomiques et physiologiques. La personnalisation peut être réalisée en intégrant des données spécifiques à chaque individu, telles que des images médicales, des mesures biométriques, ou d'autres informations pertinentes. Ces données sont ensuite utilisées pour ajuster les paramètres du modèle de tête, permettant ainsi une simulation plus précise des réponses mécaniques en fonction des caractéristiques propres à chaque famille de crânes. Cette approche individualisée offre des avantages significatifs dans la conception de dispositifs de protection, car elle permet de mieux anticiper les réponses mécaniques spécifiques à chaque individu. En tenant compte de la variabilité inter-individuelle, les critères de blessures personnalisés contribuent à une approche plus holistique de la sécurité, offrant des solutions de protection plus efficaces et mieux adaptées à la diversité anatomique de la population.

Contacts :

Dr HDR Rémi DELILLE : co-directeur de la thèse	UPHF / laboratoire LAMIH
Prof. Sebastien ROTH : co-directeur de la thèse	UTBM / laboratoire ICB
Dr Olivier MAUZAC	Ministère de l'Intérieur / CREL
Dr HDR Nicolas PRAT	IRBA

5. Références

- [1] Chaufer M., Delille R., Bourel B., Maréchal C., Lauro F., Mauzac O., Roth S. (2023). A new biomechanical FE model for blunt thoracic impact. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, pp. 1152508. [IF=6.064] [DOI=<https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1152508>].
- [2] Chaufer M., Delille R., Bourel B., Maréchal C., Lauro F., Mauzac O., Roth S. (2023). Advancement in numerical modelling of synthetic gel for ballistic impact assessment. *Materials letters*, 135077. [IF=3.574] [DOI=10.1016/j.matlet.2023.135077].
- [3] Bracq A., Delille R., Maréchal C., Bourel B., Lauro F., Roth S., Mauzac O. (2021). On the use of a SEBS polymer gel block as a new ballistic target to assess blunt ballistic impacts: application to a wide range of LLKE projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 153. [IF=4.208] [DOI=<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103874>].
- [4] Bracq A., Maréchal C., Delille R., Bourel B., Lauro F., Roth S., Mauzac O. (2019). A numerical analysis of the risk of rib fractures during blunt ballistic impacts on a human thorax. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 22, pp. 248-250. [IF=1.61]
- [5] Bracq A., Delille R., Bourel B., Maréchal C., Haugou G., Lauro F., Roth S., Mauzac O. (2019). Numerical Recreation of Field Cases on a Biofidelic Human FE Model Involving Deformable Less-Lethal Projectiles. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety* [DOI=<https://doi.org/10.1007/s41314-019-0022-8>].
- [6] Bracq A., Delille R., Maréchal C., Bourel B., Roth S., Mauzac O. (2019). Rib fractures prediction method for kinetic energy projectile impact: from blunt ballistic experiments on SEBS gel to impact modeling on a human torso FE model. *Forensic Science International*, 297, pp. 177–183. [IF=1.974] [DOI=<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.02.007>].
- [7] Bracq A., Haugou G., Delille R., Lauro F., Roth S., Mauzac O. (2017). Experimental study of the strain rate dependence of a synthetic gel for ballistic blunt trauma assessment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72, pp. 138–147. [IF=3.11] [DOI=[doi:10.1016/j.jmbbm.2017.04.027](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.04.027)].
- [8] Auperrin A., Delille R., Lesueur D., Bruyere K., Masson C., Drazetic P. (2014). Geometrical and material parameters to assess the macroscopic mechanical behaviour of fresh cranial bone samples. *Journal of Biomechanics*, 47, pp. 1180-1185, ISSN 0021-9290. [IF=2.716] [DOI=10.1016/j.jbiomech.2013.10.060].
- [9] Maréchal C., Karkar M., Delille R., Haugou G., Bresson F., Colard T. (2013). Original experimental ballistic set-up for mechanical behaviour characterisation of the cranial bone. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 16(S1), pp. 209-210, ISSN 1025-5842. [IF=1.393]
- [10] Delille R., Lesueur D., Potier P., Drazetic P., Markiewicz é. (2007). Experimental study of the bone behaviour of the human skull bone for the development of a physical head model. *International Journal of Crashworthiness*, 12(2), pp. 101-108, ISSN 1358-8265
- [11] Bresson F., Ducouret J., Peyre J., Maréchal C., Delille R., Colard T., Demondion X. (2012). Experimental study of the expansion dynamic of 9 mm Parabellum hollow point projectiles in ballistic gelatine. *Forensic Science International*, 219(1-3), pp. 113-118, ISSN 0379-0738. [IF=2.307]