

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité

Ashrafi, Behnam; Labonté, Sylvain; Baillargeon, Yves; Li, Chun; Baird, Wayne; Mandache, Catalin; Bell, LCol Ron; McArthur, Marc; Bolster, Alan; McNeil, Major Mark; Brady, Brenda; Merati, Ali; Bujold, Alain; Nandlall, Dennis; Dionne, Jean-Philippe; Rahmat, Meysam; Fraser, David; Vuong, Jennifer; Homenick, Christa; Williams, Kevin; Jakubinek, Michael; Zhang, Yunfa; Kempston, James; Comité directeur de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité; Conseil national de recherches Canada. Programme technologies des matériaux de sécurité; Recherche et développement pour la défense Canada

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40001464>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=9ad4f4a8-dd84-405d-bfe1-21f4e246d494>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=9ad4f4a8-dd84-405d-bfe1-21f4e246d494>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité

Rapport synthèse préparé par le Comité directeur de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité, le programme Technologies des matériaux de sécurité du Conseil national de recherches du Canada et Recherche et développement pour la défense Canada

Rédacteurs

Andrew Johnston, Ph. D.
Responsable de programme, Technologies des matériaux de sécurité
Conseil national de recherches du Canada

Kevin Williams, Ph. D.
Conseiller scientifique, Programme de S-T sur le soldat
Recherche et développement pour la défense Canada

Alan Bolster
Chef, Relations avec la clientèle
Conseil national de recherches du Canada

Andrew Plater
Directeur de programme, Systèmes de combat terrestres
Recherche et développement pour la défense Canada

Marc McArthur
Conseiller du Réseau d'innovation
Conseil national de recherches du Canada

Collaborateurs

Behnam Ashrafi, CNRC	Sylvain Labonté, CNRC
Yves Baillargeon, RDDC	Chun Li, CNRC
Wayne Baird, CNRC	Catalin Mandache, CNRC
Lieutenant-colonel Ron Bell, FAC	Marc McArthur, CNRC
Alan Bolster, CNRC	Major Mark McNeil, FAC
Brenda Brady, CNRC	Ali Merati, CNRC
Alain Bujold, Mawashi Science and Technology	Dennis Nandlall, RDDC
Jean-Philippe Dionne, Med-Eng	Meysam Rahmat, CNRC
David Fraser, Inkas	Alexandra Sirois, RDDC
Christa Homenick, CNRC	Geneviève Toussaint, RDDC
Michael Jakubinek, CNRC	Jennifer Vuong, CNRC
James Kempston, Morgan Advanced Materials	Kevin Williams, RDDC
	Yunfa Zhang, CNRC

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
RÉSUMÉ	2
PROCESSUS DE LA CARTE TECHNOLOGIQUE DU CANADA SUR LES MATÉRIAUX DE SÉCURITÉ	3
Contexte.....	3
Gouvernance.....	4
Processus de la carte technologique et de l'atelier.....	5
CARTES TECHNOLOGIQUES SUR LES TECHNOLOGIES DES MATÉRIAUX DE SÉCURITÉ.	7
Mode d'établissement de la carte technologique.....	7
Point de départ d'une initiative permanente.....	8
Blindage de véhicules.....	8
Équipement de protection individuelle.....	11
ÉTAT DU MARCHÉ ET DU SECTEUR	14
Environnement de la sécurité de l'avenir.....	14
Le marché de la défense.....	15
Marché de la protection des forces.....	17
Industries canadiennes de la défense et de la sécurité.....	18
Véhicules blindés et équipement de protection individuelle.....	19
Dépenses mondiales de recherche et de développement.....	20
Besoins futurs de capacités en matière de blindage de véhicules.....	21
Incidence de la menace sur les solutions potentielles.....	22
Besoins à venir de capacités de l'équipement de protection individuelle.....	24
Nature de la menace.....	24
Environnement opérationnel et exigences opérationnelles.....	25
Intégration de la protection à d'autres fonctions.....	26
Facteurs humains.....	27
PRODUITS/CATÉGORIES DE PRODUITS	29
Blindage de véhicules.....	29
Équipement de protection individuelle.....	31

DÉFIS TECHNIQUES	33
Allègement	33
Développement d'outils de modélisation	33
Amélioration de l'ingénierie des facteurs humains	33
Quantification et conception pour contrer des menaces multiples	34
Disponibilité de solutions sur le plan des matériaux	34
Réduction des coûts	34
Amélioration du rendement	34
Développement de procédés de fabrication de pointe	35
Améliorer/ permettre l'intégration	35
Caractérisation multiéchelle des matériaux	35
Matériaux à usages multiples	36
SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES	37
Technologies de fabrication – Projection d'oxycombustibles à vitesse élevée (HVOF), pulvérisation à froid et fabrication additive	37
Caractérisation et essais	39
Modélisation et simulation	42
Polymères et adhésifs	44
Céramiques	47
Gestion du cycle de vie et évaluations non destructives	49
Nanomatériaux	52
Matériaux composites	54
Fabrication de matériaux composites	56
Revêtements	58
DOMAINES DE RECHERCHE PRIORITAIRES	61
RESSOURCES	62
Programme d'innovation Construire au Canada	62
Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie	62

CanmetLCRE.....	62
Automobile et transport de surface du CNRC.....	63
Programme Recherche scientifique et développement expérimental.....	63
Réseau de recherche sur les matériaux composites de l'Université de la Colombie-Britannique.....	63
Programme d'aide à la recherche industrielle du CNRC.....	63
Initiative stratégique pour l'aérospatiale et la défense.....	64
MITACS.....	64
RECOMMANDATIONS.....	65
ANNEXE A : MEMBRES DU COMITÉ DIRECTEUR.....	66
ANNEXE B : PROGRAMME DE L'ATELIER CTCMS.....	68
ANNEXE C : ACCÈS AUX PRÉSENTATIONS SUR L'ICEE.....	71
ANNEXE D : GLOSSAIRE.....	72
ANNEXE E : BIBLIOGRAPHIE.....	73

Remerciements

Le Comité directeur de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité, le Conseil national de recherches du Canada et Recherche et développement pour la défense Canada désirent remercier les personnes suivantes pour leur contribution à la rédaction du présent rapport :

Lieutenant-colonel Ron Bell
Major Brian Corbett
John Disano
Jean-Philippe Ethier
Chris Fitzgerald
Mariane Huard
Major Edward Jun
Tamara Keating
Christopher Kingston
Vladimir Krstic
Sylvain Labonté
Vlad Lacuta
Jason Lo
Ted Maciuba
Major Mark McNeil
Robert Murray
Karl Pfister
Sergent Dave Radu
Duncan Stewart
Eddie Terrenzi
David Trudel-Boucher
Pierre Vallée
Annie Villeneuve
Jennifer Vuong
Arnold Wong

Résumé

Le secteur canadien des véhicules blindés (VB) et de l'équipement de protection individuelle (EPI) est très concurrentiel à l'échelle mondiale. Actuellement, il table surtout sur des matériaux conventionnels comme les tissus aramides (par exemple, le Kevlar®), les composites à matrice polymère et les céramiques monolithiques, soit autant de matériaux qui s'approchent rapidement des limites de leur rendement possible. Même si l'on continue d'enregistrer des progrès, le rythme de développement de ces matériaux est relativement lent comparativement à la rapide évolution de la demande de systèmes de protection plus performants et plus légers. De nouvelles technologies transformationnelles doivent être développées pour améliorer le ratio poids-rendement des blindages (protection obtenue pour un poids donné) et pour combler les lacunes de capacité cernées par les communautés d'utilisateurs (militaires, forces de l'ordre et premiers répondants).

Le programme Technologies des matériaux de sécurité (TMS), dirigé conjointement par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) [conseillé par un Comité directeur composé de pairs du secteur canadien du blindage], collabore actuellement avec des entreprises de l'ensemble de la chaîne de valeur afin de mettre au point des matériaux nouveaux et émergents susceptibles d'être intégrés aux systèmes de blindage. Le but est de démontrer l'efficacité de nouveaux matériaux, de nouveaux concepts de structures et de technologies de fabrication transformationnelles qui amélioreront substantiellement le ratio poids-rendement des systèmes de protection des VB et de l'EPI et de les transférer à l'industrie canadienne. Le CNRC et RDDC possèdent tous les deux de l'expérience dans le développement de matériaux à haut rendement et de systèmes de protection pouvant répondre à des menaces multiples. Ce programme peut contribuer au développement de produits de blindage améliorés, voire même en en complète rupture des technologies existantes (et ce du concept initial jusqu'au prototype grandeur réel, incluant son évaluation) et peut aussi offrir des conseils techniques et des services d'experts-conseils susceptibles d'accélérer le développement des produits et d'atténuer substantiellement les risques connexes.

En novembre 2015, le CNRC, RDDC et l'Association des industries canadiennes de défense et de sécurité (AICDS) ont tenu un atelier sur la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité (CTCMS). Cette carte est issue d'un processus de planification stratégique dirigé par l'industrie et a été conçue pour favoriser le développement de produits et systèmes novateurs destinés à répondre aux exigences futures du marché. Des participants du Canada et des États-Unis ont ainsi eu l'occasion d'approfondir leur connaissance des difficultés et des besoins actuels du ministère de la Défense nationale du Canada et des Forces armées canadiennes, et de participer à des discussions dirigées sur les besoins futurs du marché.

La CTCMS comme telle expose en détail les conclusions de l'atelier. Avec la contribution du Comité directeur de la CTCMS, 11 défis techniques et 9 solutions technologiques dans le domaine des matériaux de pointe ont été définis. Quarante-quatre (44) propositions de projets ont été répertoriées et ont servi d'assise pour choisir quatre grands domaines de recherche prioritaires. Les projets sélectionnés appuient les objectifs du programme TMS de mieux harmoniser les dépenses publiques consacrées à la R-D au Canada avec les besoins de l'industrie et ceux des marchés de demain, et d'établir des partenariats et des alliances dans le but de créer des opportunités susceptibles de bénéficier à tous les acteurs du marché.

Les occasions de maillage et de discussions ouvertes entre les acteurs du secteur de la défense et de la sécurité et les acteurs du secteur des technologies de matériaux représentent sans doute l'avantage qu'ont le plus apprécié les participants à l'atelier sur la CTCMS. L'information partagée dans le cadre de cet atelier ouvrira sans doute la porte au développement de solutions technologiques conçues au Canada et à la fine pointe du progrès dans le domaine du blindage.

Processus de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité

Contexte

L'établissement d'une carte technologique est une méthode éprouvée et efficace pour convaincre les acteurs du marché à s'engager dans un processus de collaboration qui mène à la l'établissement des priorités scientifiques et technologiques et au développement des projets de recherche et de développement (R-D) qui permettent de les atteindre. Ce processus d'établissement d'une carte technologique s'appuie sur la participation active d'entreprises canadiennes et des autres acteurs du secteur qui en deviennent ensuite les bénéficiaires.

Le processus de la carte routière technologique n'est en rien apparenté à un processus d'achat et il n'appuie pas non plus directement une quelconque activité d'approvisionnement de l'État. Il vise plutôt à mobiliser l'industrie et les autres acteurs du secteur afin d'obtenir leurs commentaires, conseils et recommandations sur l'orientation stratégique du programme Technologies des matériaux de sécurité (TMS) et du secteur des matériaux de sécurité en général (voir Figure 1).

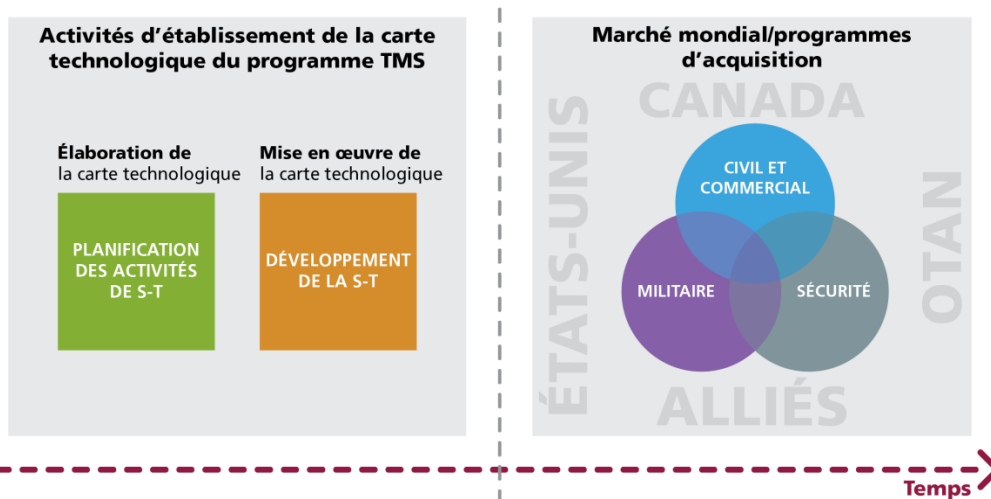


Figure 1 : CTCMS et approvisionnement

L'établissement de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité (CTCMS) est un processus libre, volontaire et non contraignant ouvert aux entreprises canadiennes (qui exercent des activités au Canada) et aux autres parties activement engagées dans le secteur de la défense et celui de la sécurité et aucune appartenance à une quelconque association n'est exigée. Le processus est fondé sur le respect mutuel et la compréhension par les participants de leurs forces, structures organisationnelles, mandats et capacités respectifs.

La CTCMS accélérera l'innovation, et accroîtra la compétitivité et la productivité dans le secteur canadien des technologies des matériaux de sécurité. Grâce à elle, les entreprises comprendront mieux les besoins du marché, ce qui les aidera à adapter plus efficacement leurs stratégies de R-D et de commercialisation. En collaborant avec le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), les entreprises pourront faire la preuve de leurs capacités à des utilisateurs potentiels, trouver de nouveaux partenaires d'affaires et de recherche stratégiques et se positionner comme des chefs de file sur le marché mondial.

Gouvernance

Le programme Technologies des matériaux de sécurité est régi par la Commission mixte sur le blindage CNRC-RDDC et est appuyé par le CNRC et Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) sous la direction du Comité directeur de la CTCMS, du ministère de la Défense nationale (MDN) et des Forces armées canadiennes (FAC) (voir Figure 2).

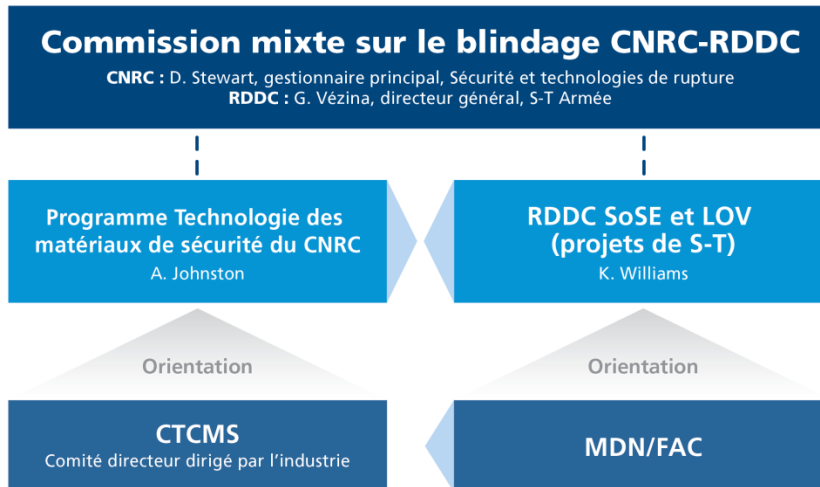


Figure 2 : Commission mixte sur le blindage CNRC-RDDC

Le Comité directeur de la CTCMS (voir [annexe A : Membres du Comité directeur de la CTCMS](#)) est constitué de chefs de file du secteur de la défense et de la sécurité, d'experts en la matière et de parties intéressées qui jouent un rôle crucial dans le recensement des activités axées sur le secteur des technologies des matériaux de sécurité. Les membres du Comité mettent à contribution leur expertise en recherche et développement technologique sur les matériaux de sécurité tels qu'appliqués à la prochaine génération d'équipement de protection individuelle (EPI) et de blindages pour véhicules. Les membres en ont été sélectionnés en fonction du mérite de leurs demandes présentées en réponse à un processus ouvert qui a été annoncé en 2014 et 2015 sur le site Achatsetventes.gc.ca.

Le Comité directeur encadre l'ensemble de l'initiative de la CTCMS et exerce le leadership nécessaire à l'établissement de la carte technologique. Voici quelles sont ses responsabilités :

- Il contribue à l'orientation et à l'établissement des objectifs de la CTCMS.
- Il approuve le plan de travail, les objectifs et l'échéancier proposés.
- Il participe activement à chaque étape du processus d'élaboration de la carte technologique et contribue aux discussions techniques.
- Il s'efforce de formuler des recommandations consensuelles s'appuyant sur les meilleures preuves disponibles ainsi que sur des pratiques exemplaires.
- Il recommande des stratégies de mise en œuvre appropriées, en s'appuyant notamment sur d'autres initiatives ou sur la participation d'autres acteurs du secteur.
- Il révisé et valide la documentation produite tout au long du processus, notamment les rapports d'ateliers.

- Il favorise des discussions efficaces, ouvertes, transparentes et équitables.
- Il encourage les échanges d'information entre les participants au processus d'établissement de la CTCMS.
- Il agit en champion de la CTCMS auprès des employeurs et dans l'ensemble de l'industrie.
- Il produit des rapports sur l'avancement des travaux à la Commission mixte sur le blindage CNRC-RDDC (voir Figure 2).

Processus de la carte technologique et de l'atelier

L'atelier sur la CTCMS, animé par le CNRC et RDDC en partenariat avec l'AICDS, est un exercice de collaboration auquel ont participé des représentants de l'industrie canadienne, du gouvernement et des milieux universitaires. Regroupant 130 représentants d'entreprises canadiennes et américaines, chercheurs, ingénieurs, représentants des communautés d'utilisateurs et décideurs gouvernementaux, l'atelier de deux jours a donné à tous des occasions de maillage, a facilité les discussions entre chefs de file de l'industrie et, au bout du compte, a posé les bases d'une collaboration future.

La CTCMS contribue à la définition des besoins du marché en matière d'EPI et de blindage de véhicule, favorise les discussions sur les difficultés technologiques et définit des projets de R-D ayant une valeur pour le secteur canadien des matériaux de sécurité et qui devraient permettre de répondre aux besoins que le marché aura dans 5 à 15 ans (voir Figure 3).

Les acteurs comprennent maintenant mieux les besoins à venir du marché et les possibilités qui s'offrent à eux, et ils sont mieux préparés à développer des options technologiques pour répondre à ces besoins futurs au sein du secteur de la défense et de la sécurité.



Figure 3 : Illustration du processus de l'atelier sur la CTCMS

L'atelier sur la CTCMS s'est déroulé en quatre phases. Les trois premières portaient chacune sur un aspect différent de la carte technologique :

- 1) besoins futurs du marché (horizons de 5, 10 et 15 ans);
- 2) concepts, produits, systèmes et sous-systèmes;
- 3) technologies.

La quatrième phase visait à intégrer le tout et à établir les liens entre les différents éléments apportés aux tables de discussion. Elle a permis de définir et prioriser les projets de R-D auxquels des ressources et des efforts de R-D devraient être consacrés (y compris les capacités de recherche du CNRC. (Voir [annexe B : Programme de l'atelier de la CTCMS](#)).

Des échanges très ouverts ont permis aux acteurs participants de définir des options technologiques novatrices reliées aux besoins futurs du marché des matériaux de sécurité et aux demandes concurrentes, comme l'illustre la Figure 4. Ce processus a également facilité l'établissement de synergies entre les participants et les autres entités associées ou intéressées.

Exercice d'équilibre

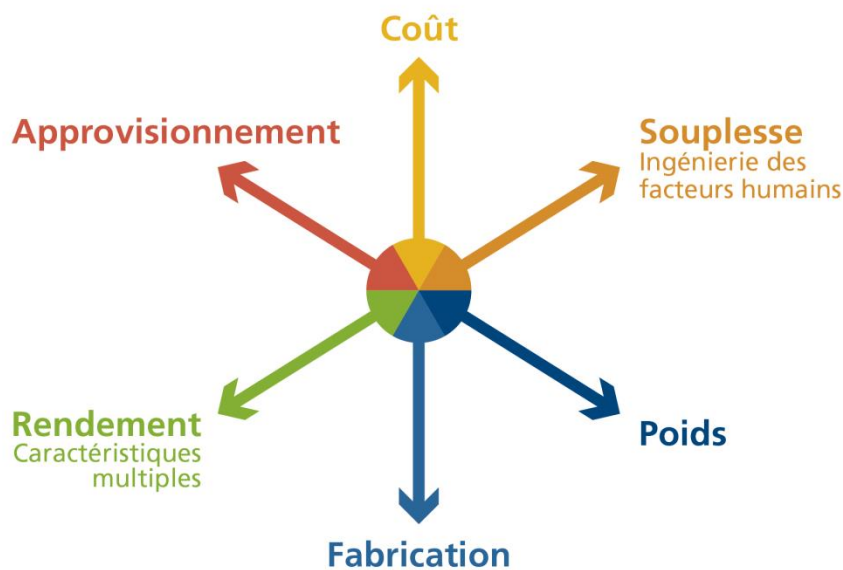


Figure 4 : Facteurs influant sur le développement de nouvelles technologies et solutions dans le secteur de la défense et de la sécurité

Cartes technologiques sur les technologies des matériaux de sécurité

La CTCMS est décrite dans la présente section. Elle a été définie en fonction de trois horizons temporels (les colonnes) : du moment présent à 2020, de 2020 à 2025, et de 2025 à 2040 et au-delà. Elle est aussi répartie en six volets (les rangées) : Marché, Exigences liées aux produits/systèmes; Défis techniques, Solutions technologiques, Projets de recherche et de développement, et Ressources.

Une version de la carte a été établie pour les blindages de véhicule (pages 8 à 10) et une autre pour l'EPI (pages 11 à 13). Afin de pouvoir être intégrée au présent rapport, la carte technologique a été divisée en sections pouvant figurer sur une seule page. On peut cependant la consulter dans son entièreté sur le site Web de la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité (www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/collaboration/ctcms.html). La carte technologique, telle qu'elle est présentée dans le présent rapport, se veut surtout un outil permettant de poursuivre le dialogue et favoriser les collaborations futures. Les données incluses dans le présent rapport ont été obtenues auprès d'experts et sont telles que collectées durant l'atelier sur la CTCMS. Mais elles vont continuer à évoluer en même temps que la carte routière évolue et se raffine.

Mode d'établissement de la carte technologique

À l'intérieur de chaque **horizon temporel**, certaines forces et certains phénomènes influent sur le **marché** du blindage de véhicule et de l'EPI, comme par exemple la nature changeante des conflits et des menaces qui en découlent, le développement de nouvelles technologies d'armement et de blindage, et les tendances en matière d'approvisionnement ainsi que les besoins des forces alliées et non alliées. Une série d'**exigences liées aux produits et systèmes** pour le blindage des véhicules et l'EPI émergent en réaction directe à ces conditions du marché. Par exemple, l'exigence d'une modularité accrue et d'une plus grande interopérabilité dans les systèmes de blindage pourrait résulter directement d'une augmentation des opérations conjointes avec d'autres pays (par exemple, missions de l'OTAN) ou de contraintes financières auxquelles font face les acheteurs de ces systèmes.

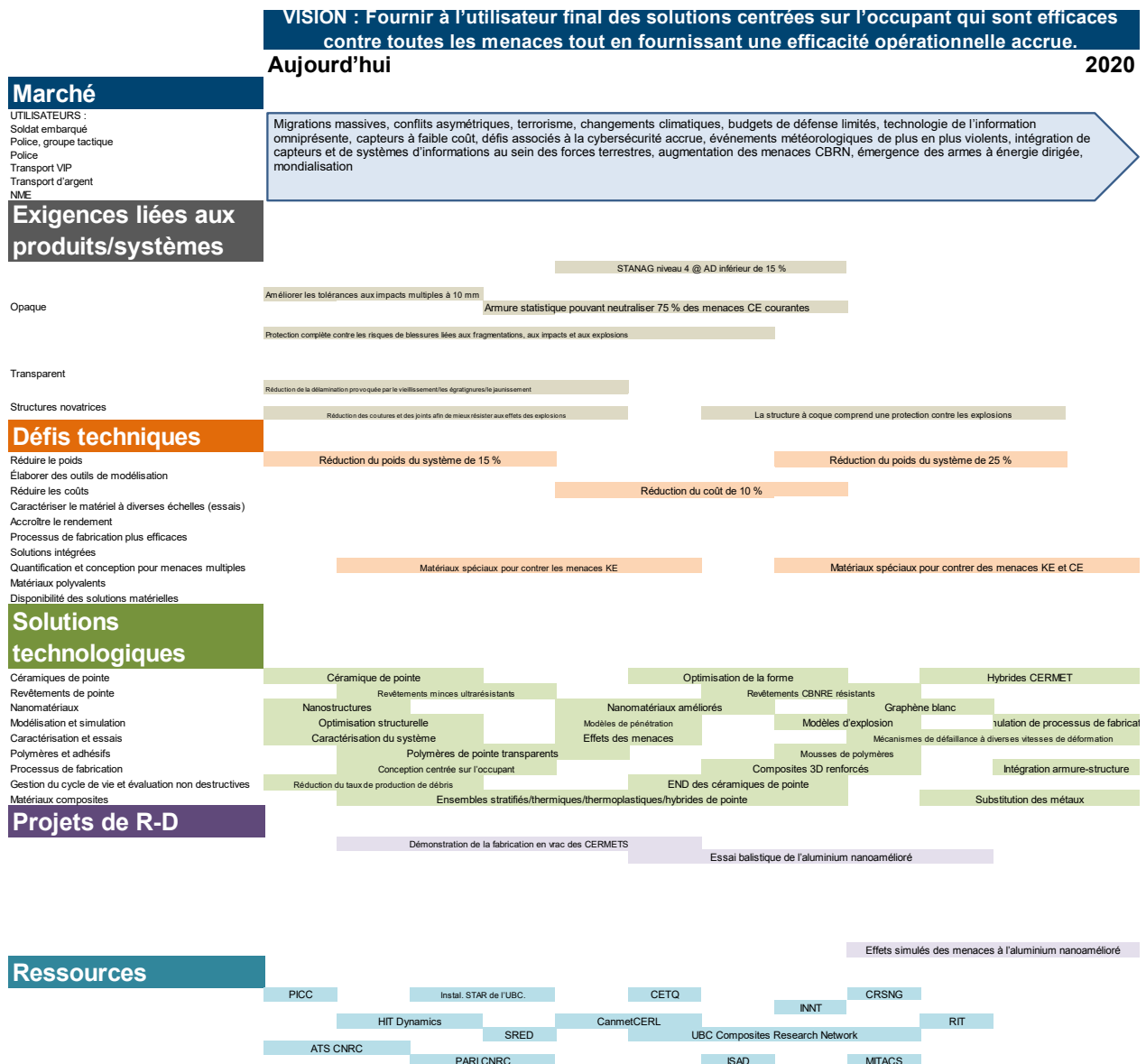
Ces exigences liées aux produits ou aux systèmes créent normalement des **défis techniques**, comme par exemple la conception de blindages optimisés en fonction d'un éventail plus large de menaces. Un certain nombre de **solutions technologiques** potentielles peuvent être appliquées pour relever ces défis techniques. Neuf solutions technologiques de principe ont été définies dans le cadre de l'atelier. Que ce soit individuellement ou en tandem, ces solutions technologiques ont le potentiel de relever les défis techniques et peuvent être explorées efficacement dans le cadre du programme Technologies des matériaux de sécurité.

L'exploration et la sélection ultime d'une solution technologique s'expriment par la mise sur pied d'un ou plusieurs **projets de recherche et de développement**. Ces projets sont tributaires des compétences et des installations des établissements de recherche, du savoir-faire des partenaires industriels, du financement obtenu et d'autres atouts qui, ensemble, créent un bassin de **ressources** qui peuvent être utilisées pour créer de l'innovation dans le secteur des matériaux de sécurité au Canada. Ce regroupement systématique des données sur une même carte technologique partagée par tous permet de cerner rapidement les besoins et de procéder à une harmonisation et une coordination efficaces des ressources de l'industrie, des milieux de la recherche et des utilisateurs, ce qui procure à l'industrie canadienne des matériaux de sécurité les outils nécessaires pour livrer une concurrence plus efficace à l'échelle mondiale et fournir les meilleurs systèmes de blindage possibles aux militaires et aux forces de l'ordre au Canada.

Point de départ d'une initiative permanente

La CTCMS ne sera jamais terminée. Les marchés, les technologies et les ressources continueront toujours d'évoluer, ce qui exigera l'ajout, la suppression ou la correction de certains points de données ou d'initiatives. Comme cette carte technologique vient tout juste d'être lancée, elle comporte par ailleurs encore des espaces vides et plusieurs initiatives restent à définir. Il appartient à l'industrie, aux utilisateurs et aux chercheurs d'enrichir la carte maintenant que le cadre général a été établi. Les utilisateurs à la recherche de meilleurs blindages pour leurs véhicules et d'EPI de meilleure qualité, les acteurs de l'industrie qui souhaitent améliorer leurs systèmes et leurs produits pour profiter des occasions qui se présentent sur le marché et répondre aux exigences, de même que les organisations ayant des compétences dans les matériaux et les procédés de fabrication des neuf domaines technologiques jugés prioritaires dans le secteur des matériaux de sécurité sont tous encouragés à « se mettre sur la carte » en visitant le site Web de la CTCMS.

Blindage de véhicules



VISION : Fournir à l'utilisateur final des solutions centrées sur l'occupant qui sont efficaces contre toutes les menaces tout en fournissant une efficacité opérationnelle accrue.

2020

2025

Marché

UTILISATEURS :
Soldat embarqué
Police, groupe tactique
Police
Transport VIP
Transport d'argent
NME

Exigences liées aux produits/systèmes

Besoin accru en matière d'aide humanitaire et d'aide en cas de catastrophe, changements climatiques, budgets de défense limités, opérations multinationales, rareté des ressources naturelles, transition de la puissance économique et politique de l'Amérique du Nord et de l'Europe vers l'Asie, automatisation accrue au sein des forces militaires, population de plus en plus vieillissante en Amérique du Nord et en Europe, prolifération des armes, événements météorologiques violents, augmentation des dépenses de l'Inde, de l'Allemagne, de l'Arabie saoudite, de la Turquie et du R.-U. en matière d'armement.

Opaque

Transparent

Structures novatrices

Défis techniques

Réduire le poids
Élaborer des outils de modélisation
Réduire les coûts
Caractériser le matériel à diverses échelles (essais)
Accroître le rendement
Processus de fabrication plus efficaces
Solutions intégrées
Quantification et conception pour menaces multiples
Matériaux polyvalents
Disponibilité des solutions matérielles

Solutions technologiques

Céramiques de pointe
Revêtements de pointe
Nanomatériaux
Modélisation et simulation
Caractérisation et essais
Polymères et adhésifs
Processus de fabrication
Gestion du cycle de vie et évaluation non destructives
Matériaux composites

Projets de R-D

Ressources



L'usine du futur

Centre d'excellence sur les matériaux de sécurité?

VISION : Fournir à l'utilisateur final des solutions centrées sur l'occupant qui sont efficaces contre toutes les menaces tout en fournissant une efficacité opérationnelle accrue.

2025

2040+

Marché

UTILISATEURS :

Soldat embarqué
Police, groupe tactique
Police
Transport VIP
Transport d'argent
NME

Exigences liées aux produits/systèmes

Société principalement urbanisées et avènement des mégavilles, montée de l'optimisation du rendement humain, augmentation des conflits entre les États, conflits dans de nombreux endroits épars, intelligence artificielle dans les applications de défense, besoin accru pour des « zones sécuritaires », automatisation et systèmes robotiques répandus, élaboration d'armes génétiques, frontière de plus en plus floue entre le maintien de l'ordre et les opérations militaires.

Opaque

STANAG niveaux 5 et 6 - efficacité ajoutée au niveau 4

Transparent

Furtivité adaptative
Protection identique à armure opaque+transparent

Structures novatrices

Défis techniques

Réduire le poids
Élaborer des outils de modélisation
Réduire les coûts
Caractériser le matériel à diverses échelles (essais)
Accroître le rendement
Processus de fabrication plus efficaces
Solutions intégrées
Quantification et conception pour menaces multiples
Matériaux polyvalents
Disponibilité des solutions matérielles

Réduction du poids du système de 50 %

Solutions technologiques

Céramiques de pointe
Revêtements de pointe
Nanomatériaux
Modélisation et simulation
Caractérisation et essais
Polymères et adhésifs
Processus de fabrication
Gestion du cycle de vie et évaluation non destructives
Matériaux composites

Conception des matériaux à l'échelle atomique

Projets de R-D

Démonstration d'une armure intégrale à camouflage adaptatif

Ressources

Équipement de protection individuelle

VISION : Fournir rapidement aux soldats et aux premiers répondants du Canada une armure personnelle rentable faisant partie d'un système polyvalent de protection intégrée qui maximise les chances de survie et le succès des missions

AUJOURD'HUI

2020

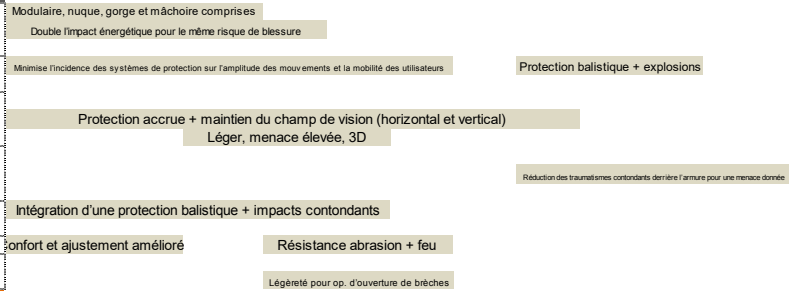
Marché

UTILISATEURS :
Soldat débarqué
Soldat embarqué
Police
NEM
Premiers répondants
Police, groupe tactique

Migrations massives, conflits asymétriques, terrorisme, changements climatiques, budgets de défense limités, technologie de l'information omniprésente, capteurs à faible coût, défis associés à la cybersécurité accrue, événements météorologiques de plus en plus violents, intégration de capteurs et de systèmes d'informations au sein des forces terrestres, augmentation des menaces CBRN, émergence des armes à énergie dirigée, mondialisation

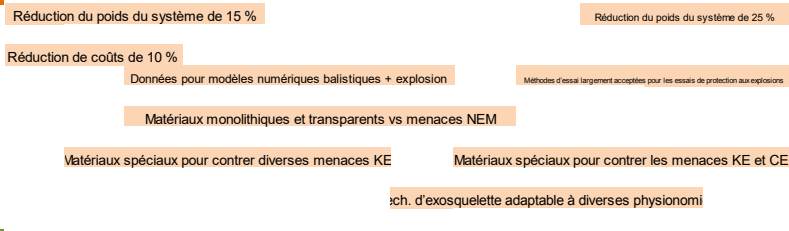
Exigences relatives aux produits/systèmes

CASQUE	Lourd/NEM Combat Police
PLAQUES	Composites Céramiques
ÉLÉMENTS TRANSPARI	Lourd/NEM/démineur Léger/lunettes de protection/LPB Antiémeutes
THORACIQUE	Léger (fragments) Moyen (armes légères) Lourd (armes lourdes/NEM)
EXTRÉMITÉS	Léger/protection ciblée Lourd/protection complète (NEM)
ARMURE CORPORELL	Textile
BOUCLERS	Antiémeute Balistique



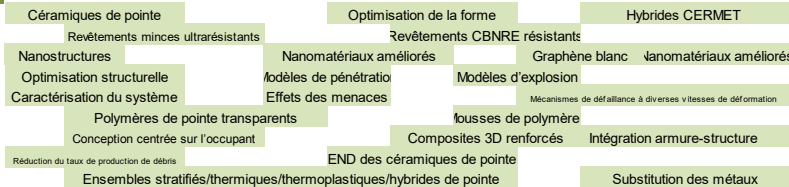
Défis techniques

Réduire le poids
Élaborer des outils de modélisation
Réduire les coûts
Caractériser le matériel à diverses échelles (essais)
Accroître le rendement
Processus de fabrication plus efficaces
Solutions intégrées
Quantification et conception pour menaces multiples
Disponibilité des solutions matérielles
Améliorer l'ergonomie
Matériaux polyvalents

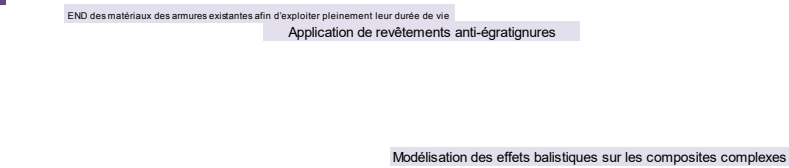


Solutions technologiques

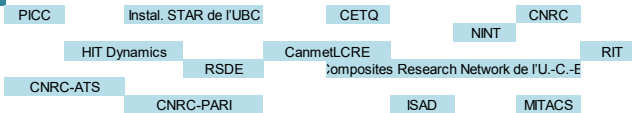
Céramiques de pointe
Revêtements de pointe
Nanomatériaux
Modélisation et simulation
Caractérisation et essais
Polymères et adhésifs
Processus de fabrication
Gestion du cycle de vie et évaluation non destructives
Matériaux composites



Projets de R-D



Ressources



VISION : Fournir rapidement aux soldats et aux premiers répondants du Canada une armure personnelle rentable faisant partie d'un système polyvalent de protection intégrée qui maximise les chances de survie et le succès des missions

2020

2025

Marché

UTILISATEURS :
Soldat débarqué
Soldat embarqué
Police
NEM
Premiers répondants
Police, groupe tactique

Besoin accru en matière d'aide humanitaire et d'aide en cas de catastrophe, changements climatiques, budgets de défense limités, opérations multinationales, rareté des ressources naturelles, transition de la puissance économique et politique de l'Amérique du Nord et de l'Europe vers l'Asie, automatisation accrue au sein des forces militaires, population de plus en plus vieillissante en Amérique du Nord et en Europe, prolifération des armes, événements météorologiques violents, augmentation des dépenses de l'Inde, de l'Allemagne, de l'Arabie saoudite, de la Turquie et du R.-U. en matière d'armement.

Exigences relatives aux produits/systèmes

CASQUE	Lourd/NEM Combat Police
PLAQUES	Composites Céramiques
ÉLÉMENTS TRANSPARENTS	Lourd/NEM/démineur Léger/lunettes de protection/LPB Antiémeutes
THORACIQUE	Léger (fragments) Moyen (armes légères) Lourd (armes lourdes/NEM)
EXTRÉMITÉS	Léger/protection ciblée Lourd/protection complète (NEM)
ARMURE CORPORELLE	Textile
BOUCLIERS	Antiémeute Balistique

Système de protection adaptable contre plusieurs menaces, nuque, gorge et mâchoire comprises
Protection légère NIJ niveau IV

Balistique+explosion+transparent pour l'utilisateur
Minimise l'incidence des systèmes de protection sur l'amplitude des mouvements et la mobilité de l'utilisateur

Protection accrue et aucune obstruction du champ de vision ambinoculaire naturel (horizontal et vertical)
Léger, monolithique, 3D

Gants ergonomiques résistants aux impacts balistiques

Protection contre les impacts balistiques et les explosifs (NEM)

Défis techniques

Réduire le poids
Élaborer des outils de modélisation
Réduire les coûts
Caractériser le matériel à diverses échelles (essais)
Accroître le rendement
Processus de fabrication plus efficaces
Solutions intégrées
Quantification et conception pour menaces multiples
Disponibilité des solutions matérielles
Améliorer l'ergonomie
Matériaux polyvalents

Textile balistique à rendement accru pour gants de grande dextérité

Création d'une bibliothèque de solutions matérielles

Solutions technologiques

Céramiques de pointe
Revêtements de pointe
Nanomatériaux
Modélisation et simulation
Caractérisation et essais
Polymères et adhésifs
Processus de fabrication
Gestion du cycle de vie et évaluation non destructives
Matériaux composites

Conception à carreaux de céramique vs monolithique pour une meilleure protection

Simulation de processus de fabrication

Remplacement des attaches métalliques

Fabrication d'additifs

Remplacement à la pièce des éléments composites d'ensembles complets

Projets de R-D

Démonstration d'une armure dotée de capacités d'autosurveillance

Ressources

Usine du futur

Centre d'excellence sur les matériaux de sécurité?

VISION : Fournir rapidement aux soldats et aux premiers répondants du Canada une armure personnelle rentable faisant partie d'un système polyvalent de protection intégrée qui maximise les chances de survie et le succès des missions

2025

2040+

Marché

UTILISATEURS :
Soldat débarqué
Soldat embarqué
Police
NEM
Premiers répondants
Police, groupe tactique

Sociétés principalement urbanisées et avènement des mégavilles, montée de l'optimisation du rendement humain, augmentation des conflits entre les États, conflits dans de nombreux endroits épars, intelligence artificielle dans les applications de défense, besoin accru pour des « zones sécuritaires », automatisation et systèmes robotiques répandus, élaboration d'armes génétiques, frontière de plus en plus floue entre le maintien de l'ordre et les opérations

Exigences relatives aux produits/systèmes

CASQUE	Lourd/NEM Combat Police	Protection complète contre les risques de blessures découlant des armes à fragmentation, des impacts et des explosions
PLAQUES	Composites Céramiques Lourd/NEM/démineur	
ÉLÉMENTS TRANSPARI	Léger/lunettes de protection/LPB Antiémeutes	Protection identique à une armure opaque/transparents pour l'utilisateur Monolithique, 3D et protection semblable à une armure opaque
THORACIQUE	Léger (fragments) Moyen (armes légères) Lourd (armes lourdes/NEM)	
EXTRÉMITÉS	Léger/protection ciblée Lourd/protection complète (NEM)	
ARMURE CORPORELLI	Textile	Protection 360°
BOUCLERS	Antiémeute Balistique	

Défis techniques

Réduire le poids
Élaborer des outils de modélisation
Réduire les coûts
Caractériser le matériel à diverses échelles (essais)
Accroître le rendement
Processus de fabrication plus efficaces
Solutions intégrées
Quantification et conception pour menaces multiples
Disponibilité des solutions matérielles
Améliorer l'ergonomie
Matériaux polyvalents

Solutions technologiques

Céramiques de pointe
Revêtements de pointe
Nanomatériaux
Modélisation et simulation
Caractérisation et essais
Polymères et adhésifs
Processus de fabrication
Gestion du cycle de vie et évaluation non destructives
Matériaux composites

Conception des matériaux à l'échelle atomique

Projets de R-D

Intégration armure-structure dans des exosquelettes

Ressources

État du marché et du secteur

Environnement de la sécurité de l'avenir

Nul ne peut prédire de quoi l'avenir sera fait. Toutefois, un certain nombre de tendances et d'analyses semblent indiquer que les thèmes dominants suivants joueront à l'avenir un rôle prépondérant dans le domaine de la sécurité.

- Certaines mégatendances mondiales (changements climatiques, urbanisation, migrations massives et raréfaction des ressources) déstabilisent la société et ont un effet profond sur la sécurité et l'environnement opérationnel.
- Le monde est de plus en plus multipolaire, et le pouvoir économique et politique glisse graduellement de l'Amérique du Nord et de l'Europe vers l'Asie.
- L'avenir sera ponctué de conflits symétriques et asymétriques menés aussi bien par des États que par d'autres acteurs. Certains pays (Russie, Chine, Iran et Corée du Nord) posent une menace particulière en raison de leur instabilité et de leurs ambitions nucléaires et territoriales. Il continuera d'y avoir des campagnes expéditionnaires.
- Le terrorisme restera une menace persistante.
- Les organismes de défense seront tenus de fonctionner en environnements austères souvent au moyen d'effectifs réduits et dispersés.
- Les forces armées devront s'acquitter de multiples missions, notamment au niveau de l'aide humanitaire et des opérations de secours consécutives à une catastrophe naturelle.
- Des opérations multinationales seront à l'ordre du jour, ce qui exigera une plus grande interopérabilité et une normalisation accrue.
- Les budgets de la défense seront plus limités, ce qui accentuera la recherche de solutions abordables et plus modulaires.
- La rapidité de l'évolution de la technologie sera un défi constant. Les cycles d'approvisionnement et les programmes de recherche peineront à soutenir le rythme.
- Voici quelques technologies clés liées à ces tendances :
 - technologies autonomes,
 - intégration de l'électronique (par exemple, capteurs, communications et informatique),
 - systèmes réseau centrés (temps réel, informatique omniprésente et communications),
 - traitement des métadonnées et analytique prédictive,
 - systèmes du combattant améliorés (par exemple, protection balistique et conception de matériel de protection à fonctions multiples pour tous les environnements (matériaux de pointe légers mais résistants, et des concepts souples et multicouches),
 - technologies capables de permettre des opérations dans des environnements protégés par des stratégies anti-accès,
 - techniques de fabrication additives et autres techniques de fabrication légères pour réduire les coûts et permettre la création de chaînes d'approvisionnement souples et la fabrication des pièces à distance,
 - modélisation et simulation (pour abrégé les périodes de développement et réduire les coûts et les risques),

- technologies de rehaussement des capacités du soldat (par exemple, outils neurocognitifs et exosquelettes),
- technologies spatiales (communications, surveillance).

C'est en considérant ces thèmes que le ministère de la Défense nationale, dans son document cadre *Opérations terrestres 2021*, décrit l'environnement de sécurité futur. Il établit le concept des opérations adaptables et dispersées qui se dérouleraient dans un contexte opérationnel « ... caractérisé par des conflits complexes et multidimensionnels, un cadre d'opérations isolées et dispersées et une approche opérationnelle basée sur des forces terrestres livrant des engagements simultanés dans l'ensemble du spectre »¹.

Les opérations réseautiques, l'omniprésence des technologies de l'information et des communications, et l'intégration des systèmes seront autant de principes sous-jacents fondamentaux à l'avenir. Les campagnes conjointes (par exemple, avec des partenaires multinationaux) deviendront la norme et exigeront des degrés plus grands que jamais d'interopérabilité. Les concepts de forces et d'équipement modulaires accroîtront l'agilité tout comme les améliorations apportées à la logistique et aux chaînes d'approvisionnement².

Le marché de la défense

À l'échelle mondiale, les dépenses militaires se sont chiffrées à environ 1 750 milliards de dollars américains en 2014, dont 35 % (c'est-à-dire environ 610 milliards) ont été engagées par les États-Unis (É.-U.)³. En 2014, les cinq autres pays ayant consacré le plus d'argent à leurs dépenses militaires étaient :

- la Chine (216 milliards de dollars),
- la Russie (85 milliards de dollars),
- l'Arabie saoudite (81 milliards de dollars),
- la France (62 milliards de dollars), et
- le Royaume-Uni (R.-U., 61 milliards de dollars)⁴.

Le pourcentage des dépenses militaires mondiales engagées par les États-Unis a accusé une baisse remarquable (passant de 40 % en 2012 à 35 % en 2014), probablement imputable à la réduction des opérations en Afghanistan et en Iraq. Toutefois, les États-Unis demeurent dominants dans ce secteur et devraient continuer de l'être (par une marge importante) pendant un certain temps encore.

¹ Ministère de la Défense nationale (Canada). Direction des Concepts et schéma de la Force terrestre (2007). *Opérations terrestres 2021 : Opérations adaptables et dispersées. Le concept d'emploi de la force de l'Armée de terre canadienne de demain*. Kingston (ON) : Direction des Concepts et schéma de la Force terrestre, extrait du site à l'adresse http://publications.gc.ca/collections/collection_2009/forces/D2-188-2007F.pdf

² *Ibid.*

³ Deloitte Touche Tohmatsu Limited (2015). *2015 Global aerospace and defense industry outlook*. Deloitte Touche Tohmatsu Limited, consulté sur le site à l'adresse : <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Manufacturing/gx-mnfg-2015-global-a-and-d-outlook.pdf>

⁴ *Ibid.*

« L'immense majorité [environ les trois quarts] des exportations canadiennes de matériel de défense et de sécurité sont vendues aux États-Unis...⁵ ». Le Canada a également vendu de l'équipement militaire et du matériel de sécurité en Europe (11 %), au Moyen-Orient (4 %), en Asie-Pacifique (3 %) et à d'autres pays (6 %)⁶. Ces chiffres laissent croire que peu importe ce que fait le Canada en matière d'exportations militaires et de sécurité, les États-Unis demeureront leur plus important client, et ce par une marge importante.

Monopolisant tout juste un peu plus de 84 % des achats, le ministère de la Défense nationale du Canada (MDN) est de loin le plus important acheteur national dans le secteur de la défense et de la sécurité⁷. Voici une ventilation des ventes des différents segments du marché canadien (voir aussi la Figure 5) :

- ministère de la Défense nationale : 84,3 %;
- Gendarmerie royale du Canada (GRC) : 4,5 %;
- Services correctionnels Canada (SCC) : 3,9 %;
- Agence des services frontaliers du Canada (ASFC) : 0,8 %;
- Police provinciale de l'Ontario (OPP) : 0,8 %;
- autres corps policiers municipaux et provinciaux : 5,8 %⁸.

Ces chiffres démontrent que même si les secteurs autres que le secteur militaire ont leur importance au Canada, en termes relatifs, ils ne tiennent pas la comparaison à l'échelle nationale.

⁵ Conseil national de recherches du Canada, Gestion du savoir (2014). *Plan stratégique : Documentation à l'appui [pour le portefeuille Technologies de sécurité et de rupture]*. Henry Chou, Brenda Brady.

⁶ Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (2013). *Le Canada d'abord : Exploiter l'approvisionnement militaire en s'appuyant sur les capacités industrielles clés*. Jenkins, T. Consulté sur le site à l'adresse <http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/app-acq/documents/eam-lmp-eng.pdf>

⁷ *Op. cit.*, Gestion du savoir du CNRC (2014).

⁸ KPMG (2012). *Economic Impact of the Defence and Security Industry in Canada*.

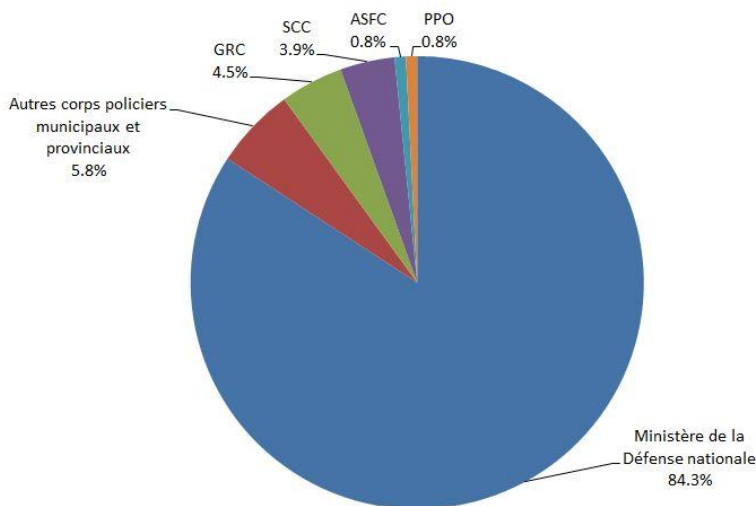


Figure 5 : Dépenses de défense et de sécurité par entité sélectionnée de l'administration publique au Canada, 2011⁹

Marché de la protection des forces

En 2013, Frost et Sullivan ont publié un rapport sur le marché mondial de la protection des forces. Il est ici question du marché de la protection des actifs fixes (comme les bases militaires), des effectifs (équipement de protection comme les casques, les vestes de protection, les lunettes de protection, etc.) et des actifs mobiles (par exemple, les véhicules militaires). Frost et Sullivan (2013) ont noté les tendances clés suivantes :

- Dans l'ensemble, il existe un besoin de moderniser, d'économiser et de rationaliser. Les programmes de modernisation de l'équipement du soldat abondent.
- La tendance à l'allègement de l'équipement, tant pour la protection individuelle que pour les véhicules, se maintient. Cet équipement léger doit cependant être hautement performant, adapté au contexte de menaces changeantes et à l'intention stratégique, et offrir un bon ratio coût-efficacité (compte tenu de la diminution constante des budgets de défense).
- « Le choix nécessaire entre la quantité et la qualité de l'équipement est encore plus frappant. Lorsque l'acceptation politique et sociale des pertes de vie est plus grande et que la main-d'œuvre est moins coûteuse, la nécessité d'offrir une protection avancée des forces est moins ressentie. Les systèmes légers coûtent moins cher que les systèmes lourds et les systèmes moins avancés seront alors souvent suffisants et abordables. Par ailleurs, pour les utilisateurs du dernier échelon, l'équipement de protection lourd ou de pointe est trop coûteux. »
- En cette ère post-Afghanistan, les systèmes d'approvisionnement sont en train de changer et accordent une importance nouvelle aux dispositifs proactifs d'évitement et de prévention (détection avancée des menaces) s'appuyant souvent sur des contremesures électroniques, la détection des intrus et la biométrie. Cette tendance annonce peut-être aussi une diminution prochaine de l'acquisition de systèmes de blindage lourds et une transition vers des véhicules plus légers s'appuyant un peu plus sur les technologies de pointe.

⁹ Ibid.

- Dans les pays utilisateurs modernes (comme le Canada et les États-Unis), on met beaucoup l'accent sur la technologie et la modernisation, mais la tolérance politique et sociale des pertes de vie est très faible. Il s'ensuit que le besoin de protection des forces continuera d'être élevé, mais que les solutions devront offrir un bon ratio coût-efficacité.

La Figure 6 illustre les prévisions de 2012 des dépenses sur le marché mondial des dispositifs de protection des forces jusqu'en 2019. Les revenus globaux liés à la « protection des forces » demeureront constants avec un total mondial annuel qui devrait être légèrement inférieur à 7,5 milliards USD.

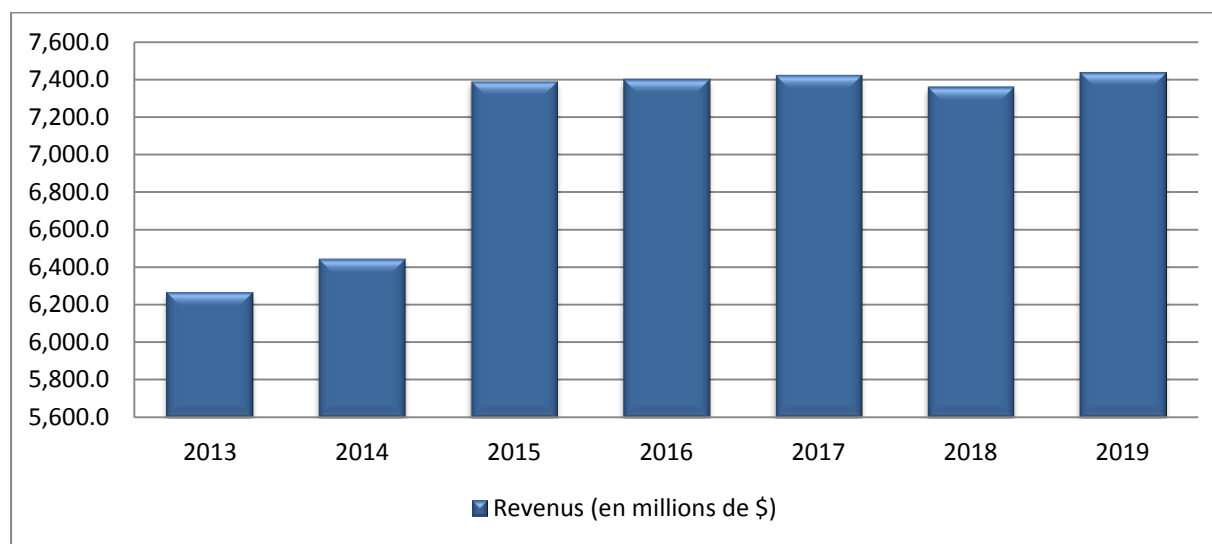


Figure 6 : Marché mondial de la protection des forces (2013 à 2019); prévisions de revenus (en USD)¹⁰

Industries canadiennes de la défense et de la sécurité

L'enquête *État de l'industrie canadienne de la défense 2014*, menée par Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE) et l'Association des industries canadiennes de défense et de sécurité (AICDS)¹¹, a permis de dresser le portrait suivant de l'industrie canadienne de la défense et de la sécurité pour l'année 2014 :

- 640 entreprises, dont 90 % comptaient moins de 250 employés;
- 63 000 emplois (équivalents temps plein) directs et indirects;
- 28 000 emplois relevant directement de l'industrie de la défense, dont 30 % touchaient à l'innovation : ingénieurs, scientifiques, chercheurs, techniciens et technologues;
- ventes de près de 10 milliards de dollars, dont 60 % étaient attribuables aux exportations (intensité des exportations supérieure de près de 20 % à celle de la moyenne générale canadienne de l'industrie manufacturière);
- contribution de 6,7 milliards de dollars au PIB du Canada¹².

¹⁰ Frost et Sullivan (2013). *Global Force Protection Market : Global Economics Will Dictate Force Protection Requirements for the Next 10 Years*. Mountain View, CA : Frost and Sullivan.

¹¹ Innovation, Sciences et Développement économique Canada et Association des industries de défense et de sécurité. *État de l'industrie Canadienne de la défense*, 2014.

¹² Ibid.

Véhicules blindés et équipement de protection individuelle

La Figure 7 est une représentation graphique de la répartition des ventes totales de l'industrie de la défense par grande catégorie de biens et services, en 2014¹³. Comme l'illustre la Figure 8, parmi les activités du domaine terrestre et les activités multi domaines, les ventes de biens et de services en matière de véhicules (y compris de véhicules de combat) ont dominé, totalisant 2,8 milliards de dollars canadiens¹⁴. Le soutien des troupes, ce qui comprend l'équipement de protection individuelle, a grandement contribué au domaine, avec des ventes totalisant 222 millions de dollars.

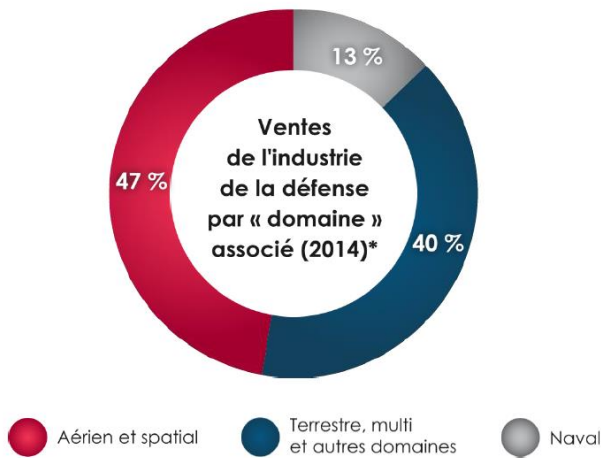


Figure 7 : Contribution directe et indirecte en pourcentage au PIB par les sous-secteurs des industries canadiennes de la défense et de la sécurité¹⁵

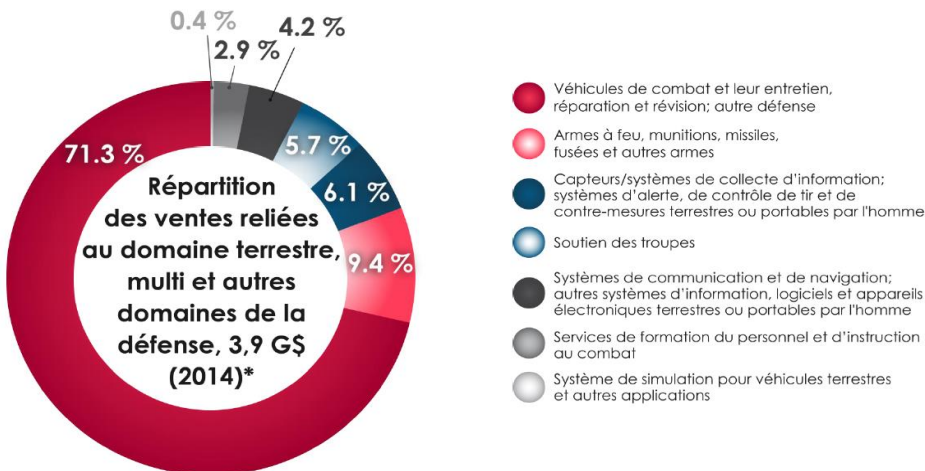


Figure 8 : Contributions en pourcentage à la création d'ETP par les sous-secteurs des industries canadiennes de la défense et de la sécurité

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

¹⁵ Ibid.

Dépenses mondiales de recherche et de développement¹⁶

La Figure 9 illustre les dépenses relatives de R-D par les 40 principaux pays investissant dans la R-D.

Les États-Unis sont, et de beaucoup, le pays qui dépense le plus en recherche et en développement, mais selon les prévisions ils seront dépassés par la Chine en 2026 si la tendance actuelle se maintient. À plus de 60 milliards USD (soit environ la moitié des investissements totaux des États-Unis en R-D en 2016), le budget de R-D du Département de la défense des États-Unis est plus important que le budget total de R-D de tous les autres pays sauf cinq (la Chine, le Japon, l'Allemagne, la Corée du Sud et l'Inde). Le budget de R-D du Département de la défense des États-Unis est surtout consacré au développement de technologies (80 %), mais il est aussi consacré à 17 % à la science et à la technologie (S-T). Ce budget de S-T est par ailleurs réparti entre la recherche fondamentale (17 %), la recherche appliquée (38 %), et le développement de technologies de pointe (45 %).

La Defense Advanced Research Projects Agency est considérée comme une entité indépendante à l'intérieur même du Département de la défense, avec un budget de 3 milliards USD. Selon une estimation de Statistique Canada, le total des dépenses de R-D au Canada en 2015 se chiffrait à 35 milliards CAD. RDDC est le chef de file national en ce qui concerne les sciences et les technologies liées à la défense et à la sécurité, et l'organisme est doté d'un budget dépassant les 300 millions de dollars canadiens.

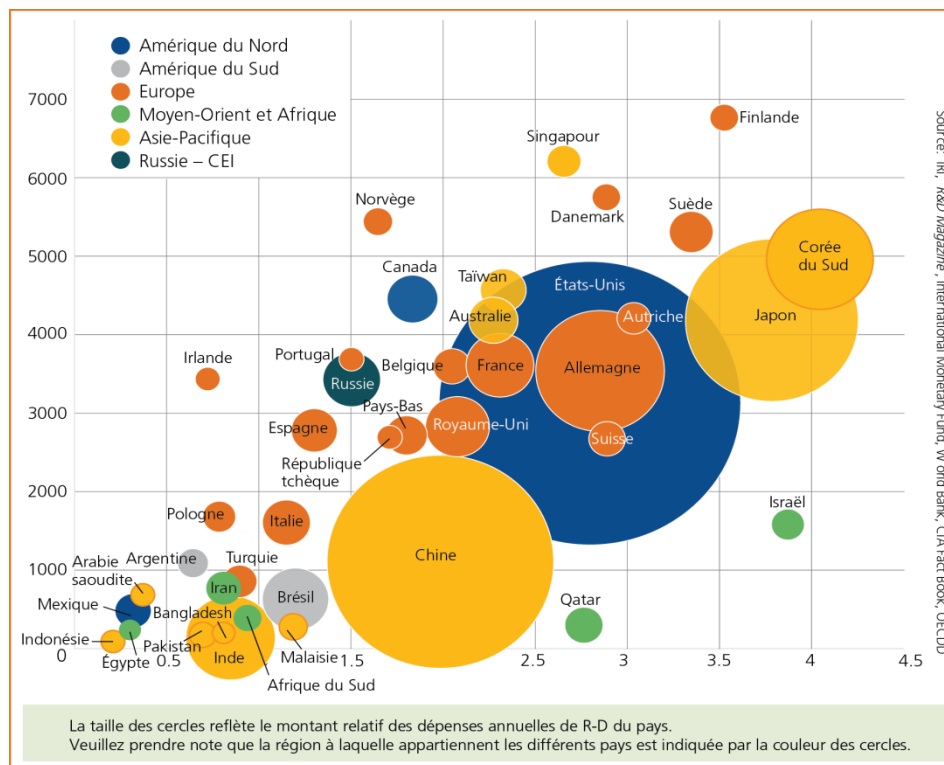


Figure 9 : Dépenses de R-D relatives par les 40 pays consacrant le plus de dépenses à la R-D (l'axe des x indique le pourcentage du PIB et l'axe des y indique le nombre de scientifiques et d'ingénieurs par million d'habitants).

¹⁶ Industrial Research Institute (2016). 2016 Global R&D Funding Forecast.

Besoins futurs de capacités en matière de blindage de véhicules

Au cours des conflits récents en Afghanistan et en Iraq, les dispositifs de protection et d'accroissement de la capacité de survie ont pris une importance nouvelle au point où ils sont devenus la capacité prédominante recherchée dans la conception des véhicules utilisés dans les zones de combat. Dans certains cas, l'amélioration de la capacité de survie a été élevée au rang de « besoin opérationnel urgent » (BOU) au détriment d'autres capacités, comme la mobilité. En fait, les exigences d'augmentation de la capacité de survie de certains parcs de véhicules ont entraîné une telle dégradation de la mobilité que bien des véhicules doivent s'en tenir aux grands axes routiers où ils deviennent des proies vulnérables à certaines menaces, notamment les engins explosifs improvisés (EEI).

L'Armée aura accès à des véhicules, des armes et de l'équipement conviviaux, robustes, adaptables et exigeant peu d'entretien et qui pourront être déployés rapidement. Ils devront aussi être capables de contrer et d'éliminer les menaces susceptibles de se présenter tout en exécutant des opérations adaptables et dispersées dans l'ensemble du spectre et dans le contexte opérationnel de l'avenir.

*- Lieutenant-colonel Ron Bell
Concepts 3, Centre de guerre terrestre de l'Armée canadienne
(citation extraite de la liste des problèmes complexes de l'Armée canadienne)*

Simultanément, le besoin de rehausser la capacité de survie augmente aussi pour les véhicules non militaires, notamment les auto-patrouilles de la police, les fourgons blindés de transport d'espèces, les véhicules des premiers répondants et les véhicules de transport des personnalités de marque. Dans certains pays, les forces policières utilisent des véhicules d'inspiration militaire ou rachètent des véhicules de combat blindés militaires excédentaires.

Il est urgent d'effectuer de la R-D pour atteindre le niveau requis de survie de l'équipage des véhicules tout en maintenant l'équilibre avec les autres capacités requises, notamment la mobilité.

Selon les renseignements fournis par le Centre de guerre terrestre de l'Armée canadienne. La conception des véhicules de combat terrestres (qui est fondée sur le but recherché) doit permettre d'atteindre un équilibre entre la mobilité, la puissance de feu, la protection, la numérisation et les facteurs humains. Ces considérations relatives à la conception doivent également prendre en compte d'autres facteurs comme la capacité de payer, la durabilité, les mises à niveau futures (augmentation du poids et des capacités), la maintenabilité, la déployabilité, la similarité, la normalisation, l'adaptabilité tactique après déploiement, la formation dans tous les environnements, l'autonomie et la résistance aux attaques réseau. Ces exigences tiennent compte du fait que l'Armée canadienne sera de plus en plus appelée à mener des opérations adaptables et dispersées dans les environnements opérationnels du futur.

Des réalités qui précèdent présentées à l'atelier sur la CTCMS, on a extrait la liste suivante de besoins du marché en matière de blindage des véhicules :

- a. Systèmes offrant un niveau de rendement conforme à l'aggravation constante des menaces. La capacité de pénétration de menaces nouvelles et changeantes augmente plus rapidement que la capacité des véhicules blindés de transporter le poids des systèmes de blindage passifs nécessaires pour contrer ces mêmes menaces. Les systèmes devraient être aussi plus durables que les systèmes actuels en ce qui concerne la résistance aux impacts multiples et la résistance physique afin de ne pas être endommagés, par exemple, par les roches et la végétation, et de mieux résister à la détérioration due aux conditions environnementales.
- b. Systèmes holistiques optimisés pour l'allègement des véhicules.

Le Tank and Automotive Research, Development and Engineering Center (TARDEC) de l'armée américaine, dans une analyse des chaînes de valeur sur une période de 30 ans, lance un appel pour le développement, la maturation et l'intégration de blindages légers (10 % à 20 % plus légers que les actuels), rapportés, électrifiés et adaptables. Ces solutions doivent comprendre de multiples mécanismes de prévention des menaces, d'amélioration de la protection contre les tirs directs et les tirs à fragmentation, et permettre de maintenir le niveau de performance et les coûts.

Incidence de la menace sur les solutions potentielles

Comme nous l'avons précédemment mentionné, et comme l'illustre la Figure 10, la diversité des menaces nouvelles et changeantes et leurs capacités de pénétration augmentent plus rapidement que la capacité des véhicules blindés de transporter le poids des systèmes de blindage passif nécessaires pour contrer ces menaces.

Malgré le développement des matériaux de blindage passif au cours des 20 dernières années, on n'est pas arrivé à réduire de manière significative le poids des blindages. Les conflits armés récents ont donné lieu à une prolifération des menaces que représentent les charges formées et les projectiles formés par explosion ainsi que les désormais omniprésents engins explosifs improvisés (EEI) sous toutes les formes. Le niveau d'énergie très élevé libéré par l'impact sur une cible relativement petite exige le recours à des solutions de blindage qui vont au-delà de simples matériaux passifs.

Les armures statistiques ont un rendement limité et sont utilisés comme mesure palliative pour accroître la protection des véhicules incapables de transporter le lourd blindage passif nécessaire pour contrer les charges formées (dont les menaces liées à l'énergie chimique (*Chemical Energy* – CE). Les matières réactives constituent une solution attrayante pour atténuer les menaces causées par la CE en raison de leur poids relativement peu important (elles peuvent être jusqu'à 10 fois plus légères que les blindages homogènes laminés [BHL] en acier équivalents). Même si les systèmes de protection réactifs qui ont été développés sont surtout utilisés contre les menaces posées par la CE, il serait possible d'en développer pour contrer l'énergie cinétique (*Kinetic Energy* – KE) (par exemple, système électromagnétique pour contrer les perforateurs de grande longueur).

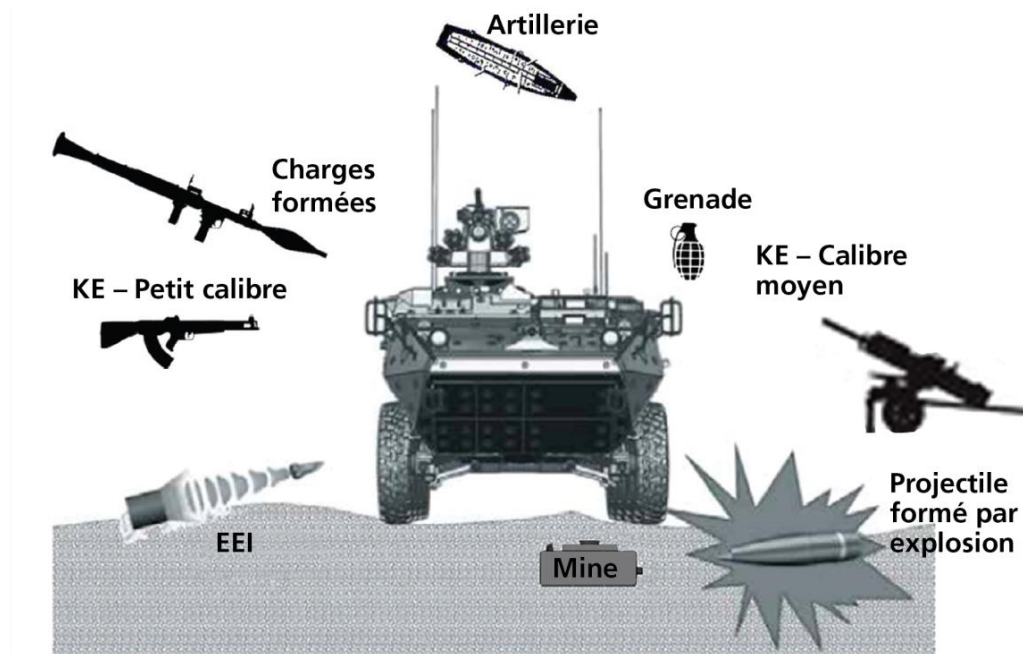


Figure 10 : Diversité des menaces pesant sur les véhicules blindés (source : RDDC)

Actuellement, les systèmes à KE peuvent perforer jusqu'à 0,8 mètre de blindage homogène laminé, tandis que les menaces à énergie chimique peuvent percer un blindage homogène laminé d'une épaisseur d'un mètre. Les véhicules actuels équipés de bonnes technologies passives (par exemple, les chars) peuvent se contenter d'une capacité de blindage équivalant à moins de 0,5 mètre de blindage homogène laminé (BHL). Toutefois, de nombreux véhicules, comme les véhicules blindés logistiques et les véhicules blindés légers, ne sont pas suffisamment puissants pour transporter un blindage équivalant à plus d'un BHL de 0,05 mètre. Les meilleurs matériaux passifs peuvent offrir un rendement équivalant à cinq fois celui du BHL, mais uniquement si les projectiles ne sont pas de type perforant. En ce qui concerne les projectiles perforants et les menaces posées par les charges formées, un blindage passif offrant de trois à quatre fois la performance d'un BHL est considéré comme très bon.

La libération rapide d'énergie dans une zone restreinte au moyen d'un système de blindage réactif/actif est l'une des avenues les plus prometteuses pour accroître véritablement la performance des blindages et générer des améliorations importantes dans la protection des véhicules à plateforme légère ou de poids moyen. Les blindages réactifs utilisés sur certains véhicules blindés légers afin de contrer les charges formées ont démontré que le poids du blindage pourrait facilement être réduit de plus de moitié pour contrer une menace par rapport à la meilleure solution actuelle de blindage passif.

Pour doubler le rendement des matériaux passifs (ce qui est possible en y combinant des matériaux réactifs), il faudra beaucoup de temps et d'argent, et une percée marquante dans le domaine des technologies de matériaux.

Besoins à venir de capacités de l'équipement de protection individuelle

L'équipement de protection individuelle doit poursuivre son évolution pour être en mesure de répondre à des menaces de plus en plus diversifiées et changeantes dans des environnements opérationnels qui se multiplient. Un des facteurs cruciaux qui jouent sur le succès de l'EPI est la facilité d'utilisation découlant de l'ingénierie des facteurs humains, y compris son effet sur la portée des mouvements de l'utilisateur, la rétention de chaleur, son poids et d'autres facteurs similaires. Chacun de ces facteurs a été pris en compte et a fait l'objet de discussions dans le cadre de l'atelier sur la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité. La présente section décrit les besoins de capacités opérationnelles qui devraient orienter l'innovation en matière d'EPI.

Nature de la menace

Les utilisateurs d'EPI dans le secteur de la défense et de la sécurité englobent les combattants (à pied ou à bord de véhicules), les policiers et autres premiers répondants, les agents de sécurité privés, les équipes de protection, les passagers de voitures blindées et les spécialistes de la neutralisation des explosifs et munitions (NEM), militaires ou civils.

Dans le contexte des organismes d'application de la loi, l'EPI protège les utilisateurs contre des menaces balistiques à faible vitesse (armes de poing) ou à haute vitesse (armes de chasse), et contre les impacts contondants, les attaques à l'arme blanche et les flammes. Sauf lorsqu'il est question des spécialistes civils de la NEM, les menaces d'explosion sont rarement une considération dans les systèmes de blindage destinés aux premiers répondants. Cette donnée pourrait être appelée à changer.

Les exigences en ce qui concerne l'EPI des combattants sont dominées par les menaces que posent les munitions à fragmentation et les impacts de balles à haute vitesse, y compris les impacts de projectiles perforants, avec l'ajout occasionnel des projectiles d'armes de poing et de mitraillettes. La résistance aux flammes est également une exigence courante pour les casques de combat, le blindage souple et les pochettes pour les plaques protectrices. La protection contre les attaques à l'arme blanche n'est actuellement pas courante dans les exigences relatives à l'EPI militaire, mais cela aussi pourrait changer dans l'avenir, surtout s'il devient faisable d'intégrer la protection aux vêtements militaires. Les gilets pare-éclats offrent déjà un certain degré de protection contre les agressions à l'arme blanche même si leur rendement véritable contre ce genre de menaces est rarement évalué.

L'évolution des exigences relatives aux impacts de balles à haute vitesse est guidée par l'amélioration de la conception des projectiles pénétrants et des matériaux dans lesquels ils sont fabriqués, de la précision des tirs et du désir d'accroître la couverture, habituellement par l'ajout de plaques latérales (protégeant les flancs du tronc) ou par des casques de combat protégeant contre les impacts de balles de carabines. La prolifération des EEI et des autres menaces d'explosion a rehaussé l'intérêt pour la protection contre les lésions par souffle (c'est-à-dire les traumatismes physiques découlant d'une exposition directe ou indirecte à une surpression due au souffle de l'explosion).

La complexité des conditions que peuvent engendrer ces menaces (voir la Figure 11) multiplie les mécanismes de blessure :

- blessures découlant de la surpression du souffle (oreilles, poumons, viscères, système nerveux central);
- blessures causées par les éclats (métalliques/naturels, soit mortels ou handicapants);
- blessures causées par des projections ou par l'impact contondant de gros débris.



Figure 11 : Complexité des mécanismes potentiels causant des blessures associés à une explosion

Cette multiplicité complexifie considérablement la conception d'EPI capable de contrer toutes ces menaces. Traditionnellement, ce problème touchait uniquement les systèmes destinés aux spécialistes de la NEM, mais l'EPI conçu à la fois pour les combattants à pied (débarqués) ou à bord d'un véhicule (embarqués) doit prendre en considération un lot important d'exigences d'ingénierie des facteurs humains et oblige à des compromis sur le plan de la protection afin d'assurer la mobilité des combattants et de limiter les nuisances. La proximité et l'angle d'attaque de bon nombre des menaces d'explosion créent aussi des défis sur le plan de la protection contre les éclats (niveau et couverture de la protection). Ces défis, jumelés au succès de l'EPI déjà déployé dans l'atténuation des blessures menaçant la vie, engendrent des attentes de protection accrue contre les blessures handicapantes aux effets permanents, ce qui oblige les experts en science et en technologie à analyser les compromis nécessaires entre protection et facteurs humains. Parmi les nouvelles menaces en émergence, mentionnons les armes à énergie dirigée (par exemple, les lasers) qui viendront compliquer un peu plus la conception de l'EPI de l'avenir et accentueront le besoin d'intégrer des matériaux nouveaux.

Environnement opérationnel et exigences opérationnelles

L'EPI doit demeurer efficace et fonctionnel dans un large éventail de conditions tactiques et d'environnements opérationnels. Il doit notamment pouvoir être utilisé aux températures glaciales de l'Arctique ou dans la chaleur infernale du désert, dans des conditions d'humidité élevée ou très basse, dans des zones urbaines ou rurales, ainsi que dans des environnements forestiers, marins ou souterrains. Bref, il doit pouvoir être utilisé dans pratiquement tous les endroits imaginables. Les utilisateurs d'EPI s'acquittent aussi d'un large éventail de missions, des patrouilles à haute visibilité aux opérations de commandos en passant par les opérations secrètes. Et la nature des menaces et le niveau acceptable de risque dans chaque scénario varient tout autant. Ces exigences, parallèlement aux budgets et options de transport souvent limités, créent une forte demande d'EPI léger, peu encombrant, configurable selon les missions (modulaire et adaptable) et capable d'offrir une protection contre de multiples menaces.

Intégration de la protection à d'autres fonctions

Les utilisateurs d'EPI des secteurs de la défense et de la sécurité ont toute une gamme de fonctions à accomplir pendant leurs missions ou dans l'exercice de leurs tâches, chacune exigeant un équipement spécialisé. Comme la Figure 12 l'illustre, les agents de la paix et les militaires modernes transportent avec eux de multiples pièces d'équipement qui accroissent leur capacité mais qui sont encombrantes et complexes^{17,18} d'où la nécessité de concevoir de l'EPI de façon à ce qu'il puisse être facilement intégré au reste de l'équipement opérationnel du combattant/premier répondant. Parmi les possibilités qui s'offrent en ce domaine, mentionnons les matériaux multifonctionnels qui réduisent le poids global du système et sa complexité grâce à l'intégration de certaines fonctions dont voici quelques exemples :

- blindage souple + distribution des données/de l'énergie;
- blindage souple + gestion de la signature + protection environnementale;
- blindage rigide + capteurs/antennes + distribution des données/de l'énergie;
- blindage rigide + dispositif intégré de stockage de l'énergie.

Parmi les objectifs de cette intégration, mentionnons l'élimination des fils et allègement de l'infrastructure de distribution et de stockage de l'énergie et des données, l'élimination des risques d'accrocs aux tissus, l'allègement global de l'équipement, la diminution du volume et la possibilité d'ajouter des capacités additionnelles dans le futur comme la surveillance de l'intégrité du blindage.

¹⁷ *Evening Standard* (2008). Vue de face d'une policière paramilitaire armée d'une arme de poing, d'un pistolet taser, d'une veste pare-éclats et de neuf autres pièces d'équipement. Consulté sur le site à l'adresse <http://www.standard.co.uk/news/the-paramilitary-face-of-a-policewoman-armed-with-handgun-taser-flak-jacket-and-nine-other-pieces-of-7267310.html>; News.com.au. (30 juin 2013). Carte technologique des systèmes du soldat.

¹⁸ Photo : Combat Camera, Cplc Robert Bottrill.



17

18

Figure 12 : Complexité des mécanismes potentiels causant des blessures associés à une explosion

Facteurs humains

La conception et la fonction de l'EPI comportent des exigences intrinsèques en matière d'ingénierie des facteurs humains qui sont vitales importantes. Même si elles ne sont habituellement pas prises en compte au même titre que les exigences de protection contre les charges explosives ou les projectiles d'armes à feu, les exigences liées au fardeau du combattant et aux autres facteurs humains peuvent avoir un effet sur l'efficacité opérationnelle et, éventuellement, sur la capacité de survie de l'utilisateur. Les facteurs liés au confort ou à l'efficacité de l'utilisateur, comme la charge thermique et la gestion de l'humidité, le poids, la distribution des charges et la facilité de mouvement ont un effet crucial sur le rendement de celui qui porte l'équipement. Un système d'EPI mal conçu augmentera la probabilité qu'il ne soit pas porté ou utilisé de la manière prévue (ce qui entraînerait une diminution de la protection) ou ne soit pas utilisé du tout. Même si cela semble évident, il nous paraît utile de mentionner que même le meilleur système de protection n'offrira aucune protection s'il n'est pas porté.

Si l'évaluation quantifiable du rendement est un domaine encore en cours d'évolution, sur le plan qualitatif, les effets des systèmes d'EPI volumineux, trop rigides, chauds et trop lourds sont notoires : ils nuisent grandement à la capacité des combattants et des premiers répondants de s'acquitter de leur mission. Entre autres exemples de défis importants liés aux facteurs humains, mentionnons la nécessité de réduire de beaucoup le poids des systèmes de blindage pour un niveau de protection donné, la faisabilité d'offrir un mécanisme de protection souple contre les impacts de projectiles à haute vitesse (« blindage solide souple ») et les importantes améliorations nécessaires en matière de résistance aux rayures et à la buée en ce qui concerne les blindages transparents. Pour certains systèmes d'EPI, particulièrement les éléments associés à l'augmentation de la protection aux extrémités du corps, au visage, dans le cou et dans la région urogénitale, les

exigences liées aux facteurs humains comme le transport de l'humidité, la perméabilité à l'air, le confort et la souplesse dominant la conception des blindages.

Ces exigences obligent à des compromis importants en ce qui concerne le niveau de protection qui peut être offert aux régions vulnérables du corps humain, avec les conséquences désastreuses que cela peut avoir lorsque des blessures surviennent. Tout EPI est en soi le fruit d'un compromis, mais la conception prenant en compte les facteurs humains, le développement et la fabrication d'équipement de protection sont souvent fondés sur une évaluation subjective de son ajustement à l'utilisateur et sa facilité d'utilisation. Le développement de mesures objectives du succès de l'intégration des systèmes humains dans la conception des systèmes du soldat, y compris l'EPI, suscite beaucoup d'intérêt et exigera des investissements importants. On pourra ainsi en venir à une analyse des compromis nécessaires entre protection et mobilité et évaluer de manière satisfaisante l'efficacité globale de l'équipement dans un contexte de mission.

Produits/catégories de produits

Blindage de véhicules

Des blindages des véhicules sont développés et des solutions de blindage sont déployées depuis que des véhicules sont placés dans des situations dangereuses. Il y a toujours eu un arbitrage à faire entre le blindage utilisé sur un véhicule et les menaces que ce même véhicule doit contrer. De nos jours, les véhicules doivent pouvoir résister à toute une gamme de menaces : balles, roquettes et missiles antichars, EEI, projectiles formés par explosion et mines enfouies (explosions/éclats/projectiles formés par explosion).

Le mot blindage est une expression générique qui englobe toute une gamme de produits, de techniques et de technologies visant à protéger un véhicule et son équipage. Comme on l'indique aux Figure 13 et Figure 14, le blindage peut prendre la forme de plaques opaques installées lorsque c'est nécessaire, de plaques transparentes (« verre à l'épreuve des balles ») installées en permanence, ou de dispositifs de blindage « statistique » ou « géométrique » (barre, barre oblique, filet) qui protègent contre certaines menaces précises dont les tirs venant de certains angles, et de différents systèmes qui protègent le véhicule contre les explosions susceptibles de se produire de part et d'autre de celui-ci ou encore, sous celui-ci. Les menaces d'explosion ont eu une incidence particulière sur la conception des véhicules récemment déployés en Afghanistan et en Iraq, et cette tendance sera vraisemblablement appelée à se maintenir.

De nombreux produits internes sont aussi utilisés pour protéger l'équipage, notamment les revêtements intérieurs pare-éclats, les soudures renforcées et les éléments structuraux offrant aussi une protection contre les éclats.

L'accord de normalisation 4569 de l'OTAN, Niveaux de protection pour les occupants de véhicules blindés légers et logistiques, est une des normes quantitatives couramment (mais pas universellement) appliquées aux blindages. Ce document contient un graphique hiérarchisant les niveaux de menaces et certains détails particuliers à chacune d'elles. Par exemple, dans le cas des menaces liées à l'énergie cinétique, il donne des détails sur le calibre de la menace, la nature des projectiles et la distance à laquelle ceux-ci sont tirés. La publication interalliée de documentation technique 55, connexe à l'accord en question, donne des exemples de menaces et de procédures d'essai approuvées.

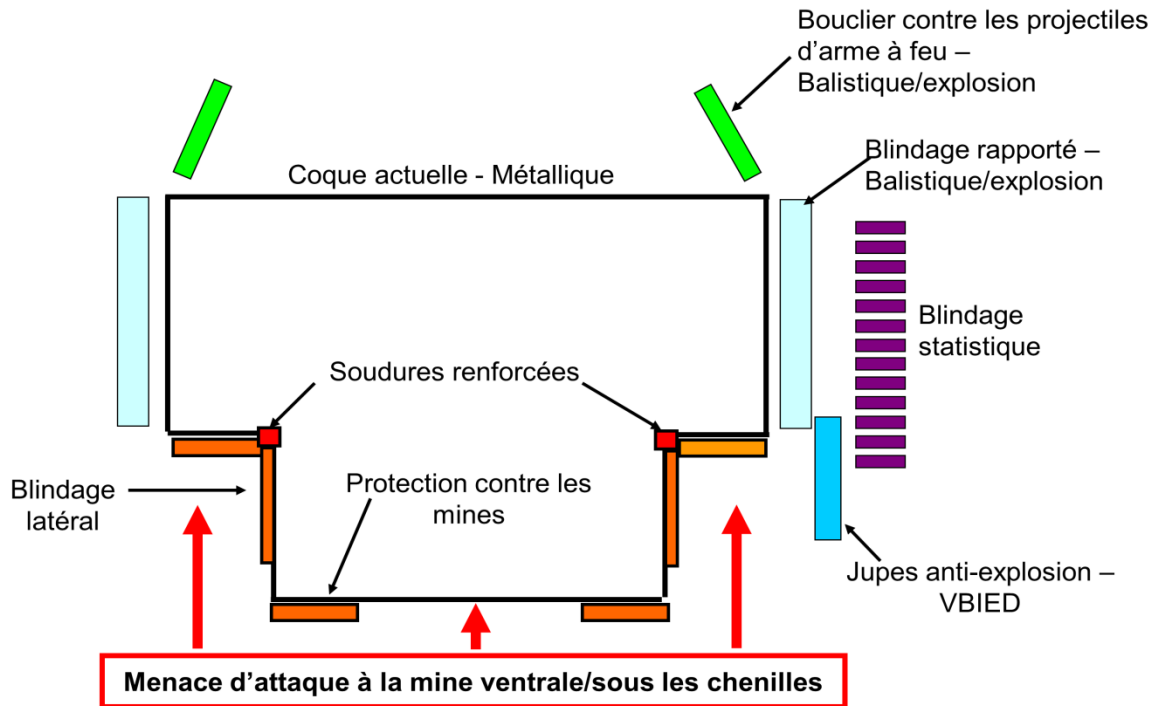


Figure 13 : Illustration des solutions créant une capacité de survie dans les véhicules blindés. Fournie pour divulgation publique par le directeur – Besoins en ressources terrestres 3.

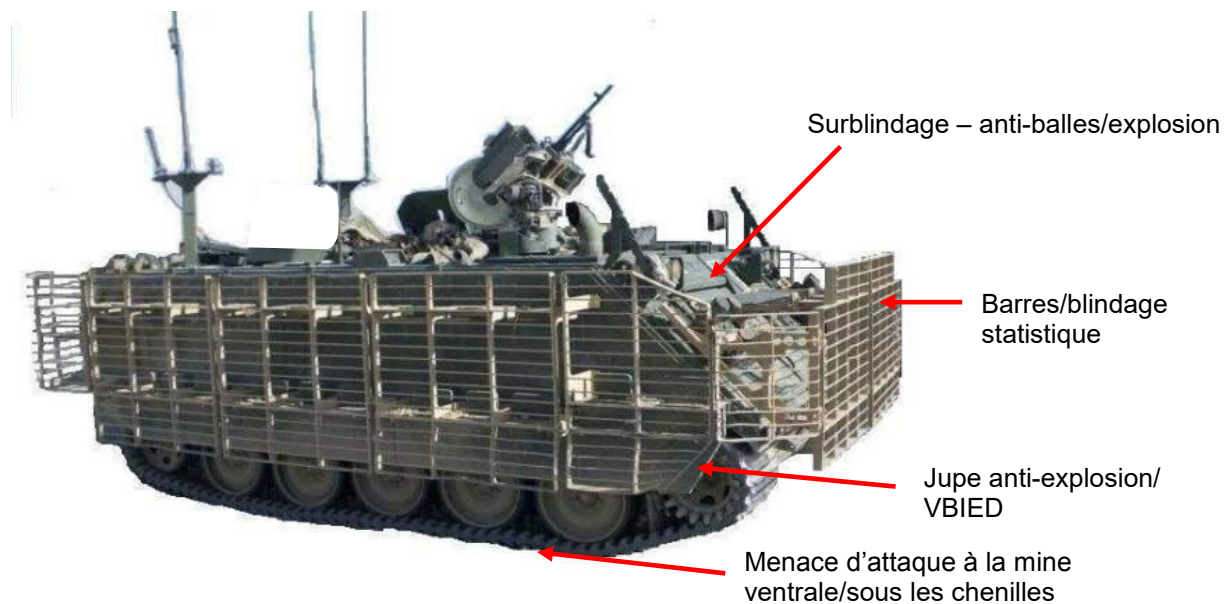


Figure 14 : Éléments qui augmente la capacité de survie des véhicules blindés sur le terrain (fourni pour diffusion publique par le directeur, Besoins en ressources terrestres 3)

Équipement de protection individuelle

L'EPI destiné aux militaires et agents de la paix offre une protection contre tout un éventail de menaces et de blessures allant des coups de couteau et des chutes à la protection contre les projectiles d'armes à feu, les éclats et la surpression. Le Tableau 1 et la Figure 15 décrivent les différents types d'EPI et leurs applications.

Tableau 1 : Types d'équipement de protection personnelle et applications typiques

Zone protégée	Genre d'EPI	Atténue les effets de...
Tête	Casque de combat/de premier répondant	Impacts d'objets contondants, éclats, projectiles d'armes de poing, projectiles de carabines, surpression/impulsion causées par une explosion, chaleur/flammes
	Casque d'équipement de NEM	Impacts d'objets contondants, éclats, surpression/impulsion causées par une explosion, chaleur/flammes
	Visières/lunettes de protection	Éclats, chaleur/flammes, surpression, impact d'objets contondants, effets environnementaux
Torse	Veste de protection balistique et anti-éclats (blindage souple)	Éclats, projectiles d'armes de poing, impacts d'objets contondants, coups de couteau, de pic
	Plaques balistiques (blindage rigide)	Projectiles d'armes à feu à haute vitesse, éclats lourds à haute vitesse, surpression/impulsion causée par une explosion
	Boucliers	Impacts d'objets contondants, projectiles d'armes de poing, éclats, coups de couteau, de pic, chaleur/flammes
	Combinaison de NEM	Éclats, surpression/impulsion causée par une explosion, impact, chaleur/flammes
Membres	Blindage de protection des épaules, des bras, des genoux et des tibias (blindage souple)	Coups de couteau/coups de barres, éclats, chaleur/flammes
	Combinaison de NEM	Éclats, impact, chaleur/flammes, surpression

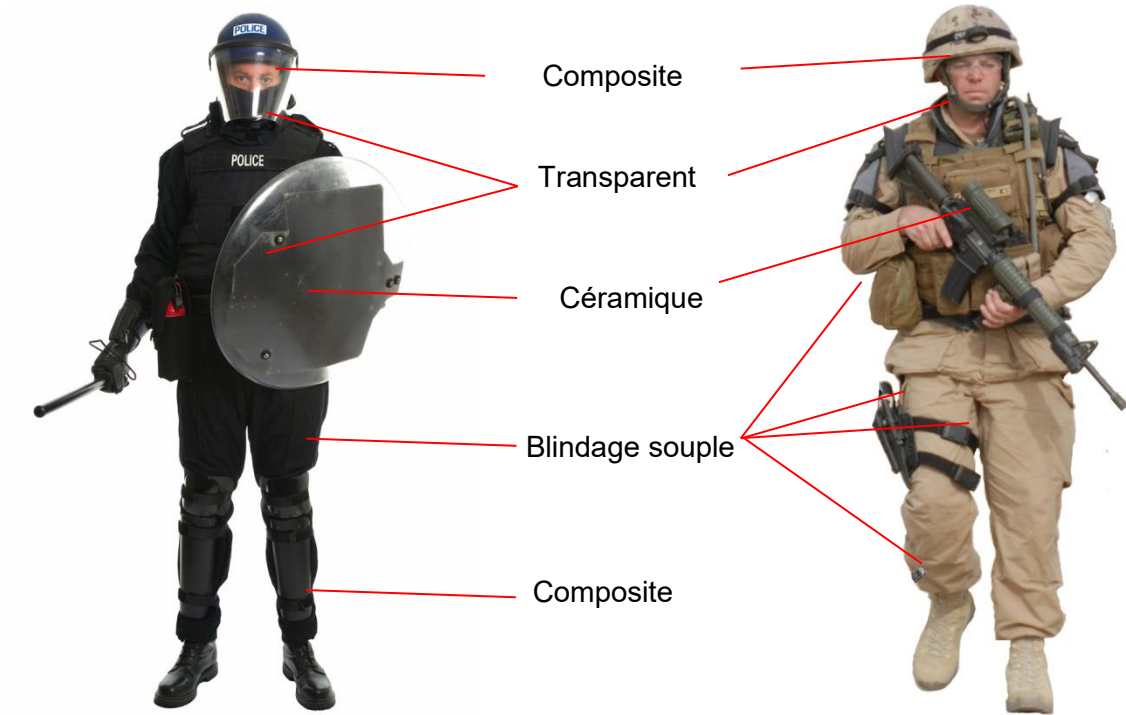


Figure 15 : Équipement de protection individuelle – applications militaires et policières

Défis techniques

Pour atteindre les cibles de rendement et répondre aux exigences dictées par les forces opérationnelles et les forces du marché, un certain nombre de défis techniques doivent être surmontés. La présente section décrit les 11 défis techniques qui ont été désignés comme prioritaires pour que les systèmes de blindage actuels et à venir répondent aux exigences de rendement.

Allègement

Les actuels systèmes de blindage opaque et transparent imposent un lourd fardeau à l'utilisateur (véhicule ou personne), ce qui nuit à son rendement et, plus particulièrement, à sa mobilité. Les matériaux de blindage transparent sont les matériaux de protection de haute performance offrant le pire ratio poids-efficacité parmi ceux actuellement utilisés dans l'EPI et les blindages de véhicules.

De nouveaux matériaux et procédés pourraient réduire considérablement le poids des systèmes tout en procurant à l'équipage du véhicule ou au porteur de l'EPI une perception accrue de son environnement immédiat (conscience situationnelle). Pour accroître le niveau de protection, il faudra assurément des progrès considérables dans la technologie des matériaux.

Développement d'outils de modélisation

Le développement de nouveaux systèmes de protection est long, complexe et coûteux. L'époque où l'on se contentait de tirer des projectiles sur des plaques d'acier de plus en plus épaisses pour en observer les résultats est en effet révolue. Cette méthode n'est plus efficace et on pourrait même avancer que des essais de ce genre sont quelque peu devenus inutiles. La modélisation des nouveaux systèmes de protection deviendra un outil plus important d'itération des solutions préalablement aux étapes de prototypage et d'essais. Le coût et la nature des nouveaux produits sollicitent fortement les ressources limitées de la plupart des organisations. Le recours à la modélisation devrait permettre d'en réduire les coûts et de rehausser la qualité de la conception technique avant de passer à l'étape de la production à grande échelle. Et pour concevoir et commercialiser ces technologies de matériaux plus prometteuses qui sont requises, réduire le temps de développement et les coûts de production, nous devons aussi recourir plus à la modélisation et la simulation. Mais les outils numériques actuels doivent être améliorés pour en bénéficier pleinement. La mise sur pied d'un projet synergique ciblant le développement d'outils de modélisation et leur validation, en comparant les résultats obtenus des modèles à la performance réelle à basse et haute vitesse de déformation de matériaux de blindage et de composants de EPI et de VB, pourrait offrir des réponses intéressantes aux défis ci-haut mentionnés.

Amélioration de l'ingénierie des facteurs humains

L'EPI conçu sans tenir compte de manière appropriée des facteurs humains et sans intégration des systèmes a des retombées négatives sur l'efficacité opérationnelle et, éventuellement, sur la capacité de survie de l'utilisateur. Dans le pire des cas, l'EPI qui n'est pas porté ou qui n'est pas porté de la manière prévue n'offre aucune protection et, dans le meilleur des cas, il offre une protection amoindrie. L'ergonomie, les caractéristiques de transfert (p. ex. chaleur et humidité), le volume, la facilité de mouvement et d'autres facteurs liés à la conception ont un effet direct sur l'acceptation de l'EPI par l'utilisateur et sur son rendement opérationnel. Les exigences liées aux facteurs humains ne peuvent être considérées comme secondaires dans le processus de développement et

d'intégration des technologies liées aux matériaux de blindage de pointe. L'ingénierie des facteurs humains est par conséquent un aspect important de la conception et du développement de l'EPI.

Quantification et conception pour contrer des menaces multiples

Les systèmes de protection actuels sont de manière générale optimisés pour contrer un moyen précis de pénétration. La protection des véhicules contre des menaces multiples a, jusqu'à maintenant, exigé le recours à tout un éventail de systèmes, ce qui alourdit les véhicules, réduit leur mobilité et ajoute de la complexité parce que ces multiples systèmes doivent ensuite être intégrés. Idéalement, un seul système entièrement intégré comprendrait des matériaux capables de contrer un large éventail de menaces, par exemple, les menaces causées par l'énergie cinétique et celles causées par l'énergie chimique.

Le développement de ces systèmes intégrés exigera de comprendre en profondeur la mécanique de pénétration d'une menace donnée et les propriétés des matériaux nécessaires pour contrer cette menace. Il exigera aussi des outils de modélisation et autres outils de conception pour appuyer les analyses d'optimisation du rendement et des compromis nécessaires.

Disponibilité de solutions sur le plan des matériaux

Pour accaparer une part de marché, l'industrie doit être en mesure de déployer les solutions qu'elle propose dans des délais acceptables. Elle doit à cette fin avoir accès à tout un éventail de données : exigences de rendement, effets des menaces et caractérisation des matériaux et systèmes correspondants. Les matériaux sélectionnés doivent être disponibles dans les quantités nécessaires à une production à grande échelle et convenir à des procédés de fabrication offrant un bon rapport coût-efficacité.

L'industrie doit également être en mesure de fabriquer et de tester des prototypes, parfois au moyen d'installations et de munitions d'essai qui ne sont pas sous leur contrôle. Pour relever ce défi, il faudra développer un réseau de science et de technologie qui permettra à l'industrie d'accéder à la fois aux données nécessaires au développement des solutions mises de l'avant et aux installations requises pour les mettre à l'essai.

Réduction des coûts

Le défi consistant à réduire les coûts est triple : contrôle du coût unitaire des systèmes par le développement de procédés de fabrication plus efficaces; réduction du coût des matériaux de base grâce à des économies d'échelle et à l'utilisation de technologies de matériaux à coûts réduits et production de systèmes plus robustes et plus durables susceptibles de réduire les coûts liés au cycle de vie.

Amélioration du rendement

Le cycle continu d'amélioration de l'efficacité des matériaux de blindage et des systèmes d'armement exige d'accroître sans cesse l'efficacité des systèmes de protection tout en gardant le contrôle sur leur coût et leur poids. Le rendement de ces systèmes ne se limite en effet pas à la simple capacité d'arrêter des projectiles de plus en plus gros. Il englobe aussi la nécessité de déployer des systèmes plus robustes et plus durables correspondant aux exigences opérationnelles.

Développement de procédés de fabrication de pointe

L'industrie doit produire des systèmes de blindage à haut rendement, mais elle doit aussi proposer des solutions offrant un bon ratio coût-efficacité. Il est possible de contrôler les coûts en développant, entre autres, des procédés de fabrication plus efficaces s'appuyant sur des outillages nouveaux et réutilisables et des procédures optimisées. Les procédés de fabrication de pointe peuvent aussi conduire à de nouvelles capacités de blindage et de nouvelles fonctionnalités qui rehausseront l'efficacité opérationnelle.

Améliorer/ permettre l'intégration

Il serait possible d'améliorer les méthodes de développement et de fabrication des structures de véhicule et des systèmes de blindage. La principale raison en est que même le meilleur blindage en plaque rapportée doit, d'une manière ou d'une autre, être joint au véhicule comme tel (et par conséquent, il transfère les charges au véhicule). L'élimination des joints de soudure vulnérables aux explosions est un exemple. De plus, l'utilisation de matériaux autres que l'acier et l'aluminium, et notamment de matériaux composites, pourrait aussi accroître la capacité de survie des équipages tout en réduisant le poids des véhicules.

L'intégration de solutions dès l'étape de la conception des véhicules permettra d'obtenir un produit final plus efficace et plus efficient. L'industrie sera alors en mesure d'utiliser au mieux les matériaux de manière à alléger les véhicules et à accroître la couverture de la protection et ainsi augmenter la capacité de survie de l'équipage. L'intégration précoce des systèmes favorisera aussi une meilleure prise en compte d'éléments externes (par exemple, étagères de rangement, capteurs, dispositifs optiques) dès l'étape de la conception.

En ce qui concerne l'EPI, la question de l'intégration comporte également son lot de défis. Nous pensons notamment à la sélection et à l'adaptation des matériaux à chaque utilisateur et aux différentes exigences opérationnelles; à l'optimisation de systèmes hybrides en fonction des besoins de protection, des contraintes de coût, de poids et des facteurs humains; à la création d'outils et d'indicateurs objectifs en appui aux analyses des compromis nécessaires; au développement de concepts pour des systèmes de blindage configurables selon les missions; au développement de matériaux offrant une protection contre des menaces multiples; à la définition des menaces contre lesquelles la protection est nécessaire et l'obtention des propriétés appropriées des matériaux retenus.

Caractérisation multiéchelle des matériaux

La caractérisation des matériaux sert à quantifier les caractéristiques d'un matériau (sa composition et sa structure bien sûr, mais aussi ses défauts internes) qui sont significatives pour une application donnée et qui sont suffisamment claires et complètes pour être reproduites. Les matériaux peuvent être caractérisés uniquement en fonction de leur chimie, de leur microstructure et des défauts engendrés lors de la fabrication.

Tout comme l'existence des technologies des matériaux appropriées est un facteur habilitant crucial, la caractérisation plus efficace et plus précise des matériaux est un aspect important du processus qui permettra de déterminer rapidement et efficacement le potentiel d'un éventail de matériaux susceptibles d'être utilisés dans des applications de blindage et d'étayer l'analyse des compromis nécessaires et les défis d'intégration.

Matériaux à usages multiples

Au moment de sélectionner les matériaux pour la conception et la fabrication des systèmes de blindage, l'intention devrait toujours être de choisir ceux qui sont susceptibles d'offrir non seulement la protection recherchée, mais qui répondent aussi à d'autres exigences fonctionnelles ou opérationnelles, notamment en minimisant le poids et l'encombrement. De tels produits peuvent émerger de solutions multi-matériaux pouvant contrer tout un éventail de menaces (par exemple, énergie chimique et énergie cinétique) ou servir au stockage ou à la transformation de l'énergie, aux communications, à l'autodiagnostic ou à la gestion de la signature.

Solutions technologiques

Les participants à l'atelier sur la CTCMS ont défini un ensemble initial de neuf plateformes technologiques susceptibles d'offrir des pistes immédiates pour la résolution des problèmes techniques et qui pourraient permettre de répondre aux exigences de rendement des systèmes de blindage de l'avenir. La présente section décrit ces solutions technologiques et comprend aussi une exploration de l'état de l'art, des difficultés connexes et des applications possibles dans le domaine du blindage.

Technologies de fabrication – Projection d'oxycombustibles à vitesse élevée (HVOF), pulvérisation à froid et fabrication additive

La projection d'oxycombustibles à vitesse élevée (high velocity oxygen fuel - HVOF) est une technologie de projection thermique de revêtement qui permet d'appliquer un revêtement dur et dense de métaux purs, d'alliages métalliques, de cermet et de certaines céramiques et de certains polymères sur un substrat de grande surface avec une efficacité de dépôt élevée à des températures et des pressions normales. Le matériau de revêtement, qui se présente sous forme de poudre, est introduit dans la chambre de combustion d'un pistolet de projection où un carburant, comme de l'hydrogène, du kérosène ou de l'éthylène est brûlé avec de l'oxygène et d'où les poudres chauffées et ramollies sont expulsées sous forme de jet pulvérisé au moyen d'un jet de gaz supersonique (voir Figure 16). La technique HVOF est le processus de projection thermique privilégié pour remplacer le placage au chrome dur parce qu'elle produit des revêtements à très faible porosité (<1 %) et très adhérents (résistance d'adhésion >50 MPa) qui ont généralement une teneur en oxyde inférieure à 1 %, même pour les métaux réactifs. Cette méthode présente par ailleurs des avantages sur le plan de la santé et de la sécurité comparativement au placage au chrome dur.



Figure 16 : Pistolet de projection HVOF en action (à gauche) et revêtement de cermet épais appliqué par HVOF sur un alliage d'aluminium à haute résistance (à droite).

Les cermets CrC-NiCr et WC-CoCr dont le revêtement est appliqué au moyen de la technologie HVOF constituent deux des principaux matériaux à base de carbone utilisés pour accroître la résistance à l'usure, à l'érosion et à la corrosion (même dans des utilisations à température élevée) dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de la pétrochimie. Les revêtements à haute densité et très durs (comme ceux des cermets) qui ont été appliqués par HVOF peuvent avoir des applications dans le secteur de la défense en rehaussant l'efficacité des composantes d'un système de blindage (lorsqu'ils sont par exemple appliqués sur un désintégreteur ou un absorbeur) ou lorsqu'ils servent de revêtement intercouches susceptible de répartir plus efficacement la propagation de l'onde de contrainte à partir du point d'impact d'un projectile. Dans ce scénario, le revêtement de cermet appliqué par HVOF est une solution possible pour la conception de blindage composite multicouche

(face d'impact en céramique/intercouche en cermet/plaque absorbante en métal) offrant un rendement balistique amélioré.

La projection à froid est un procédé de revêtement qui consiste à propulser au moyen d'une buse de projection convergente/divergente un gaz chauffé et comprimé dans lequel des particules de poudre sont introduites simultanément. Le gaz propulseur amène la vitesse des particules de poudre à des niveaux supersoniques dans leur trajectoire vers le substrat choisi. À l'impact avec le substrat, les particules subissent une déformation plastique, adhèrent à la surface et forment un revêtement (procédé en phase solide). L'énergie cinétique des particules, produite par l'expansion du gaz, est convertie en énergie de déformation plastique pendant l'adhésion au substrat. Un large éventail de matériaux métalliques, de cermet et de polymères peuvent successivement être déposés à des taux et des efficacités élevés tout en offrant suffisamment de souplesse dans le choix des substrats (par exemple, métaux ou composites). Les revêtements projetés à froid sont très denses (proches de la densité volumique du matériau) et la résistance d'adhérence entre le matériau déposé et le substrat dépasse habituellement les valeurs de résistance des colles ou autres adhésifs utilisés pour préparer les spécimens des essais de tension (par exemple, 70 MPa).

Comme on peut le voir à la Figure 17, le pistolet de projection à froid est joint à un robot (processus automatisé) capable de mouvements extrêmes, ce qui permet d'appliquer un revêtement sur des pièces de forme complexe. La résolution du jet et les taux de dépôt peuvent être réglés en modifiant certains paramètres du procédé comme la distance et l'angle de projection et la vitesse de déplacement du robot (du chalumeau). La projection peut notamment servir à l'application d'un revêtement uniquement sur certaines zones choisies d'un profilé métallique estampé ou sur d'autres formes géométriques complexes sans avoir à procéder à de longues opérations de préparation de la surface ou de masquage. Ces caractéristiques font de cette technologie une candidate importante pour la fabrication additive.

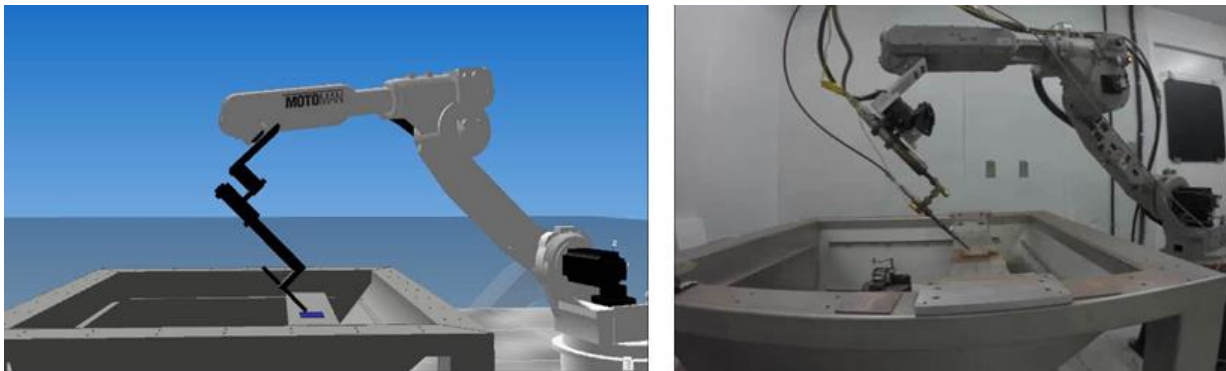


Figure 17 : Pistolet de projection à froid fixé à un bras robotisé : (à gauche) simulation informatisée de la zone de projection et (à droite) pistolet en action

Les solutions de projection à froid développées par le CNRC (Figure 18) répondent aux besoins de différents secteurs de l'industrie : revêtements anti-usure à base d'acier pour les pièces d'auto en aluminium utilisées pour alléger les automobiles; revêtements d'outils à haut rendement; remise à neuf et réparation de pièces d'aéronefs; couche d'adhérence pour les barrières thermiques dans les turbines à gaz stationnaire et celles utilisées pour les moteurs d'avions et revêtements anti-usure pour les composantes de moteurs, entre autres.

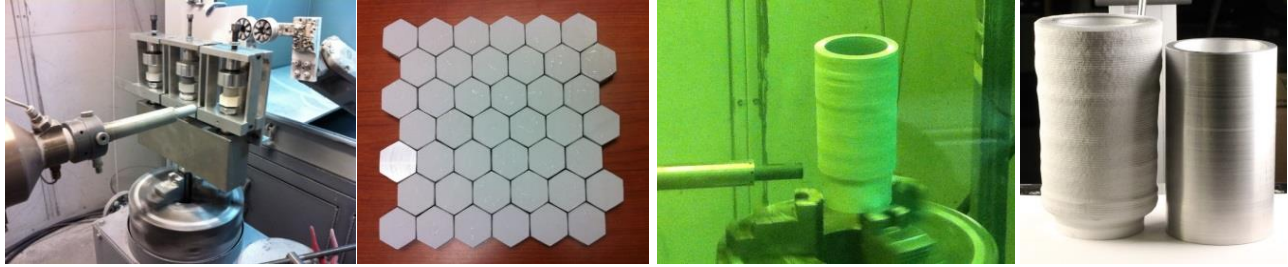


Figure 18 : Appareils de projection à froid développés à l'interne par le CNRC pour appliquer des revêtements sur des tuiles de céramique hexagonales et des tuiles métalliques encapsulées (à gauche); boîtiers métalliques usinés grâce à des revêtements pulvérisés à froid (à droite)

Plus récemment, la technologie de projection à froid a été utilisée dans des applications militaires (production de revêtements et de pièces). Une de ces applications consistait à confiner des tuiles de céramique (par exemple, Al_2O_3) dans un revêtement d'aluminium pulvérisé à froid afin de générer des contraintes résiduelles de compression, permettant ainsi à la surface d'impact d'un désintégrateur de mieux résister à plusieurs impacts d'affilé (résistance multi-impact). La technique de revêtement par projection à froid a un effet minime sur l'oxydation ou la transformation de phase des composantes pulvérisées (processus à basse température) et empêche les effets délétères sur les composants d'un blindage susceptibles d'être créés par d'autres techniques. Il a été démontré que la projection à froid peut être utilisée pour intégrer des tuiles avec revêtement dans une architecture de blindage à composantes multiples (par exemple, céramique/plaque arrière). La projection à froid peut aussi être utilisée pour modeler des pièces structurales en matériau énergétique entrant dans la composition d'enveloppes de charge explosive qui peuvent contribuer à accroître l'énergie libérée par le souffle à travers les fragments, soit en réagissant rapidement après la détonation ou juste au moment de l'impact avec la cible.

Caractérisation et essais

La capacité des modèles informatiques actuels de prédire les phénomènes de la physique des chocs dans les études d'impact et les études balistiques auxquels on recourt pour sélectionner les matériaux de blindage et concevoir les systèmes de protection dépend des modèles de comportement des matériaux, des équations d'états et des propriétés utilisées comme intrants pour la simulation. Les propriétés requises par ces modèles et par les équations utilisées dépendent de la vitesse de déformation. En conséquence, pour obtenir des simulations numériques précises, les machines d'essais servohydrauliques à haute vitesse et les barres de Hopkinson (*Split Hopkinson Pressure Bar* – SHPB) sont deux des méthodes de caractérisation qui permettent d'établir avec précision les paramètres pertinents des matériaux.

Une connaissance détaillée des caractéristiques de déformation et du comportement à la rupture des matériaux considérés pour des applications de blindage est cruciale pour choisir, optimiser et intégrer les matériaux en un système de protection efficace conçu pour contrer une menace donnée. Le comportement des matériaux dans les conditions de chargement dynamique habituellement présentes dans des situations de chocs et d'impacts dépend de la vitesse de déformation, de l'écroutissage et des effets du ramollissement thermique. Pour de nombreux événements de choc et d'impact balistique, la vitesse de déformation peut être aussi élevée que 10^6 s^{-1} .

Par conséquent, afin de bien caractériser un matériau, en considérant sa nature et les conditions de chargement, une combinaison d'essais quasi statiques, à vitesse de déformation intermédiaire et à vitesse élevée doit être effectuée. L'utilisation d'un matériau dont les propriétés sont inadéquates à la vitesse de déformation en cause peut conduire à des systèmes inefficaces, ou encore pire, à des systèmes de blindage inefficaces.

La plupart des essais de caractérisation sont effectués en situation de cisaillement, de torsion, de tension ou de compression ou en utilisant une combinaison de ces modes de charge à différentes températures lorsque les effets thermiques ne sont pas négligeables. On utilise couramment les SHPB pour caractériser le comportement des matériaux à vitesse de déformation élevée. Un exemple de SHPB est donné à la Figure 19. Cette technique s'ajoute à celles quasi statiques plus courantes et mieux connues qui s'appuient sur des machines d'essais universelles, soit mécaniques ($0,1 \text{ s}^{-1}$), soit servohydrauliques qui permettent de solliciter les matériaux à des vitesses de déformation un peu plus grandes ($0,1 \text{ s}^{-1}$ à 10^2 s^{-1}).



Figure 19 : Laboratoire des barres de Hopkinson (barres de pression) de RDDC

Un système à barres de Hopkinson comprend un percuteur, une barre entrante et une barre sortante, comme on peut le voir à la Figure 20. Les barres sont habituellement fabriquées d'acier à haute résistance mécanique. Le principe de base des barres de Hopkinson est fondé sur l'hypothèse que des ondes élastiques non dispersives se déplaceront dans les barres de pression et que, à tout le moins à des impédances élevées, des matériaux homogènes, comme le sont la plupart des métaux, le spécimen se déformera uniformément. Dans une expérience typique SHPB, le percuteur frappe la barre entrante et une onde de contrainte élastique de compression est générée et se propage dans la barre entrante. Lorsque cette onde de compression atteint l'échantillon, elle est partiellement transmise à la barre sortante et partiellement réfléchi vers la barre entrante sous forme d'une onde de tension. Des jauges de déformation, fixées au milieu des barres entrante et sortante, mesurent la vitesse de déformation.

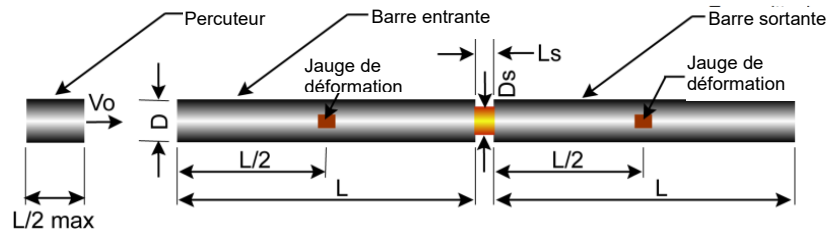


Figure 20 : Exemple d'impacteur, de barre entrante et de barre sortante

Les contraintes et déformations dans l'échantillon sont ensuite calculées en considérant le rapport entre l'amplitude des ondes de choc incidente, transmise et réfléchi. La Figure 21 donne un exemple de la contrainte exercée sur la barre entrante à la suite de simulations de tests SHPB sur des échantillons d'aluminium 6061 T6 percuteurs à cinq vitesses différentes par le percuteur. La Figure 22 donne un exemple de la réponse de l'échantillon à la traction/compression sur un éventail de vitesses de déformation obtenues au cours de tests SHPB effectués sur un autre matériau.

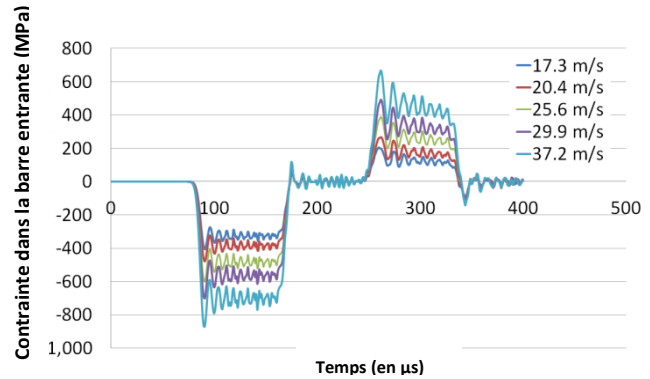


Figure 21 : Simulations numériques des tests de compression des barres de Hopkinson pour AL 6061 T6

Obtenir la réponse contrainte-déformation de matériaux non homogènes à faible impédance est plus complexe parce que l'hypothèse 1-D utilisée dans une analyse SHPB standard n'est plus valide. Cependant, depuis quelques années, grâce à des analyses plus complexes s'appuyant sur des instruments de pointe, sur des systèmes de mesure par caméras et sur l'utilisation de barres polymériques, il est maintenant possible de caractériser des matériaux comme les polymères et les composites polymériques. Mais de nouveaux investissements en S-T sont nécessaires dans ce domaine pour accroître les capacités.

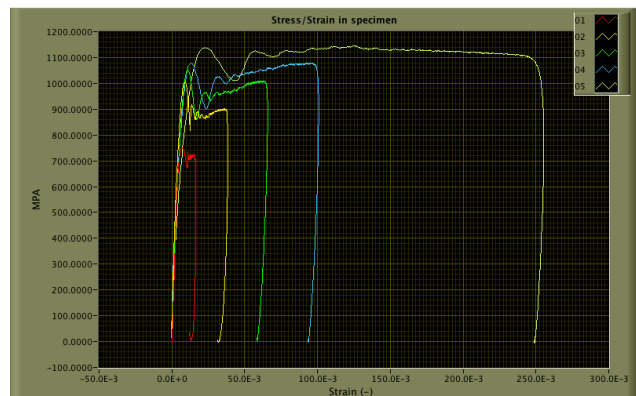


Figure 22 : Caractérisation par SHPB de la réponse du matériau à la traction/compression en fonction de la vitesse de déformation



Figure 23 : Machine d'essais à haute vitesse du CNRC

Même si les techniques SHPB ont été utilisées pour mesurer les propriétés dynamiques des matériaux au cours des 50 dernières années, elles ne conviennent pas pour des vitesses de déformation allant de faibles à intermédiaires ($<200 \text{ s}^{-1}$). En effet, la littérature scientifique montre une lacune évidente au niveau de la caractérisation des matériaux en régime intermédiaire. Ce problème est surtout imputable à l'absence d'installations appropriées et de techniques fiables. Les machines d'essais mécaniques ne sont pas suffisamment rapides et les systèmes de contrôle des machines hydrauliques ne sont pas à la hauteur de la tâche à l'extrémité supérieure de cette gamme de vitesses intermédiaires. Le développement récent de machines servohydrauliques (voir Figure 23), qui permettent d'atteindre des vitesses de déformation intermédiaires, ouvre la porte à la caractérisation des matériaux sur l'ensemble de la plage de réponses dynamiques auxquelles les systèmes de blindage et les matériaux de blindage sont susceptibles d'être assujettis.

Les matériaux soumis à des chocs et des impacts sont difficiles à caractériser et une variété de méthodes sont utilisées pour les étudier. Les tests balistiques et les simulations et analyses numériques fondées sur la physique sont nécessaires. Cet aspect de la technologie est étroitement lié au volet des simulations numériques. Aucune méthode unique (calculs, essais balistiques ou caractérisation dynamique des matériaux) ne mènera à elle seule à une compréhension totale des mécanismes qui régissent le comportement des matériaux et des structures assujettis à des conditions de charge impulsive, soit celles qui sont pertinentes pour les systèmes de protection.

Du point de vue du développement de matériaux de sécurité, une utilisation judicieuse des trois approches susmentionnées pourrait conduire à une amélioration de la compréhension de ces phénomènes ultrarapides. Cette connaissance, à son tour, pourrait être à la base d'améliorations révolutionnaires dans les technologies des matériaux et dans la conception de systèmes de blindage capables d'atténuer les menaces sans cesse croissantes auxquelles les combattants et les premiers intervenants sont constamment confrontés.

Modélisation et simulation

La modélisation et la simulation sont largement utilisées dans des applications d'ingénierie afin de réduire le nombre d'essais nécessaires pour développer et optimiser des systèmes techniques. Cette méthode réduit aussi les coûts liés au développement et aux procédés de fabrication. La modélisation et la simulation peuvent être effectuées au moyen de modèles analytiques ou en utilisant des codes de calcul par éléments finis.

Les modèles analytiques, même s'ils sont peu nombreux, sont plutôt utiles pour examiner les phénomènes physiques dominants se produisant dans les matériaux soumis à des impacts ou des événements balistiques. Toutefois, en ce qui concerne les prédictions, les modèles analytiques, souvent empiriques, sont uniquement utilisables à l'intérieur de certaines limites. Il faut donc prendre des précautions extrêmes pour ne pas violer les hypothèses simplificatrices sur lesquelles se basent les équations. Si une solution complète à un événement hautement dynamique (par exemple, l'élimination d'une menace balistique par un système de blindage) est nécessaire, des simulations numériques fondées sur la physique doivent être utilisées. Le plus souvent, cela exige de recourir à des simulations utilisant des codes informatiques de physique des chocs hydrodynamiques ou « hydrocodes » (également appelés codes hydrodynamiques élastoplastiques).

Un hydrocode peut être défini comme un code fondé sur la physique permettant de résoudre des problèmes de déformation importante et les problèmes transitoires de déformation finie qui surviennent à l'intérieur de périodes très courtes dans le contexte d'un impact à haute vitesse, d'une explosion rapprochée ou d'un impact sur une

GÉOMÉTRIE BIDIMENSIONNELLE AXISYMÉTRIQUE SANS SPIN
Cible axisymétrique du projectile; CASE = 611, TEMPS = 0,00040000;
CYCLE = 32

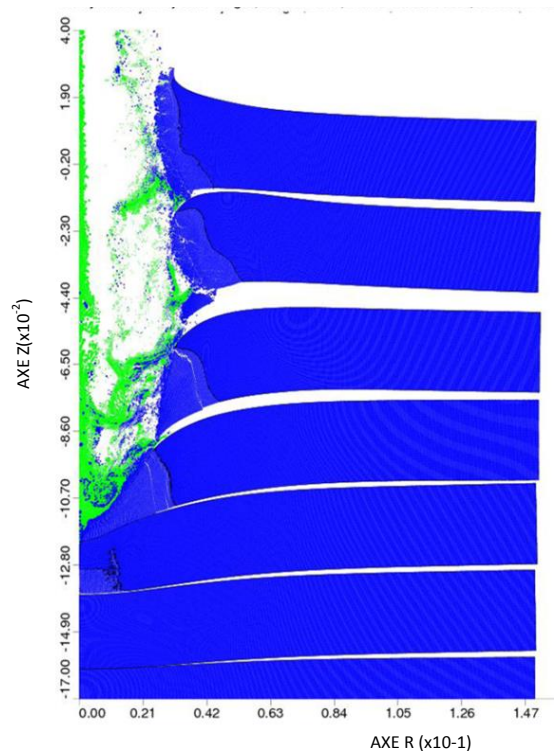


Figure 22 : Impact à haute vitesse d'un projectile en tungstène sur une cible en acier à 2,3 km/s

structure. Un des problèmes typiques d'un impact à haute vitesse, et de pénétration subséquente de la cible, est illustré à la Figure 24. Dans ce cas, la vitesse d'impact du projectile en tungstène est de 2,3 km/s et la cible est fabriquée en acier de blindage homogène laminé (BHL). Même si la résistance du matériau n'est pas nécessairement un facteur important pour la solution, elle est habituellement incluse et ceci est un point qui distingue les hydrocodes des codes généraux de dynamique des fluides. Par opposition aux codes d'analyse structurale, dans les hydrocodes, les équations d'énergie intègrent le temps et la pression, et les termes du déviateur des contraintes sont modélisés séparément. Dans une simulation par hydrocode, la solution progresse par incrément de temps. Par conséquent, les équations qui régissent la réponse du matériau doivent être résolues avec précision aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ces codes (et plus particulièrement les codes plus récents d'analyse par éléments finis) sont appelés codes explicites parce qu'ils utilisent un mécanisme explicite d'intégration du temps pour prendre en charge les ondes de contrainte et les chocs qui font partie de la solution. De manière générale, les activités de recherche et de développement devraient être concentrées autour de trois grands thèmes :

- a) Systèmes numériques nécessaires à la modélisation des matériaux qui entrent physiquement en contact les uns avec les autres et qui sont représentatifs des phénomènes physiques qui se produisent, comme le passage d'une onde de choc.
- b) Modèles de comportement des matériaux et équations d'états nécessaires pour calculer la pression et l'état de contrainte véritable du matériau à mesure que le problème progresse explicitement dans le temps.
- c) Algorithmes de calcul qui modélisent fidèlement l'endommagement ou la rupture des matériaux.

Il est évident que les thèmes b) et c) sont étroitement liés, et que le thème a) englobe les systèmes et modèles mathématiques nécessaires pour numériquement mettre en œuvre b) et c).

Comme nous l'avons décrit précédemment, la limite la plus importante à l'utilisation des hydrocodes n'est ni leur coût ni leur complexité, mais plutôt le caractère insatisfaisant des modèles de comportement utilisés pour décrire la réaction du matériau, son endommagement et sa défaillance dans des conditions de charge dynamique. La réponse du matériau, son endommagement et sa défaillance peuvent être provoqués par tout un éventail de mécanismes qui dépendent de la nature du matériau et de l'état de contrainte, de température, du taux de chargement et de nombre d'autres variables dépendantes. Les méthodes et les résultats de la réponse quasi statique du matériau et de sa fracture sont peu utiles dans des situations de chargement à grande vitesse de déformation que l'on retrouve lors d'un impact ou suite à un événement balistique.

Ainsi, les travaux dans ce volet d'activité ont pour but de faire des recherches sur l'utilisation de modèles de comportement pertinents, sur des équations d'états et sur des modèles de défaillance pour simuler le comportement des matériaux dignes d'intérêt dans des

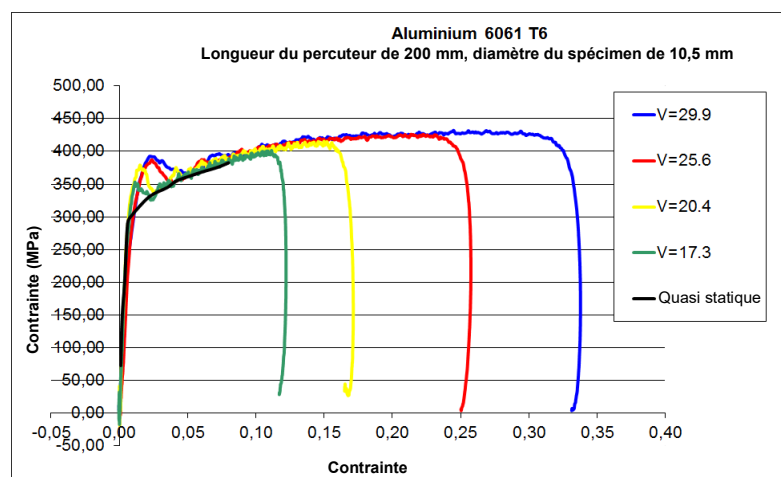


Figure 23 : Caractérisation d'aluminium Al 6061 à vitesse de déformation élevée.

conditions de choc et de chargement balistique. Cela requiert la caractérisation de matériaux à grande vitesse de déformation sur une large plage de vitesses de déformation et pouvant aller jusqu'à 10^4 s^{-1} et l'exécution d'expériences pour valider l'utilisation de ces paramètres. La Figure 25 ci-contre montre un exemple d'effet de la vitesse de déformation sur la réponse du matériau. Dans ce cas, les échantillons d'aluminium 6061 T6 ont subi des impacts à quatre vitesses d'impact (m/s) dans le laboratoire SHPB de RDDC. L'idée fondamentale était d'observer le comportement d'un matériau (amplitude de la contrainte, déformation, défaillance) à la suite d'impacts à vitesse moyenne ou élevée pour déterminer les paramètres de la simulation qui permettront de mener des études prédictives du comportement des nouveaux matériaux qui à haut taux de déformation.

En matière de caractérisation et d'essais, aucune méthode (calculs, essais balistiques ou caractérisation dynamique des matériaux) ne peut à elle seule conduire à une compréhension complète des mécanismes qui régissent le comportement des matériaux et des structures soumis à des charges impulsives. Il faudra recourir à l'ensemble des trois méthodes susmentionnées.

Polymères et adhésifs

Les polymères se présentent sous différentes formes (matières thermodurcissables, thermoplastiques et élastomères) et sont utilisés dans un large éventail d'applications de blindage soit comme matériaux de base (par exemple, matériaux de blindage transparent et mousses), soit en tant qu'adhésifs ou soit en tant que matrices dans les matériaux composites. Les polymères thermoplastiques amorphes comme le polyméthyle-méthacrylate (PMMA) et le polycarbonate (PC) sont couramment utilisés dans des applications où la transparence est cruciale (par exemple, blindage transparent utilisé aussi bien pour l'EPI que le BV).

Même si des structures transparentes multicouches (par exemple, structures PC/PMMA à deux couches) ont été commercialisées avec succès, l'optimisation des structures blindées multicouches demeure encore en émergence (niveau de maturité technologique [NMT] ~ 5 à 8). Les travaux d'optimisation portent notamment sur l'épaisseur des couches et sur l'adhérence interfaciale des différentes couches (par exemple, collage direct ou collage par élastomère thermoplastique).

Le recours aux nanotechnologies pour améliorer les blindages transparents, par exemple en utilisant des nanoparticules optiquement transparentes comme les nanotubes de nitrures de bore (NTNB), est encore relativement récent (NMT ~ 1 à 3). Les NTNB pourraient influencer plusieurs des caractéristiques des blindages transparents tout en offrant des mécanismes d'accroissement de la capacité d'absorption de l'énergie, d'augmentation de la dureté des couches extérieures et d'amélioration des autres fonctions (par exemple, la stabilité thermique, la résistance aux rayures, les propriétés antibuée, les captations et l'auto-réparation). La Figure 24 décrit les applications des polymères et des adhésifs dans le secteur de l'EPI et des BV dans lesquels les connaissances et les compétences du CNRC pourraient générer un avantage concurrentiel.

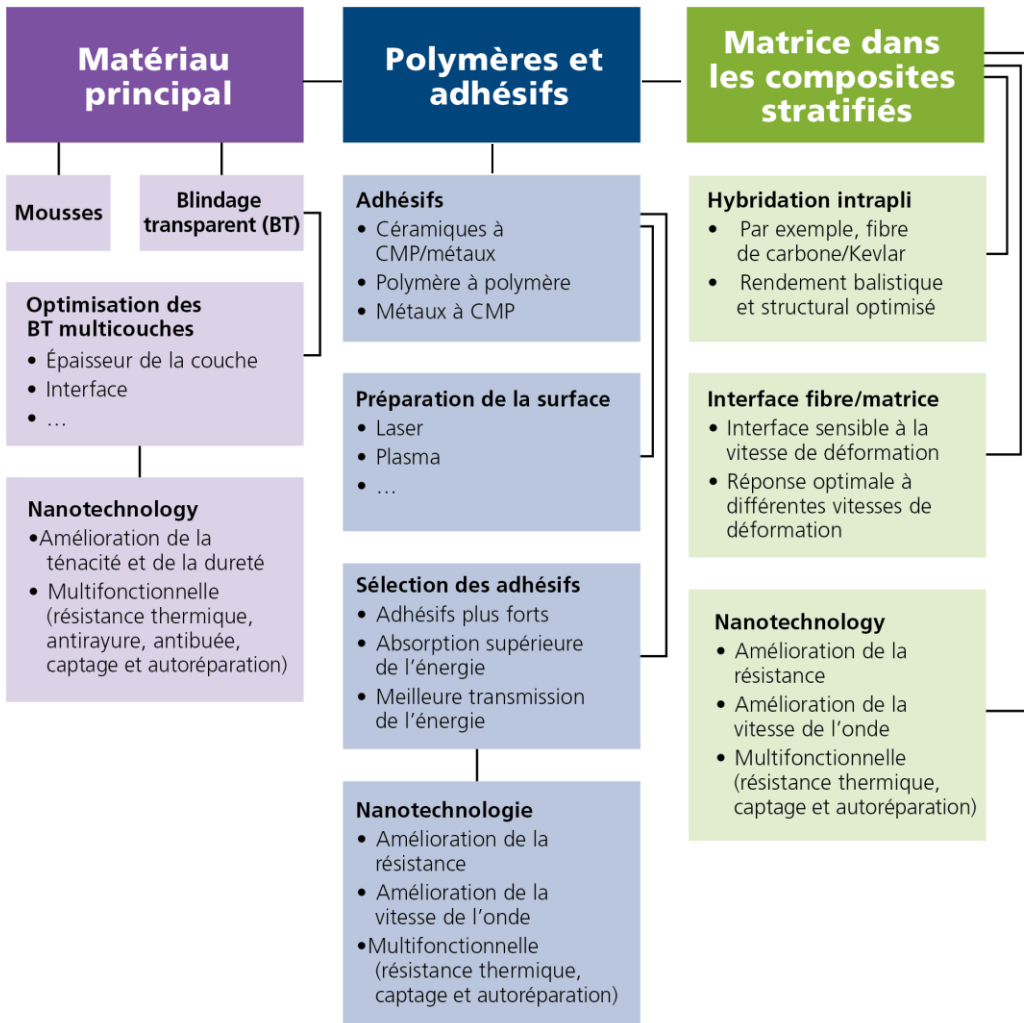


Figure 24 : Applications au blindage des technologies de polymères et de collage

Le principal avantage des systèmes de blindage céramique/composite à matrice polymère (CMP) par rapport aux systèmes traditionnels métalliques ou métallique/CMP est leur résistance élevée à la pénétration et une faible densité. Toutefois, la résistance limitée de ce système à des impacts multiples constitue un de ses principaux inconvénients. Des études ont démontré que cette performance balistique réduite est dans une large mesure imputable à l'efficacité du joint de collage et, en l'occurrence, à trois facteurs différents : mauvaise adhérence entre la plaque de céramique et le matériau de support, transmission limitée de l'énergie et capacité d'absorption de l'adhésif.

Le développement de techniques de préparation de surface de pointe pour le collage (par exemple, préparation de la surface au laser et par plasma) et la sélection judicieuse des adhésifs (par exemple, adhésifs améliorés par les nanotechnologies ou offrant une vitesse de propagation de l'onde améliorée et comparable à celle de la couche de céramique) par rapport aux adhésifs traditionnels (par exemple, époxy et polyuréthane) pourraient améliorer le rendement obtenu (par exemple, pour les chargements quasi statique, à faible et à haute vitesse d'impact ou en régime balistique) de l'équipement de protection individuelle et du blindage de véhicules (grâce à un blindage multicouche ou « système de blindage »). Bien que la recherche en ce domaine en soit encore aux toutes premières étapes (le CNRC possède actuellement des compétences internes en ce domaine), les connaissances acquises pourraient au bout du compte être transférées à des

partenaires au sein de l'industrie canadienne pour qu'ils puissent fabriquer au Canada des produits concurrentiels à l'échelle internationale.

Outre le traitement des surfaces et l'utilisation d'adhésifs disponibles sur le marché, de nouveaux concepts s'appuyant sur des adhésifs renforcés par des nanomatériaux pourraient créer des avantages additionnels. Mentionnons, entre autres, une amélioration de la résistance aux chocs, une meilleure dissipation des ondes et la création d'une multifonctionnalité grâce, entre autres, à une amélioration de la résistance thermique, à des capteurs intelligents et à des capacités d'auto-réparation, même si ces technologies en sont actuellement aux toutes premières étapes de leur développement (NMT ~ 2 à 4). Les technologies de collage fondées sur des nanomatériaux sont actuellement étudiées très intensivement dans d'autres secteurs, notamment dans ceux de l'aérospatiale, des articles de sport et de l'automobile. Par conséquent, les technologies applicables à l'EPI et au BV pourraient bénéficier des progrès accomplis dans ces secteurs.

Aujourd'hui, les systèmes de blindage CMP possédant des capacités élevées d'absorption de l'énergie et une faible densité sont largement utilisés pour des applications d'EPI et de BV. Les blindages au CMP offrent une protection qui va au-delà de la protection contre les éclats et les menaces balistiques, soit les menaces qui ont stimulé le développement de l'EPI dans le passé. Les besoins accrus de protection contre les traumatismes contondants contribuent à l'amélioration de la performance des matériaux composites utilisés dans les équipements de protection comme les casques de combat. De nouvelles exigences touchant l'EPI, comme la protection faciale, sont également introduites, mais un stratifié pouvant résister efficacement à des impacts contondants est à l'opposé d'un stratifié optimisé en fonction des exigences balistiques.

Il existe plusieurs moyens de rencontrer à la fois les exigences structurales et balistiques. Nous songeons notamment à la gradation fonctionnelle des propriétés des matériaux afin d'optimiser l'absorption d'énergie et la densité surfacique en situation d'impact balistique (par exemple, gradation du taux de matrice et hybridation des couches – hybride interpli), combinaison de fibres de carbone et de fibres aramides à l'intérieur d'un même pli – hybride intrapli – pour obtenir les propriétés mécaniques et de résistance aux impacts balistiques recherchées au plus bas poids possible (efficacité massique), et optimisation de l'interface fibre-matrice au moyen de polymères thermoplastiques.

Le NMT des composites hybrides carbone et Kevlar® est actuellement estimé comme allant de moyen à élevé (~ 5 à 8). En ce qui concerne les solutions à long terme pour réduire le poids du blindage et améliorer son rendement, il faudra développer et intégrer des matériaux avancés. Les avancées au niveau des matériaux issus des nanotechnologies montrent beaucoup de potentiel pour la création de fibres et de tissus offrant un rendement balistique spectaculairement amélioré, surtout grâce aux nanotubes de carbone (NTC). Même si aucune entreprise canadienne ni aucun institut de recherche canadien ne participent actuellement à des travaux sur les technologies des fibres, le CNRC mène actuellement des recherches actives sur des tissus à base de NTC ou de NTNB. Le NMT de ces technologies est cependant estimé comme allant de bas à moyen (NMT ~ 1 à 5). Le développement de matériaux composites améliorés grâce à la nanotechnologie, également connus comme les matériaux composites hybrides ou hiérarchiques, est susceptible d'offrir un rendement structural supérieur à celui des composites CMP grâce à la modification des matrices (par exemple, accroissement de la ténacité des résines ou amélioration de l'interface résine-matrice en offrant un rendement structural et balistique optimisé) ou de permettre la fabrication de structures composites multifonctionnelles (par exemple, amélioration des caractéristiques thermiques et des possibilités d'autocapture et d'auto-réparation). Selon les estimations, ces technologies sont encore cependant aux premières étapes de leur développement (NMT ~ 1 à 4).

Céramiques

Les principaux objectifs du programme TMS consistent à accroître le ratio poids-efficacité des produits blindés, de faciliter le transfert des technologies de blindage vers l'industrie et de développer des partenariats de recherche et de développement efficaces au Canada. Il existe actuellement un besoin pressant de produire des blindages plus résistants et plus légers offrant une protection balistique accrue aux personnes et aux véhicules tactiques. Les céramiques utilisées dans les blindages sont supérieures à la plupart des matériaux sur le plan de la dureté, de la densité et de la stabilité dans des environnements difficiles. Les technologies de blindage en céramique sont essentielles à l'allègement des systèmes actuels et à venir de blindage militaire et essentielles au maintien de la compétitivité mondiale de l'industrie canadienne des matériaux de sécurité.

Pour que le matériau réponde aux exigences des applications de blindage, il est nécessaire d'en optimiser les propriétés. Il faut notamment améliorer sa capacité de contrer les menaces et de résister aux impacts multiples, et démontrer sa fiabilité par des essais prolongés sur le terrain effectués par les utilisateurs finaux, et mettre au point des technologies de production offrant un bon ratio coût-efficacité afin de faciliter l'acceptation de la technologie (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Exemples de défis de R-D à relever en ce qui concerne l'amélioration des blindages en céramique

Aperçu des développements requis par les blindages de céramique	
Développement et fabrication (NMT 6/7)	Technologie des poudres : pressage à chaud, frittage sans pression, pressage isostatique à chaud
	Mélange avec des NTC/NTNB
	Essais non destructifs/caractérisation
	Développement de capacité
	Blindage de céramique intégré
	Fibre céramique et matériaux tridimensionnels
	Stabilité des nanotubes
	Mécanismes de renforcement
Sélection/essai/vérification (NMT 3/4)	Test d'impact : chute/pendule de Charpy/choc en traction
	Résistance à la pénétration
	Méthode de l'anneau
	Caractérisation et microscopie
Certification et essai sur le terrain (NMT 8/9)	Démonstrateur de technologie
	Test de déformation rapide (tir)
	Profondeur de pénétration (DoP)
	V ₅₀
	Densité surfacique
Incorporation et intégration (NMT 8/9)	Incorporation dans l'EPI existant, le blindage de véhicules, le blindage de céramique transparent
	Version de service

Voici quelques-uns des principaux défis liés à la recherche sur les céramiques :

- amélioration des propriétés mécaniques fondamentales pertinentes au rendement du blindage;
- développement de matériaux de blindage en céramique et de méthodes de fabrication;
- caractérisation des propriétés mécaniques à des vitesses de déformation rapides et en pression;
- compréhension des mécanismes de pénétration et de défaillance dans les céramiques;
- définition des critères de rendement et des essais balistiques.

Les quatre paramètres clés de rendement (thèmes) qu'il faut améliorer en ce qui concerne les céramiques utilisées dans les blindages sont la capacité de résister aux impacts multiples, la ténacité, la réduction du poids et l'intégration de la céramique aux autres couches du système de protection et l'amélioration de son adhérence (voir Figure 27).

Tout comme le blindage opaque, les systèmes de blindage transparent utilisent des couches constituées de différents matériaux pour fragmenter et absorber l'énergie cinétique des projectiles. Cependant, il est essentiel d'apporter une grande attention à la construction et au jumelage des différentes couches du blindage. La face d'impact, le support, et les couches de liaison devraient avoir un indice de réfraction très similaire afin de permettre une transparence maximale. Les systèmes de blindage transparent ont aussi tendance à se détériorer prématurément et leur surface tend à s'endommager facilement, ce qui opacifie le blindage lorsqu'il est employé dans un environnement sablonneux. La résistance aux rayures, à la buée et à la flexion est également un point qui a été relevé comme exigeant des améliorations majeures.



Figure 25 : Quatre thèmes clés d'amélioration des céramiques utilisées dans le blindage

Les principaux obstacles et les principales difficultés auxquels se heurtent autant les entreprises du secteur des blindages opaques que celles du secteur des blindages transparents ont trait à l'absence au Canada d'une industrie de fabrication de base de céramique de pointe, à l'absence de mesures d'incitation aux investissements dans la recherche fondamentale ainsi qu'aux cycles de croissance et de contraction du marché de la défense qui relève de décisions politiques.

Pour optimiser le rendement financier des investissements nécessaires dans la recherche sur les céramiques de pointe et dans l'infrastructure, il faut que ces céramiques trouvent des applications ailleurs que dans le secteur canadien du blindage. Heureusement, des percées récentes du CNRC en ce qui concerne la fabrication de masse et l'intégration des NTC et des NTNB dans les céramiques ont conduit à une amélioration de la ténacité. Ceci pourrait contribuer à l'optimisation du rendement des investissements dans la recherche sur les céramiques de pointe et dans les infrastructures requises. On constate également une augmentation de la demande de céramiques industrielles légères, dures et capables de résister à des températures élevées pour le secteur de

l'aérospatiale (moteurs), de l'énergie (turbines terrestres) et des piles à combustible, ce qui justifie des investissements en capital pour le développement de composites à matrice céramique (CMC).

La ténacité doit être accrue pour améliorer la résistance aux impacts multiples. Toutefois, cela diminue habituellement la résistance à un impact unique car les autres propriétés mécaniques sont alors affectées (par exemple, dureté/résistance en compression). La difficulté consiste à trouver le bon équilibre entre ces propriétés parfois divergentes.

La ténacité améliorera la capacité de résister aux impacts multiples, mais habituellement, la capacité de résister à un impact unique s'en trouvera réduite puisque les autres propriétés mécaniques seront touchées (par exemple, la résistance en compression). Cela peut être un problème ou non, selon que le blindage est rapporté ou non. Toutefois, si la capacité de résister à un impact unique est réduite de manière trop importante, le blindage de céramique rapporté pourrait ne plus être concurrentiel par rapport à un blindage composite métallique qui offre une meilleure protection en mode d'impacts multiples. La difficulté par conséquent est d'augmenter la ténacité sans pour autant affecter les autres propriétés mécaniques.

*- Yves Baillargeon
Scientifique de la défense, RDDC*

Gestion du cycle de vie et évaluations non destructives

Dans le secteur du blindage, l'évaluation non destructive (END) sert à tester et à inspecter les matériaux de sécurité. Ces deux formes d'évaluation sont connues sous les appellations « test non destructif » (TND) et « inspection non destructive » (IND). Les essais ou tests non destructifs servent de méthode d'assurance de la qualité ou de caractérisation des composantes et des assemblages nouvellement conçus et fabriqués afin de vérifier qu'ils sont conformes aux normes prévues et de s'assurer que les méthodes de fabrication ont été optimisées de la manière appropriée. Pour les matériaux de blindage déjà en service, les techniques d'inspection non destructive sont utilisées pour s'assurer qu'ils maintiennent le même niveau d'intégrité et de performance que celui d'origine. Les inspections non destructives servent aussi parfois à établir la nécessité de réparer ou de remplacer certaines pièces, certaines composantes ou certaines structures. Les évaluations non destructives permettent quant à elles d'exercer une surveillance sur les dommages subis en service et sur la qualité des structures réparées.

Des systèmes de surveillance de l'intégrité structurale (SIS) sont proposés sous forme de réseau réparti de capteurs attachés en permanence ou intégrés à une structure et pourraient être utilisés comme outils d'END *in situ*, au moins pour certaines applications. Les techniques de SIS permettent de surveiller à la fois le rendement des structures de blindage du véhicule et d'évaluer leur état et leur dégradation. Toutefois, la mise en œuvre sur le terrain d'une technique de SIS pour les structures blindées est plus problématique parce que ces systèmes sont parfois endommagés en même temps que la structure dont ils sont censés surveiller l'état.

L'application des techniques de caractérisation non destructives dépend du matériau de blindage utilisé, de la géométrie de la structure et du genre de défektivité recherchée. Les méthodes d'END les plus concrètement applicables aux matériaux de blindage sont les ondes ultrasoniques, la thermographie infrarouge, l'imagerie dans les gammes térahertz, les flux magnétiques et la radiographie.

À l'exception de la méthode d'imagerie dans les gammes térahertz, toutes les autres méthodes mentionnées précédemment sont déjà utilisées à diverses fins et bien connues dans l'industrie. Comme c'est le cas pour la grande majorité des techniques d'END, des procédures adaptées et précises d'essai et d'inspection doivent être développées. Dans d'autres secteurs industriels, les connaissances préalablement acquises contribuent à réduire le délai de mise au point des procédures, mais en ce qui concerne les matériaux et les structures de blindage, l'adaptation et la personnalisation des techniques d'END en sont encore aux phases initiales.

Les évaluations non destructives en service, tant pour le personnel que pour le blindage des véhicules, exigent des techniques efficaces, rapides, à large champ d'auscultation et à accès d'un seul côté. Même si les techniques de radiographie et d'ultrasons conviennent bien aux essais en atelier et en laboratoire, ce ne sont pas des techniques facilement utilisables sur le terrain. La technique d'imagerie dans la gamme térahertz est très prometteuse en ce qui concerne l'évaluation des blindages de céramique. Toutefois, le coût actuel d'un système d'inspection de ce genre est très élevé. La conclusion de partenariats avec des groupes de recherche qui possèdent ou qui louent à long terme ou à court terme de tels systèmes pourrait être une solution de rechange offrant un bon ratio coût-efficacité pour l'instant.

Les méthodes actuelles permettant de déterminer les propriétés et le comportement des matériaux de blindage requièrent des essais mécaniques destructifs qui sont coûteux en main-d'œuvre et en temps. S'il s'agit de déterminer le rendement post-balistique d'un blindage ayant déjà subi des impacts, les techniques de radiographie par rayon X constituent la méthode à privilégier. Toutefois, ces essais ne peuvent être facilement effectués dans les zones de combat, tandis qu'en laboratoire, ils exigent des mesures de protection très strictes contre les radiations. La taille des échantillons examinés est limitée et la méthode exige les services d'experts. L'objectif de RDDC est de découvrir des moyens qui pourront être déployés sur le terrain et qui permettront des inspections rapides et fiables.

Voici un sommaire de chacune des techniques susmentionnées accompagné dans chaque cas d'une indication de son niveau de maturité technologique (NMT) :

Contrôles aux ultrasons

Pour les contrôles aux ultrasons, des ondes à haute fréquence, habituellement dans la gamme MHz, sont dirigées vers le matériau qui doit faire l'objet des tests. Au cours de leur propagation, les ondes à haute fréquence sont assujetties aux phénomènes de réflexion et d'atténuation provoqués par leurs interactions avec les inhomogénéités du matériau, un phénomène qui peut être observé en mode réflexion (c'est-à-dire à travers les échos d'impulsion) et en mode transmission (c'est-à-dire par les différences entre l'impulsion émise d'un côté et reçue de l'autre). Le jumelage du générateur d'ultrasons avec la pièce qui fait l'objet de l'essai constitue un élément crucial de l'évaluation, surtout si les inspections sont effectuées sur des pièces immergées dans l'eau. Toutefois, cela ne représente pas un obstacle à la caractérisation du matériau dans le cas des blindages de céramique, puisque les essais sont effectués en laboratoire. Pour caractériser l'intégrité des blindages de céramique et des blindages métalliques, la technique doit être adaptée à l'environnement sur le terrain et par conséquent, d'autres travaux de développement sont actuellement nécessaires.

NMT : 6

Essais par thermographie infrarouge

La diffusion de la chaleur dans un matériau peut être observée au moyen de capteurs sensibles à la chaleur et fonctionnant dans le spectre électromagnétique à large gamme (milliers de nm en longueur d'onde). La thermographie par infrarouge est une technique sans contact, à accès par un seul côté et permettant des analyses sur des surfaces étendues. Le résultat de ce genre d'inspection est une carte bidimensionnelle de la température à la surface de la composante inspectée. Elle convient mieux à l'inspection des pièces non métalliques dont les propriétés de conductivité de la chaleur sont faibles à moyennes. La technique pourrait permettre de déterminer l'espacement entre les réseaux bidimensionnels de tuiles de céramique et partant de là, à établir l'efficacité du blindage. Même si la méthode possède un niveau de maturité technologique élevé, elle n'est pas souvent appliquée dans ce contexte.

NMT : 5 ou 6

Imagerie dans la gamme térahertz

La technique d'imagerie dans la gamme térahertz est une méthode d'inspection non destructive en émergence utilisée pour évaluer les matériaux non conducteurs (matériaux diélectriques). Elle utilise des rayonnements électromagnétiques dans des gammes de fréquences élevées (GHz ou THz). Pour les matériaux en céramique, elle peut être utilisée pour évaluer des fissures non visibles (ou dissimulées), ainsi que pour détecter les infimes variations d'épaisseur. La technologie en est encore à ses balbutiements. Même si les instruments requis sont déjà disponibles commercialement, pour l'instant, l'imagerie dans la gamme térahertz demeure coûteuse au point d'être prohibitive. La conclusion de partenariats avec des propriétaires et des fabricants de systèmes opérant dans la gamme térahertz pourrait être la prochaine étape appropriée pour l'évaluation de la technologie d'imagerie dans la gamme térahertz à des fins d'inspection de blindage en céramique.

NMT : 3 ou 4

Techniques radiographiques

Les photons (notamment les rayons X et les rayons gamma) et les particules (comme les neutrons) sont utilisés pour inspecter une pièce qui doit faire l'objet d'une évaluation. L'interaction entre les photons/particules et la structure du matériau (absorption, atténuation ou dispersion) produit des images sur un support sensible comme une pellicule photographique ou une plaque d'imagerie. Ces techniques radiographiques sont à maturité, mais dans la grande majorité des cas, elles doivent être utilisées dans l'environnement d'un laboratoire.

NMT : 8 ou 9, mais solution non applicable dans les zones de combat.

Voici quelques-uns des buts des technologies d'évaluation non destructives pour le blindage :

- déterminer de manière non destructive les propriétés mécaniques des matériaux de blindage en céramique, en composite et en métal;
- déterminer les défauts de fabrication dans les tuiles de céramique avant qu'elles ne soient définitivement assemblées dans un système de blindage;
- analyse des tests de chute et de durabilité des blindages en céramique;
- analyse de la capacité de survie (robustesse) des systèmes de blindage.

Nanomatériaux

Même s'il n'existe aucune définition unique internationalement reconnue de ce terme, un nanomatériau peut être décrit de manière assez large comme un matériau dont au moins une des dimensions est inférieure à 100 nanomètres (Figure 28), qui contient des éléments de telles dimensions nanométriques ou qui a été produit au moyen de techniques liées aux nanotechnologies. En raison de cet aspect nanométrique, les propriétés des nanomatériaux peuvent se démarquer spectaculairement d'autres matériaux plus conventionnels. Ils peuvent avoir des effets dans pratiquement tous les secteurs utilisant des matériaux de pointe.

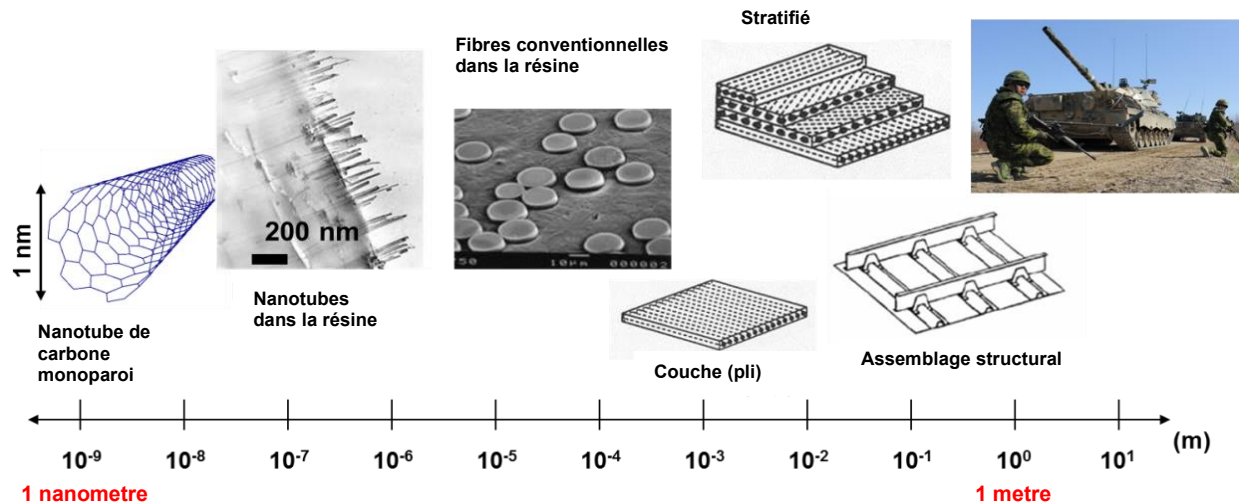


Figure 26 : Échelles de longueur du nanomètre au mètre

Les nanomatériaux ont un large éventail d'applications actuelles et possibles. On songe notamment aux matériaux nanocomposites utilisés dans le secteur de la santé, le domaine du captage et du stockage de l'énergie, l'électronique, les matériaux intelligents et réactifs (autocaptage, autoréparation), les textiles, la catalyse et d'autres.

Les nanomatériaux industriels sont produits selon des méthodes dites « descendantes » dans le cadre desquelles on réduit la taille de certains matériaux (par exemple, technologie des poudres, électronique), ou selon des méthodes dites « ascendantes » qui consistent à créer de toutes pièces certains matériaux, atome par atome ou molécule par molécule (par exemple, les nanotubes). Parmi les nanomatériaux industriels actuellement utilisés, mentionnons les fullerènes, les graphènes, les nanotubes de carbone (NTC), les nanotubes résistant à des températures élevées (BN, SiC), les nanofibres (céramique, carbone et cellulose), les nanoparticules et les nanofils en métal, la nanosilice, la nano-argile, les points quantiques semi-conducteurs, les matériaux nanocristallins (métaux, semi-conducteurs, oxydes, céramiques et cellulose) et les colloïdes. Ils englobent les composites à matrice polymère, métallique et céramique, et les revêtements contenant de tels constituants à l'échelle nanométrique.

Les plus importantes applications commerciales des nanomatériaux industriels sont les revêtements à structure nanométrique et les plastiques renforcés par des éléments nanométriques, et plus particulièrement les plastiques conducteurs auxquels des nanoparticules de métal ou de carbone ou des NTC intégrés confèrent suffisamment de conductivité pour leur donner des caractéristiques de dissipation statique ou de protection électromagnétique. Dans le cas des NTC, il existe tout un éventail d'exemples ayant atteint le NMT 9 (produits commerciaux et matériaux

utilisés dans l'espace), mais les recherches menées activement en ce domaine couvrent l'ensemble du spectre des niveaux de maturité technologique. En règle générale, les applications commerciales dans les matériaux composites sont surtout liées à leurs propriétés multifonctionnelles (électriques, thermiques, optiques), même si les NTC ont aussi commencé à être utilisés dans la fabrication de plusieurs articles de sport (par exemple, cadres de bicyclettes, bâtons de hockey).

Les applications des matériaux composites structuraux à haute performance, notamment dans le secteur de l'aérospatiale et des matériaux de sécurité, sont concentrées dans le secteur de la recherche fondamentale jusqu'au développement et à la démonstration de technologies (NMT ~ 1 à 6). Toutefois, il existe quelques exemples de produits commerciaux, notamment des blindages pour véhicules légers s'appuyant sur une céramique à structure nanométrique (IBD Deisenroth, Allemagne) et l'EPI léger utilisant des composites avec feuilles de NTC (Nanocomp Technologies, États-Unis).

Selon une étude effectuée en 2012 par Frost et Sullivan pour le compte d'Industrie Canada et intitulée *Nanotechnology in Aerospace & Defence : Canadian Capabilities, Challenges, and Related Policy Insights*, au Canada, les activités dans le secteur des nanotechnologies sont concentrées surtout dans le domaine des nanomatériaux et celui des nano-revêtements. Le Canada est concurrentiel à l'échelle internationale en ce domaine, mais souffre de l'absence de coordination nationale dont bénéficient d'autres pays, notamment les États-Unis et les pays européens. Il convient aussi de souligner la recherche appliquée sur les nanomatériaux actuellement en cours au Québec, où les chercheurs bénéficient d'un soutien ciblé de l'administration provinciale (CRIAQ, NanoQuébec, CNRC) et de la concentration de l'industrie dans le domaine des matériaux composites destinés à l'aérospatiale et de la production industrielle de nanoparticules (NTC, NTNB, nanoparticules de métal et d'oxyde et cellulose nanocristalline). On constate également la présence de grappes de recherche sur les nanomatériaux en Ontario, en Alberta et en Colombie-Britannique, dans certains établissements du CNRC et dans de grandes universités. En 2014 et 2015, le CNRC a également annoncé la construction d'une installation de recherche souple au coût de 3 millions de dollars à Ottawa et la conclusion d'un partenariat avec Xerox pour la construction « d'un campus canadien de fabrication de matériaux de pointe » à Mississauga qui viendra appuyer des projets pilotes ou des projets de production et de transformation à petite échelle de matériaux nanocomposites.

Les défis techniques et les contraintes de coûts associés à l'utilisation accrue et à l'adoption généralisée des technologies liées aux nanomatériaux dans le secteur des matériaux et d'autres matériaux composites structuraux sont liés principalement 1) à la disponibilité de nanomatériaux bien contrôlés et 2) à la présence d'installations et de compétences pour la transformation à grande échelle et l'intégration de matériaux composites comportant des nanomatériaux. La production annuelle mondiale de nanotubes de carbone multiparois a dépassé le niveau du millier de tonnes. La production industrielle d'autres nanomatériaux structuraux, qui englobe la production de graphènes, de nanotubes de carbone monoparois, de nanotubes de nitrure de bore (NTNB) et de cellulose nanocristalline est actuellement en émergence et certaines entreprises canadiennes sont des acteurs importants dans la production de ces trois derniers produits.

De nombreuses méthodes fructueuses de transformation et d'intégration des nanomatériaux aux matériaux composites ont fait l'objet de démonstrations en laboratoire, mais un certain nombre de difficultés persistent pour en venir à une utilisation routinière des nanomatériaux dans l'industrie. Certaines de ces difficultés touchent l'ensemble des nanomatériaux. Ce sont notamment les considérations relatives à la santé et à la sécurité au travail et à la mise au point d'une réglementation satisfaisante en ce domaine, ainsi que les considérations relatives à la sensibilisation du public et de l'industrie et à l'acceptation des nanotechnologies. D'autres difficultés sont liées plus

particulièrement à certains types précis de nanomatériaux ou de nanocomposites, et ont trait aux méthodes, aux températures et aux pressions nécessaires pour la fabrication des polymères, des céramiques et des métaux.

La coordination très limitée entre la recherche sur les nanomatériaux, qui se fait surtout dans les laboratoires universitaires et publics, et les besoins de l'industrie (ainsi que la sensibilisation restreinte des chercheurs à ces besoins) sont d'autres obstacles importants à leur développement. L'absence au Canada d'une stratégie nationale relative aux nanotechnologies est le problème le plus souvent cité (bien avant les problèmes de financement et d'adoption par l'industrie et les défis techniques) dans le rapport publié par Frost et Sullivan en 2012 sur l'utilisation des nanotechnologies dans les secteurs de l'aérospatiale et de la défense. Un des objectifs de la CTCMS consiste justement à favoriser une telle coordination et l'harmonisation des projets de R-D sur les nanomatériaux afin qu'ils correspondent mieux aux besoins de l'industrie dans le domaine des matériaux de sécurité.

Les métaux qui serviront aux blindages du futur comprendront des nanoparticules (et plus particulièrement des nanotubes de carbone et des métaux nanocristallins) intégrées à des matériaux composites et à des revêtements qui leur conféreront une performance balistique supérieure. Des adhésifs ou liants rhéoépaississants (par exemple, une matrice souple chargée de nanoparticules qui durcirait ou se renforcerait lorsqu'elle est touchée par des projectiles) font également l'objet de recherches. Des matériaux autoréparables ou inspirés de la biologie figurent aussi dans la documentation sur les recherches en cours.

Matériaux composites

Dans certaines applications d'EPI, comme les casques de combat, la rigidité structurale et le rendement du matériau composite, en plus de son rendement sur le plan de la protection balistique, sont des considérations vitales. Dans le cas particulier des casques, il est essentiel que la coquille possède les propriétés mécaniques nécessaires non seulement pour des questions de manutention et de durabilité, mais aussi pour la protection de la tête des combattants contre des charges extérieures provoquées par des impacts à faible vitesse (impacts contondants). De plus, la rigidité structurale et la résistance des coquilles des casques jouent un rôle dans la protection contre les blessures par traumatisme contondant derrière le blindage (*Behind Armour Blunt Trauma* – BAPT) qui sont directement liées à la réaction structurale de la coquille en matériau composite à un impact balistique.

En reconnaissance du fait que le succès commercial des produits de défense exige un ratio coût-rendement adapté à chaque mission et chaque application, l'accent devrait être mis sur l'utilisation intelligente des matériaux et des technologies de fabrication. Dans ce contexte, des travaux ont été effectués pour améliorer la performance balistique et structurale des matériaux composites thermoplastiques à base d'aramide, comme l'illustre la Figure 29. Des technologies permettant la gradation des propriétés « sur toute l'épaisseur » des composites stratifiés, l'hybridation des fibres et l'optimisation de la chimie des polymères ont fait l'objet de recherches.

Il est possible de calibrer les propriétés des matériaux composites stratifiés en utilisant des tissus composés de



Figure 27 : Système de casque modulaire – Collaboration CNRC-RDDC (photo courtoisie de RDDC Valcartier)

fil plus gros sur la surface de frappe. Cette méthode permet de réduire les coûts puisque le nombre total d'épaisseurs utilisées est réduit et que des matériaux meilleur marché peuvent être utilisés (les tissus plus épais sont habituellement moins chers). Une autre méthode consiste à optimiser le contenu de la matrice en fonction des exigences prépondérantes de résistance à la pénétration des projectiles, à la déformation dynamique maximale de la face arrière ou de la rigidité structurale. Cette méthode consiste notamment à moduler le contenu de la matrice en fonction de l'épaisseur du produit stratifié. Même si la résistance balistique de ces matériaux composites (sur la base de la densité surfacique) est réduite, des améliorations importantes dans les propriétés de flexion et de traction peuvent être obtenues grâce à ces méthodes.

L'hybridation des fibres est une autre technologie qui fait actuellement l'objet de recherches. Fondamentalement, ce concept consiste à remplacer (par hybridation) certaines des fibres aramides (celles en mesure d'atténuer la menace balistique) par d'autres qui ont une nature plus structurale (c'est-à-dire des fibres qui sont en mesure de procurer une plus grande rigidité et une plus grande résistance), comme des fibres de carbone. Les effets de deux concepts d'hybridation (hybrides interplis et intraplis) ont été étudiés. Dans le premier cas, on procède à l'alternance de couches de tissu de carbone et de tissu aramide empilées les unes par-dessus les autres (imbriquées) et regroupées ensemble, tandis que dans le deuxième cas, des fils aramides et des fils de carbone sont tissés ensemble dans le même tissu.

La performance balistique et structurale des matériaux composites découle de la synergie entre les fibres et la matrice de polymère. La sélection du bon polymère est d'une importance cruciale dans la conception des matériaux composites utilisés à des fins de blindage. On a ainsi découvert un polymère qui fonctionne particulièrement bien avec les aramides. Toutefois, en caractérisant les propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques de plusieurs polymères non renforcés et en effectuant des essais mécaniques et balistiques sur des matériaux composites à base d'aramides fabriqués au moyen de ces polymères, des propriétés qui contrôlent la performance balistique du stratifié aramide ont été détectées et la sélection judicieuse de nouveaux polymères pourraient conduire à des améliorations supplémentaires. L'amélioration des propriétés du polymère par l'utilisation de nanoparticules est une autre méthode qui pourrait être utile. Un polymère renforcé par des nanotubes de carbone peut bonifier les propriétés mécaniques sans pour autant sacrifier les propriétés balistiques.

Le niveau de maturité technologique des différentes méthodes décrites ci-dessus varie entre « plutôt élevé et prêt à commercialiser » dans le cas des composites balistiques à base d'aramide (voir Figure 29), à un NMT beaucoup plus bas (~ 2 ou 3) dans le cas des matrices en polymères renforcés par des nanoparticules (voir Figure 30).

Selon les applications et les exigences, ces technologies pourraient mener à la découverte de solutions très concurrentielles sur le plan des coûts comparativement aux polyéthylènes de masse moléculaire très élevée

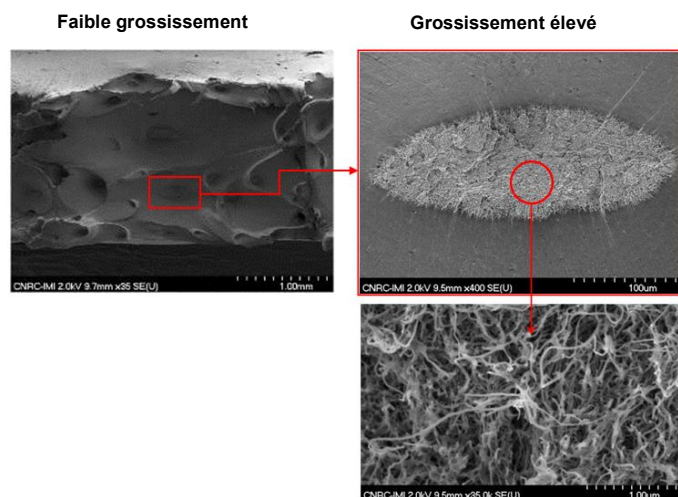


Figure 28 : Micrographies par MEB de surfaces de rupture de nanotubes de carbone multiparois dispersés dans une matrice thermoplastique (5% en poids) provenant d'échantillons de nanocomposite ayant subi des tests en traction. Plusieurs gros macro-agrégats de nanotubes de carbone multiparois sont clairement visibles dans la coupe transversale fracturée. Il est possible qu'ils soient à l'origine de la défaillance du nanocomposite.

(UHMWPE) qui sont coûteux, posent des difficultés sur le plan de la fabrication et comportent certains inconvénients, notamment sur le plan de la rigidité et de la durabilité.

Une solution fondée sur les aramides est déjà prête à commercialiser. Des travaux antérieurs ont démontré qu'il est possible d'améliorer encore la performance de ce système en utilisant un autre polymère. Il serait intéressant de lancer un projet visant à tester ces nouvelles hypothèses en sélectionnant un nouveau polymère supérieur et en générant des données à l'appui.

L'utilisation des nanotubes de carbone (NTC) semble un moyen éventuel intéressant pour développer des matériaux composites hybrides à base de nanoparticules offrant un rendement structural et balistique amélioré. L'utilisation de nanocomposites améliorés dans les applications de blindage est un domaine en émergence et des études systématiques plus poussées sont nécessaires pour confirmer les résultats obtenus jusqu'à maintenant et les améliorer, éventuellement par des stratégies d'optimisation qui consisteraient à caractériser le comportement des interfaces à différentes vitesses de déformation.

La disponibilité d'installations d'essais balistiques et d'essais de déformation à haute vitesse constitue un obstacle au développement plus poussé de ces technologies.

Fabrication de matériaux composites

Des technologies sont en cours de développement pour joindre et intégrer différents matériaux dans un système permettant la production de composants améliorés d'EPI. Ces technologies appuient les stratégies de raidissement actuellement envisagées pour régler les problèmes liés à l'utilisation de composites à base de polyéthylène de masse moléculaire très élevée (UHMWPE) dans des applications destinées à l'EPI. Elles permettront aussi des améliorations plus étendues du rendement balistique des composants d'EPI.

Des technologies ont été développées pour joindre des composites à base d'UHMWPE à des stratifiés de carbone et d'aramides. Le défi réside dans le fait que la surface du composite à base d'UHMWPE est non réactive, inerte et hydrophobe et est par conséquent très difficile à joindre à d'autres matériaux. Deux méthodes ont été étudiées pour résoudre ce problème. La première consiste à joindre simultanément les différentes couches du stratifié pendant la fabrication du panneau de blindage (méthode de cofabrication). La deuxième consiste à joindre (ou à assembler) les différentes couches dans une opération secondaire (méthode de post-fabrication).

Dans la méthode de cofabrication, une technologie de modification de la surface faisant appel aux rayons UV a été développée pour rendre la surface du composite à base d'UHMWPE plus « compatible », i.e. plus réactive. Cette technologie s'appuie sur un processus relativement simple en trois étapes permettant de modifier la surface des panneaux d'UHMWPE en créant des chaînes polymères réactives capables de former des liaisons covalentes avec une couche d'époxy pendant un processus de moulage par compression en une seule étape. Les mesures de l'angle de contact prises sur les échantillons traités montrent qu'un comportement hydrophile est nécessaire pour former des liaisons solides avec une matrice en époxy. Toutefois, les résultats des essais effectués jusqu'à maintenant montrent que les propriétés sont inférieures aux attentes. Une certaine dégradation de la matrice en polymère pendant le traitement pourrait expliquer ces résultats. D'autres études seraient nécessaires pour déterminer la cause exacte des résultats observés. Des pellicules adhésives n'exigeant pas que la surface soit modifiée ont également été sélectionnées et utilisées en suivant la méthode de cofabrication. Ces travaux ont démontré une augmentation importante de la résistance à la flexion lorsque le composite UHMWPE est renforcé au moyen de stratifiés de carbone et d'époxy. L'observation des surfaces de rupture des échantillons fabriqués au moyen de pellicules adhésives démontre une rupture de nature cohésive dans le substrat en

UHMWPE, ce qui dénote une forte adhérence entre le matériau composite à base d'UHMWPE et le matériau composite en carbone et époxy.

Le choix d'un adhésif approprié et le traitement requis de la surface sont essentiels dans la méthode post-fabrication. Les études ont démontré que la sélection d'un adhésif époxy approprié jumelé à un traitement de la surface par projection au plasma a entraîné une rupture cohésive du substrat en UHMWPE plutôt qu'une délamination à l'interface entre la couche de renforcement et le cœur en UHMWPE du composite balistique. Ces constatations ouvrent la voie à des stratégies de raidissement par la méthode de post-fabrication (voir Figure 31).



Figure 29: Des tests de pelage ont montré une défaillance dans le UHMWPE.

Une des stratégies permettant d'améliorer la performance balistique des blindages composites consiste à utiliser des matériaux multicouches et à appliquer une couche de matériau dur à la surface de frappe. L'hypothèse de travail est que cette couche dure dispersera l'énergie créée par l'impact du projectile et diminuera la pénétration. Une technologie permettant d'appliquer par projection un revêtement d' Al_2O_3 sur des composites de polymères a été développée au CNRC et son utilisation dans des applications de blindage a été testée sur un matériau composite à base d'aramides (voir Figure 32). La caractérisation structurale du revêtement Al_2O_3 montre la présence d'un mélange de phases γ et α d'une phase amorphe. Selon les conditions de projection utilisées, la densité des revêtements varie selon les estimations de 2,8 à 3 g/cm^3 , ce qui représente donc 72 % à 77 % de la densité de l'alumine à l'état brut. La dureté des revêtements appliqués, évaluée au moyen d'essais de microdureté à 300 gf, a aussi été estimée à environ 47 % à 57 % de la dureté mesurée de l' Al_2O_3 brut de calibre blindage. Avec des éclats de 17 grains simulant des projectiles, les revêtements de céramique n'ont pas semblé ajouter de résistance à la pénétration. Un des moyens pour améliorer cet aspect consisterait à alterner les couches de céramique et de matériau ductile (métallique) et par conséquent contrôler la nature des contraintes résiduelles dans le matériau multicouche résultant (tension et compression). Cette technologie possède un NMT relativement bas (~ 2 ou 3).

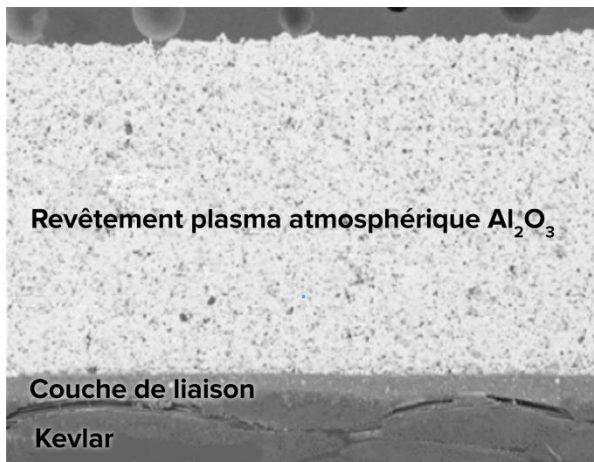


Figure 30 : Coupe transversale montrant un revêtement de céramique d'une épaisseur d'un millimètre déposé sur un matériau composite polymère à base de Kevlar®

Les technologies d'assemblage et d'intégration décrites précédemment pourraient atténuer certains des inconvénients associés à la piètre rigidité des matériaux composites à base d'UHMWPE. Le traitement aux rayons UV n'a pas donné les améliorations attendues au chapitre de la solidité de l'assemblage. À cause de sa durée et des piètres résultats obtenus, le traitement aux rayons UV ne semble pas constituer une option viable sur le plan de la fabrication. Cependant, les pellicules adhésives et certains adhésifs à base d'époxy, moyennant un traitement approprié de la surface (projection par plasma atmosphérique) ont prouvé leur efficacité pour unir les couches de renforcement (en

aramide/époxy et carbone/époxy) au substrat à base d'UHMWPE et ils devraient continuer d'être étudiés dans les travaux à venir sur le raidissement des matériaux à base d'UHMWPE. Les méthodes de cofabrication sont peut-être plus sensées du point de vue de la fabrication, mais les méthodes de post-fabrication demeurent valides pour certaines configurations. Compte tenu des technologies d'assemblage dont nous disposons, il conviendrait d'explorer plus en profondeur les stratégies de raidissement des matériaux à base d'UHMWPE et d'orienter leur développement vers les configurations pertinentes pour l'EPI. Il serait d'une importance vitale de générer des données de rendement, tant balistique que mécanique (statique, impact contondant, usure, effets du vieillissement).

L'application de revêtements durs, notamment en alumine, sur des composites de polymères est un moyen novateur d'améliorer la performance balistique des composants utilisés dans la fabrication d'EPI et c'est un domaine de R-D en émergence. Les premières tentatives n'ont pas été aussi prometteuses qu'on le croyait, à cause en partie de la nature cristalline de l'alumine générée par le processus de projection thermique du revêtement et de la densité déficiente des couches. Par conséquent, il faut travailler à l'amélioration de la densité et de la dureté. Le concept d'une surface dure générant des contraintes résiduelles favorables vaut peut-être la peine d'être exploré. Toutefois, en ce qui concerne la densité de la couche de céramique, qui est environ quatre fois supérieure à celle du support en matériau composite, l'amélioration de la performance devrait être importante pour contrebalancer l'ajout de poids. Les travaux à venir devraient d'abord se concentrer sur la définition des défis à venir afin de générer des données pour évaluer de manière plus complète le potentiel de cette technologie. Il faudrait également se concentrer sur la découverte des meilleures applications possibles si cette technologie devait être utilisée comme barrière thermique pour procurer une résistance à la chaleur aux systèmes de blindage plutôt que comme moyen d'améliorer la performance balistique.

Revêtements

Certains thermoplastiques comme le polycarbonate sont actuellement utilisés dans les blindages transparents destinés aux véhicules et à l'EPI. Trois grandes conditions doivent être prises en compte. Les thermoplastiques se rayent facilement et peuvent s'user simplement en essuyant la poussière ou la saleté. L'humidité se condense par ailleurs facilement sur la surface à des températures basses ou dans des environnements humides, ce qui nuit à la visibilité. Finalement, un blindage à base de polycarbonates n'offre aux utilisateurs aucune protection contre les rayons ultraviolets et n'empêche pas la dégradation des matériaux. Par conséquent, différents revêtements sont appliqués en couches minces afin d'améliorer leur résistance à l'abrasion, de réduire leur caractère hydrophile (afin d'éliminer l'embuage) et d'offrir une protection contre les rayons ultraviolets.

Les technologies de revêtement actuelles ont toutefois leurs propres limites. Les revêtements se dégradent trop rapidement, ils craquent et décollent du polycarbonate. Les NTNB constituent un excellent candidat comme nouvel additif puisque ces nanotubes présentent d'excellentes propriétés mécaniques, ont un facteur de forme élevé et sont optiquement transparents dans la région visible. De multiples défis pourraient être résolus d'un seul coup en développant un revêtement dur antibuée contenant des NTNB. En améliorant, par l'ajout de NTNB, la résistance à l'abrasion des revêtements commerciaux actuellement utilisés sur l'équipement en thermoplastique, on prolongera la durée de vie utile non seulement du blindage transparent, mais aussi d'autres applications dans le secteur de l'automobile et de l'aérospatiale. L'amélioration et la modification de l'hydrophobicité, et par conséquent des propriétés antibuée des blindages transparents comme les fenêtres et les systèmes de protection des yeux (par exemple, lunettes de protection, masques et

visières), empêcheront l'accumulation de fatigue chez l'employé et accroîtront sa productivité. Les utilisateurs auront un champ de vision libre pendant une plus longue période et n'auront pas à cesser de travailler pour nettoyer ou changer l'équipement. Les technologies de revêtement antibuée contenant des NTNB amélioreront non seulement l'EPI utilisé dans le secteur de la sécurité, mais aussi certains articles de sport, dont les lunettes de protection qui s'embuent facilement, plus particulièrement celles utilisées dans les sports aquatiques.

Les compétences du CNRC dans la fabrication et la transformation de matériaux à base de nanotubes combinées à son expérience dans l'intégration de nanomatériaux dans des matrices polymères pour différentes applications le placent dans une situation unique pour développer des revêtements à base de NTNB. Le développement des technologies de revêtement à base de NTNB est actuellement aux premières étapes du développement (NMT~ 1 à 4) au CNRC. Le principal problème lié au développement des NTNB est leur tendance à s'agglutiner et à former de gros agrégats (des « paquets ») qui dispersent la lumière. Cette tendance empêche une distribution uniforme des NTNB dans les revêtements pour polymère. La fonctionnalisation chimique de la surface des NTNB est cruciale pour éviter leur agglutinement, améliorer leur capacité d'être transformés et réduire au strict minimum la diffusion de la lumière.

Il existe deux principales méthodes pour « fonctionnaliser » les NTNB : la méthode covalente et la méthode non covalente. Récemment, le développement de revêtements à base de NTNB a moins retenu l'attention, car on attend de nouveaux développements dans le domaine de la fonctionnalisation chimique et l'établissement d'une offre constante de matériaux à base de NTNB. À ce jour, les NTNB fonctionnalisés covalents produisent des solutions opaques blanches sauf à des concentrations très diluées parce que les NTNB demeurent partiellement agglutinés. Les NTNB fonctionnalisés par une méthode non covalente, par ailleurs, produisent habituellement des solutions transparentes teintées. La teinte visible découle des molécules conjuguées utilisées pour fonctionnaliser les NTNB et leurs interactions avec la surface des NTNB. Les premiers essais d'intégration des NTNB dans une matrice polymère ont échoué à cause du phénomène d'agglutination susmentionné et parce que les matériaux à base de NTNB transformés se séparent à l'intérieur de la matrice du revêtement.

Même si le développement des connaissances nécessaires sur la chimie des NTNB pose des défis, les coûts ne devraient pas être un facteur limitant en ce qui concerne cette technologie. Un revêtement à base de NTNB devrait pouvoir être immédiatement utilisé à la place des systèmes commerciaux actuels.

Dans un rapport publié en 2012 par le U.S. National Research Council sur les débouchés militaires de la science des matériaux et des technologies connexes, on soulignait l'importance à long terme des matériaux légers. Le rapport se penchait sur le rôle des simulations, de la modélisation et de l'évaluation balistique en combinaison avec la recherche sur les matériaux. La caractérisation, les microstructures, le comportement et les mécanismes de déformation et de pénétration y sont mentionnés comme des sujets d'intérêt pour la recherche. La science des matériaux basée sur des méthodes de calcul (par exemple, des plaques de céramique ou de polymères de pointe afin d'en accroître le rendement et d'accélérer les délais de commercialisation) était aussi mentionnée. Le rapport recommandait par ailleurs la conduite de recherches fondamentales et appliquées dans certains domaines. Voici quelques exemples :

- création d'une base de données sur les matériaux à taux de déformation élevé;*
- céramiques et poudres de céramique opaques et transparentes;*
- fibres de polymères, de carbone, de verre et de céramique;*
- polymères en tant que matrices (rendement accru et mesure des mécanismes de déformation);*
- alliages de magnésium (faible densité, résistance élevée);*
- autres améliorations aux blindages composites fondés sur des alliages métalliques et des nanomatériaux (dans ce dernier cas, habituellement fondés sur l'utilisation de fibres de carbone);*
- adhésifs et matériaux de brasure;*
- amélioration des méthodes d'essai et de caractérisation des matériaux;*
- diminution des coûts de la fabrication en petits lots et accroissement de la capacité;*
- fabrication intelligente (c'est-à-dire grâce à des capteurs, des contrôles et des systèmes d'analyse améliorés et à l'ingénierie des systèmes).*

Domaines de recherche prioritaires

Vu les défis techniques définis pendant l'atelier, les domaines de recherche suivants sont actuellement explorés :

Réduction du poids et augmentation du rendement

- Remplacement des composants en métal par des composants en cermet, en matériaux composites ou en polymères
- Amélioration des matériaux grâce à des structures nanométriques et aux nanomatériaux
- Conception biomimétique
- Revêtements ultraminces antibuée et anti-rayures pour les blindages transparents
- Revêtements ultra-durs et ultraminces pour les polymères et les matériaux composites
- Optimisation structurale, y compris l'optimisation de la forme de la surface de frappe et élimination des soudures et des joints grâce à des pièces uniques en matériaux composites
- Intégration des matériaux – espace de conception réduit pour les produits multicouches

Réduction des coûts

- Évaluation non destructive pour utiliser au maximum la performance des matériaux et systèmes de blindage nouveaux et existants
- Outils améliorés de modélisation et de simulation pour tester le rendement du blindage
- Modélisation et simulation améliorées des procédés de fabrication
- Substitution des matériaux à coût et à performance élevés par des matériaux nano-améliorés à coût inférieur
- Meilleure utilisation de l'automatisation et de la robotique dans les procédés de fabrication

Intégration améliorée ou activée

- Miser sur la modélisation et la caractérisation pour permettre une évaluation des possibilités en ce qui concerne les structures multicouches qui pourraient être utilisées dans une structure intégrée.
- Miser sur la capacité des polymères d'adopter des formes complexes pour remplacer les systèmes à composants multiples.

Quantification et conception pour contrer des menaces multiples

- Miser sur la caractérisation des matériaux dans le développement d'une base de données sur les matériaux.

Ressources

Les ressources mentionnées ci-dessous ont été répertoriées pendant l'élaboration du présent rapport et l'atelier sur la CTCMS qui a eu lieu en novembre 2015. La liste n'est pas exhaustive et évoluera avec le temps afin de prendre en compte la contribution des parties intéressées issues de la collectivité des utilisateurs, de l'industrie et des milieux de la recherche.

Programme d'innovation Construire au Canada

Créé pour favoriser l'innovation des entreprises canadiennes, le Programme d'innovation Construire au Canada aide les entreprises à combler leurs lacunes à l'étape de la précommercialisation en leur achetant des produits et services novateurs aux dernières étapes de leur développement afin de les mettre à l'essai avant leur mise en marché. Voici comment :

- en accordant des contrats aux entrepreneurs qui ont à offrir des innovations précommerciales dans le cadre d'un processus ouvert, transparent, concurrentiel et équitable;
- en mettant à l'essai des produits ou des services de ces entrepreneurs et en leur fournissant une rétroaction;
- en donnant aux innovateurs la possibilité d'entrer sur le marché grâce à une application réussie de leurs nouveaux produits ou services;
- fournissant des renseignements sur la façon de faire affaire avec le gouvernement du Canada.

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie

Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) investit dans les gens, les découvertes scientifiques et l'innovation afin d'accroître les capacités scientifiques et technologiques du Canada pour l'avantage de tous les Canadiens. Le CRSNG investit dans les gens en aidant les étudiants de niveau postsecondaire et les boursiers postdoctoraux à poursuivre des études supérieures. Le CRSNG favorise les découvertes scientifiques en appuyant les recherches effectuées par des professeurs d'établissements postsecondaires et favorise l'innovation en encourageant les entreprises canadiennes à participer à la recherche et à la formation dans les établissements postsecondaires et à investir dans celles-ci.

CanmetLCRE

CanmetLCRE (Laboratoire canadien de recherche sur les explosifs) un laboratoire de la Direction de la sécurité et de la sûreté des explosifs, qui fait partie du Secteur des minéraux et des métaux de Ressources Naturelles Canada, est le seul laboratoire du gouvernement canadien à s'occuper d'explosifs à usage civil. Il est en outre l'un des seuls laboratoires de son genre dans le monde.

Les travaux effectués au CanmetLCRE sont diversifiés et comportent de nombreuses applications différentes, allant des essais pour savoir si un produit convient à un usage particulier à la diminution des effets des explosions accidentelles ou des attentats terroristes. CanmetLCRE offre des services à ses clients dans deux grands domaines : analyse des explosifs et technologie de sûreté et de sécurité des explosifs.

Automobile et transport de surface du CNRC

Misant sur la réputation d'excellence du Canada dans la conversion des fruits de la recherche en solutions novatrices, le portefeuille Automobile et transport de surface du CNRC peut aider des entreprises à faire passer leurs idées de l'état de simple concept à l'étape de la commercialisation. Grâce à ses antécédents éprouvés en la matière, à ses capacités de recherche, de développement et de démonstration sans équivalent et à ses programmes d'aide à l'innovation, le CNRC est un contributeur apprécié dans le secteur de l'automobile et des transports de surface, et il s'intéresse notamment aux véhicules de promenade, au transport ferroviaire lourd et léger, aux parcs de camions lourds, aux véhicules militaires spécialisés et aux véhicules d'intervention d'urgence.

Programme Recherche scientifique et développement expérimental

Le programme Recherche scientifique et développement expérimental (RS et DE) est un programme fédéral d'encouragements fiscaux conçu pour encourager les entreprises canadiennes de toutes les tailles et de tous les secteurs à effectuer de la recherche et du développement (R-D) au Canada. Ce programme est administré par l'Agence du revenu du Canada (ARC) qui accorde les encouragements fiscaux prévus dans le cadre du programme RS et DE d'une manière uniforme et prévisible, tout en incitant les entreprises à préparer leurs réclamations conformément aux lois fiscales du Canada et aux politiques et procédures de l'ARC.

Réseau de recherche sur les matériaux composites de l'Université de la Colombie-Britannique

Le Réseau de recherche sur les matériaux composites (CRN) de l'Université de la Colombie-Britannique est issu de la collaboration entre des partenaires universitaires et industriels qui appuient le secteur des matériaux composites dans l'Ouest du Canada et ailleurs. Il a été créé en janvier 2012 grâce à un investissement de 9,8 millions de dollars de Diversification de l'économie de l'Ouest Canada. La mission du CRN consiste à créer du savoir dans des documents de pratique qui favorisent la fabrication et la conception à faibles risques de matériaux composites s'appuyant sur le savoir scientifique. Le noyau du CRN se situe à l'Université de la Colombie-Britannique à Vancouver, mais on trouve également d'autres centres un peu partout dans l'Ouest du Canada.

Programme d'aide à la recherche industrielle du CNRC

Depuis plus de 70 ans, le Programme d'aide à la recherche industrielle du Conseil national de recherches du Canada (PARI-CNRC) stimule la création de richesse au Canada grâce à l'innovation technologique. Il s'acquitte de cette mission dans une large mesure en offrant une aide technologique aux petites et moyennes entreprises, et ce, à toutes les étapes du processus d'innovation, afin que ces entreprises puissent se doter d'une capacité d'innovation. Le PARI-CNRC aide les petites et moyennes entreprises à comprendre les enjeux technologiques et les possibilités qui s'offrent à elles, et les met en contact avec les meilleures compétences disponibles au Canada.

Initiative stratégique pour l'aérospatiale et la défense

L'Initiative stratégique pour l'aérospatiale et la défense (ISAD) a été lancée en 2007. Dans le cadre de cette initiative, des contributions financières remboursables sont versées à des projets de recherche et de développement (R-D) menés dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'espace, de la défense et de la sécurité (A-D). Les entreprises de toute taille peuvent profiter de l'ISAD pour innover dans la création de produits, de services et de procédés.

Voici quels sont les trois objectifs de l'ISAD :

- encourager les travaux de recherche et de développement stratégiques menant à l'innovation et à l'excellence dans les produits, services et procédés nouveaux ou améliorés;
- accroître la compétitivité des entreprises canadiennes qui exercent leurs activités dans le domaine de l'aérospatiale et de la défense;
- favoriser la collaboration entre les instituts de recherche, les universités, les collèges et le secteur privé.

MITACS

MITACS est une organisation nationale sans but lucratif qui conçoit des programmes de formation et de recherche et qui les offre au Canada depuis 15 ans. Travaillant de concert avec 60 universités, avec des milliers d'entreprises ainsi qu'avec des administrations provinciales et fédérales, le MITACS établit des partenariats de nature à favoriser l'innovation industrielle et sociale au Canada.

Recommandations

La CTCMS a joué un rôle déterminant dans le repositionnement du volet scientifique du gouvernement du Canada et l'industrie canadienne, ce qui permettra au Canada d'être plus concurrentiel sur les marchés mondiaux grâce à la collaboration intersectorielle. Le succès de la phase initiale du processus a permis d'établir une carte technologique qui guidera les acteurs des secteurs public et privé dans le développement et l'application de matériaux de sécurité.

Maintenant que le cadre de départ a été établi, le succès de la prochaine phase de cet exercice d'établissement d'une carte technologique dépendra de l'esprit de collaboration, de l'innovation et de la compétitivité dont sauront faire preuve toutes les parties intéressées au Canada. À l'avenir, il importe donc de se concentrer sur la mise en œuvre de projets de nature à permettre l'obtention de résultats.

Annexe A : Membres du comité directeur

Rôle principal : Encadrer l’initiative d’établissement d’une carte technologique du Canada sur les technologies des matériaux de sécurité afin de s’assurer que cette carte s’arrimera bien aux besoins de l’industrie.

Membres

- **Coprésidents :** AICDS, responsable du programme TMS au CNRC
- **Membres principaux :** Représentants de l’industrie canadienne
- **Membres associés :** Représentants de l’administration fédérale
- **Observateurs :** Représentants d’autres ministères et des milieux universitaires
- **Membres de soutien :** Personnel administratif de la CTCMS

Nom	Titre	Organisation	Rôle
Andrew Johnston	Responsable de programme, programme des Technologies des matériaux de sécurité	Conseil national de recherches	Coprésident
Janet Thorsteinson (en remplacement de) Nicolas Todd	Vice-présidente, Relations gouvernementales, vice-présidente adjointe, Politique, communications et relations gouvernementales	AICDS	Coprésidente
Jean-Philippe Dionne	Directeur, Génie de la recherche	Med-Eng	Membre principal
James Kempston	Directeur du développement des affaires, Amérique du Nord et Asie-Pacifique	Morgan Advanced Materials Composites and Defence Systems	Membre principal
Steve Carkner	Division de la recherche, du développement et des systèmes intégrés d’ingénierie	Revision Military Inc.	Membre principal
Major général David Fraser	Conseil d’administration	INKAS	Membre principal
Alain Bujold	Président	Mawashi Protective Clothing Inc.	Membre principal
Fabio DeWitt	Directeur principal, Blindage	DEW Engineering and Development ULC	Membre principal
Jérôme Pollak	Directeur, Développement des affaires	Tekna	Membre principal
Scott McClennan (en remplacement de) Dustin Pearson	Ingénieur de recherche principal Spécialiste des structures, Groupe de technologies appliquées	Lloyd’s Register Martec	Membre principal
Alberto Da Rocha	Ingénieur en capacité de survie, Recherche et développement	Armotec Survivability Corp	Membre principal
John Spray	Président	HIT Dynamics Ltd	Membre principal
Bradley Field	Président	PRE Labs Inc.	Membre principal
Kevin Williams	Scientifique de la Défense, section Effets des armes et protection	Recherche et développement pour la défense Canada	Membre associé
Andrew Plater	Chef de programme, programme des Systèmes de combat terrestres	Recherche et développement pour la défense Canada	Membre associé
Perry Mangione	Conseiller de portefeuille	Conseil national de recherches du Canada	Membre associé
John Preston-Thomas	Responsable d’axe, Programme TMS	Conseil national de recherches du Canada	Membre associé
Sylvain Labonté	Responsable d’axe, Programme TMS	Conseil national de recherches du Canada	Membre associé

Benoit Simard	Responsable d'axe, Programme TMS	Conseil national de recherches du Canada	Observateur
Christopher Kingston	Responsable d'axe, Programme TMS	Conseil national de recherches du Canada	Observateur
Hugo Lalonde	Gestionnaire, Projets des véhicules blindés légers à roues et soutien	Travaux publics et Services gouvernementaux Canada	Observateur
Mathieu Poirier	Spécialiste en approvisionnements, Secteur des projets de défense et des grands projets	Travaux publics et Services gouvernementaux Canada	Observateur
Marc McArthur	Conseiller réseau d'innovation	Conseil national de recherches du Canada	Membre de soutien
Alan Bolster	Chef des relations avec la clientèle	Conseil national de recherches du Canada	Membre de soutien



À l'arrière : Nicolas Todd, James Kempston, Alain Bujold, Andrew Johnston, Kevin Williams, Alan Bolster, Dustin Pearson, Christopher Kingston

À l'avant : Brad Field, Jean-Philippe Dionne, Jérôme Pollak, Marc McArthur

Photo courtoisie : Conseil national de recherches du Canada

Annexe B : Programme de l'atelier CTCMS



Jour 1 : lundi le 23 novembre

Emplacement : Auditorium	MOT D'OUVERTURE 11 h – 11 h 10		
	<p>Duncan Stewart, Gestionnaire principal du portefeuille Technologies de sécurité et de rupture, Conseil national de recherches Canada (CNRC)</p> <p>Janet Thorsteinson, Vice Présidente, Relations gouvernementales, Association des industries canadiennes de la défense et de sécurité (AICDS)</p>		
	Présentation du programme de l'atelier : objectifs et processus 11 h 10 – 11 h 25		
	Maître de cérémonie		
	Environnement futur d'opérations terrestres et liste des problèmes persistents de l'Armée canadienne 11 h 25 – 11 h 45		
	LCol R. Bell, Concepts 3, Centre de guerre terrestre de l'Armée canadienne		
Menaces émergentes et prolifération 11 h 45 – 12 h 05			
Maj Brian Corbett, Direction – Renseignement scientifique et technique, Commandement du renseignement des Forces canadiennes			
PAUSE-REPAS 12 h 05 – 13 h			
PHASE I : Préparer le terrain 13 h – 14 h 20			
Cafeteria	ÉQUIPEMENT DE PROTECTION PERSONNELLE	Bibliothèque	VÉHICULES BLINDÉS
	Besoins futurs du Ministère de la Défense nationale (MDN) et des Forces armées canadiennes (FAC) en matière de protection des soldats 13 h – 13 h 30		Besoins futurs du Ministère de la Défense nationale (MDN) et des Forces armées canadiennes (FAC) en matière de protection des véhicules 13 h – 13 h 25
	Maj. Edward Jun, Directeur besoins en ressources terrestres 5 – Section des systèmes des soldats, Ministère de la Défense nationale		Maj. Mark McNeil, Directeur besoins en ressources terrestres 3, Ministère de la Défense nationale
	Besoins futurs de la police en matière de protection balistique 13 h 30 – 13 h 55		Mobilité, protection, puissance de feu et l'avenir de la guerre montée 13 h 25 – 13 h 40
	Sgt. Dave Radu, Coordonnateur de l'équipe nationale de réponse d'urgence, Gendarmerie royale du Canada		Ted Maciuba, Directeur adjoint, besoins des véhicules, US Army Maneuver Center of Excellence
	Défis de science et technologie (S et T) liés aux matériaux de sécurité posés par les besoins futurs de l'Armée en matière de protection du soldat 13 h 55 – 14 h 20		Besoins futurs de la police en matière de protection de véhicules 13 h 40 – 14 h
Kevin Williams, Scientifique de la défense Recherche et développement pour la défense Canada	Jean-Philippe Ethier, Gendarmerie royale du Canada		
	Défis de science et technologie (S et T) liés aux matériaux de sécurité posés par les besoins futurs de l'Armée en matière de protection des véhicules 14 h – 14 h 20		Alexandra Sirois, Scientifique de la défense, Recherche et développement pour la défense Canada
PAUSE-SANTÉ 14 h 20 – 14 h 50			

Ordre du jour



Jour 1 : lundi le 23 novembre

Emplacement : Auditorium	MOT D'OUVERTURE 11 h – 11 h 10		
	<p>Duncan Stewart, Gestionnaire principal du portefeuille Technologies de sécurité et de rupture, Conseil national de recherches Canada (CNRC)</p> <p>Janet Thorsteinson, Vice Présidente, Relations gouvernementales, Association des industries canadiennes de la défense et de sécurité (AICDS)</p>		
	<p>Présentation du programme de l'atelier : objectifs et processus 11 h 10 – 11 h 25</p> <p>Maître de cérémonie</p>		
	<p>Environnement futur d'opérations terrestres et liste des problèmes persistents de l'Armée canadienne 11 h 25 – 11 h 45</p> <p>LCol R. Bell, Concepts 3, Centre de guerre terrestre de l'Armée canadienne</p>		
	<p>Menaces émergentes et prolifération 11 h 45 – 12 h 05</p> <p>Maj Brian Corbett, Direction – Renseignement scientifique et technique, Commandement du renseignement des Forces canadiennes</p>		
	PAUSE-REPAS 12 h 05 – 13 h		
PHASE I : Préparer le terrain 13 h – 14 h 20			
Cafétéria	ÉQUIPEMENT DE PROTECTION PERSONNELLE	Bibliothèque	VÉHICULES BLINDÉS
	<p>Besoins futurs du Ministère de la Défense nationale (MDN) et des Forces armées canadiennes (FAC) en matière de protection des soldats 13 h – 13 h 30</p> <p>Maj. Edward Jun, Directeur besoins en ressources terrestres 5 – Section des systèmes des soldats, Ministère de la Défense nationale</p>		<p>Besoins futurs du Ministère de la Défense nationale (MDN) et des Forces armées canadiennes (FAC) en matière de protection des véhicules 13 h – 13 h 25</p> <p>Maj. Mark McNeil, Directeur besoins en ressources terrestres 3, Ministère de la Défense nationale</p>
	<p>Besoins futurs de la police en matière de protection balistique 13 h 30 – 13 h 55</p> <p>Sgt. Dave Radu, Coordonnateur de l'équipe nationale de réponse d'urgence, Gendarmerie royale du Canada</p>		<p>Mobilité, protection, puissance de feu et l'avenir de la guerre montée 13 h 25 – 13 h 40</p> <p>Ted Maciuba, Directeur adjoint, besoins des véhicules, US Army Maneuver Center of Excellence</p>
	<p>Défis de science et technologie (S et T) liés aux matériaux de sécurité posés par les besoins futurs de l'Armée en matière de protection du soldat 13 h 55 – 14 h 20</p> <p>Kevin Williams, Scientifique de la défense Recherche et développement pour la défense Canada</p>		<p>Besoins futurs de la police en matière de protection de véhicules 13 h 40 – 14 h</p> <p>Jean-Philippe Ethier, Gendarmerie royale du Canada</p>
			<p>Défis de science et technologie (S et T) liés aux matériaux de sécurité posés par les besoins futurs de l'Armée en matière de protection des véhicules 14 h – 14 h 20</p> <p>Alexandra Sirois, Scientifique de la défense, Recherche et développement pour la défense Canada</p>
PAUSE-SANTÉ 14 h 20 – 14 h 50			

Jour 2 : mardi le 24 novembre (suite)

PAUSE-SANTÉ		10 h 10 – 10 h 25
Emplacement : Cafeteria	ÉQUIPEMENT DE PROTECTION PERSONNELLE	VÉHICULES BLINDÉS
	Revue de l'état de l'art des technologies relatives aux produits de blindage transparents (visières) 10 h 25 – 10 h 45	Défis et opportunités pour les stratifiés composites balistiques 10 h 25 – 10 h 45
	Vlad Lucuta , Directeur, technologies de blindage, Revision Military	David Boucher-Trudel , Agente de recherche, Advanced Composites Polymères, CNRC
	Applications des nanotechnologies dans les matériaux de sécurité 10 h 45 – 11 h 05	Revue critique du rôle joué par les céramiques comme matériaux de blindage 10 h 45 – 11 h 05
Christopher Kingston , Agent de recherche, Nanocomposites, CNRC	Vladimir Krstic , Président, Functional Materials Manufacturing, Inc.	
Entretiens dirigés – Associer des solutions technologiques potentielles aux phases 1 et 2 – Déterminer les secteurs de R-D et les classer en ordre de priorité 11 h 05 – 12 h	Entretiens dirigés – Associer des solutions technologiques potentielles aux phases 1 et 2 – Déterminer les secteurs de R-D et les classer en ordre de priorité 11 h 05 – 12 h	
Sous la direction d'un animateur	Sous la direction d'un animateur	
PAUSE-REPAS		12 h – 13 h
Auditorium	PHASE IV : Définir le plan d'action	13 h – 16 h 45
	L'écosystème canadien de l'innovation des matériaux de sécurité	13 h – 13 h 30
	Andrew Johnston , Chef du programme, Technologies matériaux de sécurité, CNRC	
	Propositions de modèles de financement pour les projets de R-D des Technologies des matériaux de sécurité et principales occasions de financement pour l'industrie et le milieu universitaire du Canada 13 h 30 – 14 h 15	
Pierre Vallée , Conseiller en innovation, Service Innovation Concierge, CNRC		
PAUSE-SANTÉ		14 h 15 – 14 h 30
Cafeteria	ÉQUIPEMENT DE PROTECTION PERSONNELLE	VÉHICULES BLINDÉS
	Définir des projets de R-D (portée, intervenants ou collaborateurs potentiels, ressources, etc.) 14 h 30 – 15 h 45	Définir des projets de R-D (portée, intervenants ou collaborateurs potentiels, ressources, etc.) 14 h 30 – 15 h 45
Sous la direction d'un animateur	Sous la direction d'un animateur	
Auditorium	Centre de transfert de technologies au Canada de l'Armée américaine – Canada 101	15 h 45 – 16 h 10
	Robert C. Murray , LTC, LG, US Army International Technology Center Canada	
	Projets de recherche et développement collaboratifs dans un contexte d'environnement compétitif	16 h 10 – 16 h 20
	Karl Pfister , Président-directeur général, <i>Armotec Survivability</i>	
	Résumé des résultats de l'atelier et prochaines étapes	16 h 20 – 16 h 45
Maître de cérémonie		
Remarques de clôture	16 h 45 – 17 h	
Duncan Stewart , Gestionnaire principal, Technologies de sécurité et de rupture, CNRC		
RÉSEAUTAGE		17 h – 18 h

Annexe C : Accès aux présentations sur l'ICEE

Pour accéder aux présentations de l'atelier sur la Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité, veuillez suivre les instructions ci-dessous.

1. Rendez-vous à la page d'inscription sur le site d'Industrie Canada afin d'obtenir un code d'utilisateur :
<https://www.ic.gc.ca/app/scr/registration-inscription/accueil.html?lang=fra>
2. Lorsque vous vous êtes inscrit pour obtenir un code d'utilisateur, ouvrez une session sur la plateforme ICEE. <https://www.ic.gc.ca/app/scr/pssb/sstrm-crtss/login.pub>
3. Créez un profil d'utilisateur ICEE. Cette procédure prend de 10 à 15 minutes. On vous posera des questions et on vous demandera de donner le nom d'une personne de référence pour confirmer votre identité. Veuillez informer la personne en question qu'elle recevra un courriel lui demandant de confirmer votre identité.
4. Lorsque votre profil d'utilisateur ICEE a été créé (le processus prend en tout environ 24 heures), vous pouvez commencer à utiliser la plateforme ICEE.

Rappel : Créez un signet pour accéder à la page d'ouverture d'une session et n'oubliez pas de noter votre code d'utilisateur et votre mot de passe.

Nota : Toutes les présentations pourraient ne pas être mises à votre disposition à l'extérieur du contexte de l'atelier.

Annexe D : Glossaire

A-D	Aérospatial et défense
AICDS	Association des industries canadiennes de défense et de sécurité
BABT	Réduction des traumatismes contondants derrière l'armure-type
BHL	Blindage homogène laminé
BOU	Besoin opérationnel urgent
BV	Blindage pour véhicules
CE	Énergie chimique (<i>Chemical Energy</i>)
CMC	Matériau composite à matrice de céramique
CMP	Composite à matrice de polymère
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation pour l'aérospatial du Québec
CRN	Réseau de recherche sur les composites (Composite Research Network)
CTCMS	Carte technologique du Canada sur les matériaux de sécurité
DoP	Profondeur de pénétration (<i>Depth of Penetration</i>)
EEI	Engin explosif improvisé
END	Évaluation non destructive
EPI	Équipement de protection individuelle
FAC	Forces armées canadiennes
HVOF	Projection d'oxycombustibles à vitesse élevée (<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>)
IND	Inspection non destructive
ISAD	Initiative stratégique pour l'aérospatial et la défense
KE	Énergie cinétique (Kinetic Energy)
MDN	Ministère de la Défense nationale
NEM	Neutralisation des explosifs et des munitions
NMT	Niveau de maturité technologique
NTC	Nanotube de carbone
NTNB	Nanotube de nitrures de bore
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique Nord
PC	Polycarbonate
PME	Petites et moyennes entreprises
PMMA	Polyméthyle-méthacrylate
R-D	Recherche et développement
RDDC	Recherche et développement pour la défense Canada
SHPB	Barre de pression d'Hopkinson (<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>)
SIS	Surveillance de l'intégrité structurale
S-T	Science et technologie
TARDEC	Tank and Automotive Research and Engineering Center
TMS	Technologies des matériaux de sécurité
TND	Test non destructif
UHMWPE	Polyéthylène de masse moléculaire très élevée
UV	Ultraviolet
VB	Véhicule blindé
VBIED	Engin explosif improvisé placé dans un véhicule (<i>Vehicle-Borne Improvised Explosive Device</i>)

Annexe E : Bibliographie

- Brady, B. (2016). *Security Materials Technologies Roadmap*. NRC Knowledge Management.
- Business Management Support. (2016). *BMS Insight Document: General Estimate of Armoured Vehicle (AV) and Personal Protective Equipment (PPE) Markets vis-a-vis Security Materials in a Canadian Context*. NRC Business Management Support.
- Chou, H., & Brady, B. (2014). *Strategic Plan: Supporting Documentation [for NRC's Security and Disruptive Technologies]*. NRC Knowledge Management.
- Cianfarani, C. (2016, January 26). Budget 2016 Submission from the Canadian Association of Defence and Security Industries (CADSI). Canadian Association of Defence and Security Industries . Récupéré sur <https://www.defenceandsecurity.ca/UserFiles/File/pubs/CADSIBudgetSubmissionLetter1.pdf>
- Defence iQ white paper. (2016). *Global Armoured Vehicles - Market Report 2016*. International Armoured Vehicles . Récupéré sur <http://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/white-papers/global-armoured-vehicles-market-report-2016>
- Deloitte Touche Tohmatsu Limited. (2015). *2015 Global aerospace and defense industry outlook*. Deloitte Touche Tohmatsu Limited. Récupéré sur <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Manufacturing/gx-mnfg-2015-global-a-and-d-outlook.pdf>
- Department of National Defence; Directorate of Land Concepts and Design. (2007). *Land Operations 2021: Adaptive Dispersed Operations: The Force Employment Concept for Canada's Army of Tomorrow*. Kingston. Récupéré sur http://publications.gc.ca/collections/collection_2009/forces/D2-188-2007E.pdf
- Encyclopaedia Britannica . (2015). *Gulf Cooperation Council (GCC)* . Récupéré sur Encyclopaedia Britannica Web site : <http://www.britannica.com/topic/Gulf-Cooperation-Council>
- EveningStandard. . (2008, April 16). The paramilitary face of a policewoman armed with handgun, taser, flak jacket and nine other pieces of equipment. Récupéré sur <http://www.standard.co.uk/news/the-paramilitary-face-of-a-policewoman-armed-with-handgun-taser-flak-jacket-and-nine-other-pieces-of-7267310.html>
- Frost and Sullivan. (2013). *Global Force Protection Market: Global Economics Will Dictate Force Protection Requirements for the Next 10 years*. Mountain View, CA : Frost and Sullivan.
- Innovation, Sciences et Développement économique Canada et Association des industries de défense et de sécurité. État de l'industrie Canadienne de la défense, 2014.
- Jenkins, T. (2013). *Canada First: Leveraging Defence Procurement Through Key Industrial Capabilities*. Public Works and Government Services Canada. Récupéré sur <http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/app-acq/documents/eam-lmp-eng.pdf>
- Johnston, A. (2014, November 5). Announcement of planned Canadian Security Materials Technology Roadmap. National Research Council of Canada.

- KMPG. (2012). *Economic Impact of the Defence and Security Industry in Canada* .
- McNeil, M. M. (s.d.). Department of National Defence/ Canadian Armed Forces Future Vehicle Protection Requirements. Department of National Defence/ Canadian Armed Forces.
- McWilliams, A. (2015). *Advanced Protective Gear and Armor*. BCC Research.
- National Research Council of Canada . (2016, February 9). SMTRM Roadmap Infographic.
- National Research Council of Canada. (2015). *Canadian Security Materials technology Roadmap (SMTRM) Principles, Framework and Governance*.
- National Research Council of Canada. (2015, November 23-24). Canadian Security Materials Technology Roadmap Workshop: PPE Break-out session deck.
- National Research Council of Canada. (2015, November 23). Canadian Security Materials Technology Roadmap Workshop: Program, goals & process.
- National Research Council of Canada. (2015, March 16). Communications Plan: Canadian Security Materials Technology Road Map.
- National Research Council of Canada. (2016, February 9). Roadmap Report Technologies: VA and PPE.
- National Research Council of Canada. (2016, March 17). *Security Materials technology program*. Récupéré sur National research Council of Canada Web site: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/collaborative/smt.html>
- National Research Council of Canada. (2016, February 9). Technology Summary for the Security Materials Technology Roadmap.
- News.com.au. (2013, June 30). Cost of Australian combat soldier's kit soars to \$27,700. Récupéré sur <http://www.news.com.au/national/cost-of-australian-combat-soldier8217s-kit-soars-to-27700/story-fncynjr2-1226672202534>
- Sirois, A., Baillargeon, Y., Bergeron, G., & Pageau, G. (2015, November 23-24). S&T Challenges. Defence Research and Development Canada.
- Williams, K., Ouellet, S., & Bourget, D. (2015, November 23). S&T Challenges to Addressing Army Requirements for Soldier Physical Protection . Defence Research and Development Canada.