

**RÉSISTANCE BALISTIQUE DE PANNEAUX EN BÉTON FIBRÉ À ULTRA-HAUTE
PERFORMANCE AUX PROJECTILES ANTIBLINDAGES**

**BALLISTIC RESISTANCE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED
CONCRETE PANELS SUBJECTED TO ARMOR-PIERCING PROJECTILES**

Mémoire soumis à la division des études graduées

du Collège militaire royal du Canada

par

Jeremy Tremblay, cmr

Sous-lieutenant

Dans le cadre de l'accomplissement partiel des critères pour le diplôme de

Maitrise en sciences appliquées en génie civil

Avril 2020

©Le présent mémoire peut être utilisé au ministère de la Défense nationale, mais l'auteur conserve les droits de publications

REMERCIEMENTS

La réussite de ce projet n'aurait pas été possible sans l'appui, l'expertise et le soutien financier de mes codirecteurs de recherche, monsieur Marc-André Dagenais et monsieur Gordon Wight. Leur aide a été grandement appréciée tout au long des deux années d'études afin de compléter ce mémoire bilingue.

Un grand merci aux techniciens du laboratoire de structures, monsieur Dexter Gaskin et monsieur Steve VanVolkingburgh. Leur aide précieuse a été grandement utile pour la conception des coffrages et des panneaux, et pour les essais de caractérisation des produits utilisés. J'aimerais aussi remercier Decebal Michaud pour son aide durant les gâchées.

Je tiens à souligner la contribution de la compagnie King, qui a fourni les matériaux nécessaires à la construction des spécimens en BFUP. Un merci spécial à monsieur Julian Pena Cruz. Son support et son expertise lors des gâchées ont été grandement éducatifs.

Finalement, j'aimerais remercier monsieur Normand Levert et monsieur Bratislav Mitric du Centre d'essais techniques de la qualité pour leur soutien lors des essais au laboratoire canadien de recherche sur les explosifs de Canmet. Merci également à monsieur Richard Bowes du laboratoire qui a grandement contribué à la réussite des essais, sans oublier monsieur Larry Goheen et son équipe pour leur expertise.

RÉSUMÉ

La protection du personnel et des structures face aux explosions et projectiles, spécifiquement les menaces balistiques de calibre léger, est un enjeu critique pour les Forces armées canadiennes (FAC), mais aussi pour les autres agences gouvernementales et forces armées à l'international. L'utilisation de systèmes composés de panneaux protecteurs offre une approche modulaire efficace pour contrer ses menaces. Bien que ces panneaux puissent être fabriqués d'une variété de matériaux, le béton fibré à ultra-haute performance (BFUP) est un matériau récent bien adapté pour résister aux explosions et aux impacts. Le matériau présente une ductilité en flexion et est environ cinq fois plus performant en compression et jusqu'à dix fois plus performant en traction que le béton ordinaire. Les panneaux en BFUP peuvent être des composantes efficaces et efficaces de systèmes conçus pour fournir une protection adéquate à une variété de dangers, y compris les menaces balistiques.

L'objectif de cette étude était d'évaluer et d'analyser la résistance balistique des panneaux de BFUP aux tirs d'armes légères. Les essais ont été réalisés sur des panneaux de 350 mm par 350 mm d'épaisseur variable coulés à partir de BFUP disponible sur le marché. Les paramètres expérimentaux évalués dans cette étude comprenaient la teneur en fibres (3 et 4 %) et l'épaisseur des panneaux (40, 50 et 60 mm). Les panneaux ont été soumis à des munitions antiblindages de 7,62 mm X 51 mm. Les essais ont été effectués à deux vitesses de projectile différentes et à des distances de décharge équivalentes représentant des conditions rapprochées (10 m) et des conditions éloignées (300 m).

Des essais expérimentaux ont été effectués sur un champ de tir intérieur et les procédures étaient conformes aux normes de l'Organisation du traité de l'Atlantique nord (OTAN) et des FAC. La distance de tir était limitée physiquement à 10 mètres et, afin de simuler des vitesses d'impact en conditions éloignées, la quantité de poudre propulsive dans la munition d'essai a été modifiée pour limiter la vitesse du projectile. Un radar Doppler et un écran photo-électrique ont été utilisés pour mesurer les vitesses du projectile avant l'impact. Une caméra à haute-vitesse placée à l'arrière du panneau a enregistré des vidéos qui ont été utilisées pour évaluer les débris générés et la vitesse résiduelle du projectile. Une carte de culbutage (*yaw card*) et une plaque témoin ont également été utilisées pour étudier le comportement du projectile après l'impact. La configuration expérimentale a permis de faire des comparaisons et des évaluations scientifiques des performances de résistance balistique des mélanges de BFUP spécifiques à cette étude et des épaisseurs de panneaux.

Au total, 36 panneaux ont été mis à l'essai au cours de cette recherche, et chaque panneau était soumis à un seul projectile antiblindage de 7,62 mm X 51 mm. 18 panneaux ont été testés avec des vitesses d'impact d'environ 815 m/s, représentant des conditions rapprochées de 10 m. Une deuxième série de 18 panneaux a été testée avec des vitesses d'impact approximatives de 615 m/s correspondant aux conditions éloignées avec une distance équivalente de 300 m. Lorsqu'ils ont été soumis à des vitesses d'impact plus élevées en conditions rapprochées, tous les panneaux ont été perforés pendant les essais par les projectiles perforants. Toutefois, les panneaux présentaient un niveau élevé d'absorption d'énergie, avec une valeur moyenne de 2548 à 3013 J pour des épaisseurs de panneaux de 40 mm à 60 mm respectivement. De plus, la vitesse résiduelle des projectiles sortant des spécimens de 60mm a été considérablement réduite, passant de 816 à 483 m/s. Les spécimens soumis aux conditions éloignées ont également été perforés, à l'exception d'un panneau de 60 mm d'épaisseur en BFUP avec 4 % de fibre par volume. Ce panneau a freiné et retenu le noyau du projectile. Des déformations minimales ont été observées à l'arrière de ce panneau et une énergie d'absorption maximale de 2066 J a été mesurée. L'énergie absorbée moyenne des panneaux perforés se situait entre 1706 et 2034 J pour les panneaux de 40 à 60 mm respectivement. La vitesse résiduelle du projectile sortant a été considérablement réduite pour chaque essai, en particulier pour les panneaux de BFUP de 3% de fibre par volume de 60 mm, où la vitesse a été réduite, en moyenne, de 614 m/s à 18 m/s, sans perforation de la plaque témoin à l'arrière de la cible. Dans l'ensemble, pour les deux séries de

panneaux représentant conditions rapprochées et éloignées, un minimum de débris a été observé (moins de 140 g) après l'impact, ce qui démontre la capacité des fibres du BFUP de limiter la quantité et le type de débris qui pourrait causer des blessures suivant un impact.

Des modèles de prédiction de base et avancés ont été utilisés pour estimer l'énergie résistante des panneaux en fonction des caractéristiques du matériau telles que la teneur en fibres, l'épaisseur et les propriétés mécaniques. Un modèle de prédiction de *Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)* a été développé à l'aide du logiciel commercial Autodyn afin de simuler la performance balistique des panneaux de BFUP soumis à des vitesses de projectiles antiblindages en conditions rapprochées. Le modèle a été étalonné à l'aide de données expérimentales obtenues au cours de l'étude. Les propriétés des matériaux incorporées dans le modèle proviennent de la littérature et des essais de caractérisation effectués dans le cadre de cette recherche sur les cylindres de BFUP. Le modèle permet d'évaluer et d'approximer le niveau de dommage tout au long de l'impact, de mesurer les dimensions du cratère avant et arrière et d'observer le comportement du projectile pendant et après le processus de perforation. De plus, la simulation facilite les mesures de l'énergie en cause et prédit la vitesse d'impact et la vitesse résiduelle du projectile. En plus du volume des débris pouvant être approximé, le modèle permet l'analyse du cheminement des fissures durant et après le processus de perforation du projectile.

ABSTRACT

Protection of personnel, equipment and structures against explosions and projectiles, specifically ballistic threats from small arms fire, is an essential responsibility not only of the Canadian Armed Forces (CAF) but also other government agencies and military forces worldwide. Protective panels as components of a larger system offer an effective modular approach to counter these threats. Although panels can be made from a variety of materials, ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), a recent development, is a material well-suited to resist blast and impact loads. The material exhibits ductility in bending and performs approximately five times better than ordinary concrete in compression and up to ten times better in tension. Panels made of UHPFRC have the potential to be effective and efficient components of systems designed to provide adequate protection to a variety of hazards including ballistic threats.

The aim of this study was to assess and analyze the ballistic resistance performance of UHPFRC panels to small arms fire. The tests were conducted on 350 mm by 350 mm panels of variable thickness cast from commercially available UHPFRC. Experimental panel parameters evaluated in this study included fibre content (3 and 4%) and the thickness of panels (40, 50, and 60 mm). The panels were subjected to 7.62 mm X 51 mm armoured-piercing rounds. Testing was conducted at two different projectile velocities and associated equivalent discharge distances representing Urban Operations (10 m) and Field Operations (300 m).

Experimental testing was conducted on an indoor range and procedures were consistent with North Atlantic Treaty Organization (NATO) and CAF standards. The shooting distance was physically limited to 10 m and in order to simulate impact velocities consistent with field operations, the propulsive powder ratio in the test round was modified to limit the velocity of the projectile. A Doppler Radar and photo-electric screen system was used to monitor project velocities pre-impact. A high-speed video camera positioned in the back of the panel recorded images that were used to evaluate the residual velocity of the projectile and generated debris. A yaw card and witness panel were also used to study the projectile behaviour post-impact. The experimental setup allowed scientific comparisons and evaluations of the ballistic resistance performances of the specific UHPFRC mixes and panel thicknesses.

A total of 36 panels were tested during this research where each panel was impacted by a single 7.62 mm X 51 mm armoured-piercing round. 18 panels were tested with projectile impact velocities of approximately 815 m/s, representing urban operational discharge distances of 10 m. A second serial of 18 panels was tested with approximate impact velocities of 615 m/s consistent with Field Operations with an equivalent representative discharge distance of 300 m. When subjected to the higher projectile velocities consistent with Urban Operations, all panels were perforated during the tests by the armor-piercing rounds. However, the panels demonstrated a high capacity of energy absorption, with an average value of 2548 to 3013 J for panel thicknesses of 40 mm to 60 mm respectively. In addition, the residual velocity of the projectiles exiting the 60 mm specimens were considerably reduced, from 816 to 483 m/s. Specimens shot under the field operational conditions were also perforated, with the exception of one 60 mm thick panel made of UHPFRC with 4% of fibre per volume which retained the penetrator. Minimal deformations were observed at the back face of this panel and a maximal absorption energy of 2066 J was measured. The average absorbed energy of the perforated panels was between 1706 and 2034 J for the 40 to 60 mm panels respectively. The residual velocity of the projectile exiting specimens was significantly reduced for every test, particularly for 60 mm panels made of UHPFRC with 3% of fibre per volume, where velocity was decreased, in average, from 614 m/s to 18 m/s with no perforation of the witness panel at the back of the target. Overall, for both panel series representing urban and field operational discharge distances, minimal

debris (less than 140 g) was observed after impact, which demonstrates the capacity of fibres in UHPFRC to limit the type of debris that could cause post-impact injuries.

Basic and advanced predictive models were used to estimate the resistant energy of the panels according to material characteristics such as fibre content, thickness, and mechanical properties. An advanced predictive Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) model was developed using the commercial software Autodyn in order to simulate the ballistic performance of UHPFRC panels subjected to armor piercing projectile velocities consistent with urban operational discharge distances. The model was calibrated with experimental data obtained during the study. Material properties incorporated in the model were sourced from literature and from characterization tests performed as part of this research on UHPFRC cylinders. The model enables the evaluation and the approximation of the damage level throughout the impact, the measurements of the front and rear crater dimensions, and the observation of the projectile behaviour during and after the perforation process. In addition, the simulation facilitates the measurements of energy involved, and predicts the impact and residual velocity of the projectile. In addition, the debris volume was approximated from the model and the behaviour of the crack pattern in the cross-section of the panel during and after the impact was simulated.

DÉCLARATION D'ARTICLES EN CO-RÉDACTION

L'auteur de ce mémoire, présenté dans un format par article tel proposé par les Directives de rédaction de thèse du Collège militaire royal du Canada, est le Sous-Lieutenant Jeremy Serge Tremblay, avec les superviseurs monsieur Marc-André Dagenais et monsieur Gordon Wight comme co-auteurs. Ceux-ci ont fourni l'aide, les conseils et les recommandations nécessaires à la compilation de ce mémoire. L'auteur de l'article planifie la soumission de celui-ci dans une revue révisée par des pairs et les co-auteurs seront inclus.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT.....	iv
DÉCLARATION D'ARTICLES EN CO-RÉDACTION.....	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABBRÉVIATIONS	xiii
LISTE DES SYMBOLES	xv
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Contexte du projet.....	1
1.2. But.....	2
1.3. Étendue de la recherche	2
1.4. Organisation du présent document.....	5
1.5. Explication des annexes	5
2. REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1. Béton fibre à ultra-haute performance	7
2.1.1. Définition	7
2.1.2. Constituants du BFUP.....	7
2.1.3. Propriétés mécaniques.....	9
2.2. Balistique	14
2.2.1. Définition	14
2.2.2. Munitions	14
2.2.3. Balistique terminale	17
2.3. Protection.....	18
2.3.1. Définition	18
2.3.2. Normes.....	18
2.4. Performance balistique du BFUP.....	20
2.4.1. Montages expérimentaux	20
2.4.2. Performance balistique du BFUP.....	22
2.5. Modèle numérique	29
3. MANUSCRIPT: ‘‘BALLISTIC RESISTANCE OF UHPFRC PANELS SUBJECTED TO ARMOR-PIERCING PROJECTILES’’	33

3.1.	Abstract	33
3.2.	Introduction.....	33
3.2.1.	General.....	33
3.2.2.	Impact Resistance of UHPFRC.....	33
3.2.3.	Protective Materials Standards.....	34
3.3.	Research Objectives and Scope	34
3.4.	Experimental Program	35
3.4.1.	Specimens	35
3.4.2.	Materials	36
3.4.3.	Test Setup, Instrumentation, Procedures.....	37
3.4.4.	Numerical Model	39
3.5.	Results and Discussion	41
3.5.1.	Resistance of the Panels against AP Projectile at Close Range	41
3.5.2.	Resistance of the Panels against AP Projectiles at Long Range	53
3.6.	Conclusions.....	56
3.7.	Acknowledgement	57
3.8.	References.....	58
4.	Conclusions et recommandations.....	60
4.1.	Conclusion	60
4.2.	Recommandations.....	61
5.	Bibliographie.....	62
	ANNEXES.....	67
	CURRICULUM VITÆ.....	143

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Morts causés par des batailles, selon le type de conflit, entre 1989 et 2018 [1]	1
Figure 1-2 : Utilisations des gabions HESCO comme moyen de protection [2]	2
Figure 1-3 : Panneaux de BFUP de (1) 40mm, (2) 50mm, et (3) 60mm	3
Figure 1-4 : Photo et radiographie de la Nammo Lapua AP 11 LR (7,62mm x 51 AP).....	4
Figure 1-5 : Schéma du montage expérimental de CanmetLCRE	4
Figure 2-1: Exemple de proportions par volume d'un mélange de BFUP comparé à un BO [15]	8
Figure 2-2: Augmentation de la compacité d'un mélange granulaire [15]	8
Figure 2-3: a) Fibres à bouts ondulés, b) fibres ondulées, c) fibres avec bouts en crochets, et d) microfibres laitonnées [22].....	9
Figure 2-4 : Étapes du comportement en compression uniaxiale du BFUP [16]	10
Figure 2-5: Comportement en traction directe des BRF [9]	10
Figure 2-6: Contrainte de traction d'un béton ordinaire et de différents BRF [16].....	11
Figure 2-7: Orientation des fibres : a) parallèle et b) perpendiculaire à la direction de l'impact	11
Figure 2-8 : Analyse numérique démontrant la répartition des efforts selon différents dimensionnements d'os pour l'ETD : (a) portion centrale de 152,4 mm incluant un changement linéaire ; (b) portion centrale de 50,8 mm ; (c) portion centrale de 101,6 mm ; (d) portion centrale de 152,4 mm ; (e) portion centrale de 203,2 mm ; (f) portion centrale de 152,4 mm incluant 76,2 mm aux deux extrémités [34]	12
Figure 2-9: Dimensions suggérées pour le spécimen en forme d'os et le montage expérimental pour l'ETD [34].....	13
Figure 2-10: Essai de traction direct : a) dimensions du spécimen et b) le montage expérimental utilisé [37]	13
Figure 2-11 : Système de coordonnées pour la balistique [39]	14
Figure 2-12 : Les parties d'une munition [39].....	15
Figure 2-13 : Coupe de section de différents types d'ogive : a. solide, b. balle chemisée, c. balle à pointe souple, d. balle semi-gainée concave, e. balle chemisée à noyau dur, f. balle traçante. [39].....	15
Figure 2-14: a) 7,62 mm x 51 et quelques variantes, b) 5,56 mm x 45 et quelques variantes [42]	16
Figure 2-15: a) Calibre 7,62 mm x 39 utilisé dans plusieurs recherches, et b) les dimensions [43].....	16
Figure 2-16 : Modes de rupture possible selon différentes situations d'impact [44].....	17
Figure 2-17: Montage d'essai standardisé par NIJ 0108.01 [47].....	19
Figure 2-18 : Angle d'impact [47].....	20
Figure 2-19: Montage expérimental utilisé à l'université technique de la République Tchèque, à Prague [51]	20
Figure 2-20 : Arme semi-automatique CZ 858 [52]	21
Figure 2-21 : Support et la cible après impact [31].....	22
Figure 2-22 : Dommages d'un panneau de 50mm de béton à ultra-haute performance, devant (a) et derrière (b) [54]	23
Figure 2-23 : Dommages de panneaux de BFUP de 1, 2 et 3% de fibres respectivement de gauche à droite, avec une épaisseur de 50mm [54]	23
Figure 2-24: Différents esquisses post-impact selon différents teneurs en fibres [51]	24
Figure 2-25: La réponse à l'impact contre un projectile déformable de : (a) BFUP avec 2% microfibres d'acier, (b) béton à ultra haute performance sans fibre, and (c) béton à haute performance sans fibre [43]	25
Figure 2-26 : Types de réponse possible après un impact d'un projectile sur une cible de béton : (a) fissurations - (i) avant - (ii) arrière, (b) effritement, (c) pénétration, (d) écaillage, (e) éjection d'un bouchon, et (f) perforation [43]	26

Figure 2-27 : Énergie de résistance d'un panneau de béton lors de l'impact [55]	27
Figure 2-28 : Mode de ruptures du béton [55]	27
Figure 2-29: Processus de rupture durant l'impact de (a) béton à haute résistance, (b) béton fibré et (c) béton à ultra-haute performance, avec (d) l'échelle de dommage, à un temps $t = 0,2$ ms [43]	30
Figure 2-30 : Coupe de section du projectile non-déformable (a) réel et (b) modélisé [43]	32
Figure 2-31 : Comparaison (a) d'un essai numérique sur Autodyn et (b) d'essais réels d'un projectile déformable impactant un panneau de BFUP de 2% de fibres par volume [43]	32
Figure 3-1: NIJ 018.01 Standardised Test Setup [13].....	34
Figure 3-2: (a) Specimens Dimensions (units in mm) and (b) Panels Before Testing.....	35
Figure 3-3: Photography and Radiography of the 7.62mm x 51 Armor Piercing 11 Long Range	37
Figure 3-4: Test Setup for Ballistic Impact.....	37
Figure 3-5: Specimen Support	38
Figure 3-6: Velocity-Distance of 7.62 mm x 51 Armor Piercing 11 Long Range of NAMMO [18]	38
Figure 3-7: Reference System of Coordinates of the Experimental Setup	39
Figure 3-8: ANSYS Autodyn Model of Penetrator (a) Dimensions (mm), (b) SPH Model, and (c) Photography of Post-Impact Penetrator	40
Figure 3-9: Rear Crater after Impact of Specimen UF3-60-1	42
Figure 3-10: Example of (a) Stripped Jacket after Impact Embedded in Panel and (b) Same Jacket Removed from Panel.....	44
Figure 3-11: High-Speed Camera Footage Presenting Typical Penetrator Exiting Rear Panel of Specimen UF4-60-3, (a) Before Perforation, (b) Penetrator Exiting Panel, (c) Before Impact with Witness Panel, and (d) after Perforation of Witness Panel.....	44
Figure 3-12: Average Residual Velocity of Penetrator for Close Range Tests	45
Figure 3-13: Average Absorbed Energy of Panels for Close Range Tests	45
Figure 3-14: 40 mm Specimen after Impact (a) Front View, and (b) Rear View (Specimen UF3-40-2) ...	46
Figure 3-15: 60 mm Specimen after Impact (a) Front View, and (b) Rear View (Specimen UF4-60-2) ...	46
Figure 3-16: Mass Debris after Impact for UF3 & UF4 Series.....	47
Figure 3-17: Failure Modes of Concrete Target [11].....	48
Figure 3-18: Section View of 60mm Panel of (a) UF3 Series and (b) UF4 Series	48
Figure 3-19: Crack Propagation in (a) 50mm Panels of UHPC [5] and (b) 50mm Panels of UHPFRC 3% (Specimen UF3-50-1)	49
Figure 3-20: (a) Jacket and Core before Impact and (b) after Impact from Numerical Simulation.....	51
Figure 3-21: Post-Impact Damage Contour of 60mm Panel on Autodyn.....	52
Figure 3-22: Post-Impact Material Status Contour of 60mm on Autodyn.....	52
Figure 3-23: Specimen FF4-60-3 after Impact (a) Front and (b) Rear.....	54
Figure 3-24: Tumbling of the Penetrator at the Exit of Specimen UF4-60-2	55
Figure 3-25: Comparison of K Values for the 11m Versus the 300m (Equivalent Velocity) Impact with AP Rounds	56
Figure A-1 : Dimensions des panneaux	A - 1/6
Figure A-2: Mélangeur Cumflow RP100XD HD [14]	A - 3/6
Figure A-3 : Schéma du montage expérimental du champ de tir intérieur de CanmetLCRE.....	A - 5/6
Figure A-4 : Support utilisé pour les essais d'impact des panneaux de BFUP	A - 5/5
Figure F-1 : Dimensions du (a) Panneau, (b) Noyau et (c) Chemise	F - 2/6

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Programme expérimental de la recherche.....	5
Tableau 2-1: Exemple des constituants d'un BFUP de Polytechnique de Montréal [17]	8
Tableau 2-2 : Caractéristiques de quelques variantes de la 5,56 et de la 7,62 [42]	16
Tableau 2-3 : Résumé de test pour chaque niveau de protection désiré selon le NIJ Standard 0108.01 [47]	19
Tableau 2-4 : Descriptions des symboles des équations pour le modèle de Hwang & al. [55]	28
Tableau 2-5 : Comparaison des paramètres K et K/\emptyset^2 selon différents calibres déformables et non- déformable, et différents mélanges de bétons à ultra-haute performance [43] [49].....	29
Tableau 2-6 : Paramètres du BFUP utilisés pour le développement du matériau dans Autodyn [43]	31
Tableau A-1 : Constituants nécessaires pour les gâchées des produits UP-F3 et UP-F4 (unité en kg)A - 2/6	
Tableau A-2 : Résultats des essais de caractérisation des produits UP-F3 et UP-F4 comparés aux valeurs de la compagnie	A - 4/6
Tableau A-3 : Spécifications de la prise de vidéo par la caméra haute-vitesse	A - 6/6
Tableau B-1 : Nomenclature utilisée dans le projet, et nomenclature utilisée par le laboratoire CanmetLCRE	B - 1/47
Tableau C-1 : Résultats bruts de la recherche provenant du rapport de CETQ et CanmetLRCE.....	C - 1/3
Tableau C-2: Distance entre le centroïde de la plaque témoin et du centre de la perforation (sur l'axe X seulement) et distance corrigée	C - 2/3
Tableau C-3 : Résultats corrigés des vitesses résiduelles, énergies cinétiques résiduelles et énergies absorbées utilisés dans la recherche.....	C - 3/3
Tableau D-1 : Résultats des paramètres K et K/\emptyset^2 , ainsi que des épaisseurs minimales requises théoriques des essais.....	D - 2/2
Tableau E-1 : Résultats comparatifs des essais expérimentaux et du modèle de prédiction Hwang et al. [55] et Mod. Hwang et al. [56]	E - 11/11
Tableau F-1 : Setup - Controls - Wrapup Criteria for Autodyn Model.....	F - 1/6
Tableau F-2 : Informations utiles pour le maillage et critère de solution	F - 2/6
Tableau F-3 : Propriétés des matériaux utilisées dans le modèle numérique.....	F - 3/6

Table de l'article

Table 3-1: Specimen Nomenclature and Test Parameters	36
Table 3-2: Average Material Properties of UP-F3 and UP-F4 from Laboratory Tests and Published Values from Manufacturer	36
Table 3-3: Photron FastCam SA-Z High-Speed Video Camera Specifications for the Study.....	39
Table 3-4: ANSYS Autodyn Material Parameters.....	41
Table 3-5: Close Range Terminal Ballistic Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels.....	42
Table 3-6: Close Range Energy Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels	43
Table 3-7: Results of K and K/Φ^2 for UF3 Series and UF4 Series	49
Table 3-8: Resistant Energy of Prediction Model and Comparison of Hwang et al. Model [11] and Mod. Hwang et Al. Model [10] for UF3 and UF4 Series.....	50
Table 3-9: Impact Results of Numerical Simulation on ANSYS Autodyn Compared to Experimental Results	51

Table 3-10: Long Range Average Terminal Ballistic Results Caused by AP Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels 53

Table 3-11: Long Range Energy Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels 54

Table 3-12: Resistant Energy of Prediction Model and Comparison of Hwang et al. Model [11] and Mod. Hwang et Al. Model [10] for FF3 and FF4 Series 56

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ACI	American Concrete Institute
AP	Armor-Piercing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFUP	Béton fibré à ultra haute performance
BO	Béton ordinaire
BRF	Béton renforcé de fibres
CAD	Computer-Aided Design
CAF	Canadian Armed Forces
CanmetCERL	Canadian Explosives Research Laboratory
CanmetLCRE	Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs
CETQ	Centre d'essais technique de la qualité
CMR	Collège militaire royal du Canada
CSA	Canadian Standards Association
EOS	Equation of State
ERDC	Engineer Research and Development Center
ETD	Essai de traction direct
FAC	Forces armées canadiennes
FS	Fumée de silice
HS	Haut résistance aux sulfates
LR	Long Range
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MPS	Modular Protective Structure

NIJ	National Institute of Justice
OTAN	Organisation du traité de l'Amérique du Nord
QETE	Quality Engineering Test Establishment
RHT	Riedel, Hiermaier, Thoma
RMC	Royal Military College of Canada
SI	Système international
SPH	Smooth Particles Hydrodynamics
SPL	Superplastifiants
UHPC	Ultra High Performance Concrete
UHPFRC	Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete
US	United States
USA	United States of America

LISTE DES SYMBOLES

E_{ad}	Énergie absorbée ou dissipée (J)
E_c	Énergie cinétique (J)
E_c	Énergie de l'écaillage, Scabbing Energy (J)
$\%E_d$	Pourcentage d'énergie dissipée (%)
E_K	Énergie cinétique (J)
E_m	Énergie mécanique (J)
E_p	Énergie potentielle (J)
E_r	Énergie résiduelle (J)
E_R	Énergie de résistance (J)
E_S	Énergie de l'effritement, Spalling Energy (J)
E_T	Énergie du tunnel, Tunnelling Energy (J)
E/C	Ratio Eau/Ciment
f_c	Résistance à la compression (MPa)
fps	Images par seconde, Frame per Second
f_t	Résistance à la traction (MPa)
g	Constante gravitationnelle (m/s^2)
g	Gramme
g/cm^3	Gramme par centimètre cube
GPa	Gigapascal
h	Hauteur (m)
J	Joule
J/m^2	Joule par mètre carré

K	Symbole pour $\Delta E/t$
K/\emptyset^2	Ratio de $\Delta E/t$ et du calibre au carré
kg/m^3	Kilogramme par mètre cube
kPa	Kilopascal
l_f	Longueur d'une fibre (mm)
m	Masse (kg)
m	Mètre
mg	Milligramme
mm	Millimètre
MPa	Mégapascal
ms	Milliseconde
m/s	Mètre par seconde
μsec	Microseconde
R^2	Determination Coefficient (Excel)
t_{\min}	Épaisseur minimale
v	Vitesse (m/s)
v_a	Vitesse absorbée (m/s)
v_i	Vitesse initiale (m/s)
v_r	Vitesse résiduelle (m/s)
W	Watt
°	Degré
°C	Degré Celsius
$\Delta E/t$	Ratio de l'énergie cinétique absorbée et épaisseur Kinetic Energy Loss to Thickness Ratio (J/mm)
\emptyset	Diamètre du projectile (mm)
\emptyset_f	Diamètre d'une fibre (mm)

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte du projet

Les forteresses médiévales ou encore les bunkers de la Seconde Guerre mondiale sont des témoins de l'histoire qui nous rappelle que le principe de protection ne date pas d'hier. En considérant le nombre de conflits dans le monde, l'incertitude politique dans certaines régions du globe et l'amélioration continue des armes, l'ingénieur civil doit s'adapter afin de concevoir des structures protectrices adaptées aux réalités d'aujourd'hui. En effet, la violence est encore bien présente sur cette planète. Les conflits impliquant des organisations terroristes, les guerres civiles et les guerres politiques causent des dizaines de milliers de victimes chaque année depuis 1989 tel que montré sur la Figure 1-1 [1]. Par conséquent, les moyens de protections, autant pour les êtres humains que pour les équipements ne cessent d'être améliorés afin de rivaliser avec les nouvelles armes.

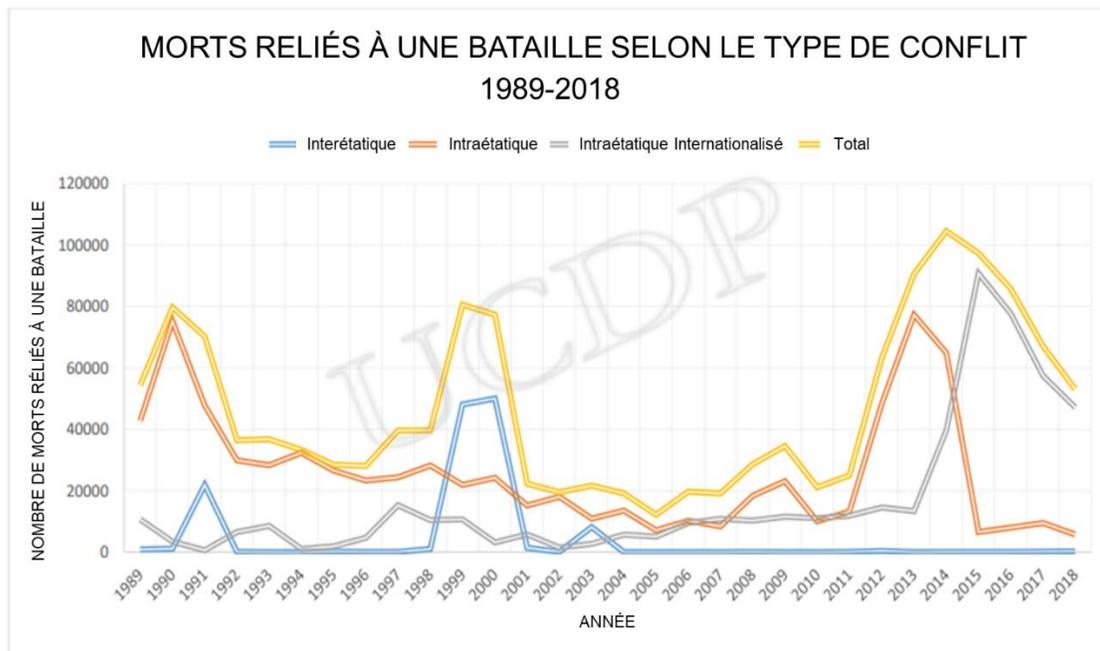


Figure 1-1 : Morts causés par des batailles, selon le type de conflit, entre 1989 et 2018 [1]

Depuis plusieurs années, une des structures protectrices fréquemment utilisées par les forces armées canadiennes (FAC) et ses alliés est le système de gabion [2]. Ces gabions, de la compagnie HESCO, tels qu'illustrés sur la Figure 1-2, peuvent être érigés afin de créer un périmètre de protection. « Depuis la première guerre du Golfe, ces bacs faits de textiles et d'acier ont été déployés dans des lieux ardu et éloignés créant de simples murs de périmètre à des fortifications de bases plus permanentes, défendant le personnel, l'équipement et les atouts critiques de l'armée américaine, de la Défense britannique, du Corps des Marines des É-U, de la branche aérienne des Forces armées des É-U et de l'Organisation du traité de l'Atlantique Nord (OTAN). » [2] Il a été démontré que ces gabions sont efficaces, mais sont toutefois à usage unique. En effet, même si les gabions sont intacts, le transport à lui seul peut engendrer des bris.



Figure 1-2 : Utilisations des gabions HESCO comme moyen de protection [2]

L'utilisation d'un système de protection réutilisable, efficace et léger pourrait s'avérer particulièrement avantageuse pour les FAC d'un point vu économique et pratique. Les FAC ont besoin d'un système modulaire facile à installer et qui s'intègre bien aux installations existantes. De nombreux dispositifs structuraux protecteurs sont disponibles, mais la plupart sont complexes d'un point de vue logistique et sont à usage unique. Comme le mentionne le Major Sean Matten, de la *Royal Academy of Engineering*, « il y a de la place pour l'amélioration et plus de recherche est nécessaire pour développer des structures protectrices efficaces qui allègent le fardeau logistique, qui peuvent être érigées rapidement en terrain accidenté, et sans coûter excessivement cher » [3].

1.2. But

L'objectif de ce projet de recherche est d'analyser et de démontrer la performance balistique de panneaux en béton fibré à ultra-haute performance (BFUP) aux projectiles antiblindages courants. Deux types de mélange ont été utilisés, l'UP-F3 [4] et l'UP-F4 [5] de *KING Construction Products, SIKA Company*. Les panneaux ont été testés avec des projectiles ayant une grande capacité de perforation. Deux paramètres de tirs ont été sélectionnés. Le premier simulant un tir effectué à une distance de 10 mètres afin de recréer des conditions équivalentes au combat en milieu urbain. Le second simulant un tir effectué à une distance de 300 mètres, distance typique recréant des conditions équivalentes au combat en milieu ouvert.

1.3. Étendue de la recherche

Un programme expérimental ainsi qu'une phase de modélisation numérique ont été complétés dans le cadre de ce projet afin d'analyser la résistance balistique de panneaux en BFUP face à des munitions antiblindages de petit calibre. Le BFUP utilisé dans la fabrication des panneaux provient d'un mélange local canadien. Deux dosages de fibres (3 et 4%) et trois épaisseurs de panneaux (40, 50 et 60 mm) ont été étudiés. Des tirs réels ont été effectués en milieu contrôlé et ont simulé 2 environnements de combat, conditions équivalentes au combat en milieu urbain et en milieu ouvert, soit un tir effectué à une distance de 10 m et à une distance de 300 m respectivement.

Un total de 36 panneaux de 350 x 350 mm ont été fabriqués et coulés au laboratoire de structures du département de génie civil au Collège militaire royal du Canada (CMR). Les dimensions ont été sélectionnées en fonction du montage expérimental utilisé pour les essais balistiques. Les épaisseurs des panneaux varient de 40 mm, 50 mm et 60 mm. Des exemples de panneaux sont présentés à la Figure 1-3.

Ces épaisseurs ont été dimensionnées en fonction de recherches similaires et afin de caractériser la capacité d'absorption des BFUP sélectionnées. Des panneaux de petite taille ont été sélectionnés afin de faciliter le transport entre le CMR et le lieu des essais et de respecter les normes sur les essais balistiques de matériaux de protection. Deux dosages de fibre ont été utilisés : 3% de fibres par volume et 4% de fibres par volume. Les fibres d'acier utilisées ont 13 mm de longueur et 0,2 mm de diamètre.

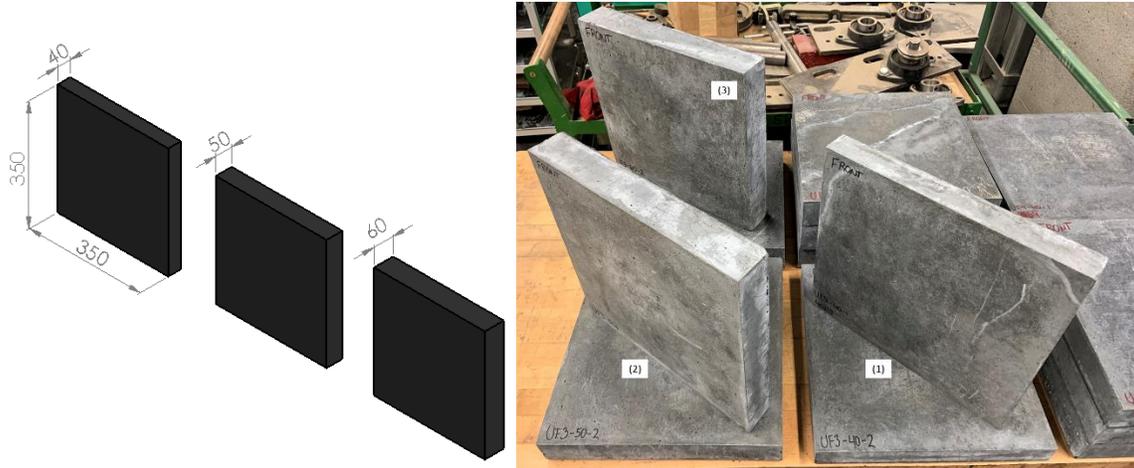


Figure 1-3 : Panneaux de BFUP de (1) 40mm, (2) 50mm, et (3) 60mm

Les essais expérimentaux ont été effectués au Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs (CanmetLCRE), un laboratoire des Ressources naturelles du Canada responsable des explosifs civils. Les tirs ont tous été effectués à une distance de 10 mètres en raison de la configuration et des limites du montage expérimental du laboratoire. Cependant, certains paramètres ont été ajustés afin de simuler l'effet d'un tir effectué à une distance de 300 m. Les essais balistiques ont été réalisés en conditions idéales dans un laboratoire intérieur afin de limiter les forces externes pouvant agir sur le projectile et de limiter les changements de températures et le taux d'humidité sur les spécimens.

Des munitions de type Nammo Lapua AP 11 LR (7,62 mm x 51 AP) ont été utilisées [6]. Il s'agit d'un calibre léger antiblindage avec un noyau en alliage de tungstène, présentée sur la Figure 1-4. La mise à feu des projectiles a été effectuée à partir d'un récepteur universel New Lenox, surmonté d'un canon .308 Winchester. Deux vitesses de tirs initiales ont été utilisées, 815 m/s afin de simuler des conditions de combat en milieu urbain ou encore un tir effectué à une distance de 10 m et 615 m/s afin de simuler des conditions de combat en milieu ouvert soit un tir effectué à une distance de 300 m. La quantité de poudre à canon a été ajustée afin d'obtenir la vitesse désirée. Les vitesses à la sortie du canon et à l'impact ont été mesurées à l'aide d'un système d'instrumentation balistique composé d'un radar Infinition BR-3502 Doppler et du système Oehler System 83 (avec 3 écrans photoélectriques Model 57). Un schéma du montage expérimental utilisé à la CanmetLCRE est présenté à la Figure 1-5.

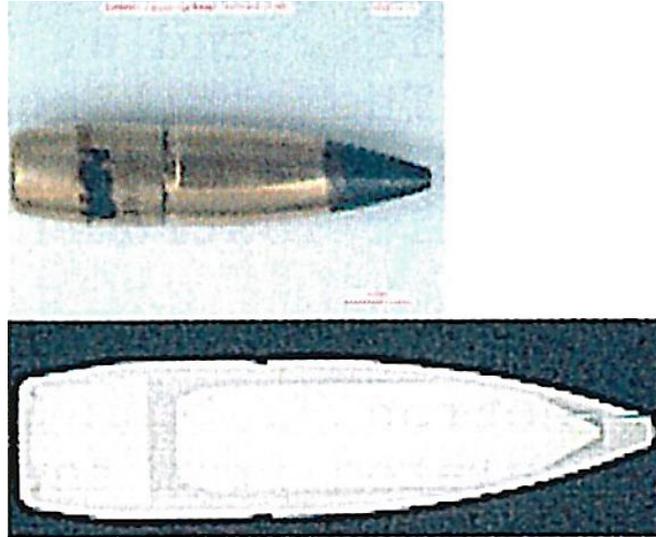


Figure 1-4 : Photo et radiographie de la Nammo Lapua AP 11 LR (7,62mm x 51 AP)

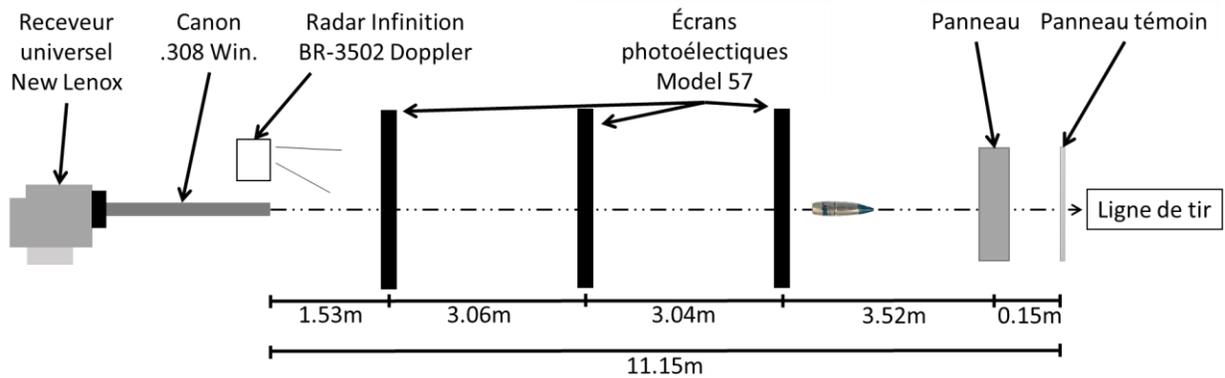


Figure 1-5 : Schéma du montage expérimental de CanmetLCRE

Sur les 36 panneaux testés, 18 ont subi un tir simulant des conditions de combat en milieu urbain (distance de tir 10 m) et 18 ont subi un tir simulant des conditions de combat en milieu ouvert (distance de tir 300 m). Chaque panneau a été soumis à un seul tir au centre et la vitesse résiduelle du projectile, advenant la perforation, a été mesurée à l'aide d'une caméra haute vitesse. Le programme expérimental est présenté au Tableau 1-1, montrant les vitesses d'impact en fonction de la distance équivalente.

Tableau 1-1 : Programme expérimental de la recherche

Vitesse d'impact m/s	Distance équivalente m	Épaisseur mm	Nombre de spécimen par dosage de fibres
815	10	40	3 x 3%
			3 x 4%
		50	3 x 3%
			3 x 4%
		60	3 x 3%
			3 x 4%
615	300	40	3 x 3%
			3 x 4%
		50	3 x 3%
			3 x 4%
		60	3 x 3%
			3 x 4%

Avec l'avancement des méthodes d'analyse numérique, les capacités analytiques des logiciels permettent des analyses détaillées d'événement de contraintes élevées à grande vitesse. Ainsi, un modèle numérique a été développé avec la composante Autodyn de ANSYS afin de simuler la performance balistique de panneaux en BFUP en conditions équivalente au combat urbain. Ce modèle a été calibré avec les essais expérimentaux. Les propriétés des matériaux incorporées au modèle proviennent de la littérature et de données obtenues lors d'essais de caractérisation performés en laboratoire au CMR sur des éprouvettes de BFUP. Ce modèle a été développé afin d'évaluer et d'approximer la quantité de dommage, la taille du cratère à l'avant et à l'arrière du panneau ainsi que d'observer le comportement du projectile durant et après perforation. De plus, des modèles de prédictions récents valides pour le BFUP ont été utilisés afin de valider le modèle.

1.4. Organisation du présent document

Ce mémoire par article a été écrit en respect des directives de rédaction de thèse du CMR [7]. Le corps du mémoire présente un total de quatre chapitres. Le premier chapitre introduit l'ensemble du mémoire. Il présente le sujet, le but et l'étendue de la recherche. Le second chapitre est la revue de la littérature. Ce chapitre est un examen complet des sujets pertinents à la recherche. Le troisième chapitre présente l'article, rédigé en anglais. Il présente la recherche, les résultats, les analyses et les conclusions. Finalement, le dernier chapitre conclut et résume le mémoire. De plus, les annexes complètent le mémoire avec des informations non présentées dans l'article.

1.5. Explication des annexes

Étant donné le format du mémoire, certaines informations pertinentes à la recherche ne sont pas présentées. Les annexes ont pour but de fournir au lecteur tout le matériel ayant servi à cette recherche. Tout d'abord, l'Annexe A présente la conception des panneaux, les paramètres de la recherche, le montage expérimental et les procédures d'essais.

Le rapport produit par la CETQ et CanmetLCRE est présenté à l'Annexe B. Ce rapport inclut tous les résultats enregistrés lors des essais expérimentaux. De plus, l'Annexe B inclut la nomenclature utilisée durant la recherche, les photographies des spécimens et des plaques témoins après chaque impact, ainsi que

des numérisations 3D des cratères avant et arrière de chaque panneau. Tous les résultats compilés, soit les résultats bruts et corrigés, sont présentés à l'Annexe C.

Les Annexes D et E présentent des notes de calcul. D'abord, l'Annexe D présente les notes de calcul et les résultats en ce qui concerne les épaisseurs minimales théoriques requises pour un arrêt complet des projectiles. Puis, l'Annexe E montre un exemple de calcul d'un modèle de prédiction utilisé dans cette recherche, et les résultats associés.

Enfin, le modèle numérique est présenté à l'Annexe F. Les étapes de création du modèle sur Autodyn ANSYS sont élaborées afin de permettre la reproduction. Le modèle décrit très bien le comportement du BFUP lors d'un impact à haute vitesse, mais des modifications sont nécessaires pour représenter le comportement du projectile.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Béton fibre à ultra-haute performance

2.1.1. Définition

Les bétons renforcés de fibres (BRF) sont de plus en plus utilisés dans la recherche pour toute sorte d'application et sont depuis peu disponibles sur le marché. Un BRF est « un matériau composite renforcé de fibres et constitué d'une matrice de mortier ou de béton de ciment Portland, dans lequel les fibres sont discontinues et réparties uniformément au hasard » [8]. De ces BRF, le béton fibré à ultra-haute performance (BFUP) se distingue par ses propriétés mécaniques supérieures. La matrice cimentaire d'un BFUP procure à elle seule une résistance à la compression supérieure ou égale à 120 MPa [9]. L'ACI suggère la définition suivante du BFUP : Le béton à ultra-haute performance est un matériau cimentaire, un béton avec une résistance en compression spécifique d'un minimum de 150 MPa avec une durabilité spécifique, une ductilité en traction et une dureté régulée ; les fibres sont généralement incluses pour atteindre des critères et des exigences spécifiques [10]. Plusieurs produits sont actuellement disponibles sur le marché: *KPM Industries LTD* [11], *LAFARGE* [12], *EIFFAGE SIKA* [13], etc. [14]

2.1.2. Constituants du BFUP

Les constituants d'un béton ordinaire (BO) et d'un BFUP sont présentés sur la Figure 2-1. La matrice du BFUP est généralement composée d'eau, de fumée de silice, de poudre de verre (ou autre type de poudre fine, tels les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, le sable de quartz, etc.), de ciment (ciment Portland ou autre type de ciment spécial), et de superplastifiants (SPL) [15]. Les constituants du BFUP sont spécialement sélectionnés afin d'améliorer l'homogénéité, d'augmenter la compacité de la pâte et d'améliorer la microstructure [16]. Afin d'améliorer l'homogénéité du BFUP, la taille des granulats est réduite. L'addition de particules fines (quartz ou fumée de silice), tel qu'illustré sur la Figure 2-2, permet de parvenir au niveau de compacité de la pâte souhaité [16]. Plusieurs types de BFUP sont présents sur le marché : chacun ayant des propriétés mécaniques différentes et des caractéristiques diverses. À titre d'exemple, le Tableau 2-1 présente la composition du mélange développé dans la région de Montréal. Ce BFUP a une résistance à la compression de 121 MPa à 28 jours [17].

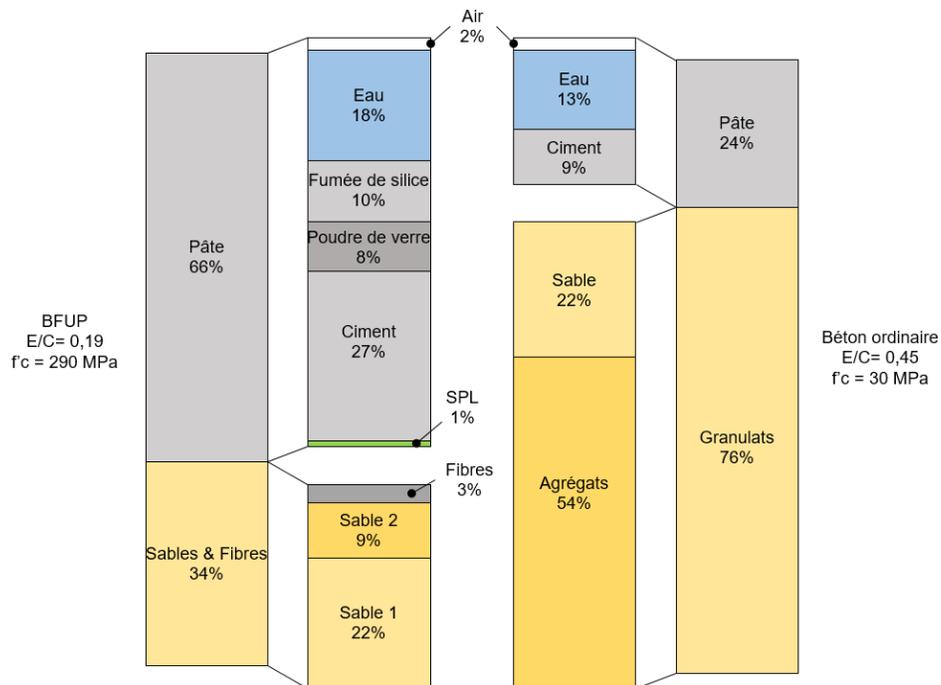


Figure 2-1: Exemple de proportions par volume d'un mélange de BFUP comparé à un BO [15]

Tableau 2-1: Exemple des constituants d'un BFUP de Polytechnique de Montréal [17]

Constituants	Type	Poids (kg/m ³)
Ciment	HS Bath, Québec	967
Fumée de silice (FS)	FS grise, surface spécifique : 20 m ² /g	251
Sable	Sable de silice, taille du grain <0.5 mm	675
Fibres d'acier	Rectilignes (l _f = 10 mm, ø _f = 0.2 mm)	430
Superplastifiant	Polycarboxylate, contenu solide : 35% par masse	35
Eau totale		244

*HS : Haute Résistance Sulfate

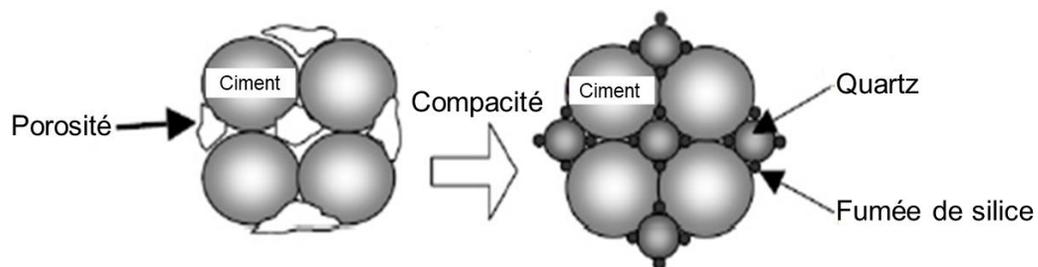


Figure 2-2: Augmentation de la compacité d'un mélange granulaire [15]

L'ajout de fibres dans le béton procure divers avantages dont l'augmentation significative de la résistance en traction, le contrôle de la fissuration et l'augmentation de la ductilité. Les principaux avantages techniques sont énumérés ci-dessous [18] :

- un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
- une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post-fissuration (*résistance résiduelle*) ;
- une énergie d'absorption élevée ;
- une résistance aux impacts élevée ;
- une résistance à la fatigue élevée ;
- une augmentation de la résistance en cisaillement.

Plusieurs types de matériaux sont utilisés : métaux, polymères, et même des matériaux organiques. Les fibres d'acier et les fibres de carbone sont les plus utilisées sur le marché [19]. Ces fibres peuvent être de différentes formes. La géométrie des fibres peut modifier les propriétés mécaniques de la fibre elle-même ou les propriétés mécaniques du BFUP. L'optimisation de la géométrie des fibres a pour objectif d'améliorer le comportement du matériau. Différentes formes sont présentées à la Figure 2-3. Les microfibrilles laitonnées (Figure 2-3) prennent leur nom de leur petit diamètre de 160 μm et de leur courte longueur de 6 à 13 mm [16] [20]. La présence de fibres produit un pont supplémentaire dans la matrice cimentaire du BFUP ce qui permet le contrôle de la fissuration. Cette liaison entre la matrice et les fibres est essentielle afin d'obtenir le comportement désiré. Ainsi, le BFUP possède une grande capacité d'absorption d'énergie [21]. La formulation du BFUP offre la compacité requise afin de créer une zone de transition interfaciale pratiquement inexistante entre les fibres et la pâte : résultant en une forte liaison [15].

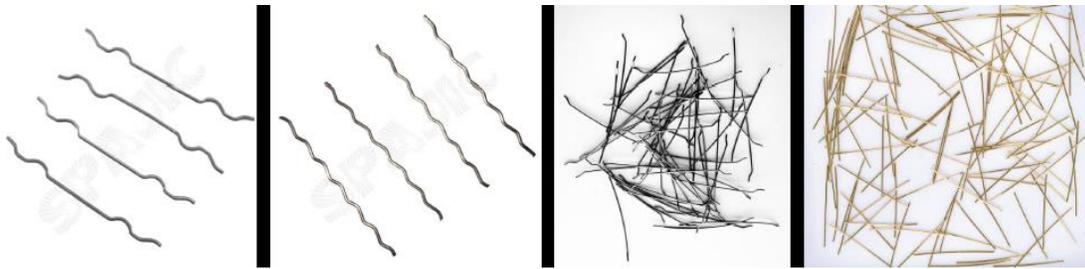


Figure 2-3: a) Fibres à bouts ondulés, b) fibres ondulées, c) fibres avec bouts en crochets, et d) microfibrilles laitonnées [22]

2.1.3. Propriétés mécaniques

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer l'ensemble des propriétés mécaniques d'un BFUP [23] puisqu'il s'agit d'un matériau ayant une résistance en traction significative contrairement au BO.

La résistance en compression des BFUP est généralement supérieure à 150 MPa [16]. Une cure adéquate et l'utilisation d'agrégats spéciaux peuvent augmenter cette résistance jusqu'à 400 MPa [15], voire jusqu'à 800 MPa [16]. Le BFUP développé à l'école Polytechnique Montréal, avec l'utilisation de matériaux locaux, a atteint une résistance en compression d'environ 120 MPa à 28 jours [24]. Un exemple de courbe contrainte-déformation lors d'un essai de compression uniaxiale du BFUP jusqu'à la rupture est présenté à la Figure 2-4. Les 5 étapes présentées sur la figure décrivent le comportement en fonction du pourcentage de la contrainte maximale du BFUP en compression (f'_c).

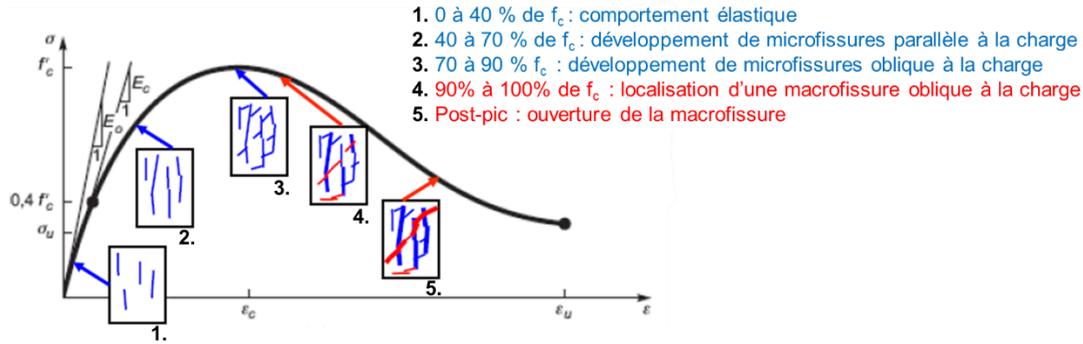


Figure 2-4 : Étapes du comportement en compression uniaxiale du BFUP [16]

La présence de fibres dans le béton procure une résistance en traction et augmente la ductilité. Ainsi des essais de traction directe (ETD) sont utilisés afin de déterminer les propriétés mécaniques du matériau en traction. Différents types de comportements peuvent être identifiés lors d'un ETD sur les BRF en fonction du matériau. En termes de comportement post - fissuration, une phase adoucissante est typique d'un BRF conventionnel alors qu'une phase d'écroutissage suivi d'une phase adoucissante est typique d'un BFUP tel qu'illustré à la Figure 2-5. Plusieurs classes de BRF peuvent obtenir ce comportement post-fissuration. En effet, les matériaux utilisés dans la matrice et le type de fibres, incluant le dosage, sont les éléments clés pour ce comportement [9]. Des valeurs typiques de la contrainte en traction du béton conventionnel et de différents types de BRF sont présentés à la Figure 2-6.

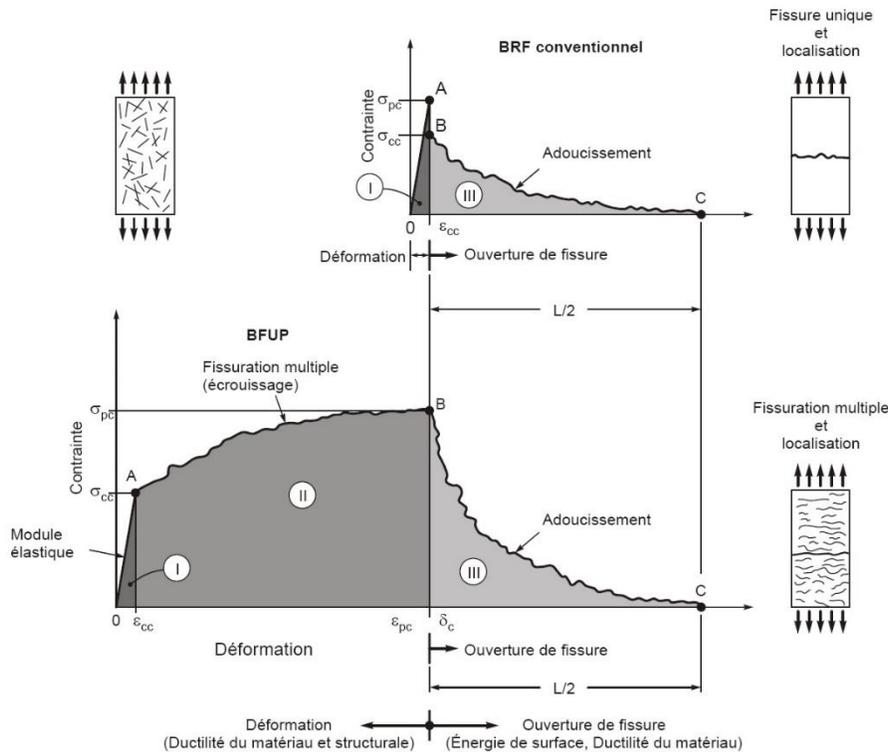


Figure 2-5: Comportement en traction directe des BRF [9]

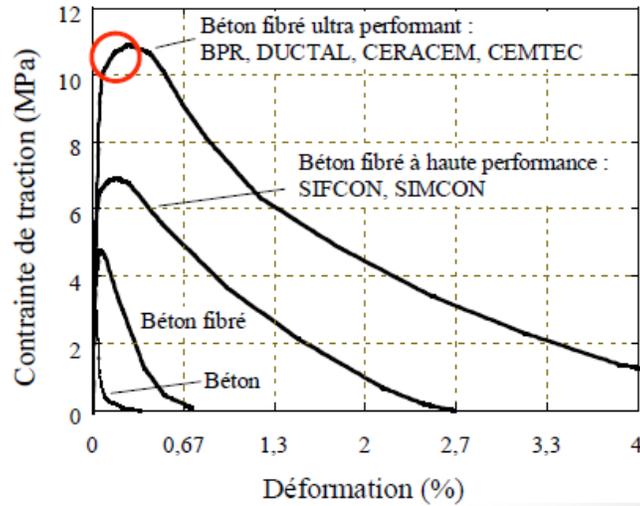


Figure 2-6: Contrainte de traction d'un béton ordinaire et de différents BRF [16]

Le BFUP possède une grande capacité d'absorption d'énergie ce qui en fait un matériau idéal pour la construction de structures protectrices [20]. La haute résistance en compression combinée à l'ajout des fibres améliore la résistance aux impacts et la dureté, et permet ainsi au BFUP de résister à des taux de déformation élevés [25] [26] [27]. En effet, le BFUP soumis à des taux de déformation élevés, tel un impact d'un projectile à haute-vitesse, voit ses propriétés en ductilité, sa résistance à la rupture maximale en tension, et sa capacité d'absorption d'énergie augmenter [28] [29] [30]. L'orientation des fibres influence également la résistance aux impacts d'un BFUP de façon considérable. Lors de la coulée du BFUP, il est préférable que les fibres soient perpendiculaires à l'impact, tel qu'illustré sur la Figure 2-7. Il a été démontré que le potentiel d'absorption d'énergie est réduit lorsque les fibres sont parallèles au vecteur de l'impact [31], voir Figure 2-7 a). Les fibres perpendiculaires à l'impact, voir Figure 2-7 b), augmentent la dissipation de l'énergie de l'impact.

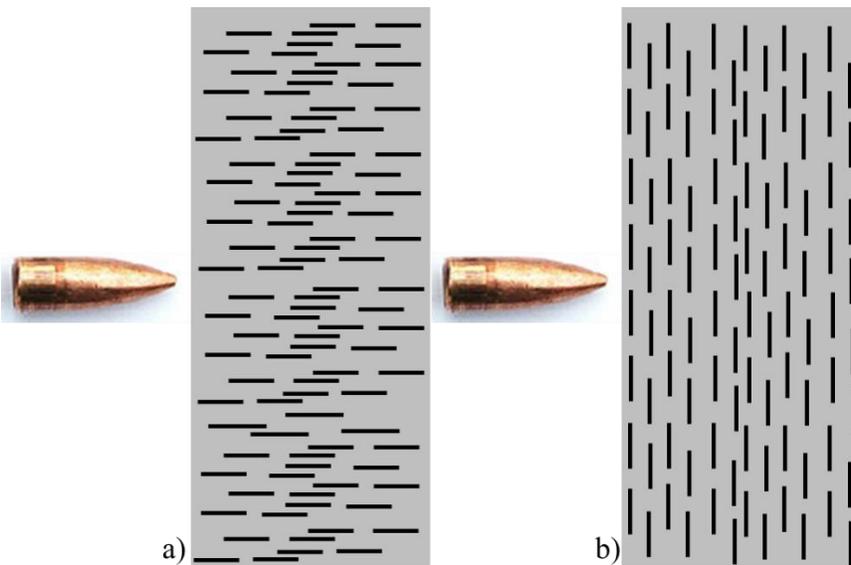


Figure 2-7: Orientation des fibres : a) parallèle et b) perpendiculaire à la direction de l'impact

Essais de caractérisation

Afin de déterminer la résistance à la compression du béton, il est courant d'utiliser les prescriptions de la norme canadienne A23.2 [32] où les dimensions des spécimens d'essais sont spécifiées. La longueur des spécimens cylindriques doit être le double du diamètre. La résistance à la compression du BO est calculée par la moyenne de deux essais de compression uniaxiale sur des cylindres de 300 x 150 mm. La résistance en compression du BFUP est quant à elle déterminée sur des cylindres de 150 x 75 mm selon les spécifications ASTM C39, publié en 2018 [33]. Auparavant des cylindres de 200 x 100 mm étaient utilisés.

Afin de déterminer la résistance en traction du BFUP, l'essai de traction directe (ETD) est fréquemment utilisé. Il n'y a cependant pas d'essai normalisé actuellement au Canada ni en Amérique [34]. Ainsi, plusieurs recherches expérimentales ont été réalisées afin d'identifier les critères d'essais optimaux. Plusieurs recommandations ont été proposées quant à la façon de procéder à l'ETD, incluant les dimensions optimales du spécimen [34] [35] [36] [37] [29]. Le plus récent article publié par le *Journal of Testing and Evaluation* de l'ASTM, propose l'utilisation d'un spécimen en forme d'os. Les dimensions et le montage expérimental proposés dans cette recherche sont présentés à la Figure 2-9. Deux LVDT sont utilisés sur les faces avant et arrière. Ces dispositifs permettent de mesurer la déformation lors de l'ETD, dans le but de produire la courbe contrainte-déformation en traction du matériau. Ces dimensions ont été sélectionnées à la suite d'une analyse par éléments finis afin de minimiser la disparité des contraintes, voir Figure 2-8. Ainsi, la norme ASTM C1609 [38] a établi les limites du rapport des dimensions : la plus petite dimension du spécimen ne doit pas être plus petit que trois fois la longueur des fibres utilisées. Le montage expérimental présenté à la Figure 2-9 diffère de ce qui est globalement utilisé dans de multiples recherches. Cependant, ce type de fixation permet un développement optimal des contraintes dans la partie mince du spécimen [34]. De façon générale, il est commun d'utiliser des mâchoires à chaque extrémité afin d'agripper le spécimen à la presse hydraulique, ou encore un montage enveloppant les extrémités, tel illustré à la Figure 2-10. Ce montage permet d'éviter l'application de contraintes aux extrémités du spécimen qu'engendrent les mâchoires par la compression.

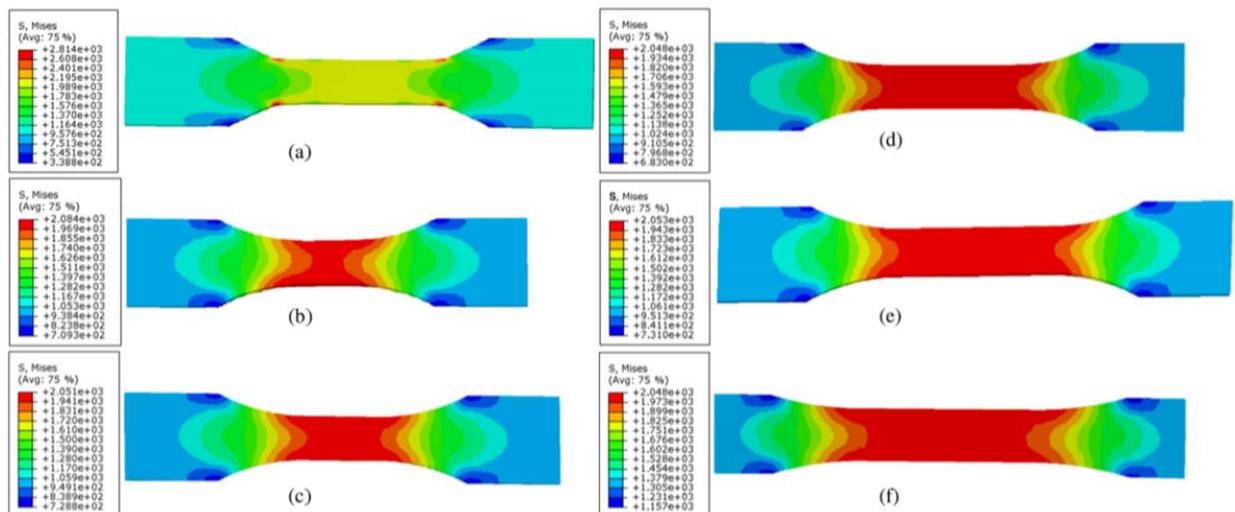


Figure 2-8 : Analyse numérique démontrant la répartition des efforts selon différents dimensionnements d'os pour l'ETD : (a) portion centrale de 152,4 mm incluant un changement linéaire ; (b) portion centrale de 50,8 mm ; (c) portion centrale de 101,6 mm ; (d) portion centrale de 152,4 mm ; (e) portion centrale de 203,2 mm ; (f) portion centrale de 152,4 mm incluant 76,2 mm aux deux extrémités [34]

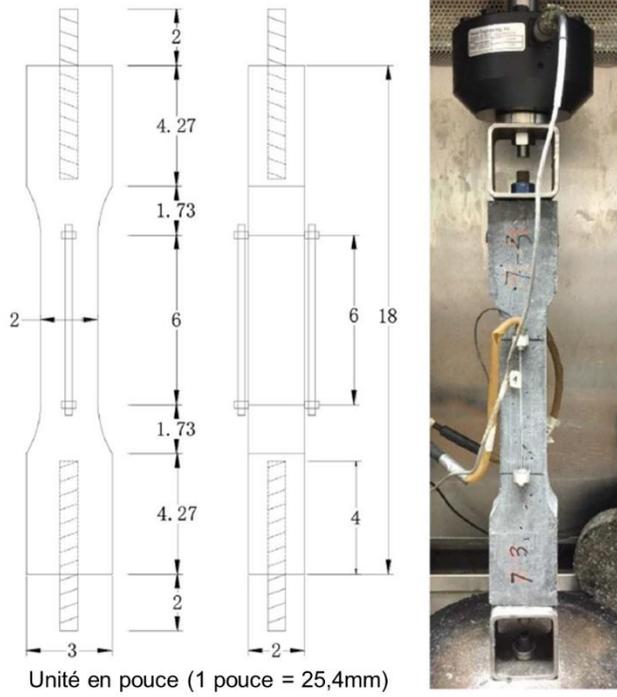


Figure 2-9: Dimensions suggérées pour le spécimen en forme d'os et le montage expérimental pour l'ETD [34]

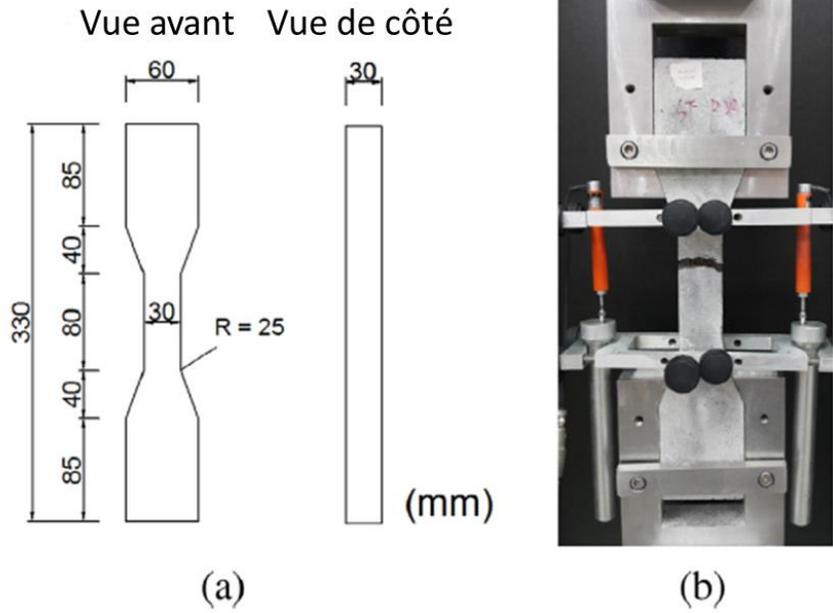


Figure 2-10: Essai de traction direct : a) dimensions du spécimen et b) le montage expérimental utilisé [37]

2.2. Balistique

2.2.1. Définition

La balistique peut être définie telle « la science des corps en vol, englobant les phénomènes physiques impliqués et le mouvement du projectile. La balistique est divisée en un nombre de domaines, en fonction de l'emplacement du projectile dans son vol. » [39] Brièvement, ces domaines sont :

1. **La balistique intérieure** : Étude du comportement du projectile dans l'arme, de la détonation jusqu'à la sortie du canon;
2. **La balistique intermédiaire** : Étude de l'effet de l'arme sur le projectile après sa sortie (par les gaz qui suivent et qui peuvent influencer le projectile);
3. **La balistique extérieure** : Étude du comportement du projectile pendant le vol. Entre la sortie et l'impact, le projectile obéit aux forces *externes*, tel le vent, la friction de l'air, la gravité, et autres. Cette phase inclut les paramètres de temps et d'espace du projectile durant son parcours; et,
4. **La balistique terminale** : Étude des effets de l'impact et de la pénétration du projectile à la cible.

Dans le domaine de la balistique, le système de coordonnées est généralement basé sur la direction du tir : l'axe x défini la direction du vol, l'axe y orienté vers le haut, donc contraire au vecteur gravitationnel, et l'axe z orienté vers la droite. La Figure 2-11 illustre ce système de coordonnées. Les unités sont basées sur le Système International d'Unité (SI). Les distances en mètres, les masses en kilogrammes et le temps en seconde [39].

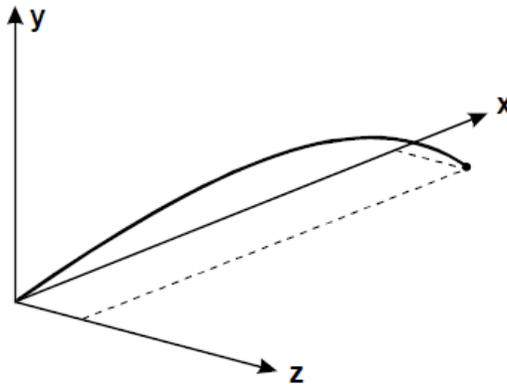


Figure 2-11 : Système de coordonnées pour la balistique [39]

2.2.2. Munitions

Une munition est généralement composée de 4 parties distinctes, telles que montré sur la Figure 2-12. L'ogive, la charge propulsive (poudre), l'étui et l'amorce. Le projectile a comme rôle de transporter l'énergie requise pour atteindre l'effet recherché sur la cible. Les projectiles d'armes légères n'utilisent généralement que l'énergie cinétique, soit aucune autre charge propulsive au vol, ce qui influence la forme et la structure du projectile [39]. La conception du projectile tient compte des forces extrêmes auxquels il doit résister dans le canon afin d'emmagasiner l'énergie requise. La Figure 2-13 illustre une coupe de section typique d'ogives de munitions communes.

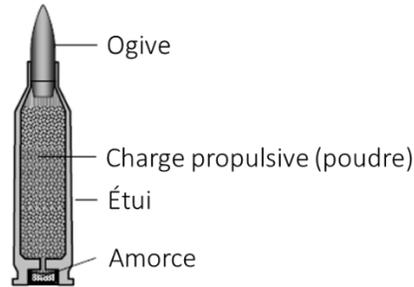


Figure 2-12 : Les parties d'une munition [39]

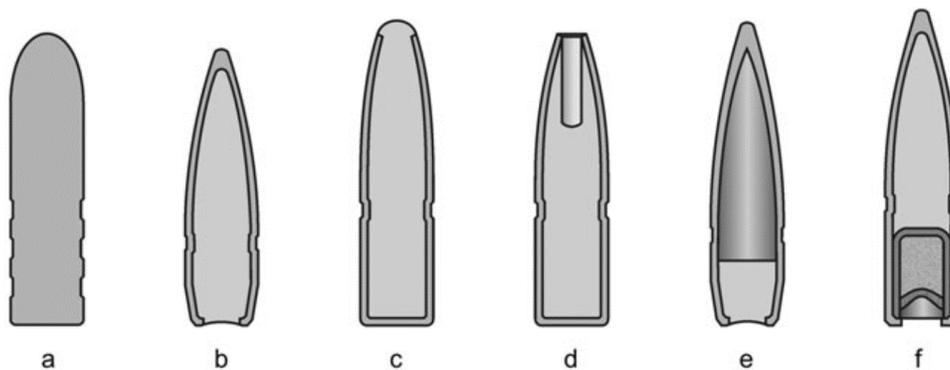


Figure 2-13 : Coupe de section de différents types d'ogive : a. solide, b. balle chemisée, c. balle à pointe souple, d. balle semi-gainée concave, e. balle chemisée à noyau dur, f. balle traçante. [39]

Le calibre d'une balle de fusil définit ses dimensions. Généralement, deux termes sont utilisés. Le premier nombre définit le diamètre de l'ogive, et le second la longueur de l'étui. D'autres termes peuvent être ajoutés pour définir des caractéristiques supplémentaires de la balle. Par exemple, ces caractéristiques peuvent identifier une balle de fusil perforante, une balle de fusil traçante, une munition à blanc, donc n'ayant aucune ogive dans l'étui, etc. Selon l'OTAN, deux calibres constituent la norme balistique des pays membres : le 7,62 OTAN (7,62 mm x 51) et le 5,56 OTAN (5,56 mm x 45) [40]. Ces deux types de calibre sont illustrés sur la Figure 2-14. Il existe plusieurs variantes pour chacun des calibres. Quelques variantes sont présentées au Tableau 2-2. Dans plusieurs recherches consultées, le calibre utilisé est le 7,62mm x 39, tel qu'illustré sur la Figure 2-15. Deux types de 7,62 mm x 39 ont été utilisés : une munition déformable, composée d'une chemise en acier et d'un noyau de plomb, et une munition non déformable, composée d'une chemise en acier et d'un noyau en acier. Cette dernière est de conception soviétique et ne fait pas partie de l'arsenal approuvé par l'OTAN. La plupart des recherches effectuées sur la performance balistique du BFUP proviennent de pays autorisant et utilisant ce calibre. Il est à noter que ce calibre est très populaire auprès des groupes terroristes, car il est facile d'acquisition et s'utilise avec le AK-47. Le AK-47 (Kalachnikov Model 1947) est une arme russe, réputée pour sa fiabilité, simple d'utilisation et propice à la production de masse [41]. Le Tableau 2-2 présente quelques caractéristiques des variantes de la 5,56 et de la 7,62, incluant l'énergie initiale des munitions. La quantité d'énergie développée par les calibres 7,62 est supérieure à celle de la 5,56, ce qui explique son utilisation pour la perforation et la pénétration de blindage.



Figure 2-14: a) 7,62 mm x 51 et quelques variantes, b) 5,56 mm x 45 et quelques variantes [42]

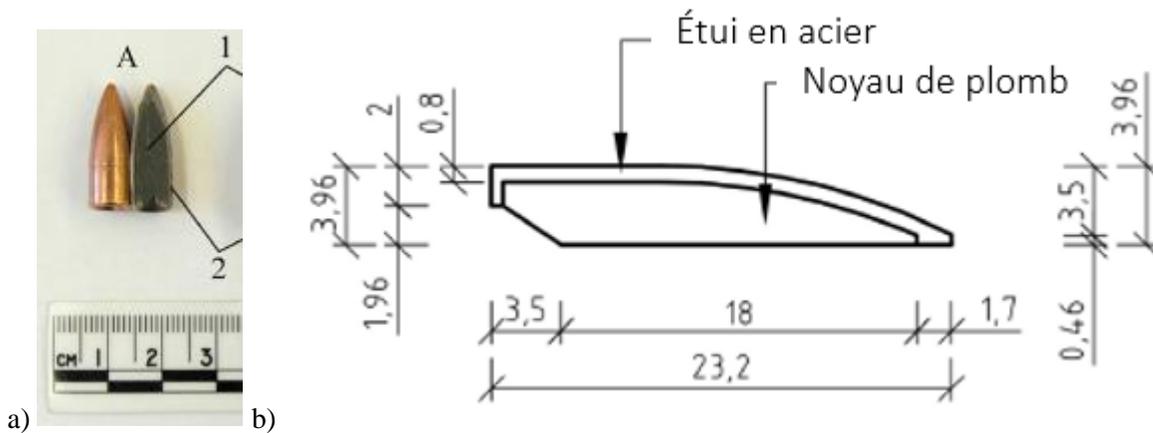


Figure 2-15: a) Calibre 7,62 mm x 39 utilisé dans plusieurs recherches, et b) les dimensions [43]

Tableau 2-2 : Caractéristiques de quelques variantes de la 5,56 et de la 7,62 [42]

Calibre	Masse (g)	Vitesse initiale (m/s)	Énergie (J)	Note
5,56 mm x 45 OTAN	4,0	910	1500 (min)	Approuvé par l'OTAN
5,56 mm x 45 (IP)	3,9	910	1500 (min)	Performance à la pénétration augmentée de 20%
7,62 mm x 51 OTAN	9,5	838	3300 (min)	Approuvé par l'OTAN
7,62 Sniper 175grain	11,3	790	3500 (min)	Pour haute précision
7,62 mm x 51 AP 11 LR	10,9	805	3500 (min)	Performance à la pénétration élevée, de NAMMO
7,62 mm x 63 (AP M2)	10,69	849 (min)	3850 (min)	Utilisé pour les tests de niveau de protection IV
7,62 mm x 39	8,04	700	2000 (min)	Munition soviétique

2.2.3. Balistique terminale

Tel que mentionné précédemment, la balistique terminale étudie l'effet du projectile à l'impact et des dommages perpétrés à la cible. Dans les études de balistique terminale, les cibles sont classifiées selon leur épaisseur : semi-infinie, intermédiaire et mince [44]. L'utilisation de spécimen d'une épaisseur semi-infini permet l'étude de la pénétration, et non l'étude d'un panneau servant à la protection. Ceci permet d'étudier la forme, le volume et la profondeur du cratère et les caractéristiques du projectile résiduel en évitant les mécanismes de rupture à l'arrière du panneau. Les panneaux intermédiaires sont pertinents pour les études de protection balistique. Leur épaisseur permet l'arrêt potentiel d'un projectile, mais ne prévient pas les dommages à l'arrière. En effet, plusieurs mécanismes de rupture doivent être considérés [44]. La Figure 2-16 illustre plusieurs modes de rupture possible pour des spécimens à épaisseur intermédiaire.

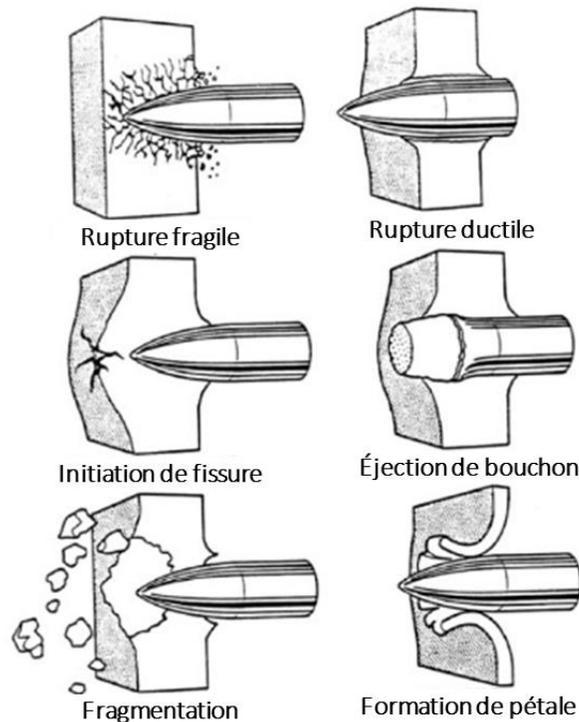


Figure 2-16 : Modes de rupture possible selon différentes situations d'impact [44]

Plusieurs équations ont été développées pour la balistique terminale pour différents matériaux, incluant des équations pour la conservation de la masse, de l'énergie et de la dynamique [44]. Les équations développées pour le BFUP sont présentées à la section 2.4.2. L'équation de base, Équation 2-1 [45], décrit l'énergie cinétique du projectile. L'énergie cinétique est définie par E_c , en joule, la masse du projectile par m , en kg, et la vitesse du projectile par v_i , en m/s. Lorsque le projectile perfore complètement la cible, l'énergie résiduelle (E_r) en joule est calculée par l'Équation 2-2, avec la vitesse résiduelle du projectile en m/s, v_r . La vitesse absorbée (v_a) est définie par l'Équation 2-3, en m/s. L'énergie absorbée ou dissipée (E_{ad}) est par la suite calculée par l'Équation 2-4, en joule, et le pourcentage d'énergie dissipée ($\%E_d$) par l'Équation 2-5. Si le projectile est endommagé pendant le processus de pénétration et qu'il est possible d'en connaître la masse finale, les équations utilisant la vitesse résiduelle doivent aussi tenir compte de la masse résiduelle.

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v_i^2 \quad \text{Équation 2-1 [45]}$$

$$E_r = \frac{1}{2} * m * v_R^2 \quad \text{Équation 2-2 [46]}$$

$$v_a = v_i - v_r \quad \text{Équation 2-3 [46]}$$

$$E_{ad} = \frac{1}{2} * m * (v_i^2 - v_r^2) \quad \text{Équation 2-4 [46]}$$

$$\%E_d = \left(\frac{E_{ad}}{E_c} \right) * 100 \quad \text{Équation 2-5 [46]}$$

2.3. Protection

2.3.1. Définition

Il existe plusieurs méthodes afin d'améliorer le niveau de protection du personnel et de l'équipement. Le premier objectif est de définir ce qui doit être protégé et à quel niveau. Le moyen de protection est ensuite sélectionné. Contre les attaques terroristes, les moyens protecteurs sont multiples [45]. Ces moyens de protection contre des attaques à la bombe ont été identifiés et sont énumérés ci-dessous:

1. **Dévier** une attaque terroriste par la disposition intelligente de la sécurité, des moyens de défense, et des bâtiments. Rendre les chances apparentes de succès minces pour le terroriste.
2. **Déguiser** les parties sensibles d'une cible potentielle, afin que l'énergie de l'attaque soit gaspillée sur le mauvais emplacement, afin d'éliminer l'impact désiré du terroriste.
3. **Disperser** une cible potentielle, afin de rendre impossible la destruction totale de celle-ci.
4. **Arrêter** l'attaque par des moyens physiques, tels des barrières ou des murs.
5. **Émousser ou absorber** l'attaque une fois la cible atteinte. Ceci peut être atteint en durcissant la structure pour absorber davantage d'énergie et ainsi protéger les atouts importants.

Les moyens 4 et 5 ont été adaptés et développés par certaines normes pour les attaques directes spécifiquement. La norme développée par l'OTAN pour la protection balistique définit des niveaux de protection, décrits à la section suivante. Ces niveaux permettent de classer les moyens protecteurs selon leurs limites respectives. Lors de la classification des moyens protecteurs, ces normes permettent de définir les types de calibres à considérer et les critères expérimentaux à respecter.

2.3.2. Normes

L'OTAN se base, entre autres, sur la norme NIJ Standard 0108.01 de la *U.S. Department of Justice* pour tester la résistance de matériaux protecteurs. Cette norme est disponible en ligne et a été développée par le Département de la Justice des États-Unis [47]. Ce document décrit les tests standardisés à effectuer pour le niveau de protection désiré : I, II-A, II, III-A, III, ou IV. Chacun de ces niveaux offre une protection appropriée contre certains calibres. Le Tableau 2-3 présente un résumé de l'essai à performer en fonction du niveau de protection souhaité, du calibre à utiliser, de la longueur du canon et de la vitesse d'impact à atteindre. La Figure 2-17 présente le montage expérimental standardisé pour chaque niveau de protection, selon le NIJ Standard 0108.01. Aucune pénétration n'est permise pour l'ensemble des niveaux de protection. Le nombre d'impacts requis par spécimen est habituellement de 5, à l'exception du niveau IV, où un seul tir est requis.

Tableau 2-3 : Résumé de test pour chaque niveau de protection désiré selon le NIJ Standard 0108.01 [47]

Niveau de protection	Calibre testé	Masse de l'ogive (g)	Longueur du canon suggérée (cm)	Vitesse requise de l'ogive (m/s)	Nombre d'impacts requis par spécimen	Nombre de pénétrations permis
I	22 LRHV Plomb	2,6	15 à 16,5	320 ± 12	5	0
	38 Spécial RN Plomb	10,2	15 à 16,5	259 ± 15	5	0
II-A	357 Magnum JSP	10,2	10 à 12	381 ± 15	5	0
	9 mm FMJ	8,0	10 à 12	332 ± 12	5	0
II	357 Magnum JSP	10,2	15 à 16,5	425 ± 15	5	0
	9 mm FMJ	8,0	10 à 12	358 ± 12	5	0
III-A	44 Magnum Lead SWC Gas	15,55	14 à 16	426 ± 15	5	0
	9 mm FMJ	8,0	24 à 26	426 ± 15	5	0
III	7.62 mm FMJ	9,7	56	838 ± 15	5	0
IV	.30-06 AP	10,8	56	868 ± 15	1	0

Abréviation :

AP	Armor Piercing
FMJ	Full Metal Jacket
JSP	Jacketed Soft Point
LRHV	Long Rifle High Velocity
RN	Round Nose
SWC	Semi-Wadcutter

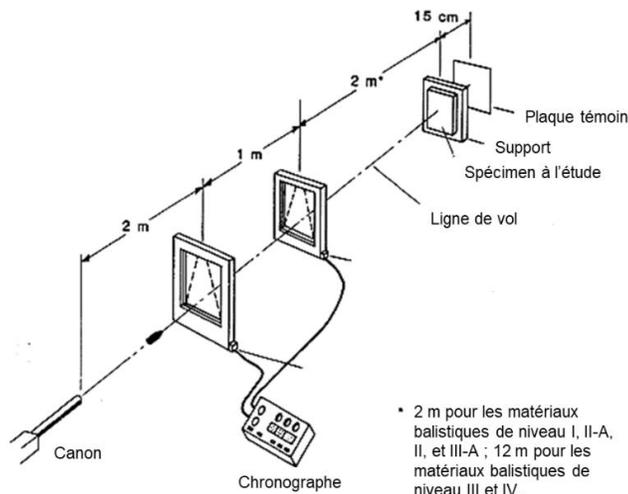


Figure 2-17: Montage d'essai standardisé par NIJ 0108.01 [47]

La norme définit également les critères d'acceptabilité d'un tir. Le premier étant l'angle d'impact ou l'angle d'incidence, qui ne doit pas être supérieur à 5°, voir Figure 2-18. Le deuxième critère précise

que la position de l'impact doit être à plus de 5 centimètres du support ou de la position du tir précédent. Le troisième critère est la vitesse mesurée aux chronographes, qui doit être dans les limites prescrites présenté au Tableau 2-3. La vitesse mesurée varie d'un calibre à l'autre et varie de 259 à 868 m/s. Cependant, si le projectile frappe à moins de 5 centimètres du support, et/ou à une vitesse supérieure, mais ne pénètre pas, le tir peut être considéré comme acceptable [47]. De plus, la norme prescrit qu'une pénétration complète est définie par le passage de la lumière d'une source lumineuse de 60-W dans l'ouverture.

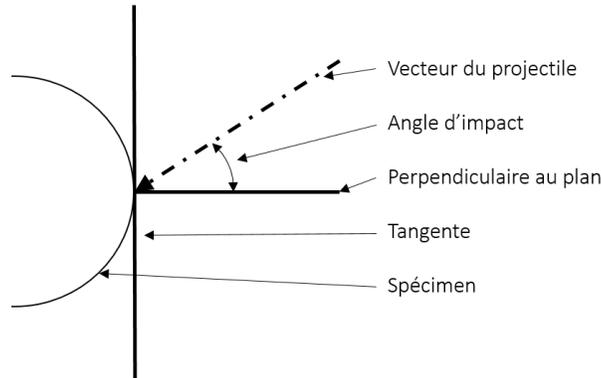


Figure 2-18 : Angle d'impact [47]

2.4. Performance balistique du BFUP

2.4.1. Montages expérimentaux

Ils existent différents types de montages expérimentaux décrits dans la littérature pour les essais balistiques [43] [48] [49] [50]. Dans l'ensemble des montages expérimentaux, trois facteurs essentiels sont considérés : le point de tir, la distance parcourue du projectile et la cible, incluant le support. Un exemple est présenté à la Figure 2-17 où plusieurs spécifications par rapport aux distances sont indiquées selon le montage d'essai de la norme NIJ 0108.01. Ce montage est un guide normalisé et des modifications justifiées peuvent être apportées. Par exemple, la Figure 2-19 présente un montage expérimental différent de la norme utilisée à l'université technique à Prague. Cette configuration utilise une distance de 20 mètres et d'un fusil manié par une personne, contrairement à une distance de 15 mètres, pour le type de calibre, et d'un fusil monté selon la norme NIJ 0108.01. Cependant, une différence de 5 mètres n'engendre aucune différence significative en termes d'énergie cinétique à l'impact.

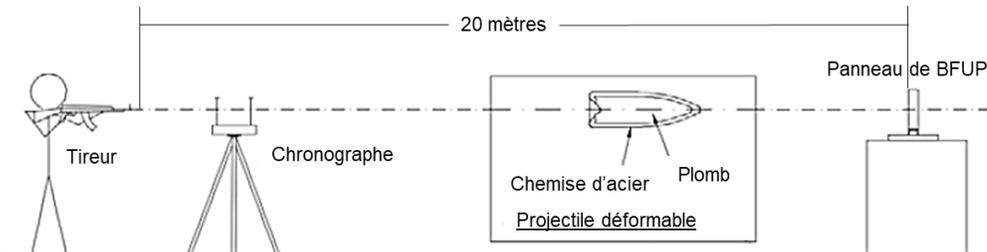


Figure 2-19: Montage expérimental utilisé à l'université technique de la République Tchèque, à Prague [51]

Point de tir

Le point de tir désigne l'ensemble de l'équipement, c.-à-d. le mécanisme de tir incluant la chambre, le canon, la visée, l'angle du tir, la vitesse de sortie ainsi que la qualité du vol du projectile. En résumé, le comportement du projectile durant le vol (p. ex. le culbutage : le projectile culbute durant le vol dû à de l'instabilité). Plusieurs modèles de canons sont disponibles sur le marché pour les essais balistiques quoique l'utilisation d'une arme demeure une option, montée ou non à un support. Par exemple, à la *Czech Technical University* à Prague, une arme civile est utilisée lors des essais. Il s'agit d'une arme semi-automatique (CZ 858) telle qu'illustrée sur la Figure 2-20, utilisée avec des munitions de calibre 7,62 mm x 39 [43], sans support. Afin de mieux contrôler l'angle d'impact et le culbutage, l'utilisation d'un support ou d'un canon universel est préférable.



Figure 2-20 : Arme semi-automatique CZ 858 [52]

Distance

La distance de tir la plus commune spécifiée par la norme NIJ 0108.01 est de 15 mètres pour les niveaux de protection III et IV (Figure 2-17). Une distance de 20 mètres est également utilisée dans la littérature telle qu'illustrée sur la Figure 2-19. La distance de tir est variable et peut être modifiée en fonction des objectifs de la recherche tels que le contrôle et l'analyse de l'effet d'un tir de courte distance ou de longue distance. Un tir éloigné équivaut à une vitesse d'impact moindre, et un angle d'impact variable, souvent plus grand que 0° . La caméra haute vitesse, lorsque située à l'avant du panneau permet de définir l'angle d'impact. Le chronographe, ou les chronographes sont nécessaires afin de capter la vitesse du projectile, afin d'avoir précisément l'énergie initiale que l'ogive a emmagasinée.

Cible et support

Les dimensions de la cible varient en fonction de la réponse recherchée et étudiée. La surface d'impact utilisée dans la littérature varie entre 300 mm et 400 mm de hauteur et de largeur [43]. L'épaisseur varie selon le besoin et le calibre utilisé. Par exemple, pour un BFUP avec 2% de fibres ayant une résistance en compression d'environ 150 MPa, une épaisseur de 50 mm est suffisante pour arrêter un projectile déformable de 7,62 mm x 39, mais 45 mm n'est pas suffisant [43]. La surface d'impact prescrite par la norme NIJ 0108.01 doit être d'au moins 30,5 cm x 30,5 cm [47].

Le support pour la cible doit empêcher tout mouvement suivant l'impact. Différentes méthodes peuvent être utilisées. Par exemple, l'université technique à Prague fixe ses panneaux en quatre points à l'aide de vis, tel qu'illustré sur la Figure 2-21.



Figure 2-21 : Support et la cible après impact [31]

2.4.2. Performance balistique du BFUP

Performance

La grande capacité d'absorption d'énergie et les propriétés mécaniques du BFUP en font un matériau potentiel à la construction de structures résistantes à des charges extrêmes [14] [53]. Il a été démontré que la performance balistique du BFUP est beaucoup plus élevée que le béton à ultra-haute performance non fibré [54]. Un des facteurs principaux de cette performance est la présence de fibres qui assure le contrôle de la fissuration, limite la propagation des dégâts et contribue à la haute capacité d'absorption d'énergie. Un mélange sans fibre demeure un matériau fragile malgré sa haute résistance en compression. Le dosage de fibre a fait l'objet d'une recherche sur la performance balistique et il a été déterminé que 2% par volume de microfibres est une quantité optimale [54]. Au-delà de 2 % de fibres, la performance balistique n'augmente plus significativement. De plus, la présence de fibres limite l'éclatement du béton ainsi que les fragments secondaires de haute vitesse post-impact contrairement au béton non fibré telle que montrée à la Figure 2-25. Ces fragments peuvent atteindre une vitesse suffisante pouvant blesser ou endommager l'équipement. À titre de comparaison, la Figure 2-22 présente les dommages résultants d'un tir d'un projectile déformable de 7,62 mm X 39 ayant une énergie initiale de 2000J sur un béton à ultra-haute performance non fibré [54]. L'impact a causé de nombreuses fissures et le panneau a été perforé. La Figure 2-23 présente les dommages de la face avant d'un panneau en béton fibré à ultra haute performance. Quelques fissures ainsi qu'un cratère d'une taille significative sont visibles sur la face avant du panneau contenant 1 % de fibre alors que la dimension du cratère et la présence de fissures diminuent sur la face avant des panneaux contenant 2 et 3% de fibres. De plus, aucun panneau de BFUP n'a été perforé et la profondeur de la pénétration du projectile varie d'un dosage de fibres à l'autre.

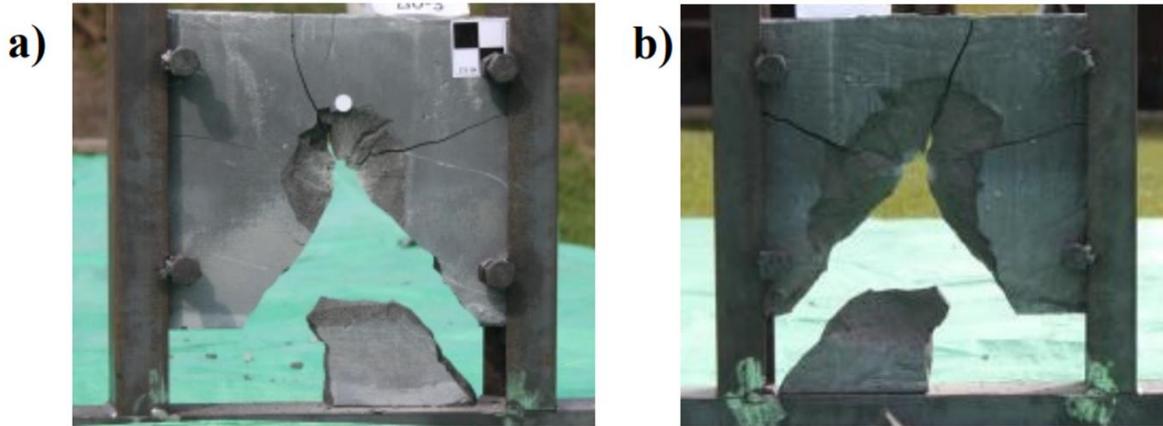


Figure 2-22 : Dommages d'un panneau de 50mm de béton à ultra-haute performance, devant (a) et derrière (b) [54]



Figure 2-23 : Dommages de panneaux de BFUP de 1, 2 et 3% de fibres respectivement de gauche à droite, avec une épaisseur de 50mm [54]

Malgré la présence de fibres, la performance balistique du BFUP varie considérablement en fonction du type de munition utilisé, notamment entre les projectiles déformables et non déformables de petits calibres. À titre d'exemple, il a été démontré qu'un panneau mince en BFUP possède une résistance suffisante afin d'arrêter un projectile déformable de petit calibre [51]. Le projectile utilisé dans cette recherche avait une masse initiale de 8.04 g et le calibre était de 7,62 mm x 39. Il était composé d'un noyau de plomb et d'une chemise en acier. Les conclusions présentées dans ces travaux ont démontré qu'un panneau de 300 mm x 400 mm x 50 mm (hauteur x longueur x épaisseur) avec 2% par volume de microfibrilles dans le mélange était suffisant pour l'arrêt complet du projectile [51]. Tel qu'illustré sur la Figure 2-24, le panneau de BFUP avec 2% de fibres résiste plus adéquatement à l'impact que le panneau de BFUP avec 1% de fibres. Le projectile est encastré dans le panneau, et aucun écaillage à l'arrière n'a été observé. Finalement, aucune fissuration superficielle n'a été développée autour du cratère formé [51].

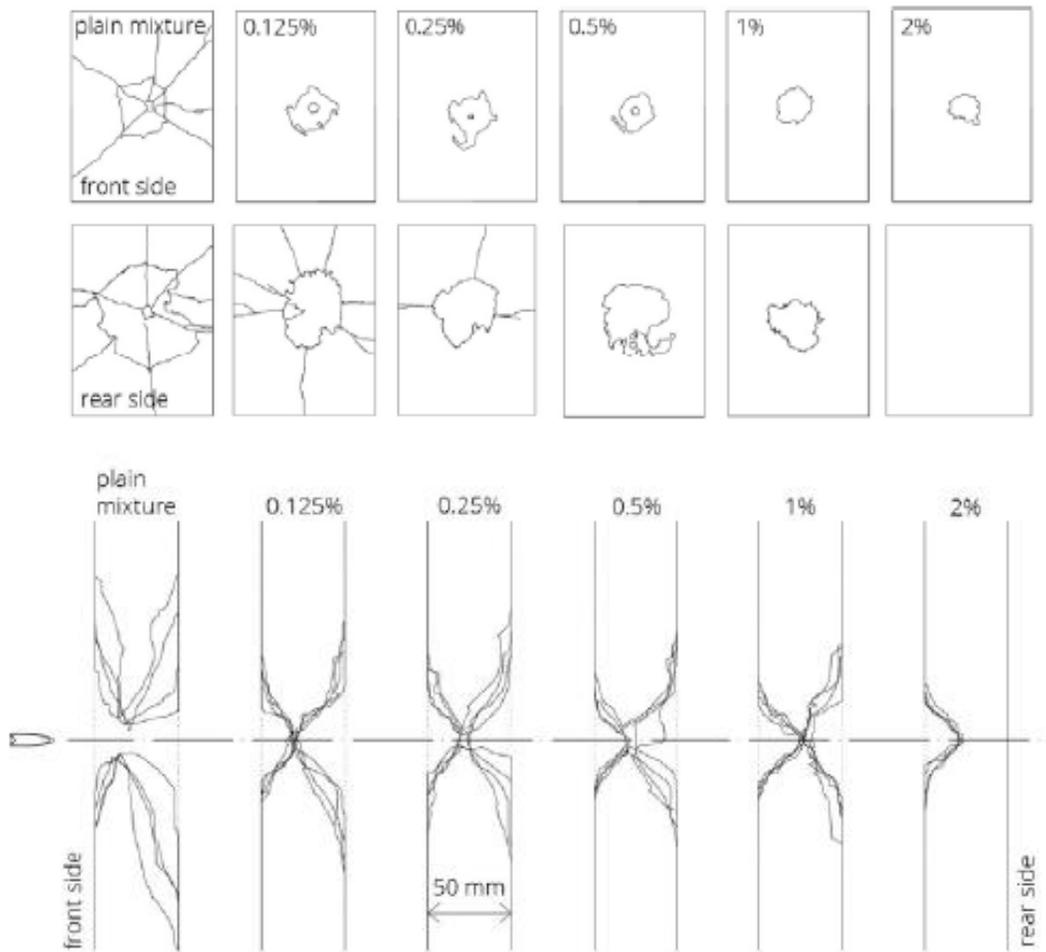


Figure 2-24: Différents esquisses post-impact selon différentes teneurs en fibres [51]

Dans le cas des projectiles non déformables, des essais ont démontré qu'un panneau mince en BFUP de 45 mm d'épaisseur n'était pas en mesure d'offrir l'énergie de résistance requise pour contrer des projectiles non-déformables [43]. Une ogive composée d'un noyau en acier et d'une chemise en acier conventionnel ont été utilisés pour la recherche. Avec 2% de fibres par volume composant la matrice, le panneau de 45 mm d'épaisseur a réduit significativement la vitesse du projectile, sans toutefois l'arrêter. En effet, la vitesse d'impact du projectile utilisé était de 720 m/s, et la vitesse résiduelle de 71 m/s [43]. À cette vitesse résiduelle, le projectile d'acier n'a perforé aucun des 4 panneaux d'acier situés à l'arrière du panneau testé. Il est possible d'observer le noyau à la sortie du panneau à la Figure 2-25.

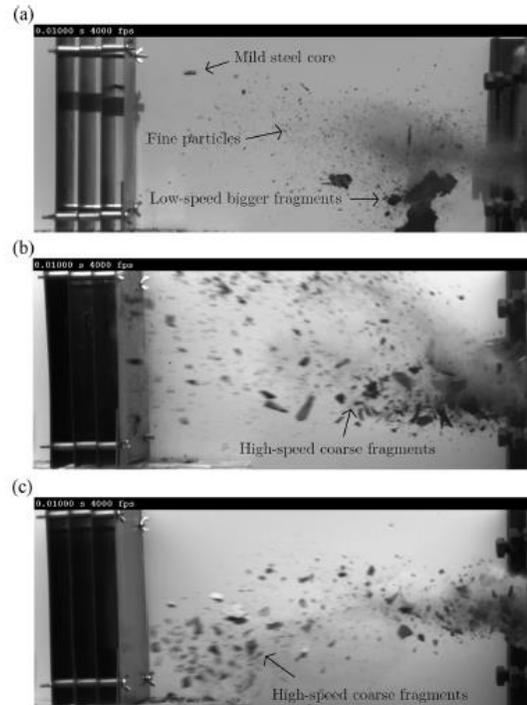


Figure 2-25: La réponse à l'impact contre un projectile déformable de : (a) BFUP avec 2% microfibrilles d'acier, (b) béton à ultra haute performance sans fibre, and (c) béton à haute performance sans fibre [43]

Indépendamment des munitions utilisées, plusieurs phénomènes, ou modes de rupture, sont possibles durant l'impact. Dans le cas du béton et du BFUP, ces modes de rupture sont illustrés sur la Figure 2-26. Plus d'un comportement peuvent survenir lors d'un impact. Par exemple, lors d'une perforation, l'effritement et l'écaillage sont observés pour une majorité d'essais de panneau de BFUP étudié [51]. De plus, lors d'une pénétration seulement, donc aucune perforation, de l'effritement est présent. Toutefois, de l'écaillage, donc des dommages à l'arrière, peut aussi survenir dû à l'onde de choc. Cette onde de choc survient lors de l'impact du projectile sur la face avant du panneau. Un des modes de rupture non observé avec les panneaux de BFUP conçu avec un pourcentage de fibres optimal est l'apparition de fissurations à l'avant et à l'arrière du panneau [51]. Ce qui est un des avantages de l'ajout de fibres dans la matrice. Des macro-fissures et microfissures peuvent être toutefois présentes dans la section du panneau, tel qu'illustré sur les esquisses de la Figure 2-24 et sur le modèle numérique de la Figure 2-29 (c).

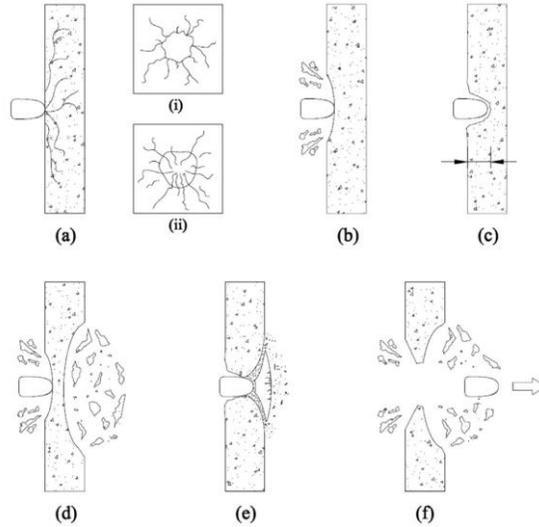


Figure 2-26 : Types de réponse possible après un impact d'un projectile sur une cible de béton : (a) fissurations - (i) avant - (ii) arrière, (b) effritement, (c) pénétration, (d) écaillage, (e) éjection d'un bouchon, et (f) perforation [43]

Équations développées

Le comportement ductile et la haute résistance du BFUP ne permet pas d'utiliser l'ensemble des équations développées pour le BO. Plusieurs recherches sur le sujet ont permis de développer des modèles empiriques spécifiques pour le BFUP et les bétons fibrés [49] [55] [56]. Ces recherches ont permis le développement d'équations permettant de déterminer l'épaisseur requise pour éviter la perforation, ainsi que d'analyser le niveau d'énergie de résistance d'un panneau de BFUP. Différents modèles empiriques et semi-analytiques pour des panneaux de BFUP soumis à des impacts de projectile à haute vitesse ont été comparés afin de démontrer l'efficacité et l'applicabilité de chacun [56]. Cette recherche a spécifiquement analysé des modèles de profondeur de la pénétration et de l'éjection de la masse pour des projectiles déformables et non-déformables. L'article a permis de distinguer les méthodes les plus efficaces applicables dans chaque cas. L'un des modèles offrant les meilleurs résultats pour un béton fibré soumis à un impact d'un projectile non-déformable est le modèle récemment publié par Hwang et al. [55]. Les auteurs du modèle ont développé celui-ci à l'aide de la loi de la conservation de l'énergie : soit l'énergie cinétique du projectile et l'énergie de résistance du panneau de BFUP. La Figure 2-27 résume ce qui est mesuré et calculé par ce modèle. E_K symbolise l'énergie cinétique, E_R l'énergie de résistance, E_S l'énergie de l'effritement (*Spalling Energy* en anglais), E_T l'énergie du tunnel (*Tunneling Energy*), et E_C l'énergie de l'écaillage (*Scabbing Energy*). Pour le calcul complet de l'énergie cinétique et de l'énergie de résistance du béton, quelques équations de base, les Équation 2-6 à l'Équation 2-10, sont présentés [55]. Le Tableau 2-4 décrit les symboles utilisés dans les équations, classés en ordre d'apparence, avec la Figure 2-28 qui présente les modes de rupture du béton, incluant la localisation de certains symboles. De plus, l'article présente aussi des simplifications pour le calcul de la profondeur de pénétration, selon certaines hypothèses, dans le cas où l'énergie cinétique est moindre que l'énergie de résistance du panneau.

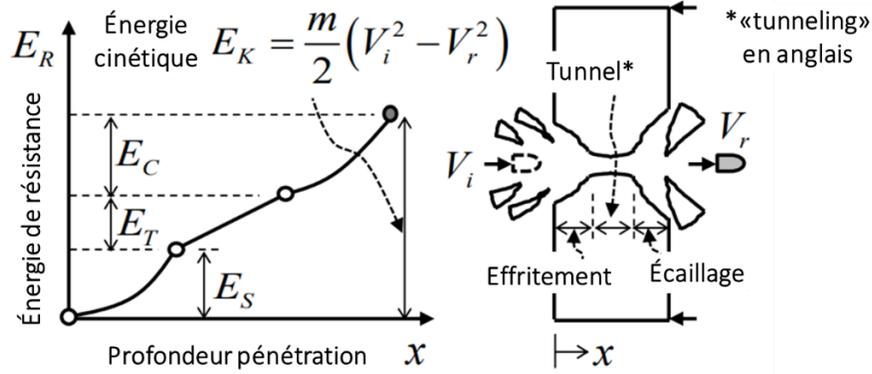


Figure 2-27 : Énergie de résistance d'un panneau de béton lors de l'impact [55]

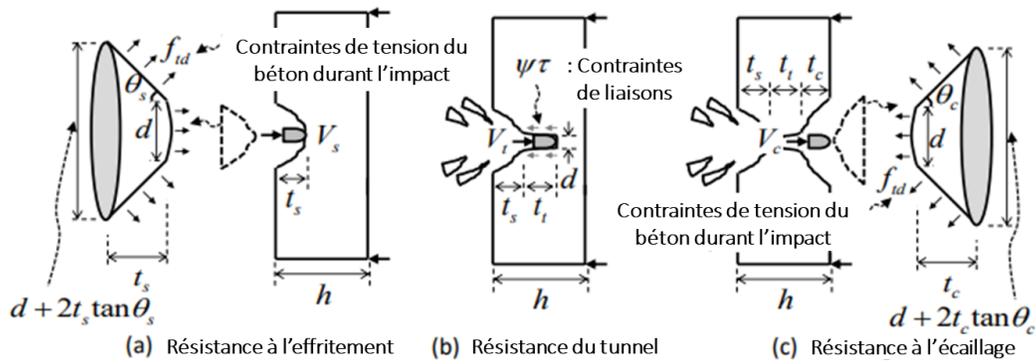


Figure 2-28 : Mode de ruptures du béton [55]

$$E_K = \frac{m}{2} * (V_i^2 - V_r^2) \quad \text{Équation 2-6}$$

$$E_R = E_S + E_T + E_C \quad \text{Équation 2-7}$$

$$E_S = F_s \frac{V_{sc}}{A_{sp}} = \frac{\pi}{12} f_{td} [4t_s^3 \tan^2 \theta_s + 6dt_s^2 \tan \theta_s + 3d^2 t_s] (k_s k_{bs}) \quad \text{Équation 2-8}$$

$$E_T = \frac{F_t}{\rho_p A_p} m = \frac{4m}{\rho_d d} t_t \left(2.2 \varphi \sqrt{f'_{cd}} \right) \quad \text{Équation 2-9}$$

$$E_C = \frac{\pi}{12} f_{td} [4t_c^3 \tan^2 \theta_c + 6dt_c^2 \tan \theta_c + 3d^2 t_c] (k_s k_{bc}) \quad \text{Équation 2-10}$$

Tableau 2-4 : Descriptions des symboles des équations pour le modèle de Hwang & al. [55]

Symboles	Signification anglaise	Signification française
m	Projectile mass	Masse du projectile
V_i	Initial velocity of projectile	Vitesse initiale du projectile
V_r	Residual velocity of projectile after perforation	Vitesse résiduelle du projectile après perforation
F_s	Resistance of the concrete cone under impact load	Résistance du cône du béton
V_{sc}	Volume of damaged concrete cone	Volume du cône idéalisé endommagé
A_{sp}	Projected area of idealized concrete cone	Aire projetée du cône idéalisé
f_{td}	Concrete tensile strength depending on the strain rate	Résistance en traction, selon le taux de déformation
t_s	Allowable spalling depth	Profondeur permise d'effritement
θ_s	Average angle of concrete cone surface	Angle moyen de la surface du cône
d	Smaller diameter of concrete cone	Plus petit diamètre du cône
k_s	Size effect factor	Facteur de l'effet de taille
k_{bs}	Stress concentration effect factor for spalling	Facteur de l'effet de la concentration de contraintes
F_t	Bond resistance	Résistance de la liaison (tunnel)
ρ_p	Projectile density	Densité du projectile
A_p	Cross-sectional area of projectile	Aire de section du projectile
t_t	Allowable tunneling depth	Profondeur permise du tunnel
φ	Nose shape factor of projectile	Facteur de la configuration de la pointe de l'ogive
f'_{cd}	Compressive strength depending on strain rate	Résistance à la compression en fonction du taux de déformation
t_c	Allowable scabbing depth	Profondeur permise de l'écaillage
θ_c	Average angle of the concrete cone surface	Angle moyen de la surface du cône
k_{bc}	Stress concentration effect factor for scabbing	Facteur de l'effet de la concentration de contraintes

Finalement, l'application de l'Équation 2-11 a été démontré efficace pour le calcul de l'épaisseur requise d'un panneau de BFUP afin de résister à un impact d'un petit calibre [43]. Quelques symboles utilisés dans cette équation sont : t_{min} , l'épaisseur minimale du panneau pour résister la perforation, \emptyset le diamètre du projectile, m la masse du projectile et v la vitesse d'impact [49]. Cette équation est basée sur le terme $\frac{K}{\emptyset^2}$, un terme caractérisant le matériau. Le terme K est un ratio de la perte de l'énergie cinétique (ΔE) et de l'épaisseur du panneau (t) pour un tir ayant perforé le panneau. Ce paramètre permet de caractériser chaque BFUP en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur teneur en fibres. Ce paramètre ne tient pas compte de la vitesse d'impact ni de l'épaisseur du panneau. En d'autres mots, le paramètre K est l'énergie absorbée par le matériau en fonction de l'épaisseur. Les unités généralement utilisées sont le J/cm ou J/mm [43] [49]. Le terme complet $\frac{K}{\emptyset^2}$ permet d'introduire la géométrie du projectile dans l'équation. Le Tableau 2-5 présente une comparaison des termes K et $\frac{K}{\emptyset^2}$ provenant de différentes

recherches sur différents mélanges de BFUP et de différents calibres. Une observation importante provenant du Tableau 2-5 et la différence entre les valeurs de K pour le BFUP 1%. Les taux d'énergie absorbé par mm diffèrent grandement entre les recherches utilisant des calibres de diamètre similaire pour le BFUP 1%. Cette différence est expliquée par la soustraction de la masse de la chemise de l'ogive lors des calculs utilisant le calibre 7,62mm x 39. Cette omission est expliquée par le détachement de la chemise lors de l'impact. Le noyau était la seule partie de l'ogive qui a complètement perforé les panneaux [43].

$$\frac{K}{\phi^2} * t_{min} * \phi^2 = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad \text{Équation 2-11 [43]}$$

Tableau 2-5 : Comparaison des paramètres K et K/φ² selon différents calibres déformables et non-déformable, et différents mélanges de bétons à ultra-haute performance [43] [49]

Mélange	Calibre					
	7,62 mm x 39 non-déformable [43]		7,62 mm x 51 AP [49]		5,56 mm x 45 [49]	
	K (J/mm)	$\frac{K}{\phi^2}$ (J/mm³)	K (J/mm)	$\frac{K}{\phi^2}$ (J/mm³)	K (J/mm)	$\frac{K}{\phi^2}$ (J/mm³)
Béton à ultra-haute performance	16,5	0,512	39,4	0,679	32,0	1,05
BFUP 0,5%	17,5	0,543	-	-	-	-
BFUP 1,0%	17,7	0,547	40,3	0,694	34,5	1,12
BFUP 1,5%	19,1	0,593	-	-	-	-
BFUP 2,0%	18,8	0,583	-	-	-	-
BFUP 2,5%	19,6	0,608	-	-	-	-

2.5. Modèle numérique

L'utilisation de méthodes empiriques et analytiques présentées dans le UFC 3-340-01, un document protégé de la *US Army Corps of Engineers*, ne sont plus applicables pour l'analyse du BFUP : étant donné qu'elles ont été développées pour du BO [57]. Selon la littérature récente, la résistance aux impacts de panneaux de BFUP contre des projectiles déformables et non-déformables a été mesurée avec de multiples modèles empiriques et analytiques [56]. Ces modèles sont applicables pour le BFUP, mais il existe des moyens plus performants et visuels. En effet, l'utilisation de logiciels numériques pour des analyses plus en profondeur permettent de bien corréliser les nombreux essais expérimentaux déjà effectués. La méthode numérique est donc une approche potentielle. Plusieurs logiciels sont offerts sur le marché pour la simulation d'impact. Selon plusieurs recherches [43] [58], l'utilisation de ANSYS Autodyn [59] pour la modélisation et l'analyse du comportement du BFUP lors d'un impact a été concluante. En effet, la composante Autodyn d'ANSYS permet une analyse complète et précise de la réponse dynamique d'un matériau soumis à un impact à haute vitesse [59]. Le modèle permet aussi l'observation de grandes déformations, des modes de rupture du BFUP, ainsi que des débris produits lors de l'impact [43]. Tel qu'illustré sur la Figure 2-29, le modèle numérique a démontré son potentiel pour des bétons à haute résistance, pour des bétons fibrés et pour des bétons à ultra-haute performance. La Figure 2-29 montre le niveau de dommage durant l'impact à 0,2 ms. Il est possible d'observer l'avantage de l'ajout de fibres dans le modèle de la Figure 2-29 (b). Les fibres permettent la concentration des efforts autour du cratère formé lors de la perforation.

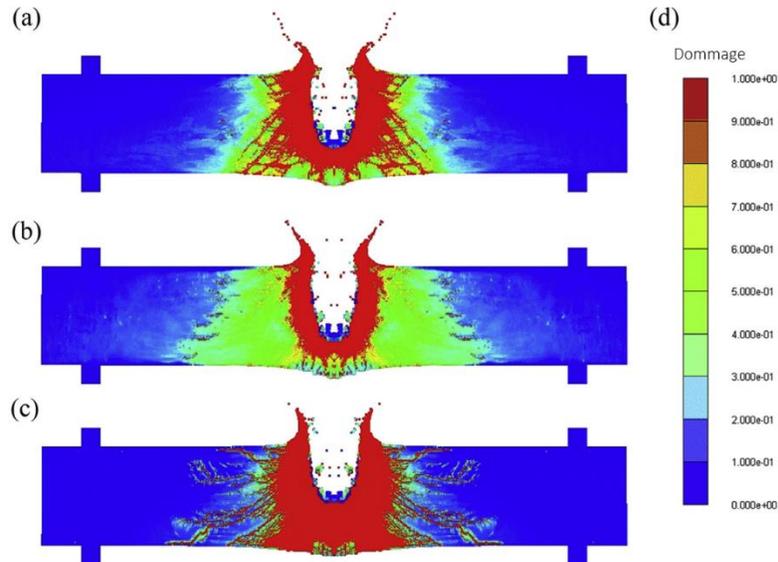


Figure 2-29: Processus de rupture durant l'impact de (a) béton à haute résistance, (b) béton fibré et (c) béton à ultra-haute performance, avec (d) l'échelle de dommage, à un temps $t = 0,2$ ms [43]

Propriétés mécaniques BFUP dans ANSYS

Étant donné des disparités entre les matrices de différentes compagnies et industries, chaque BFUP a ses particularités. Un des BFUP utilisé dans la littérature, ayant servis au développement d'un modèle numérique sur Autodyn, a été étudié en profondeur pour connaître ses propriétés mécaniques et ses caractéristiques [43]. À l'aide de la composante Autodyn de ANSYS, le BFUP peut être défini à l'aide de plusieurs modèles. Le premier modèle utilisé pour décrire le béton est le RHT (Riedel, Hiermaier, Thoma). Ce modèle représente bien les matériaux fragiles soumis à des impacts. Dans des situations de contraintes élevées durant un impact, ce modèle doit être modifié, tel qu'expliqué dans l'article de Tu et al. [60]. Les recommandations apportées dans l'article sont adoptées dans les recherches de Sovják et al. [43]. En effet, le modèle RHT peut être complété par un modèle EOS (*Equation of State*), qui relie l'effet d'une pression appliquée sur la densité et l'énergie interne d'un matériau poreux, tel un béton. Le Tableau 2-6 présente les paramètres utilisés pour le BFUP d'une recherche récente [43].

Tableau 2-6 : Paramètres du BFUP utilisés pour le développement du matériau dans Autodyn [43]

Paramètres RHT	Valeur	Unité
Module de cisaillement	22,5	GPa
Résistance en compression (f_c)	150	MPa
Résistance en traction (f_t/f_c)	0,070	-
Résistance élastique ($/f_t$)	0,5	-
Résistance élastique ($/f_c$)	0,65	-
Constante de dommage (D1)	0,04	-
Constante de dommage (D2)	1	-
Déformation minimale à la rupture	0,01	-
Énergie de fracture	12400	J/m ²
Contrainte de fracture en tension principal	10,5	MPa
Déformation à l'érosion	1,5	-
Type de déformation à l'érosion	Instantané	-
Paramètres EOS	Valeur	Unité
Densité poreuse	2,28	g/cm ³
Vitesse de son en milieu poreux	3450	m/s
Pression de compaction initiale	23330	kPa
Pression de compaction solide	6000	MPa
Facteur de compaction	3	-

Modélisation de l'essai et résultats

La modélisation et l'analyse d'essais d'impact balistique peuvent être accomplies à l'aide de deux composantes d'ANSYS : Explicit Dynamics et Autodyn. Ces composantes peuvent être utilisées en paires ou séparément. La géométrie peut être conçue à l'aide d'Explicit Dynamics, avec tous les paramètres d'essais, puis générer les résultats à l'aide de Autodyn. Autrement, le développement complet de l'essai peut être accompli sur Autodyn. Dans le cas de la recherche présentée [43], la modélisation du problème, les paramètres de l'essai et les paramètres du solveur ont tous été complétés à l'aide de la composante Autodyn. Dans le cas de la recherche, des projectiles déformables et non-déformables frappaient des panneaux de BFUP. La géométrie de ces projectiles et de la cible a été formée à l'aide d'une symétrie rotationnelle, à partir d'une forme 2D. Cet outil d'Autodyn permet de minimiser le volume de données, ce qui accélère le processus d'analyse. Les chercheurs ont utilisé des SPH (acronyme de l'anglais pour *Smooth Particles Hydrodynamics*) afin de modéliser la géométrie. Le diamètre de chaque particule était de 0,3mm. Ce diamètre semblait optimal selon l'article. La géométrie des projectiles a été respectée, tel qu'illustré sur la Figure 2-30. La vitesse initiale du projectile était de 700 m/s pour l'essai réel et pour l'essai numérique.

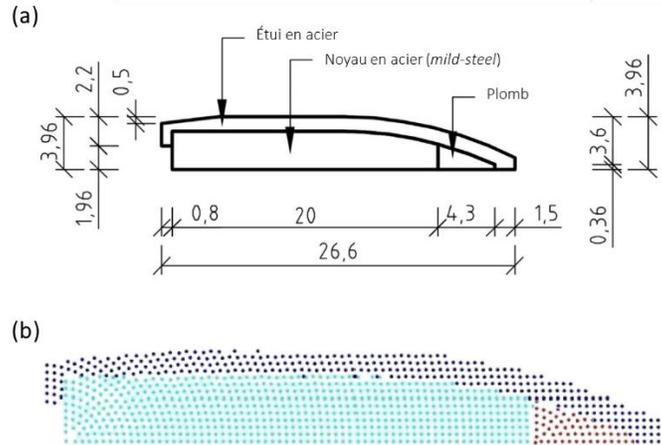


Figure 2-30 : Coupe de section du projectile non-déformable (a) réel et (b) modélisé [43]

Les résultats entre les essais numériques et les essais réels sur le BFUP présentent des comportements similaires. Un modèle numérique de la littérature a permis une comparaison significative entre les essais [43]. Il est possible de distinguer la ressemblance entre les fissures et les modes de rupture entre le modèle et les panneaux réels. La Figure 2-31 montre des coupes de section d'un modèle numérique et de deux essais réels. La figure permet plusieurs observations du panneau de l'essai réel, dont de l'écaillage à l'arrière du panneau. Tandis que les résultats de l'essai numérique ont permis certaines conclusions quant à la rupture de l'arrière du panneau. En effet, il a été possible de confirmer la présence de tension, expliquant l'écaillage, et de cisaillement, expliquant l'éjection en bouchon (modes de rupture illustrés sur la Figure 2-26). Il a été déterminé que l'un des avantages du modèle numérique est de mesurer et d'observer divers éléments dans la section du panneau durant l'impact.

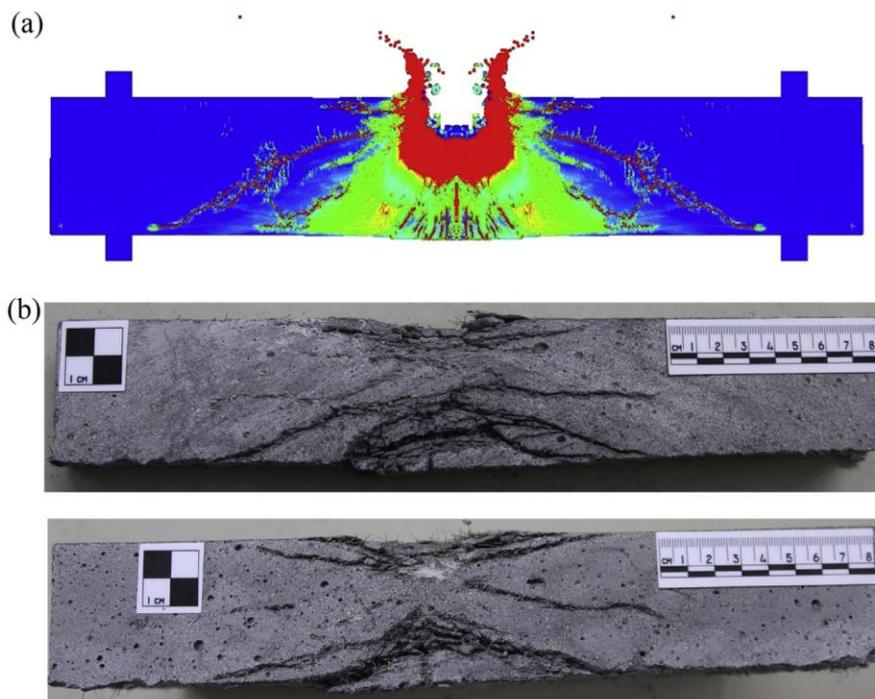


Figure 2-31 : Comparaison (a) d'un essai numérique sur Autodyn et (b) d'essais réels d'un projectile déformable impactant un panneau de BFUP de 2% de fibres par volume [43]

3. MANUSCRIPT: ‘BALLISTIC RESISTANCE OF UHPFRC PANELS SUBJECTED TO ARMOR-PIERCING PROJECTILES’

3.1. Abstract

In this study, thin armor panels were designed and constructed using Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) and their ballistic resistance to armor-piercing small arms fire was assessed. The fibre dosages selected for the panels were 3% and 4% by volume, with minimum UHPFRC compressive strengths of 137 MPa and 129 MPa respectively. The panels’ front and rear surfaces were 350 mm x 350 mm and the thicknesses were 40 mm, 50 mm, and 60 mm. Ballistic performances of the panels were assessed at two bullet velocities representing different operational distances. The two distances were based on a threat associated with Urban Operations (approximately 10 meters), and Field Operations (approximately 300 meters). An armor-piercing 7.62 mm x 51 Armor Piercing Round was used for the testing. The testing demonstrated that at close range the panels could absorb a high level of energy, up to 3089J, and at this range, all panels were perforated. The results of the 60 mm panels impacted by a 300 meters equivalent range shot, absorbed energy of up to 2066 J, and slowed down the projectile to a very low velocity or a complete stop. Basic and advanced predictive models were used to estimate the resistant energy of the panels according to material characteristics such as fibre content, thickness, and mechanical properties. A numerical model was also developed. An SPH Autodyn model provided good predictions of the crater dimensions. It also demonstrated a similar impact behaviour of the UHPFRC panel when compared to real tests, however further work is needed to more accurately represent the bullet core and jacket.

3.2. Introduction

3.2.1. General

The effects of small arms have been and continue to be a threat to civilian and military personnel and equipment. Military forces are frequently involved in conflicts where protection is required from weapons of various calibers. A variety of materials and techniques can be used to protect military personnel and assets from the effects of these deadly weapons. Frequently, protective structures employed on operations are expensive, heavy, non-reusable, bulky and time-consuming to erect. In a response to this issue, the U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) developed a new lightweight, effective and reusable protective structure [1]. This Modular Protective System (MPS) consists of a lightweight structural framework which supports modular protective panels. The properties of these protective panels are intended to be selected according to the current threat. The MPS was developed using a specific reinforced UHPFRC panel. In general, UHPFRC has outstanding properties such as a high energy absorption capacity and its performance under ambient and cold temperature are excellent against impact loading [2]. UHPFRC panels can not only serve as a protection against impulsive and dynamic loads but its performance against small arms fire should also be considered.

3.2.2. Impact Resistance of UHPFRC

UHPFRC is a fibre reinforced cementitious material, with exceptional compressive strength, good durability, a ductile behaviour in tension and exceptional toughness [3]. With its high-energy absorption capacity, preliminary research has assessed the ballistic resistance of UHPFRC [4] [5] [6] [7] [8] [9]. One research project considered the placement of the fibres in the panels, the crater dimensions after impact and

the effective thickness required to stop the bullet with no scabbing. Sovják et al. [7] concluded that 50 mm thick panels with 2% fibres by volume could effectively stop deformable projectiles, consisting of a steel jacket and a soft-lead core. They also determined that less than 2% could be considered unsafe which was defined by a high volume of ejected fragments. In addition, more than 2% would be inefficient in terms of penetration depth and crater dimension improvements. 2% by volume offered the required bridging to avoid cracking and minimum spalling and scabbing. Also, Kravanja et al. [10] concluded that for non-deformable projectiles, the prediction model developed by Hwang et al. [11] was the most accurate. Based on the energy conservation law, they developed a model that calculates the penetration depth of concrete targets. More recently, Dobruský et al. [6] performed tests on UHPFRC with compressive strength varying from 130 MPa to 210 MPa, using deformable and non-deformable 5.56 mm x 45 and 7.62 mm x 51 projectiles. Their results on UHPFRC materials were conclusive, proving it to be an efficient protective material.

3.2.3. Protective Materials Standards

In order to protect assets, various measures can be considered. In this study, the ability of a panel to effectively absorb the energy of an attack is the main concern [12]. While the attack may be of high energy, the structure needs the toughness to store that energy in various forms. The NIJ Standard 0108.01 frequently used for assessing protective materials was applied in order to determine some of the testing parameters for this study [13]. The standardised test set up, as seen on Figure 3-1, consists of a total length of 15 meters, plus 15 centimeters for the witness panel. The chronograph is positioned at 2 meters from the muzzle. To be considered a valid hit, the angle of incidence must be within 0 to 5°, and a complete penetration, in both the specimen and the witness panel, is limited by the passage of light (from a 60-W light bulb source). The witness panel is made of aluminum alloy and is used ‘to determine the potential for an incapacitating injury’ [13].

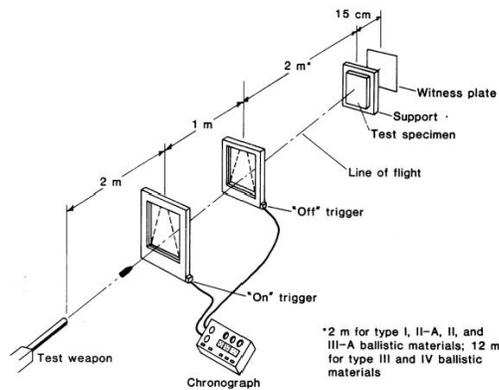


Figure 3-1: NIJ 0108.01 Standardised Test Setup [13]

3.3. Research Objectives and Scope

This paper presents the results of a project which assessed the ballistic resistance of UHPFRC panels. The research objectives were to measure the resistance performance of local UHPFRC to modern military-grade armor piercing small arms ammunition, to characterize the material used, to determine the applicability of recent prediction models for the material used, and to develop an accurate numerical model of the local UHPFRC simulating a close range shot.

The scope of this research was to analyse different threats in terms of impact velocities of the non-deformable projectile on two types of local UHPFRC. Two impact velocities were studied to represent two combat conditions, namely: Urban Operations, for close combat distances between 10 to 50 meters, and Field Operations, at a longer distance of approximately 300 meters. The two types of local UHPFRC were

different in terms of fibre dosage. One had a steel fibre content of 3% by volume and the other one had a dosage of 4% by volume. The main purpose of selecting two UHPFRC was to measure differences in ballistic effectiveness, which was determined by the attenuation of projectile velocity, by the mass of debris generated from the impact, and by energy absorption. In addition, the thicknesses were varied in order to obtain various results to confirm the applicability of prediction models and to develop material parameters that could be used to select required thicknesses to resist a non-deformable projectile impact.

A numerical model was developed according to past studies from the literature. The objective was to enhance it and analyse its accuracy using an AP round at high velocity. In addition, a recently proposed prediction model for the penetration depth of a projectile in UHPFRC material was considered, to assess its applicability to this current study.

3.4. Experimental Program

3.4.1. Specimens

In total, 36 specimens were cast and tested. The size of the specimens' front and back faces were designed according to NIJ 0108.01 specifications. The thicknesses were selected according to the other studies reported in literature [7] [10] [14] to compare results. The surface dimensions were 350 mm by 350 mm and the three thicknesses were 40, 50 and 60 mm. Three specimens of each thickness for each specific fibre dosage were cast. In addition, the dimensions had to comply with the test setup at the testing facility. The specimens' dimensions are illustrated on Figure 3-2. All 36 panels were made of UHPFRC, 18 were designed with 4% fibres by volume and the other 18 with 3% fibres by volume. Fibres were the only reinforcement. All the panels were tested with the AP round, half of the specimens where subjected to rounds with velocities representing an equivalent discharge distance of 10 meters and the other half, an equivalent discharge distance of 300 meters.

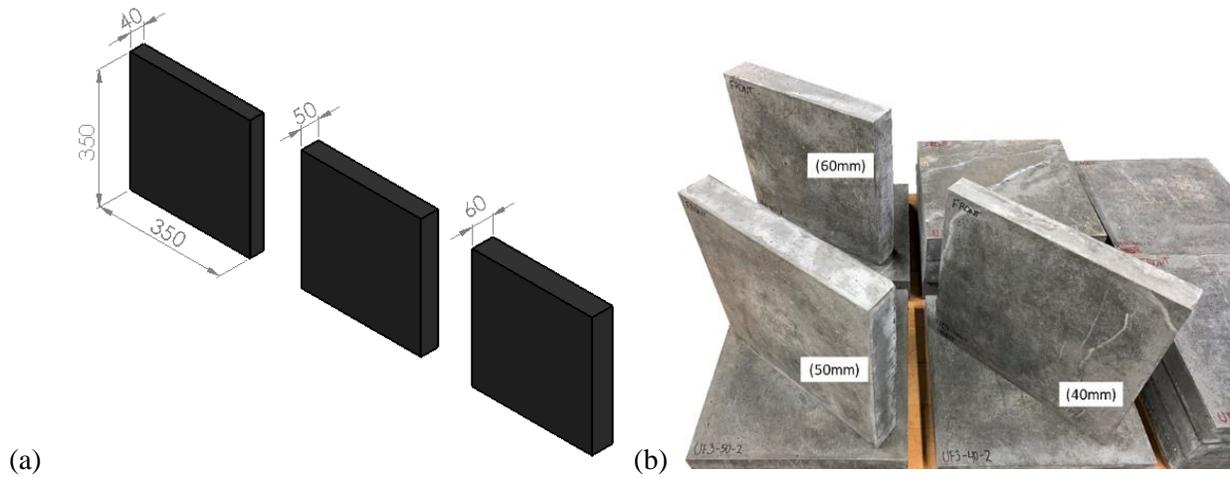


Figure 3-2: (a) Specimens Dimensions (units in mm) and (b) Panels Before Testing

The designation of each specimen is based on the testing and material parameters, as shown in Table 3-1. Each designation is composed of 6 characters arranged in three terms. The first character of the first term is based on the range category of the test: U for Urban Operations and F for Field Operations. The second and third characters in the first term are based on the fibre content of the specimen: F3 for 3% fibres per volume and F4 for 4% fibres per volume. The second term refers to the thickness of the panel: 40, 50 and 60mm. The last term is the specimen number out of 3 specimens per range category, fibre content

and thickness. Only one shot was required per specimen for this study, and the velocity of the projectile as it relates to the range category is explained in Section 3.4.3.

Table 3-1: Specimen Nomenclature and Test Parameters

Specimen	Minimum Required Velocity of Projectile (m/s)	Fibre Content (%)	Thickness (mm)
UF3-40-(1,2,3)	780	3	40
UF3-50-(1,2,3)	780	3	50
UF3-60-(1,2,3)	780	3	60
UF4-40-(1,2,3)	780	4	40
UF4-50-(1,2,3)	780	4	50
UF4-60-(1,2,3)	780	4	60
FF3-40-(1,2,3)	608	3	40
FF3-50-(1,2,3)	608	3	50
FF3-60-(1,2,3)	608	3	60
FF4-40-(1,2,3)	608	4	40
FF4-50-(1,2,3)	608	4	50
FF4-60-(1,2,3)	608	4	60

3.4.2. Materials

UHPFRC

KING Construction products were used in this project. The constituents of the UHPFRC used in this research consisted of a proprietary mixture of cement (HS Bath, Québec), silica fume, sand, steel fibres, superplasticizers and water [11]. For this research, two products from the supplier were used: UP-F3 and UP-F4. The two UHPFRC's fibre dosage consist of 3% (UP-F3) and 4% (UP-F4) of steel fibres by volume. The fibres used in the mix are Bekaert Dramix fibres. Their length and diameter are 10 mm and 0.2 mm respectively. The products were provided ready to mix from bags of fine particles, including cement, silica fume and sand, liquid admixtures, and steel reinforcement. The material properties obtained in laboratory, are shown in Table 3-2 along with manufacturer provided properties [15]. Four batches were cast, two of each product. Cylinders of 100 mm x 200 mm were used for the first 2 batches. Cylinders of 75 mm x 150 mm were used to assess the compressive strength of the last 2 batches, in accordance with the new ASTM C39 standard [16].

Table 3-2: Average Material Properties of UP-F3 and UP-F4 from Laboratory Tests and Published Values from Manufacturer

Material		Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Mass Density (kg/m ³)
UP-F3	Laboratory (28 days)	144	42	-	-
	Manufacturer (28 days)	120	37	9.5	2400
UP-F4	Laboratory (28 days)	141	40	-	-
	Manufacturer (28 days)	120	37	11.0	2450

Projectile

The ammunition used in the study was a 7.62 mm x 51 Armor Piercing 11 Long Range from NAMMO [17]. The design and materials used in this small arms ammunition are specifically chosen for enhanced perforation capabilities and high accuracy at far distances. It has the capacity to perforate 18 mm

thick steel plates used for armored vehicle. It is suitable for semi-automatic rifles, sniper rifles and machine guns. The projectile weights 10.8 grams with a muzzle velocity of 805 m/s. The penetrator weights 5.26 grams. The kinetic energy at the exit of the muzzle is approximately 3500 joules. A photo and a radiography of the projectile is shown in Figure 3-3. The jacket is made of gilding metal, the core of tungsten carbide and aluminum is used at the tail. The projectile shape is pointed conical with a boat tail. Adjustment of the propellant which energized the projectile is discussed in Section 3.4.3.

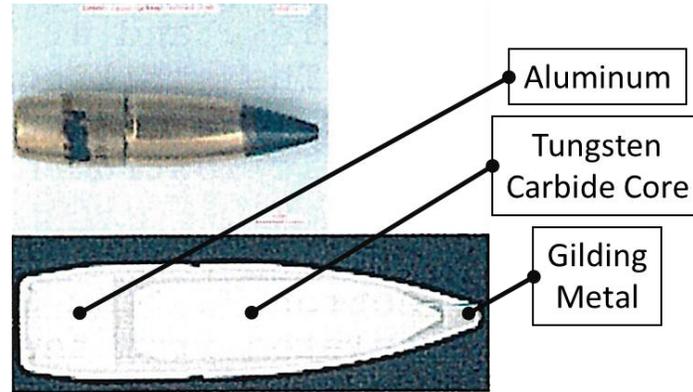


Figure 3-3: Photography and Radiography of the 7.62mm x 51 Armor Piercing 11 Long Range

3.4.3. Test Setup, Instrumentation, Procedures

The ballistic testing was performed at the Canadian Explosives Research Laboratory (Canmet CERL). The test setup, as shown on Figure 3-4, is based on a 11.15 meter long indoor range. The indoor range provided an appropriate temperature-controlled facility to ensure a consistent testing environment. For the study, according to the caliber used, a .308 Win Barrel was set up on a New Lenox Universal Receiver. The velocity of the projectiles exiting the barrel and impacting the panels were measured using an Infinition BR-3502 Doppler Radar, and a Oehler System 83 (with three Model 57 photoelectric screens). Tumbling of the projectile was assessed with a yaw card positioned close to the third screen. The specimens were fixed in place using clamps and metal frames, as shown on Figure 3-5. The 0.508mm thick witness panel, as proposed by NIJ 0108.01 [13], was situated 150mm behind the specimen and was made of aluminum alloy: 2024-T3.

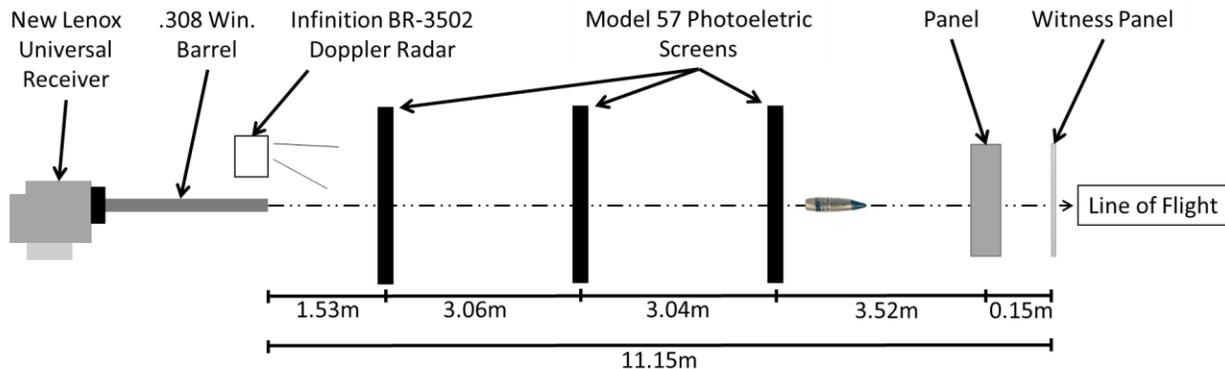


Figure 3-4: Test Setup for Ballistic Impact



Figure 3-5: Specimen Support

Two velocities representing two range categories were tested during this study: one velocity at close range representing Urban Operations and a second representing Field Operations. For the Urban operations (an equivalent discharge distance of 10 m), the projectile was shot from the Universal Receiver with no modification to the powder. The intended velocity using non-modified projectiles was 780 m/s. The second velocity considered in the study was at long range for Field Operations and equivalent discharge distance of 300 meters was selected. The intended velocity at that distance was 608 m/s. Extruded powder was removed and an appropriate amount was put back in the shell. The target velocities selected were based on research independent of this study [18]. In this work, the velocities associated with this study's standard round were assessed on a range. This assessment was conducted at various distances, based on 26 shots from each distance, from 0 to 1300 meters, with a 50 meters increment. The velocity-distance relation is represented in Figure 3-6.

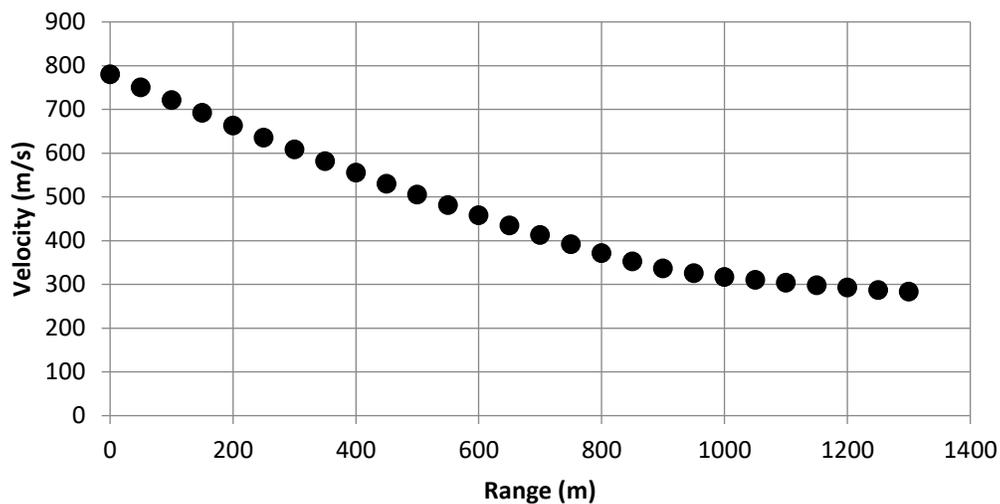


Figure 3-6: Velocity-Distance of 7.62 mm x 51 Armor Piercing 11 Long Range of NAMMO [18]

Before each shot, the panel was weighed and then positioned on the specimen support, with its center aligned with the line of sight, defined by a laser. Once the yaw card was placed and the temperature of the specimen taken, the research team cleared the range. After each shot, the residual mass of the panel was measured and the residual velocity of the exiting projectile was assessed with a high-speed camera. A Photron FastCam SA-Z high-speed video camera was used, camera specifications are shown in Table 3-3. Because of the location of the camera, shooting in the Z direction and capturing speeds in the X-Y plane, corrections had to be included in the residual speed. In order to correct the velocity, distances from the hit to the center of the witness plate in the Z-axis were taken, and corrections were applied using trigonometry. The coordinate reference system is shown on Figure 3-7. During the tests, the resolution of the high-speed video camera was changed, as seen in the Table 3-3. A bigger frame was required for the 300 meters shots because the projectile was impacting the witness panel outside of the 640 x 280 pixels frame. The projectiles with no-modification to the powder (Urban Operations) were shot first, and then projectiles representing Field Operations with an equivalent discharge distance of 300 meters were shot. A total of 36 panels were tested for this study. According to NIJ 0108.01 Standard [13], the caliber tested is for Protective Level III and would normally require 5 hits on the target for a test. However, because of the armor piercing nature of the round, only one hit was assessed.

Table 3-3: Photron FastCam SA-Z High-Speed Video Camera Specifications for the Study

Specimens	Camera Settings		
	Framerate (fps x1000)	Shutter Speed (μ sec)	Resolution (pixels)
UF3 Series, UF4 Series, + FF3-40-1 & FF3-40-2	100	1.25	640 x 280
FF3 Series & FF4 Series (Except FF3-40-1 & FF3-40-2)	50.4	1.25	640 x 512

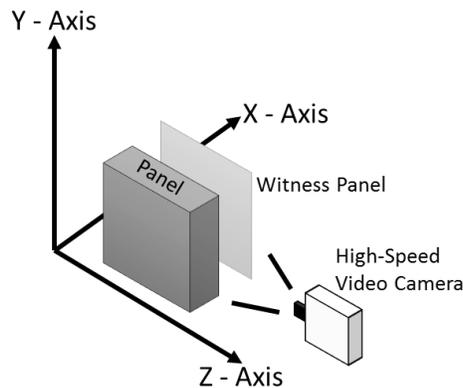


Figure 3-7: Reference System of Coordinates of the Experimental Setup

3.4.4. Numerical Model

Numerous empirical and analytical methods have been developed to assess the terminal ballistic resistance properties of concrete. Many models can measure the depth of penetration into semi-infinite concrete specimens or are able to assess the efficacy of a design. One of the most comprehensive documents addressing this issue, UFC 3-340-01, presents many empirical and analytical models for predicting the resistance of conventional concrete [19]. The methods presented in that document are less well-suited to predicting the behaviour of UHPFRC. Because of its high compressive strength and its ductile behaviour, new predictive methods are required. Recently, Hwang et al. [11] developed an empirical model to assess

hard projectile penetration on concrete targets that includes parameters such as high compressive strength and the use of fibres as a means of reinforcement. While this empirical approach is an efficient way of representing the high-speed impact response of UHPFRC, the increased power of commercial advanced computational software provides a tool for more thoroughly predicting behaviour of UHPFRC when impacted by a projectile. Accurate predictions of UHPFRC ballistic resistance behaviour has been obtained by other researchers such as Sovják et al. [7] using the commercial software, ANSYS Autodyn. In this study, a predictive model was developed using ANSYS Autodyn R18.2 [20], based on the work of Sovják et al. [7].

The model was constructed using a 2-Dimensional (2D) geometry with rotational symmetry to facilitate a faster analysis. The modelled geometry consisted of the UHPFRC panel and the penetrator only. Analyses were conducted not only with the plain tungsten carbide core representing the projectile but also with the gilding metal jacket covering the core. The jacket of the bullet was included in order to more accurately represent the behaviour upon impact. It was concluded by Brown [21] that a jacketed projectile shows better performance when using this type of model. Both concrete panel and projectile were modelled using Smooth Particles Hydrodynamics (SPH), with a size of 0.3 mm [7]. The geometry of the penetrator is illustrated on Figure 3-8. In addition, the panel's dimensions are 100 mm long by 60 mm thick and the panel was fixed at the upper part. The initial velocity of the penetrator was set to 815 m/s to represent the projectile discharge distance for Urban Operations (10 m).

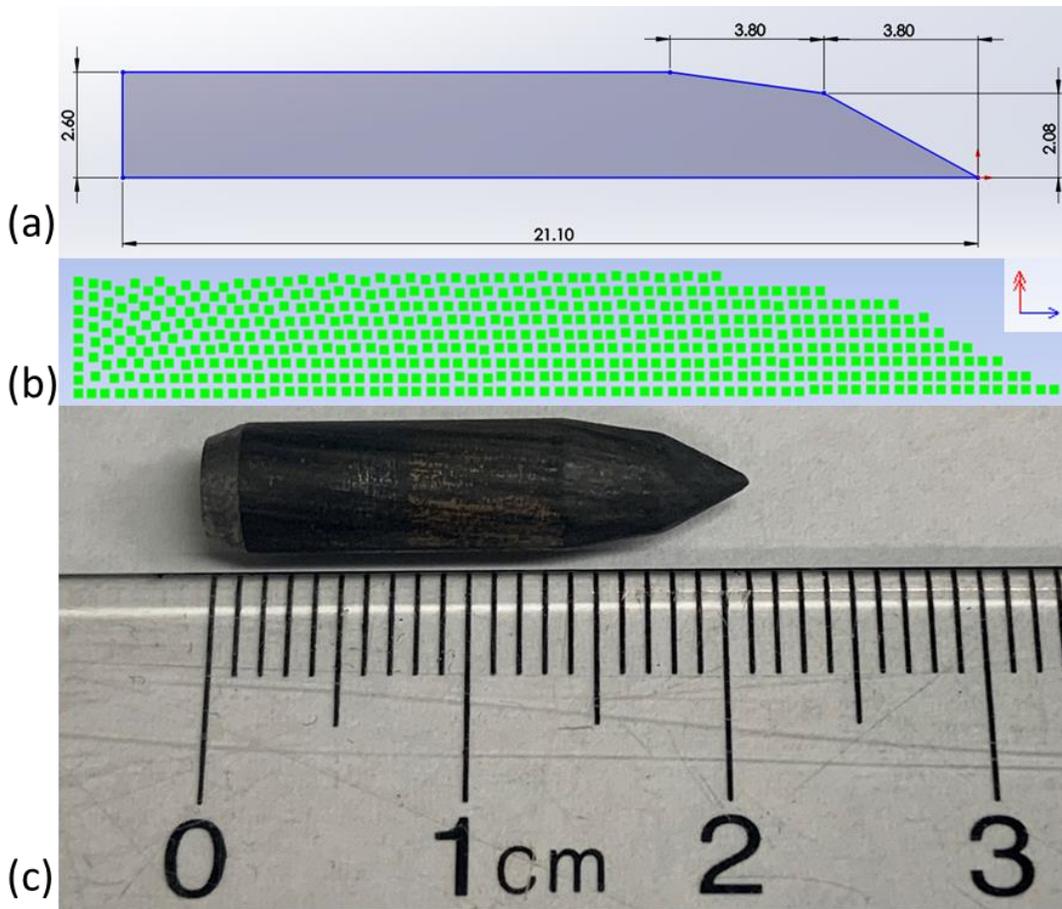


Figure 3-8: ANSYS Autodyn Model of Penetrator (a) Dimensions (mm), (b) SPH Model, and (c) Photography of Post-Impact Penetrator

Material properties and parameters were based on literature and on materials available in the ANSYS Explicit Dynamics Library. For the UHPFRC model, it was first selected from the library, then modified with mechanical properties obtained either in the laboratory or from the manufacturer of the UHPFRC and from parameters used in the literature. The UHPFRC model in ANSYS uses the P-Alpha Equation of State, in order to describe the porous characteristics of the cementitious material. The strength and failure of the concrete is defined by a RHT (Riedel, Hiermaier, Thoma) Concrete model, which is specifically designed for brittle materials [20]. Material used for the penetrator consists of a model from ANSYS Library, enhanced with a Johnson Cook failure model from literature [22]. Material parameters are presented in Table 3-4. Values with no reference are from the ANSYS Library.

Table 3-4: ANSYS Autodyn Material Parameters

Material	Model	Parameters			
UHPFRC	EOS P-Alpha	Reference Density (g/cm ³) 2.45 [15]	Porous Density (g/cm ³) 2.28 [7]	Porous Soundspeed (m/s) 3450 [7]	Initial Compaction Pressure (kPa) 20000
		Solid Compaction Failure (GPa) 6	Compaction Exponent 3		
	RHT Concrete - Strength	Shear Modulus (GPa) 22.06	Compressive Strength f _c (MPa) 150*	Tensile Strength (f _t /f _c) 0.1	Shear Strength (f _s /f _c) 0.18
		Intact Failure Surface Constant A 1.6	Intact Failure Surface Exponent N 0.61	Elastic Strength / f _t 0.7	Elastic Strength / f _c 0.53
	RHT Concrete – Failure	Damage Constant D1 0.04	Damage Constant D2 1	Tensile Failure Hydro (P _{min})	
	Erosion	Erosion Strain 1.5	Type of Geometric Strain Instantaneous		
Tungsten Carbide	EOS - Shock	Density (g/cm ³) 17.00	Gruneisen Coefficient 1.54	Parameter C1 (m/s) 4029	Parameter S1 1.237
	Strength – Johnson Cook	Shear Modulus (GPa) 250	Yield Stress (MPa) 1506		
Brass	EOS-Shock	Density (g/cm ³) 8.45	Gruneisen Coefficient 2.04	Parameter C1 (m/s) 3726	Parameter S1 1.434
	Erosion	Erosion Strain 1.5	Type of Geometric Strain Instantaneous		

*From Laboratory Results

3.5. Results and Discussion

3.5.1. Resistance of the Panels against AP Projectile at Close Range

18 panels were cast and shot at close range, to simulate Urban Operations. These panels were shot after 110 days. The average uniaxial compressive strength of the UHPFRC 3% and UHPFRC 4% were 166 MPa and 170 MPa respectively during the testing. To simulate Urban Operations, ammunition was shot with no modification from the manufacturer. According to the results, the average impact velocity was 821 m/s, very close to the minimum velocity of 823 m/s prescribed by NIJ 0108.01 [13] and exceeded the

predicted velocity of 780 m/s at a range of 11.5 m predicted by Fig. 3-6. Terminal ballistic results were consistent. All panels and witness panels subjected to close range shots were perforated. Every hit was considered appropriate according to the standard and no result was excluded from the analysis. Basic terminal ballistic results, such as debris fragment mass, crater diameters, impact velocity, residual velocity, and characteristics of the projectile at the exit are presented in Table 3-5. The values shown in the table are the average results of three similar tests, with the standard deviation in parentheses. Residual velocity was measured using the high-speed video recordings. The craters dimensions were measured using a 3D scanner and precise measurements were achieved on Solidworks 3D CAD software. In the situation of an irregular shaped crater, as seen on Figure 3-9, the average distance of four points coincident with the middle hole was measured.

Table 3-5: Close Range Terminal Ballistic Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels

Specimens	Debris Fragment Mass (g)	Crater Diameters (mm)		Velocity (m/s)		Exiting Projectile Condition
		Front	Rear	Impact	Residual	
UF3-40	120(±20)	81 (±6)	93 (±11)	813(±3)	632(±7)	IP*
UF3-50	130(±10)	87(±9)	74(±5)	817(±8)	562(±17)	IP*
UF3-60	107(±12)	85(±10)	82(±16)	814(±0)	492(±4)	IP*
UF4-40	140(±37)	77(±5)	97(±13)	818(±0)	620(±13)	IP*
UF4-50	100(±20)	77(±15)	83(±6)	818(±4)	560(±12)	IP*
UF4-60	93(±23)	89(±6)	68(±6)	816(±6)	483(±11)	IP*

Values in parentheses indicate the standard deviation

*IP stands for Intact Penetrator, meaning only the penetrator exited the panel.

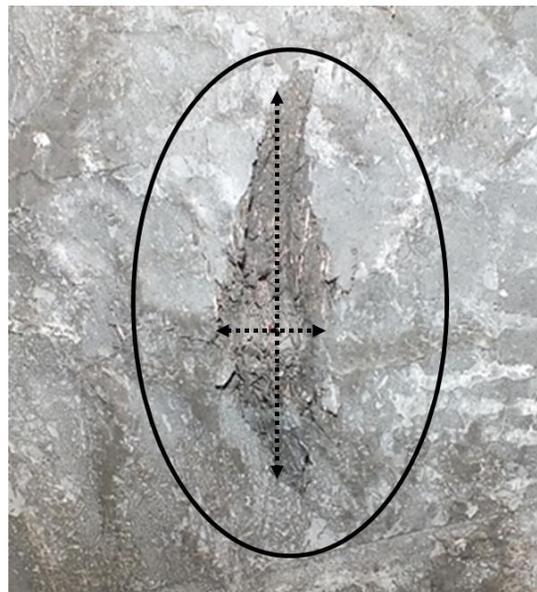


Figure 3-9: Rear Crater after Impact of Specimen UF3-60-1

Energies involved in the system were calculated using initial and residual velocities. Initial, residual and absorbed energy are presented in Table 3-6. Absorbed energy is the difference between the initial and residual energy. It is important to note that the loss of energy is not considered, which means the loss in

resistant energy in the form of debris was not assessed. Kinetic energies were calculated using Equation 3-1 (m is mass of projectile and v is velocity). During penetration, the jacket was stripped from the core, resulting in an intact penetrator exiting the panel, thus results considering only penetrator are shown. Following every shot, all witness panels were perforated.

$$E_K = \frac{1}{2} m * v^2 \quad \text{Equation 3-1 [12]}$$

Table 3-6: Close Range Energy Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels

Specimens	Initial Energy (J)		Residual Energy (J)	Total Absorbed Energy (J)		Witness Panel Perforated
	Bullet*	Penetrator**	Penetrator	Including Jacket	Penetrator Only	
UF3-40	3599(±25)	1738(±12)	1051(±24)	2548(±49)	688(±36)	YES(±0)
UF3-50	3630(±69)	1753(±33)	831(±50)	2799(±19)	922(±17)	YES(±0)
UF3-60	3608(±00)	1743(±00)	637(±11)	2971(±11)	1106(±11)	YES(±0)
UF4-40	3643(±00)	1760(±00)	1010(±41)	2633(±41)	750(±41)	YES(±0)
UF4-50	3646(±31)	1761(±15)	826(±35)	2820(±21)	935(±25)	YES(±0)
UF4-60	3626(±50)	1751(±24)	613(±28)	3013(±34)	1138(±19)	YES(±0)

Values in parentheses indicate the standard deviation

* Bullet initial mass is 10.89g

** Penetrator initial mass is 5.26g

General Impact Behaviour

Eighteen panels were tested at close range with a minimum velocity of 811 m/s and maximum of 822 m/s. The temperature on the panels' surface was between 14 and 16°C. There was no noticeable error in the data acquisition system throughout the tests, from camera footage to velocity measurement systems. The residual velocity was calculated from the high-speed footage and corrections were applied to account for the X-Z plane. The 18 projectiles used for the close-range tests were all similar and there was no change to the barrel in between tests. For all 18 shots, the hit was considered valid. The angle at which the projectile hit the panel was not observed, however, the yaw card method was used in order to analyse the aft view of the bullet post-impact. In every case, the imprints left by the penetration of the bullet were showing no anomalies.

Upon impact, debris on the front side was propelled away from the front face of the panel in all directions. While the speed of the debris was not measured some particles reached the barrel at a range of 11.15 m. During penetration, the jacket was stripped from the hard core. In some cases, the jacket was stuck in the panel, but generally, it was found a few meters in front of the panel. An after-impact jacket is presented on Figure 3-10. The jacket shown on the figure was stuck in the panel, it was then removed for further analysis and to facilitate the scan of the panel. At the back side of the panels, from the high-speed camera point of view, the penetrator was intact after every shot. No major deformation of the projectile was noticeable. Few penetrators were found after impact and for those observed in detail post-impact, little damage was visible apart from groove lines inscribed by the UHPFRC in a pattern consistent with the radial motion of the bullet. One exiting penetrator is shown on Figure 3-8 (c) and these small grooves are noticeable.

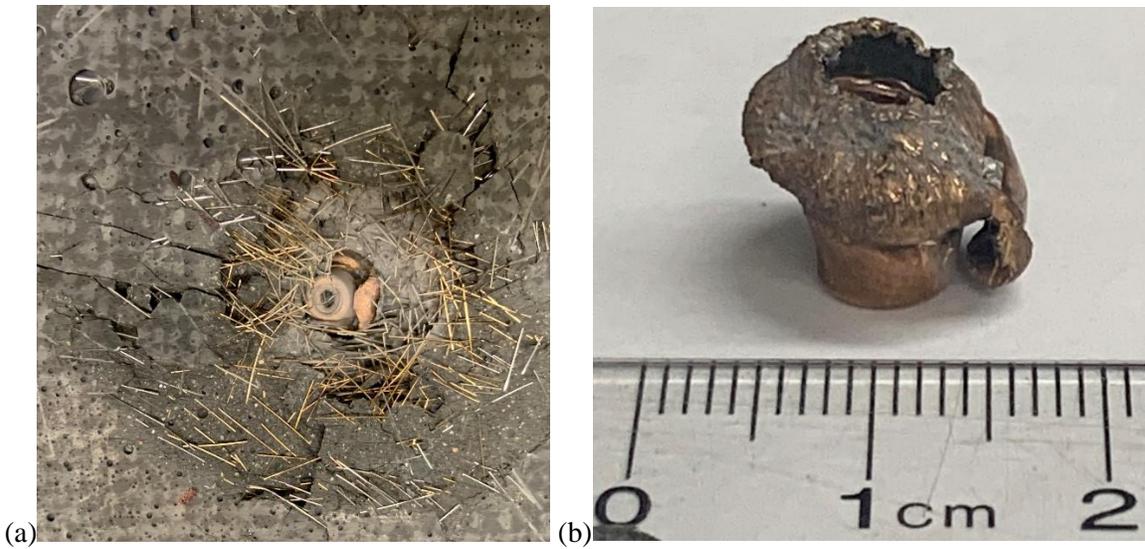


Figure 3-10: Example of (a) Stripped Jacket after Impact Embedded in Panel and (b) Same Jacket Removed from Panel

During the perforation process, the recording from the high-speed camera was very useful. Measuring the residual velocity of the penetrator exiting the panel was possible because of the slower velocity of debris relative to the projectile. A typical penetration action is shown on Figure 3-11. In Figure 3-11(c), aluminium debris can be observed following the penetrator. This aluminium component is part of the bullet as seen on the radiography on Figure 3-3. The component is the explanation of high-intensity light on Figure 3-11 (d). In general, the behaviour of the debris projected from the back side is mostly conservative from one panel to the other. In some cases, fibres were ejected at high speed and were slightly penetrating the witness panel. Deviations from the line of flight were observed when penetrator was exiting the panel. Although considered homogeneous, the trajectory of the projectile can deviate because of instabilities in the material and variable mechanical properties in the panel [23].

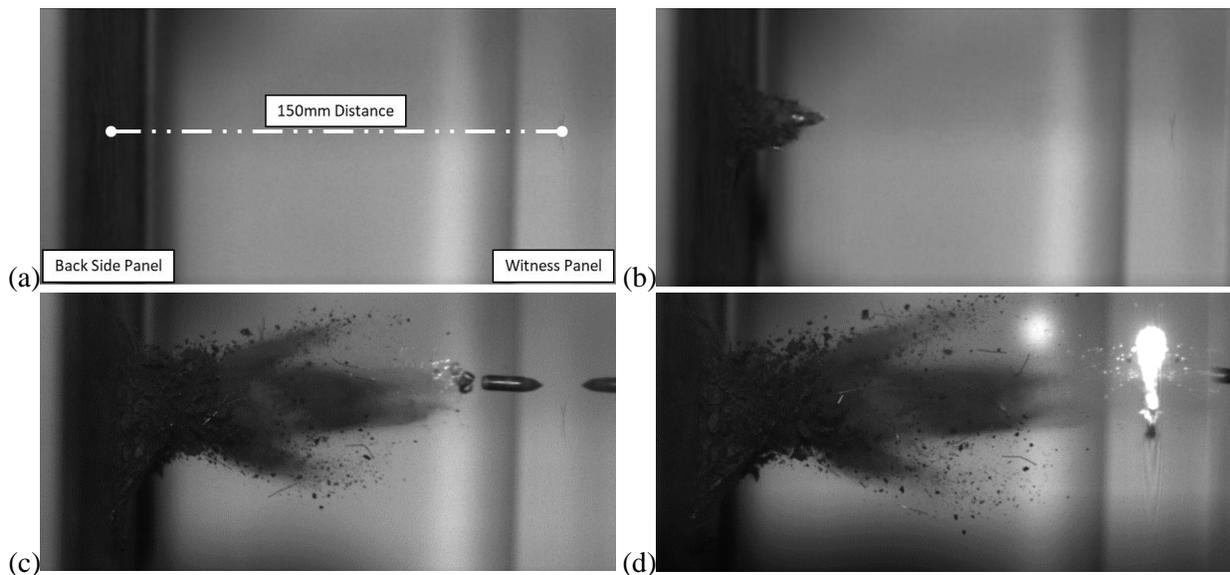


Figure 3-11: High-Speed Camera Footage Presenting Typical Penetrator Exiting Rear Panel of Specimen UF4-60-3, (a) Before Perforation, (b) Penetrator Exiting Panel, (c) Before Impact with Witness Panel, and (d) after Perforation of Witness Panel

Effect of Thickness and Fibre Content

By studying various thicknesses and fibre contents, these effects can be assessed, and the empirical methods can be adjusted for these parameter variations. Three thicknesses (40, 50 and 60 mm) were selected for this study. In addition, two fibre contents were selected: 3% and 4% per volume. According to Fornusek et al. [4], the optimal fibre content for ballistic resistance relative to cost is 2% per volume. However, the two higher fibre contents were selected to add to the body of knowledge and to test commercially available “off the shelf” products. The average residual velocity for each thickness and each fibre content is presented on Figure 3-12 and in Table 3-5. As predicted, the residual velocity would be lowered when increasing the thickness. However, the improvement in residual velocity of panels made with 3% versus 4% fibres per volume is relatively small, which confirms that an optimal fibre content is likely less than 3% as suggested in the literature. In addition, the increasing thickness has a linear effect on resistant energy of the panels. As shown on Figure 3-13, the absorbed energy varies linearly when increasing the thickness. The determination coefficients (R^2) of the linear regression for UF3 Series and UF4 Series are 0.989 and 0.999 respectively. The gain in absorbed energy is not improved significantly between the two fibre contents.

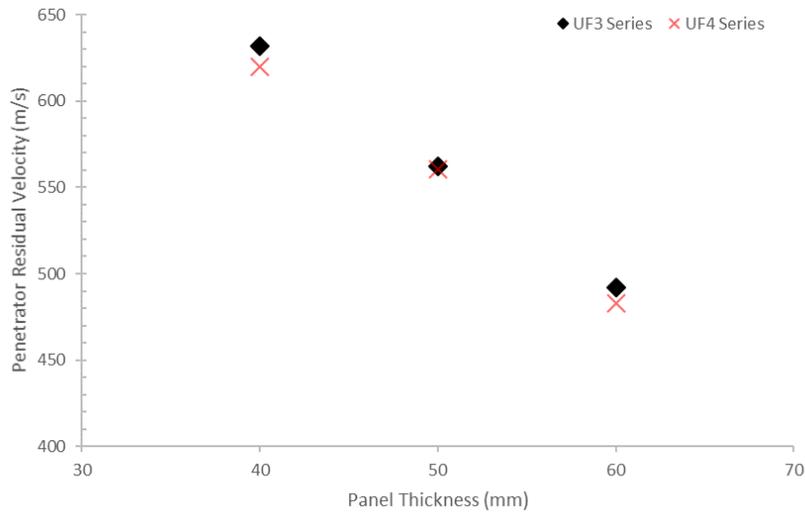


Figure 3-12: Average Residual Velocity of Penetrator for Close Range Tests

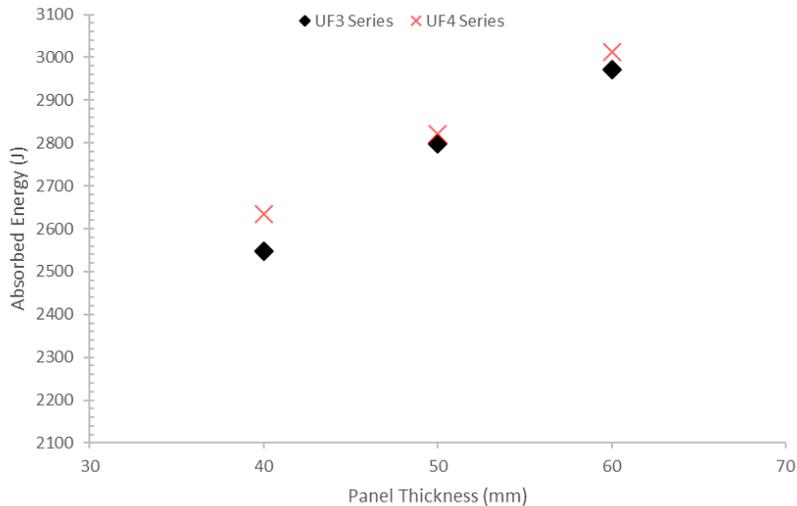


Figure 3-13: Average Absorbed Energy of Panels for Close Range Tests

The craters induced by the high-velocity impact are consistent for the close range tests. The majority of the results show that the front crater is larger than the rear one for the 60mm panels, as seen in Table 3-5. According to literature [7], the opposite may be observed. However, in this study, the difference in kinetic energy and the projectile's configuration and properties are a key explanation to the results. Thinner panels in other studies have less material to propagate the shock wave induced by the projectile, meaning cracks are induced and weaken the back of the panel, hence bigger craters are created at the back. In addition, panels of 40 mm showed larger tunnel diameters than other thicknesses, as shown on Figure 3-14. For the 60 mm panels, no jacket was found in the panels. The potential explanation is that the thickness of the panel improved the behaviour during the tunnelling. The exiting projectile is the tungsten carbide penetrator that presents no macro deformations, thus no increasing surface of the penetrator. A smaller crater is formed since the projectile is smaller, with less contact surface and lower kinetic energy, and with more material to absorb the shock wave. Fibres are then retaining the material in place, acting as bridges for crack propagations [24]. For the 50 mm panels, the results differed between the 3% and the 4% panels. The 3% panels showed back crater diameters larger than the front crater. The opposite was observed for the 4% panels.

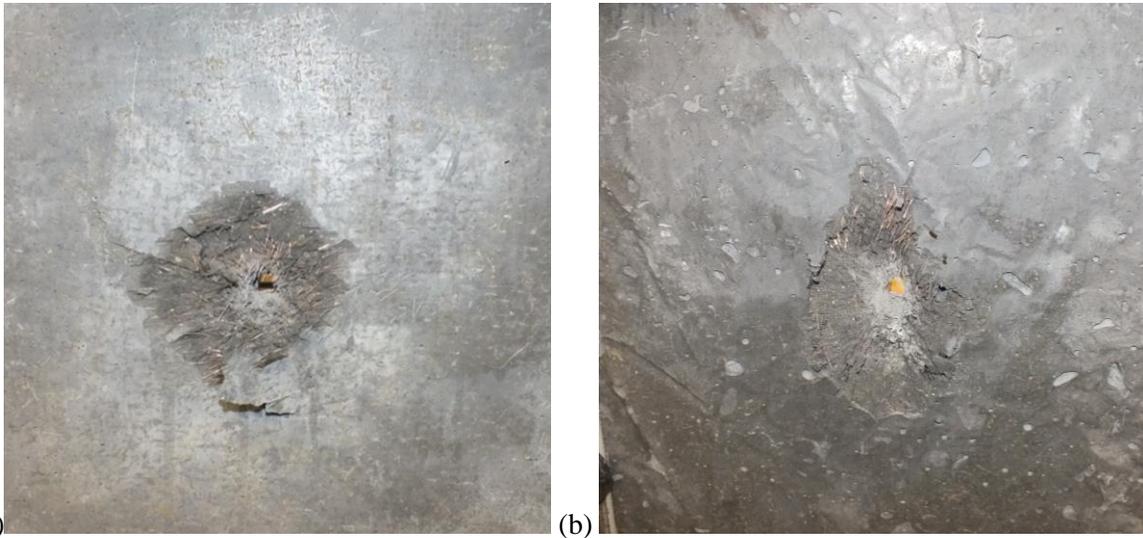


Figure 3-14: 40 mm Specimen after Impact (a) Front View, and (b) Rear View (Specimen UF3-40-2)

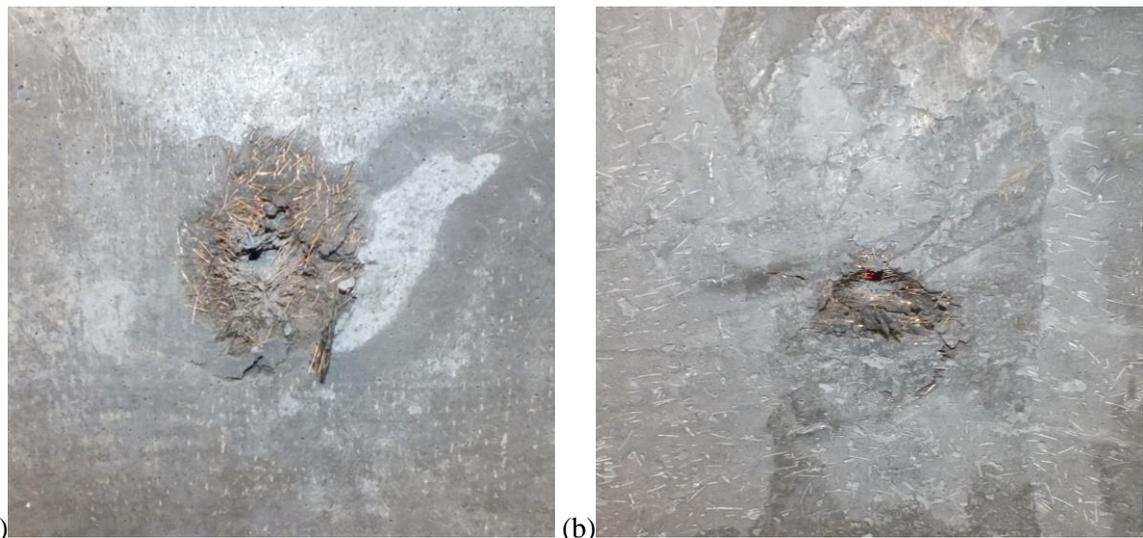


Figure 3-15: 60 mm Specimen after Impact (a) Front View, and (b) Rear View (Specimen UF4-60-2)

After impact, it was noted that generally the mass loss was decreasing when the thickness of the panels was increased. In addition, this tendency was generally observed with the increase of fibre content. This observation based on the results shows that the improvement was neither completely consistent nor particularly significant. Compared to similar research, Sovják et al. [7] observed a mass loss of 98 g to 126 g for 50 mm specimen of UHPFRC with 2% to 2.5% of fibres per volume, impacted with a non-deformable 7.62 mm x 39 projectile. It was observed that the residual hard core was deformed, unlike the exiting penetrator in this study. As seen on Figure 3-16, the mass losses for 50 mm UF3-Series and UF4-Series are 130 g and 100 g respectively for a 7.62 mm x 51 AP projectile. The numbers are very close to the previous research results for materials sharing similar material properties (average uniaxial compressive strength of around 150 MPa). The debris were ejected in three forms during the perforation process: spalling, tunneling and scabbing.

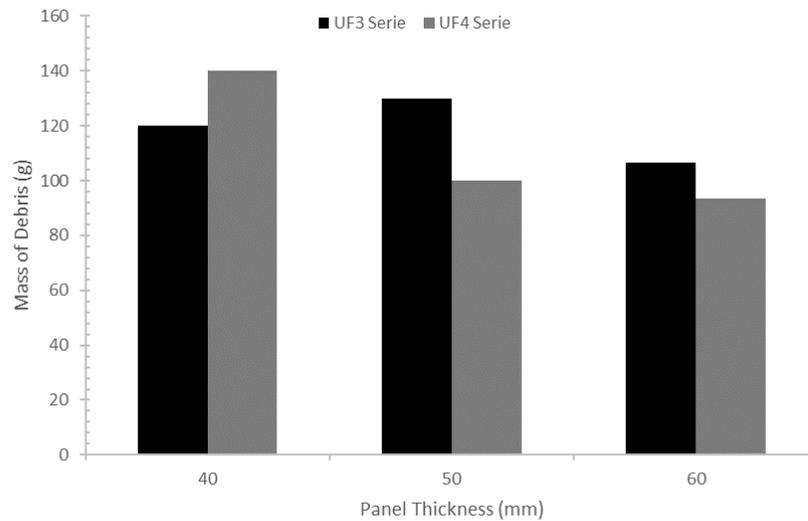


Figure 3-16: Mass Debris after Impact for UF3 & UF4 Series

Failure Modes

All eighteen panels tested with no modification to the propellant of the rounds (Urban Operations range category) were perforated by the projectile. Considering the high velocity of the projectile, the bullet induces a response that is localised in the area of the ballistic impact, which is independent of the support conditions [25]. This focused the observations to the damaged area, which can be separated in three separate categories, or failure modes, as seen on Figure 3-17. The first mode is spalling, which occurs at the front of the panel. The second failure mode is tunneling. Finally, the last mode is scabbing, at the back face of the panel. In general, brittle fracture is considered for cementitious materials. However, the addition of fibres improves ductility and lowers the fragmentation volume.

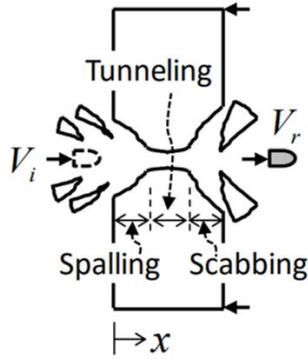


Figure 3-17: Failure Modes of Concrete Target [11]

The failure modes occurring in all the tested panels are similar to the illustration of Figure 3-17. A section view of a 60 mm panel of UF3 Series and one 60 mm panel of UF4 Series are shown on Figure 3-18 (a) and Figure 3-18 (b) respectively. According to the results and observations, spalling was caused by the bullet including both the jacket and the hard core. It was observed that the jacket was stripped from the hard core during the first failure mode. Following the removal of the jacket, the penetrator continued its penetration action through tunnelling and finished its course with scabbing at the back. It was mentioned previously that the crater diameter at the front of the panel was generally larger on the front face than at the back. This was most likely caused by the higher contact surface of the bullet at the impact face compared to the contact surface of the bullet, penetrator only, exiting the panel. In addition, no deflection of the panel was noticed after impact.

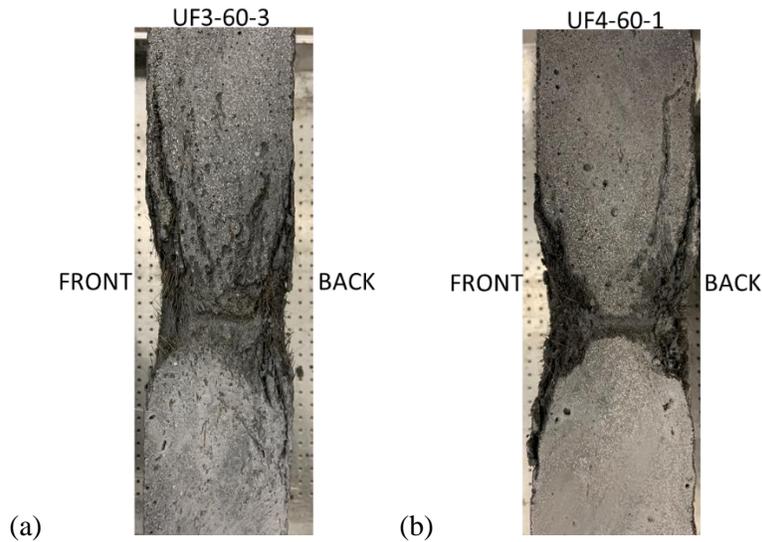


Figure 3-18: Section View of 60mm Panel of (a) UF3 Series and (b) UF4 Series

Crack propagation was similar throughout the thicknesses. Upon impact, cracks would propagate starting from the top of the spalling cone. During perforation, cracks from the scabbing cone were noticed. The observations can be seen on Figure 3-18. Crack propagation was still minimal for the UHPFRC panels. Without the fibres in the mix, as studied by Máca et al. [5], the material fails in a brittle behaviour manner. UHPC panels of 50 mm did not resist to deformable small arm projectile impacts used in the research and macrocracks propagated throughout the specimens, as seen on Figure 3-19 (a), separating the target in four major pieces. In this study, no crack was observed on the surface of the panels, as see on Figure 3-19 (b).

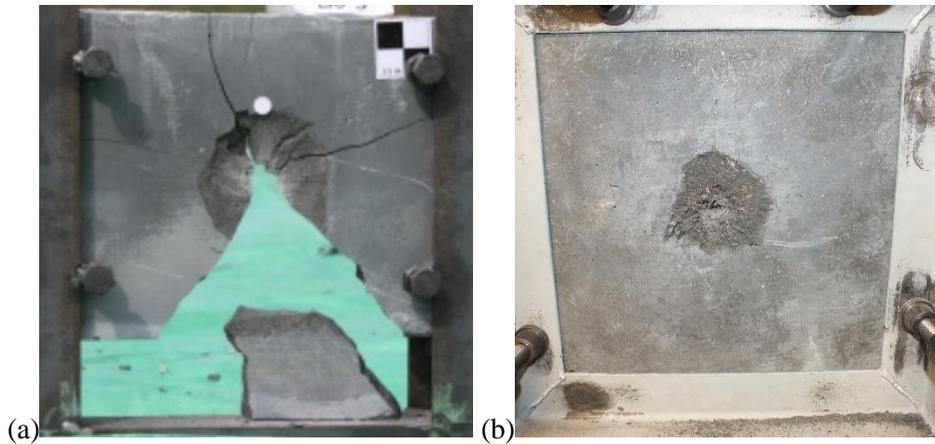


Figure 3-19: Crack Propagation in (a) 50mm Panels of UHPC [5] and (b) 50mm Panels of UHPFRC 3% (Specimen UF3-50-1)

Material Characteristic Based on Energy Loss and Projectile Calibre

Almansa et al. [14] developed the parameter K , a material characteristic. This parameter represents the kinetic energy loss to thickness ratio ($\Delta E/t$). This parameter directly excludes the thickness of the panel tested and the initial kinetic energy of the projectile, which can be very useful for design purposes. Furthermore, by dividing K by the square caliber of the projectile (K/Φ^2) a parameter considering the geometry of a projectile is then considered. The Equation 3-2 can be used to calculate the minimal panel thickness (t_{min}) required to absorb the total initial kinetic energy. In this study, parameters were calculated for UHPFRC with 3% and 4% fibres per volume for commercially available products. Parameters were calculated using the core only, because of the constant mass throughout the perforation process [7]. Values for this study in combination with other studies are shown in Table 3-7. K parameters are compared in the table for various cementitious materials. Almansa et al. [14] considered the total diameter of the projectile for their calculations, unlike Sovják et al. [7] and this study, where only the hard core was considered (i.e. mass, diameter, initial kinetic energy and residual kinetic energy). That may explain the higher values for that research. K values of this study are very close to results from the paper of Sovják et al. [7].

$$\frac{K}{\Phi^2} * t_{min} * \Phi^2 = \frac{1}{2} m * v^2 \quad \text{Equation 3-2 [7]}$$

Table 3-7: Results of K and K/Φ^2 for UF3 Series and UF4 Series

Material	Calibre					
	7.62mm x 51 AP Nammo AP 11 LR		7.62mm x 51 AP [14]		7.62mm x 39 FMJ-MS [7]	
	K (J/mm)	$\frac{K}{\Phi^2}$ (J/mm ³)	K (J/mm)	$\frac{K}{\Phi^2}$ (J/mm ³)	K (J/mm)	$\frac{K}{\Phi^2}$ (J/mm ³)
UHPC	-	-	39.4	0.679	16.5	0.512
UHPFRC 0.5%	-	-	-	-	17.5	0.543
UHPFRC 1.0%	-	-	40.3	0.694	17.7	0.547
UHPFRC 1.5%	-	-	-	-	19.1	0.593
UHPFRC 2.0%	-	-	-	-	18.8	0.583
UHPFRC 2.5%	-	-	-	-	19.6	0.608
UHPFRC 3.0%	18.03*	0.67*	-	-	-	-
UHPFRC 4.0%	18.80*	0.70*	-	-	-	-

*Results obtained from this study, excluding the jacket of the bullet

Predictive Model Based on Resistant Energy

A predictive model accounting for all stages of energy absorption for concrete targets impacted by a non-deformable projectile was developed by Hwang et al. [11]. The model is based on the kinetic energy of the projectile, considering the mass (m), the initial velocity (v_i) and the residual velocity (v_r), as seen in Equation 3-3. The kinetic energy should equal the resistant energy of the target, shown in Equation 3-4. Considering the three failure modes of concrete upon impact of a high velocity impact, the resistant energies of each section are calculated. The first section is scabbing (E_S), then tunnelling (E_T), and finally, scabbing (E_C). The model is suitable for this research since it is considering parameters such as high compressive strengths, reinforcement with fibres, aggregate size, and non-deformable projectiles. Based the work of Hwang et al. [11], Kravanja et al. [10] modified the previous model for better representation of the failure mechanism of the spalling and scabbing portions (named *Mod. Hwang et al. model*). The study proved that better matching results are obtained by using a conventional method of calculating the area involved the two failure modes, unlike the non-conventional method used by Hwang et al. [11].

In this study, it is shown that the *Mod. Hwang et al.* model is consistent with the experimental results. Based on the test results for close range tests, the *Hwang et al. model* shows percentage difference of 3.7% to 11.1% between the resistant energy calculated from the model and the kinetic energy absorbed by the panels from the experimental results. The use of the *Mod. Hwang et al.* model gave percentage difference of 0.4% to 6.0%. The results for theoretical resistant energy tend to be less when compared to the kinetic energy loss absorbed calculated from the velocities observed in the experiments. Results of the initial prediction model and the *Mod. Hwang et al.* model are presented in Table 3-8. The results are highly sensitive to the compressive strength of the material; a value of 150 MPa was used for the calculations.

$$E_K = \frac{1}{2} m * (v_i^2 - v_r^2) \quad \text{Equation 3-3}$$

$$E_R = E_S + E_T + E_C \quad \text{Equation 3-4}$$

Table 3-8: Resistant Energy of Prediction Model and Comparison of Hwang et al. Model [11] and Mod. Hwang et Al. Model [10] for UF3 and UF4 Series

Specimen	v_i (m/s)	v_r (m/s)	E_K^* (J)	E_R (J)	Mod. E_R (J)	Difference** E_K & E_R (%)	Difference** E_K & Mod. E_R (%)
UF3-40	813.0	632.0	687.9	655.5	694.7	4.8	1.0
UF3-50	816.5	562.0	922.7	827.8	873.7	10.8	5.5
UF3-60	814.0	492.0	1106.0	989.9	1041.5	11.1	6.0
UF4-40	818.0	619.7	749.9	716.3	760.0	4.6	1.3
UF4-50	818.3	560.4	935.2	901.2	952.1	3.7	1.8
UF4-60	816.0	482.6	1138.7	1076.9	1134.1	5.6	0.4

*Mass of projectile is 5.26g. Only hard core was considered.

**Percentage difference is the absolute difference divided by the average of the values, multiplied by 100.

Numerical Simulation

The numerical simulation performed using ANSYS Autodyn correlated extremely well with the experimental results. The outcome of debris, failure modes, crater diameters and crack propagation are similar to the tests. For the comparison, only the 60 mm panel was simulated. The various results are presented in Table 3-9. It can be observed that the model predicted appropriate crater diameters but was less accurate in predicting the residual velocity of the penetrator. However, the predicted impact behaviour of the brass was similar to the experimental results, where the jacket was stripped entirely from the core, as shown on Figure 3-20 (b). The hard core was eroded and deformed, compared to initial shape as shown on

Figure 3-20 (a); thus, more work is needed to better represent the material characteristic of the tungsten carbide core.

Failure modes were well-represented by the model. Spalling and scabbing are following a 50 to 60° angle. This angle, or cone angle, is comparable to the prediction model values from Hwang et al. [11], which are between 42° to 57° for a sharp-nose and an ogive shape.

Table 3-9: Impact Results of Numerical Simulation on ANSYS Autodyn Compared to Experimental Results

Parameter	Simulation	Experimental Results		Ratio Exp./Sim.	
		UF3 Serie	UF4 Serie	UF3 Serie	UF4 Serie
Front Crater Diameter (mm)	86	85	89	0.99	1.03
Rear Crater Diameter (mm)	83	82	68	0.99	0.82
Residual Velocity of Penetrator (m/s)	375(at 0.1ms)	492	483	1.31	1.29

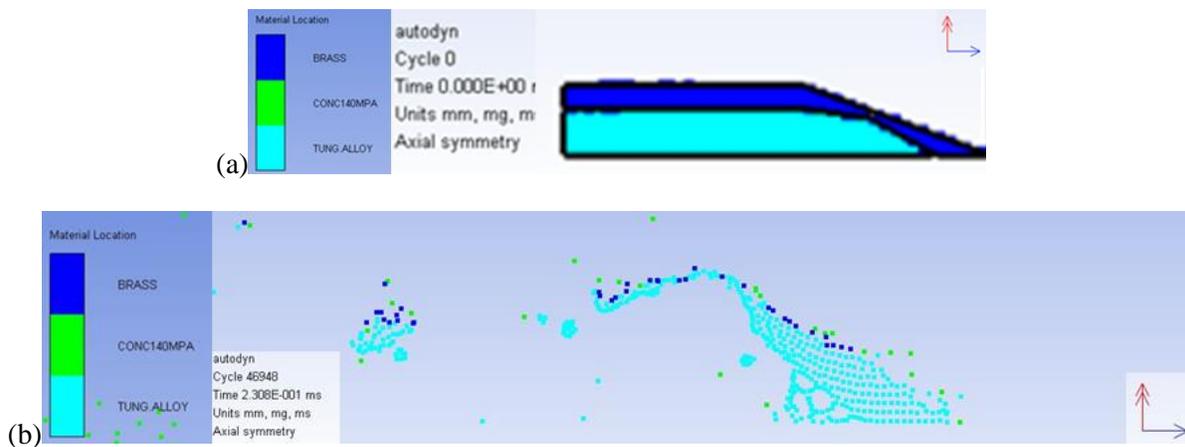


Figure 3-20: (a) Jacket and Core before Impact and (b) after Impact from Numerical Simulation

The crack pattern from the simulation had similarities to the experimental results. As shown on Figure 3-21 and Figure 3-22, the cracks are following the bullet line of flight and extending in the material. The predicted cracks are similar to observations from Figure 3-18, in that the cracks are longer than the craters. The damage which occurred in the panel during perforation process is localized, as shown on Figure 3-21. According to the simulations results, even though the material is completely damaged around the tunnelling area, Figure 3-22 shows that the material is experiencing both plastic and elastic deformations, thus keeping the damaged material in place. According to the numerical simulation, the scabbing depth is slightly greater than the spalling depth. One explanation could be the intensity of the shock wave upon impact, which could have resulted in higher rate of deformations and fractures than existed in the experiment. However, as observed with experimental results, the detailed behaviour of the panel changes from one impact to the other. Non-homogeneous cementitious materials present many differences from one pour to the other, thus resulting in minor changes in material properties.

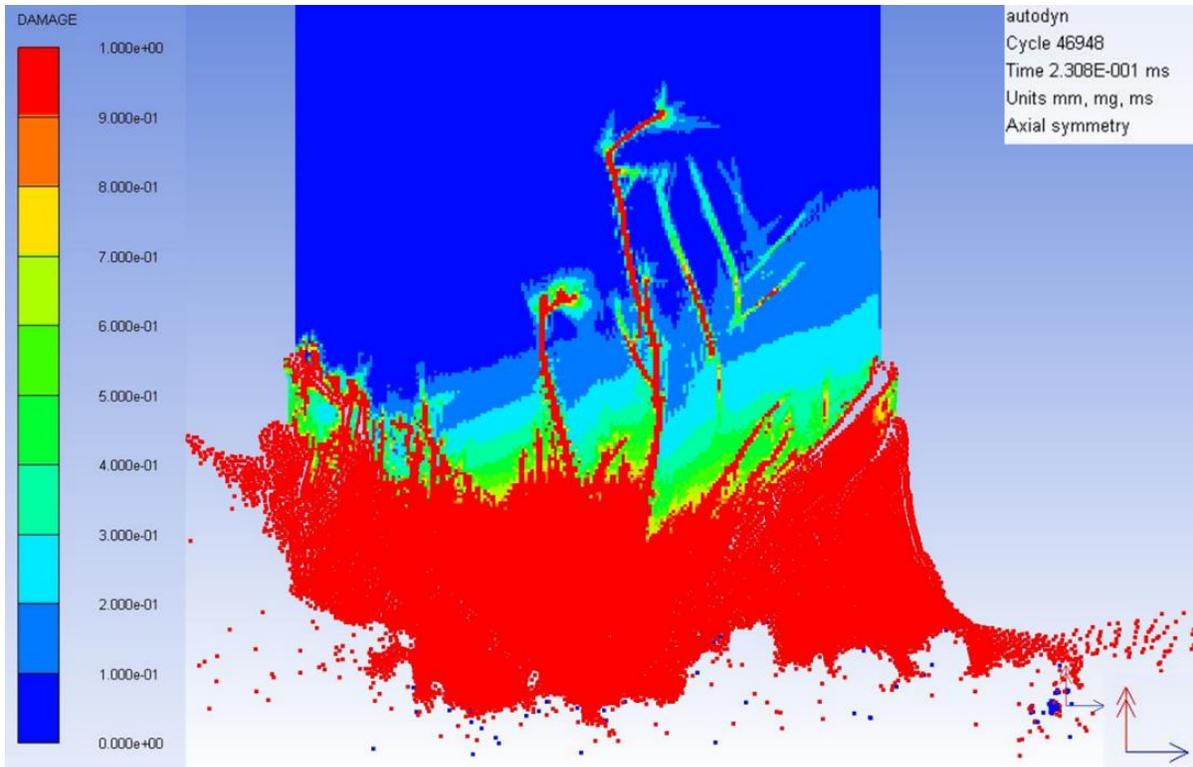


Figure 3-21: Post-Impact Damage Contour of 60mm Panel on Autodyn

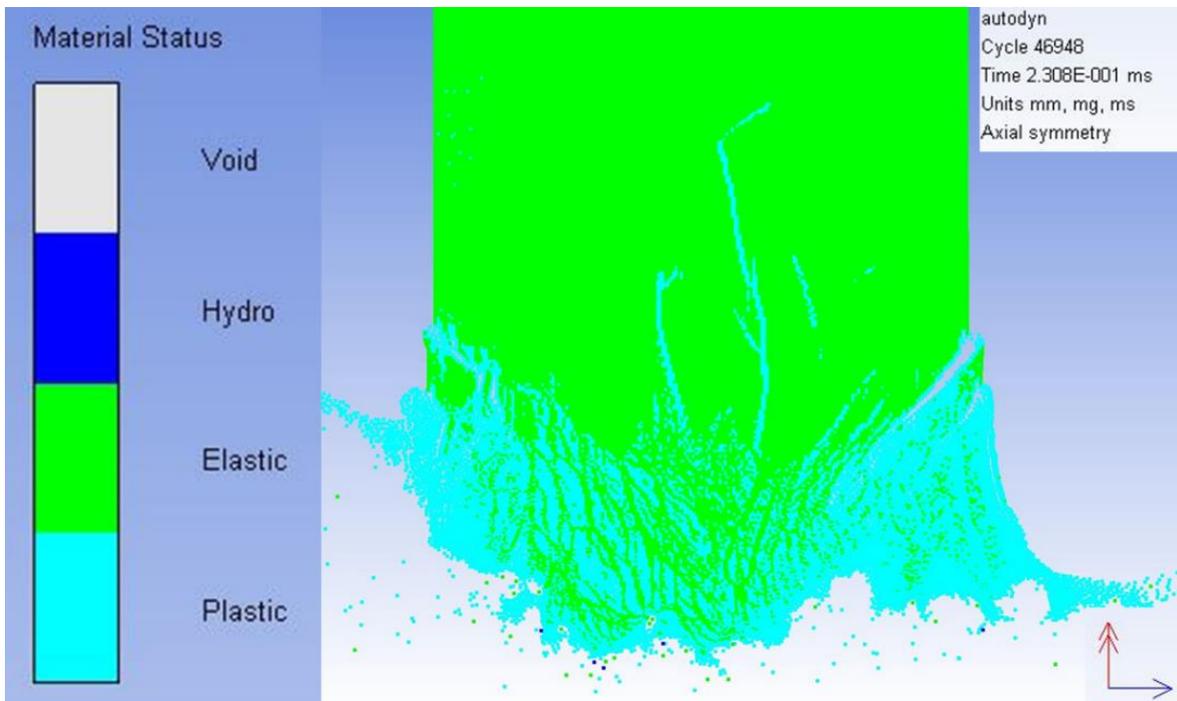


Figure 3-22: Post-Impact Material Status Contour of 60mm on Autodyn

The numerical simulation performed on Autodyn with the use of SPH to model the jacket, core and target appropriately predicted the experimental behaviour. It allowed a good representation of the behaviour of the fibre reinforced cementitious material and simulated the behaviour of the jacket during perforation. Although the core was not characterized with proper material parameters to match the manufacturer values, the general behaviour of the target itself was achieved, which was the intent of the numerical study. The use of SPH of 0.3 mm in size as mentioned by Sovják et al. [7] allowed very good representation of the crack pattern and failure modes to develop fully.

3.5.2. Resistance of the Panels against AP Projectiles at Long Range

One parameter of the study was the equivalent discharge distance, characterized by a different velocity of the bullet. The velocity parameter allowed more results for the study of applicability of the energy model proposed by Hwang et al. [11] and the *Mod. Hwang et al.* model [10]. It also provided additional data points for this specific material and projectile characteristics (i.e. values of K and K/Φ^2). For this study, 18 panels were cast with the same geometry and fibre content as the close range tests. Due to time constraint and availability of the indoor shooting range, the specimens were tested at 28 days and were cured for a shorter time period than the panels in the initial study. The average uniaxial compressive strength of the UHPFRC 3% and UHPFRC 4% were 142 MPa and 132 MPa respectively. In order to reach an equivalent distance of 300 meters in an indoor range limited by 11.15 meters, propellant (powder) was removed from the case. The appropriate ratio was achieved by trial and error. A velocity of approximately 615 m/s was achieved, which is close to values obtained from Figure 3-6. The laboratory conditions during testing were like the previous tests, with panel temperature varying around 13°C. All panels were shot, and results were consistent. General terminal ballistic results are presented in Table 3-10 and energies calculated from observed velocities are presented in Table 3-11. The residual velocity and crater dimensions were calculated using the same techniques that were employed for the previous tests.

Table 3-10: Long Range Average Terminal Ballistic Results Caused by AP Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels

Specimens	Debris Fragment Mass (g)	Crater Diameters (mm)		Velocity (m/s)		Exiting Projectile Condition
		Front	Rear	Impact	Residual	
FF3-40	93(±31)	63(±10)	87(±12)	611(±2)	341(±28)	IP*
FF3-50	87(±12)	72(±9)	93(±2)	612(±5)	267(±26)	IP*
FF3-60	100(±20)	68(±15)	80(±8)	611(±4)	18(±2)	IP*
FF4-40	67(±31)	60(±3)	93(±22)	613(±6)	360(±29)	IP*
FF4-50	93(±12)	71(±2)	75(±4)	618(±8)	242(±24)	IP*
FF4-60	60(±20)	68(±3)	68(±40)	614(±4)	64(±66)**	IP*

Values in parentheses indicate the standard deviation

*IP stands for Intact Penetrator, meaning only the penetrator exit panel.

**One of three specimens did not perforate.

Table 3-11: Long Range Energy Results Caused by Armor-Piercing Rounds on 350 mm x 350 mm Surface Panels

Specimens	Initial Energy (J)		Residual Energy (J)	Total Absorbed Energy (J)		Witness Panel Perforated
	Bullet*	Penetrator**	Penetrator	Including Jacket	Penetrator Only	
FF3-40	2035(±14)	983(±7)	308(±49)	1727(±60)	688(±36)	YES
FF3-50	2037(±34)	984(±16)	139(±30)	1898(±13)	922(±17)	YES
FF3-60	2035(±27)	983(±13)	1(±0)	2034(±27)	1106(±11)	NO
FF4-40	2048(±39)	989(±19)	342(±54)	1706(±29)	750(±41)	YES
FF4-50	2082(±54)	1006(±26)	155(±31)	1927(±31)	935(±25)	YES
FF4-60	2051(±27)	990(±13)	19(±24)	2032(±30)	1138(±19)	1 of 3 perforated

Values in parentheses indicate the standard deviation

* Bullet initial mass is 10.89g

** Penetrator initial mass is 5.26g

General Behaviour

In this study, all eighteen panels were shot at ambient laboratory conditions. The velocity reached was equivalent to a shot from 300 meters representing Field Operations and every hit was considered valid. In terms of perforation, out of 18 UHPFRC panels, only one target did not perforate (specimen FF4-60-3), as shown on Figure 3-23. For the witness panels, none was perforated for the FF3-60 Series, and only one was perforated in the FF4-60 Series (UF4-60-2, shown on Figure 3-24 from the high-speed camera footage). The residual energy of the penetrator was too low to pierce the aluminium but was sufficient to dent it. However, as mentioned in NIJ 0108.01 [13] as a check for perforation, light was not passing through the panel. For the craters, the diameters were smaller on the front side of the panel than for the close range tests, but no significant change to the rear crater was noted between the experimental studies at the two different range categories. As observed from the previous study, the jacket was stripped from the core and only the penetrator continued its flight. The tungsten carbide projectile did not show any deformations after perforation process, and the exiting penetrator was tumbling at the exit, as shown on Figure 3-24, due to low speed and interaction with the cementitious target.

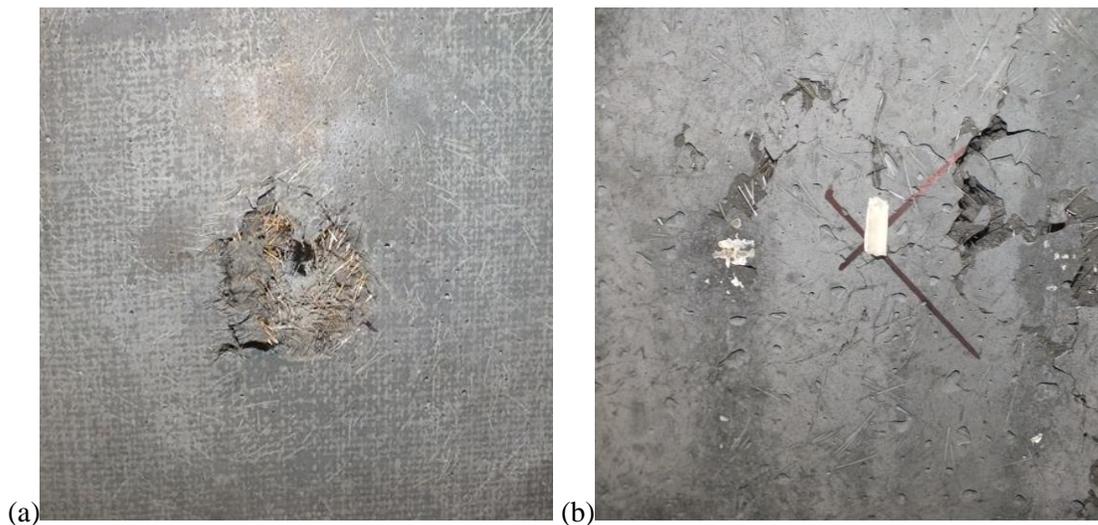


Figure 3-23: Specimen FF4-60-3 after Impact (a) Front and (b) Rear



Figure 3-24: Tumbling of the Penetrator at the Exit of Specimen UF4-60-2

The thickness of the panels had an important role in energy absorption similar to that observed in the previous study. As shown in Table 3-11, the effect of the thickness is considerable with an approximative gain of 150 J for every added centimeter. However, an increased fibre content in the UHPFRC panels from 3% to 4% did not show significant improvement in the 18 panels tested. The results from the FF4-60 Series are too variable regarding perforation to make any final conclusions: the first hit perforated the specimen, but not the witness panel, the second hit perforated both the specimen and witness panel, and the third hit did not go through the specimen. However, for both fibre content, the 60 mm panels were able to sufficiently slow down the penetrator to avoid perforation of the witness panel, with the exception of one test where the bullet was stopped in the UHPFRC panel. The maximum energy absorbed measured for the long range study was 2066 J when considering the initial bullet with the jacket. In addition, it is important to consider that these tests were performed at 28 days after casting, unlike the previous study done at around 110 days. The uniaxial compressive strength was lower by approximatively 30 MPa.

Material Characteristic Based on Energy Loss and Projectile Calibre

The parameter K , which defined the energy absorbed for one unit of distance (ΔE in joules divided by the thickness in mm), was calculated according to the parameters for a long range test. According to Almansa et al. [14], the material characteristic (K) is non-related to parameters such as impact velocity, which in this scenario, is different from the previous study. However, it was noted that the measured uniaxial compressive strength of the specimens during testing was almost 30 MPa less. As presented in Figure 3-25, K for FF3 (16.72 J/mm) and FF4 (16.46 J/mm) series are low compared to UF3(18.03 J/mm) and UF4(18.80 J/mm) values. One explanation could be the difference in compressive strength, which is one crucial parameter related to the performance of the panels. The difference is minimal and similar for both studies, but it is recommended that the effect and the value of f'_c should be considered in future models.

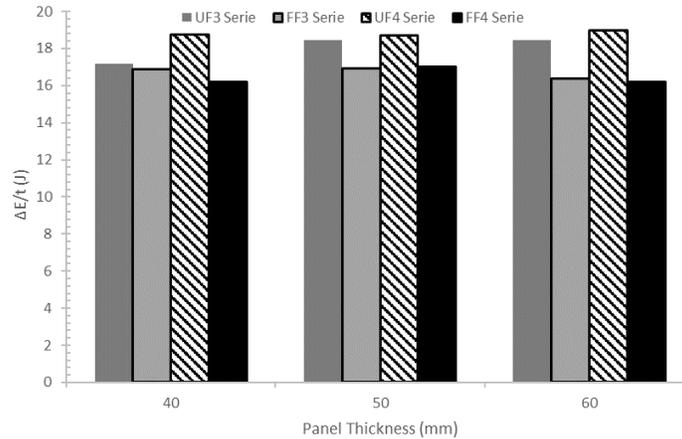


Figure 3-25: Comparison of K Values for the 11m Versus the 300m (Equivalent Velocity) Impact with AP Rounds

Predictive Model Based on Resistant Energy

The initial velocity of the projectile was a parameter for this study. The results from different initial conditions was useful to measure the applicability of the prediction model proposed by Hwang et al. [11] and the *Mod. Hwang et al.* model [10]. As presented in Table 3-12, the *Mod. Hwang et al.* model is more accurate than the initial prediction model for each thickness. However, the differences are much greater than for the UF3 and UF4 Series. The resistant energies calculated from the prediction models are lower than the absorbed kinetic energies. The values are more conservative which could be beneficial for design purposes and requirements. The differences are very sensitive to residual velocity, which in this case, only average values were used.

Table 3-12: Resistant Energy of Prediction Model and Comparison of Hwang et al. Model [11] and Mod. Hwang et al. Model [10] for FF3 and FF4 Series

Specimen	v_i (m/s)	v_r (m/s)	E_K^* (J)	E_R (J)	Mod. E_R (J)	Difference** E_K & E_R (%)	Difference** E_K & Mod. E_R (%)
FF3-40	611.3	341.3	676.5	542.0	574.5	22.1	16.3
FF3-50	612.7	267.5	795.8	682.8	720.7	15.3	9.9
FF3-60	611.3	17.7	982.1	817.9	860.6	18.2	13.2
FF4-40	613.3	359.9	648.7	591.2	627.2	9.3	3.4
FF4-50	618.3	242.0	851.6	747.6	789.8	13.0	7.5
FF4-60	613.7	64.4	979.5	890.6	937.9	9.5	4.3

*Mass of projectile is 5.26g. Only hard core was considered.

**Percentage difference is taken as the absolute difference divided by the average of the values, multiplied by 100.

3.6. Conclusions

The purpose of this chapter was to present the experimental program testing the ballistic resistance of UHPFRC panels against armor-piercing small-arms munitions. The tests were simulating two types of armed engagements. The bullets for the first engagement simulated an equivalent discharge distance of approximately 10 meters (Urban Operations) and the second at approximately 300 meters (Field Operations). The protective panels tested were thin and can be used for many military and civilian projects. It has indeed been demonstrated that the two products tested have good resistance against AP projectile impacts. Furthermore, the results obtained from various predictive models were consistent with the experimental behaviour. The detailed conclusions related to this article are presented below.

1. It appears from ballistic tests performed on different panel thicknesses that the ballistic resistance of panels increases linearly with panel thickness. For short-distance fire, all UHPFRC 40, 50, and 60 mm thick panels, including aluminum witness panels were perforated. For long distance fire, only the 60 mm panels of UHPFRC 3% and 1 panel of UHPFRC 4% were able to reduce the energy of the projectile sufficiently to avoid perforation of the witness panel. A single 60 mm UHPFRC 4% panel was not perforated.
2. The difference in fibre dosage between 3% and 4% per volume slightly improved the ballistic performance of the panels for the short distance shots but was not considered significant. No effect was found on long-range shots.
3. The panels showed a high energy-absorbing capability against AP rounds. The highest level of absorbed energy at close range conditions was measured at 3089 J (when considering the initial jacket of the projectile). At long range conditions, the highest level of absorbed energy was 2066 J, with no perforation of the UHPFRC panel. During the perforation process, in all cases, the jacket was detached from its core and was projected forward of the panel, or was caught in the panel, mostly in the tunneling part
4. The post-experimental analysis established the values of K and K/\varnothing^2 for the materials used for targets. These material characteristics can be used for further research or for design purposes.
5. The results of this experimental study demonstrated the applicability of a prediction model supported by multiple researchers. This prediction model was valid for panels tested under the selected conditions. It was demonstrated that the modified model proposed in the literature showed a better correlation with the test results.
6. A numerical model was developed based on literature and experimental results of this study. The simulation was developed on Autodyn. The model uses SPH and 2D rotational symmetry for better representation and analysis of the behaviour of UHPFRC. The model achieved very good results representing panel behaviour, in terms of crater diameters, failure modes and crack pattern, which was the intent of the numerical simulation. For the projectile, the jacket was stripped from the hard core during both simulation and experimental tests; however, the penetrator was highly deformed during the simulation. Thus, more work is needed for better representation of the hard core to match experimental results.

3.7. Acknowledgement

This research project was partially funded by the Quality Engineering Test Establishment (QETE) and testing range facilities and support was provided by the Canadian Explosives Research Laboratory (CanmetCERL). The help of both parties was tremendous and very appreciated. The UHPFRC was generously provided by KPM Industries, a Sika Company.

3.8. References

- [1] D. H. Nelson, W. F. Heard, M. J. Roth and T. R. Slawson, "Development of a Novel, Lightweight, Protective Structure to Resist Impulsive, Dynamic Loads," US Army Engineer Research and Development Center (ERDC), Vicksburg, 2008.
- [2] M. Beirnes, Impact Resistance of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Panels and Steel Fibre Reinforced Concrete Panels Strengthened with Fibre Reinforced Polymer Straps at Low Temperatures, Kingston: Royal Military College of Canada, 2017.
- [3] V. Perry, P. White and T. Ahlborn, "The First North American Broad Based Structural Design Guide on UHPC - ACI 239C," *First International Interactive Symposium on UHPC*, pp. 1-8, 2016.
- [4] J. Fornusek, M. Mára, R. Sovják and J. Zatloukal, "UHPRFC Resistance to Projectile Impact in Dependence on Fibre Content," in *Advanced Materials for Defense*, Springer vol 4, 2020.
- [5] P. Máca and R. Sovják, "Resistance of ultra high performance fibre reinforced concrete to projectile impact," *Structures Under Shock and Impact*, vol. XII, pp. 261-272, 2012.
- [6] S. Dobruský, E. Bonnet, S. Bernadi and D. Jacomo, "Ballistic resistance of Ductal Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC)," in *5th International Conference on Protective Structures*, Poznan, 2018.
- [7] R. Sojvak, T. Vavrinik, J. Zatloukal, P. Maca, T. Micunek and M. Frydryn, "Resistance of slim UHPRFC targets to projectile impact using in-service bullets," *International Journal of Impact Engineering*, no. 76, pp. 166-177, 2015.
- [8] H. Wu, Q. Fang, X. Chen, Z. Gong and J. Liu, "Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510-1320 m/s," *Construction and Building Materials*, no. 74, pp. 188-200, 2015.
- [9] G.-Y. Kim, J.-I. Choi, S.-E. Park, H. Kim, Y. Lee and B. Y. Lee, "Response of UHPRFC and HDFRC under static and high-velocity projectile impact loads," *Construction and Building Materials*, no. 188, pp. 399-408, 2018.
- [10] S. Kravanja and R. Sovják, "Ultra-high-performance Fibre-Reinforced Concrete Under High-Velocity Projectile Impact Part II. Applicability of Prediction Models," *Acta Polytechnica*, vol. 58, no. 6, pp. 355-364, 2018.
- [11] H.-J. Hwang, S. Kim and T. Kang, "Prediction of Hard Projectile Penetration on Concrete Targets," *The 2016 Structures Congress (Structures16)*, pp. 1-7, 2016.
- [12] D. Cormie, G. Mays and P. Smith, Blast effects on buildings, London: Thomas Telford, 2009.
- [13] J. K. Stewart, "Ballistic Resistant Protective Materials NIJ Standard 0108.01," U.S. Department of Justice, 1985.

- [14] E. M. Almansa and M. F. Cánovas, "Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1807-1814, 1999.
- [15] "UP-FX POLY," KING: A SIKA COMPANY, [Online]. Available: <https://www.kpmindustries.com/KingConstructionProducts/wp-content/uploads/sites/13/2015/12/UP-FX-Poly-TDS-ENG-REV.0007.pdf>. [Accessed 15 January 2020].
- [16] ASTM, C39/C39M: Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [17] NAMMO, "NAMMO Ammunition Handbook, 4th Edition," 2016. [Online]. Available: https://www.nammo.com/globalassets/pdfs/ammobook/nammo_ammobook_2016.pdf. [Accessed 20 January 2020].
- [18] QETE and J. Bélanger, "7.62 x 51 NATO AP 11 Long Range Velocity Curvers," QETE - CETQ, Ottawa, 2019.
- [19] Department of Defense USA, UFC 3-340-01, Washington : US Army Corps of Engineers, 2002.
- [20] "ANSYS Autodyn," ANSYS, Inc., 2018. [Online]. Available: www.ansys.com. [Accessed 17 December 2018].
- [21] L. B. Brown, "Simulating the Effect of the Jacket During the Penetration of an AK47 Bullet Using Ansys Autodyn," University of New South Wales at the Australian Defence Academy, New South Wales, 2015.
- [22] S. R. Lemanski, "Computational Modelling of a Tungsten Carbide Projectile into Ceramic Faced Armour," University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy, Sydney, 2013.
- [23] Q. Li, S. Reid, H. Wen and A. Telford, "Local impact effects of hard missiles on concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 224-284, 2005.
- [24] M. B. Eide and J.-M. Hisdal, "Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC) - State of the art," SINTEF Building and Infrastructure, Oslo, 2012.
- [25] N. Naik and P. Shrirao, "Composite structures under ballistic impact," *Composite Structures*, vol. 66, pp. 579-590, 2004.
- [26] "Construction & Mining Products," KPM Industries LTD. , 2018. [Online]. Available: www.kpmindustries.com. [Accessed 19 December 2018].
- [27] K. Habel, J.-P. Charron, S. Braike, R. D. Hooton, P. Gauvreau and B. Massicotte, "Ultra-high performance fibre reinforced concrete mix design in central Canada," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 35, pp. 217-224, 2008.

4. Conclusions et recommandations

4.1. Conclusion

La résistance balistique de panneaux en BFUP face à des projectiles perforants a été évalué dans ce projet de recherche. L'objectif était de fournir une alternative efficace, économique, légère et facile d'installation aux systèmes de protection actuellement utilisé par les FAC. Deux mélanges de BFUP provenant d'une compagnie canadienne et disponible sur le marché ont été utilisés. Les deux mélanges étant presque identique excepté pour la teneur en fibre, 3 et 4%. Afin d'évalué la résistance balistique du BFUP, 36 panneaux ont été testés dans le cadre du programme expérimental. Les spécimens ont été soumis à de véritable tir selon 2 environnements de combat : condition de combat en milieu urbain et condition de combat un milieu ouvert, soit un tir effectué à une distance de 10 m et 300 m respectivement. 18 panneaux ont été testés selon les conditions de combat en milieu urbain et 18 ont été testé selon les conditions de combat en milieu ouvert. Les principaux paramètres d'essais, autre que le pourcentage de fibre, ont été l'épaisseur des panneaux, 40, 50 et 60 mm et la distance du tir, 10 et 300 m. Un modèle numérique a également été développé pour les essais simulant un tir en condition de combat urbain. Ce modèle numérique a été développé en fonction de données disponible dans la littérature et sur les résultats expérimentaux de cette étude. La simulation a été développé sur Autodyn. Le modèle utilise des particules SPH et une symétrie rotationnelle en 2D pour une meilleure représentation et analyse du comportement du BFUP. Le modèle a permis l'obtention de résultats représentant le comportement du panneau en termes de dimensions des cratères, des modes de rupture et du comportement à la fissuration. Les résultats du programme expérimental et des analyses numériques ont mené aux conclusions suivantes :

1. La résistance augmente linéairement avec l'épaisseur autant pour les panneaux testés en condition de combat en milieu urbain (tir effectué à une distance de 10 m) que pour les panneaux testés en condition de combat en milieu ouvert (tir effectué à une distance de 300 m).
2. L'ensemble des panneaux testés selon des conditions de combat en milieu urbain ont été perforées lors des essais ainsi que la plaque témoin situé derrière le spécimen. Cependant, les panneaux ont démontré une capacité d'absorption d'énergie significative. L'énergie d'absorption maximale mesurée est de 3089 J alors que l'énergie cinétique à l'impact était d'environ 3500 J. Par conséquent, une épaisseur supérieure à 60 mm, un mélange plus résistant ou des modifications dans la conception des panneaux est nécessaire pour une protection adéquate en condition de combat urbain.
3. L'ensemble des panneaux testés selon des conditions de combats en milieu ouvert ont été en mesure d'absorber une quantité considérable d'énergie. Les panneaux de 60 mm d'épaisseur ont été en mesure de réduire significativement la vitesse du projectile à une vitesse insuffisante pour perforer la plaque témoin, ou dans le cas d'un spécimen, à un arrêt complet. L'énergie d'absorption maximal mesurée est de 2066 J alors que l'énergie cinétique à l'impact variait entre 2000 et 2100 J.
4. Aucun avantage significatif n'a été observé entre une teneur en fibre de 3 et 4% par volume dans le BFUP. Par conséquent, une teneur en fibre de 3% semble optimale.
5. L'analyse post-expérimentale a permis d'établir des valeurs de K et K/\varnothing^2 pour les mélanges utilisés soit 16,72 et 18,03 J/mm pour les BFUP contenant 3 % et 4 % de fibre par volume respectivement. De plus, il a été possible de valider l'applicabilité du modèle de prédictions de Hwang et al. [55]. L'analyse a cependant démontré que le modèle modifié de Hwang et al. [56] affichait une meilleure

corrélation avec les résultats de la recherche. Ces paramètres pourraient servir à d'éventuelle travaux de recherche ou encore pour la conception.

Les résultats du programme expérimental ont démontré l'efficacité et le potentielle des panneaux en BFUP comme système de protection. Les objectifs de l'étude visaient entre autres à démontrer l'applicabilité d'un modèle de prédiction disponible dans la littérature, de développer des caractéristiques du matériau pouvant servir à de futures recherches, et potentiellement pour de la conception, et de développer un modèle numérique répliquant le comportement à l'impact du BFUP. Les résultats de l'étude expérimentale ont démontré l'applicabilité d'un modèle de prédiction supporté par plusieurs recherches. Le modèle de prédiction était valide pour les panneaux testés sous les conditions sélectionnées. Il a été démontré par cette recherche que le modèle modifié proposé dans la littérature affichait une meilleure corrélation avec les résultats de l'étude. Finalement, le modèle numérique développé sur Autodyn d'ANSYS permet de bonnes corrélations avec les essais expérimentaux pour les dimensions des cratères avant et arrière du panneau, des modes de ruptures ainsi que la vitesse résiduelle du projectile. Cependant, le modèle pourrait être amélioré afin de mieux représenter le comportement de la munition utilisée.

4.2. Recommandations

Afin de concevoir des panneaux en BFUP pouvant être utilisés comme système de protection dans un environnement de combat en milieu urbain et ouvert, des travaux additionnelles indiqués ici devraient être menées :

1. L'une des analyses post-expérimentale déterminait l'épaisseur minimale requise pour éviter la perforation d'un panneau de BFUP. En théorie, ces épaisseurs ont été calculées en considérant à la fois la balle avec chemisage, et sans chemise. Il serait alors recommandé de vérifier par des essais balistiques sur les différentes épaisseurs si les calculs devraient tenir compte de la balle complet, ou seulement du noyau dit non-déformable. Les épaisseurs obtenues des calculs sont présentées à l'Annexe D.
2. Cette recherche avait comme objectif l'analyse de la résistance balistique d'un seul panneau à la fois. Il serait recommandé d'effectuer des essais sur un système de 2 panneaux, séparé d'un matériau léger ou de vide. Le premier panneau aurait l'énergie de résistance requise pour réduire significativement l'énergie cinétique du projectile, tandis que le second panneau aurait l'énergie de résistance requise pour éviter la perforation.
3. Une piste de recherche pertinente serait d'étudier la performance balistique d'un panneau de BFUP jumelé à une plaque d'acier, située à l'avant ou à l'arrière du panneau. Étant donné que la munition utilisée dans cette recherche est spécialement conçue pour avoir des propriétés perforantes exceptionnelles [6], l'utilisation d'une plaque d'acier pourrait être bénéfique. Ce système composite permettrait potentiellement de réduire l'épaisseur du panneau de BFUP et d'obtenir un système de protection plus mince.
4. À la suite des essais expérimentaux, le modèle numérique a démontré une bonne corrélation entre les résultats réels et numériques. Cependant, lors du processus de perforation, le noyau de la balle a subi d'importants déformations. Ce comportement n'a toutefois pas été observé lors des essais réels. Le noyau de la balle était intact à la sortie, avec de petites marques mineures. Il serait recommandé de développer un modèle plus approprié pour le noyau de tungstène. L'hypothèse d'un meilleur modèle du projectile est une obtention plus représentative de la vitesse résiduelle numérique aux essais expérimentaux.
5. Le type de munition utilisé pour cette recherche n'est pas inclus dans les normes de NIJ 0108.01 [47]. Afin de déterminer une épaisseur optimale pour un niveau de protection désiré, il serait recommandé d'effectuer des essais balistiques en respectant les normes prescrites pour celui-ci (calibre, type de balle, vitesse d'impact, etc.).

5. Bibliographie

- [1] UCDP, «Uppsala Conflict Data Program,» Department of Peace and Conflict Research, 2019. [En ligne]. Available: <https://www.ucdp.uu.se/encyclopedia>. [Accès le 20 Novembre 2019].
- [2] «HESCO: Defensive Barriers, Protective Structures and Body Armour,» ARMY TECHNOLOGY, 2019. [En ligne]. Available: <https://www.army-technology.com/contractors/infrastructure/hesco/>. [Accès le 20 Novembre 2019].
- [3] S. Matten, «Force Protection,» *Ingenia*, vol. 37, Décembre 2008.
- [4] «UP-F3 Poly,» King Construction Products, 2019. [En ligne]. Available: <https://www.kpmindustries.com/KingConstructionProducts/product/up-f3-poly-concrete/>. [Accès le 20 Novembre 2019].
- [5] «UP-F4 Poly,» KING Constructions Products, 2019. [En ligne]. Available: <https://www.kpmindustries.com/KingConstructionProducts/product/up-f4-poly-concrete/>. [Accès le 20 Novembre 2019].
- [6] NAMMO, «NAMMO Ammunition Handbook, 4th Edition,» 2016. [En ligne]. Available: https://www.nammo.com/globalassets/pdfs/ammobook/nammo_ammobook_2016.pdf. [Accès le 20 January 2020].
- [7] «Directives de rédaction de thèse,» Collège militaire royal du Canada, 06 Mai 2015. [En ligne]. Available: <https://www.rmc-cmr.ca/fr/escadre-academique/redaction-these>.
- [8] Groupe CSA, Code canadien sur le calcul des ponts routiers, Mississauga: S6-14, 2014.
- [9] B. Massicotte, Calcul des structures en béton armé: Concepts de base, Laval: Éditions da Vinci, 2015.
- [10] V. Perry, P. White et T. Ahlborn, «The First North American Broad Based Structural Design Guide on UHPC - ACI 239C,» *First International Interactive Symposium on UHPC*, pp. 1-8, 2016.
- [11] «Construction & Mining Products,» KPM Industries LTD. , 2018. [En ligne]. Available: www.kpmindustries.com. [Accès le 19 December 2018].
- [12] «LAFARGE Canada,» LafargeHolcim, 2018. [En ligne]. Available: www.lafarge.ca. [Accès le 19 December 2018].
- [13] «BSI: Eiffage's ultra high-performance fibre-reinforced concrete,» Eiffage Group, 2018. [En ligne]. Available: www.eiffageinfrastructures.com. [Accès le 19 December 2018].

- [14] M. Beirnes, *Impact Resistance of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Panels and Steel Fibre Reinforced Concrete Panels Strengthened with Fibre Reinforced Polymer Straps at Low Temperatures*, Kingston: Royal Military College of Canada, 2017.
- [15] M. B. Eide et J.-M. Hisdal, «Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art,» SINTEF Building and Infrastructure, Oslo, 2012.
- [16] P. Rossi, D. Boulet et J.-P. Charron, *Bétons de fibres courants vers les Bétons de fibres ultra performants*, Montréal: École Polytechnique de Montréal, 2008.
- [17] K. Habel, J.-P. Charron, S. Braike, R. D. Hooton, P. Gauvreau et B. Massicotte, «Ultra-high performance fibre reinforced concrete mix design in central Canada,» *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 35, pp. 217-224, 2008.
- [18] Association béton Québec, *Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton*, Québec: Bibliothèque nationale du Québec, 2005.
- [19] H. P. Behbahani, B. Nemotollahi et M. Farasatpour, «Steel Fibre Reinforced Concrete: A Review,» chez *ICSECM*, Kandy-SriLanka, 2011.
- [20] D. Nicolaides, A. Kanellopoulos, M. Petrou, P. Savva et A. Mina, «Development of a new Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite (UHPFRCC) for impact and blast protection of structures,» *Construction and Building Materials*, n° % 195, pp. 667-674, 2015.
- [21] K. M. Nemati, «Fibre-Reinforced Concrete,» University of Washington, Seattle, 2015.
- [22] «Steel Fibers,» SPAJIC, 2018. [En ligne]. Available: www.spajic.com. [Accès le 21 December 2018].
- [23] R. Yu, P. Spiesz et H. Brouwers, «Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC),» *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 29-39, 2014.
- [24] M.-A. Dagenais, *Réhabilitation sismique des joints de chevauchement de piles de ponts par chemisage en béton fibré à ultra-haute performance*, Montréal: École Polytechnique de Montréal, 2014.
- [25] V. Bindiganavile, N. Banthia et B. Aarup, «Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite,» *ACI Materials Journal*, vol. 6, n° % 199, pp. 543-548, 2002.
- [26] K. Habel et P. Gauvreau, «Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n° % 110, pp. 938-946, 2008.
- [27] T. K. Tran et D. J. Kim, «Strain Energy Frame Impact Machine (SEFIM),» *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, pp. 126-136, 2012.
- [28] E. Parant, P. Rossi, E. Jacquelin et C. Boulay, «Strain Rate Effect on Bending Behavior of New Ultra-High-Performance Cement-Based Composite,» *ACI Materials Journal*, n° % 1104, pp. 458-463, 2007.

- [29] S. Pyo, K. Wille, S. El-Tawil et A. E. Naaman, «Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension,» *Cement & Concrete Composites*, n° % 156, pp. 15-24, 2015.
- [30] S. Pyo, S. El-Tawil et A. E. Naaman, «Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates,» *Cement and Concrete Research*, n° % 188, pp. 144-156, 2016.
- [31] R. Lovichova, M. Mara et J. Fornusek, «Projectile impact resistance of UHPFRC structures for various methods of fresh mixture placement,» *Procedia Engineering*, n° % 1193, pp. 80-87, 2017.
- [32] C. Standard, A23.1-F14/A23.2-F14 - Béton : constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton, Ottawa: CSA Group, 2014.
- [33] ASTM, C39/C39M: Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [34] Z. Zhou et P. Qiao, «Direct Tension Test for Characterization of Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete,» *Journal of Testing and Evaluation: ASTM*, 2018.
- [35] N. T. Tran, T. K. Tran et D. J. Kim, «High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension,» *Cement and Concrete Research*, n° % 169, pp. 72-87, 2015.
- [36] K. Wille, S. El-Tawil et A. Naaman, «Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading,» *Cement & Concrete Composites*, n° % 148, pp. 53-66, 2014.
- [37] S.-T. Kang, J.-I. Choi, K.-T. Koh, K. S. Lee et B. Y. Lee, «Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete,» *Composite Structures*, n° % 1145, pp. 37-42, 2016.
- [38] A. C1609/C1609M-12, «Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading),» ASTM International, 2012. [En ligne]. Available: www.astm.org. [Accès le 04 Juin 2019].
- [39] B. P. Kneubuehl, R. M. Coupland, M. A. Rothschild et M. J. Thali, *Wound Ballistics: Basics and Applications*, Berlin: Springer, 2008.
- [40] «Normes internationales et conquêtes de marchés: le cas des normes balistiques,» Centre de ressources et d'information sur l'intelligence économique et stratégique, 05 Juin 2012. [En ligne]. Available: www.portail-ie.fr. [Accès le 09 Mai 2019].
- [41] M. Ray, «AK-47: Soviet Firearm,» *Encyclopaedia Britannica*, 18 Juillet 2018. [En ligne]. Available: www.britannica.com. [Accès le 06 Juin 2019].
- [42] «Petit Calibre,» *General Dynamics : Produits de défense et système tactiques - Canada*, 2019. [En ligne]. Available: www.gd-otscanada.com. [Accès le 09 Mai 2019].

- [43] R. Sojvak, T. Vavrinik, J. Zatloukal, P. Maca, T. Micunek et M. Frydryn, «Resistance of slim UHPFRC targets to projectile impact using in-service bullets,» *International Journal of Impact Engineering*, n° %176, pp. 166-177, 2015.
- [44] Z. Rosenberg et E. Dekel, *Terminal Ballistics*, New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [45] D. Cormie, G. Mays et P. Smith, *Blast effects on buildings*, London: Thomas Telford, 2009.
- [46] E. E. Haro, J. A. Szpunar et A. G. Odeshi, «Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid,» *Composites: Part A*, n° %187, pp. 54-65, 2016.
- [47] J. K. Stewart, «Ballistic Resistant Protective Materials NIJ Standard 0108.01,» U.S. Department of Justice, 1985.
- [48] A. Prakash, S. Srinivasan et A. Rama Mohan Rao, «Application of steel fibre reinforced cementitious composites in high velocity impact resistance,» *Materials and Structures*, vol. 50, n° %16, p. 16, 2017.
- [49] E. M. Almansa et M. F. Cánovas, «Behaviour of normal and steel fibre-reinforced concrete under impact of small projectiles,» *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1807-1814, 1999.
- [50] H. Wu, Q. Fang, X. Chen, Z. Gong et J. Liu, «Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510-1320 m/s,» *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 188-200, 2015.
- [51] R. Sojvak, D. Shandhag, P. Konrad et J. Zatloukal, «Response of thin UHPFRC targets with various fibre volume fractions to deformable projectile impact,» *Procedia Engineering*, n° %1193, pp. 3-10, 2017.
- [52] CESKA ZBROJAVKA, «Instruction Manual CZ 858 Tactical,» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.czub.cz/media/attachment/file/i/n/instruction-manual-cz-858-tactical.pdf>. [Accès le 16 Décembre 2019].
- [53] L. Mao et S. Barnett, «Investigation of toughness of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) beam under impact loading,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. 99, pp. 26-38, 2017.
- [54] P. Máca et R. Sovják, «Resistance of ultra high performance fibre reinforced concrete to projectile impact,» *Structures Under Shock and Impact XII*, vol. 126, pp. 261-272, 2012.
- [55] H.-J. Hwang, S. Kim et T. Kang, «Prediction of Hard Projectile Penetration on Concrete Targets,» chez *The 2016 Structures Congress*, Jeju Island, 2016.
- [56] S. Kravanja et R. Sovják, «Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Under High-Velocity Projectile Impact Part II. Applicability of Prediction Models,» *Acta Polytechnica*, vol. 58, n° %16, pp. 355-364, 2018.

- [57] Department of Defense USA, UFC 3-340-01, Washington : US Army Corps of Engineers, 2002.
- [58] J. Liu, C. Wu et X. Chen, «Numerical Study of ultra-high performance concrete under non-deformable projectile penetration,» *Construction and Building Materials*, n° 1135, pp. 447-458, 2017.
- [59] «ANSYS Autodyn,» ANSYS, Inc., 2018. [En ligne]. Available: www.ansys.com. [Accès le 17 December 2018].
- [60] Z. Tu et Y. Lu, «Modifications of RHT material model for improve numerical simulation of dynamic response of concrete,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 1072-1082, 2010.

ANNEXES

Annexe A

1. Informations Complémentaires

Le Chapitre 3 présente la recherche pour publication. Certaines informations sont volontairement omises et les résultats présentés dans l'article sont majoritairement des compilations de plusieurs données. De plus, toutes les informations quant au dimensionnement, à la préparation, et aux procédures expérimentales ne sont pas incluses dans le Chapitre 3. Ces informations complémentaires à l'article sont présentées dans cette annexe. Celles-ci peuvent être utiles pour répondre à des questions d'un lecteur ou de permettre une base à une future recherche similaire.

2. Dimensionnement des panneaux de BFUP

Le dimensionnement des panneaux a été effectué en suivant des guides et des recommandations de la littérature. Le but de la recherche était d'analyser la performance balistique de minces panneaux. Les panneaux devaient alors être facile à manipuler, transporter et installer. Le dimensionnement des panneaux a été sélectionné en fonction de la littérature et des normes pour les essais balistiques de matériaux protecteurs seulement, aucun calcul n'a été effectué. Selon les informations obtenues, les matériaux utilisés n'ont jamais été soumis à de telles expériences balistiques. Initialement, le projet devait considérer l'utilisation d'un pendule pour les essais, simulant ainsi un tir, mais l'idée a été rejetée pour se concentrer uniquement sur des essais d'impacts de munitions à grande performance de perforation.

Pour la surface d'impact, le standard NIJ 0108.01 a été suivi. Selon cette norme américaine, les panneaux testés doivent respecter une surface minimale de 30,5cm par 30,5cm. Selon les essais initiaux considérés pour la recherche, soit utilisé un montage à pendule du Collège militaire royal du Canada, ces dimensions étaient trop petites pour permettre un support adéquat aux panneaux. Des dimensions de 350mm par 350mm ont alors été sélectionnées pour la surface. Cette surface s'est avérée optimal pour le montage expérimental en place au champ de tir intérieur de CanmetLCRE. Pour les épaisseurs, des dimensions de 40, 50 et 60mm ont été sélectionnées. Ces dimensions se basent sur des essais similaires de la littérature. Aucun calcul n'a été effectué. Le but était d'obtenir des caractéristiques pouvant démontrer l'applicabilité d'équations développées pour différentes mesures sur le BFUP. Les dimensions finales sont présentées sur la Figure A-1.

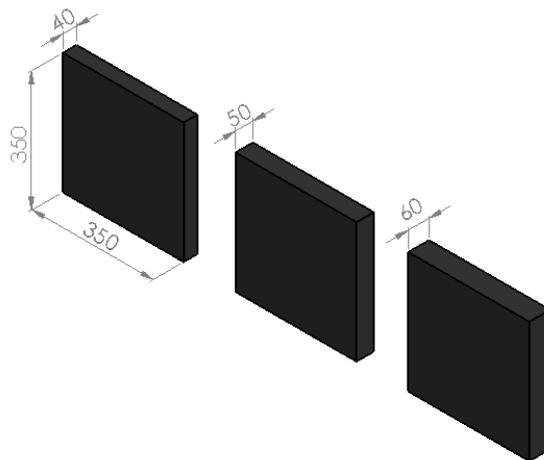


Figure A-1 : Dimensions des panneaux

3. Fabrication des panneaux de BFUP

Moules

Les panneaux ont été fabriqués à l'aide de moules faits de contre-plaqué de la compagnie Glen Supply, située à Kingston, Ontario. Les contre-plaqués, spécialement conçus pour les coulées de béton, sont d'une épaisseur de $\frac{3}{4}$ de pouce. Un total de 18 moules a été fabriqués. Avant chaque coulée, les moules étaient huilés pour faciliter le démoulage.

Matériaux

Les matériaux utilisés pour la recherche ont été généreusement donnés par la compagnie KING Construction Products, une compagnie de SIKA. Deux BFUP ont été sélectionnés : le UP-F3 et le UP-F4. Ces BFUP de 3% et de 4% de fibres par volume respectivement ont des propriétés mécaniques supérieures. Un total de 4 gâchées a été nécessaire pour produire un total de 36 panneaux, 15 cylindres pour essais de compression uniaxiale, et 12 spécimens en forme d'os, pour des essais de traction directe. Chaque gâchée consistait d'un volume total d'environ 78,9L pour le UP-F3 et d'environ 80,1L pour le UP-F4. Les constituants et les quantités de chaque produit sont indiqués dans le Tableau A-1.

Tableau A-1 : Constituants nécessaires pour les gâchées des produits UP-F3 et UP-F4 (unité en kg)

Constituants	Quantité par gâchée de UP-F3 (~78,9L)	Quantité par gâchée de UP-F4 (~80,1L)
Sac de prémix (25kg/sac)	150	150
Adjuvant A	1,965	2,673
Adjuvant B	1,998	2,028
Adjuvant C	3,021	3,066
Eau/Glace	14,580	14,367
Fibres d'acier	18,450	25,017

Procédures de gâchée

Lors des deux premières gâchées, un expert de la compagnie était présent pour assurer le bon déroulement : Monsieur Julian Pena Cruz. Pour le mélange des produits, le mélangeur Cumflow RP100XD HD a été utilisé pour les gâchées, voir Figure A-2. Avant de débiter le mélange des produits, chaque constituant a été pesé et entreposé dans des sceaux pour faciliter l'ajout des ingrédients au mélangeur. La procédure, prescrite par la compagnie, a été identique pour l'ensemble des gâchées, pour assurer l'homogénéité des panneaux. Une équipe de trois personnes a été nécessaire pour le mélange et la coulée des BFUP dans les moules. Pour la coulée dans les moules, le BFUP était transféré dans des sceaux et acheminé dans les moules. Des mouvements rapides et larges de gauche vers la droite étaient employés afin d'assurer une répartition homogène et une position horizontale des fibres. Une fois dans les moules, les panneaux étaient recouverts de plastique pour la cure de 7 jours. Les spécimens étaient démoulés après 36 heures. Ils étaient enveloppés de jute et recouverts encore de plastique, et arrosés constamment pour le

restant des 7 jours. Après la semaine écoulée, les spécimens étaient laissés à condition ambiante sur des plateaux sur des chariots pour une durée totale de 28 jours.



Figure A-2: Mélangeur Cumflow RP100XD HD [14]

Essais de caractérisation

Afin de caractériser les produits à 28 jours suivant la cure et au moment des essais, des cylindres ont été produits. Pour les deux premières gâchées, des cylindres de 200 x 100mm ont été utilisés. Cependant, la norme ASTM C39 prescrit l'utilisation de cylindres de 150 x 75mm. Les cylindres de ces dimensions ont été commandés et utilisés pour la troisième et la quatrième gâchée. Le module d'élasticité a été mesuré seulement pour les cylindres de 200 x 100mm. L'instrumentation est uniquement adaptée pour des cylindres de cette taille. Le module d'élasticité a été obtenu pour les deux premières gâchées à l'aide de la norme ASTM C469. Les résultats des essais sont présentés au Tableau A-2, selon le nombre de jours après la coulée.

Tableau A-2 : Résultats des essais de caractérisation des produits UP-F3 et UP-F4 comparés aux valeurs de la compagnie

Matériaux	Nom du cylindre	Résistance en compression (MPa)	Jour d'essais	Module élastique (MPa)	Dimensions du cylindre (mm x mm)	Date de l'essai
UP-F3	F3-100A	147,13	28 jours	-	100 x 200	8 aout 2019
UP-F3	F3-100B	148,79	28 jours	-	100 x 200	8 aout 2019
UP-F4	F4-100A	156,01	28 jours	-	100 x 200	8 aout 2019
UP-F4	F4-100B	151,02	28 jours	-	100 x 200	8 aout 2019
UP-F3	F3-75A	141,70	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F3	F3-75B	145,29	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F3	F3-75C	137,44	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F4	F4-75A	129,09	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F4	F4-75B	132,61	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F4	F4-75C	133,89	28 jours	-	75 x 150	6 novembre 2019
UP-F3	F3-100C	163,43	110 jours	-	100 x 200	1 novembre 2019
UP-F3	F3-100D	168,18	110 jours	41741,12	100 x 200	1 novembre 2019
UP-F4	F4-100C	175,28	110 jours	-	100 x 200	1 novembre 2019
UP-F4	F4-100D	174,05	110 jours	-	100 x 200	1 novembre 2019
UP-F4	F4-100E	159,99	110 jours	39518,62	100 x 200	1 novembre 2019

4. Montage expérimental et procédures

Tous les essais performés sur les panneaux étaient de nature balistique. Les essais ont été performés au champ de tir intérieur de CanmetLCRE, dans un environnement contrôlé. Tous les tests ont été performés à conditions ambiantes, avec une température environnante d'environ 18°C. Le taux d'humidité relative ambiant variait de 30.9% à 64%. Le plan du champ de tir est illustré sur la Figure A-3. La distance totale entre la tête du canon et la face du panneau était d'environ 11 mètres, avec une distance de 15 centimètres entre la face arrière du panneau et la face avant du panneau témoin. Le support est illustré sur la Figure A-4.

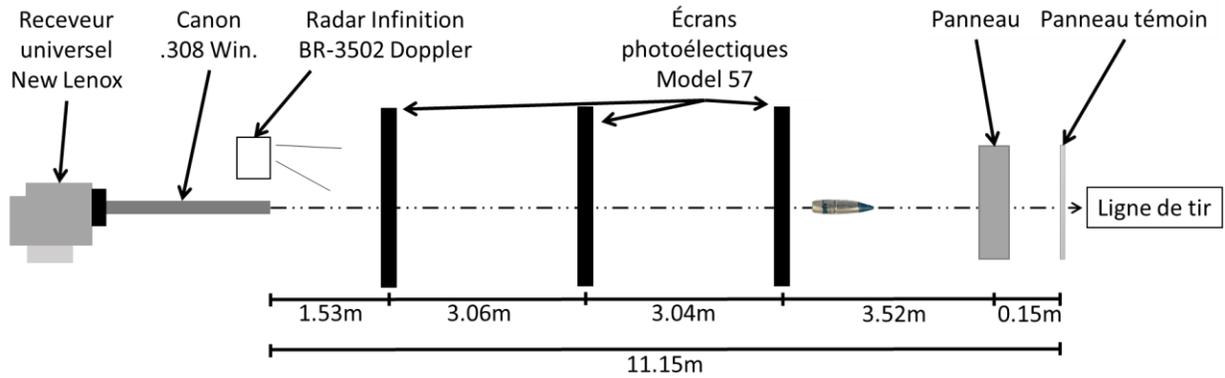


Figure A-3 : Schéma du montage expérimental du champ de tir intérieur de CanmetLCRE



Figure A-4 : Support utilisé pour les essais d'impact des panneaux de BFUP

Instrumentation

Toute l'instrumentation utilisée pour les essais d'impacts provient du laboratoire de CanmetLCRE. Tel illustré sur la Figure A-3, le receveur universel New Lenox agrémenté d'un canon .308 Win a été utilisé pour le tir des munitions. La vitesse pré-impact des projectiles fut mesurée à l'aide de deux moyens. Pour la mesure des vitesses, le Oehler System 83 (avec 3 écrans photoélectriques Model 57) était utilisé pour confirmer les résultats du radar, et le radar Infinition BR-3502 Doppler était utilisé afin mesurer avec exactitude les vitesses d'impact. Une feuille de papier (Yaw Card en anglais) était installée entre le troisième écran et le panneau afin d'analyser le comportement du projectile en vol. Cette carte permet de confirmer la lignée du projectile, à savoir s'il bascule durant le vol, indiquant un tir faussé si le cas se présente. La mesure de la vitesse résiduelle des projectiles se faisaient à l'aide d'une caméra à haute vitesse (Photron FastCam SA-Z) et d'un logiciel utilisé par les techniciens du laboratoire CanmetLCRE. Les spécifications de la prise de vidéo par la caméra sont présentées au Chapitre 3, et au Tableau A-3.

Tableau A-3 : Spécifications de la prise de vidéo par la caméra haute-vitesse

Paramètres de la caméra			
Spécimens	Fréquence d'images (x1000)	Vitesse d'obturation (µsec)	Résolution (pixels)
UF3 Série, UF4 Série, + FF3-40-1 & FF3-40-2	100	1.25	640 x 280
FF3 Série & FF4 Série (Sauf FF3-40-1 & FF3-40-2)	50.4	1.25	640 x 512

Procédure

La procédure suivie pour les essais était identique d'un panneau à l'autre. Premièrement, les essais à courte distance ont été performés. Les munitions utilisées pour ces tests n'ont subi aucune modification à la quantité de poudre. Avant chaque test, le panneau était pesé, puis sa température de surface était mesurée à l'aide d'un courant électrique. Le centroïde avant et arrière du panneau était marqué. Puis, le panneau était installé sur le support afin d'apporter les corrections nécessaires afin d'avoir le pointeur laser au centre du panneau. Par la suite, le panneau était enlevé, et la plaque témoin était installé, et son centre était marqué au marqueur (le centre étant l'emplacement du pointeur laser). Le panneau de BFUP était réinstallé. La face avant du panneau était toujours la face lisse, afin d'avoir une surface d'impact homogène d'un spécimen à l'autre.

Par la suite, une fois le champ de tir sécurisé, le tir était entamé. Suivant le tir, des photos avant et arrière du panneau étaient prises, ainsi que la plaque témoin. Si possible, le noyau du projectile était rapatrié, ainsi que la chemise. Le panneau de BFUP était finalement pesé puis entreposé. Les plaques témoins étaient préalablement marquées au centre afin de mesurer la distance en X entre le lieu d'impact et le centroïde. Cette distance permet d'obtenir, à l'aide de la triangulation, la réelle distance de parcours du projectile, une distance hors plan de la caméra à haute vitesse, tel mentionné plus haut. La vitesse résiduelle du projectile obtenue des vidéos haute-vitesse était alors corrigée avec la nouvelle distance obtenue.

Finalement, pour les essais d'impact à 300 mètres, une quantité de poudre devait être enlevée des munitions pour atteindre une vitesse équivalente. Cette modification fut accomplie par essais-erreurs par les techniciens qualifiés de CanmetLCRE. Outre cette modification, toutes les étapes suivies pour les tirs à courte distance étaient identiques.

Annexe B

Cette annexe présente le rapport compilé par le CETQ et par CanmetLCRE, ainsi que les photographies de chaque spécimen, avant et arrière, et des plaques témoins. Les photos ont été prises par un technicien du laboratoire. Celles-ci présentent les panneaux avant le transport, avec tous les débris soutenus par les fibres intacts. Le rapport de CETQ et CanmetLCRE présente tous les résultats bruts obtenus lors des essais balistiques. Les techniciens ont utilisé leur propre nomenclature pour les panneaux pour faciliter la prise de donnée dans leur système. Cette nomenclature est présentée au Tableau B-1. La nomenclature du projet est basée sur quatre termes. Le premier décrivant la distance de tir : *U* pour *Urban Operations*, tir à courte distance, et *F* pour *Field Operations*, tir à longue distance. Le deuxième terme, *F*, indique le type de renforcement : fibres d'acier dans le cas de la recherche. Le quatrième terme, 3 ou 4, décrit le pourcentage de fibres par volume. Le cinquième terme décrit l'épaisseur du panneau : 40,50 ou 60mm. Finalement, le dernier terme décrit le numéro du spécimen dans sa catégorie pour un total de 3 spécimens ayant les mêmes caractéristiques.

Tableau B-1 : Nomenclature utilisée dans le projet, et nomenclature utilisée par le laboratoire CanmetLCRE

Nomenclature du Projet	Nomenclature utilisée par CanmetLCRE	Nomenclature du Projet	Nomenclature utilisée par CanmetLCRE
UF3-40-0*	X007069	FF3-40-1	X007087
UF3-50-0*	X007070	FF3-40-2	X007088
UF3-60-0*	X007071	FF3-40-3	X007089
UF3-40-1	X007072	FF3-50-1	X007090
UF3-40-2	X007073	FF3-50-2	X007091
UF3-50-1	X007074	FF3-50-3	X007092
UF3-50-2	X007075	FF3-60-1	X007093
UF3-60-1	X007076	FF3-60-2	X007094
UF3-60-2	X007077	FF3-60-3	X007095
UF4-40-1	X007078	FF4-40-1	X007096
UF4-40-2	X007079	FF4-40-2	X007097
UF4-40-3	X007080	FF4-40-3	X007098
UF4-50-1	X007081	FF4-50-1	X007099
UF4-50-2	X007082	FF4-50-2	X007100
UF4-50-3	X007083	FF4-50-3	X007101
UF4-60-1	X007084	FF4-60-1	X007102
UF4-60-2	X007085	FF4-60-2	X007103
UF4-60-3	X007086	FF4-60-3	X007104

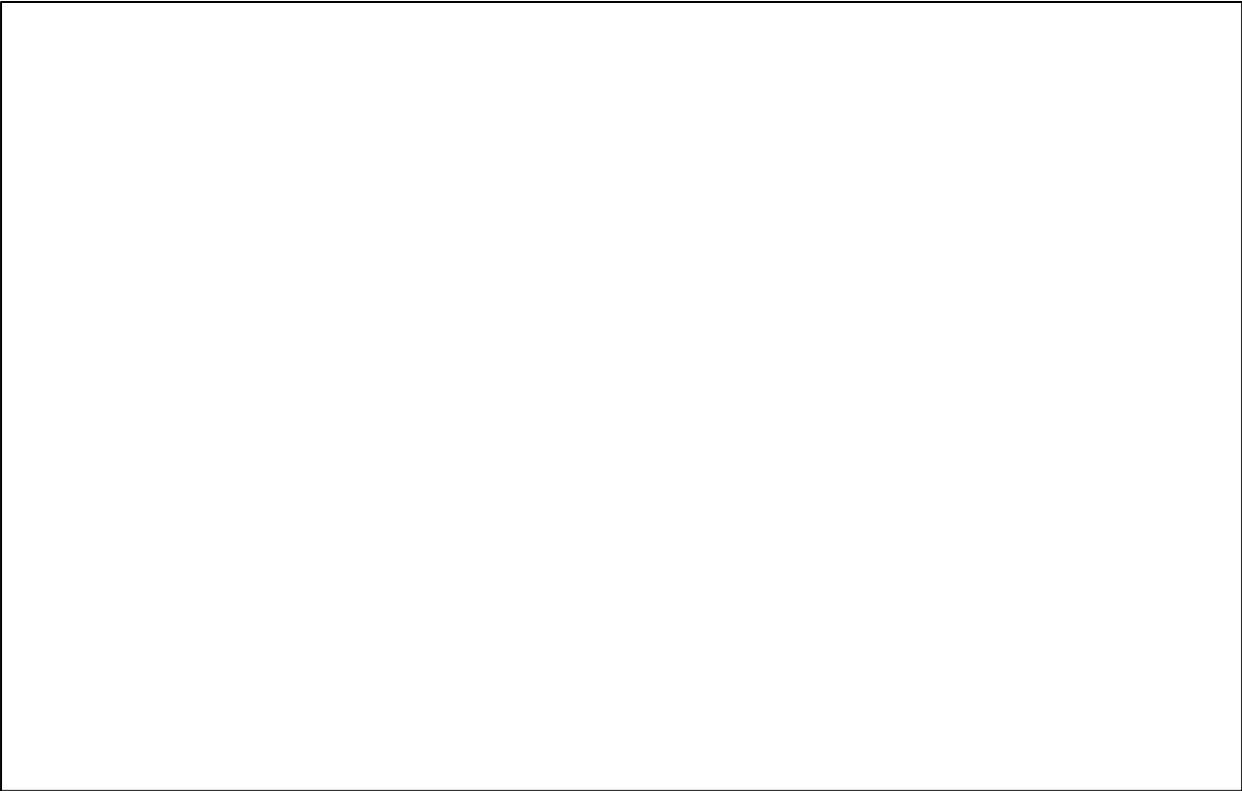
*Spécimens ayant servis à tester le montage expérimental et les paramètres de prise de vidéo.

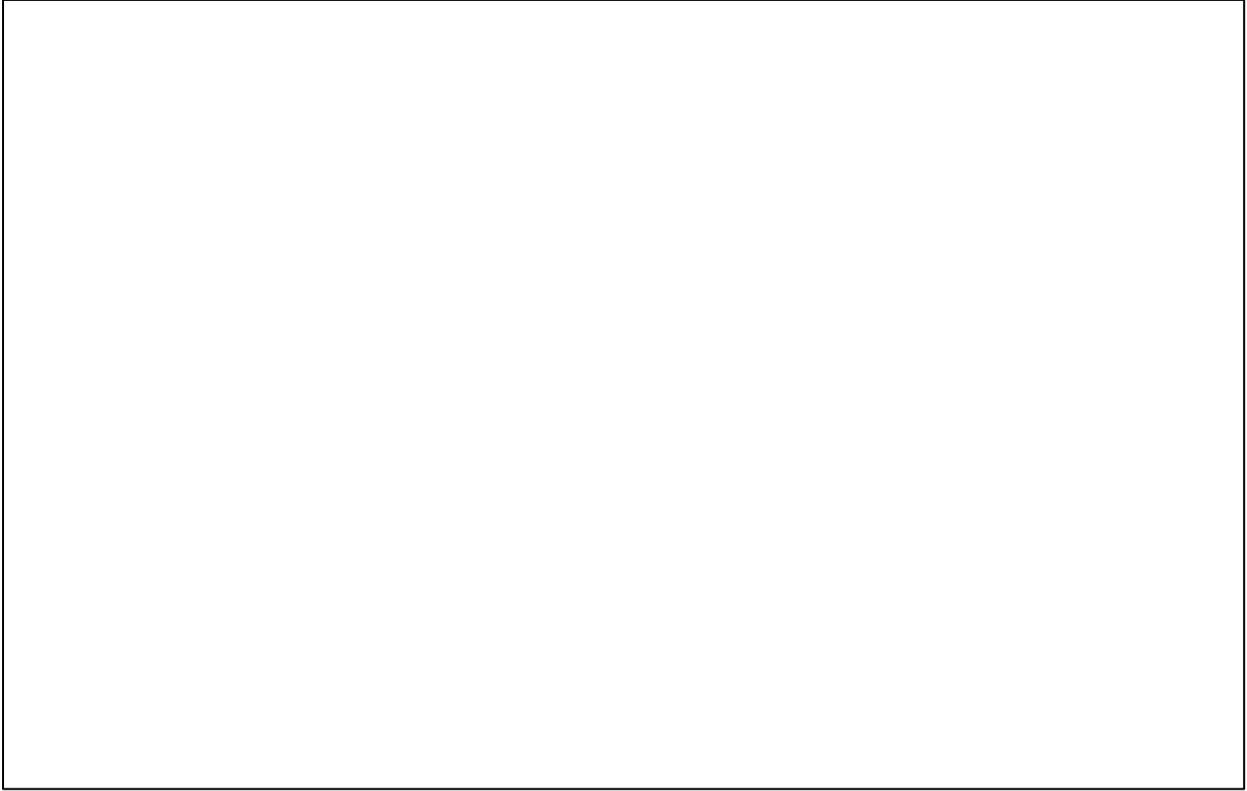
En plus des photographies, le scan avant et arrière de chaque panneau est présenté. Ces scans ont permis de mesurer de façon précise les dimensions des cratères de chaque panneau. Ceux-ci ont été possible à l'aide du département de génie mécanique du Collège militaire royal du Canada. L'appareil HandySCAN 3D a été utilisé pour faire les scans. Les cratères ont été numériquement mesurés à l'aide de Solidworks.

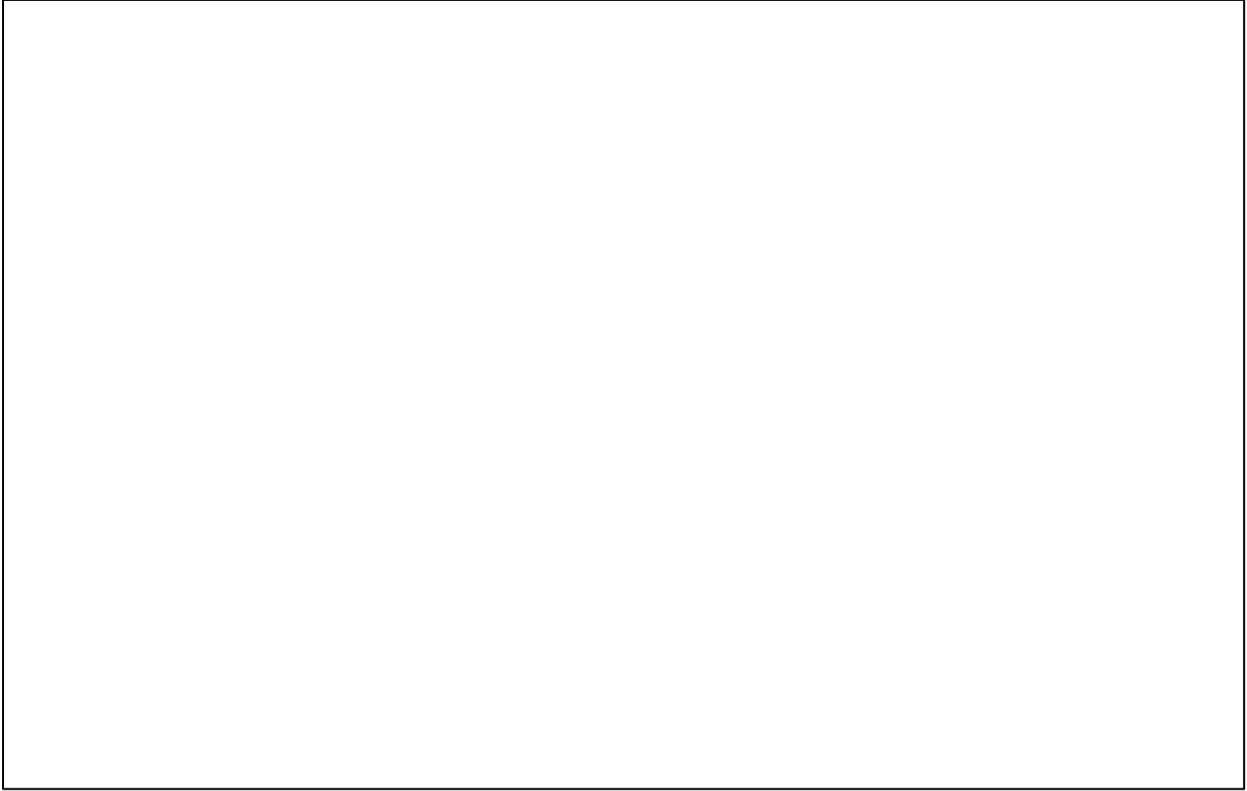
1. Rapport des résultats balistiques par LCRE

Rapport confidentiel

Pour plus d'informations, contacter l'auteur.
jeremy.tremblay3@forces.gc.ca
jeremy.tremblay@hotmail.fr



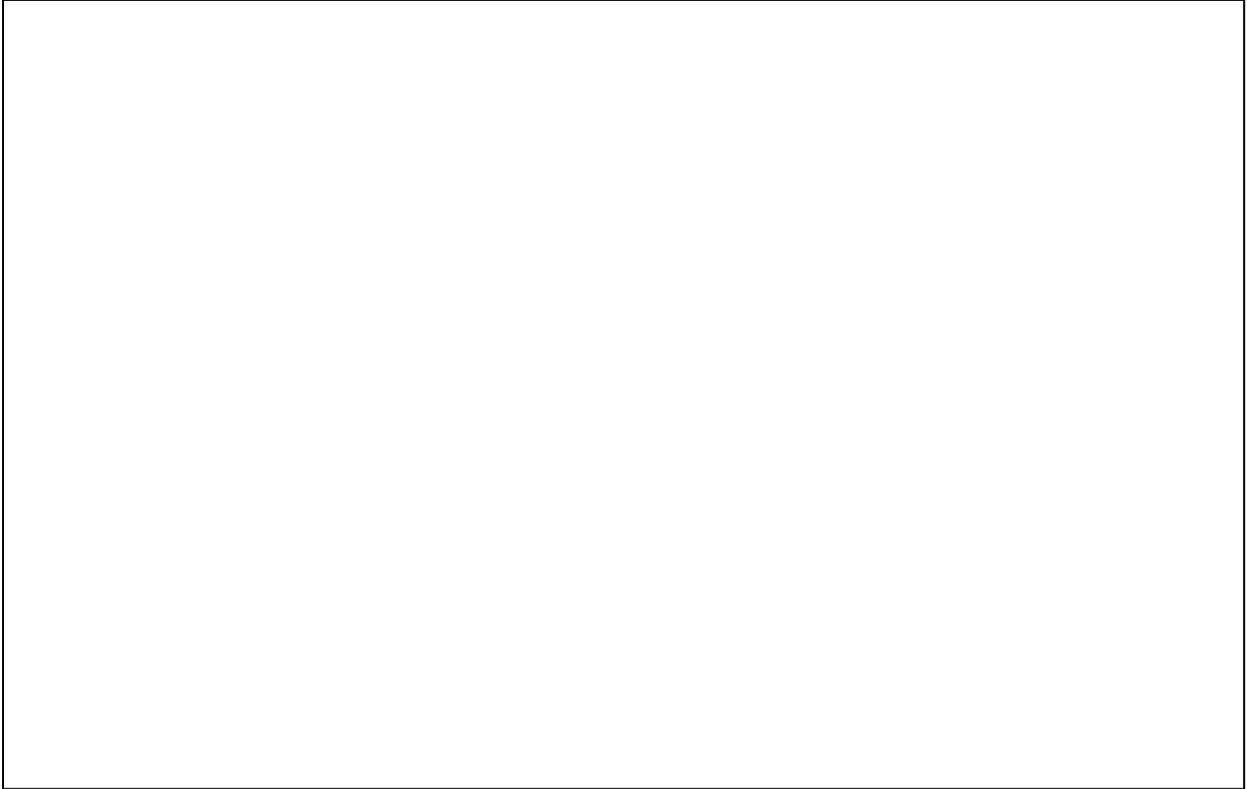


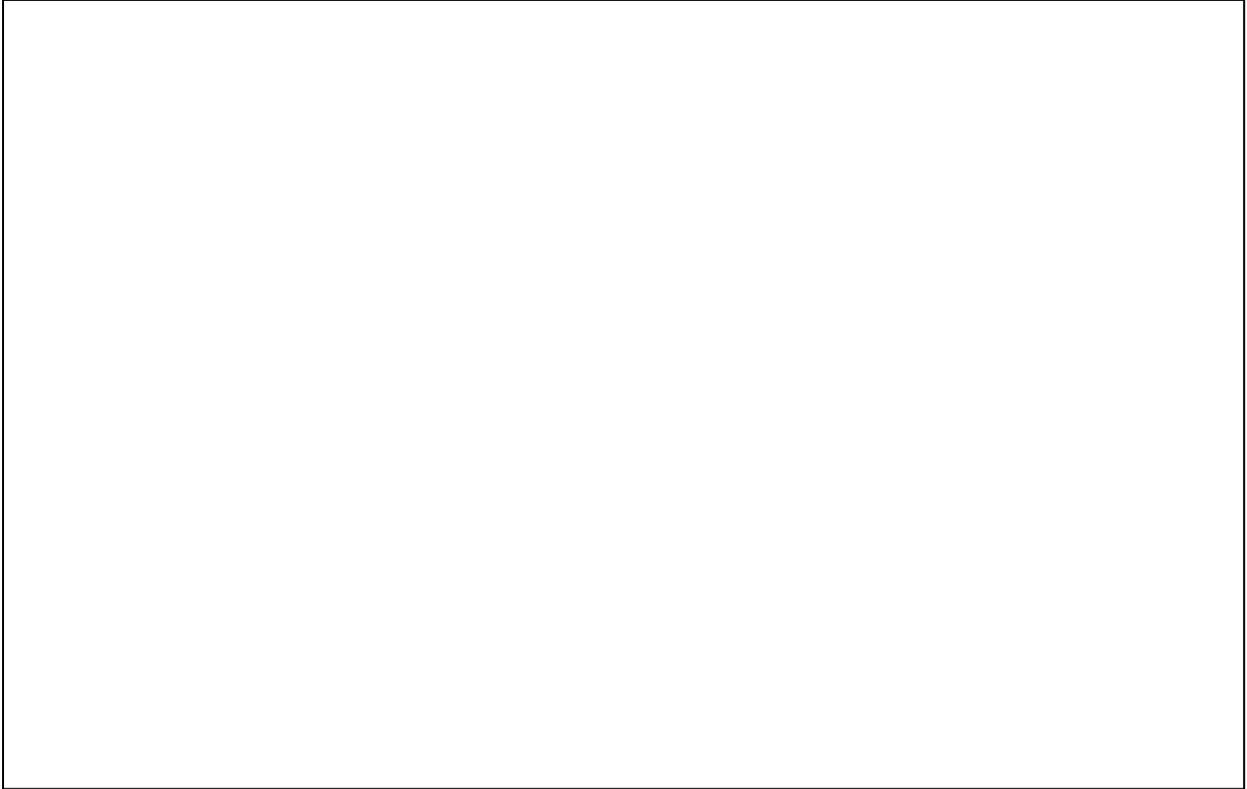


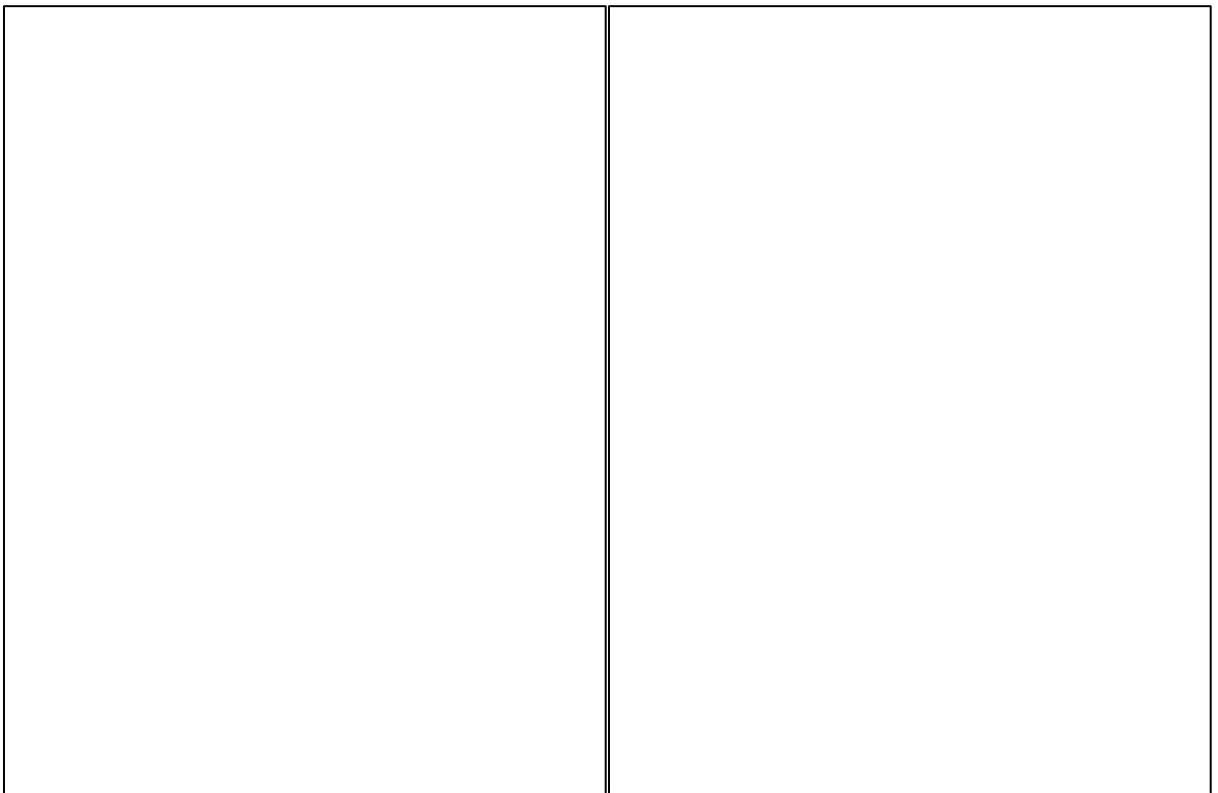
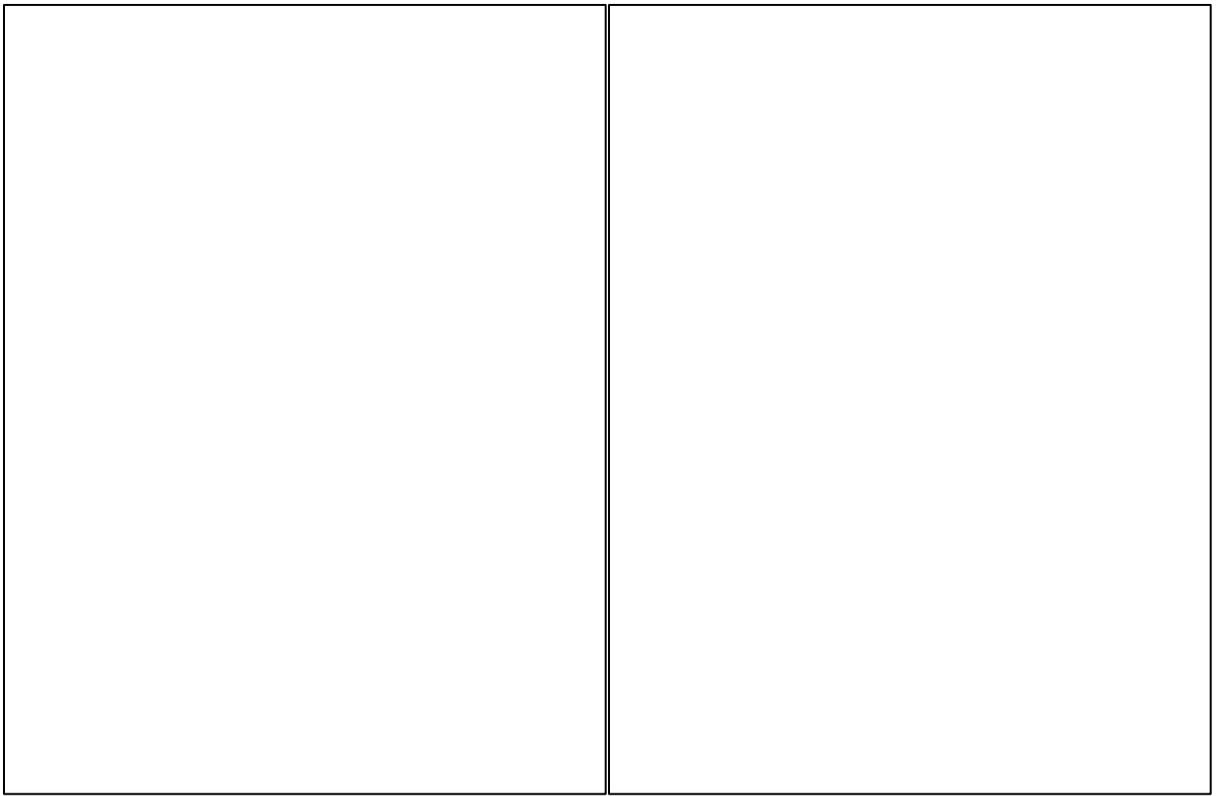
--	--

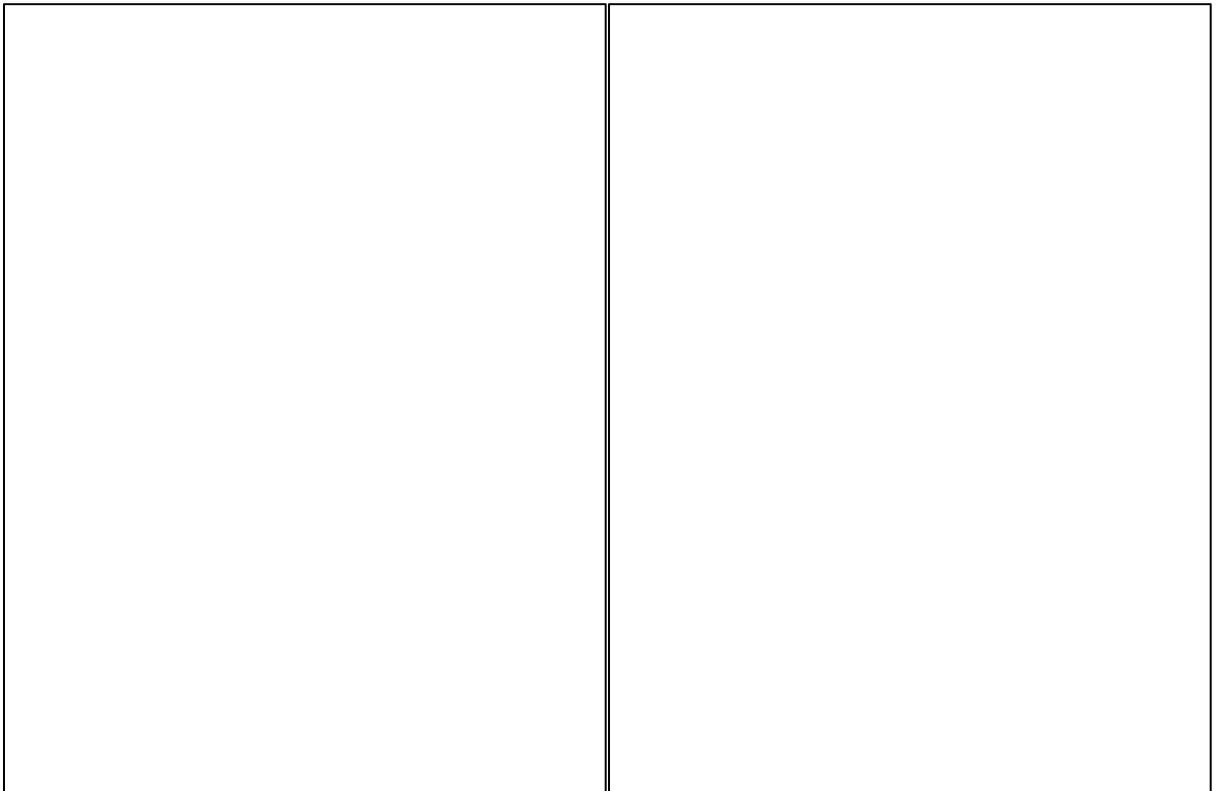
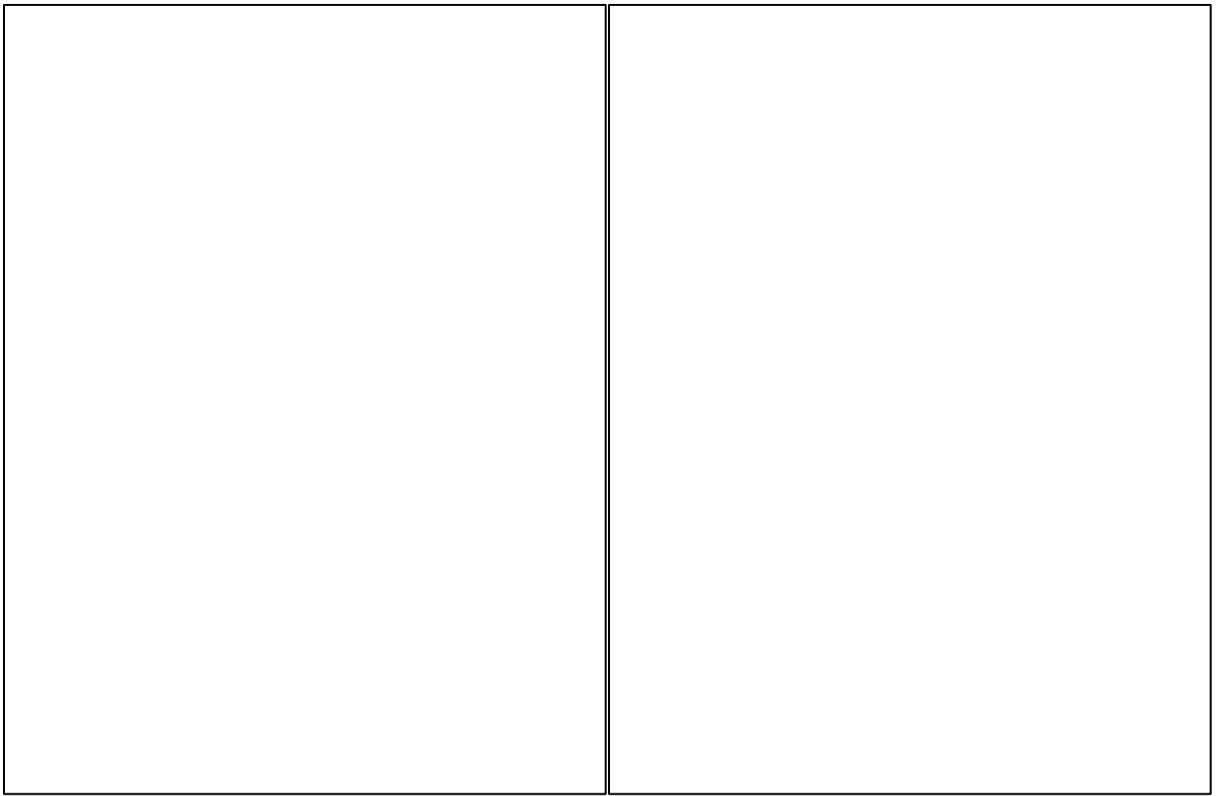
--	--

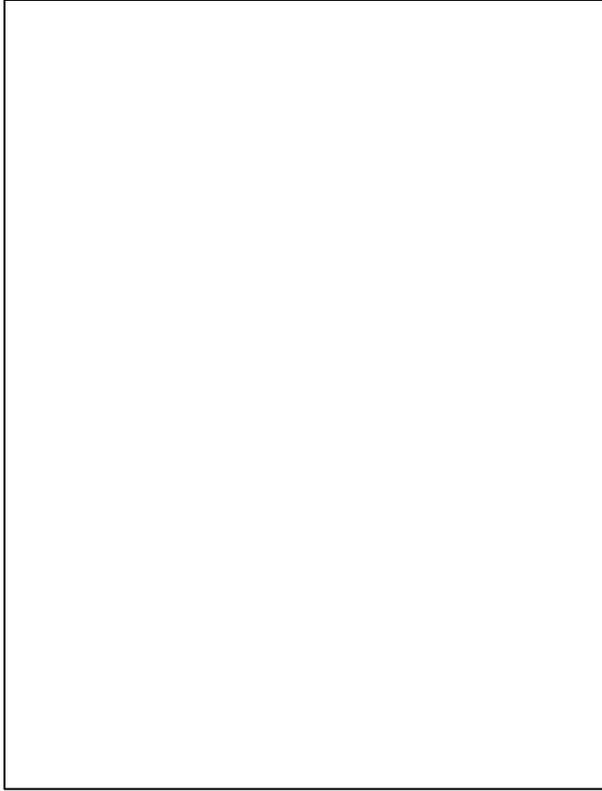
--







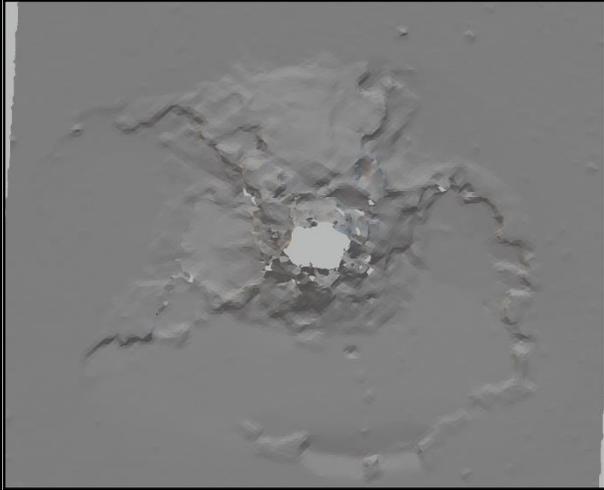




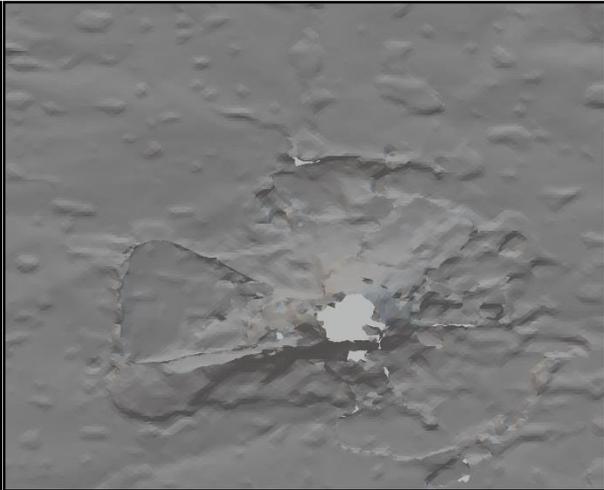
2. Photographies et scan solidworks

Panneau UF3-40-0

AVANT



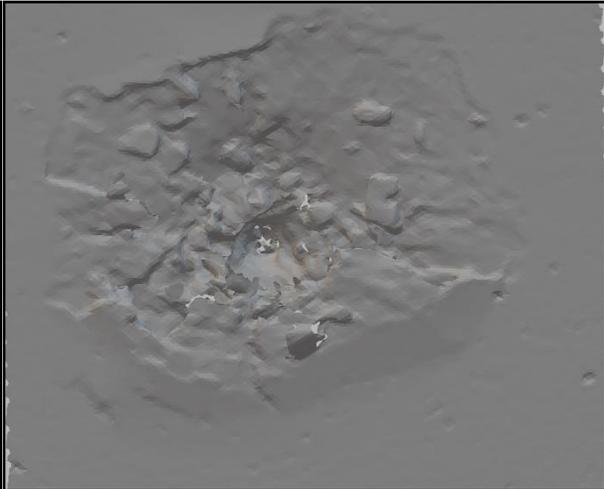
ARRIÈRE



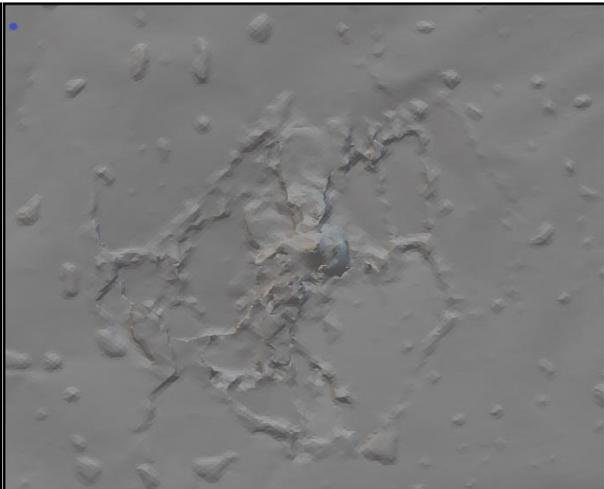
TÉMOIN



Panneau UF3-50-0
AVANT



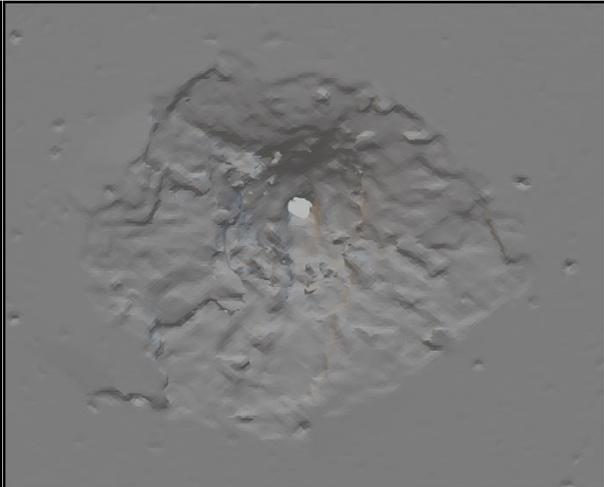
ARRIÈRE



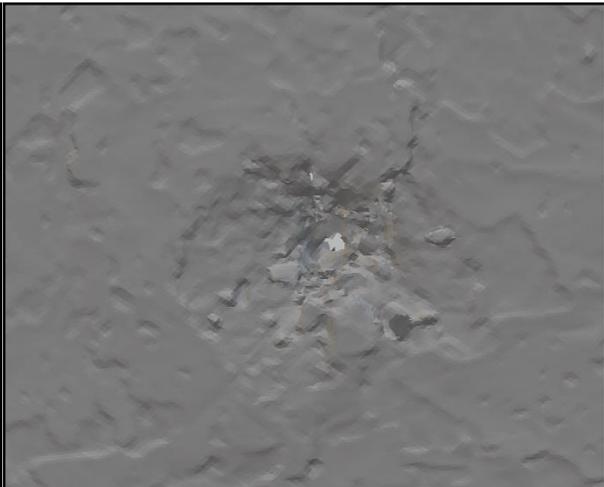
TÉMOIN



Panneau UF3-60-0
AVANT



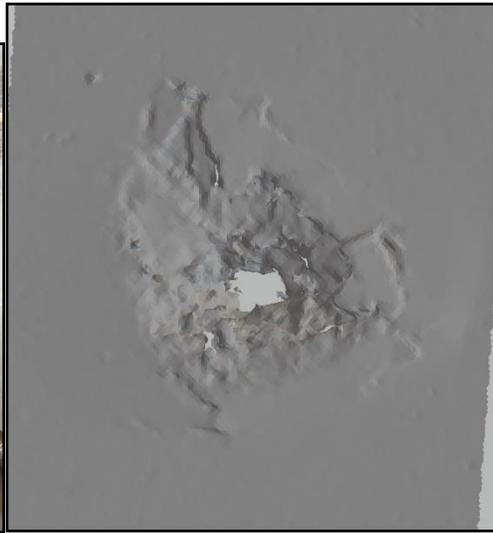
ARRIÈRE



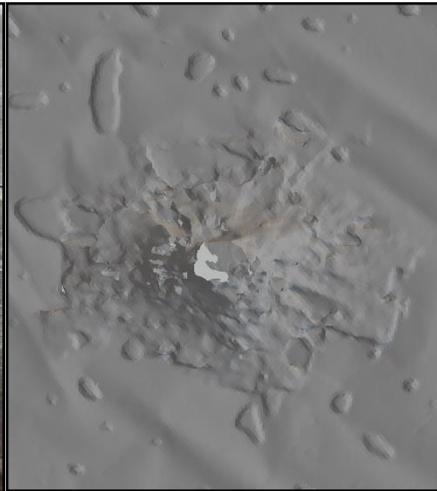
TÉMOIN



Panneau UF3-40-1
AVANT



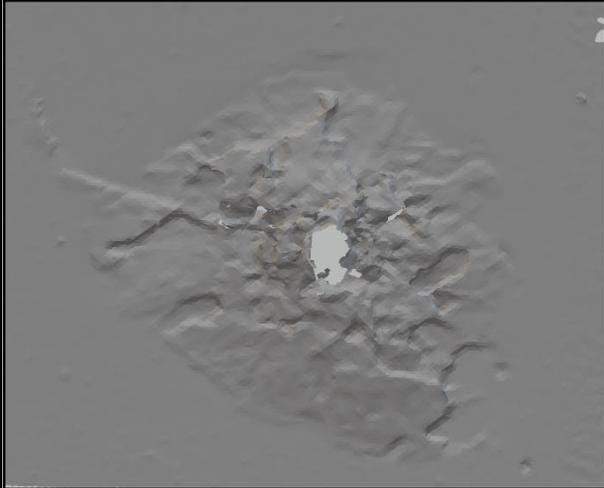
ARRIÈRE



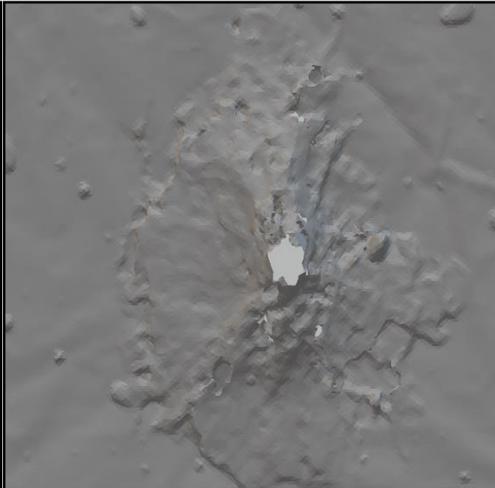
TÉMOIN



Panneau UF3-40-2
AVANT



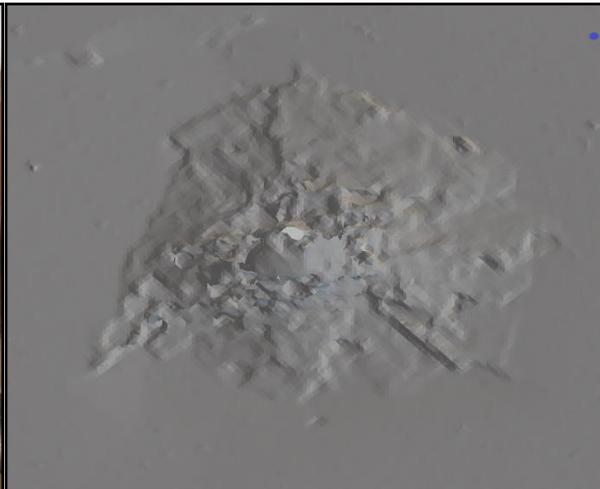
ARRIÈRE



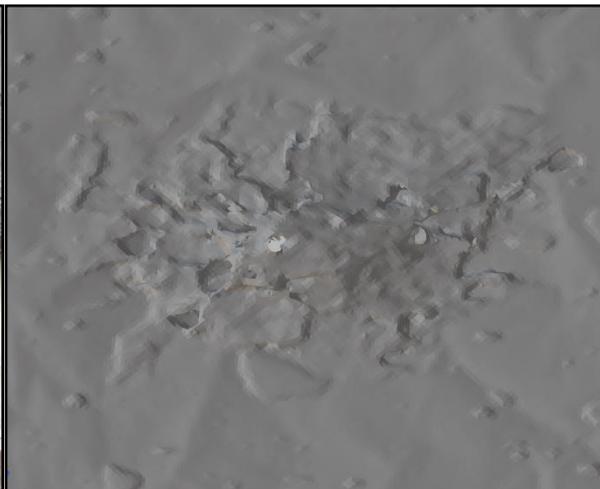
TÉMOIN



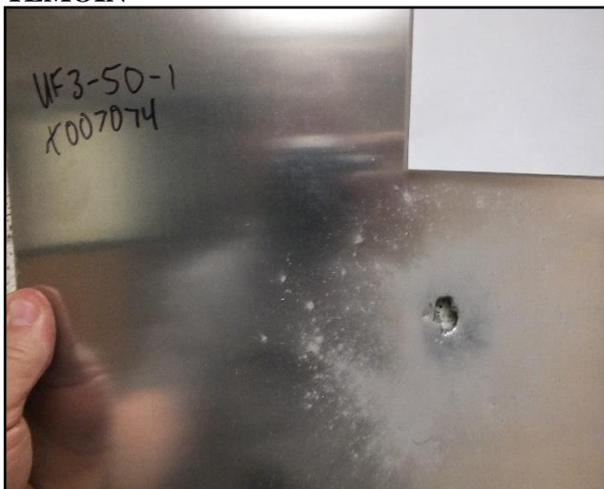
Panneau UF3-50-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



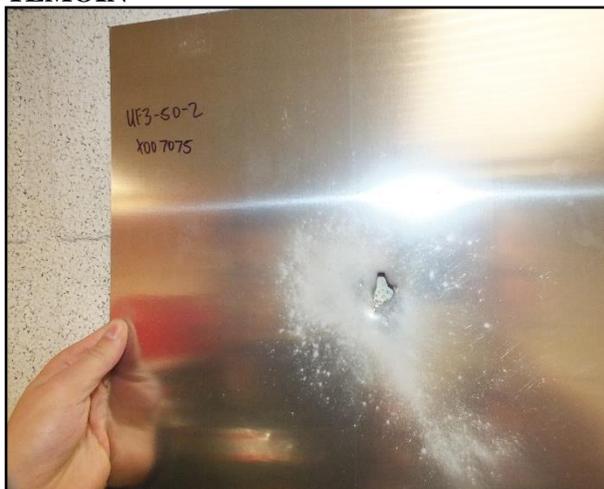
Panneau UF3-50-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



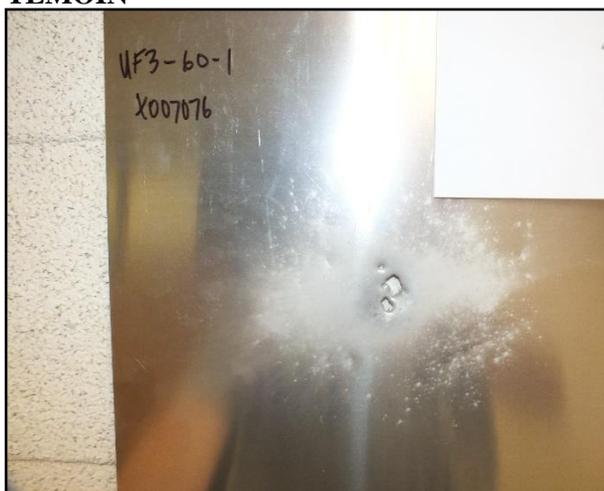
Panneau UF3-60-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau UF3-60-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



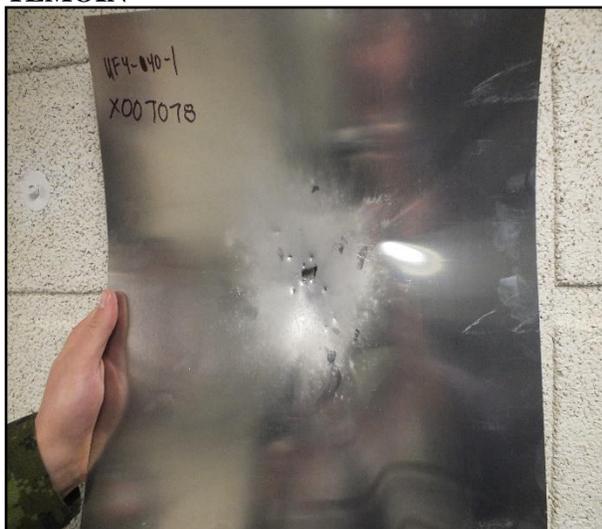
Panneau UF4-40-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



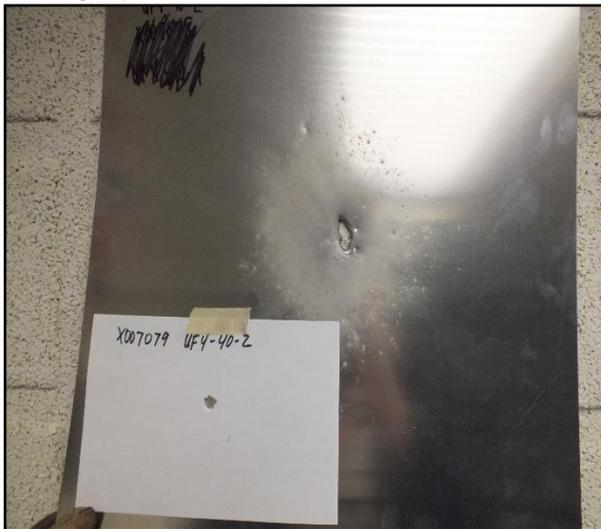
Panneau UF4-40-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



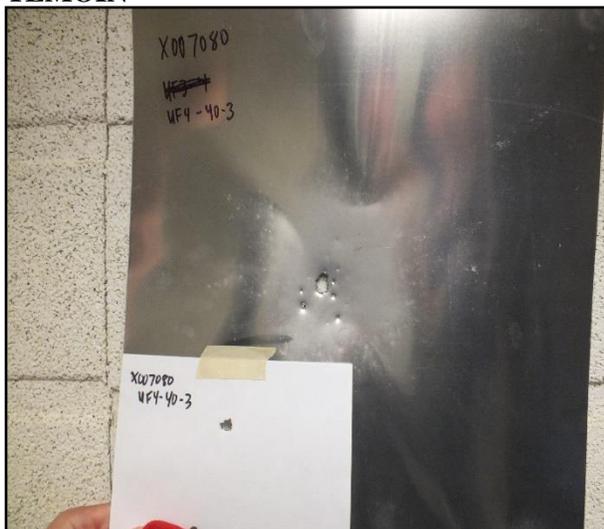
Panneau UF4-40-3
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau UF4-50-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



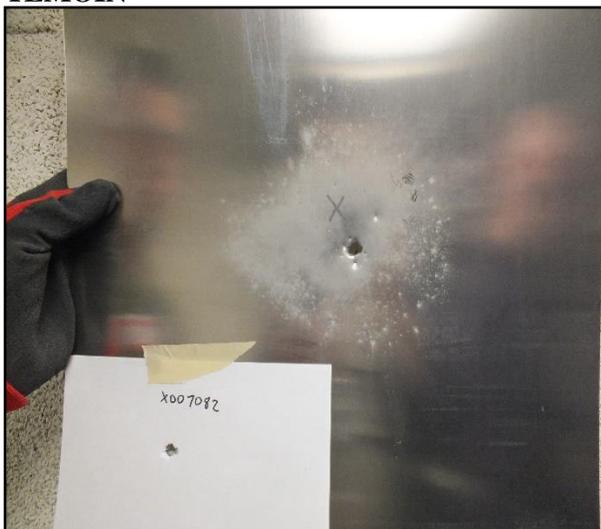
Panneau UF4-50-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau UF4-50-3
AVANT



ARRIÈRE



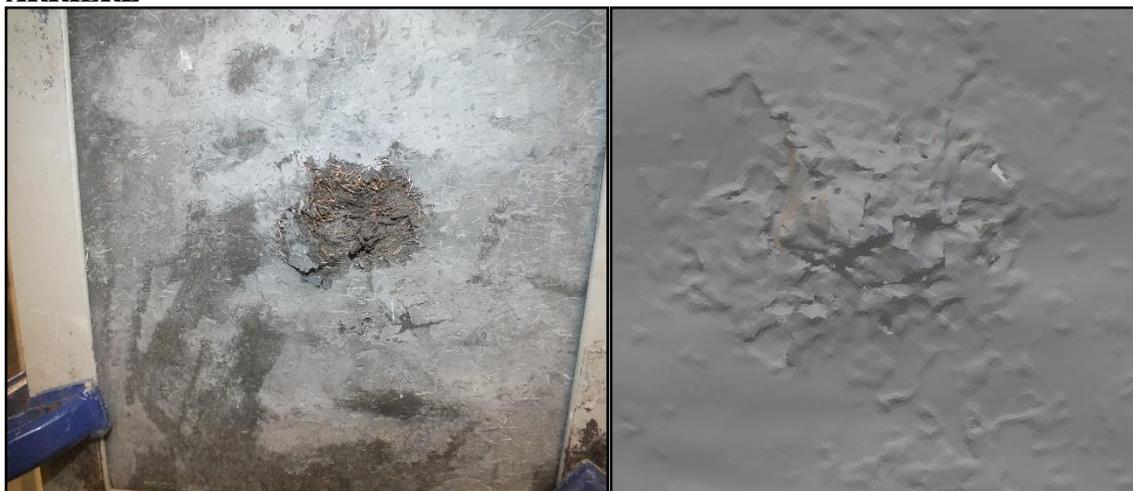
TÉMOIN



Panneau UF4-60-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau UF4-60-2
AVANT



ARRIÈRE



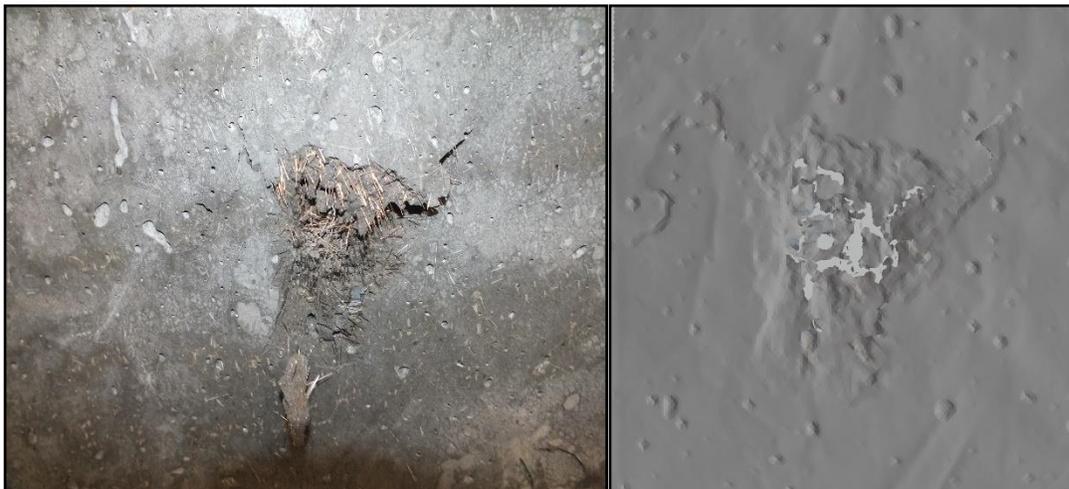
TÉMOIN



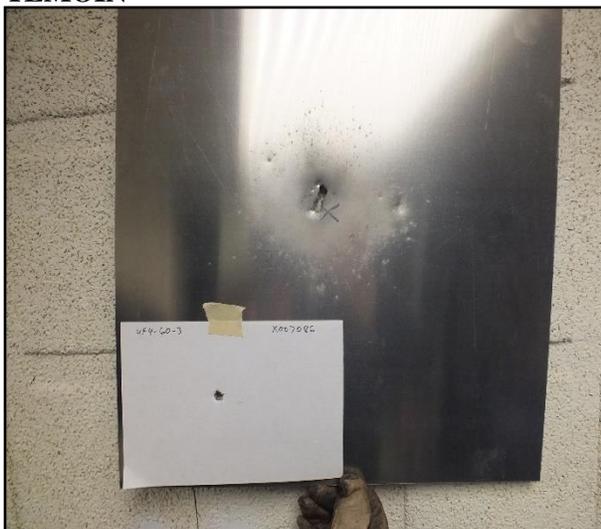
Panneau UF4-60-3
AVANT



ARRIÈRE



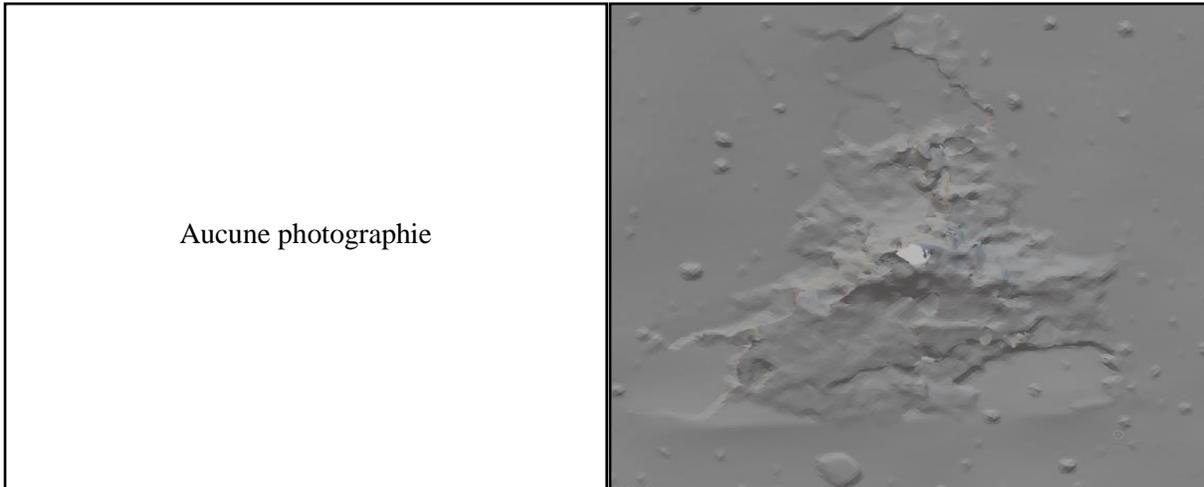
TÉMOIN



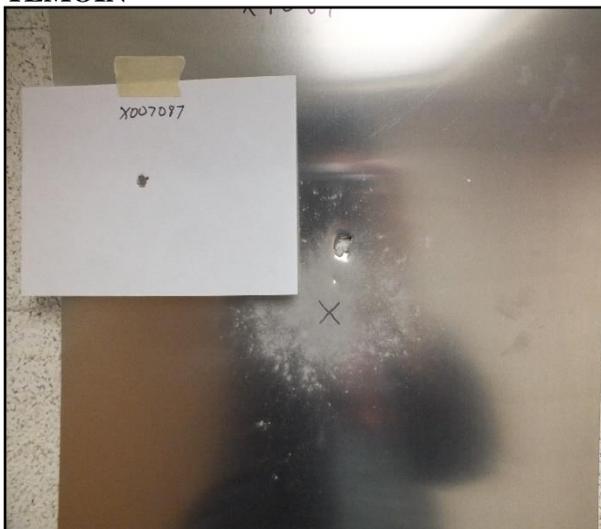
Panneau FF3-40-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau FF3-40-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau FF3-40-3
AVANT



ARRIÈRE



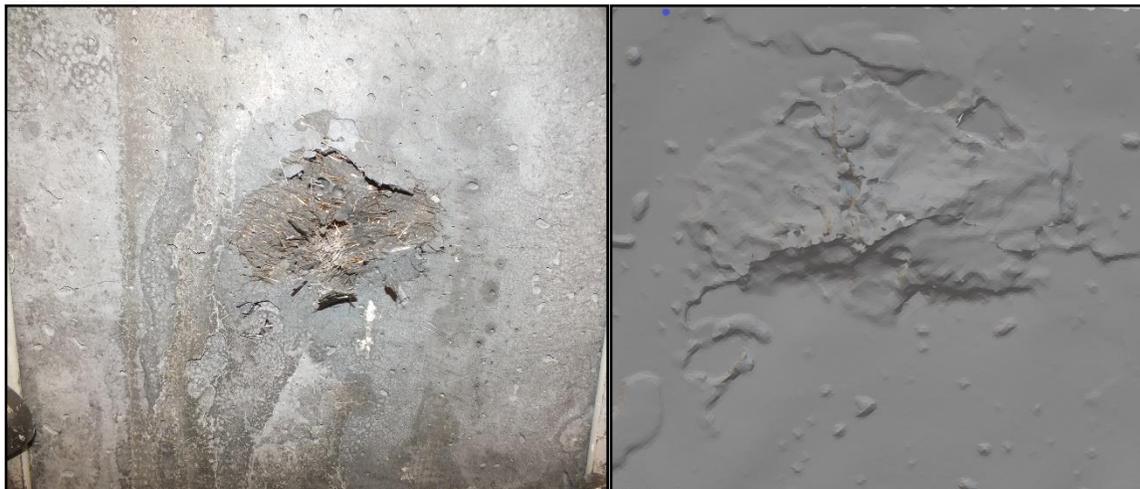
TÉMOIN



Panneau FF3-50-1
AVANT



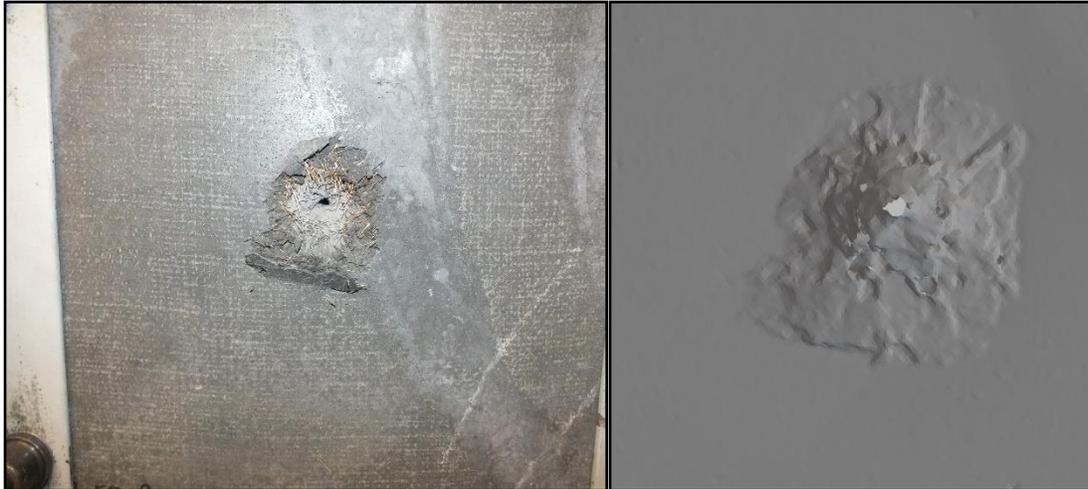
ARRIÈRE



TÉMOIN



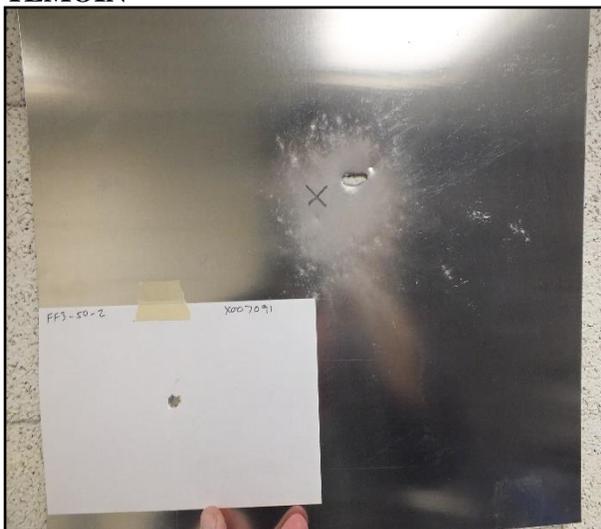
Panneau FF3-50-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



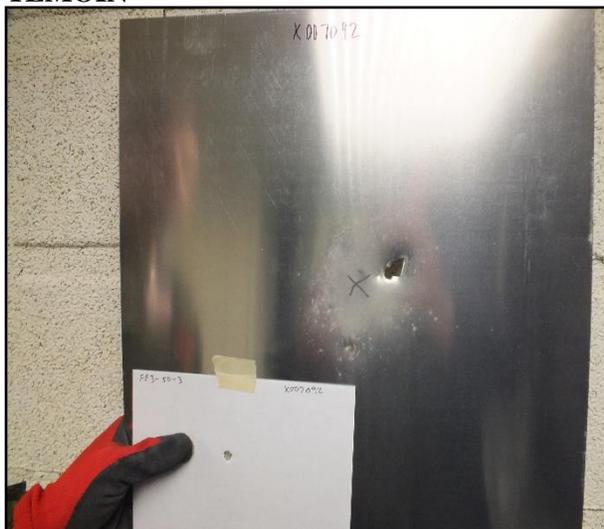
Panneau FF3-50-3
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



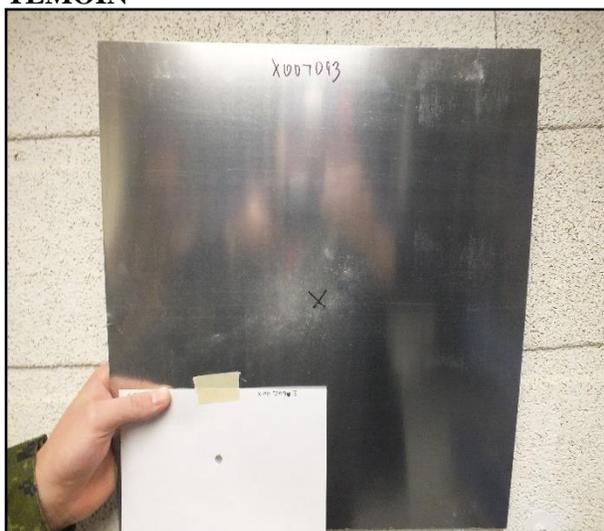
Panneau FF3-60-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



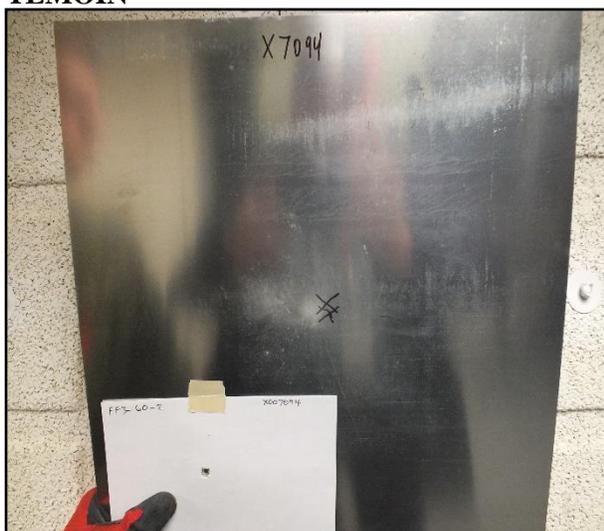
Panneau FF3-60-2
AVANT



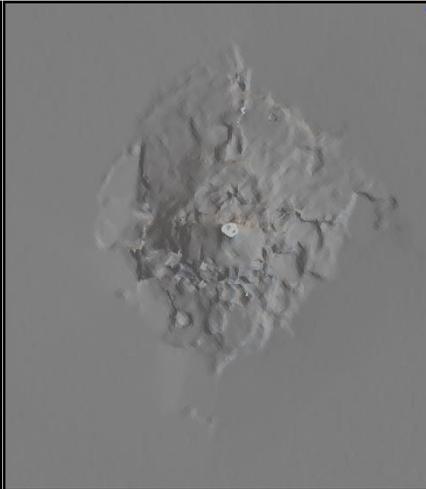
ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau FF3-60-3
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



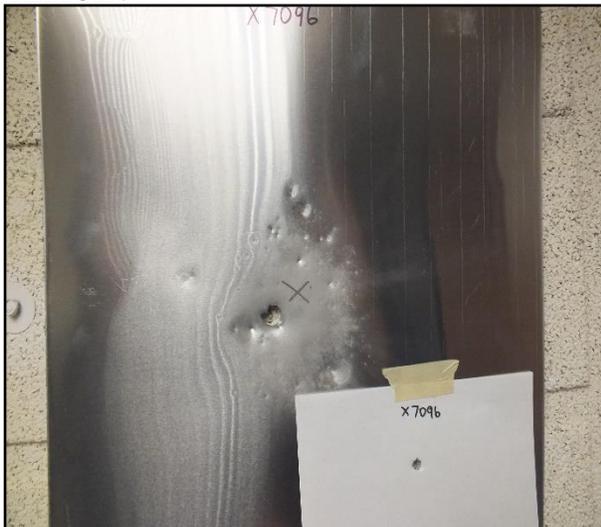
Panneau FF4-40-1
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau FF4-40-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Panneau FF4-40-3
AVANT



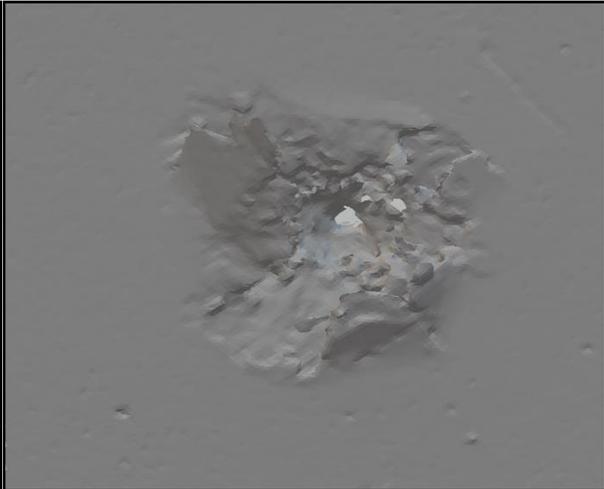
ARRIÈRE



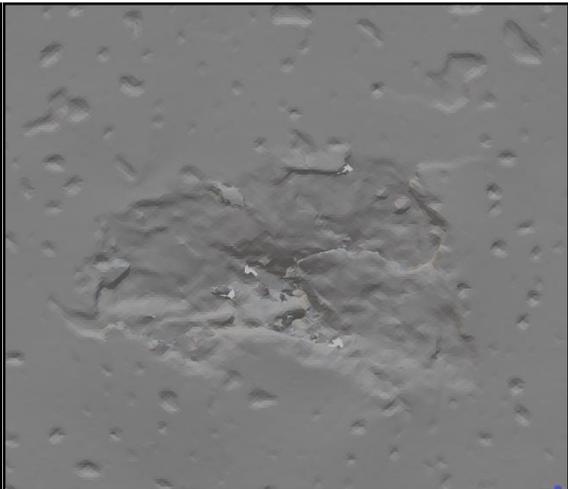
TÉMOIN



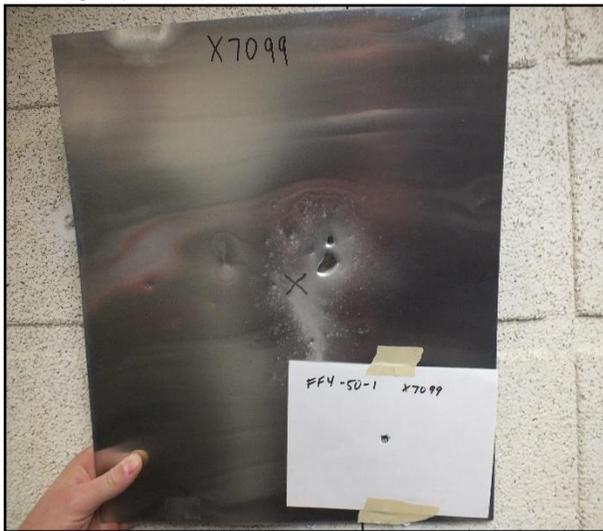
Panneau FF4-50-1
AVANT



ARRIÈRE



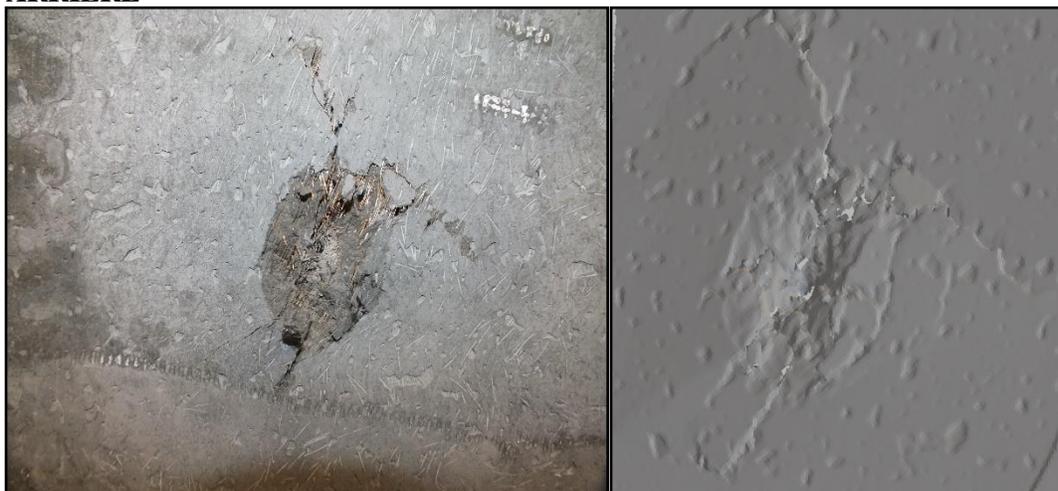
TÉMOIN



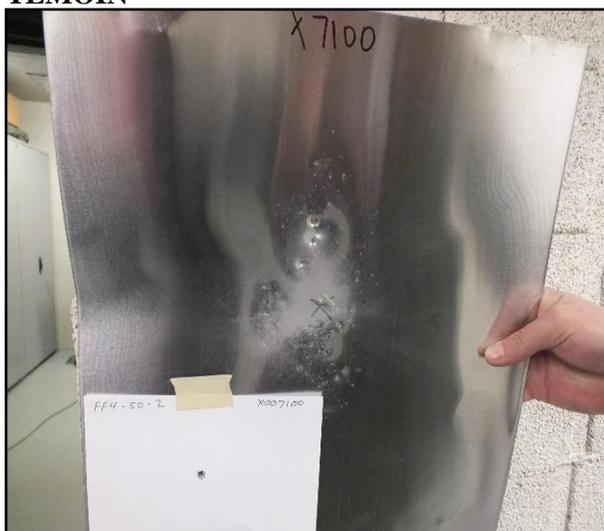
Panneau FF4-50-2
AVANT



ARRIÈRE



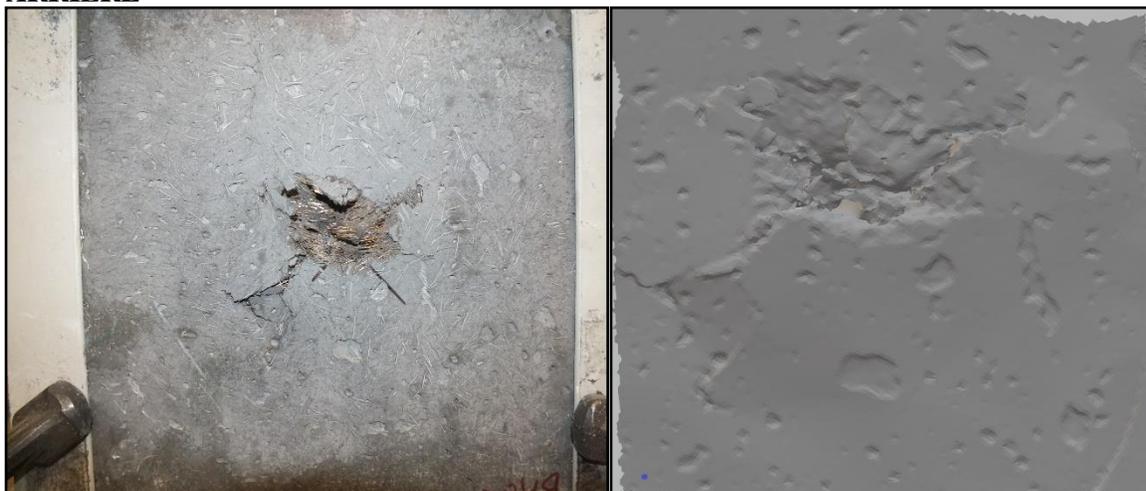
TÉMOIN



Panneau FF4-50-3
AVANT



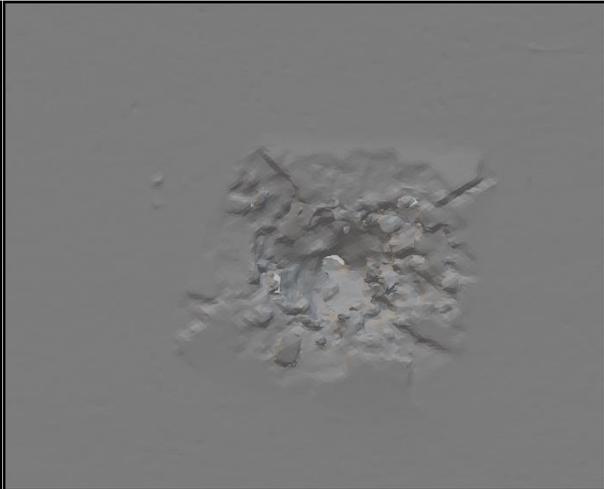
ARRIÈRE



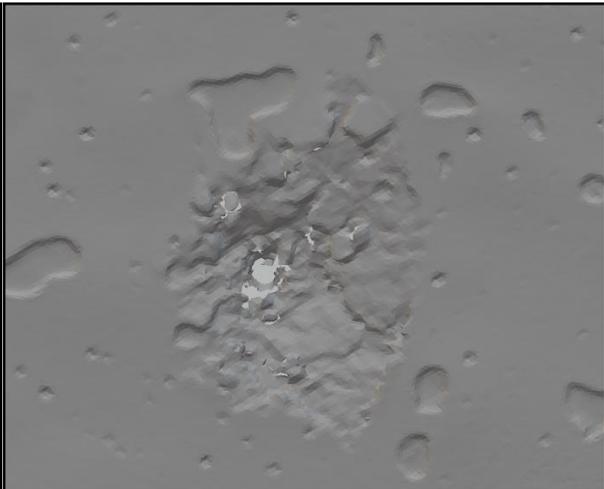
TÉMOIN



Panneau FF4-60-1
AVANT



ARRIÈRE



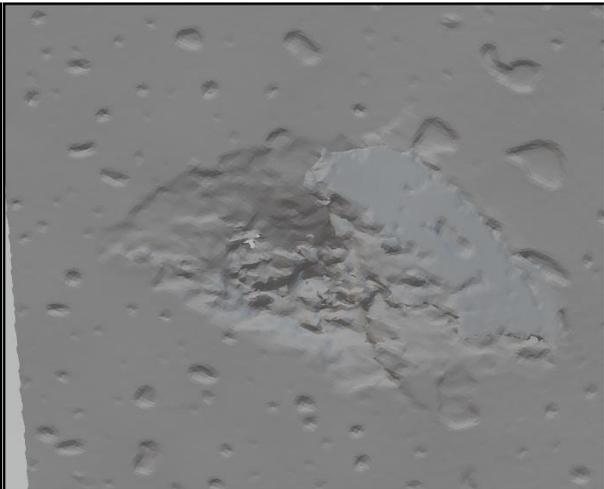
TÉMOIN



Panneau FF4-60-2
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



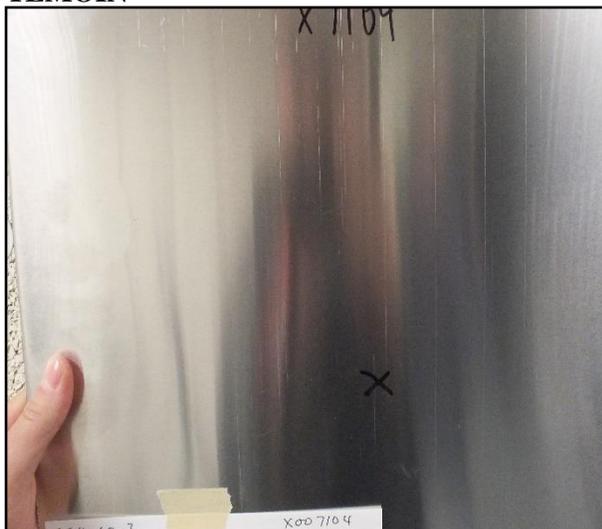
Panneau FF4-60-3
AVANT



ARRIÈRE



TÉMOIN



Annexe C

Cette annexe présente tous les résultats compilés du rapport de CETQ et CanmetLRCE. Le Tableau C-1 présente les résultats bruts obtenus. Le Tableau C-2 présente les distances entre le centroïde de la plaque témoin et le centre de la perforation, ainsi que la distance équivalente parcourue corrigée par le projectile. Cette distance ajuste ainsi les vitesses résiduelles du noyau du projectile et les énergies cinétiques résiduelles et énergies absorbées, présentées au Tableau C-3. Les corrections ont été appliquées en X seulement, étant donné que la caméra haute-vitesse capte les vitesses dans le plan Y-Z. La distance a été calculée à l'aide de trigonométrie, et les nouvelles vitesses à l'aide d'un ratio.

Tableau C-1 : Résultats bruts de la recherche provenant du rapport de CETQ et CanmetLRCE

Spécimen		Température (°c)		Humidité (%)	Masse (kg)		Masse (kg)	Vitesse (m/s)		Énergie Cinétique (J)		
RMC ID	LCRE ID	Ambiante	Panel	Relative	Avant	Après	Perte	Impact	Résiduelle	Pré-impact	Résiduelle	Absorbée**
F3-40-0	X007069	17,0	16,0	53,7	11,86	11,76	0,10	818,00	661,00	3643,38	1149,10	2494,28
F3-50-0	X007070	17,5	16,0	58,3	15,95	15,82	0,13	811,00	607,00	3581,29	969,02	2612,27
F3-60-0	X007071	18,0	16,0	57,3	18,76	18,66	0,10	818,00	505,00	3643,38	670,72	2972,66
UF3-40-1	X007072	18,3	14,0	58,5	12,06	11,94	0,12	811,00	637,00	3581,29	1067,17	2514,12
UF3-40-2	X007073	18,1	14,0	58,5	12,62	12,48	0,14	815,00	627,00	3616,71	1033,93	2582,78
UF3-50-1	X007074	17,4	15,0	62,1	15,86	15,74	0,12	822,00	574,00	3679,10	866,52	2812,58
UF3-50-2	X007075	18,0	14,0	59,7	16,14	16,00	0,14	811,00	550,00	3581,29	795,58	2785,72
UF3-60-1	X007076	18,3	14,0	59,8	18,58	18,48	0,10	814,00	495,00	3607,84	644,42	2963,42
UF3-60-2	X007077	19,5	14,0	56,5	19,10	18,98	0,12	814,00	489,00	3607,84	628,89	2978,95
UF4-40-1	X007078	16,3	16,0	64,0	13,00	12,88	0,12	818,00	611,00	3643,38	981,83	2661,55
UF4-40-2	X007079	16,4	15,0	60,5	12,70	12,52	0,18	818,00	634,00	3643,38	1057,14	2586,24
UF4-40-3	X007080	16,5	15,0	59,2	12,54	12,42	0,12	818,00	614,00	3643,38	991,50	2651,88
UF4-50-1	X007081	16,5	15,0	59,2	15,54	15,42	0,12	822,00	574,00	3679,10	866,52	2812,58
UF4-50-2	X007082	16,7	15,0	59,2	15,62	15,54	0,08	815,00	554,00	3616,71	807,19	2809,52
UF4-50-3	X007083	16,7	15,0	56,8	16,22	16,12	0,10	818,00	549,00	3643,38	792,68	2850,70
UF4-60-1	X007084	16,9	15,0	56,4	19,08	18,96	0,12	811,00	469,00	3581,29	578,50	3002,79
UF4-60-2	X007085	16,9	15,0	56,7	19,02	18,94	0,08	815,00	448,00	3616,71	527,85	3088,85
UF4-60-3	X007086	16,7	15,0	57,0	19,18	19,10	0,08	822,00	494,00	3679,10	641,81	3037,28
FF3-40-1	X007087	18,0	14,0	36,9	12,42	12,30	0,12	612,00	357,00	2039,39	335,19	1704,20
FF3-40-2	X007088	17,6	13,0	36,3	12,50	12,44	0,06	613,00	309,00	2046,06	251,12	1794,95
FF3-40-3	X007089	17,7	14,0	35,7	12,86	12,76	0,10	609,00	353,00	2019,45	327,72	1691,73
FF3-50-1	X007090	17,7	14,0	35,1	15,56	15,48	0,08	606,00	199,00	1999,60	104,15	1895,45
FF3-50-2	X007091	17,1	14,0	35,6	15,62	15,52	0,10	613,00	241,00	2046,06	152,75	1893,31
FF3-50-3	X007092	17,6	14,0	35,0	15,84	15,76	0,08	616,00	236,00	2066,14	146,48	1919,66
FF3-60-1	X007093	17,9	13,0	35,4	19,26	19,16	0,10	609,00	15,00	2019,45	0,59	2018,86
FF3-60-2	X007094	17,6	14,0	39,7	19,14	19,06	0,08	609,00	19,00	2019,45	0,95	2018,50
FF3-60-3	X007095	18,2	14,0	32,5	18,82	18,70	0,12	616,00	19,00	2066,14	0,95	2065,19
FF4-40-1	X007096	18,3	14,0	30,9	12,66	12,62	0,04	620,00	381,00	2093,06	381,77	1711,28
FF4-40-2	X007097	17,7	14,0	34,4	12,38	12,32	0,06	611,00	366,00	2032,73	352,30	1680,43
FF4-40-3	X007098	18,1	14,0	33,6	12,22	12,12	0,10	609,00	302,00	2019,45	239,87	1779,58
FF4-50-1	X007099	18,7	6,0	32,8	15,82	15,72	0,10	623,00	238,00	2113,36	148,97	1964,39
FF4-50-2	X007100	18,4	11,0	38,0	15,92	15,82	0,10	609,00	217,00	2019,45	123,84	1895,60
FF4-50-3	X007101	17,0	13,0	39,8	16,08	16,00	0,08	623,00	244,00	2113,36	156,58	1956,78
FF4-60-1	X007102	18,2	13,0	38,3	19,12	19,06	0,06	609,00	61,00	2019,45	9,79	2009,66
FF4-60-2	X007103	18,3	14,0	39,1	19,40	19,32	0,08	616,00	132,00	2066,14	45,83	2020,31
FF4-60-3	X007104	18,5	14,0	38,7	19,04	19,00	0,04	616,00	0,00	2066,14	0,00	2066,14
Poids du projectile : 10,89g												
*Residual energy of the jacket exiting the test panel was not factored in the calculation. The jacket is known to have exited the panels.												

Tableau C-2: Distance entre le centroïde de la plaque témoin et du centre de la perforation (sur l'axe X seulement) et distance corrigée

Spécimen		Distance X - Perforation	Nouvelle Distance Parcourue
RMC ID	LCRE ID	(mm)	(mm)
F3-40-0	X007069	0,00	150,00
F3-50-0	X007070	0,00	150,00
F3-60-0	X007071	0,00	150,00
UF3-40-1	X007072	0,00	150,00
UF3-40-2	X007073	0,00	150,00
UF3-50-1	X007074	0,00	150,00
UF3-50-2	X007075	0,00	150,00
UF3-60-1	X007076	0,00	150,00
UF3-60-2	X007077	0,00	150,00
UF4-40-1	X007078	0,00	150,00
UF4-40-2	X007079	0,00	150,00
UF4-40-3	X007080	0,00	150,00
UF4-50-1	X007081	0,00	150,00
UF4-50-2	X007082	12,84	150,55
UF4-50-3	X007083	13,72	150,63
UF4-60-1	X007084	33,70	153,74
UF4-60-2	X007085	-50,40	158,24
UF4-60-3	X007086	-6,84	150,16
FF3-40-1	X007087	0,00	150,00
FF3-40-2	X007088	0,00	150,00
FF3-40-3	X007089	25,20	152,10
FF3-50-1	X007090	0,00	150,00
FF3-50-2	X007091	29,20	152,82
FF3-50-3	X007092	33,50	153,70
FF3-60-1	X007093	0,00	150,00
FF3-60-2	X007094	0,00	150,00
FF3-60-3	X007095	0,00	150,00
FF4-40-1	X007096	-20,00	151,33
FF4-40-2	X007097	-12,30	150,50
FF4-40-3	X007098	-63,60	162,93
FF4-50-1	X007099	30,90	153,15
FF4-50-2	X007100	0,00	150,00
FF4-50-3	X007101	65,00	163,48
FF4-60-1	X007102	0,00	150,00
FF4-60-2	X007103	9,50	150,30
FF4-60-3	X007104	0,00	150,00

Tableau C-3 : Résultats corrigés des vitesses résiduelles, énergies cinétiques résiduelles et énergies absorbées utilisés dans la recherche

Spécimen		Vitesse Corrigée (m/s)		Énergie Cinétique (J)		
RMC ID	LCRE ID	Impact*	Résiduelle	Pré-impact	Résiduelle	Absorbée
F3-40-0	X007069	818	661,00	3643,38	1149,10	2494,28
F3-50-0	X007070	811	607,00	3581,29	969,02	2612,27
F3-60-0	X007071	818	505,00	3643,38	670,72	2972,66
UF3-40-1	X007072	811	637,00	3581,29	1067,17	2514,12
UF3-40-2	X007073	815	627,00	3616,71	1033,93	2582,78
UF3-50-1	X007074	822	574,00	3679,10	866,52	2812,58
UF3-50-2	X007075	811	550,00	3581,29	795,58	2785,72
UF3-60-1	X007076	814	495,00	3607,84	644,42	2963,42
UF3-60-2	X007077	814	489,00	3607,84	628,89	2978,95
UF4-40-1	X007078	818	611,00	3643,38	981,83	2661,55
UF4-40-2	X007079	818	634,00	3643,38	1057,14	2586,24
UF4-40-3	X007080	818	614,00	3643,38	991,50	2651,88
UF4-50-1	X007081	822	574,00	3679,10	866,52	2812,58
UF4-50-2	X007082	815	556,03	3616,71	813,10	2803,60
UF4-50-3	X007083	818	551,29	3643,38	799,32	2844,06
UF4-60-1	X007084	811	480,69	3581,29	607,70	2973,59
UF4-60-2	X007085	815	472,61	3616,71	587,44	3029,26
UF4-60-3	X007086	822	494,51	3679,10	643,15	3035,95
FF3-40-1	X007087	612	357,00	2039,39	335,19	1704,20
FF3-40-2	X007088	613	309,00	2046,06	251,12	1794,95
FF3-40-3	X007089	609	357,95	2019,45	336,97	1682,48
FF3-50-1	X007090	606	199,00	1999,60	104,15	1895,45
FF3-50-2	X007091	613	245,52	2046,06	158,54	1887,52
FF3-50-3	X007092	616	241,81	2066,14	153,79	1912,35
FF3-60-1	X007093	609	15,00	2019,45	0,59	2018,86
FF3-60-2	X007094	609	19,00	2019,45	0,95	2018,50
FF3-60-3	X007095	616	19,00	2066,14	0,95	2065,19
FF4-40-1	X007096	620	384,37	2093,06	388,56	1704,50
FF4-40-2	X007097	611	367,23	2032,73	354,67	1678,06
FF4-40-3	X007098	609	328,02	2019,45	282,99	1736,46
FF4-50-1	X007099	623	243,00	2113,36	155,30	1958,07
FF4-50-2	X007100	609	217,00	2019,45	123,84	1895,60
FF4-50-3	X007101	623	265,92	2113,36	185,98	1927,38
FF4-60-1	X007102	609	61,00	2019,45	9,79	2009,66
FF4-60-2	X007103	616	132,26	2066,14	46,01	2020,13
FF4-60-3	X007104	616	0,00	2066,14	0,00	2066,14
		*Aucun Changement.				

Annexe D

De la théorie mentionnée dans le Chapitre 2 et dans le Chapitre 3, une équation a été développée pour évaluer l'épaisseur requise d'un panneau de BFUP pour résister à un tir, l'Équation 2-11. Cette annexe présente un exemple de calcul pour un des essais expérimentaux, ainsi que les résultats de chacun des essais au Tableau D-1. Tel mentionné au Chapitre 3, la chemise n'est pas incluse dans les calculs. Cette omission est expliquée par son extraction lors de la pénétration.

$$\frac{K}{\phi^2} * t_{min} * \phi^2 = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad \text{Équation D-1 [43]}$$

Exemple de calcul pour déterminer l'épaisseur minimale du spécimen UF4-50-1

Déterminer les données requises

$$m_p = 0,00526 \text{ kg} \quad \text{Masse du noyau}$$

$$\phi_p = 5,2 \text{ mm} \quad \text{Diamètre du noyau}$$

$$t_{panneau} = 50 \text{ mm} \quad \text{Épaisseur du panneau}$$

$$v_i = 822 \frac{m}{s} \quad \text{Vitesse initiale du noyau}$$

$$v_r = 574 \frac{m}{s} \quad \text{Vitesse résiduelle du noyau}$$

Calcul de l'énergie cinétique, de l'énergie résiduelle et de l'énergie absorbée

$$E_K = \frac{1}{2} m_p v_i^2 = \frac{1}{2} * 0,00526 \text{ kg} * \left(822 \frac{m}{s}\right)^2 = 1777 \text{ J} \quad \text{Énergie cinétique initiale du noyau}$$

$$E_R = \frac{1}{2} m_p v_r^2 = \frac{1}{2} * 0,00526 \text{ kg} * \left(574 \frac{m}{s}\right)^2 = 867 \text{ J} \quad \text{Énergie résiduelle du noyau}$$

$$\Delta E = E_K - E_R = 1777 \text{ J} - 867 \text{ J} = 910 \text{ J} \quad \text{Énergie absorbée par le panneau}$$

Calcul du paramètre K et K/Ø²

$$K = \frac{\Delta E}{t_{panneau}} = \frac{910 \text{ J}}{50 \text{ mm}} = 18,2 \frac{J}{mm}$$

$$\frac{K}{\phi^2} = \frac{18,2 \frac{J}{mm}}{(5,2 \text{ mm})^2} = 0,67 \frac{J}{mm^3}$$

Calcul de l'épaisseur minimale requise théorique

$$\frac{K}{\phi^2} * t_{min} * \phi^2 = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$t_{min} = \frac{E_K}{K} = \frac{1777J}{18,2 \frac{J}{mm}} = 98 \text{ mm}$$

Résultats des autres essais expérimentaux

Tableau D-1 : Résultats des paramètres K et K/φ², ainsi que des épaisseurs minimales requises théoriques des essais

Spécimen	v_i Noyau m/s	v_r Noyau m/s	E_K Noyau J	E_R Noyau J	ΔE Noyau J	t Panneau mm	K BFUP J/mm	φ Penetrator mm	φ² penetrator mm²	K/φ² Penetrator J/mm³	t_min Noyau mm
UF3-40-1	811	637	1729,81	1067,17	662,63	40	16,57	5,20	27,04	0,61	104,42
UF3-40-2	815	627	1746,91	1033,93	712,98	40	17,82	5,20	27,04	0,66	98,01
UF3-40-0	818	661	1759,80	1149,10	610,69	40	15,27	5,20	27,04	0,56	115,27
UF3-50-1	822	574	1777,05	866,52	910,53	50	18,21	5,20	27,04	0,67	97,58
UF3-50-2	811	550	1729,81	795,58	934,23	50	18,68	5,20	27,04	0,69	92,58
UF3-50-0	811	607	1729,81	969,02	760,79	50	15,22	5,20	27,04	0,56	113,69
UF3-60-1	814	495	1742,63	644,42	1098,21	60	18,30	5,20	27,04	0,68	95,21
UF3-60-2	814	489	1742,63	628,89	1113,74	60	18,56	5,20	27,04	0,69	93,88
UF3-60-0	818	505	1759,80	670,72	1089,08	60	18,15	5,20	27,04	0,67	96,95
UF4-40-1	818	611	1759,80	981,83	777,96	40	19,45	5,20	27,04	0,72	90,48
UF4-40-2	818	634	1759,80	1057,14	702,65	40	17,57	5,20	27,04	0,65	100,18
UF4-40-3	818	614	1759,80	991,50	768,30	40	19,21	5,20	27,04	0,71	91,62
UF4-50-1	822	574	1777,05	866,52	910,53	50	18,21	5,20	27,04	0,67	97,58
UF4-50-2	815	556	1746,91	813,10	933,81	50	18,68	5,20	27,04	0,69	93,54
UF4-50-3	818	551	1759,80	799,32	960,48	50	19,21	5,20	27,04	0,71	91,61
UF4-60-1	811	481	1729,81	607,70	1122,11	60	18,70	5,20	27,04	0,69	92,49
UF4-60-2	815	473	1746,91	587,44	1159,47	60	19,32	5,20	27,04	0,71	90,40
UF4-60-3	822	495	1777,05	643,15	1133,90	60	18,90	5,20	27,04	0,70	94,03
FF3-40-1	612	357	985,05	335,19	649,86	40	16,25	5,20	27,04	0,60	60,63
FF3-40-2	613	309	988,27	251,12	737,16	40	18,43	5,20	27,04	0,68	53,63
FF3-40-3	609	358	975,42	336,97	638,45	40	15,96	5,20	27,04	0,59	61,11
FF3-50-1	606	199	965,83	104,15	861,68	50	17,23	5,20	27,04	0,64	56,04
FF3-50-2	613	246	988,27	158,54	829,73	50	16,59	5,20	27,04	0,61	59,55
FF3-50-3	616	242	997,97	153,79	844,18	50	16,88	5,20	27,04	0,62	59,11
FF3-60-1	609	15	975,42	0,59	974,83	60	16,25	5,20	27,04	0,60	60,04
FF3-60-2	609	19	975,42	0,95	974,47	60	16,24	5,20	27,04	0,60	60,06
FF3-60-3	616	19	997,97	0,95	997,02	60	16,62	5,20	27,04	0,61	60,06
FF4-40-1	620	384	1010,97	388,56	622,41	40	15,56	5,20	27,04	0,58	64,97
FF4-40-2	611	367	981,83	354,67	627,16	40	15,68	5,20	27,04	0,58	62,62
FF4-40-3	609	328	975,42	282,99	692,43	40	17,31	5,20	27,04	0,64	56,35
FF4-50-1	623	243	1020,78	155,30	865,48	50	17,31	5,20	27,04	0,64	58,97
FF4-50-2	609	217	975,42	123,84	851,57	50	17,03	5,20	27,04	0,63	57,27
FF4-50-3	623	266	1020,78	185,98	834,80	50	16,70	5,20	27,04	0,62	61,14
FF4-60-1	609	61	975,42	9,79	965,63	60	16,09	5,20	27,04	0,60	60,61
FF4-60-2	616	132	997,97	46,01	951,96	60	15,87	5,20	27,04	0,59	62,90
FF4-60-3	616	0	997,97	0,00	997,97	60	16,63	5,20	27,04	0,62	60,00

Annexe E

Un exemple de notes de calculs est présenté dans cette annexe. Les notes sont présentées en anglais seulement. Le modèle de prédiction utilisé au Chapitre 3, le modèle Hwang et al. [55], présente de bonnes corrélations avec les essais de cette recherche. Toutefois, le modèle Mod. Hwang et al. [56] décrit de façon plus précise les énergies lors du processus de perforation du BFUP utilisé. Les deux modèles sont présentés par un exemple de calcul pour la série UF4-50. Les calculs ont été effectués avec la moyenne des résultats des panneaux testés à la même vitesse initiale, de même dosage de fibres et d'épaisseur similaire. Les résultats comparatifs entre les essais expérimentaux et les modèles original et modifié sont présentés au Tableau E-1.

Exemple de calcul pour le modèle de prédiction de Hwang et al. pour la série UF4-50

Definition of Material Parameters

$f'_c = 150'000'000 \text{ Pa}$	UHPFRC Compressive Strength
$\rho_c = 2450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	UHPFRC Density
$h = 0.05 \text{ m}$	Panel Thickness
$s_a = 0.0005 \text{ m}$	Maximum Size of Aggregate
$V_f = 0.04$	Fibre Dosage
$l_f = 0.01 \text{ m}$	Fibre Length
$d_f = 0.0002 \text{ m}$	Fibre Diameter

Definition of Projectile Parameters

<i>Sharp</i>	Nose Shape
$\tan(\theta_s) = 0.9$	Tan of average concrete cone angle. Value based on nose shape and existing results.
$\rho_p = 15700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Projectile Density (Tungsten Carbide)
$m = 0.00526 \text{ kg}$	Projectile Mass
$E_p = 6.825E + 11 \text{ Pa}$	Elastic Modulus of Projectile (Tungsten Carbide)
$v_{pi} = 818.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Initial Velocity of Projectile

$$v_{pf} = 560.4 \frac{m}{s}$$

Residual Velocity of Projectile

$$d = 0.0052 \text{ m}$$

Projectile diameter

$$E_K = \frac{m(v_{pi}^2 - v_{pf}^2)}{2}$$

$$= \frac{0.00526 \text{ kg} \left(\left(\frac{818.3 \text{ m}}{s} \right)^2 - \left(\frac{560.4 \text{ m}}{s} \right)^2 \right)}{2}$$

$$= 935.14 \text{ J}$$

Kinetic Energy Absorbed by Panel

Spalling Energy

Concrete Tensile Strength

$$f_t = 2.12 \ln(1 + 0.1(f'_c + 8))$$

$$f_t = 2.12 \ln(1 + 0.1(150 \text{ MPa} + 8))$$

$$f_t = 5.981 \text{ MPa}$$

Steel Fibre-Reinforced Concrete Tensile Strength

$$f_{ts} = f_t \left(1 + \frac{2 l_f}{3 d_f} V_f \right)$$

$$f_{ts} = 5.981 \text{ MPa} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{0.1}{0.0002} 0.04 \right)$$

$$f_{ts} = 13.96 \text{ MPa}$$

Strain Rate of Concrete

$$\dot{\epsilon}_c = \left(\frac{V_{pi}^2}{h} \right) \sqrt{\frac{\rho_p}{E_p}}$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\left(\frac{818.3 \frac{m}{s}}{0.05 \text{ m}} \right)^2}{\sqrt{6.825E + 11 \text{ Pa}}} \sqrt{\frac{15700 \frac{kg}{m^3}}{6.825E + 11 \text{ Pa}}}$$

$$\dot{\epsilon}_c = 2.031E + 03/s$$

Tensile Strength Depending on Strain Rate

Because $\varepsilon_c \geq 10/s$,

$$f_{td} = 0.0062 f_{ts} (10^6 \dot{\varepsilon})^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{td} = 0.0062 * 13960000 Pa (10^6 * 2.031E + 03)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{td} = 1.096E + 08 Pa$$

Coefficient Related to the Concrete Target Thickness

$$k_1 = 2.1 \left(\frac{h}{d} \right)^{0.3} - 1.75 \geq 0$$

$$k_1 = 2.1 \left(\frac{0.05m}{0.0052m} \right)^{0.3} - 1.75 \geq 0$$

$$k_1 = 2.391 \geq 0 \text{ OK}$$

Coefficient Related to the Steel Fiber Volume Ratio

$$k_2 = 1 - 0.025 V_f * 100$$

$$k_2 = 1 - 0.025 * 0.04 * 100$$

$$k_2 = 0.9$$

Coefficient Related to the Concrete Density

$$k_3 = 5.94 - \frac{2.1 \rho_c}{1000} \leq 1$$

$$k_3 = 5.94 - \frac{2.1 * 2450 kg/m^3}{1000} \leq 1$$

$$k_3 = 0.795 \leq 1 \text{ OK}$$

Coefficient Related to the Maximum Size of Aggregate

$$k_4 = \frac{0.23 s_a}{d} + 0.77 \geq 1$$

$$k_4 = \frac{0.23 * 0.0005m}{0.0052m} + 0.77 \geq 1$$

$$k_4 = 0.7921 \geq 1 \text{ No}$$

$$k_4 = 1$$

Allowable Spalling Depth

$$t_s = k_1 k_2 k_3 k_4 d \leq 0.5h$$

$$t_s = 2.391 * 0.9 * 0.795 * 1 * 0.0052 \leq 0.5 * 0.05m$$

$$t_s = 0.008896 m$$

Average Perimeter of the Concrete Cone

$$b_s = \pi * (d + 2t_s \tan \theta_s)$$
$$b_s = \pi * (0.0052 + 2 * 0.008896 * 0.9)$$
$$b_s = 0.06664 \text{ m}$$

Size Effect Factor

$$k_s = \left(\frac{300}{h}\right)^{0.25} \leq 1$$
$$k_s = \left(\frac{300}{50\text{mm}}\right)^{0.25} \leq 1$$
$$k_s = 1.565 \leq 1 \text{ No}$$
$$k_s = 1$$

Stress Concentration Factor

$$k_{bs} = 1.25$$

Resistance of the Concrete Cone

$$F_S = \left[f_{td} t_s b_s \tan \theta_s + f_{td} \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \right] (k_s k_{bs})$$
$$F_S = \left[1.906 \text{ E} + 08 * 0.008896 * 0.06664 * 0.9 + 1.906 \text{ E} + 08 \left(\frac{\pi 0.0052^2}{4} \right) \right] (1 * 1.25)$$
$$F_S = 76000 \text{ N}$$

Volume of the Idealized Concrete Cone

$$V_{SC} = (\pi t_s (4t_s^2 \tan^2 \theta_s + 6d t_s \tan \theta_s + 3d^2)) / 12$$
$$V_{SC} = (\pi * 0.008896 (4 * 0.008896^2 * 0.9^2 + 6 * 0.0052 * 0.008896 * 0.9 + 3 * 0.0052^2)) / 12$$
$$V_{SC} = 1.368 \text{ E} - 06 \text{ m}^3$$

Projected Area of the Idealized Concrete Cone

$$A_{SP} = 0.25\pi(d + 2t_s \tan \theta_s)^2$$
$$A_{SP} = 0.25\pi(0.0052 + 2 * 0.008896 * 0.9)^2$$
$$A_{SP} = 3.534 \text{ E} - 04 \text{ m}^2$$

Spalling Resistant Energy

$$E_S = F_S * V_{SC} / A_{SP}$$
$$E_S = 76000 * (1.368 \text{ E} - 06) / (3.534 \text{ E} - 04)$$
$$E_S = 294.1 \text{ J}$$

Tunneling Energy

Compressive Strength Depending on the Strain Rate

$$f'_{cd} = 0.012f'_c \left(\frac{10^5 \dot{\epsilon}}{3} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.012 * 150'000'000Pa \left(10^5 * \frac{2031}{3} \right)^{\frac{1}{3}} = 7.336E + 08Pa \text{ Since } \dot{\epsilon} \geq \frac{30}{s}$$

Nose Shape Factor of the Projectile

$$\varphi = 0.2 \text{ For Sharp Nose}$$

Allowable Tunneling Depth

$$t_t = h - t_s - t_c = 0.05 - 0.008896 * 2 = 0.03221 m$$

Tunneling Energy

$$E_T = \frac{4m}{\rho_a d} t_t (2.2\varphi \sqrt{f'_{cd}} = \frac{4 * 0.00526kg}{\frac{15700kg}{m^3} * 0.0052m} * 0.03221m * \sqrt{7.336E + 08Pa} = 0.09892J$$

Scabbing Energy

Tan. of Average Angle of Concrete Cone Surface

$$\tan \theta_c = 2.0 \text{ Regardless of Nose Shape}$$

Allowable Scabbing Depth

$$t_c = t_s = 0.008896 m$$

Tensile Strength Depending on the Strain Rate

$$f_{td} = 1.096E + 08Pa$$

Scabbing Energy

$$E_C = \frac{\pi}{12} f_{td} (4t_c^3 \tan^2 \theta_c + 6dt_c^2 \tan \theta_c + 3d^2 t_c) (k_s k_{bc})$$
$$E_C = \frac{\pi}{12} * 1.096E + 08 (4 * 0.008896^3 * 2^2$$
$$+ 6 * 0.0052 * 0.008896^2 * 2 + 3 * 0.0052^2 * 0.008896) (1 * 1.25)$$
$$E_C = 606.9J$$

$$E_R = E_S + E_T + E_C = 294.1J + 0.1J + 606.9J = 901.1J$$

Exemple de calcul pour le modèle de prédiction Mod. Hwang et al. pour la série UF4-50

Spalling Energy

Concrete Tensile Strength

$$f_t = 2.12 \ln(1 + 0.1(f'_c + 8))$$

$$f_t = 2.12 \ln(1 + 0.1(150 \text{ MPa} + 8))$$

$$f_t = 5.981 \text{ MPa}$$

Steel Fibre-Reinforced Concrete Tensile Strength

$$f_{ts} = f_t \left(1 + \frac{2}{3} \frac{l_f}{d_f} V_f \right)$$

$$f_{ts} = 5.981 \text{ MPa} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{0.1}{0.0002} 0.04 \right)$$

$$f_{ts} = 13.96 \text{ MPa}$$

Strain Rate of Concrete

$$\dot{\epsilon}_c = \left(\frac{V_{pi}^2}{h} \right) \sqrt{\frac{\rho_p}{E_p}}$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\left(818.3 \frac{m}{s} \right)^2}{0.05 m} \sqrt{\frac{15700 \frac{kg}{m^3}}{6.825E + 11 Pa}}$$

$$\dot{\epsilon}_c = 2.031E + 03/s$$

Tensile Strength Depending on Strain Rate

Because $\dot{\epsilon}_c \geq 10/s$,

$$f_{td} = 0.0062 f_{ts} (10^6 \dot{\epsilon})^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{td} = 0.0062 * 13960000 Pa (10^6 * 2.031E + 03)^{\frac{1}{3}}$$

$$f_{td} = 1.096E + 08 Pa$$

Coefficient Related to the Concrete Target Thickness

$$k_1 = 2.1 \left(\frac{h}{d} \right)^{0.3} - 1.75 \geq 0$$

$$k_1 = 2.1 \left(\frac{0.05m}{0.0052m} \right)^{0.3} - 1.75 \geq 0$$

$$k_1 = 2.391 \geq 0 \text{ OK}$$

Coefficient Related to the Steel Fiber Volume Ratio

$$k_2 = 1 - 0.025V_f * 100$$

$$k_2 = 1 - 0.025 * 0.04 * 100$$

$$k_2 = 0.9$$

Coefficient Related to the Concrete Density

$$k_3 = 5.94 - \frac{2.1\rho_c}{1000} \leq 1$$

$$k_3 = 5.94 - \frac{2.1 * 2450\text{kg}/\text{m}^3}{1000} \leq 1$$

$$k_3 = 0.795 \leq 1 \text{ OK}$$

Coefficient Related to the Maximum Size of Aggregate

$$k_4 = \frac{0.23s_a}{d} + 0.77 \geq 1$$

$$k_4 = \frac{0.23 * 0.0005\text{m}}{0.0052\text{m}} + 0.77 \geq 1$$

$$k_4 = 0.7921 \geq 1 \text{ No}$$

$$k_4 = 1$$

Allowable Spalling Depth

$$t_s = k_1 k_2 k_3 k_4 d \leq 0.5h$$

$$t_s = 2.391 * 0.9 * 0.795 * 1 * 0.0052 \leq 0.5 * 0.05\text{m}$$

$$t_s = 0.008896 \text{ m}$$

Radii of the Bottom Circle Surface of Cone

$$r_1 = \frac{d + 2t_s \tan \theta_s}{2} = \frac{0.0052 + 2 * 0.008896 * 0.9}{2} = 0.01061\text{m}$$

Radii of the Top Circle Surface of Cone

$$r_2 = \frac{d}{2} = \frac{0.0052}{2} = 0.0026\text{m}$$

Conventional Geometrical Equation for Lateral Cone Surface

$$A_1 = \pi(r_1 + r_2) \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + t_s^2}$$

$$A_1 = \pi(0.01061 + 0.0026) \sqrt{(0.01061 - 0.0026)^2 + 0.008896^2}$$

$$A_1 = 0.0004966\text{m}^2$$

Size Effect Factor

$$k_s = \left(\frac{300}{h}\right)^{0.25} \leq 1$$

$$k_s = \left(\frac{300}{50\text{mm}}\right)^{0.25} \leq 1$$

$$k_s = 1.565 \leq 1 \text{ No}$$

$$k_s = 1$$

Stress Concentration Factor

$$k_{bs} = 1.25$$

Resistance of the Concrete Cone

$$F_S = \left(A_1 + \frac{\pi d^2}{4}\right) f_{td} k_s k_{bs}$$

$$F_S = \left(0.0004966 + \pi * \frac{0.0052^2}{4}\right) 1.096E + 08 * 1 * 1.25$$

$$F_S = 70929N$$

Volume of the Idealized Concrete Cone

$$V_{SC} = (\pi t_s (4t_s^2 \tan^2 \theta_s + 6dt_s \tan \theta_s + 3d^2))/12$$

$$V_{SC} = (\pi * 0.008896(4 * 0.008896^2 * 0.9^2 + 6 * 0.0052 * 0.008896 * 0.9 + 3 * 0.0052^2))/12$$

$$V_{SC} = 1.368 E - 06 m^3$$

Projected Area of the Idealized Concrete Cone

$$A_{SP} = 0.25\pi(d + 2t_s \tan \theta_s)^2$$

$$A_{SP} = 0.25\pi(0.0052 + 2 * 0.008896 * 0.9)^2$$

$$A_{SP} = 3.534 E - 04 m^2$$

Spalling Resistant Energy

$$E_S = F_S * V_{SC} / A_{SP}$$

$$E_S = 70929 * (1.368E - 06) / (3.534E - 04)$$

$$E_S = 274.5J$$

Tunneling Energy

Se référer à aux calculs de la section précédente pour le modèle de prédiction non-modifié, aucun changement n'est apporté à ce modèle modifiée.

Scabbing Energy

Tangent of Average Angle of Concrete Cone Surface

$$\tan \theta_c = 2.0 \text{ **Regardless of Nose Shape**}$$

Allowable Scabbing Depth

$$t_c = t_s$$

Volume of Idealized Concrete Cone

$$V_{CC} = (\pi t_c (4t_c^2 \tan^2 \theta_c + 6d t_c \tan \theta_c + 3d^2))/12$$

$$V_{CC} = (\pi * 0.008896 (4 * 0.008896^2 * 2^2 + 6 * 0.0052 * 0.008896 * 2 + 3 * 0.0052^2))/12$$

$$V_{CC} = 4.431E - 06 \text{ m}^3$$

Projected Area of the Idealized Concrete Cone

$$A_{CP} = 0.25\pi(d + 2t_c \tan \theta_c)^2$$

$$A_{CP} = 0.25\pi(0.0052 + 2 * 0.008896 * 2)^2$$

$$A_{CP} = 0.001306 \text{ m}^2$$

Radii of the Bottom Circle Surface of Cone

$$r_1 = \frac{d + 2t_c \tan \theta_c}{2} = \frac{0.0052 + 2 * 0.008896 * 2}{2} = 0.02039 \text{ m}$$

Radii of the Top Circle Surface of Cone

$$r_2 = \frac{d}{2} = \frac{0.0052}{2} = 0.0026 \text{ m}$$

Conventional Geometrical Equation for Lateral Cone Surface

$$A_1 = \pi(r_1 + r_2) \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + t_s^2}$$

$$A_1 = \pi(0.02039 + 0.0026) \sqrt{(0.02039 - 0.0026)^2 + 0.008896^2}$$

$$A_1 = 0.001437 \text{ m}^2$$

Resistance of the Concrete Cone

$$F_C = \left(A_1 + \frac{\pi d^2}{4} \right) f_{td} k_s k_{bc}$$

$$F_C = \left(0.001437 + \pi * \frac{0.0052^2}{4} \right) 1.096E + 08 * 1 * 1.25$$

$$F_C = 199732 \text{ N}$$

Scabbing Resistant Energy

$$E_C = F_C * V_{CC} / A_{CP}$$

$$E_C = 199732 * (4.431E - 06) / (1.306E - 03)$$

$$E_C = 677.4J$$

$$E_R = E_S + E_T + E_C = 274.5J + 0.1J + 677.4J = 952.0J$$

Tableau E-1 : Résultats comparatifs des essais expérimentaux et du modèle de prédiction Hwang et al. [55] et Mod. Hwang et al. [56]

Série	m Noyau kg	v_i Noyau m/s	v_f Noyau m/s	t Panneau m	E_K Noyau J	E_R Résistance J	Mod. E_R* Résistance J	Difference Hwang et al. %	Difference* Mod. Hwang et al. %
UF3-40	0,00526	813,0	632,0	40,0	687,9	655,5	694,7	4,8	1,0
UF3-50	0,00526	816,5	562,0	50,0	922,7	827,8	873,7	10,8	5,5
UF3-60	0,00526	814,0	492,0	60,0	1106,0	989,9	1041,5	11,1	6,0
UF4-40	0,00526	818,0	619,7	40,0	749,9	716,3	760,0	4,6	1,3
UF4-50	0,00526	818,3	560,4	50,0	935,2	901,2	952,1	3,7	1,8
UF4-60	0,00526	816,0	482,6	60,0	1138,7	1076,9	1134,1	5,6	0,4
FF3-40	0,00526	611,3	341,3	40,0	676,5	542,0	574,5	22,1	16,3
FF3-50	0,00526	611,7	267,5	50,0	795,8	682,8	720,7	15,3	9,9
FF3-60	0,00526	611,3	17,7	60,0	982,1	817,9	860,6	18,2	13,2
FF4-40	0,00526	613,3	359,9	40,0	648,7	591,2	627,2	9,3	3,4
FF4-50	0,00526	618,3	242,0	50,0	851,6	747,6	789,8	13,0	7,5
FF4-60	0,00526	613,7	64,4	60,0	979,5	890,6	937,9	9,5	4,3

*Modèle modifié

Annexe F

Afin de caractériser le comportement du BFUP sous un impact à haute vitesse, un modèle numérique a été développé. Le modèle a été développé principalement suivant les essais expérimentaux. Aucun modèle similaire ne fut composé auparavant au Collège militaire royal du Canada. Le logiciel ANSYS R18.2 a été utilisé pour ce projet. La composante Autodyn a été sélectionnée afin de produire le modèle. Tel indiqué au Chapitre 2 et au Chapitre 3, Autodyn est spécialement conçu pour la modélisation de problèmes soumis à des impacts de haute vitesse et de déformations extrêmes. Cette annexe présente les étapes de conception pour le modèle numérique : paramètres sélectionnés, la géométrie, l'utilisation de SPH, et les propriétés des matériaux.

Paramètres du modèle

La première étape à effectuer est d'établir la symétrie du problème. En effet, afin de réduire le temps d'analyse et le poids du fichier, un problème en 2D avec une symétrie à l'axe est l'option optimale. Sous l'onglet *Setup* dans la barre des tâches au haut de la fenêtre, sélectionner *Symmetry*, puis choisir 2D et axial.

Ensuite, sous l'option *Controls* dans la barre des tâches à la gauche de la fenêtre, les critères d'analyse sont déterminés : soit le nombre limite de cycles, le temps limite d'analyse, le taux d'erreur acceptable d'énergie, et le cycle de référence d'énergie. Le Tableau F-1 montre les critères sélectionnés pour le modèle. La limite de cycles doit être grande, afin d'assurer que le projectile traverse complètement la cible. Le temps limite a été calculé en fonction de la vitesse initiale du projectile et de la distance à parcourir. Le cycle de référence d'énergie a une grande valeur, étant donné la nature de l'impact, où grand nombre d'éléments sont projetés.

Tableau F-1 : Setup - Controls - Wrapup Criteria for Autodyn Model

Critère	Valeur
Cycle Limit	999999
Time Limit (ms)	2
Energy Fraction	0.05
Energy Ref. Cycle	999999*

*Grande valeur afin de permettre une plus grande marge d'erreur dans les équations d'énergie du logiciel. Cette mesure est nécessaire due au type d'impact.

Géométrie

Le modèle est composé de trois parties : le panneau, le noyau et la chemise. D'abord, seulement le panneau de 60mm a été dimensionné sur les trois épaisseurs étudiées. Une hauteur de 100mm a été sélectionnée pour le modèle. Cette hauteur est plus petite que celle des spécimens, car les efforts sont concentrés dans la région de l'impact. Pour la géométrie du noyau, un noyau réel intact a été mesuré afin de reproduire les mêmes dimensions. Pour la chemise, des approximations ont été adoptées étant donné qu'elle n'a pas la résistance suffisante pour perforer complètement le panneau. Les dimensions du panneau, du noyau, et de la chemise sont présentées à la Figure F-1. (Note : Dimensions à la main étant donné la crise pandémique 2020.)

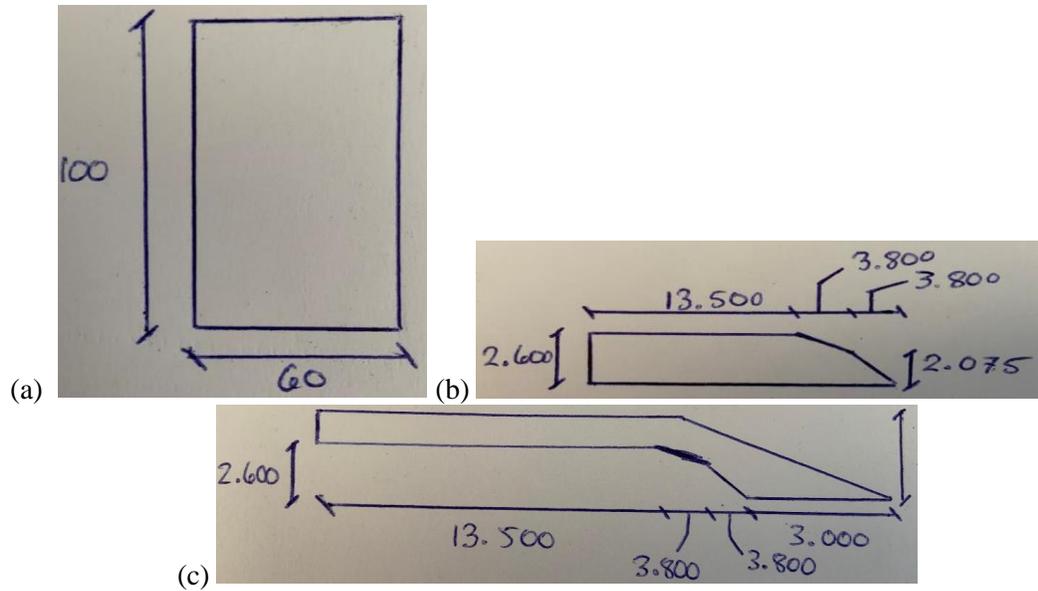


Figure F-1 : Dimensions du (a) Panneau, (b) Noyau et (c) Chemise

Maillage (*Mesh*) et Conditions Initiales

La composante Autodyn permet plusieurs types de *Mesh* pour des modèles numériques. Chacun ayant leurs spécialités, leurs avantages et leurs désavantages. Afin de modéliser un comportement à la fois fragile et ductile d'un matériau, l'utilisation de SPH était la meilleure solution. Ces éléments permettent une érosion plus facile et l'effet de fissuration est nettement observable. Le Tableau F-2 présente le nombre d'éléments utilisés pour les géométries, ainsi que les informations pour le modèle de solution. De plus, la taille des éléments SPH était de 3mm, valeur proposée par la littérature [43]. De plus, une condition de support fixe a été appliquée au haut du panneau avec un outil de conditions limites libre.

Tableau F-2 : Informations utiles pour le maillage et critère de solution

SPH		Nombre d'éléments
Panneau		66600
Chemise		276 (Vitesse initiale de 815 m/s)
Noyau		531 (Vitesse initiale de 815 m/s)
SOLVER		-
Smoothing Length		Constant
Interface Treatment		None

Propriétés des matériaux

Les caractéristiques des matériaux utilisées pour le modèle proviennent de la littérature, de caractéristiques déjà établies par ANSYS, et de valeurs obtenues par des essais de caractérisation de cette présente recherche. Les valeurs sélectionnées pour le développement du modèle sont présentées au Tableau F-3.

Tableau F-3 : Propriétés des matériaux utilisées dans le modèle numérique

Material Name - BRASS

Equation of State	Shock
Reference density	8.45000E+00 (g/cm ³)
Gruneisen coefficient	2.04000E+00 (none)
Parameter C1	3.72600E+03 (m/s)
Parameter S1	1.43400E+00 (none)
Parameter Quadratic S2	0.00000E+00 (s/m)
Relative volume, VE/V0	0.00000E+00 (none)
Relative volume, VB/V0	0.00000E+00 (none)
Parameter C2	0.00000E+00 (m/s)
Parameter S2	0.00000E+00 (none)
Reference Temperature	0.00000E+00 (K)
Specific Heat	0.00000E+00 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	None
Failure	None
Erosion	Geometric Strain
Erosion Strain	1.50000E+00 (none)
Type of Geometric Strain	Instantaneous
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniot

Material Name - CONC140MPA

Equation of State	P alpha
Reference density	2.45000E+00 (g/cm3)*
Porous density	2.28000E+00 (g/cm3)**
Porous soundspeed	3.45000E+03 (m/s)**
Initial compaction pressure	2.00000E+04 (kPa)
Solid compaction pressure	6.00000E+06 (kPa)
Compaction exponent	3.00000E+00 (none)
Solid EOS	Polynomial
Bulk Modulus A1	3.52700E+07 (kPa)
Parameter A2	3.95800E+07 (kPa)
Parameter A3	9.04000E+06 (kPa)
Parameter B0	1.22000E+00 (none)
Parameter B1	1.22000E+00 (none)
Parameter T1	3.52700E+07 (kPa)
Parameter T2	0.00000E+00 (kPa)
Reference Temperature	3.00000E+02 (K)
Specific Heat	6.54000E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Compaction Curve	Standard
Strength	RHT Concrete
Shear Modulus	2.20600E+07 (kPa)
Compressive Strength (fc)	1.50000E+05 (kPa)***
Tensile Strength (ft/fc)	1.00000E-01 (none)
Shear Strength (fs/fc)	1.80000E-01 (none)
Intact Failure Surface Constant A	1.60000E+00 (none)
Intact Failure Surface Exponent N	6.10000E-01 (none)
Tens./Comp. Meridian Ratio (Q)	6.80500E-01 (none)
Brittle to Ductile Transition	1.05000E-02 (none)
G (elas.)/(elas.-plas.)	2.00000E+00 (none)
Elastic Strength / ft	7.00000E-01 (none)
Elastic Strength / fc	5.30000E-01 (none)
Fractured Strength Constant B	1.60000E+00 (none)
Fractured Strength Exponent M	6.10000E-01 (none)
Compressive Strain Rate Exp. Alpha	9.09000E-03 (none)
Tensile Strain Rate Exp. Delta	1.25000E-02 (none)
Max. Fracture Strength Ratio	1.00000E+20 (none)
Use CAP on Elastic Surface?	Yes
Failure	RHT Concrete
Damage Constant, D1	4.00000E-02 (none)
Damage Constant, D2	1.00000E+00 (none)
Minimum Strain to Failure	1.00000E-02 (none)
Residual Shear Modulus Fraction	1.30000E-01 (none)

Tensile Failure	Hydro (Pmin)
Erosion	Geometric Strain
Erosion Strain	1.50000E+00 (none)
Type of Geometric Strain	Instantaneous
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	Riedel et al."Penetration of Reinforced Concrete" ISIEMS'99 pp315. Riedel W. "Beton unter dynamischen Lasten" Ed. Fraunhofer EMI, IRB-Verlag, 2004, ISBN 3-8167-6340-5. Riedel, et al. "Numerical Assessment for Impact Strength" IJIE 36 (2009) pp283.

Material Name - TUNG.ALLOY

Equation of State	Shock
Reference density	1.70000E+01 (g/cm ³)
Gruneisen coefficient	1.54000E+00 (none)
Parameter C1	4.02900E+03 (m/s)
Parameter S1	1.23700E+00 (none)
Parameter Quadratic S2	0.00000E+00 (s/m)
Relative volume, VE/V0	0.00000E+00 (none)
Relative volume, VB/V0	0.00000E+00 (none)
Parameter C2	0.00000E+00 (m/s)
Parameter S2	0.00000E+00 (none)
Reference Temperature	3.00000E+02 (K)
Specific Heat	1.34000E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs)
Strength	Johnson Cook
Shear Modulus	2.50000E+08 (kPa)
Yield Stress	1.50600E+06 (kPa)
Hardening Constant	1.77000E+05 (kPa)
Hardening Exponent	1.20000E-01 (none)
Strain Rate Constant	1.60000E-02 (none)
Thermal Softening Exponent	1.00000E+00 (none)
Melting Temperature	1.72300E+03 (K)
Ref. Strain Rate (/s)	1.00000E+00 (none)
Strain Rate Correction	1st Order
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansion	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s)
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)
Reference:	LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniots: EOS 7th Int. Symp. Ballistics. Johnson & Cook

*Valeur de KING Industries **Source spécifiée non valide.**

**Valeur de la littérature [43]

***Selon essais de caractérisation en compression uniaxiale.

CURRICULUM VITÆ

Nom complet :	Jeremy Serge Tremblay
Éducation post-secondaire	Collège militaire royal de Saint-Jean-sur-Richelieu (2013-2015) Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec DEC en Sciences de la nature (2015) Collège militaire royal du Canada (2015-2018) Kingston, Ontario B. Ing. en génie civil (2018)
Expérience militaire	Sans objet