



Ecole Royale Militaire



Université de Liège

# Evaluation expérimentale de l'impact thoracique des projectiles non-létaux

**Cyril Robbe, ir.**

Thèse de doctorat en vue de l'obtention du diplôme de  
Docteur en Sciences de l'Ingénieur

Bruxelles, Avril 2013

Promoteurs:

Dr Alexandre Papy (ERM)

Professeur Jean-Philippe Ponthot (ULg)

# Remerciements

Par le fait même, une thèse est sensée représenter un travail mené individuellement de bout en bout. Rien ne serait plus triste et insensé que de penser que cela ait pu être ici le cas. En ce qui me concerne, il me semble que cette thèse est le fruit d'une collaboration particulièrement fructueuse, guidée certes par ma personne, mais représentant le travail de toute une équipe, extrêmement compétente. A l'heure des remerciements, je n'ai pas assez de mes doigts pour compter les personnes ayant apporté une contribution significative, et pas assez de mémoire pour me rappeler qui a pu, par de plus petites contributions, m'aider à parvenir à constituer le document que vous vous apprêtez à lire. S'il est difficile de résumer quatre ans de travail dans un format rentrant dans une mallette, il est également compliqué de réunir les remerciements (et les quelques digressions) sur les deux pages que je me suis fixé. Je tacherai donc, dès à présent, d'être bref.

En premier lieu, je tiens à remercier mon promoteur ERM, Monsieur, Commandant, Major Alexandre "Joe" Papy, selon les costumes, les époques et l'humeur. Contrairement à ce que son nom laisse supposer, il fut tout au long de cette thèse un chef d'équipe très dynamique et stimulant, qui m'a permis non seulement de produire ce travail que je vous laisserai juger, mais plus important, m'a également donné le goût de ce domaine dont je ne connaissais pour ainsi dire rien : l'évaluation des armes non-létales. Sa bonne humeur, son sens du compromis et son pragmatisme m'inspireront certainement bien au delà de la présente thèse.

En second lieu, je tiens à remercier mon promoteur ULg, le professeur Jean-Philippe Ponthot. S'il était, de par une volonté partagée, plus en retrait sur la présente étude, il a pourtant pu trouver chaque fois que nécessaire, et jusqu'à la toute fin de la rédaction de cette thèse, beaucoup de son temps à me consacrer, malgré un agenda dont l'encombrement ne pourrait être mieux illustré que par son bureau de travail, à l'organisation . . . disons exotique. Jean-Philippe, un tout grand merci !

Je pense ensuite à beaucoup de personnes du département ABAL de l'ERM, je commencerai donc fort logiquement par le professeur Marc Pirlot. Si Alexandre a



---

pu me donner le goût du non-létal, c'est certainement Marc qui me donne envie de poursuivre mon travail au département, et d'élargir mes horizons au monde vaste et passionnant qu'est la balistique. Si les termes chefs, patrons, ou boss lui vont comme un gant tant son aptitude à mener une équipe est évidente, la bonne humeur et la compétence toutes deux reconnues du département sont tout à son image.

Viennent ensuite les deux autres mousquetaires du non-létal (un mousquet n'est pas non-létal diront les mauvaises langues mais je trouvais la formule intéressante), à savoir Monsieur Nestor Nsiampa, et Lieutenant Amar Oukara. Le premier apporte une contribution indispensable à ce travail, puisqu'il a la lourde charge de s'occuper des simulations numériques présentées dans ce doctorat. Le second fut un partenaire de tous les jours, aussi bien au laboratoire que derrière les écrans. Leur soutien fut permanent et omniscient, tout au long respectivement de ces quatre et deux années de travail ensemble.

La liste est encore longue. Tout d'abord, merci à André Chabotier, qui partage mon bureau depuis quatre ans, et dont l'expérience et le goût pour la balistique contribuent, peut être même plus qu'il en a lui-même conscience, à l'ensemble des résultats produits par le département ABAL. Ensuite, Marc Maldague, véritable encyclopédie vivante des statistiques, qui m'aura porté assistance par ses connaissances dans le domaine, en particulier lors de la finition de ce doctorat. Merci à Frederik Coghe, nom qui ressortira encore souvent à l'avenir dans le monde de la balistique tant son savoir et son avis pertinent sur le sujet sont impressionnants. Merci pour les petits conseils de tous les jours. Je pense enfin à Johan Gallant, dont la contribution est sans doute plus subtile puisque nous avons eu moins d'occasions de travailler ensemble (et oui, un missile ou un rail gun n'est pas vraiment proche d'une arme non-létale!). Néanmoins, ses conseils en rédaction et sa maîtrise des aspects bibliographiques m'auront permis de boucler ce travail dans les temps impartis, challenge qui paraissait encore difficile à réaliser il y a à peine trois mois.

Merci à Benoît pour les procédures et démarches administratives tout au long de ce long périple.

Merci également aux nombreux élèves ayant collaboré, par un travail de fin d'étude ou par un stage, à la présente thèse.

Enfin, je tiens remercier les techniciens et armuriers du laboratoire ABAL. Merci à Alain Doucet de m'avoir permis de me mettre dès les premiers jours dans le bain de la balistique expérimentale et de m'avoir faire confiance quand il fallait. Comme l'ensemble du travail réalisé au labo, le non-létal porte lui aussi ta signature. Merci à Alain Vanhove, qui maîtrise la caméra et l'appareil photo comme Picasso son pinceau, et qui m'a apporté grand aide pour la maîtrise des caméras haute-vitesse, domaine très technique et indispensable dans cette étude. Merci à Dominique et à

---

Patrick pour les coups de mains dans l'atelier. Merci à Marc, Jean-Marc, Patrick, et Yves pour le soutien d'armurier.

Je dépasse les deux pages, mais je ne pouvais pas ne pas également remercier mes nombreux relecteurs : mes parents Michèle et Michel, mes promoteurs Alexandre et Jean-Philippe, mes collègues Amar et Nestor, et ma douce Emilie !

---

# Abstract

On constate depuis une vingtaine d'années une augmentation significative de l'emploi d'armes non-létales, aussi bien au sein des forces de l'ordre que du côté militaire. L'idée est effectivement séduisante : pouvoir stopper ou neutraliser la cible, sans lui occasionner de blessures graves, ou de lésions permanentes, voire létales. La technologie actuellement prépondérante consiste en le tir d'un projectile, généralement très déformable, à l'aide d'un lanceur pneumatique ou d'une arme à feu classique, à des vitesses de l'ordre de 100 m/s. L'impact provoque une douleur, qui amène à la neutralisation ou à l'obtempération de la cible.

En pratique, on constate que ces armes provoquent néanmoins des blessures graves et même létales, d'où la nécessité de mettre au point des méthodes d'évaluation avant leur mise sur le marché. Les impacts au niveau du thorax, zone d'impact prépondérante, sont caractérisés par des lésions plus importantes que pour d'autres parties du corps, à l'exception de la tête qui n'est jamais visée. Les lésions observées consistent en des blessures provoquées par un impact non-pénétrant, ou en la pénétration du projectile dans l'organisme.

Une étude de la littérature sur le sujet oriente cette recherche vers les résultats obtenus à l'Université de Wayne State, par le professeur C. Bir. Ainsi, le critère lésionnel de l'impact non-pénétrant étudié dans cette thèse sera le  $(VC)_{max}$ , même si la méthode mise en place est adaptable à tout autre critère. Par ailleurs, l'étude de la pénétration de la peau s'inspirera d'un modèle anthropomorphique ou "*surrogate*", également développé par C. Bir.

La méthode d'évaluation proposée dans ce travail combine des mesures expérimentales et des simulations numériques. La présente thèse s'intéresse exclusivement à l'aspect expérimental, l'aspect numérique faisant l'objet d'une autre thèse développée au département ABAL (Systèmes d'Armes et Balistique) de l'Ecole Royale Militaire.

Les deux tests expérimentaux mis au point consistent en des tirs de projectiles non-létaux respectivement sur une cible supposée infiniment rigide, équipée d'un capteur de force, et sur le "*surrogate*" susmentionné. Ces deux tests néces-

---

sitent l'emploi d'un lanceur pneumatique, développé pour l'occasion, qui permet de tirer l'intégralité des projectiles aux vitesses voulues. Ses caractéristiques inédites apportent entière satisfaction tout au long de l'étude.

L'emploi du "*surrogate*" ne nécessite qu'une mesure de vitesse avant l'impact, tandis que les mesures réalisées lors du tir sur le mur rigide consistent en une mesure de vitesse avant l'impact, ainsi que de force et de déplacement du projectile pendant l'impact. La mesure de force est effectuée à l'aide d'un capteur piézoélectrique, les deux autres sont réalisées à l'aide d'une caméra haute-vitesse. L'emploi de celle-ci nécessite le développement d'un logiciel de poursuite dédié à l'application de mesures dynamiques d'impacts de projectiles non-létaux. Ce logiciel apporte une flexibilité, une précision et quantité d'information jusque là jamais atteintes.

Les résultats consistent alors en la prise de ces mesures pour six projectiles commerciaux et un projectile en développement. Un énorme effort est fourni pour quantifier les incertitudes de mesure. celles-ci sont calculées grâce à l'emploi du logiciel de poursuite dédié et constituent une originalité supplémentaire de cette thèse. Finalement l'ensemble des résultats expérimentaux sont collationnés et intégrés dans l'approche hybride expérimentale et numérique pour évaluer le potentiel lésionnel de l'impact non-pénétrant et de l'impact pénétrant, à différentes vitesses d'impact, pour le projectile Spartan LE 40 mm de Nobel Sport et le FN303.

Les données obtenues pour ces deux projectiles sont ensuite reliés à des distances de tirs. Trois systèmes d'armes sont alors étudiés : le F2000 pour le projectile 40 mm, et le FN303 et FN303p pour le projectile FN303. Grâce à une étude de dispersion et d'efficacité supplémentaire, les résultats définitifs permettent de dimensionner des distances minimum et maximum d'engagement, qui garantissent un tir sûr et efficace.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Exposition du problème et des objectifs</b>	<b>5</b>
2.1	Contexte . . . . .	5
2.2	Définition d'une arme non-létale . . . . .	9
2.3	Exemples d'armes non-létales antipersonnel . . . . .	10
2.3.1	Les armes non-létales à énergie cinétique . . . . .	10
2.3.2	Les armes non-létales électriques . . . . .	15
2.3.3	Les armes non-létales chimiques . . . . .	15
2.3.4	Autres technologies . . . . .	17
2.4	L'étude de l'effet des armes non-létales à énergie cinétique . . . . .	17
2.4.1	L'efficacité d'une arme non-létale à énergie cinétique . . . . .	18
2.4.2	Cas précis d'impacts de projectiles non-létaux rapportés dans la littérature . . . . .	18
2.4.3	Revue de la morbidité et mortalité des impacts de projectiles non-létaux [23] . . . . .	19
2.4.4	Discussions . . . . .	20
2.4.5	Un forum particulier : les groupes OTAN . . . . .	22
2.5	Discussion et définition de l'objectif de la thèse . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Etat de l'art de l'impact non-létal thoracique et de la pénétration de la peau</b>	<b>25</b>

---

3.1	Généralités . . . . .	25
3.1.1	L'échelle AIS . . . . .	25
3.1.2	Critère lésionnel, tolérance lésionnelle, et probabilité de lésion	26
3.1.3	La problématique de la cible humaine . . . . .	29
3.2	L'impact thoracique non-pénétrant . . . . .	29
3.2.1	L'impact thoracique non-pénétrant dans le milieu du crash automobile . . . . .	30
3.2.2	L'impact thoracique non-pénétrant d'un projectile non-létal selon l'université de Wayne State . . . . .	34
3.2.3	Détermination de corridors biomécaniques . . . . .	34
3.2.4	Détermination de critères lésionnels thoraciques . . . . .	36
3.2.5	Développement d'un " <i>surrogate</i> " pour l'impact non-létal thoracique . . . . .	38
3.2.6	Discussion sur les études de WSU . . . . .	38
3.3	L'étude de la pénétration de la peau par projectile non-létal . . . . .	39
3.3.1	La méthode initiale de WSU . . . . .	40
3.3.2	La méthode "Force Wall" . . . . .	44
3.3.3	Discussion sur l'étude de la pénétration de la peau . . . . .	46
3.4	Efficacité d'une arme non-létale à énergie cinétique . . . . .	47
3.5	Contribution originale de la thèse . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Mise au point expérimentale</b>	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	51
4.2	Réalisation du laboratoire dédié à l'étude des projectiles non-létaux .	52
4.3	Conception du lanceur universel . . . . .	54
4.3.1	L'ancien lanceur universel . . . . .	55
4.3.2	Le nouveau lanceur universel . . . . .	56
4.3.3	Les relations pression-vitesse . . . . .	57

---

---

4.3.4	Le couple sabot-séparateur . . . . .	59
4.3.5	Le tir du projectile instrumenté . . . . .	63
4.4	La mesure de vitesse du projectile avant impact . . . . .	63
4.5	Les mesures de balistique terminale . . . . .	67
4.5.1	La méthodologie employée pour l'étude de l'impact non-pénétrant	68
4.5.1.1	Les deux approches " <i>surrogate</i> " . . . . .	68
4.5.1.2	L'approche hybride : expérimentale et numérique . .	70
4.5.1.3	Comparaison des deux approches " <i>surrogate</i> " et de l'approche hybride . . . . .	74
4.5.1.4	La mesure du déplacement du point d'impact . . . .	76
4.5.2	La métrologie de l'étude de la pénétration de la peau . . . . .	78
4.5.2.1	La méthode " <i>WSU</i> " . . . . .	78
4.5.2.2	La méthode " <i>Force Wall</i> " . . . . .	78
4.6	Conclusion . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Logiciels d'exploitation des mesures</b>	<b>81</b>
5.1	Introduction . . . . .	81
5.2	Quelques concepts d'une caméra haute-vitesse . . . . .	82
5.3	Le logiciel de poursuite . . . . .	85
5.3.1	La calibration de l'image . . . . .	86
5.3.2	Le " <i>pre-processing</i> " . . . . .	87
5.3.3	Le " <i>processing</i> " . . . . .	88
5.3.4	Le " <i>post-processing</i> " . . . . .	91
5.3.5	La problématique du calcul de la vitesse . . . . .	92
5.3.6	La validation du logiciel . . . . .	94
5.4	Utilisation du logiciel de poursuite . . . . .	94
5.5	Conclusions . . . . .	96

---



---

<b>6</b>	<b>Validation des mesures et détermination des incertitudes</b>	<b>97</b>
6.0.1	Introduction . . . . .	97
6.1	Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact . . . . .	98
6.1.1	Quantification des incertitudes . . . . .	101
6.1.1.1	Incertitudes de calibration . . . . .	101
6.1.1.2	Incertitudes de prise du film . . . . .	101
6.1.1.3	Incertitudes de prise de mesure . . . . .	105
6.1.1.4	Autres incertitudes . . . . .	110
6.1.1.5	Bilan des incertitudes . . . . .	112
6.1.2	Influence des paramètres de la mesure de vitesse sur l'incertitude induite . . . . .	113
6.1.2.1	Influence de la distance orthogonale entre la caméra et la trajectoire de tir . . . . .	114
6.1.2.2	Influence de l'angle d'ouverture de la caméra . . . . .	116
6.1.2.3	Influence de la résolution géométrique de la caméra . . . . .	117
6.1.2.4	Influence de la fréquence d'ouverture de la caméra . . . . .	117
6.1.2.5	Influence de la distance $d_c$ sur laquelle la calibration de l'image est réalisée . . . . .	118
6.1.2.6	Influence de la distance $d_p$ parcourue par le projectile . . . . .	119
6.1.2.7	Influence de la vitesse du projectile . . . . .	120
6.1.3	Comparaison de l'incertitude théorique à l'erreur de vitesse mesurée expérimentalement . . . . .	121
6.1.4	Conclusions sur l'incertitude de mesure de la vitesse . . . . .	123
6.2	Détermination de l'incertitude de mesure d'un déplacement . . . . .	125
6.3	Validation de la mesure de force et détermination de l'incertitude liée . . . . .	128
6.3.1	Le montage " <i>mur rigide</i> " . . . . .	128
6.3.2	Validation des mesures . . . . .	131

---

---

6.3.2.1	Etude de répétabilité des mesures issues des deux capteurs de force . . . . .	131
6.3.2.2	Comparaison des résultats mesurés par les deux capteurs de force . . . . .	132
6.3.2.3	Comparaison des résultats mesurés par le capteur de force et par la déformation d'un ressort . . . . .	135
6.3.2.4	Bilan de quantité de mouvement lors d'un impact d'un projectile non-létal sur le capteur Kistler . . . . .	138
6.3.2.5	Discussion sur la validation de la mesure de force à l'aide du montage Kistler . . . . .	141
6.3.3	Détermination de l'incertitude de mesure du facteur de correction $k_{correction,Kistler}$ . . . . .	143
6.3.4	Conclusion sur la validation et la détermination de l'incertitude de la mesure de force . . . . .	146
6.4	Conclusions . . . . .	147
<b>7</b>	<b>Réalisation des essais</b>	<b>149</b>
7.1	Introduction . . . . .	149
7.2	Résultats de tirs sur mur rigide . . . . .	149
7.2.1	Le 40 mm Spartan LE 40 de Nobel Sport . . . . .	152
7.2.2	Le 40 mm Sir de Brügger et Thomet . . . . .	156
7.2.3	Le 40 mm Impulse de Nico Pyrotechnics . . . . .	158
7.2.4	Le RB1FS . . . . .	160
7.2.5	Le FN303 . . . . .	163
7.2.6	Le Beanbag . . . . .	164
7.2.7	Le Projectile en Matériau Innovant . . . . .	167
7.2.8	Incetitude des mesures de forces, de déplacement, et du diamètre d'impact du projectile . . . . .	169
7.2.9	Discussion des résultats . . . . .	171
7.3	Etude de la pénétration de la peau . . . . .	172

---

---

7.3.1	la " <i>méthode WSU</i> " . . . . .	173
7.3.1.1	Validation du montage expérimental . . . . .	174
7.3.1.2	Amélioration du " <i>surrogate</i> " . . . . .	176
7.3.1.3	Impacts de projectiles non-létaux . . . . .	178
7.3.1.4	Comparaison des résultats et détermination de l'in- certitude de mesure du $V_{50}$ . . . . .	180
7.3.2	la méthode " <i>Force Wall</i> " . . . . .	184
7.3.3	Discussion des résultats . . . . .	188
7.4	Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal . . . . .	190
7.4.1	Introduction . . . . .	190
7.4.2	Détermination des valeurs seuils correspondant au potentiel lésionnel, à la dispersion et à l'efficacité . . . . .	192
7.4.3	Le modèle numérique thoracique . . . . .	193
7.4.4	Etude du système d'arme F2000 tirant le projectiles Spartan LE 40 de Nobel Sport . . . . .	195
7.4.4.1	Réalisation de tirs à l'aide du lanceur F2000 et du projectile à différentes distances . . . . .	195
7.4.4.2	Etude de la pénétration de la peau . . . . .	196
7.4.4.3	Etude de l'impact non-pénétrant . . . . .	197
7.4.4.4	Etude des distances d'emploi du système d'arme F2000 - NS . . . . .	199
7.4.5	Etude des système d'arme FN303 et FN303p tirant le projec- tile FN303 . . . . .	200
7.4.5.1	Réalisation de tirs à l'aide du FN303 et du FN303p à différentes distances . . . . .	200
7.4.5.2	Etude de la pénétration de la peau . . . . .	201
7.4.5.3	Etude de l'impact non-pénétrant . . . . .	201
7.4.5.4	Etude de la distance d'emploi du FN303 et du FN303p . . . . .	204
7.4.6	Discussion des résultats . . . . .	206

---

---

7.5	Conclusions . . . . .	208
<b>8</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>211</b>
8.1	Objectif . . . . .	211
8.2	Réalisations . . . . .	211
8.3	Résultats . . . . .	212
8.4	Perspectives . . . . .	213
	<b>Bibliographie</b>	<b>215</b>
	<b>Annexes</b>	<b>225</b>
A	Témoignage d’emplois d’armes non-létales par la DSU	227
B	Cas de décès rapportés dans l’étude NIJ 2004	231
C	Liste des participants des groupes OTAN	233
D	Quelques résultats essentiels de l’étude de WSU par Bir	237
E	Mise au point du couple séparateur-sabot	241
F	La mesure de force par capteur flexiforce	245
1	La mesure de force par capteur flexiforce . . . . .	245
2	Calibration statique . . . . .	247
3	Calibration dynamique . . . . .	249
4	Discussion . . . . .	255
G	La mesure de force par accéléromètre	257
1	Tir du projectile instrumenté à l’aide du lanceur pneumatique . . . . .	258
2	Conception du projectile instrumenté . . . . .	260
H	Caractéristiques techniques des instruments employés	265

---

---

<b>I</b>	<b>Deux logiciels développés pour l'étude</b>	<b>277</b>
1	Le logiciel de traitement de la mesure de force . . . . .	277
2	Le logiciel des calculs de dispersion . . . . .	282
<b>J</b>	<b>Publications réalisées dans le cadre de ce doctorat</b>	<b>285</b>

# Table des figures

2.1	Nombre d'utilisation d'armes non-létales et pourcentage d'opérations amenant l'emploi d'armes non-létales pour l'ATF et L'USMS au fil des années [10]. . . . .	8
2.2	(a) Le lanceur F2000 équipé d'un lance grenade 40 mm. (b) Quelques projectiles 40mm. De gauche à droite, le Nobel Sport Spartan LE-40, le même dans sa cartouche, le Brügger et Thomet Sir-X, le même dans sa cartouche et le Rheinmetall Nico Pyrotechnik Impulse Nic, et le même dans sa cartouche. . . . .	11
2.3	(a) Le lanceur fusil FN303 et le pistolet FN303p . (b) Le projectile FN303, tirable par les deux lanceurs. . . . .	11
2.4	(a) deux versions du lanceur flashball de Verney-Carron . (b) Le projectile Flashball tiraille par les deux lanceurs. . . . .	12
2.5	Des projectiles bâton, de 37 mm. A gauche, un projectile en caoutchouc de 28 g, au milieu un projectile en bois de 32 g, à droite un projectile en plastique de 134 g (le L5). . . . .	12
2.6	(a) Deux lanceurs calibre 12. (b) Divers projectiles calibre 12. (c) Le projectile RB1FS. (d) Le projectile Beanbag. . . . .	13
2.7	Les Projectiles en Matériaux Innovants (PMI). . . . .	14
2.8	Le pistolet électrique Taser X26. . . . .	15
2.9	Exemple de spray OC, en spray. . . . .	16
2.10	L'Active Denial System (ADS). . . . .	17
2.11	Lésion superficielle observée après l'impact d'un projectile plastique [15]. . . . .	19

---

2.12	Répartition des projectiles non-létaux employés par les forces de l'ordre américaine entre 1980 et 2000, 962 tirs recensés [23]. . . . .	20
2.13	Les choix opérés amenant à la définition de l'objectif de la thèse. . . . .	24
3.1	Illustration de la courbe de probabilité de lésion en fonction d'un critère lésionnel. . . . .	28
3.2	Comparaison d'un impact non-létal et d'un impact issu d'un crash automobile, adapté de [14, 41]. . . . .	30
3.3	Représentation du viscous mechanism et calcul du critère lésionnel. . . . .	31
3.4	Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition A [14]. . . . .	35
3.5	Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition A [14]. . . . .	35
3.6	Corrélation entre la probabilité d'observer un AIS>1 suite à un impact thoracique non-létal et les critères $(VC)_{max}$ (a) et BC (b) [14]. . . . .	37
3.7	Les " <i>surrogates</i> " thoraciques, pour un impact arrivant de la droite de l'image [14]. . . . .	38
3.8	Exemple de cas de non-pénétration et de pénétration [52]. . . . .	41
3.9	Les différentes zones impactées dans l'étude de la pénétration de WSU, [33, 52, 53]. . . . .	42
3.10	Schéma du dispositif expérimental a [52–54]. . . . .	43
3.11	Comparaison des résultats sur PMHS avec les résultats du dispositif sélectionné [52–54]. . . . .	45
3.12	Méthode de la DGA. (1) projectile, (2) mur rigide équipé du capteur de force, (3) caméra haute vitesse [55]. . . . .	45
4.1	Une ligne de tir non-létale installée dans le laboratoire du département balistique de l'ERM, photo prise en 2009. . . . .	53
4.2	L'enceinte permettant la protection de l'environnement lors des tirs. Les dimensions sont en mm. . . . .	53
4.3	L'ancien lanceur pneumatique. . . . .	55
4.4	Le nouveau lanceur pneumatique universel. . . . .	57

---

---

4.5	La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la surpression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour différents projectiles. . . . .	58
4.6	(a) Un exemple de sabot de 30 mm pour le projectile FN303, avec de gauche à droite le sabot seul, le sabot et son projectile, et le projectile seul. (b) Un exemple de séparateur adapté au sabot de 30 mm pour le projectile FN303. . . . .	60
4.7	(a) Un exemple de bonne attitude du projectile PMI - séparation à 50 m/s (b) Un exemple de mauvaise attitude du projectile PMI - séparation à 115 m/s . . . . .	61
4.8	Un exemple de la séparation droite avec un sabot de 42 mm en matériau PNR, un amortisseur en mousse et un séparateur constitué d'une plaque en aluminium percée et d'une plaque de PNR servant à amortir l'impact. . . . .	62
4.9	Un exemple de séparation du projectile PMI tiré à une vitesse de 110 m/s. . . . .	62
4.10	La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la surpression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour des PMI. . . . .	62
4.11	La base de vitesse. (a) Illustration du fonctionnement, vue de face. (b) photo de la base de mesure, vue latérale. . . . .	64
4.12	Photo de la mire permettant de traduire une distance en pixels en une distance réelle. . . . .	65
4.13	Une chaîne de mesure typique employée pour ce doctorat. . . . .	67
4.14	Le capteur Flexiforce. . . . .	69
4.15	Le plan d'assemblage de la version finale du projectile instrumenté. . . . .	69
4.16	La méthodologie de travail liée à l'emploi du capteur piézoélectrique. . . . .	71
4.17	(a) la cible rigide dans laquelle le capteur est vissé, (b) Le capteur PCB employé, (c) l'assemblage des deux. . . . .	73
4.18	Les mesures de force en fonction du temps pour un impact d'un projectile FN303 sur mur rigide, à différentes vitesses. . . . .	73
4.19	Les mesures de force maximum en fonction de la vitesse d'impact pour un impact d'un projectile FN303 sur mur rigide. . . . .	74

---



---

4.20	Courbes de l'enfoncement de la tête déformable d'un projectile Nobel Sport Spartan LE 40 mm en fonction du temps, pour différentes vitesses d'impact. . . . .	77
4.21	Courbes de la vitesse de l'enfoncement de la tête déformable d'un projectile Nobel Sport Spartan LE 40 mm en fonction du temps, pour différentes vitesses d'impact. . . . .	77
5.1	Une exemple de profondeur de champ réduite. On y voit bien la zone nette et la zone floue. . . . .	83
5.2	Représentation schématique de l'angle d'ouverture d'une caméra. . . . .	83
5.3	Exemple du phénomène de flou directionnel lors d'un tir d'un projectile RB1FS à différentes vitesses. . . . .	84
5.4	L'interface de l'étape " <i>calibration de l'image</i> ". . . . .	86
5.5	L'interface de l'étape " <i>pre-processing</i> ". . . . .	88
5.6	L'opération de soustraction ou d'addition de l'image $t_0$ . A gauche, on retire à chaque pixel sa valeur initiale; à droite, on réalise l'opération complémentaire. . . . .	89
5.7	L'interface de l'étape " <i>processing</i> ". . . . .	90
5.8	L'interface de l'étape " <i>post-processing</i> ". . . . .	91
5.9	L'erreur de type 1 (a) sur le signal déplacement en fonction du temps, sur un faible intervalle de temps et (b) sur le signal vitesse en fonction du temps pour un mouvement de chute libre d'une sphère, sur un intervalle de temps plus long. . . . .	92
5.10	L'erreur de type 2 sur (a) le signal déplacement en fonction du temps et sur (b) le signal vitesse en fonction du temps pour un mouvement de chute libre d'une sphère. . . . .	93
5.11	Exemple du traitement du signal vitesse pour la poursuite du mouvement horizontal d'un projectile 40 mm lancé à 60 m/s et impactant un mur rigide. . . . .	94
5.12	La validation des mesures à l'aide du logiciel de poursuite par l'étude d'une sphère en chute libre et comparaison avec un modèle théorique (PMM). . . . .	95

---

---

6.1	L'influence (a) de l'incertitude longueur mire, (b) de l'incertitude pixel mire, et (c) de l'incertitude plan mire, sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	102
6.2	Illustration de la géométrie liée à la la non-orthogonalité entre l'axe de la caméra et la trajectoire de tir, vu du haut. . . . .	102
6.3	L'influence de l'incertitude $\gamma$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	104
6.4	Implication de l'emploi de l'équation 6.9 pour le calcul de l'incertitude liée au flou directionnel, lors du te tirs du projectile RB1FS à différentes vitesses. . . . .	106
6.5	Illustration de l'effet de la parallaxe, vu du haut. . . . .	107
6.6	L'influence de " <i>l'erreur parallaxe</i> " pour un projectile sphérique et pour un projectile cylindrique, (a) et (c) dans le cas d'une prise de mesure autour du centre de l'image, et (b) et (d) dans le cas d'une mesure sur une moitié d'image, sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	109
6.7	Illustration de l'effet de perspective, vu du haut. . . . .	111
6.8	Influence de l'effet de distorsion sur le facteur de calibration. . . . .	112
6.9	Influence de la distance L sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse, avec mise en évidence du bruit. . . . .	115
6.10	Influence de l'angle d'ouverture $\Omega$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	116
6.11	Influence de la résolution géométrique $res_g$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	117
6.12	Influence de la fréquence d'ouverture de la caméra $SS$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	118
6.13	Influence de la distance $d_c$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	119
6.14	Influence de la distance $d_p$ sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	119
6.15	Influence de la vitesse $v$ du projectile sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse. . . . .	120

---

---

6.16 Erreurs et incertitudes de mesure relatives entre la mesure de vitesse par base de mesure optique et par caméra haute-vitesse et incertitudes de mesures liées. . . . .	123
6.17 Détermination d'un corridor tenant compte de l'incertitude de la mesure de déplacement horizontal d'un projectile Nobel Sport impactant une surface rigide à 60 m/s. . . . .	127
6.18 Le setup mis en place pour le mur rigide : (a) structure rigide, (b) le capteur PCB200C20, (c) le capteur Kistler 9061a, (d) l'assemblage vissé du capteur PBC (" <i>montage PCB</i> "), (e) l'assemblage en sandwich du capteur Kistler 9061a (" <i>montage Kistler</i> "). . . . .	129
6.19 Les deux montages de fixations des capteurs piezoélectriques : (a) le " <i>montage PCB</i> ", (b) le " <i>montage Kistler</i> ". . . . .	130
6.20 Mesure de l'impact d'un projectile FN303 à 32 m/s sur le capteur PCB200C20 avec et sans palet d'impact. . . . .	130
6.21 Exemple de répétabilité de la mesure de la force avec le montage Kistler.	132
6.22 Comparaison des signaux de force issus d'impacts mesurés par le montage Kistler et le montage PCB. . . . .	133
6.23 Comparaison des signaux de force issus d'impacts mesurés par le montage Kistler et le montage PCB. . . . .	134
6.24 Comparaison de la réponse fréquentielle du bruit du signal Kistler après impact, pour l'impact d'un FN303 à 90 m/s et l'impact d'un Nobel sport à 60 m/s. . . . .	134
6.25 Le calibrateur permettant la calibration du montage Kistler à l'aide de la mesure de la déformation d'un ressort. . . . .	136
6.26 Résultat du calibrateur : comparaisons entre les mesures de force du montage Kistler et de la déformation du ressort. . . . .	137
6.27 Exemple du l'interface du logiciel de calcul de la quantité de mouvement à l'aide du capteur de force et à l'aide de la caméra haute vitesse. . . . .	140
6.28 Comparaison des facteurs $k_{correction,Kistler}$ obtenus grâce au calibrateur et à l'aide du bilan de quantité de mouvement. . . . .	142
6.29 Illustratin du calcul de l'incertitude de mesure $IM_{pkistler}$ . . . . .	145

---

---

7.1	L'intégralité des projectiles testés. De gauche à droite : le 40 mm Spartan LE-40 de Nobel Sport (NS), le Sir de Brügger et Thomet (BT), le Impulse de Nico Pyrotechnics (NP), le RB1FS, le FN303, le Beanbag (BB), et le prototype de projectile en matériau innovant (PMI). . . . .	150
7.2	Le montage expérimental employé pour l'étude de l'impact du projectile sur mur rigide. . . . .	151
7.3	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm NS sur mur rigide à une vitesse de 35 m/s. . . . .	153
7.4	Exemple de profil de fracture de deux projectiles 40 mm. . . . .	154
7.5	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm NS sur mur rigide. . . . .	155
7.6	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm BT sur mur rigide à une vitesse de 36 m/s. . . . .	156
7.7	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm BT sur mur rigide. . . . .	157
7.8	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm NS sur mur rigide à une vitesse de 36 m/s. . . . .	158
7.9	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm NP sur mur rigide. . . . .	159
7.10	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un RB1FS sur mur rigide à une vitesse de 33 m/s. . . . .	161
7.11	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles RB1FS sur mur rigide. . . . .	162
7.12	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un FN303 sur mur rigide à une vitesse de 34 m/s. . . . .	163
7.13	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles FN303 sur mur rigide. . . . .	164
7.14	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un beanbag sur mur rigide à une vitesse de 31 m/s. . . . .	165
7.15	Différentes attitudes du projectile beanbag avant l'impact, pour une vitesse proche de 30 m/s. . . . .	165

---

---

7.16	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles beanbag sur mur rigide. . . . .	166
7.17	Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un PMI sur mur rigide à une vitesse de 92 m/s. . . . .	167
7.18	Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles PMI sur mur rigide. . . . .	168
7.19	La courbe de $V_{50}$ des essais de tirs sur PMHS et de tirs sur le " <i>surrogate</i> " mis au point par WSU (adaptés de [52–54]). . . . .	174
7.20	Le montage expérimental de l'étude de la pénétration de la peau. . .	175
7.21	Les différentes courbes de $V_{50}$ obtenues en répliquant le dispositif de WSU. . . . .	176
7.22	Résultats des courbes de $V_{50}$ obtenus pour les tirs de projectiles RB1FS sur le " <i>surrogate</i> " constitué d'un bloc de gélatine, du panneau en mousse, et de peau de chamois synthétique. . . . .	177
7.23	Résultats des courbes de $V_{50}$ obtenus pour les tirs de projectiles RB1FS sur le " <i>surrogate</i> " constitué d'un bloc de gélatine, du panneau en mousse, et d'un film de tuftane. . . . .	177
7.24	Résultats des courbes de $V_{50}$ obtenus pour les tirs de projectiles FN303 sur le " <i>surrogate original</i> ". . . . .	178
7.25	Résultats des courbes de $V_{50}$ obtenus pour les tirs de projectiles beanbag sur le " <i>surrogate original</i> ". . . . .	179
7.26	Résultats des courbes de $V_{50}$ obtenus pour les tirs de projectiles PMI sur le " <i>surrogate original</i> ". . . . .	179
7.27	Ensemble des résultats de $V_{50}$ obtenus pour l'étude du " <i>surrogate</i> ", et incertitudes associées. . . . .	181
7.28	Ensemble des résultats de $V_{50}$ obtenus pour l'étude de différents projectiles, et incertitudes associées. . . . .	182
7.29	Ensemble des résultats de $DE_{50}$ obtenus pour l'étude de différents projectiles, et incertitudes associées. . . . .	183
7.30	Exemple du calcul de la contrainte au cours du temps par le logiciel de poursuite. . . . .	185

---

---

7.31	Exemple de la mesure de contrainte à l'impact au cours du temps pour le tir d'un projectile RB1FS impactant le capteur à une vitesse de 90,2 m/s. . . . .	186
7.32	Exemple de la mesure de contrainte à l'impact au cours du temps pour le tir d'un projectile 40 mm NS impactant le capteur à une vitesse de 91,9 m/s. . . . .	187
7.33	La méthodologie de travail liée à l'emploi du capteur piézoélectrique.	191
7.34	Illustration du thorax numérique développé en LS-DYNA. . . . .	193
7.35	Les résultats de validation du thorax numérique, grâce aux corridors biomécaniques. (a) Le graphe force en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 20 m/s. (b) Le graphe déplacement horizontal du thorax en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 20 m/s. (c) Le graphe force en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 40 m/s. (d) Le graphe déplacement horizontal du thorax en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 40 m/s. . . . .	194
7.36	La montage expérimental employé pour la mesure de la dispersion du système d'arme et la retardation du projectile. . . . .	195
7.37	(a) Les résultats de dispersion et (b) les résultats de retardation obtenus suite au tir du projectile NS à l'aide du lanceur F2000, en intérieur.	196
7.38	Comparaison des résultats expérimentaux de tirs du projectile NS sur mur rigide avec les résultats issus des simulations numériques. . . . .	197
7.39	Les résultats du calcul du critère $(VC)_{max}$ mesuré pour l'impact d'un projectile Nobel Sport impactant le thorax. . . . .	198
7.40	(a) Les résultats de dispersion et (b) les résultats de retardation obtenus suite au tir du projectile FN303 à l'aide du lanceur FN303 et du FN303p, en intérieur. . . . .	200
7.41	Comparaison des résultats expérimentaux de tirs du projectile FN303 sur mur rigide avec les résultats issus des simulations numériques. . . . .	202
7.42	Les résultats du calcul du critère $(VC)_{max}$ mesuré pour l'impact d'un projectile FN303 impactant le thorax. . . . .	203
D.1	Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition B [14]. . . . .	237

---

---

D.2	Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition B [14]. . . . .	238
D.3	Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition C [14]. . . . .	238
D.4	Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition C [14]. . . . .	239
E.1	Un exemple de la séparation droite avec un sabot de 40 mm en matériau PNR et un amortisseur en mousse. . . . .	242
E.2	Un exemple de la séparation type projectile flèche avec un sabot en deux parties plastique ABS et un séparateur en ABS présentant un guide aidant à la séparation. . . . .	242
E.3	Un exemple de la séparation élastique avec un sabot en plastique ABS et un séparateur constitué d'élastiques. . . . .	243
E.4	Les différentes solutions de séparation testées. . . . .	243
E.5	Un exemple de séparation du projectile PMI tiré à une vitesse de 110 m/s. . . . .	244
E.6	La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la surpression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour des PMI. . . . .	244
F.1	Le circuit électrique du capteur Flexiforce. . . . .	246
F.2	La presse mécanique employée pour la réalisation de la calibration statique du capteur. . . . .	248
F.3	Les résultats de la calibration statique des capteurs Flexiforce. . . . .	248
F.4	(a) Le calibrateur dynamique - (b) la tour de chute du département ABAL - (c) zoom sur la pièce interface-ressort du calibrateur dynamique. . . . .	251
F.5	La comparaison des signaux purs (a) et filtrés (b) obtenus à l'aide du calibrateur dynamique. . . . .	252
F.6	Le nouveau calibrateur dynamique. . . . .	253
F.7	(a) Résultats des essais de calibration dynamique de différents capteurs. (b) Comparaison aux résultats statique et aux résultats obtenus dans la littérature [100]. . . . .	254

---

---

G.1	L'ouverture permettant le passage du fil de l'accéléromètre. . . . .	259
G.2	(a) La bobine perpendiculaire à la trajectoire du fil, débobinage par rotation de la bobine, (b) la bobine conique d'axe confondu à la trajectoire du fil, débobinage sans rotation. . . . .	259
G.3	Les différentes versions du projectile instrumenté, les versions évoluant de gauche vers la droite. En haut, une vue du haut, avec l'accéléromètre vissé au centre, caché pour le projectile final. En bas, vue latérale, avec présence d'un palet en aluminium pour le projectile final.	261
G.4	La version finale du projectile instrumenté. . . . .	261
G.5	Le plan d'assemblage de la version finale du projectile instrumenté. . . . .	262
G.6	(a) Comparaison de courbes de force en fonction du temps fournies par le capteur de force de référence et par l'accéléromètre - (b) Résultats des tests de calibration de l'accéléromètre. . . . .	263
H.1	Les spécifications techniques du capteur de force PCB200C20. . . . .	266
H.2	Les spécifications techniques de l'accéléromètre PCB350C02. . . . .	267
H.3	Les spécifications techniques de l'alimentation/amplificateur PCB ICP 482 B11. . . . .	268
H.4	Les spécifications techniques du capteur de force Kistler 9061a. . . . .	269
H.5	Les spécifications techniques de l'amplificateur de charge Kistler 4603b, partie 1. . . . .	270
H.6	Les spécifications techniques de l'amplificateur de charge Kistler 4603b, partie 2. . . . .	271
H.7	Les spécifications techniques du capteur de force Flexiforce. . . . .	272
H.8	Les spécifications techniques du dispositif d'acquisition de données NI PCI6110. . . . .	273
H.9	Les spécifications techniques de la caméra haute-vitesse Photron SA5. . . . .	274
H.10	Les spécifications techniques de la caméra haute-vitesse Photron Ultima APX. . . . .	275
H.11	Les spécifications techniques de la base de mesure optique Drello LS1. . . . .	276
I.1	L'interface du logiciel d'acquisition. . . . .	278

---



---

I.2	L'interface du logiciel de traitement de données. . . . .	281
I.3	L'algorithme de fenêtrage du signal. . . . .	282
I.4	Exemple d'images exportées par le logiciel de calcul de dispersion d'impact. Les $R_{90}$ (voir section 7.4.2) y sont représentés. (a) les ré- sultats de dispersion du FN303, pour des tirs à une distance de 20 m. (b) Une comparaison des résultats de dispersion du Nobel Sport Spartan LE 40 (NS), à différentes distances. . . . .	283

# Liste des Tables

2.1	Opportunités d'emploi d'armes non-létales par les forces militaires [2].	8
2.2	quelques projectiles non-létaux actuellement disponibles sur le marché et leurs caractéristiques principales. . . . .	14
2.3	Différentes armes chimiques employées. . . . .	16
2.4	Répartition des zones touchées par les projectiles d'impact, et leurs lésions provoquées [23]. . . . .	21
3.1	l'échelle AIS appliquée au thorax [26–28]. . . . .	26
3.2	Les projectiles bâtons rigides tirés par les études de WSU [14]. . . . .	34
3.3	Les valeurs des paramètres des courbes présentées sur la figure 3.6 par l'équation (3.1) [14]. . . . .	37
3.4	Les résultats de skin penetration obtenus par WSU [33, 52, 53]. . . . .	42
4.1	Les résultats des mesures de vitesse du projectile à l'aide d'une base de mesure optique et à l'aide d'une caméra haute vitesse. . . . .	66
6.1	Les paramètres typiques employés pour la prise de mesure de vitesse.	100
6.2	Bilan des différentes erreurs et incertitudes sur l'incertitude totale de la mesure de vitesse. . . . .	113
6.3	Les paramètres employés pour la comparaison de la mesure de vitesse à l'aide de la caméra et du logiciel de poursuite par rapport à celle de la base de mesure optique. . . . .	121
6.4	Comparaison entre l'erreur de mesure de vitesse et l'incertitude théorique. . . . .	122

---

6.5	Résultat des essais de calibration du montage Kistler à l'aide du calibreur. . . . .	138
6.6	Résultat des essais de calibration du montage Kistler à l'aide du bilan de quantité de mouvement. . . . .	141
6.7	Données employées pour le calcul de l'incertitude du facteur de correction $k_{correction,kistler}$ . . . . .	143
7.1	Les paramètres du montage caméra pour les différents essais réalisés. . . . .	151
7.2	Comparaison de la quantité de mouvement transmise à la cible, mesurée par le capteur de force et par la caméra haute-vitesse. . . . .	161
7.3	Les résultats des essais de calibration réalisés pour les mesures. . . . .	169
7.4	Les incertitudes liées aux mesures des tirs des projectiles sur mur rigide. . . . .	170
7.5	Résumé des $V_{50}$ , des $\sigma_{V_{50}}$ et des incertitudes de mesure de la valeur $V_{50}$ ( $IM_{V_{50}}$ ) obtenus pour les tirs sur " <i>surrogate</i> ". . . . .	182
7.6	Les valeurs du critère $(VC)_{max}$ relevées expérimentalement et numériquement. . . . .	195
7.7	Résultat final de l'analyse de létalité du projectile NS. . . . .	199
7.8	Résultat final de l'analyse de létalité du projectile FN303 tiré à l'aide du lanceur FN303(a), et du lanceur FN303p (b). . . . .	205
C.1	Les pays représentés dans les différents groupe OTAN mentionnés dans le document principal. . . . .	233
D.1	Les résultats bruts de la mesure du critère $(VC)_{max}$ obtenus lors des tirs sur thorax PMHS dans les conditions A, B, et C [14]. . . . .	239
F.1	Résultats statistiques du test statique par palier. . . . .	248
F.2	Résultats statiques du test statique par charge progressive. . . . .	249
F.3	Résultats des différents tests de calibration. . . . .	254
G.1	Paramètres statistiques de K, nouveau facteur de calibration de l'accéléromètre PCB 350C02. . . . .	264

---

# Liste des acronymes

<b>Accronyme</b>	<b>Signification</b>
3RBID	3 Rib Ballistic Impact Dummy
3RCS	3 Rib Chest Structure
AAP 6	Glossaire de l'OTAN
ABAL	Département Système d'Armes et Balistique, de l'ERM
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
ADS	Active Denial System
AEP	Atenuated Energy Projectile
AEP	Document OTAN Lié à un STANAG ou un STANREC et décrivant les méthodes proposées
AIS	Abreviated Injury Scale
ATF	Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives - USA
BB	Projectile Beanbag
BIR	3 Ballistic Impact Rig - à ne pas confondre avec le professeur Bir, de WSU
BMO	Base de Mesure Optique
BT	Brügger et Thomet Sir-X
CFC	Channel-Frequency-Class : type de filtre de signaux employé dans l'accidentologie
CN	2-chloroacétophénone
CR	Dibenz-1,4-oxazépine
CS	2-chlorobenzylidène malononitrile
DAQ	Dispositif d'acquisition de données
DAT 11	Onzième initiative du programme "Defense Against Terrorism"
<i>DE</i> <sub>50</sub>	Densité énergétique d'un projectile à l'impact, caractérisée par une probabilité de pénétrer la peau du corps humain égale à 50%

---

<b>Accronyme</b>	<b>Signification</b>
DGA	Direction Générale des Armements - France
DSU	Direction des Unités Spéciales de la Police Fédérale belge
ERM	Ecole Royale Militaire (=KMS=RMA)
FN (Herstal)	Fabrique Nationale, fabricant et fournisseur d'armes belge
FN303	Fusil lanceur de projectile non-létaux FN303 - Projectile non-létal
FN303p	Pistolet lanceur de projectile non létiaux FN303
IRCGN	Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (France)
LAL	Laceration Assessment Layer
LCG	Land Capability Group- groupe OTAN
M26	Modèle de Pistolet électrique TASER
NAAG	NATO Army Armaments Group
NAC	North Atlantic Council
NATO	North Atlantic Treaty Organization (=OTAN)
NATO-LCG-DSS	NATO - Land Capability Group - Dismounted Soldier
NLCSG-NLKE-TOE	System - Non Lethal Capabilities Sub Group - Non Lethal Kinetic Energy - Team Of Expert
NLC	Non Letal Capabilities
NP	Projectile Rheinmetall Nico Pyrotechnik Impulse 40mm
NS	Projectile Spartan LE40 de Nobel Sport
OC	Oléorésine de Capsicum
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (=NATO)
PAL	Penetration Assesment Layer
PCB	Marque de capteurs
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
PFP	Partnership For Peace - programme de coopération bilatérale entre les pays OTAN et d'autres pays Euro-Atlantique
PMHS	Post Mortem Human Subject
PMI	Projectile en Matériau Innovant
PMM	Point Mass Model, modèle de ballistique extérieure décrivant le comportement d'un projectile en vol libre
PNR	Polyéthylène Non-Réticulé
PVC	polychlorure de vinyle

---

---

<b>Accronyme</b>	<b>Signification</b>
RB1FS	Rubber Fins Stabilized Baton, projectile non-létal
TOR	Term Of Reference
USMS	United States Marshals Service - USA
$V_{50}$	Vitesse d'un projectile à l'impact, caractérisée par une probabilité de pénétrer la peau du corps humain égale à 50 %
WSU	Wayne State University
X26	Modèle de Pistolet électrique TASER le plus répandu

---

# Chapitre 1

## Introduction

Les armes dites non-létales sont apparues sur le marché il y a maintenant plus de cinquante ans. Le concept est séduisant : pouvoir stopper ou neutraliser une personne, sans lui occasionner de blessures graves ou permanentes. Cet outil semble parfaitement adéquat pour de nombreuses missions des forces de l'ordre et, in extenso, pour les forces militaires. Elle apporte une solution opérationnelle dans des situations où le contact physique direct ou vocal entre l'interpelleur et la cible n'est pas suffisant ou trop risqué pour pouvoir réaliser la mission dans les meilleures conditions, et lorsque l'utilisation d'armes conventionnelles, et toutes les conséquences que leur emploi peut apporter, n'est pas adapté.

Cela dit, dès les premiers pas de ces technologies, on constate que tout n'est pas si idyllique. Tout comme pour l'utilisation de matraques ou de contacts physiques directs par les forces de l'ordre, l'emploi de ces armes est toujours lié à un certain risque de lésions permanentes, voire même de décès de la cible. Il est certainement utopique d'imaginer que ces armes non-létales puissent un jour remplir leur mission sans être liées à un certain risque de lésions graves ou permanentes. C'est pourquoi le terme "*arme moïn-létale*", remplace tout doucement son prédécesseur.

Quoi qu'il en soit, la communauté impliquée par l'emploi de ces armes travaille quotidiennement pour au moins tendre vers cette situation utopique. Pour parvenir à cet objectif très ambitieux, il convient donc de mettre au point des méthodes d'évaluation permettant de déterminer le potentiel lésionnel d'un système d'armes, avant son utilisation en situations réelles. Ce résultat intéresse tout d'abord le fabricant, en vue d'améliorer la qualité de ses armes et de ses projectiles, qui pourront alors permettre des tirs provoquant de moins en moins de risques de lésions, à des distances plus élevées et avec une meilleure précision. L'acquéreur, de son côté, pourra comparer différents systèmes présents sur le marché, et se diriger vers le choix le plus adéquat pour ses besoins. Enfin, la communauté impliquée par leur utilisation



pourra mieux comprendre son système d'arme, et ainsi mieux définir comment s'en servir et être plus conscient des risques liés à l'utilisation de ces systèmes.

Le travail est gigantesque, c'est pourquoi la présente thèse s'est fixée pour objectif de mettre au point une méthode d'évaluation des armes non-létales dites à énergie cinétique qui sont actuellement les plus utilisées. Le principe de fonctionnement de ces armes consiste en le tir d'un projectile souvent très déformable, de masse comprise entre 5 et 100 g, à des vitesses de l'ordre de 100 m/s, dans le but de neutraliser la cible en lui occasionnant une sensation de douleur suffisamment intense, mais sans la blesser. Une étude de la littérature, que le lecteur retrouvera dans le deuxième chapitre de cette thèse, montre la prépondérance des lésions graves au niveau du thorax, en raison de la pénétration du projectile dans l'organisme ou par dommages occasionnés aux organes vitaux par un impact non-pénétrant. L'objectif fixé pour cette thèse est donc de mettre au point une méthode expérimentale permettant d'évaluer ces deux phénomènes.

L'ensemble des études réalisées sur le sujet par l'université de Wayne State aux Etats-Unis, décrit dans le troisième chapitre, constitue une source bibliographique majeure de ce doctorat. En particulier, des essais sur PMHS (Post Mortem Human Subject) y ont été réalisés, dont les résultats sont indispensables pour la présente étude. Ces données sont la perle rare dans la littérature ouverte, de par leur caractère unique. Malgré certaines réserves émises sur ces résultats, cette thèse s'inspire largement de ces travaux, avec toutefois la volonté d'être adaptable en fonction des nouvelles données qui seraient à l'avenir disponibles.

La mise au point expérimentale, coeur du problème, est ensuite abordée dans le quatrième chapitre. Elle a pour objectif de développer l'ensemble des outils indispensables pour poursuivre l'étude. En particulier, il s'agit de concevoir un lanceur, aux capacités inédites, lui permettant de tirer l'intégralité des projectiles non-létaux d'aujourd'hui et de demain, pour une gamme de vitesses représentative d'impacts observés en situations réelles. Une fois cette capacité de tir mise au point, il reste à définir les méthodes et moyens métrologiques employés pour réaliser l'évaluation proprement dite. Comme le lecteur le découvrira, la méthode définie est hybride entre des mesures expérimentales, qui constituent les résultats essentiels de ce doctorat, et des simulations numériques, actuellement développées par un autre chercheur de l'ERM. La mise au point de cette méthode hybride pour évaluer le potentiel lésionnel d'un projectile non-létal est une originalité essentielle de ce doctorat, et les résultats expérimentaux sont tout à fait inédits. Les deux technologies phares pour réaliser les mesures sont un capteur de force piezoélectrique et une caméra haute-vitesse.

Tous ces outils expérimentaux nécessitent également l'appui de logiciels, permettant d'exploiter au mieux les mesures. Le développement de ces logiciels fait l'objet

---

du cinquième chapitre. Ainsi, les images générées par la caméra haute-vitesse sont traitées à l'aide d'un logiciel de poursuite, dédié à l'exploitation des mesures expérimentales réalisées tout au long de ce doctorat.

Le sixième chapitre s'intéresse à l'incertitude liée à l'ensemble des mesures réalisées tout au long de cette thèse. Une approche semi-théorique, semi-expérimentale, est réalisée de manière à systématiquement quantifier l'incertitude liée à l'ensemble des mesures produites. Autant que possible, les calculs permettant de déterminer ces incertitudes sont intégrés dans les logiciels employés, ce qui permet de systématiquement déterminer ces incertitudes.

Enfin, le septième chapitre consiste en la réalisation pratique des méthodes définies dans les chapitres précédents pour enfin conclure sur le potentiel lésionnel thoracique de divers projectiles disponibles. L'intégralité des résultats expérimentaux obtenus pour étudier l'impact non-pénétrant et pour l'étude de la pénétration de la peau sont présentés pour sept projectiles non-létaux. Une méthode intégrée collationne ces résultats dans la démarche hybride, expérimentale et numérique, pour deux projectiles. L'application de cette méthode permet de déterminer le potentiel de ces deux projectiles dans différentes conditions de tir et, in fine, de déterminer des distances d'emploi, permettant un tir présentant un risque de lésion minimale, tout en restant efficace. Il s'agit là du résultat le plus abouti de ce doctorat.

Bien entendu, tout au long de ce parcours, de nombreuses perspectives sont mises en évidence. Ainsi le dernier chapitre, qui regroupe les conclusions essentielles de ce doctorat, tâche de mettre en évidence les améliorations qui restent à apporter au présent travail et propose de nombreuses pistes d'applications de l'ensemble des moyens et résultats proposés.



# Chapitre 2

## Exposition du problème et des objectifs

*« Soumettre l'ennemi par la force n'est pas le summum de l'art de la guerre, le summum de cet art est de soumettre l'ennemi sans verser une seule goutte de sang. »* Sun Tzu, *The Art of War*, daté du cinquième siècle BC [1].

Dans ce chapitre, le concept d'armes non-létales est abordé. Celles-ci seront définies, et un aperçu de leur emploi et de leur utilité sera exposé. Plusieurs catégories d'armes existant seront présentées, le choix se porte sur l'étude des armes non-létales antipersonnel à énergie cinétique. Une revue de littérature sur ces systèmes spécifiques sera alors exposée, mettant en valeur des zones critiques à étudier. La fin de ce chapitre aboutira à une définition complète, claire et précise de l'objectif de la présente thèse.

### 2.1 Contexte

Depuis maintenant une cinquantaine d'années, les nouvelles règles de conflits engagés par les forces de l'ordre ou par les organismes militaires, évoluent vers une tendance bien claire. De plus en plus, on cherche à accomplir une mission en évitant autant que possible des effusions de sang, ou des pertes humaines. Cet impératif, de plus en plus présent, a pu mettre en évidence le manque relatif d'équipement spécifique pour assurer la mission sous cette nouvelle contrainte<sup>1</sup>[3–5].

---

1. « During the 1999 Washington summit, the North Atlantic Council (NAC) identified Non-Lethal Weapons (NLW) as a "critical, additional capability needed in order to meet the demands of

Le terme "*arme non-létale*" voit le jour dans les années 1960, où un ensemble de différentes technologies se voient progressivement ainsi nommées par les forces de l'ordre. Il s'agit alors essentiellement d'agent chimiques irritants, ainsi que des projectiles non-pénétrants, tirés à l'aide d'armes à feu conventionnelles [4, 6]. Le concept d'armes non-létales, tel que nous l'entendons aujourd'hui, était né.

Ce n'est cependant que bien plus tard, durant les années 1990, durant lesquelles on observe un énorme gain d'intérêt pour ce type d'armement, que l'on retrouve une définition plus officielle de ce concept. L'OTAN le définit ainsi : «*Non-Lethal Weapons are weapons which are explicitly designed and developed to incapacitate or repel personnel, with a low probability of fatality or permanent injury, or to disable equipment, with minimal undesired damage or impact on the environment.*» (définition OTAN d'octobre 1999 C-M(99)44 diffusée sous la cote PFP(NAAG)N(99)2, du 16 novembre 1999). Suivant les organismes, on retrouve différentes définitions des armes non-létales [4].

Sémantiquement, les forces de l'ordre et les forces militaires exposées à des conflits suivent ce qu'on appelle le principe de proportionnalité<sup>2</sup>. Une situation à faible menace se résout à l'aide de contact verbal, de diplomatie ou de contact physique direct, tandis qu'une situation à très haute menace nécessite l'emploi d'armes létales conventionnelles tel que des armes à feu. L'utilisation d'armes non-létales devient adéquate en cas de menace intermédiaire entre ces deux situations extrêmes. Elles doivent permettre aux forces de l'ordre d'intervenir rapidement et efficacement, sans mettre ni l'ensemble des personnes à neutraliser, ni le public environnant, ni les forces de l'ordre, en danger. Elle remplissent donc une fonction pour laquelle il n'existait pas encore de moyens adaptés.

---

future operations." Recent and ongoing operations have confirmed this need. Lessons from peace support and anti-/counter- terrorism operations have highlighted the need to accomplish tasks while minimizing undesired or collateral effects, which is key to the very nature and definition of non-lethal weapons », cité de [2].

2. « *Le principe de proportionnalité vise à s'abstenir de lancer une attaque dont on peut attendre qu'elle cause incidemment des pertes en vies humaines dans la population civile, des blessures aux personnes civiles, des dommages aux biens de caractère civil, ou une combinaison de ces pertes et dommages, qui seraient excessifs par rapport à l'avantage militaire concret et direct attendu. L'application de ce principe pose en fait la question de l'adéquation entre les moyens mis en oeuvre et l'effet militaire recherché. L'application du principe de proportionnalité n'exclut pas que des dommages collatéraux puissent être subis par la population civile ou des biens civils, à condition que les dommages collatéraux ne soient pas excessifs par rapport à l'avantage militaire concret et direct attendu. Elle n'exclut pas non plus que des objectifs, jouissant d'une protection particulière en l'application d'une convention internationale, constituent des cibles lorsque cette convention mentionne expressément la faculté pour l'attaquant de tirer argument de l'existence d'une nécessité militaire pour infliger de tels dommages.* » [7]

Les applications pour les forces de l'ordre civiles sont nombreuses. Celle-ci sont « *constamment à la recherche de méthodes plus efficaces pour gérer les désordres publics, les émeutes, contrôler les manifestations, mais aussi les situations plus aiguës telles que des prises d'otages, les attentats terroristes ou la lutte contre les narcotrafiquants* » (cité de [5]).

Pour rendre les choses plus concrètes et moins conceptuelles, il convient bien sûr d'interroger les utilisateurs d'armes non-létales. Une telle démarche donne une idée bien plus claire du bénéfice que ce type d'armement peut apporter. Pour cette raison, l'annexe A expose deux témoignages inédits et généralement plutôt rares dans la littérature de situations ayant amenés l'emploi d'armes non-létales, là où un armement classique aurait été moins efficace. Il s'agit d'opérations menées par la Direction des Unités Spéciales de la Police Fédérale Belge (DSU).

De nombreuses missions militaires peuvent également voir leur efficacité accrue par l'emploi d'armes non-létales. Citons en particulier le cas de contrôles de check-point, d'émeutes urbaines, et de contrôles de foules (on retrouve dans [3] des exemples de ces situations en Irak où l'emploi d'armes non-létales aurait permis une meilleure efficacité de l'intervention). Ces missions obéissent au principe de proportionnalité, et l'intervention systématique à l'aide d'un arsenal militaire exclusivement légal n'est parfois pas suffisant ou pas efficace. Bien souvent, l'omniprésence de civils lors de ce type de mission peut rendre délicate l'utilisation d'armes classiques, en raison d'un trop grand risque de dommages collatéraux, qui amène inévitablement à un envenimement de la situation [3]. Par opposition, on retrouve dans [8] quelques exemples d'emploi d'armes non-létales ayant permis une plus grande efficacité de l'intervention. Enfin, la table 2.1, issue du rapport OTAN [2], mentionne les opportunités d'emploi des armes non-létales par les forces militaires. La réunion de lancement du DAT11 de l'OTAN amène ainsi à la définition des armes non-létales comme suit : « *... identified NLC (Non Letal Capabilities) as a **critical additional capability** needed to meet the demands of future operations ... NLC formalized as a Priority Shortfall Area in 2012* » [9].

Ces quelques considérations expliquent l'augmentation systématique de l'utilisation d'armes non-létales, que ce soit en milieu civil ou militaire, d'où une nécessité grandissante de maîtriser leurs effets. Des statistiques sont difficiles à obtenir, de par le caractère sensible de l'information. On retrouve tout de même certains chiffres de l'emploi d'armes non-létales aux USA par le "*bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives*" (ATF), et le "*United States Marshals Service*" (USMS) (figure 2.1) [10].

Challenge	Implication/Opportunity for NLW
<p><b>Minimize undesired casualties:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- When uncertain if a target is hostile.</li> <li>- When others (non-combatants or friendly forces) are near a target.</li> <li>- When the desired target effect/ response is temporary (i.e., not desired dead or destroyed).</li> </ul>	<p>Offer <i>reversible</i> means to act that will:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Help discern intent (also allowing for earlier use of lethal force upon determining hostile intent).</li> <li>- Dissuade, delay, or defeat the target.</li> <li>- Isolate threats from human shields.</li> </ul>
<p><b>Minimize undesired collateral effects:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- On infrastructure and facilities (especially if civilian/dual-use or of symbolic importance).</li> <li>- Which have an environmental impact.</li> </ul>	<p>Provide <i>limited duration</i> effects that:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deny adversary's use or access while preserving for later use.</li> <li>- Minimise re-construction needs.</li> </ul>
<p><b>Act when lethal force may not be allowed or may be counter-productive:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Policy, treaty/legal, or operational constraints.</li> <li>- Potential 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> order effects.</li> </ul>	<p>Tailor <i>effects</i> (type and magnitude) to:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Accomplish task requirements.</li> <li>- Satisfy constraints.</li> <li>- Avoid undesired consequences (negative perceptions or reactions).</li> </ul>

TABLE 2.1. Opportunités d'emploi d'armes non-létales par les forces militaires [2].

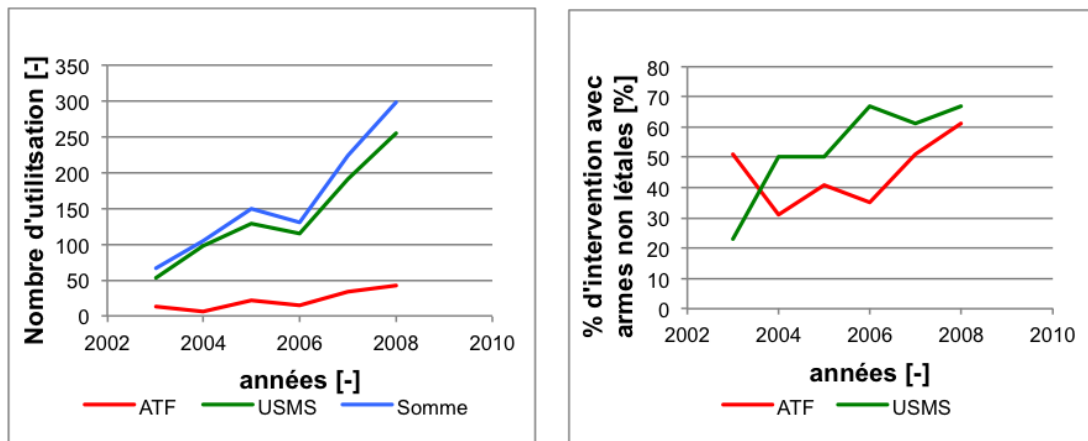


FIGURE 2.1. Nombre d'utilisation d'armes non-létales et pourcentage d'opérations amenant l'emploi d'armes non-létales pour l'ATF et L'USMS au fil des années [10].

## 2.2 Définition d'une arme non-létale

Armes non-létales, armes à létalité réduite, armes moins-létale, moyens de force intermédiaire, autant de terminologies pour désigner la même catégorie d'armement, définie dans un premier temps par la définition présentée dans la section 2.1. On identifie plusieurs faiblesses de cette définition.

- Tout d'abord, un débat existe autour de la terminologie "*létal*" qui dans la langue de Molière est synonyme de "*mortel*", tandis que la langue de Shakespeare, même si les définitions diffèrent, accepte couramment sous cette terminologie également les blessures graves. Une confusion existe donc déjà à ce niveau.
- Par ailleurs, les moyens à mettre en oeuvre pour effectuer la tâche ne sont pas spécifiés. De ce fait, un instrument peut se retrouver dans une catégorie létale, ou non-létale, selon l'utilisation que l'on en fait. Une utilisation d'arme à feu classique peut par exemple bien souvent être non-létale lors de tir sur les membres. Parallèlement, un cutter ou une paire de ciseau peut être considéré comme létal, si employés de manière inappropriée. Le terme "*non-létal*" ne fait donc pas l'unanimité, d'où le remplacement de celui-ci par "*létalité réduite*" ou "*moins-létale*".
- Enfin, on parle de probabilité faible, mais non définie. A tout un chacun de se faire alors un avis sur la question.

La définition OTAN 2008 améliore un peu les choses en définissant les armes non-létales comme « *A weapon that is **explicitly designed and primarily employed** to incapacitate or repel persons or to disable equipment, while **minimizing fatalities, permanent injury and damage to property and the environment**[AAP-6(2008) - glossaire OTAN].*

Cette définition ne spécifiant pas les moyens employés pour accomplir la tâche du système d'armes, on retrouve donc englobées sous cette terminologie des solutions technologiques très diverses [4, 8, 11, 12]. Une étude extensive de cet ensemble sort bien évidemment du cadre de ce doctorat. On constate en pratique un intérêt actuel très important pour étudier les armes antipersonnel, que ce soit du côté militaire ou civil [2, 5]. Elle correspondent d'ailleurs mieux aux types d'opérations civiles ou militaires opérées par l'état belge. Dans un premier temps, il a donc été choisi de limiter l'étude à cette catégorie. De nombreuses autres restrictions seront opérées tout au long de ce chapitre.



Parmi ces armes antipersonnel, on retrouve à nouveau diverses technologies. Trois catégories principales, employées de plus en plus fréquemment par les forces de l'ordre et les forces militaires, sont à mettre en évidence : les armes non-létales dites à énergie cinétique, les armes non-létales électriques, et les armes non-létales chimiques [13]. Diverses nouvelles technologies voient également le jour et sont regroupées sous l'appellation "*autres technologies*".

## 2.3 Exemples d'armes non-létales antipersonnel

### 2.3.1 Les armes non-létales à énergie cinétique

Ces armes apparues au début des années 1960 sont, avec les armes chimiques, les premiers systèmes d'armes qu'on peut qualifier d'armes non-létales. Le principe est de tirer, à l'aide d'une arme à feu classique ou d'un lanceur dédié, un projectile léger et se déformant de manière significative lors de l'impact, à une vitesse allant habituellement de 60 à 120 m/s. On parle de "*projectile non-létal*" et "*d'impact non-létal*". Le but est de neutraliser une personne ciblée en lui occasionnant une sensation douloureuse suffisante en termes de durée et d'intensité au niveau de la zone d'impact, sans pour autant la blesser. Bien évidemment, une blessure non voulue est toujours possible. La définition de l'OTAN précitée ne décrit justement pas précisément le type de blessure qu'on peut considérer comme acceptable, ou même la probabilité d'observer cette blessure. C'est donc à l'organisme responsable de l'emploi de ce système d'armes de définir ses propres méthodes et limites d'emploi (c'est bien sûr le cas également pour l'emploi d'autres catégories d'armes non-létales). En général, dans les pays occidentaux, il est de bonne pratique de définir la lésion maximum acceptable comme ne nécessitant pas un traitement médical allant au-delà du traitement simple de première ligne (soins locaux sur place ou en service d'urgences sans nécessité d'hospitalisation). En général, le projectile non-létal ne doit jamais occasionner une pénétration dans l'organisme et provoquer une blessure ouverte. On parle donc "*d'impact non-pénétrant*", ou de "*blunt-trauma*" [14].

Pour remplir cette fonction, on retrouve sur le marché des projectiles de taille, de masse et de matériaux très différents (table 2.2). En voici quelques exemples :

- Les projectiles 40 mm (figure 2.2) : il s'agit de projectiles à tête hautement déformable (caoutchouc, mousse,...) et à corps plus rigide, souvent plastique. Ceux-ci sont projetés de manière pyrotechnique, à l'aide d'un lanceur 40 mm (correspondant au lance-grenade).

## 2.3 Exemples d'armes non-létales antipersonnel

---



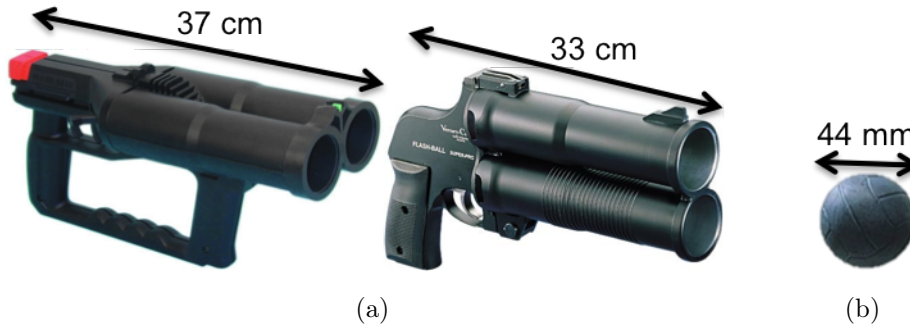
**FIGURE 2.2.** (a) Le lanceur F2000 équipé d'un lance grenade 40 mm. (b) Quelques projectiles 40mm. De gauche à droite, le Nobel Sport Spartan LE-40, le même dans sa cartouche, le Brügger et Thomet Sir-X, le même dans sa cartouche et le Rheinmetall Nico Pyrotechnik Impulse Nic, et le même dans sa cartouche.

- Le FN303 et le FN303p, de la FN herstal : projectile de diamètre égal à 17,2 mm, constitué d'une coque plastique creuse, remplie de poudre de bismuth et d'un agent liquide (glycol, peinture, etc.). Le projectile est conçu pour se briser à l'impact. Il est propulsé de manière pneumatique à l'aide d'un lanceur dédié. Deux lanceurs sont disponibles : un fusil (FN303) et un pistolet (FN303p) (figure 2.3).



**FIGURE 2.3.** (a) Le lanceur fusil FN303 et le pistolet FN303p . (b) Le projectile FN303, tirable par les deux lanceurs.

- Le Flash-Ball de Verney-Carron : projectile en forme de balle en caoutchouc de 44 mm de diamètre propulsé de manière pyrotechnique à l'aide d'un lanceur dédié (figure 2.6).
- Les "projectiles batons" (figure 2.5) sont des projectiles cylindriques de forme plus ou moins allongée, de diamètre égal à 37 mm, constitué de bois pour les anciens projectiles, et de plastique ou caoutchouc pour les projectiles plus récents. Ils sont tirés pyrotechniquement à l'aide d'un lance grenade ou d'un lanceur dédié. Leur masse est généralement comprise entre 100 et 150 g. cer-



**FIGURE 2.4.** (a) deux versions du lanceur flashball de Verney-Carron . (b) Le projectile Flashball tiraille par les deux lanceurs.

taines cartouches contiennent parfois plusieurs projectiles bâtons moins longs, et donc moins lourds.

- Les "rubber bullet", "fun tir", "mini gomme cogne", et "RB1FS (Rubber Fins Stabilized Baton)", de calibre 12<sup>3</sup> ( figure 2.6(a)) : il s'agit de projectiles de forme et de matériaux divers. Le matériau employé est généralement du caoutchouc ou du plastique, rigide ou légèrement déformable lors d'un impact sur corps humain. Ceux-ci sont propulsés de manière pyrotechnique à l'aide d'armes à feu classiques, dans une cartouche de calibre 12. Un ou plusieurs projectiles peuvent être présents dans une cartouche. Les vitesses et les énergies varient suivant les systèmes d'armes et les projectiles employés. Le projectile RB1FS, caractérisé par une masse de 6,5 g, sera particulièrement étudié par la suite.



**FIGURE 2.5.** Des projectiles bâton, de 37 mm. A gauche, un projectile en caoutchouc de 28 g, au milieu un projectile en bois de 32 g, à droite un projectile en plastique de 134 g (le L5).

---

3. « Le calibre d'une arme à feu désigne le diamètre intérieur d'un tube . . . , et par extension la grosseur d'un projectile . . . le diamètre était calculé de telle façon que l'on pouvait fondre X projectiles semblables dans une livre de plomb (livre anglaise de 489,5 gr) » . . . « le calibre 1 étant égal à un projectile de 489,5 gr, le calibre 12 est le calibre d'une arme tirant des balles d'un diamètre calculé pour en faire tenir 12 dans cette même livre. » - <http://www.ctcmr.org/debut/calibre.html>, consulté en janvier 2013.

### 2.3 Exemples d'armes non-létales antipersonnel

---

- Le "*Beanbag*", projectile de calibre 12 (figure 2.6(a)), est constitué d'une poche en tissu contenant une poudre de plomb, et est propulsé de manière pyrotechnique à l'aide d'une arme à feu classique (figure 2.6(a)). Le modèle étudié est caractérisé par une masse de 40 g.



(a)



(b)



(c)



(d)

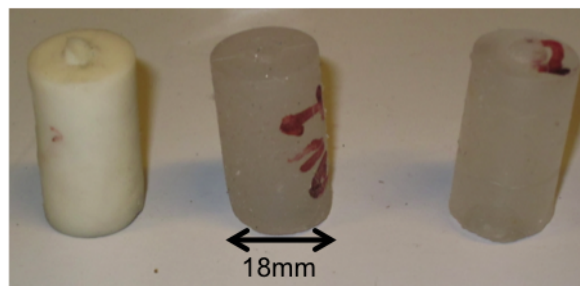
**FIGURE 2.6.** (a) Deux lanceurs calibre 12. (b) Divers projectiles calibre 12. (c) Le projectile RB1FS. (d) Le projectile Beanbag.

En dehors de ces projectiles commercialement disponibles, certains projectiles sont encore au stade de développement. De par sa situation, le département ABAL (Systèmes d'Armes et Balistique) de l'Ecole Royale Militaire (ERM) a une relation privilégiée avec la FN Herstal, qui développe actuellement une nouvelle gamme de Projectiles en Matériaux Innovants (PMI). Ces projectiles sont actuellement homogènes et extrêmement déformables (figure 2.7). Leur masse est pour le moment définie à 7,7 g. Ils n'ont pas encore de lanceur attitré.

Projectile	Matériau	Diamètre du projectile (mm)	Masse du projectile (g)	Vitesse du projectile à la bouche (m/s)	Energie du projectile à la bouche (J)	Source
Projectile bâton monobâton	caoutchouc, bois, PVC, polyuréthane	37	90 à 140	58 à 70	200 à 250	[15-17]
Beanbag	Sachet de tissu rempli de plomb	18,5	40	70 à 90	98 à 162	MK Ballistics Systems
RB1FS	Caoutchouc	18,5	6,5	152	78	MK Ballistics Systems
Flash-Ball	Caoutchouc	44	28	85 à 125	100 à 220	Département balistique de l'IRCGN*, France
FN303	Coque plastique remplie de poudre de bismuth	17,2	8,2	90	35	FN Herstal
Grenade sponge 40 mm	Projectile plastique à tête en caoutchouc	40	32 à 42	85 à 105	100 à 200	Ecole Royale Militaire (ERM-Belgique)

\*Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale (France)

**TABLE 2.2.** quelques projectiles non-létaux actuellement disponibles sur le marché et leurs caractéristiques principales.



**FIGURE 2.7.** Les Projectiles en Matériaux Innovants (PMI).

### 2.3.2 Les armes non-létales électriques

De plus en plus répandues surtout aux USA, on désigne dans cette catégorie des armes permettant une incapacitation de la personne visée en lui infligeant une décharge électrique de faible ampérage (quelques mA maximum), de tension élevée (plusieurs kV) et de période très faible (impulsions de l'ordre de  $100 \mu s$ ). Les modèles les plus répandus sont les Taser X26 et M26, qui permettent d'infliger cette décharge soit en contact direct, soit à distance à l'aide de tirs de dards appelés "*ar-dillons*" sur la cible (figure 2.8). Ils sont reliés à l'arme par deux fils électriques et permettent de fermer un circuit électrique et d'occasionner la décharge. Cette décharge provoque soit une douleur en contact direct, soit une contraction musculaire incontrôlable (disruption électro-musculaire) en tir à distance, induisant une perte de contrôle postural et une chute. Dans ce dernier cas la personne reste immobilisée aussi longtemps que les impulsions électriques lui sont appliquées. Le lecteur intéressé trouvera une revue de la littérature dédiée aux armes électriques dans la référence [13].



FIGURE 2.8. Le pistolet électrique Taser X26.

### 2.3.3 Les armes non-létales chimiques

On retrouve dans cette catégorie toute une série de produits chimiques occasionnant un effet gênant sur la cible, de manière à l'incapaciter. Il s'agit de produits irritants, lacrymogènes, malodorants, calmants, ou marquants. Ces agents chimiques sont soit stockés dans une grenade adaptée qui explose et délivre son produit dans une zone, soit vaporisés dans l'air à l'aide d'un spray liquide pour de faibles distances (figure 2.9). À l'heure actuelle, les principaux agents irritants utilisés dans l'Union Européenne sont le CN ou "*Mace*", le CS ou "*gaz de larmes*", le CR, et le plus répandu d'entre eux, l'OC (table 2.3) . Ce dernier est obtenu par extraction des fruits mûrs et desséchés de différentes espèces de piment de genre *Capsicum*.

Les caractéristiques communes à ces agents sont un temps d'activation relativement court, une durée d'action limitée dans le temps avec atténuation progressive ainsi qu'une grande marge de sécurité entre les doses incapacitantes et létales [18, 19]. Le lecteur intéressé trouvera une revue de la littérature dédiée aux armes chimiques dans la référence [13].



**FIGURE 2.9.** *Exemple de spray OC, en spray.*

	<b>Composant</b>	<b>odeur</b>	<b>Temps d'activation</b>	<b>durée d'action</b>
CN	2-chloroacétophénone	Pomme	3 à 10 s	10 à 20 minutes
CS	2-chlorobenzylidène malononitrile	Poivre	10 à 60 s	10 à 30 minutes
CR	Dibenz-1,4-oxazépine	Inodore	Instantané	15 à 60 minutes
OC	Oléorésine de Capsicum	Poivre	Quelques secondes	30 à 60 minutes

**TABLE 2.3.** *Différentes armes chimiques employées.*



### 2.3.4 Autres technologies

Il existe également toute une série de nouvelles technologies, souvent très sophistiquées et très coûteuses, permettant de réaliser un effet d'incapacitation non-létal. On parle notamment d'armes à énergie dirigée dont le but est d'envoyer une énergie sous une forme d'onde à haute fréquence ou de lumière et d'occasionner une sensation de chaleur, de désorientation, d'aveuglement ou de nausée. Citons en particulier l'Active Denial System (ADS) qui est un système d'arme non-létal à énergie dirigée développé pour l'armée américaine par Raytheon (figure 2.10) :

« *The Silent Guardian™ Protection System uses millimeter wave technology to repel individuals without causing injury . . . the system's antenna directs a focused beam of millimeter wave energy. The beam travels at the speed of light and penetrates the skin to a depth of 1/64 of an inch, producing an intolerable heating sensation that causes targeted individuals to instinctively flee or take cover. This sensation ceases immediately when an individual moves out of the beam or the operator steers the beam away.* » (www.raytheon.com). La portée maximum est définie à 750 m et permet, même à cette distance, de discriminer la personne subissant l'effet [20].



FIGURE 2.10. L'Active Denial System (ADS).

On retrouve dans [4, 8, 11] quelques autres exemples de ces armes non-létales à énergie dirigée.

## 2.4 L'étude de l'effet des armes non-létales à énergie cinétique

Vu l'importance de la tâche, une étude exhaustive de tous les systèmes susmentionnés sort largement du cadre de ce doctorat. Que ce soit dans le milieu civil ou dans le milieu militaire, on constate que les armes à énergie cinétique restent



la catégorie largement la plus employée [4, 21]. Par la suite, cette étude sera donc exclusivement dédiée sur l'étude des armes non-létales à énergie cinétique.

### 2.4.1 L'efficacité d'une arme non-létale à énergie cinétique

Pour être qualifiée d'efficace, une arme non-létale doit réunir deux conditions. Tout d'abord, elle ne doit pas occasionner de blessures graves ou létales. Ensuite, elle doit réaliser sur l'individu ciblé un effet qui permet sa neutralisation. Pour un projectile non-létal, il s'agit d'une douleur suffisamment forte pour incapaciter la personne cible ou pour conduire à son obtempération. Un impact peut également servir de diversion pour ensuite neutraliser l'individu à l'aide d'un autre moyen.

Actuellement, la grande majorité des études sur les projectiles non-létaux porte sur leur potentiel lésionnel. En effet, on cherche d'abord à s'assurer que le projectile n'occasionne pas d'effets non désirés avant de savoir s'il est opérationnellement efficace ou pas. On travaille donc toujours du côté de la sécurité. L'effet occasionné est actuellement peu étudié. En effet, le phénomène de douleur est non seulement perçu différemment d'un individu à l'autre, mais également fortement influencé par de nombreux facteurs extérieurs comme la motivation de la cible ou la prise de substances alcoolisées ou de drogues. L'étude du phénomène de la douleur est donc très complexe et actuellement encore peu avancée. Cet aspect ne sera donc que succinctement abordé.

### 2.4.2 Cas précis d'impacts de projectiles non-létaux rapportés dans la littérature

Quelques exemples de cas rapportés d'emploi d'armes non-létales à énergie cinétique sont présentés dans cette section. Ils permettent de se faire une idée quand à la dangerosité des impacts, et à savoir quelles sont les zones d'impacts critiques. Il est à noter que ceux-ci reflètent systématiquement les cas les plus critiques. En effet, une utilisation de ces armes, n'amenant à aucune complication ou suite, est pratiquement impossible à recenser et à détailler, la victime ne se présentant pas forcément aux forces de l'ordre pour faire état de sa situation. A l'opposé, un cas critique, traité médicalement, est plus détaillé, rendant ainsi l'information plus disponible.

- Cas d'impacts occasionnés par des projectile bâton en plastique :
  - Une première étude datée de 1999 détaille les lésions observées suite à l'utilisation de projectiles bâton en plastique durant une semaine de violences en Irlande du Nord survenue en 1996 [15]. La lésion observée est une

abrasion de forme annulaire de 4 cm de diamètre présentant un contour ecchymotique bien que des lésions internes soient également diagnostiquées (figure 2.11).

- Une seconde étude datée de 2004 concerne le projectile d'impact L21A1 (projectile bâton plastique)[16]. Les auteurs décrivent également la lésion classiquement encourue avec ce type de projectile à savoir une abrasion circulaire d'environ 4 cm de diamètre avec une zone ecchymotique périphérique. Les auteurs concluent en rappelant qu'en Irlande du Nord, les 14 décès répertoriés au moment de la rédaction de l'article sont attribuables à l'utilisation de projectiles d'impact en plastique, sont observés suite à des tirs au niveau céphalique ou thoracique.
- 12-gauge bean-bag [22] : Une étude publiée en 2001 et menée par le Département de Médecine d'Urgence de l'Université de Californie du Sud (Los Angeles) revoit, de manière rétrospective entre janvier 1996 et février 2000, les lésions présentées par 40 patients suite à l'utilisation de bean-bags par les forces de l'ordre. Un cas de décès est rapporté, suite à la pénétration intra-thoracique d'un projectile.

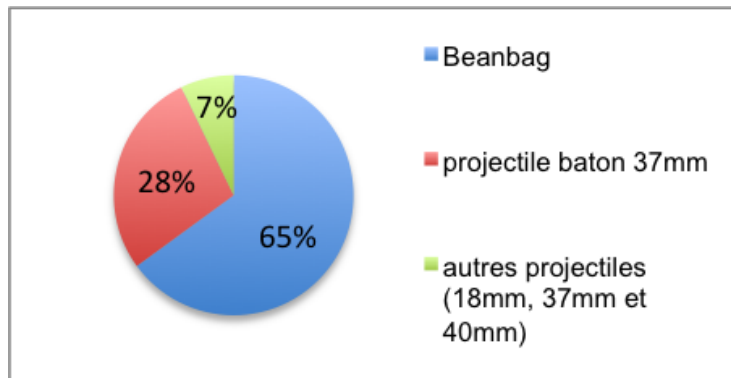


**FIGURE 2.11.** *Lésion superficielle observée après l'impact d'un projectile plastique [15].*

### 2.4.3 Revue de la morbidité et mortalité des impacts de projectiles non-létaux [23]

Cette étude porte sur un ensemble de près de 1000 projectiles tirés essentiellement dans les années 1990 aux États-Unis [23]. Ceux-ci sont de différents types, impactent différentes zones du corps, et provoquent différentes lésions (figure 2.12 et table 2.4). L'essentiel des projectiles tirés atteignent la zone abdomen-thorax,

mais la létalité induite est beaucoup plus sévère pour la zone thoracique que pour la zone abdominale. Notons que la répartition des projectiles utilisés suit une certaine tradition historique propre aux États-Unis. La situation actuelle mondiale est donc probablement assez différente en termes de projectiles employés et de lésions induites.



**FIGURE 2.12.** Répartition des projectiles non-létaux employés par les forces de l'ordre américaine entre 1980 et 2000, 962 tirs recensés [23].

On retrouve en annexe B une analyse plus détaillée des cas de cette étude ayant amené la mort [23]. Ceux-ci sont plus nombreux que ceux présentés dans la table 2.4 pour deux raisons. Tout d'abord parce que deux personnes décédées présentent des impacts sur différentes régions du corps et qu'il est impossible d'attribuer la mort à l'une ou l'autre région en particulier. Ensuite parce que des décès sont dus à un emploi erroné d'un projectile léthal par les forces de l'ordre.

#### 2.4.4 Discussions

Les cas rapportés de blessures et la revue de la morbidité amènent quelques conclusions essentielles :

- on constate que les blessures observées peuvent être classées en deux catégories : l'impact non-pénétrant et l'impact pénétrant. Ce dernier est dû au phénomène de pénétration de la peau par le projectile ( "*skin penetration*" en anglais).
- L'impact non-pénétrant est caractérisé par des lésions superficielles, au niveau de la peau et des tissus sous-cutanés (ecchymose, hématome, abrasion et dilacération) (figures 2.11), avec éventuelle présence de lésions plus profondes (fracture osseuse, rupture vasculaire, lésions d'organes pleins et lésions d'organes creux). Si les lésions superficielles sont relativement bénignes, les lésions

## 2.4 L'étude de l'effet des armes non-létales à énergie cinétique

---

	Blessure occasionnée								Total	Pourcentage
	Contusion	Abrasion	Dilacération	Fracture	Pénétration	Mort	Indemne			
<b>Zone touchée</b>										
Abdomen	158	62	8	9	2	/	14	254	33 %	
Thorax	69	49	3	6	6	5	7	146	19 %	
Dos	46	29	2	1	/	/	6	84	11 %	
Aine	4	/	/	/	/	/	2	6	0,8 %	
Jambe	56	33	11	/	3	/	10	113	15 %	
Bras	42	48	11	6	1	/	7	115	15 %	
Fesses	15	11	/	/	/	/	1	27	4 %	
Tête	3	2	7	5	2	/	/	19	2,5 %	
Cou	1	3	1	/	/	1	/	5	0,6 %	
<b>Total</b>	<b>394</b>	<b>237</b>	<b>43</b>	<b>27</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>47</b>	<b>768</b>	<b>100 %</b>	
<b>Pourcentage</b>	<b>51 %</b>	<b>31 %</b>	<b>5,6 %</b>	<b>3,5 %</b>	<b>1,8 %</b>	<b>0,7 %</b>	<b>6,1 %</b>	<b>100 %</b>		

**TABLE 2.4.** Répartition des zones touchées par les projectiles d'impact, et leurs lésions provoquées [23].

internes peuvent par contre causer des blessures très graves, voire létales. C'est donc un point essentiel à étudier.

- Le phénomène de pénétration de la peau est plus proche d'une blessure d'arme à feu classique, et présente le même genre de risque. A nouveau donc, les lésions peuvent être très graves, voire létales, et leur étude est donc tout aussi importante.
- On remarque la place prépondérante de l'impact thoracique, qui est d'une part une zone souvent impactée (table 2.4), et d'autre part une zone vulnérable, au vu des blessures et de de la létalité observées [22, 23].

### 2.4.5 Un forum particulier : les groupes OTAN

La littérature expose systématiquement des cas relatant l'emploi d'armes non-létales dans le milieu civil. Il est par compte beaucoup plus compliqué d'obtenir des données issues du domaine militaire, de par le caractère sensible de ce genre d'information. Cela dit, la Belgique est engagée dans des groupes OTAN travaillant sur le sujet, et de nombreuses informations sont disponibles, mais malheureusement classifiées. Ce doctorat est en partie basé sur ces informations.

Un première source d'information et de collaboration intra OTAN est le DAT 11 (onzième initiative du programme "*Defense Against Terrorism*"), dirigé par le Canada. Un objectif de cette initiative est de mettre en évidence l'existence ou l'existence prochaine de capacités d'armement non-létal, pouvant rapidement être mis en opération pour les missions de l'OTAN ayant lieu en Afghanistan et pour d'autres opérations anti-terroristes. Une workshop sur le sujet, regroupant les experts de différents pays OTAN (annexe C) fut organisé par la Belgique en mars 2010.

La conclusion essentielle de cette réunion est que l'étude de la pénétration de la peau, ainsi que les lésions thoraciques pouvant survenir en cas d'impact non-létal, sont les domaines d'études prioritaires quant à la quantification du potentiel lésionnel d'un projectile non-létal . L'étude de l'impact abdominal et de l'impact crânien sont définis comme objectifs secondaires. Le groupe insiste également sur le fait que la tête n'est jamais visée par ce type d'arme, mais que l'étude de l'impact sur la tête reste intéressant dans une démarche d'évaluation de risque [21].

La deuxième conclusion met en évidence la nécessité de poursuivre l'étude des projectiles non-létaux au niveau OTAN, et d'accentuer la volonté de parvenir à des méthodes standardisées d'évaluation du potentiel lésionnel d'un impact non-létal. Plusieurs autres réunions OTAN, sous diverses dénominations mais regroupant les mêmes pays et personnes ont lieu depuis lors deux fois par an, organisées et diri-

gées par la Belgique. Le groupe de travail actuel jouit de la dénomination "*NATO LCG DSS NLCSG NLKE TOE*"<sup>4</sup>. L'objectif de ces réunions est de proposer des méthodes standardisées pour évaluer les armes non-létales à énergie cinétique. Selon un sondage d'opinion auprès des pays participants à ces groupes, le thorax est un domaine d'étude prioritaire. L'impact sur tête est également étudié dans une démarche d'évaluation de risque, même si elle n'est jamais visée. Par ailleurs, des efforts sont actuellement mis en place pour standardiser l'évaluation du phénomène de pénétration de la peau du projectile. A l'heure de la rédaction de ce doctorat, un document proposant une méthode d'évaluation de la pénétration de la peau par un projectile non-létal est en cours de revue, et pourrait être publié d'ici la fin de l'année 2013, sous la future appellation de STANREC 4744 Edition 1 - AEP 94[24]. De nombreux apports provenant de ce doctorat ont permis d'aboutir à ce document.

## 2.5 Discussion et définition de l'objectif de la thèse

Tout au long de ce chapitre, de multiples choix ont été opérés pour aboutir à la définition du sujet de cette thèse. Au vu de l'ampleur de la tâche, il a été décidé d'évaluer uniquement les armes non-létales antipersonnel à énergie cinétique.

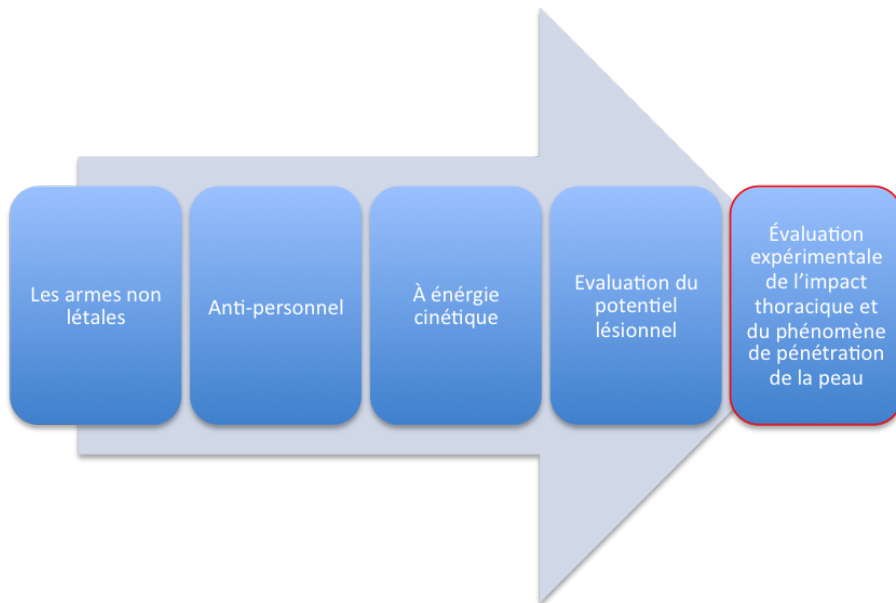
Une première conclusion à la lumière de l'ensemble des sources précitées est que l'impact d'un projectile non-létal n'est pas sans danger. Celui-ci occasionne lors d'un impact non-pénétrant des lésions superficielles visibles, mais parfois également des lésions internes, plus graves, pouvant parfois nécessiter une intervention médicale urgente, ou pouvant provoquer même le décès de la cible. Par ailleurs, la pénétration du projectile dans l'organisme n'est pas exclue, entraînant aussi des blessures potentiellement très graves ou mortelles. En plus de la tragédie humaine évidente, la popularité des armes non-létales est très négativement influencée par le moindre cas rapporté ayant amené des blessures plus graves, là où paradoxalement l'emploi d'une arme classique n'engendrerait pas le même tollé populaire. Bien souvent, il en découle un changement de méthode, voir même de la loi, le système d'armes en cause pouvant être parfois définitivement retiré de l'arsenal des forces de l'ordre ou militaire. Ces quelques considérations mettent en avant le besoin très fort qu'ont les utilisateurs, les acquéreurs, les fabricants et tous autres acteurs impliqués par l'emploi d'une arme à énergie cinétique, de disposer de méthodes permettant d'évaluer leur potentiel lésionnel. La question de l'efficacité du système est également cruciale pour l'emploi de ces armes en situations réelles.

---

4. North Atlantic Treaty Organization - Land Capability Group - Dismounted Soldier System - Non Lethal Capabilities Sub Group - Non Lethal Kinetic Energy - Team Of Expert.

En deuxième conclusion, on observe également l'importance particulière de l'impact thoracique dans ces séries de données. D'une part, on constate qu'il s'agit d'une des zones les plus impactées avec l'abdomen, et d'autre part qu'il s'agit d'une zone fragile. En effet, l'étude [23] montre qu'il s'agit dans l'échantillon présenté de la seule zone impactée, avec la tête, ayant causé le décès de la cible. Les experts travaillant sur le sujet pour l'OTAN concluent dans le même sens, et mettent l'accent sur l'étude de l'impact thoracique et de la pénétration de la peau.

**L'objectif de la présente thèse est ainsi défini :** proposer une méthode d'évaluation expérimentale permettant d'étudier le potentiel lésionnel de l'impact thoracique et le phénomène de pénétration de la peau d'un projectile non-létal (figure 2.13). l'aspect efficacité sera également succinctement abordé. Dans cette optique, une gamme de projectiles représentative des projectiles actuellement disponibles sur le marché sera étudiée, ainsi que les projectiles PMI.



**FIGURE 2.13.** *Les choix opérés amenant à la définition de l'objectif de la thèse.*

# Chapitre 3

## Etat de l'art de l'impact non-létal thoracique et de la pénétration de la peau

Ce chapitre s'intéresse au potentiel lésionnel et à l'efficacité des projectiles d'impacts. Quelques généralités seront d'abord abordées, avant de s'intéresser successivement à l'étude de l'impact thoracique, à l'étude de la pénétration de la peau par le projectile, et à l'efficacité de l'impact du projectile. Une des particularités de l'état de l'art est qu'il a beaucoup évolué tout au long de ce doctorat, notamment au niveau de l'étude de la pénétration de la peau. En effet, de nombreuses nouvelles informations sont apparues durant les deux dernières années de ce travail, via le canal OTAN entre autre. Le travail de l'établissement de l'état de l'art ne s'est donc pas effectué exclusivement en début de doctorat mais bien tout au long de celui-ci.

### 3.1 Généralités

Dans un premier temps, le lecteur intéressé pourra consulter quelques rappels d'anatomie thoracique élémentaire [25]. Bien sûr, de nombreuses références existent sur le sujet.

#### 3.1.1 L'échelle AIS

On retrouve dans la littérature de l'accidentologie automobile une échelle appelée *AIS (Abbreviated Injury Scale)* permettant non seulement de codifier n'importe quelle lésion, de manière à pouvoir partager l'information plus efficacement, mais également



de classer celles-ci selon leur gravité, sur une échelle de 1 à 6 : 1 étant une lésion mineure, et 6 étant une lésion maximale [26]. La table 3.1 montre un exemple de cette échelle pour le thorax, adaptée selon [27, 28].

Score AIS	Gravité	Fracture correspondante	Blessure des tissus correspondante
1	Mineure	1 fracture costale	Contusion bronchique
2	Modérée	2 à 3 fractures costales Fracture du sternum	Rupture partielle bronchique
3	Sérieuse	Plus de 4 fractures aux omoplates 2 à 3 fractures costales et hémopneumothorax	Contusion pulmonaire Contusion cardiaque mineure
4	Sévère	Volet thoracique Plus de 4 fractures bilatérales Plus de 4 fractures + hémopneumothorax	Dilacérations pulmonaires bilatérales Dilacération aortique mineure Contusion cardiaque majeure
5	Critique	Volet thoracique bilatéral	Dilacération aortique majeure Dilacération pulmonaire avec pneumothorax sous tension
6	Maximale		Dilacération aortique avec hémorragie massive

TABLE 3.1. *l'échelle AIS appliquée au thorax [26–28].*

### 3.1.2 Critère lésionnel, tolérance lésionnelle, et probabilité de lésion

On définit un "*critère lésionnel*" comme étant un paramètre physique ou un ensemble de paramètres physiques qui corrèlent bien avec la sévérité d'une blessure occasionnée à la zone du corps envisagée [29].

On définit la "*tolérance lésionnelle*" d'une région ou d'un organe du corps comme l'amplitude de la charge, traduite en une valeur seuil d'un critère lésionnel, qui produit un risque spécifié de blessure spécifiée. En d'autres mots, la tolérance lésionnelle est la valeur d'un critère lésionnel connu qui permet de distinguer, avec une probabilité statistique donnée, un événement non traumatique d'un événement traumatique[13, 28, 29].

Comme le corps humain varie d'un individu à l'autre en terme de propriétés mécaniques et de géométrie, une valeur d'un critère lésionnel n'amènera pas systématiquement à une certaine lésion, mais sera plutôt liée à la probabilité d'observer

une certaine lésion. Une fonction de régression logistique<sup>1</sup> [30, 31] établit le lien entre la probabilité de lésion  $p$  et le critère lésionnel  $x$  (variable discrète ou continue) par la formule

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta \cdot x}} \quad (3.1)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres dérivés d'analyses statistiques d'essais biomécaniques. On voit sur le graphe (figure 3.1) que, selon cette formule, la probabilité d'une lésion  $p$  en fonction du critère  $x$  suit une loi pour laquelle on distingue trois zones [32] :

- lors d'une faible valeur du critère, la probabilité de lésion est quasiment inexistante (zone a).
- Lors d'une valeur importante du critère, la probabilité de lésion est quasiment de 1 (zone c).
- Entre ces 2 zones, on retrouve une zone mixte, où une faible augmentation du critère lésionnel engendre une augmentation significative de la probabilité de lésion (zone b).

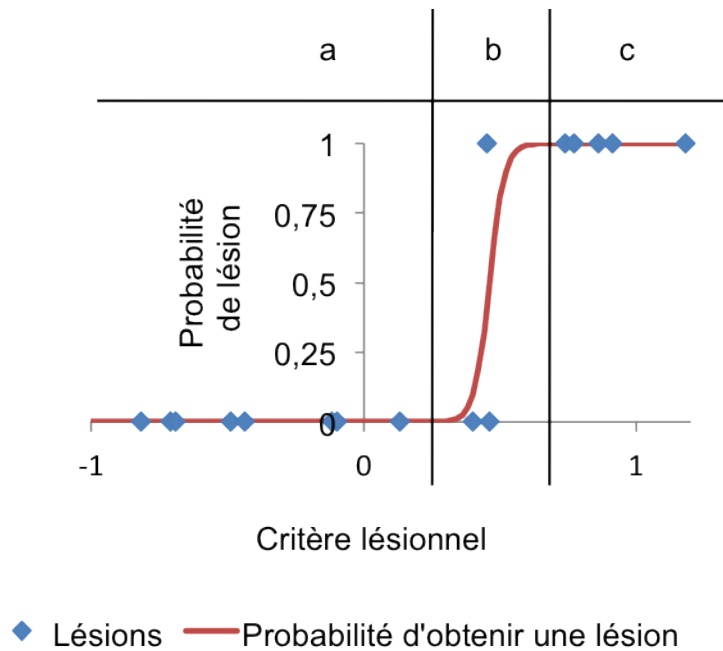
Au vu de diverses discussions avec les acteurs impliqués par les armes non-létales, le niveau d'acceptation de blessure suite à un impact non-létal est généralement défini dans la culture occidentale comme suit : on accepte une probabilité maximum de 50 % d'obtenir une blessure caractérisée par un score de sévérité de l'échelle AIS  $>1$ . De plus on accepte une probabilité maximum d'observer une pénétration de la peau égale à 50 % [14, 21, 33]. C'est la ligne de conduite qui est suivie tout au long de cette étude.

Ces valeurs de probabilités égales à 50% peuvent sembler élevées. Cependant, elles sont justifiées par 2 arguments :

- tout d'abord, il faut savoir que les critères et tolérances lésionnelles sont essentiellement issus de mesures expérimentales réalisées sur cadavre (*PMHS = Post Mortem Human Subjects*). Si ceux-ci donnent une assez bonne idée de

---

1. « *La régression logistique est un des modèles multivariés couramment utilisés en épidémiologie... Elle s'utilise lorsque la variable à expliquer (variable dépendante  $Y$ ) est qualitative, le plus souvent binaire. Les variables explicatives (variables indépendantes  $X_i$ ) peuvent être par contre soit qualitatives, soit quantitatives. La variable dépendante est habituellement la survenue ou non d'un événement et les variables indépendantes sont celles susceptibles d'influencer la survenue de cet événement.* », adapté de [30].



**FIGURE 3.1.** Illustration de la courbe de probabilité de lésion en fonction d'un critère lésionnel.

l'effet qu'on pourrait obtenir sur cible vivante, il existe tout de même des différences fondamentales. Tout d'abord, les PMHS ainsi employés ne sont pas représentatifs de la population. Bien souvent, il s'agit de corps de personnes relativement âgées [14, 33], ne représentant pas la population qu'on retrouve habituellement dans un contexte d'emploi d'armes non-létales. De plus, les fonctions vitales étant éteintes, le cadavre réagira certainement différemment d'une cible vivante. On observe en effet au moins une différence au niveau de la tonicité musculaire, et le phénomène de rigidité cadavérique. On suppose que ces deux considérations ont tendance à rendre la cible plus fragile face à l'impact non-létal qu'un être vivant représentatif de la population. Sans pour autant pouvoir quantifier ce phénomène, on peut donc émettre l'hypothèse qu'un impact donné aura une probabilité d'infliger une lésion spécifiée plus importante sur un PMHS que sur un être vivant.

- La deuxième raison de choisir une valeur de probabilité systématiquement égale à 50 % est purement statistique. En effet, les lois statistiques employées sont caractérisées par une probabilité, et une incertitude de mesure autour de cette probabilité. On peut montrer que celui-ci est minimum autour de la valeur de 50 %, et que plus on s'éloigne de cette valeur, plus cet incertitude est importante, et donc moins précise et significative est la probabilité [34, 35].

### 3.1.3 La problématique de la cible humaine

Quelle que soit la source, les critères et tolérances sont initialement déterminés à la suite de tirs sur PMHS ou sur animaux. En effet, contrairement à des essais de protections balistiques où les projectiles sont tirés sur les matériaux réels, des tirs sur êtres humains sont hors de question, en raison du risque de lésions graves que ces tirs représentent. Le PMHS ou l'animal est assez naturellement choisi comme substitut, en espérant que celui-ci s'en rapproche le plus possible. En pratique, de tels tirs sont très difficiles à mettre en oeuvre. D'abord, pour des raisons éthiques, on essaie de limiter leur nécessité au maximum. Par ailleurs, des difficultés juridiques peuvent exister pour procéder à ce genre d'essais. Le cas de la Belgique est assez caricatural, puisqu'aux dires des spécialistes, si aucune loi n'interdit ce genre d'essais, la complexité des démarches juridiques nécessaires rend le test pratiquement impossible à mettre en oeuvre. Enfin, la difficulté technique de ce genre d'essais est également élevée, et la reproductibilité n'est jamais assurée vu le caractère biologique et non reproductible d'un être humain.

Le problème peut être contourné en employant un substitut, sensé réagir de la même manière qu'un corps humain pour une sollicitation spécifiée. Un tel substitut, appelé "*Dispositif anthropomorphe d'essai*" ou "*surrogate*", est évalué quant à sa "*biofidélité*", c'est-à-dire sa capacité à réagir comme un corps humain ou une partie du corps humain pour une sollicitation spécifiée. Un exemple courant de "*surrogate*" est l'hybrid III<sup>2</sup>, qu'on emploie pour répliquer la réaction du corps humain lors d'un accident de voiture. Le concept peut être étendu aux modèles numériques d'un être humain ou d'une partie d'un être humain, qui dans un certain sens sont des "*surrogates*" virtuels. On verra par la suite que suivant la zone du corps et le phénomène envisagé, certains critères nécessitent l'emploi d'un "*surrogate*" pour être évalués, et d'autres non.

## 3.2 L'impact thoracique non-pénétrant

On retrouve beaucoup d'études sur l'impact thoracique pour des sollicitations ayant lieu lors d'un crash automobile [36–40]. Ces impacts sont caractérisés par des vitesses d'impact plus faibles et par des masses plus élevées qu'un projectile non-létal [14, 41]. On retrouve sur la figure 3.2 une comparaison entre l'impact non-létal et l'impact issu d'un crash automobile. On constate une différence notable en termes de masses et de vitesses en présence, et une tendance à l'accentuation de cette différence

---

2. <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact/hybrid-iii-50th>.

au fil des années. On ne peut donc pas reprendre les résultats et outils tels quels, même si des similitudes peuvent apparaître, d'où l'intérêt de s'y attarder un peu.

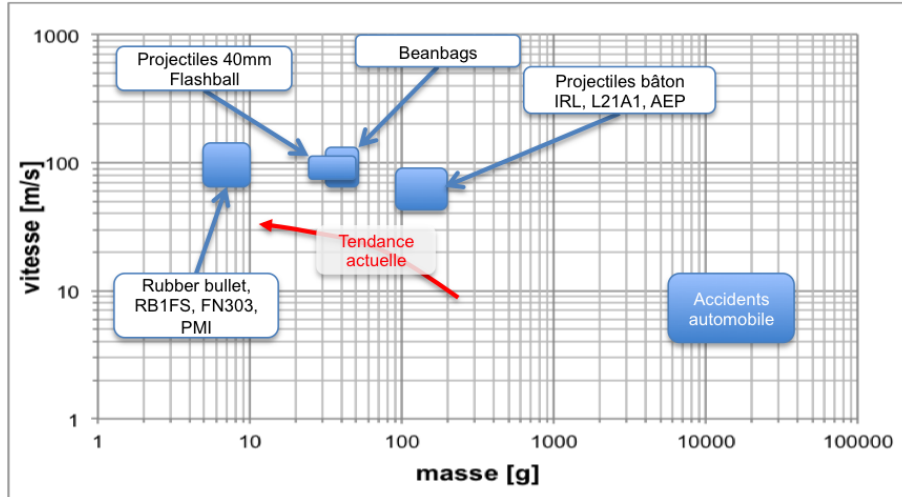


FIGURE 3.2. Comparaison d'un impact non-létal et d'un impact issu d'un crash automobile, adapté de [14, 41].

### 3.2.1 L'impact thoracique non-pénétrant dans le milieu du crash automobile

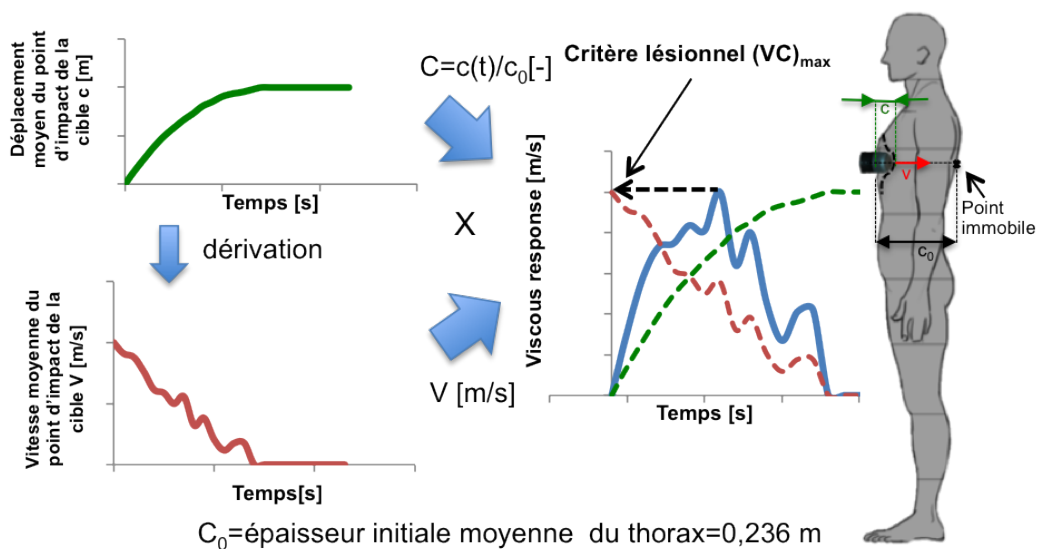
Pour ce type de sollicitations, la réponse biomécanique du corps à l'impact est influencée par trois éléments : l'inertie de la zone corporelle soumise à l'impact, la résistance élastique des tissus et la résistance visqueuse des tissus [36]. Pratiquement, ces trois éléments s'associent pour résister aux contraintes et déformations induites à l'impact. Lorsque les tissus sont soumis à des exigences au-delà d'une limite de réversibilité, les lésions surviennent, souvent caractérisée par une fracture de côte, liée à une trop grande flexion [36]. L'expérience montre qu'on peut distinguer deux mécanismes lésionnels principaux lors d'impacts de projectiles, l'un étant prépondérant lorsque la vitesse moyenne des tissus soumis à l'impact est inférieure à 3 m/s, l'autre lorsque cette vitesse est supérieure à 3 m/s [28, 36]. Lorsque cette vitesse est inférieure à 3 m/s, la résistance élastique des tissus représente l'élément limitant la survenue de lésions. L'énergie est graduellement absorbée par la compression tissulaire, de type *"slow crushing load"*, elle-même limitée par les propriétés élastiques tissulaires. Le mécanisme lésionnel induit est alors de type *"crush & shear injury"*, et consiste en l'écrasement et le cisaillement des tissus et organes par compression directe lors de l'impact [28, 36]. Lorsque la vitesse moyenne de la zone corporelle impactée dépasse 3 m/s, ce sont les propriétés visqueuses qui représentent l'élément limitant. Plus cette vitesse est élevée, plus l'effet d'inertie de la zone impactée sera

### 3.2 L'impact thoracique non-pénétrant

important. Dans ces conditions, la vitesse moyenne tissulaire est le facteur dominant et non plus le déplacement moyen du point d'impact. Le tissu est déformé trop rapidement pour pouvoir dissiper les effets de l'impact du projectile. Le mécanisme lésionnel prépondérant est le "*viscous mechanism*", consistant en une propagation d'ondes de pression (plus importante que lorsque la vitesse moyenne des tissus est inférieure à 3 m/s) au sein des structures organiques ou tissulaires profondes du corps [42] qui peuvent provoquer des lésions internes avant que la paroi n'ait subi de déformation significative. Ces lésions internes concernent aussi bien les organes pleins que les organes creux. Un changement important de la vitesse de propagation de l'onde de pression au niveau d'une interface air-tissu (dans les poumons et le tube digestif par exemple) est responsable d'une différence majeure de pression pouvant entraîner des lésions tissulaires focalisées en ces endroits. Le viscous mechanism [36] est régi, pour les tissus biologiques mous, par la "*viscous response*", c'est-à-dire par le produit de la compression moyenne de la zone atteinte  $C$  et de la vitesse  $v$  moyenne à laquelle la dite zone se déplace, selon la formule

$$\text{Viscous response} = (v(t).C(t)) \quad (3.2)$$

La compression moyenne  $C$  est exprimée comme le rapport entre le déplacement moyen de la zone impactée  $c$  (en [m]) et la longueur  $c_0$  (en [m]), qui correspond à l'épaisseur thoracique moyenne au repos. On émet par ce calcul l'hypothèse que le thorax se déforme, mais que le point arrière ne se déplace pas pendant l'impact (figure 3.3) .



**FIGURE 3.3.** Représentation du viscous mechanism et calcul du critère lésionnel.

Le critère lésionnel "*viscous criterion*"  $(VC)_{max}$  correspond au maximum de la courbe *Viscous response*. Le potentiel lésionnel maximal est observé lorsque cette courbe  $v(t) \times C(t)$  est maximum, ce qui se produit bien avant d'atteindre une compression maximum. Ceci explique qu'une lésion provoquant une déformation relativement peu importante peut induire un potentiel lésionnel important. Ce critère est validé pour des vitesses moyenne du thorax allant de 3 m/s à 30 m/s [43, 44].

Ces considérations, observées par l'expérience, peuvent être reliées à l'énergie absorbée par l'organisme lors de la sollicitation provoquée par un impact. A nouveau on distingue trois cas, le premier lorsque la vitesse moyenne des tissus lors de l'impact est inférieur à 3 m/s, le deuxième lorsque cette vitesse est comprise entre 3 m/s et 30 m/s, et la troisième lorsque cette vitesse est supérieure à 30 m/s.

Lorsque cette vitesse est inférieure à 3 m/s, L'hypothèse du comportement élastique du thorax donne la relation :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

où

- $\sigma$  est la contrainte moyenne sur la surface d'impact, dans la direction de l'impact, exprimée en  $[Pa]$ .
- $\varepsilon$  est la déformation moyenne sur la surface d'impact, dans la direction de l'impact, exprimée sans unité  $[-]$ . Elle est liée au déplacement du point d'impact  $c$  [m] et à l'épaisseur thoracique initiale  $c_0$  [m] :  $\varepsilon = c/c_0$ , si l'on suppose que le point arrière du thorax ne se déplace pas (3.3).
- $E$  est le module de Young moyen du thorax, à l'endroit envisagé, et dans la direction d'impact, exprimé en  $Pa$ .

L'énergie absorbée  $E_a$  [J] par l'organisme est alors :

$$E_a = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{max}} E\varepsilon^2 d\varepsilon = \frac{E\varepsilon_{max}^2}{2} \quad (3.4)$$

L'énergie absorbée est bien directement proportionnelle à la déformation maximum.

Dans des conditions de vitesse moyenne de la surface d'impact comprises entre 3 m/s et 30 m/s, l'élément résistant prépondérant est la résistance visqueuse des tissus. Dans ces conditions, On émet l'hypothèse que les tissus sollicités se comporte comme un élément visqueux :

### 3.2 L'impact thoracique non-pénétrant

---

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad (3.5)$$

où

- $\sigma$  est la contrainte moyenne sur la surface d'impact, dans la direction de l'impact, exprimée en  $[Pa]$ .
- $\dot{\varepsilon}$  est la vitesse déformation moyenne sur la surface d'impact, dans la direction de l'impact, exprimée en unité  $[1/s]$ . Elle est liée à la vitesse moyenne du point d'impact  $v$   $[m/s]$  :  $\dot{\varepsilon} = v/c_0$  (si l'on suppose que le point arrière du thorax ne se déplace pas (3.3) ).
- $\eta$  est la viscosité dynamique moyenne du thorax, à l'endroit envisagé, et dans la direction d'impact, exprimé en  $[Pa s]$

L'énergie absorbée  $E_a$   $[J]$  par l'organisme est alors :

$$E_a = \int_0^{\varepsilon_{max}} \sigma \varepsilon d\varepsilon = \int_0^{t_{\varepsilon_{max}}} \eta \dot{\varepsilon}^2 dt = \eta \left( [\varepsilon \dot{\varepsilon}]_0^{t_{\varepsilon_{max}}} - \int_0^{t_{\varepsilon_{max}}} \varepsilon \ddot{\varepsilon} dt \right) \quad (3.6)$$

Le premier terme caractérise la résistance visqueuse des tissus, le deuxième terme caractérise l'inertie corporelle des tissus. L'expérience montre que

$$[\varepsilon \dot{\varepsilon}]_0^{t_{\varepsilon_{max}}} \gg \int_0^{t_{\varepsilon_{max}}} \varepsilon \ddot{\varepsilon} dt$$

et donc

$$E_a = \eta [\varepsilon \dot{\varepsilon}]_0^{t_{\varepsilon_{max}}} \quad (3.7)$$

lorsque la vitesse moyenne du point d'impact est dans l'intervalle précisé. L'énergie absorbée par l'organisme est donc dictée par le produit de la déformation et de la vitesse de déformation de l'organisme, évaluée entre le début de l'impact et le moment où la déformation est maximum  $t_{\varepsilon_{max}}$ . Selon l'hypothèse d'immobilité du point arrière du thorax, ce produit est équivalent, à une constante près, à la "*viscous response*" :

$$\varepsilon \dot{\varepsilon} = \frac{c}{c_0} \frac{v}{c_0} = \frac{vC}{c_0} \quad (3.8)$$

où  $c_0$  est l'épaisseur thoracique initiale, en  $[m]$ . L'énergie absorbée par l'organisme et la "*viscous response*" sont donc intimement liées. Le fait que la lésion apparaissent au moment où la "*viscous response*" est maximum reste une observation tirée directement de l'expérience, sans interprétation physique particulière.



### 3.2.2 L'impact thoracique non-pénétrant d'un projectile non-létal selon l'université de Wayne State

L'université de Wayne State (WSU), aux Etats-Unis, qui dispose d'une expérience reconnue dans le domaine de l'accidentologie automobile, s'est penchée sur la question et a fourni durant les 15 dernières années des études dédiées aux projectiles non-létaux. C'est la source bibliographique principale de ce doctorat [14, 41, 45, 46]. L'ensemble de ces études fournit trois résultats essentiels.

### 3.2.3 Détermination de corridors biomécaniques

Dans un premier temps, des projectiles non-létaux, définis dans la table 3.2, et référencés comme tirs A, B et C, sont tirés sur des PMHS. Il s'agit de projectiles bâtons rigides (figure 2.5 et table 2.2), qui ne sont sans doute plus représentatifs des projectiles non-létaux actuels qui ont tendance à être plus déformables. Ces projectiles ont été équipés d'un accéléromètre, et grâce à ce capteur ainsi qu'à l'emploi de caméras haute-vitesse, l'auteur présente des courbes « force à l'impact en fonction du temps », « déplacement du thorax au point d'impact en fonction du temps », et « force à l'impact en fonction du déplacement du thorax au point d'impact ». Ces résultats sont relevés pour plusieurs tirs sur cadavres, effectués dans les conditions A, B, et C présentées dans la table 3.2. Les résultats sont ensuite collationnés et une enveloppe globale approximative appelée "*corridor biomécanique*" est définie sur chaque graphe. Les résultats des impacts de condition A sont présentés sur les figures 3.4 et 3.5. Le lecteur intéressé trouvera les résultats des autres tirs en annexe D. Ces résultats sont essentiels, car ils permettent d'évaluer la biofidélité d'un modèle thoracique pour des sollicitations proches d'un impact non-létal. Une cible sera donc biofidèle pour ce type de sollicitation si les courbes « force en fonction du temps », et « déplacement en fonction du temps » sont bien dans les corridors définis sur les figures 3.4 et 3.5, ainsi que ceux présentées dans l'annexe D.

Projectile	diamètre du projectile [mm]	masse du projectile [g]	vitesse d'impact du projectile [m/s]
A	37	140	20
B	37	140	40
C	37	30	60

**TABLE 3.2.** Les projectiles bâtons rigides tirés par les études de WSU [14].

### 3.2 L'impact thoracique non-pénétrant

---

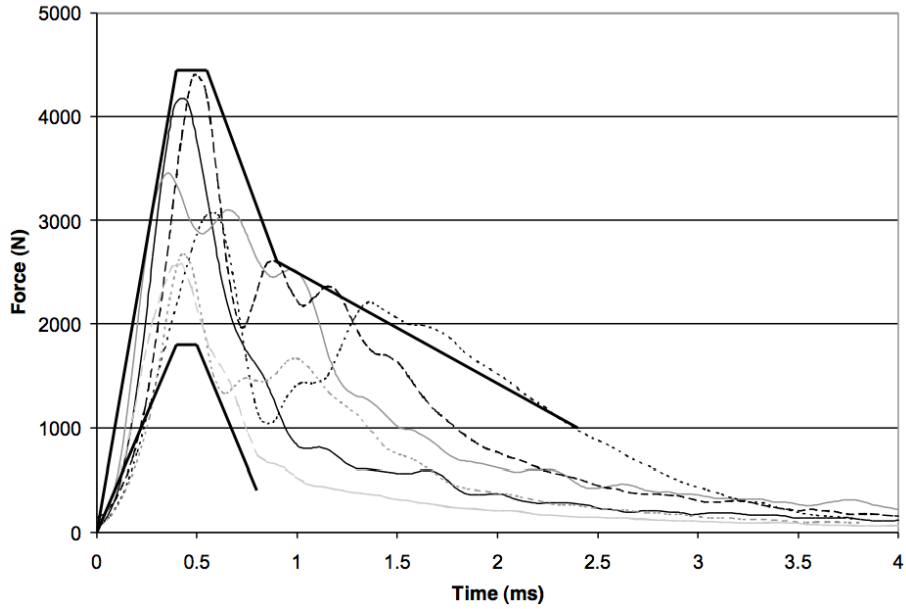


FIGURE 3.4. Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition A [14].

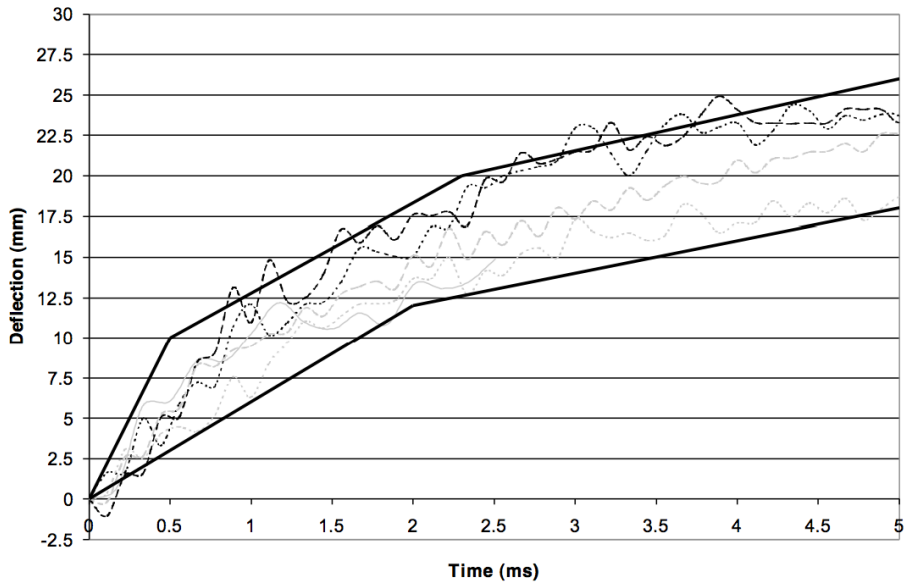


FIGURE 3.5. Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition A [14].

### 3.2.4 Détermination de critères lésionnels thoraciques

Dans un deuxième temps, ces études proposent également des critères lésionnels pour évaluer l'impact non-létal. Deux critères sont proposés : il s'agit du "*Blunt Criterion*"  $BC$  et du "*Viscous Criterion*"  $(VC)_{max}$  [14, 41, 45, 46]. Ces critères ont ensuite été validés par le professeur C. BIR (Wayne State University) pour les impacts thoraciques de projectiles non-létaux. Leur validation découle de la même série de tirs que ceux employés pour développer les corridors biomécaniques. Les deux critères susmentionnés permettent une bonne corrélation avec une lésion observée et sont définis comme suit :

$$BC = \ln \left( \frac{mv^2}{2W^{1/3}TD} \right) \quad (3.9)$$

où

- $m$  est la masse du projectile exprimé en  $kg$ .
- $v$  est la vitesse du projectile exprimée en  $m/s$ .
- $W$  est la masse de la cible exprimée en  $kg$ .
- $T$  est l'épaisseur de la paroi déformable de la cible exprimée en  $cm$ .
- $D$  est le diamètre du projectile en  $cm$ .

Le "*blunt criterion*", représente donc le rapport entre l'énergie cinétique du projectile lors de l'impact et certains paramètres de la cible et du projectile. Il est à noter que ce critère n'a aucune signification physique, mais qu'il s'agit simplement d'un ensemble de paramètres, qui, lorsqu'il sont combiné tel que la formule le précise, corréleront bien avec l'occurrence de la lésion. Il s'agit donc d'une mise en correspondance empirique entre certains paramètres de l'impact et l'occurrence de lésion. D'autres remarques à son sujet suivent.

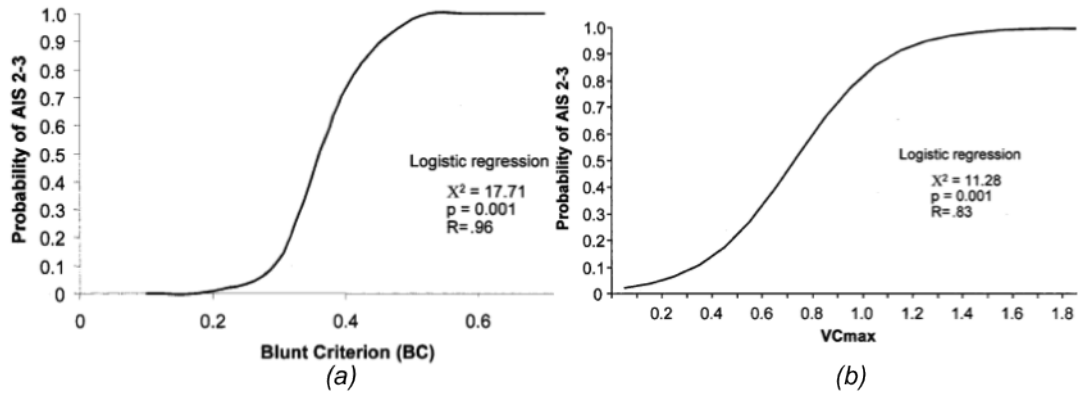
Para ailleurs, le "*Viscous Criterion*"  $(VC)_{max}$  est défini comme suit :

$$(VC)_{max} = (v(t).c(t))_{max} \quad (3.10)$$

Le "*viscous criterion*"  $(VC)_{max}$  est le critère issu de l'accidentologie automobile déjà mentionné. Ces deux critères sont corrélés avec la probabilité d'observer une lésion caractérisée par un  $AIS > 1$  (figure 3.6, table 3.3). Les lésions observées se résument à une ou plusieurs fractures costales, ou sternales. D'autres types de

### 3.2 L'impact thoracique non-pénétrant

blessures basées sur d'autres séries de données ont déjà été corrélés avec le critère  $(VC)_{max}$  [14], mais ne sont pas observés sur cette série de données. Les données brutes sont présentes dans l'annexe D.



**FIGURE 3.6.** *Corrélacion entre la probabilidad d'observer un AIS>1 suite à un impact thoracique non-létal et les critères  $(VC)_{max}$  (a) et BC (b) [14].*

Une grande différence existe entre ces 2 critères : le premier tient compte uniquement de paramètres du projectile, ainsi que des mesures globales de la cible. Il ne nécessite donc en fait pas de tir et donc pas de "surrogate" pour être évalué. Le  $(VC)_{max}$  quant à lui nécessite un "surrogate".

Après une étude plus poussée du critère  $BC$ , on constate que celui-ci pose quelques problèmes. Essentiellement, il ne tient pas compte des caractéristiques des matériaux du projectile ou de la cible. Ainsi, un projectile extrêmement rigide de même diamètre et de même masse qu'un projectile très mou, tous deux tirés à la même vitesse, amènent au même  $BC$ . En pratique pourtant, ces deux projectiles présentent certainement un potentiel lésionnel différent. Par ailleurs, ce critère ne caractérise les géométries qu'à l'aide de paramètres globaux comme le diamètre du projectile ou l'épaisseur de la cible. Ces paramètres sont matière à interprétation puisque ces dimensions sont amenées à changer pendant l'impact . Certains articles tentent de prouver l'invalidité de ce critère pour toutes ces raisons, ce qui rejoint

critère	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	valeur 50%*
BC	-17,76	38,50	0,96	0,37
$(VC)_{max}$	5,59	4,34	0,83	0,8
*en terme de valeur du critère amenant à une probabilité d'une lésion AIS>1 égale à 50%				

**TABLE 3.3.** *Les valeurs des paramètres des courbes présentées sur la figure 3.6 par l'équation (3.1) [14].*

l'avis des experts présents dans les groupes OTAN [21, 47–49]. Il est donc décidé dès ce stade d'exclure le critère  $BC$ .

### 3.2.5 Développement d'un "surrogate" pour l'impact non-létal thoracique

Le dernier résultat de l'étude de WSU est le développement d'un "surrogate thoracique", basé sur les courbes précitées (figures 3.4 et 3.5 et annexe D), et ayant eu successivement la dénomination de  $3RCS$  (*3 Rib Chest Structure*), et de  $3RBID$  (*3 Rib Ballistic Impact Dummy*) (figure 3.7). Ceux-ci sont développés pour correspondre aux corridors biomécaniques, et pour fournir les mêmes valeurs de  $(VC)_{max}$  que celles observées sur les PMHS. Un système de mesure intégré à base de LED permet de mesurer ce  $(VC)_{max}$ . L'ERM est sur le point d'acquérir une version actualisée de ce "surrogate", baptisée pour l'occasion le  $3BIR$  (*3 Ballistic Impact Rig*, figure 3.7). Le test de ce dispositif sera certainement une belle perspective à l'issue de ce doctorat.

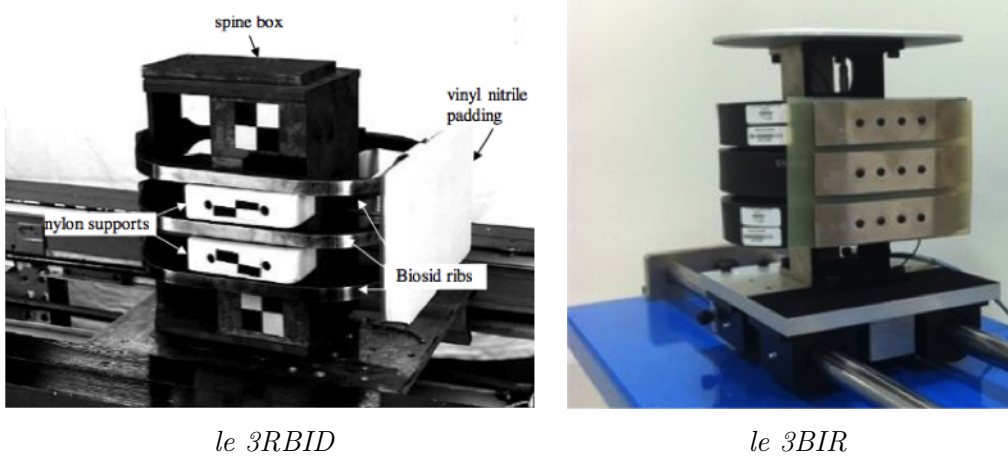


FIGURE 3.7. Les "surrogates" thoraciques, pour un impact arrivant de la droite de l'image [14].

### 3.2.6 Discussion sur les études de WSU

Les études de WSU constituent la source bibliographique principale de ce doctorat. Elle sont en effet les seules données accessibles dans la littérature ouverte donnant des résultats de projectiles non-létaux sur PMHS. D'autres tests du même type ont été effectués par d'autres organismes, mais de par le caractère sensible de

### 3.3 L'étude de la pénétration de la peau par projectile non-létal

---

ces informations, leurs résultats ne sont pas disponibles. Les données de WSU sont donc uniques dans la littérature ouverte.

Cela dit, il convient d'en tirer les conclusions nécessaires avec un oeil critique. Plusieurs réserves sont émises à leur propos :

- tout d'abord, on constate que les projectiles employés sont très rigides, et présentent des couples masses-vitesses qui s'éloignent notablement des projectiles non-létaux actuels ( figure 3.2 et table 2.2). N'ayant pas d'autres données cadavériques, on peut se demander si les critères sont toujours d'applications pour des projectiles plus déformables, et si les "*surrogates*" sont toujours biofidèles pour ce nouveau genre de projectiles.
- Par ailleurs, on constate quelques erreurs dans les données issues de ces articles. On remarque en effet des incohérences entre les valeurs présentées dans la table 3.3 et la figure 3.6. On constate également des erreurs de mesures probables en ce qui concerne les de force à l'impact en fonction du déplacement du point d'impact du thorax PMHS (non présentées). En effet, si l'on fait un bilan d'énergie ou de quantité de mouvement sur ces courbes, on obtient des valeurs d'énergie non constantes d'un tir à l'autre. Ces valeurs ne correspondent pas à l'énergie cinétique fournie par le projectile. Ces considérations sont détaillées dans les références [50, 51]
- Enfin, certaines données de métrologie sont incomplètes, comme par exemple les éventuels filtres appliqués aux signaux, les données exactes des masses et des vitesses des projectiles, ce qui complique l'exploitation rigoureuse des données.

Malgré ces quelques restrictions, les résultats de ces études restent inestimables et irremplaçables car uniques dans la littérature. D'autres données de tirs sur PMHS restent souhaitables. Faute de mieux, cette thèse est néanmoins basée sur les données disponibles. De manière à garantir une certaine pérennité des résultats produits lors de ce doctorat, une contrainte est posée, dès ce stade : la démarche et les résultats produits doivent être adaptables à d'autres données et d'autres critères probablement disponibles à l'avenir.

### 3.3 L'étude de la pénétration de la peau par projectile non-létal

Le deuxième domaine d'étude couvert dans ce doctorat est l'étude de la pénétration de la peau. Comme exposé dans l'annexe B, l'impact pénétrant d'un projectile

non-létal peut amener des blessures létales, il est donc très important de l'étudier également. Au début de ce doctorat, très peu de données étaient disponibles. Ce n'est qu'au cours de l'année 2010 et suite à l'implication de la Belgique dans les groupes OTAN que l'on a pu obtenir de nouvelles informations. Depuis, les résultats sont discutés et améliorés constamment grâce à l'apport d'informations de différents pays OTAN, dont la Belgique, pour constituer l'état de l'art tel qu'il existe aujourd'hui. Les références de l'OTAN spécifiées ont donc la particularité d'être en même temps document d'origine du travail de ce doctorat, et également résultat de ce doctorat.

Deux sources bibliographiques distinctes sont employées et traitées dans ces groupes OTAN. La première provient à nouveau de WSU, qui dans la prolongation de l'étude de l'impact thoracique, propose une étude dédiée au phénomène de pénétration de la peau par un projectile non-létal [21, 33, 52–54]. La deuxième source est fournie par la Direction Générale des Armements (DGA), en France. Cette deuxième source propose une méthode appelée ici "*la méthode Force Wall*", qui est plus récente et est toujours en cours de mise au point [55]. Ces deux méthodes sont actuellement proposées comme standard d'évaluation au niveau OTAN, et la présente thèse contribue de manière significative à l'écriture de ce document [24]. Un des objectifs de ce doctorat est de comparer les deux méthodes proposées.

### 3.3.1 La méthode initiale de WSU

A nouveau, comme pour l'étude thoracique, cette approche est basée sur des tirs sur PMHS. Le projectile calibre 12 RB1FS est choisi comme projectile de référence (table 2.2, figure 2.6(c)). Le principe est de tirer ce projectile sur différentes parties du corps, et à différentes vitesses. La densité énergétique  $DE$ , telle que définie ci-dessous, a déjà été rapporté comme critère de pénétration de projectiles de petits calibres tels que les armes à air comprimé [56]. Celle-ci est donc relevée pour chaque tir, selon la formule

$$DE = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3.11)$$

avec :

- $m$  : la masse du projectile en  $kg$ .
- $v$  : la vitesse du projectile en  $m/s$ .
- $D$  : le diamètre du projectile en  $m$ .

### 3.3 L'étude de la pénétration de la peau par projectile non-létal

---

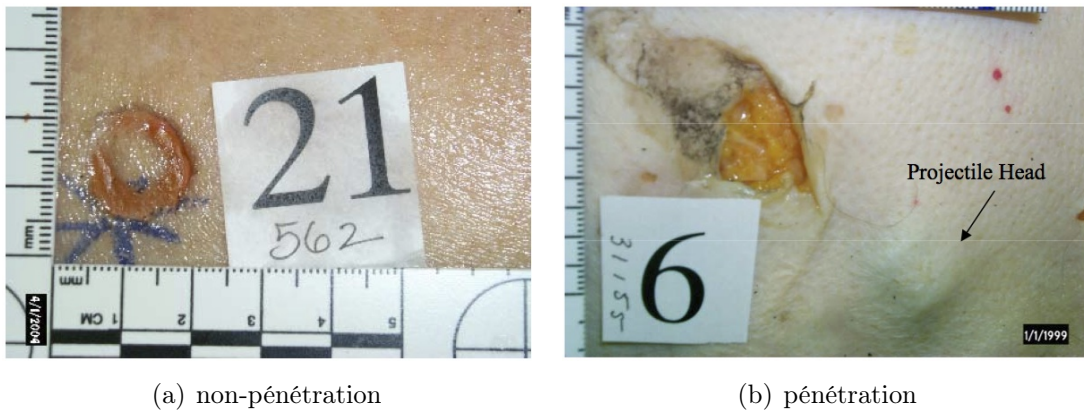
L'occurrence de la pénétration est répertoriée pour chaque tir. On retrouve sur la figure 3.8 une photographie post impact exposant un cas de non-pénétration et un cas de pénétration. Une pénétration est définie comme suit :

« une perturbation non seulement de la peau mais aussi des tissus sous-cutanés ou des muscles causée par le projectile. » [54]

Une non-pénétration est, quant à, elle définie comme étant

« une déchirure, une décoloration ou un marquage de la peau sans dommage des tissus sous-cutanés. » [54]

Les tirs sont réalisés sur les régions du corps définies sur la figure 3.9 et les résultats obtenus sont repris dans la table 3.4.

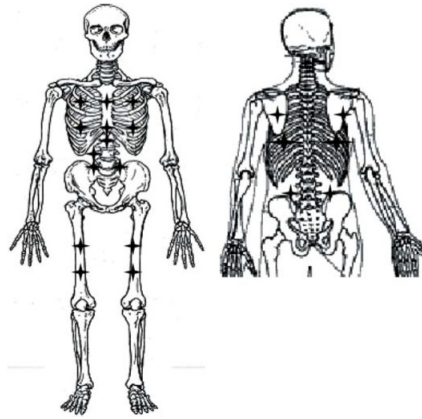


**FIGURE 3.8.** Exemple de cas de non-pénétration et de pénétration [52].

On constate que l'emplacement d'impact le plus susceptible de voir apparaître une pénétration est le tir sur une côte antérieure. La valeur de densité énergétique amenant une probabilité de pénétration de la peau de 50 % (définie par l'équation 3.1 à l'aide des valeurs de la table 3.4) est de  $23,99 J/cm^2$ . C'est cette valeur qui est exploitée dans ce travail. Elle correspond à une vitesse du projectile de 137 m/s, ce qui amène à conclure que le projectile RB1FS présente des risque de pénétration à sa vitesse nominale de 152 m/s.

Le deuxième résultat de cette étude est de proposer un "surrogate" pour évaluer le phénomène de pénétration de la peau. Après différents essais, le dispositif expérimental consiste en un modèle composé de trois couches [52–54] :





**FIGURE 3.9.** Les différentes zones impactées dans l'étude de la pénétration de WSU, [33, 52, 53].

Localisation de l'impact	densité énergétique 50 % *	$\alpha^{**}$	$\beta^{**}$
Sternum	32,88	-1,907	0,058
On anterior Rib	23,99	-126,513	5,274
Between Anterior Rib	33,30	-2,731	0,082
Liver	39,88	-1,907	0,095
Lateral to Umbilicus	34,34	-3,424	0,098
Proximal Femur	26,13	-5,147	0,197
Distal Femur	28,13	-4,895	0,174
Scapula	50,60	-5,262	0,104
On Posterior Rib	52,74	-10,021	0,190
Lower Back	38,13	-4,004	0,105

\*en terme de valeur de densité énergétique ayant amené, après exploitation statistique des résultats selon l'équation 3.1, une probabilité de pénétration de la peau de 50%  
 \*\* paramètres de l'équation 3.1

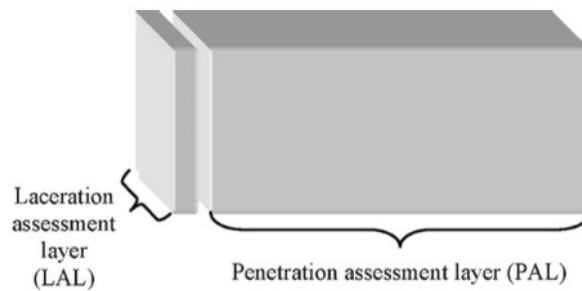
**TABLE 3.4.** Les résultats de skin penetration obtenus par WSU [33, 52, 53].

### 3.3 L'étude de la pénétration de la peau par projectile non-létal

---

- Une couche appelée Penetration Assessment Layer ou PAL, représentant les tissus internes et les organes. Celle-ci est constituée d'un bloc de gélatine balistique 20 %<sup>3</sup>[57]. Ce bloc doit être conditionné à 10°C pendant 24h, et ne peut être exposé à la température ambiante pendant les tests que pour une durée maximale de 45 minutes.
- Deux couches appelées Laceration Assessment Layer ou LAL, représentant la peau et les tissus sous-cutanés. Celles-ci sont constituées d'une première couche en peau de chamois dont l'épaisseur optimale est de 1,39 mm<sup>4</sup>, et d'une seconde couche en mousse à cellules fermées dont l'épaisseur est de 6 mm<sup>5</sup>.

Un tel dispositif est représenté sur la figure 3.10.



**FIGURE 3.10.** Schéma du dispositif expérimental a [52–54].

Puisque ce dispositif diffère d'un PMHS, il est nécessaire de redéfinir les critères de pénétration, de lacération et d'absence de blessure. Le nouveau critère de pénétration est défini de la sorte :

*« Une perforation de la couche PAL par un projectile non-létal causant un trou ou une cavité permanente sera considérée comme équivalente à une pénétration sur les PMHS. »* [54]

Le nouveau critère de non-pénétration est décrit de la sorte :

---

3. 20 % massique de poudre de gélatine, 80% massique d'eau.

4. disponible chez le fournisseur suivant : J&T Beaven Ltd, 117 The Midlands Holt, Trowbridge Wiltshire BA14 6RJ England - <http://www.beaven.com/home> .

5. disponible chez le fournisseur suivant : Doll- Doo, 8521 Spencer Court, North Ridgeville, OH 44039-4493, USA ; [www.dolldoo.com](http://www.dolldoo.com) .

« *La perforation des couches LAL, représentant la peau et les tissus sous-cutanés, sans pénétration de la couche PAL, sera considérée comme une lacération.* » [54]

« *La non-perforation à la fois des couches LAL et de la couche PAL résulte en l'absence de blessures.* » [54]

Il est également nécessaire de donner des caractéristiques aux différents éléments afin que le "*surrogate*" soit reproductible d'un laboratoire à l'autre. En ce qui concerne la gélatine, de manière à s'assurer de ses propriétés mécaniques face à l'impact, un procédé de calibration est réalisé en tirant un projectile sur le bloc nu, selon les spécifications suivantes suivante [54] :

- Utilisation de billes cuivrées pour air gun dont le calibre est de 4,5 mm (sans masse spécifiée).
- La vitesse des projectiles doit être de 179 m/s  $\pm$  4,5 m/s.
- La distance de tir doit être égale à 3,05 m.
- La profondeur de pénétration du projectile doit être comprise entre 3,81 et 7,62 cm.

Concernant les autres constituants, seul le fournisseur est spécifié, sans informations complémentaires<sup>6</sup>. La figure 3.11 montre une comparaison entre la courbe de probabilité de pénétration d'un PMHS au niveau d'une côte antérieure en fonction de la densité énergétique et la courbe de probabilité correspondante pour le "*surrogate*" testé. Les résultats semblent très similaires.

### 3.3.2 La méthode "Force Wall"

Cette méthode est basée sur un doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées à Lyon, [58] dont l'un des résultats est l'établissement d'un critère de rupture de la peau. Celui-ci est basé sur la contrainte maximum à faible vitesse de déformation ( $100 \text{ s}^{-1}$ ), et fixe la valeur de rupture entre 7 MPa et 10 MPa. La DGA propose d'exploiter cette étude pour amener à une nouvelle méthodologie d'évaluation de la pénétration de la peau. Le principe est de tirer le projectile sur un capteur de force rigide encastré dans un matériau supposé infiniment rigide (par rapport au projectile) (figure 3.12).

---

6. « The foam used in this test procedure is 0.60 cm closed cell foam available from Darice Inc. at [www.darice.com](http://www.darice.com) (Part number 1199-20) » [54]

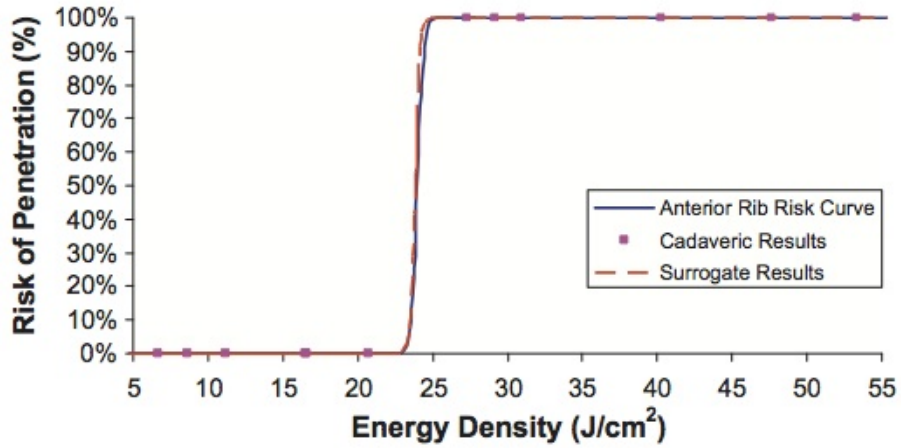


FIGURE 3.11. Comparaison des résultats sur PMHS avec les résultats du dispositif sélectionné [52–54].

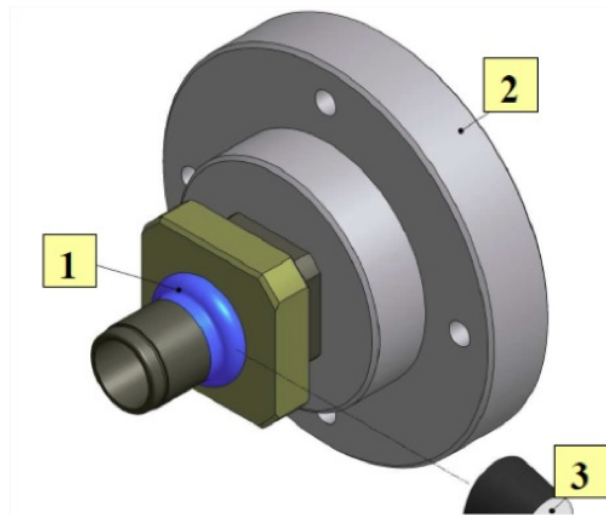


FIGURE 3.12. Méthode de la DGA. (1) projectile, (2) mur rigide équipé du capteur de force, (3) caméra haute vitesse [55].

La force en fonction du temps est mesurée à l'aide du capteur, tandis qu'une caméra haute-vitesse permet de mesurer la surface de contact en fonction du temps. Ces deux données permettent de calculer la contrainte moyenne, définie comme la pression moyenne de contact, en fonction du temps. Le critère lésionnel étudié est la contrainte, et la tolérance (telle que définie dans la section 3.1.2) est fixée à 10 MPa. Des tests sur PMHS prévus prochainement devraient permettre de mieux spécifier cette valeur.

### 3.3.3 Discussion sur l'étude de la pénétration de la peau

Deux méthodes sont proposées pour l'évaluation de la pénétration de la peau. La première est basée sur un "*surrogate*", validé à l'aide de données cadavériques pour un projectile bien précis. La deuxième est basée sur une caractérisation de la rupture de la peau. Ces deux méthodes sont actuellement publiées dans un document de l'OTAN décrivant une proposition de standard d'évaluation de la pénétration de la peau par un projectile non-létal. Dans ce contexte, de nouveaux tirs sur PMHS sont prochainement prévus, et pourraient permettre de discerner la validité de ces deux méthodes. En attendant, les deux méthodes sont envisagées.

La première méthode présente l'avantage d'être simple, bon marché, et semble donner des résultats très fidèles aux tirs sur PMHS pour le projectile spécifié. Ses inconvénients sont cependant multiples :

- le "*surrogate*", de par sa constitution en couche PAL et LAL donne l'impression d'avoir l'ambition de pouvoir évaluer non seulement l'occurrence de la pénétration, mais également l'occurrence de la lacération. Malheureusement, aucune donnée n'est fournie quant à l'occurrence de la lacération observée lors des tirs sur PMHS. Il est donc impossible de conclure que le "*surrogate*" est biofidèle sur ce point. En ce qui concerne la présente thèse, son emploi se limitera donc à l'évaluation de la pénétration.
- D'un point de vue pratique, la limite de 45 minutes de test, et le procédé de contrôle de la température de la gélatine rendent les tests fastidieux [57, 59, 60].
- Le manque d'informations sur les caractéristiques mécaniques des constituants de la couche LAL risque de rendre le test peu répétable.
- La définition de la pénétration est matière à interprétation, ce qui peut influencer les résultats des tests.

---

« The natural chamois used in this test procedure is available from J & T Beaven, Ltd. (Sussex, England), stock number 45094. The optimum thickness is 1.39 mm (1.15 to 1.80 mm). »[54]

- Le dispositif n'est validé qu'à l'aide d'un seul projectile. La question de son applicabilité pour l'ensemble des projectiles non-létaux demeure.

Malgré ces problèmes, un tel dispositif semble très prometteur de par son caractère simple et de par les bon résultats qu'il fourni. De nombreux pays OTAN partent donc dans cette direction, y compris les USA [21]. Ce test, proposé comme futur standard [24] est certainement une bonne base de recherche, et fait donc l'objet d'améliorations et d'essais multiples à l'aide de divers projectiles.

L'avantage de la deuxième méthode est sans doute sa plus grande répétabilité, et sa démarche de caractérisation de matériau, moins empirique que la première méthode. Un de ses inconvénients est le peu d'informations fournies. On ne connaît pas les données permettant d'extrapoler des résultats sur mur rigide vers des résultats applicables sur diverses parties du corps humain. Par ailleurs, le fait de tirer sur un mur rigide pourrait amener un mécanisme d'impact potentiellement non représentatif d'un impact sur corps humain, beaucoup plus mou, et pourrait donc influencer les résultats et conclusions de façon notable. Un bon exemple est le projectile FN303 qui a la particularité d'éclater à l'impact. Ce phénomène est systématiquement observé lorsqu'il est tiré sur mur rigide, même à des vitesses de 30 m/s. Or, sur corps humain, le projectile n'éclate pas forcément<sup>7</sup>. Le phénomène étudié est donc différent. Les résultats du tir sur mur rigide ne sont donc peut-être plus extrapolables à une éventuelle pénétration de la peau. Un autre désavantage vient de la complexité des mesures, plus délicates à maîtriser que celles du "*surrogate*", et amenant des coûts bien plus importants (notamment dûs à la nécessité d'une caméra haute-vitesse qui peut coûter plusieurs dizaines de milliers d'euros). Enfin, il est à noter que cette méthode est très récente puisque la première communication dans les groupe OTAN à son sujet date d'octobre 2012. Des récents résultats, produit par la France et la Belgique, montrent qu'elle pose encore des problèmes. Ces résultats encore partiels ne sont donc pas publiés dans ce doctorat, seuls deux exemples prouvant la faisabilité de la méthode sont présentés.

## 3.4 Efficacité d'une arme non-létale à énergie cinétique

L'unique source bibliographique qu'on rapporte sur le sujet est une étude réalisée par l' "*United States Air Force Research Laboratory*" [61], elle même basée sur des études non publiées. On y mentionne deux seuils de douleurs, tous deux quan-

---

<sup>7</sup>. Cette conclusion est basée sur des observations de tests non publiés, réalisés dans le cadre de ce doctorat.

tifiés en densité énergétique. La première limite est fixée à  $2,15J/cm^2$ , et est liée à une certaine douleur, dont la perception est variable d'une personne à l'autre. La deuxième valeur est de  $3,62J/cm^2$ , et est liée à une douleur intense, qui empêcherait la victime de cette douleur de continuer à réaliser ses activités, quelles qu'elles soient.

Bien conscient que cette unique source bibliographique rend le raisonnement fragile, l'efficacité des armes non-létales à énergie cinétiques est néanmoins évaluée dans ce doctorat selon cette unique valeur de  $3,62J/cm^2$ . Un impact atteignant une valeur de densité énergétique supérieure à cette valeur sera considéré comme efficace, et un impact caractérisé par une valeur inférieure sera considéré comme inefficace. Il est à noter que cette mesure ne nécessite qu'une mesure de vitesse avant impact. L'étude métrologique est donc très limitée. L'aspect efficacité ne sera donc réabordé qu'à la toute fin de ce document.

### 3.5 Contribution originale de la thèse

A l'issue de cette revue de la littérature, il est maintenant possible d'affiner l'objectif de ce doctorat. Celui-ci est de développer une méthode adaptée aux projectiles non-létaux actuels et futurs, permettant de procéder à une évaluation du potentiel lésionnel du projectile au niveau du thorax d'une part, et au niveau de la pénétration de la peau d'autre part. Une brève étude de l'efficacité est également réalisée.

La première évaluation est basée sur les travaux de WSU et sur le critère  $(VC)_{max}$ . La méthode proposée doit être applicable à des projectiles fortement déformables, contrairement aux résultats actuellement disponibles, et doit être éventuellement extrapolable à d'autres critères lésionnels. Les projectiles étudiés représentent les projectiles actuellement disponibles, ainsi que les PMI. Comme on pourra le voir par la suite, de nombreux moyens métrologiques originaux doivent être mis en place pour atteindre cet objectif.

La deuxième évaluation a pour but d'étudier le potentiel de pénétration de la peau d'un projectile non-létal. Au début de ce doctorat, aucune méthode standardisée n'existait à ce sujet. Il s'agit donc de proposer une telle méthode, inédite, pour étudier cette question. Deux pistes sont explorées. La première appelée "*méthode WSU*" est basée sur un "*surrogate*". Le pré-requis est de répliquer une proposition de "*surrogate*" de WSU et de s'assurer que les résultats sont bien comparables à ceux issus de tirs sur PMHS. Ensuite, la méthodologie est affinée. Enfin, une base de données de résultats inédits, correspondant à différents projectiles non-létaux, est

publiée. La méthode "Force Wall" est également implémentée, grâce à des moyens métrologiques développés pour l'occasion. Seule une étude de faisabilité est réalisée.

Comme tout résultat métrologique est associée à une incertitude de mesure, des moyens de validation sont développés et des études d'incertitude de mesures sont systématiquement réalisées. Ceci constitue une nouvelle originalité de cette thèse.

Enfin, cette thèse est la première étude s'intéressant à l'efficacité d'une arme non-létale à énergie cinétique. Même si la base bibliographique est réduite, il est intéressant de voir à quelle genre de conclusion cela puisse mener.

Enfin, signalons que l'ensemble des résultats fournis par ce doctorat constitue une source de données précieuses pour les groupes OTAN dans lesquels la Belgique participe. Comme déjà précisé, l'une des ambitions de ces groupes est de proposer des standards d'évaluation du potentiel lésionnel des projectiles non-létaux. Le résultat le plus intéressant et le plus valorisant de ce doctorat sera donc sans doute de donner un maximum de recommandations pratiques et d'informations à ces groupes, qui permettront dans un futur proche, de faire reconnaître et accepter des méthodes d'évaluation efficaces et reconnues à un niveau international.





# Chapitre 4

## Mise au point expérimentale

*« Si nous savions ce que nous faisons, on n'appellerait pas cela de la recherche, pas vrai ? »*

Citation habituellement attribuée à Albert Einstein.

### 4.1 Introduction

Ce chapitre représente le coeur du travail de ce doctorat. Durant cette phase, de nombreux choix sont effectués, fermant de nombreuses portes, et en ouvrant d'autres. Le résultat de tout ce travail mène à la définition et à la mise au point des moyens expérimentaux qui permettent l'évaluation de l'impact non-létal thoracique non-pénétrant et de la pénétration de la peau. Ce chapitre est divisé en quatre parties distinctes. En effet, assez naturellement, la mise au point expérimentale est régie par quatre besoins différents :

- le premier besoin est de mettre en place une ligne de tir dédiée à l'étude expérimentale des projectiles non-létaux, c'est-à-dire en somme de créer le laboratoire qui permettra de réaliser tant d'avancées par la suite. En pratique, il s'agit de mettre au point une enceinte permettant le tir de projectiles en toute sécurité pour l'expérimentateur et son environnement. Par ailleurs, son ergonomie doit permettre de pouvoir accueillir les différents moyens métrologiques.
- Un deuxième besoin fondamental est de mettre au point le lanceur permettant de tirer l'intégralité des projectiles non-létaux à la disposition du département ABAL. A l'aube de la réalisation de ce travail, il existait déjà au département

ABAL un prototype de lanceur pneumatique, qui donnait déjà de bons résultats. Cette partie consiste donc à améliorer ce lanceur de manière à ce qu'il réponde à tous les besoins nécessaires pour mener à bien l'étude ultérieure.

- Une fois rassuré sur le bon fonctionnement de l'enceinte et du lanceur, des projectiles non-létaux peuvent être tirés et les mesures adéquates peuvent être réalisées. Très certainement, comme toute étude expérimentale balistique, la vitesse du projectile avant l'impact devra être mesurée, et ce avec la meilleure précision possible. Le troisième besoin consiste en cette mesure.
- Enfin, le dernier besoin, mais très certainement pas le moindre puisqu'il s'agit du coeur même de ce doctorat, est de prendre les mesures de balistique terminale<sup>1</sup>. Leur mise au point fut longue et fastidieuse, de nombreuses options ont été examinées, des choix drastiques ont dû être effectués pour finalement aboutir aux solutions choisies, et développées dans les chapitres suivants.

Ces quatre points font l'objet des sections suivantes. Avant cela, l'auteur tient à préciser une première décision qui influence le montage expérimental : il a été décidé de placer systématiquement la sortie du lanceur le plus près possible de la cible. De cette manière, la durée de vol du projectile est minimisée, et donc également les influences que l'environnement pourrait avoir sur le projectile durant cette phase. Un projectile aérodynamiquement instable (comme c'est parfois le cas avec un projectile non-létal) n'a alors pour ainsi dire que peu de temps pour modifier sa configuration avant l'impact, ce qui augmente la répétabilité du test et donc la qualité des résultats. Cette décision influence les dimensions du laboratoire, la conception du lanceur pneumatique, les choix technologiques permettant les mesures de la vitesse du projectile et les mesures de balistique terminale.

## 4.2 Réalisation du laboratoire dédié à l'étude des projectiles non-létaux

La réalisation d'une ligne de tir dédiée est une avancée déterminante dans la progression de ce doctorat, puisqu'elle permet de travailler sur le sujet de manière quotidienne. Avant la présente étude, les tirs de projectiles non-létaux étaient effectués dans le tunnel de tir du laboratoire du département ABAL de l'ERM (figure 4.1). Ce tunnel, mesure 103 m de long, et dispose d'une salle de contrôle confinée et adapté aux impacts balistiques classiques de petit calibre. L'inconvénient de ce labo est sa disponibilité limitée.

---

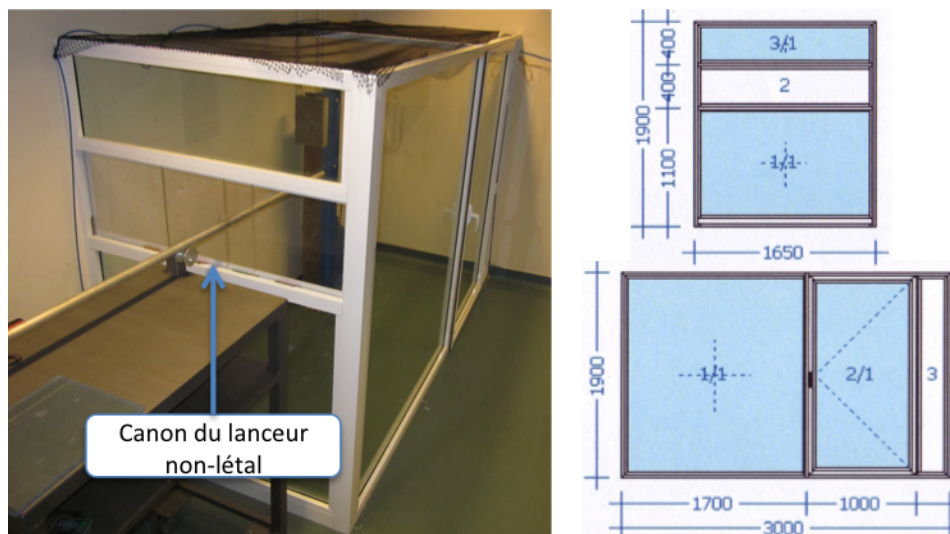
1. la balistique terminale traite des effets du projectile sur sa cible.

## 4.2 Réalisation du laboratoire dédié à l'étude des projectiles non-létaux



**FIGURE 4.1.** Une ligne de tir non-létale installée dans le laboratoire du département balistique de l'ERM, photo prise en 2009.

Le nouveau laboratoire permet de mieux maîtriser les montages expérimentaux et de gagner beaucoup de temps. Le laboratoire balistique du département ABAL reste cependant disponible lorsque des tirs à longue distance sont nécessaires. La nouvelle enceinte est présentée sur la figure 4.2.



**FIGURE 4.2.** L'enceinte permettant la protection de l'environnement lors des tirs. Les dimensions sont en mm.

Concevoir cette nouvelle ligne de tir implique de résoudre deux problèmes fondamentaux. Le premier est de dimensionner un espace estimé suffisant pour la réalisation des tirs non-létaux. Celui-ci doit permettre de placer le lanceur, les instruments de mesure et la cible. Le deuxième est de concevoir une structure permettant de garantir la sécurité de l'expérimentateur et de son environnement lors du tir. En effet, l'impact provoque de façon quasi systématique un rebond, ou la destruction

du projectile, ce qui peut être dommageable pour l'environnement de l'impact ou pour le tireur, d'où la nécessité de prévoir une protection adéquate.

La solution retenue consiste en la fabrication d'une enceinte constituée de panneaux de verre feuilleté de 2 fois 6 mm d'épaisseur encastrés dans une structure en aluminium. Ces éléments sont choisis de manière à pouvoir encaisser les impacts des éventuels rebonds. Le verre transparent permet de placer certains instruments à l'extérieur de l'enceinte, comme la caméra haute-vitesse ou des spots éclairants. Le corps du lanceur est également prévu à l'extérieur de l'enceinte, avec la bouche du canon à l'intérieur via une entrée adéquate. L'entrée dans l'enceinte se fait via une porte en verre du même type. Enfin, le plafond de l'enceinte est composé d'un filet permettant de retenir le projectile à l'intérieur dans le cas peu probable d'un rebond dans cette direction. Ce filet permet un dégagement de chaleur de l'enceinte, qui est une caractéristique indispensable lorsque des instruments dégagant beaucoup de chaleur comme des spots éclairants sont présents dans l'enceinte.

### 4.3 Conception du lanceur universel

Le lanceur est un élément essentiel pour le bon déroulement de cette étude. Cet outil doit permettre d'étudier l'impact des projectiles dans différentes conditions, correspondant à différentes situations d'impact observées lors de l'utilisation réelle de projectiles non-létaux. La configuration du projectile dans une situation d'impact réel peut être résumée par ces différentes caractéristiques : la norme de son vecteur vitesse, son angle de yaw<sup>2</sup>, et sa rotation autour de son axe. Parmi ces trois paramètres, de part son caractère déterminant sur le phénomène, seule l'influence de la vitesse sera étudiée. Les deux autres paramètres doivent donc uniquement être contrôlés de manière à être très répétable et reproductible<sup>3</sup>. Les fonctions voulues pour le lanceur sont ainsi définies :

- il doit permettre de tirer l'intégralité des projectiles non-létaux disponibles, ainsi que les PMI.
- Il doit permettre d'ajuster la vitesse du projectile à la bouche du canon, de manière précise, répétable, et reproductible .

---

2. l'angle de yaw est l'angle entre le vecteur vitesse du projectile et le vecteur axe du projectile. Il s'agit de la traduction anglaise de l'angle de lacet. Pour rester cohérent avec le monde balistique, la terminologie "yaw" sera employée par la suite.

3. La "répétabilité" est l'habilité de fournir la même mesure lorsque toutes les conditions de mesures demeurent identiques. La "reproductibilité" est l'habilité de fournir la même mesure en faisant varier certaines conditions de mesures, typiquement l'opérateur.

### 4.3 Conception du lanceur universel

---

- L'angle de yaw à la sortie du canon, doit systématiquement être le plus faible possible, de manière à être le plus répétable et le plus reproductible possible, et à réduire au maximum son influence.
- La rotation du projectile autour de son axe doit systématiquement être la plus faible possible, de manière à être la plus répétable et la plus reproductible possible, et à réduire au maximum son influence.

D'autres fonctions additionnelles seront greffées par la suite, et seront détaillées dans les sections correspondantes.

#### 4.3.1 L'ancien lanceur universel

Le lanceur prototype disponible à l'aube de ce doctorat peut être décrit comme un ensemble de trois composants :

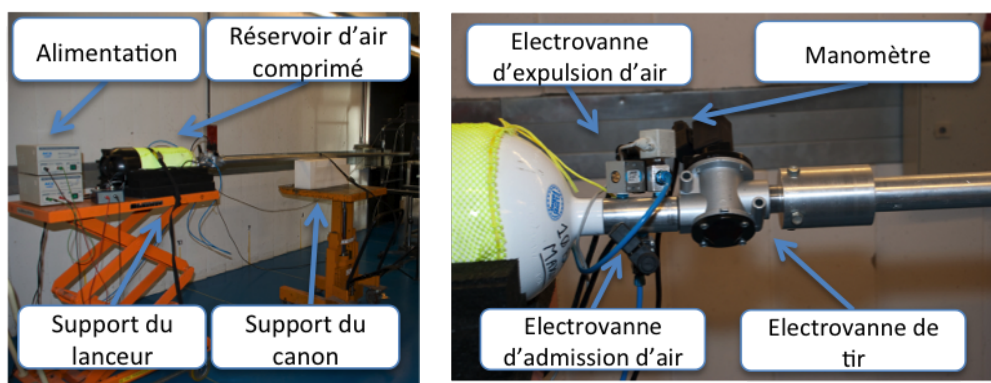


FIGURE 4.3. *L'ancien lanceur pneumatique.*

- un réservoir d'air comprimé constitué d'une bouteille de plongée. La pression est vérifiée à l'aide d'un manomètre.
- Le canon, correspondant à un projectile donné.
- Une interface mécanique entre ces deux derniers éléments, équipée d'un système d'électrovannes permettant soit l'admission d'air comprimé dans le réservoir, soit l'expulsion de l'air comprimé du réservoir, soit l'admission de l'air comprimé du réservoir vers le canon. Ces électrovannes sont pilotées par un circuit électrique et un boîtier de commande adaptés.

Ce canon permettait déjà de tirer plusieurs projectiles non-létaux, comme le FN303, des projectiles calibre 12, ou des billes de 20 mm et de 50 mm. Le contrôle

de la vitesse du projectile à la bouche à l'aide de l'ajustement de la pression au sein du réservoir du canon était déjà très correct. Cependant, de nombreuses améliorations étaient nécessaires pour parvenir à réaliser les objectifs de cette étude.

- Tout d'abord, le projectile était chargé dans le lanceur par la bouche du canon, en le poussant à l'aide d'une baguette adaptée au canon. Cette opération est peu pratique et nécessite le déplacement de la cible et beaucoup d'espace, non disponible sur la nouvelle ligne de tir.
- De manière à répliquer des résultats de la littérature [14], une capacité intéressante du lanceur est de pouvoir tirer un projectile instrumenté d'un accéléromètre, relié à une unité d'acquisition de données à l'aide d'un fil. Le tir d'un tel projectile est impossible avec ce lanceur.
- Les interfaces entre le réservoir, les électrovannes et le canon n'assurent pas une étanchéité suffisante, d'où une chute de pression non négligeable dans le réservoir lors du tir. Cette chute altère le contrôle de la pression et a donc tendance à diminuer la précision de la vitesse obtenue à la bouche.
- Le faible nombre de canons adaptés ne permet pas de tirer l'ensemble des projectiles voulu avec la précision requise.
- Le lanceur est soutenu par une table à hauteur réglable à l'aide de cales en caoutchouc et de sangles. Le canon est porté par une autre table. La stabilité et l'alignement de l'ensemble sont perfectibles.

### 4.3.2 Le nouveau lanceur universel

Ce nouveau lanceur est le fruit d'une collaboration entre l'auteur de cette thèse et un élève de la *Katholieke Hogeschool Sint-Lieven*, faisant son travail de fin d'étude sur le sujet [62]. Ce nouveau lanceur est également un lanceur pneumatique, basé sur le même principe. Celui-ci est présenté sur la figure 4.4.

Un réservoir constitué d'une bouteille de plongée est employé. Les électrovannes du précédent lanceur sont employées pour l'admission et l'expulsion de l'air comprimé du réservoir, et pour l'admission de l'air comprimé dans le canon. Mais les ressemblances s'arrêtent là. Ce nouveau lanceur dispose d'une culasse principale à laquelle sont reliés le réservoir et le canon. Cette culasse dispose d'un système d'ouverture/fermeture, permettant le chargement du projectile. Il est également équipé d'un orifice permettant le passage d'un fil dans le cas de tir d'un projectile instrumenté. Quatre canons sont adaptés aux projectiles, permettant le tir de projectile calibres 12, de 20 mm, de 30 mm et de 40 mm. Tout autre canon peut également être

### 4.3 Conception du lanceur universel

---

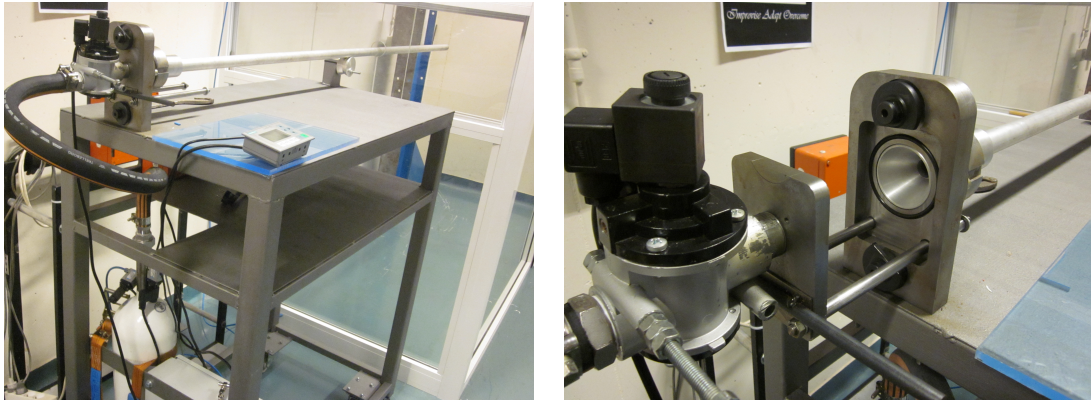


FIGURE 4.4. *Le nouveau lanceur pneumatique universel.*

adapté, via la fabrication d'une pièce d'interface adaptée. L'assemblage est réalisé de manière à diminuer significativement les fuites, et permet donc un meilleur contrôle de la pression de tir et donc de la vitesse du projectile à la sortie du canon. Le canon est piloté à l'aide d'un système PID<sup>4</sup> permettant de contrôler la pression lors de la procédure de tir. Enfin l'ensemble réservoir - culasse - canon dispose d'un support dédié sous forme d'une table tantôt fixe tantôt roulante, permettant une meilleure stabilité et une bonne répétabilité des conditions de tirs.

#### 4.3.3 Les relations pression-vitesse

Le but de ce doctorat n'était certainement pas d'optimiser la balistique intérieure du lanceur<sup>5</sup> mais plutôt d'obtenir un bon contrôle de la vitesse, et un angle de yaw et une rotation du projectile autour de son axe qui soient minimum. La vitesse est commandée par la surpression<sup>6</sup> introduite dans le réservoir avant le tir. Cette section présente quelques graphes "surpression - vitesse" à la bouche, qui permettent d'aider l'utilisateur du lanceur à obtenir la vitesse désirée (figure 4.5).

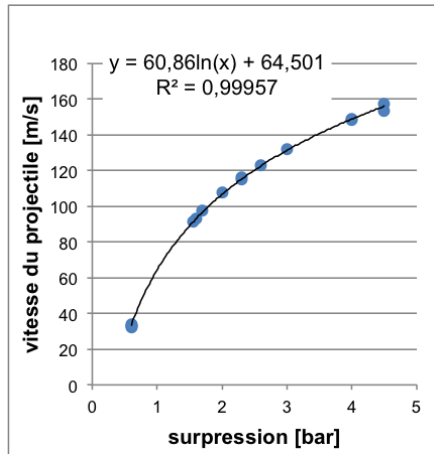
---

4. « Un régulateur PID ou correcteur PID (pour « proportionnel intégral dérivé ») est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'une grandeur physique d'un système industriel ou "procédé". C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques » - [http://fr.wikipedia.org/wiki/Régulateur\\_PID](http://fr.wikipedia.org/wiki/Régulateur_PID), consulté en janvier 2013.

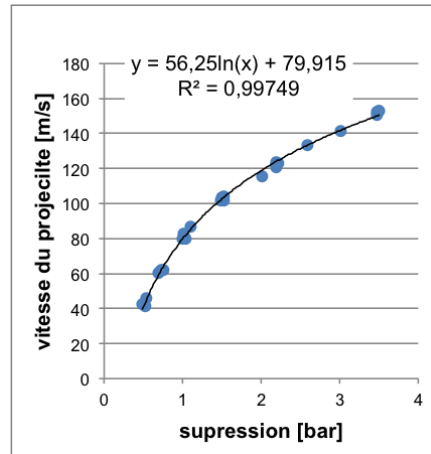
5. La balistique intérieure étudie l'ensemble des phénomènes ayant lieu lors du mouvement du projectile dans le lanceur - [e-ballistics.com](http://e-ballistics.com), consulté en janvier 2013.

6. La surpression est définie comme la différence entre la pression présente dans le réservoir et la pression atmosphérique.

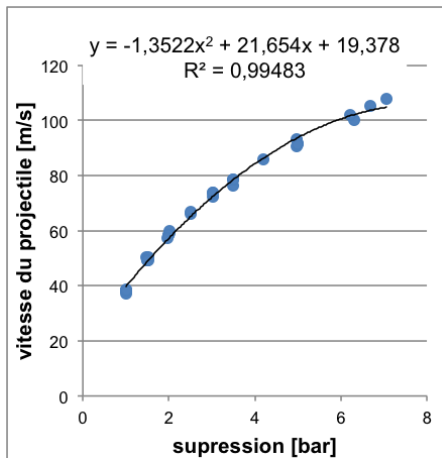




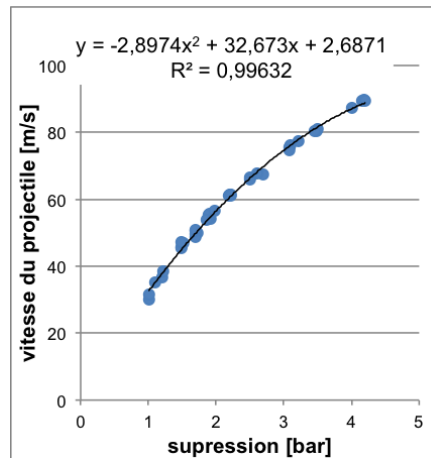
*FN303 (17,35 mm)*



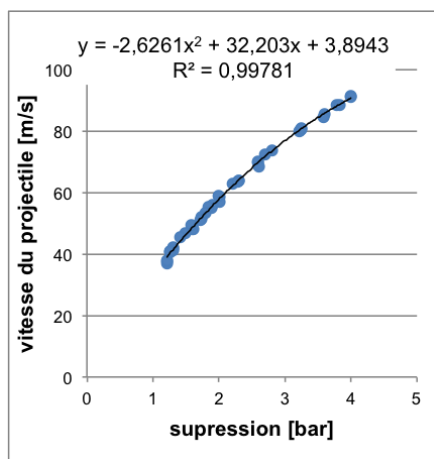
*RB1FS (calibre 12)*



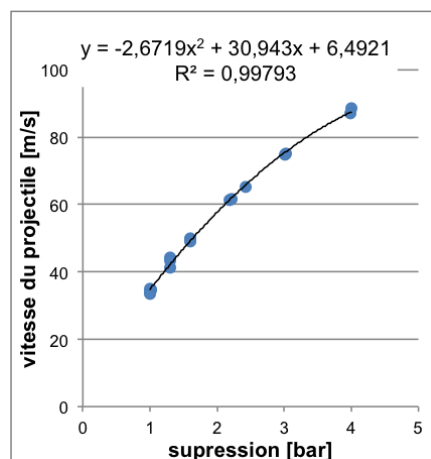
*Beanbag Defence Technologies (calibre 12)*



*Nobel Sport Spartan LE-40 (40 mm)*



*Brügger & Thomet Sir (40 mm)*



*NICO-Pyrotechnik Impulse (40 mm)*

**FIGURE 4.5.** La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la supression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour différents projectiles.

On observe que ces relations suivent des lois approximées, déterminées de manière purement empirique, et présentent une faible dispersion autour de cette loi (caractérisée ici par le facteur de vraisemblance  $R^2$ , défini par la fonction suivante <sup>7</sup> :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - Y'_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4.1)$$

où

- $Y_i$  représente les valeurs de la coordonnée dépendante considérée.
- $Y'_i$  représente les valeurs de la coordonnée dépendante prédite par la meilleure prédiction considérée.
- $\bar{Y}$  représente la moyenne des valeurs  $Y_i$ .

Une valeur proche de 1 indique une bonne approximation des valeurs par la loi considérée, une valeur proche de zéro indique une absence de corrélation entre les valeurs et la loi considérée.

Ces lois ont été choisies pour maximiser ce facteur  $R^2$ , et ne correspondent donc en aucun cas à un modèle physique du phénomène. L'utilisateur peut donc contrôler de manière précise la vitesse du projectile à la bouche, et donc à l'impact puisque la distance de tir est très courte.

#### 4.3.4 Le couple sabot-séparateur

Les projectiles présentés dans la section 4.3.3 ont l'avantage de pouvoir être tirés par le lanceur tel quel, dans un canon adapté. Malheureusement, pour des projectiles présentant un diamètre différent des canons disponibles, ce n'est pas forcément le cas. Par ailleurs, les PMI, très déformables, ne peuvent pas être tirés tels quels avec ce lanceur. En effet, de nombreux phénomènes de frottement, non répétables ou reproductibles, s'établissent pendant leur parcours dans le canon. Il en découle une mauvaise attitude du projectile à la bouche du canon, caractérisée par un angle de yaw souvent significatif, et également un mauvais contrôle de la vitesse. A ces deux problèmes s'ajoute un troisième non rencontré jusque là : l'attitude du projectile devant être la plus répétable et reproductible possible, l'objectif est d'avoir un projectile le moins déformé possible à la sortie du canon. Même si la vitesse est contrôlée et que l'angle de yaw et la rotation du projectile selon son axe

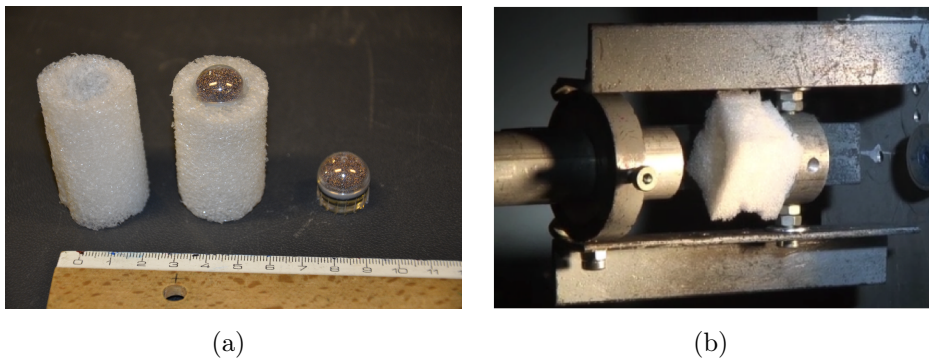
---

7. <http://www.phaser.com/modules/students/salmon/R2.pdf> - consulté en janvier 2013.

sont minimisés, ce type de projectile peut être allongé, ou écrasé à la sortie du canon, ce qui est considéré comme étant inacceptable.

Une solution dédiée doit donc être développée. Le principe est de placer préalablement le projectile dans un conteneur, appelé "*sabot*", et de tirer l'ensemble projectile-sabot à l'aide du lanceur pneumatique. Le projectile n'est donc plus en contact direct avec le canon, ce qui permet d'éviter les frottements et les problèmes qui en découlent. On retrouve sur la figure 4.6(a) un exemple de sabot de 30 mm, employé avec le projectile FN303 (qui peut néanmoins être également tiré sans sabot dans le canon adapté).

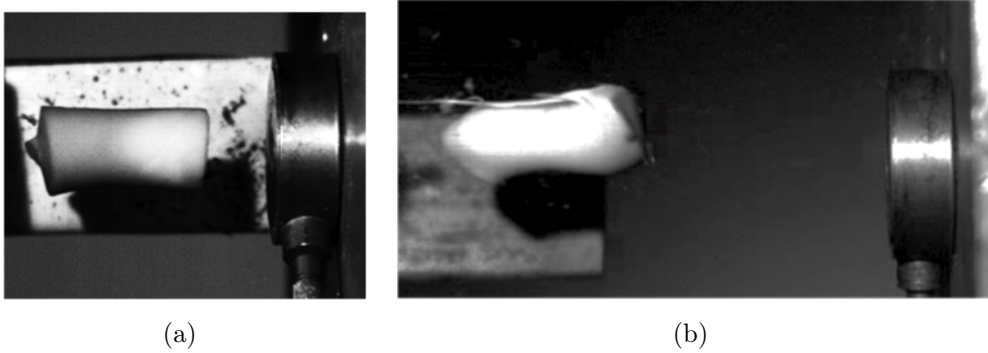
Si le couple projectile-sabot est tiré tel quel, l'ensemble impacte alors la cible, ce qui influence le phénomène à étudier. Vu le peu de place présente entre le canon et la cible, et donc le faible temps de vol, le sabot ne peut être séparé du projectile aérodynamiquement comme cela peut être le cas pour des projectiles de plus gros calibre et/ou sur des plus longs vols. Il s'agit alors d'employer le sabot en parallèle avec un deuxième élément appelé "*séparateur*", dont la fonction est de séparer le projectile du sabot, une fois le projectile sorti du canon. En pratique, la solution choisie consiste à stopper le sabot à la sortie du canon, et de ne laisser continuer que le projectile. La solution globale consiste en un projectile d'un diamètre  $A$ , d'un sabot, de diamètre  $B > A$ , correspondant également au diamètre du canon, et d'un séparateur constitué d'une pièce mécanique placée sur la trajectoire de tir, qui présente un trou circulaire de diamètre  $C$ , tel que  $A < C < B$ , à travers lequel le projectile peut passer, mais pas le sabot. Un exemple de séparateur, adapté au sabot présenté sur la figure 4.6(a), est présenté sur la figure 4.6(b).



**FIGURE 4.6.** (a) Un exemple de sabot de 30 mm pour le projectile FN303, avec de gauche à droite le sabot seul, le sabot et son projectile, et le projectile seul. (b) Un exemple de séparateur adapté au sabot de 30 mm pour le projectile FN303.

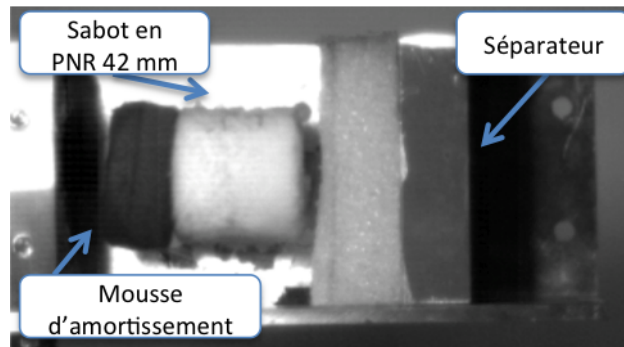
Les premiers essais mis en oeuvre pour tirer le PMI présentèrent des résultats très médiocres. Un exemple caricatural est présenté sur la figure 4.7. Pour améliorer

l'attitude du projectile, une campagne de tirs de plusieurs mois a été réalisée. L'objectif était de tester de nombreuses solutions et d'optimiser l'attitude du projectile à l'impact. Cette recherche est détaillée dans l'annexe E.

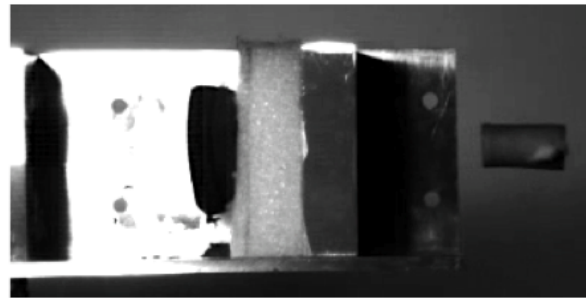


**FIGURE 4.7.** (a) *Un exemple de bonne attitude du projectile PMI - séparation à 50 m/s* (b) *Un exemple de mauvaise attitude du projectile PMI - séparation à 115 m/s*

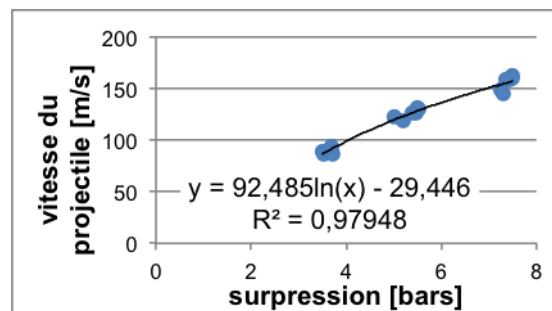
La solution finalement retenue consiste en une séparation droite (voir annexe E) d'un sabot de 42 mm en polyéthylène non-réticulé (PNR) d'une densité de  $105 \text{ kg/m}^3$ , et d'un séparateur constitué d'une plaque d'aluminium percée d'un trou circulaire de 25 mm et d'un panneau en mousse en PNR. On retrouve également à l'arrière du sabot un amortisseur constitué d'un cylindre en mousse, permettant l'accélération plus progressive du couple sabot-projectile dans le canon, évitant ainsi leur séparation prématurée. Afin d'obtenir le meilleur alignement possible entre le canon et le séparateur, ce dernier est vissé sur le canon lui-même. Le sabot et le séparateur sont présentés sur la figure 4.8. Un exemple de séparation typique est présenté sur la figure 4.9. Enfin, une courbe pression-vitesse pour le projectile PMI est présentée sur la figure 4.10.



**FIGURE 4.8.** *Un exemple de la séparation droite avec un sabot de 42 mm en matériau PNR, un amortisseur en mousse et un séparateur constitué d'une plaque en aluminium percée et d'une plaque de PNR servant à amortir l'impact.*



**FIGURE 4.9.** *Un exemple de séparation du projectile PMI tiré à une vitesse de 110 m/s.*



**FIGURE 4.10.** *La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la surpression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour des PMI.*

### 4.3.5 Le tir du projectile instrumenté

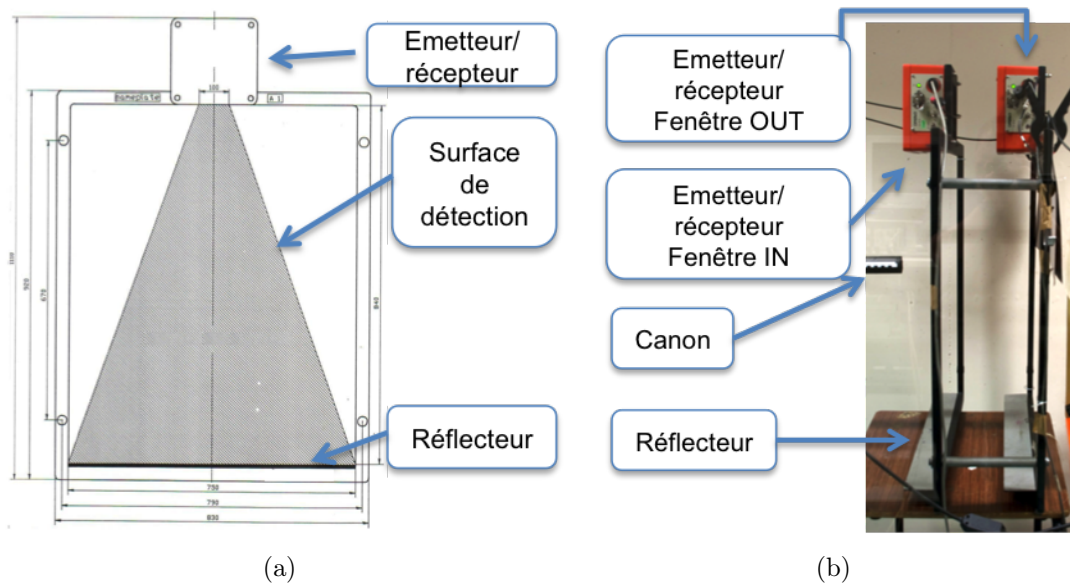
La dernière fonction inédite du nouveau lanceur est de pouvoir tirer des projectiles instrumentés. La description de cette fonction est décrite dans l'annexe G.

## 4.4 La mesure de vitesse du projectile avant impact

La mesure de vitesse du projectile est certainement une mesure systématique et indispensable pour toute analyse balistique. Au vu du matériel disponible au département ABAL, deux solutions techniques sont envisagées pour réaliser cette mesure. Soit la mesure est réalisée à l'aide d'une base de mesure optique, soit la mesure est effectuée à l'aide d'une caméra haute-vitesse (voir annexe H).

Une base de mesure optique est une structure parallélépipédique, disposant d'au moins deux fenêtres placées orthogonalement à la trajectoire du projectile (figure 4.11). Un émetteur récepteur infrarouge est placé au sommet de chaque fenêtre. Ce dispositif émet un rayonnement infrarouge sur un réflecteur, placé en dessous de la fenêtre, qui réfléchit le signal vers le récepteur. Lors du passage du projectile dans la fenêtre, celui-ci bloque une partie du rayonnement, l'empêchant de parcourir le trajet émetteur-réflecteur-récepteur. Une différence de rayonnement est détectée et un chronomètre enregistre le temps correspondant à ce phénomène. En employant au moins deux fenêtres de ce type (IN et OUT), on obtient une donnée de temps correspondant à la présence du projectile à l'une et l'autre fenêtre. En connaissant la distance entre les deux fenêtres, on peut calculer la vitesse moyenne du projectile sur cet intervalle.

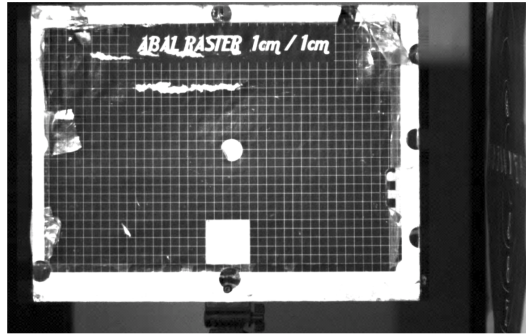
L'emploi de cette base de mesure optique amène différents avantages. Tout d'abord, sa simplicité de mise en oeuvre et la grande expérience du département ABAL quant à son emploi rend son utilisation rapide et efficace. Par ailleurs, la précision de la mesure est grande. Par exemple, l'incertitude d'une base de vitesse dont les deux fenêtres sont espacées de 2 m a été évaluée à 0,1 % [63]. L'inconvénient est l'encombrement spatial induit. Le département dispose de bases de mesure optique dont les fenêtres sont espacées de respectivement 25 cm, 50 cm, 1 m, 2 m, et 2,20 m de long. Comme déjà précisé, il est préférable de réduire au maximum la distance entre la bouche du canon et la cible, il est donc logique de vouloir employer la base de mesure optique de 25 cm. L'incertitude est alors estimée à 0,8 % [63, 64]. En pratique, cette distance peut toujours être trop importante, d'où l'idée de travailler sur une solution alternative, à savoir la mesure de vitesse par caméra haute-vitesse.



**FIGURE 4.11.** La base de vitesse. (a) Illustration du fonctionnement, vue de face. (b) photo de la base de mesure, vue latérale.

Le principe de la mesure de la vitesse à l'aide d'une caméra haute-vitesse est relativement similaire. Deux images au moins doivent être prises à deux endroits différents, lorsque le projectile est en vol. Les instants correspondants à ces deux images sont enregistrés par le chronomètre de la caméra haute-vitesse. La distance parcourue en pixels peut directement être mesurée sur ces images. Pour obtenir la distance réelle correspondante, il faut multiplier cette valeur par un rapport traduisant une distance en pixels en une distance réelle. Ce rapport, appelé "*facteur de calibration*", peut être déterminé en plaçant sur l'image un corps dont on connaît exactement les dimensions en unités réelles. On mesure alors le nombre de pixels correspondants. En pratique, ce facteur peut être déterminé préalablement aux tirs en plaçant dans le plan de la trajectoire de tir une référence appelée "*mire*" (figure 4.12), dont les dimensions sont connues. Une photo est alors prise, et permet de calculer le facteur de calibration correspondant. Tant que l'emplacement de la caméra et de la trajectoire de tir ne change pas, ce facteur de calibration est applicable. Ce concept sera réabordé dans le chapitre suivant.

En pratique, il semble préférable de vouloir employer la caméra haute-vitesse pour effectuer la mesure. En effet, celle-ci est de toute manière systématiquement employée lors d'un test, puisqu'elle sert à visualiser le point d'impact et l'attitude du projectile avant impact. Son emploi ne nécessite donc pas de matériel supplémentaire. De plus, elle n'a pas l'inconvénient de nécessiter une distance bouche du canon - cible d'au moins 25 cm pour être opérationnelle.



**FIGURE 4.12.** *Photo de la mire permettant de traduire une distance en pixels en une distance réelle.*

Avant de certifier que cette solution convient, une brève comparaison entre mesures de vitesse par base de vitesse et par caméra haute-vitesse a été réalisée [64]. Deux projectiles ont été tirés : le FN303 et une bille en ABS<sup>8</sup> de 50 mm. Les résultats sont repris dans la table 4.1, avec :

- $v_{cam}$ , la vitesse du projectile mesurée à l'aide de la caméra haute vitesse.
- $v_{Bmo}$ , la vitesse du projectile mesurée à l'aide de la base de mesure optique de 2m.

Dans un premier temps, des tests d'hypothèses de normalités ont été effectués, pour s'assurer que l'écart entre les deux mesures suit bien une loi normale. Deux tests, non présentés furent réalisés : le test de Kolmogorov, et la droite d'Henry.[65, 66]. La table 4.1 montre que la moyenne est bien proche de 0, ce qui laisse supposer qu'il n'y a donc pas de biais. Par ailleurs, l'écart-type est de 1,2% de la vitesse de référence  $v_{Bmo}$ , ce qui se rapproche de la précision de la base de vitesse. On ne peut donc pas conclure qu'un système est meilleur que l'autre. Ce résultat détermine définitivement le choix de la technique de mesure de vitesse par caméra haute-vitesse. Une analyse théorique de l'incertitude de mesure sera présentée dans un chapitre suivant.

---

8. « L'acrylonitrile butadiène styrène ou ABS est un polymère thermoplastique employé par l'industrie pour des produits présentant une bonne tenue aux chocs, relativement rigides, légers et moulés. » [http://fr.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiène\\_styrène](http://fr.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiène_styrène), consulté en février 2013.



Projectile : FN303			Projectile : ABS 50 mm		
$v_{Bmo}$ [m/s]	$v_{cam}$ [m/s]	$\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$ [-]	$v_{Bmo}$ [m/s]	$v_{cam}$ [m/s]	$\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$ [-]
38,82	38,69	-0,0033	31,51	32,24	0,0232
60,78	61,95	0,019	38,71	39,67	0,0248
61,57	61,4	-0,0028	52,86	54,67	0,0342
61,35	61,9	0,0090	52,06	53,97	0,0367
61,45	61,9	0,0073	42,76	43,04	0,0065
61,86	61,41	-0,0073	43,05	43,04	-0,0002
89,6	88,98	-0,0069	44,59	45,28	0,0154
88,67	89,26	0,0067	45,59	45,98	0,0086
89,31	89,81	0,0056	45,42	45,84	0,009
89,4	89,81	0,0046	43,12	43,74	0,0144
89,22	88,98	-0,0027	43,32	44,02	0,0162
89,02	88,71	-0,0035	44,27	44,86	0,0133
88,8	88,71	-0,0010			
Moyenne de $\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$ [-] : 0,0091 Ecart-type de $\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$ [-] : 0,012					

**TABLE 4.1.** Les résultats des mesures de vitesse du projectile à l'aide d'une base de mesure optique et à l'aide d'une caméra haute vitesse.

## 4.5 Les mesures de balistique terminale

Cette section est probablement l'une des plus délicate, puisqu'elle a pour but de déterminer la méthodologie et les techniques de mesures employées pour l'évaluation d'un impact non-létal par la suite. L'objectif à ce stade n'est pas de maîtriser la mesure dans son intégralité mais plutôt de réaliser une étude de faisabilité dont le but est de mettre en évidence des avantages et des inconvénients, permettant ultérieurement de comparer différentes solutions afin de conserver la meilleure d'entre elles. Les moyens métrologiques de l'impact non-pénétrant seront d'abord expliqués, avant d'aborder la métrologie dédiée à l'étude de la pénétration de la peau. De cette manière, les faits exposés respectent la réalité chronologique d'une part, et permettent d'utiliser les résultats de l'étude de l'impact non-pénétrant pour l'étude de la pénétration d'autre part.

Il est à noter qu'une prise de mesure n'est pas liée uniquement à un capteur spécifique mais bien à toute une chaîne de mesure, où chaque élément influence le résultat [67]<sup>9</sup>. Une chaîne de mesure typiquement employée dans cette étude est présentée sur la figure 4.13.



**FIGURE 4.13.** Une chaîne de mesure typique employée pour ce doctorat.

Dans l'étude qui suit, l'ensemble de la chaîne sera systématiquement étudié, et non le capteur isolé. Dans tous les cas, l'éventuelle unité de traitement du signal sera celle préconisée dans les spécifications du capteur. Le dispositif d'acquisition de données (DAQ) sera systématiquement une unité PXI NI BNC-2110, muni d'une carte d'acquisition PCI-6110<sup>10</sup> (voir annexe H).

9. [http://iutlpa.u-strasbg.fr/montaned/capt\\_acqui\\_e.pdf](http://iutlpa.u-strasbg.fr/montaned/capt_acqui_e.pdf), consulté en février 2013.

10. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1865> et <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/11> consulté en janvier 2013).

### 4.5.1 La méthodologie employée pour l'étude de l'impact non-pénétrant

La métrologie de l'impact non-pénétrant doit permettre de mesurer le critère lésionnel  $(VC)_{max}$  sur un "surrogate". A ce stade, deux approches sont envisagées.

#### 4.5.1.1 Les deux approches "surrogate"

Pour ces deux approches l'intégralité des mesures et conclusions emploient des moyens métrologiques. La cible doit alors être un "surrogate" et doit permettre la mesure du critère lors de l'impact. La biofidélité est garantie en s'assurant que les courbes force en fonction du temps et déplacement du point d'impact de la cible en fonction du temps soient bien dans les corridors définis dans la section 3.2.3. La métrologie devra donc permettre de mesurer une force à l'impact et un déplacement. Le critère  $(VC)_{max}$  étant dérivé du déplacement du point d'impact de la cible au cours du temps, son calcul n'engendre pas de contraintes métrologiques supplémentaires.

Deux technologies sont envisagées pour la mesure de force :

- soit la métrologie emploie un capteur Flexiforce (approche Flexiforce). Il s'agit d'un capteur très fin et très flexible, et donc très peu invasif, permettant de mesurer une force (figure 4.14). Cette méthode et ses premiers résultats sont présentés dans l'annexe F.
- Soit la technique de mesure de WSU, qui emploie un projectile instrumenté d'un accéléromètre, [14, 68] est étudiée, répliquée, et améliorée (approche accéléromètre). Le projectile, équipé de l'accéléromètre est présenté sur la figure 4.15. L'implémentation de cette méthode et ses premiers résultats sont présentés dans l'annexe G.

Dans les deux cas, la mesure de déplacement de la cible pendant l'impact est étudié à l'aide d'une caméra haute-vitesse.

#### 4.5 Les mesures de balistique terminale



FIGURE 4.14. Le capteur Flexiforce.

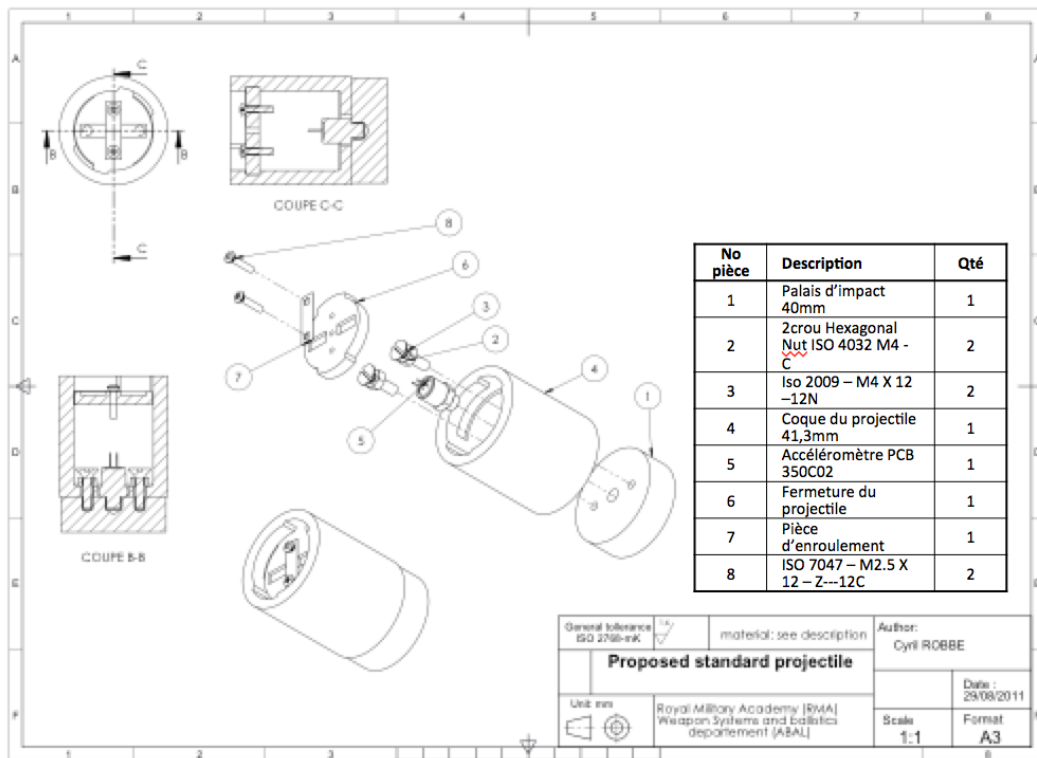


FIGURE 4.15. Le plan d'assemblage de la version finale du projectile instrumenté.

#### 4.5.1.2 L'approche hybride : expérimentale et numérique

Cette approche, qui sera appelée "*méthode hybride*", emploie des moyens métrologiques expérimentaux et des moyens numériques. Cette approche permet d'obtenir une grande quantité d'information sur les phénomènes étudiés. Elle nécessite cependant d'être alimentée par une grande quantité de mesures. Dans le cas présent, un thorax numérique doit être développé. Les géométries complexes du corps humain doivent être relevées, et les propriétés des matériaux biologiques doivent être déterminées. La première étape peut être faite en partenariat avec une équipe médicale. En particulier, les technologies d'imagerie médicale modernes apportent des mesures et des informations très précieuses. La détermination des propriétés des matériaux (module de Young, coefficient de Poisson, ...) est également complexe, et fait l'objet d'études dédiées [69–72].

Enfin, des lois constitutives, propres aux types de sollicitations envisagées, doivent être choisies, et sont paramétrées par des caractéristiques des matériaux en présence. Les lois constitutives font le lien entre la sollicitation et la réponse qu'elle induit (contraintes, déformations, ...). Une fois toutes ces difficultés franchies, le modèle thoracique développé sera validé sur des données de tirs sur PMHS, disponibles dans la littérature, et présentées dans la section 3.2.3 [14]. La réponse du modèle numérique doit être aussi identique que possible à celles observées lors des essais sur cadavre, ce qui fait du modèle numérique un "*surrogate*" virtuel. D'autre part, le projectile doit également être modélisé, grâce au même procédé. Le modèle peut être validé à l'aide d'essais faits en interne, qui emploient des moyens métrologiques dédiés.

Une fois ces deux modèles développés, on peut alors simuler l'impact numériquement et calculer les grandeurs physiques voulues, à savoir ici le critère  $(VC)_{max}$ . L'hypothèse sous-jacente est que les deux modèles validés indépendamment peuvent donner des résultats corrects lors de la simulation d'un impact du dit projectile sur le thorax numérique. Le critère n'est donc plus mesuré directement mais calculé.

Pour résumé, cette approche nécessite une méthodologie divisée en cinq étapes (figure 4.16) :

1. la première étape consiste en l'exploitation de tirs expérimentaux de projectiles rigides instrumentés d'un accéléromètre sur PMHS. Les résultats consistent en des mesures de force et de déplacement point d'impact de la cible au cours du temps. Il s'agit de l'étape réalisée à Wayne State University (WSU) par C. Bir [14] (voir section 3.2.3 et annexe D).

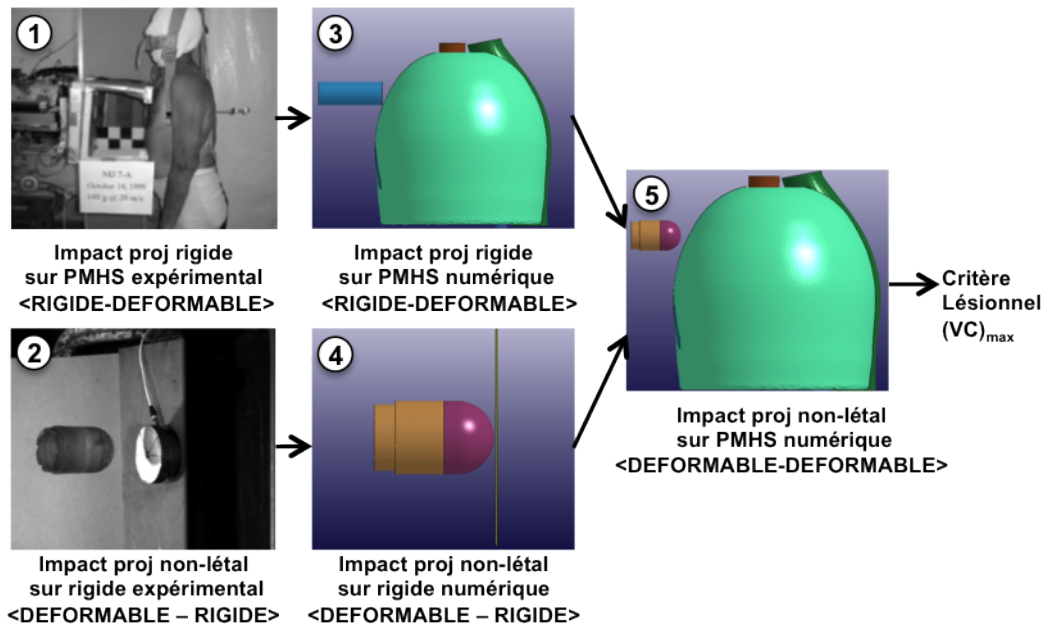


FIGURE 4.16. La méthodologie de travail liée à l'emploi du capteur piézoélectrique.

2. La deuxième étape consiste en des tirs expérimentaux de projectiles non-létaux divers sur un mur supposé infiniment rigide équipé d'un capteur de force. Les résultats sont des mesures de force et de déplacement du projectile au cours du temps. Il s'agit de la métrologie nécessaire dans cette démarche hybride.
3. La troisième étape consiste en l'exploitation d'un modèle numérique du thorax. Celui-ci est validé à l'aide des données fournies par l'étape 1.
4. La quatrième étape consiste en l'élaboration de modèles numériques de projectiles non-létaux. Ceux-ci sont validés à l'aide des données fournies par l'étape 2.
5. La cinquième étape consiste en la simulation numérique de l'impact d'un projectile non-létal sur thorax. Les modèles numériques employés sont ceux développés à l'étape 2 et 4. A l'issue de cette étape, on est en mesure de calculer numériquement des critères lésionnels. En l'occurrence, il s'agit ici de calculer le critère  $(VC)_{max}$ , même si tout autre choix est possible.

L'avantage de ce procédé est sa grande souplesse. En effet, une fois les modèles développés et validés, les résultats sont bien plus large que la valeur d'un critère lésionnel, puisque l'ensemble de la dynamique du phénomène peut être obtenue. Il est également aisé de faire des études paramétriques ou de sensibilité sur les géométries des projectiles, sur l'emplacement de l'impact, sur les critères lésionnels,

ou sur d'autres facteurs dont l'utilisateur souhaiterait étudier l'influence. La quantité de travail et d'informations nécessaires sont donc importantes, mais en contre partie, les résultats sont très riches.

Les étapes numériques font l'objet d'un doctorat de l'ERM, écrit par monsieur Nsiampa. Les résultats partiels sont déjà présentés dans diverses publications [73–76].

La métrologie liée à cette approche consiste en l'utilisation d'un capteur de force piezoélectrique<sup>11</sup> encastré dans un bloc qu'on supposera infiniment rigide, et d'une caméra haute-vitesse. Le projectile est tiré à différentes vitesses sur l'ensemble bloc rigide, capteur rigide (qui sera appelé "*mur rigide*" dans cette thèse) et des mesures de force et de déplacement du projectile pendant l'impact sont réalisées. La mesure de force à l'impact est mesurée à l'aide du capteur, et celle du déplacement du projectile à l'aide de la caméra. Ces deux mesures constituent l'étape 2 mentionnée sur la figure 4.16, dont les résultats sont employés pour réaliser la modélisation numérique du projectile non-létal (étape 4). La mesure de force par le capteur piézoélectrique et la mesure des déplacement du projectile pendant l'impact constitueront donc les deux types de mesures expérimentales à réaliser pour cette approche hybride.

Une première étude de faisabilité de la mesure de force à l'aide de la méthode "*mur rigide*" est implémentée dès ce stade. L'objectif est de s'assurer que les mesures étaient bien répétables et reproductibles.

Le capteur employé est un capteur PCB 200C20. dont les caractéristiques sont présentées dans l'annexe H. Ce capteur est vissé dans une cible rigide présentée sur la figure 4.17. L'avantage de travailler avec ce type de capteur est que le fabricant fournit avec le capteur un facteur de calibration sensé être adapté pour le type d'application envisagée.

Des tests de répétabilité sont présentés sur la figure. 4.18. On y retrouve des mesures de force en fonction du temps observées lors de tirs de projectiles FN303 à différentes vitesses<sup>12</sup>. On constate que dans des conditions identiques, à savoir pour des vitesses d'impacts quasiment identiques, les courbes sont également quasiment identiques. On présente l'ensemble des résultats de la séance de tir sur la figure 4.19, en terme de  $F_{max}$  (défini comme le maximum du signal force, en [N]) en fonction de la vitesse de tir. A nouveau les essais semblent très cohérents.

---

11. *La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique* - Wikipedia.org, consulté en janvier 2013.

12. le phénomène "*escalier*". des courbes est dû à un système d'acquisition de mesures de faible résolution comparé à ce qu'on peut voir sur les autres courbes présentées dans ce travail.

#### 4.5 Les mesures de balistique terminale

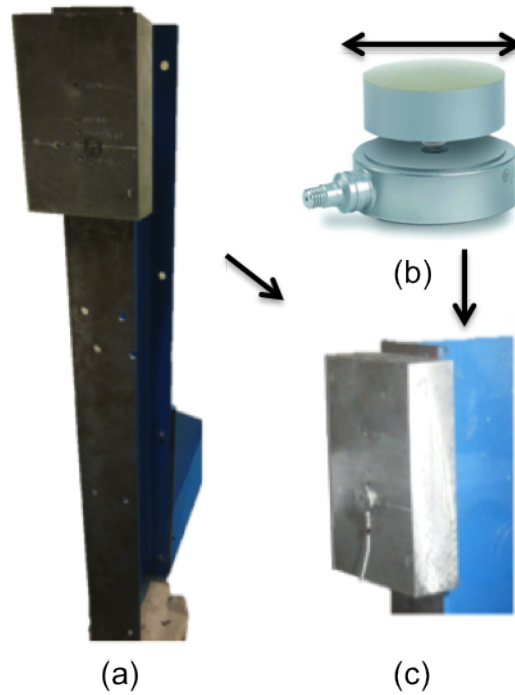


FIGURE 4.17. (a) la cible rigide dans laquelle le capteur est vissé, (b) Le capteur PCB employé, (c) l'assemblage des deux.

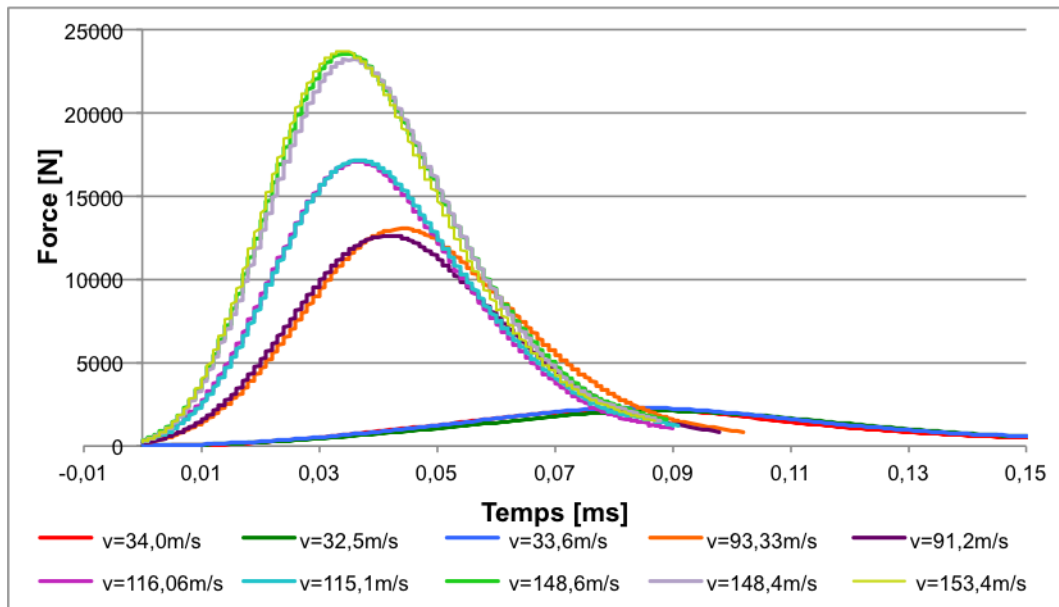
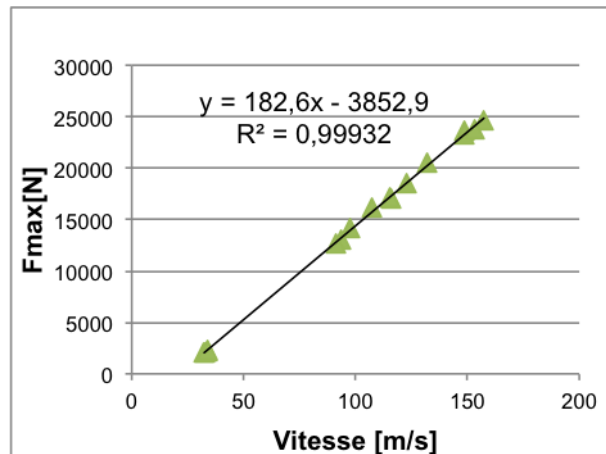


FIGURE 4.18. Les mesures de force en fonction du temps pour un impact d'un projectile FN303 sur mur rigide, à différentes vitesses.





**FIGURE 4.19.** Les mesures de force maximum en fonction de la vitesse d'impact pour un impact d'un projectile FN303 sur mur rigide.

#### 4.5.1.3 Comparaison des deux approches "surrogate" et de l'approche hybride

Beaucoup de mise au point et de résultats ont été nécessaires pour décider quelle serait la méthode la plus adéquate à mettre en oeuvre pour étudier le potentiel lésionnel thoracique d'un projectile non-létal. Les critères de choix de la méthode envisagée sont les suivants :

- la solution doit être facile à mettre en oeuvre.
- La solution doit donner des résultats précis, répétables, et reproductibles.
- La solution doit être adaptable à l'ensembles des projectiles non-létaux disponibles sur le marché, ainsi que les Projectiles en Matériaux Innovants (PMI).
- La méthode doit permettre de mesurer ou calculer le critère  $(VC)_{max}$  et idéalement d'autres mesures permettant d'étudier d'autres critères lésionnels qui seraient étudiés à l'avenir.

Les trois méthodes, présentées respectivement dans l'annexe F, G, et dans la section 4.5.1.2 sont implémentées et comparées selon ces critères. Au terme de l'étude de faisabilité de ces trois méthodes, les conclusions sont les suivantes :

- la mesure de force à l'aide d'un capteur Flexiforce permet de travailler avec un "surrogate", et présente l'avantage de permettre la mesure de force pour des impacts de projectiles déformables sur surfaces déformables. Néanmoins,

les désavantages sont nombreux. Tout d'abord, une calibration individuelle est nécessaire. Ensuite, la dispersion des mesures est relativement élevée. Un autre problème est la nécessité de travailler avec une surface d'impact constante et déterminée, de manière à employer le bon facteur de calibration. Pour cela, une pièce additionnelle peut être fixée sur le capteur, mais risque alors d'être invasive et donc de modifier le phénomène à mesurer. Ce dernier point réduit considérablement l'intérêt de travailler avec un capteur aussi peu invasif et flexible tel que le Flexiforce. Toutes ces considérations rendent la mesure peu fiable, il est donc décidé à ce stade d'exclure cette solution.

- La mesure de force à l'aide d'un accéléromètre est également employée avec un "*surrogate*". Elle impose le projectile, puisque celui-ci doit être le plus rigide possible, et équipé de l'accéléromètre. Des premiers essais ont permis la validation de la faisabilité de la mesure même si une certaine dispersion est observée. Une optimisation du procédé peut certainement être envisagée. L'inconvénient principal est cette restriction du projectile, qui par sa rigidité se distingue particulièrement d'un projectile non-létal actuel. Même si cette solution ne présente pas de réelle innovation, puisqu'elle est déjà appliquée dans les études de WSU [14, 68], il reste tout de même intéressant de maîtriser cette technique, puisqu'elle permet d'obtenir les corridors donnant les références pour estimer la biofidélité d'un "*surrogate*".
- Enfin, la méthode hybride est basée sur un tout autre principe. Contrairement aux deux autres mesures, la cible est ici imposée. Le projectile employé par contre est tout à fait libre. La méthode de travail, décrite sur la figure 4.16 est complexe et longue à mettre en oeuvre. Cela dit, les premiers résultats métrologiques sont très encourageants, et poussent à poursuivre l'étude dans cette direction.

A la fin de cette campagne d'essais métrologiques, il a été décidé de travailler exclusivement à l'aide de l'approche hybride expérimentale et numérique. La métrologie employée pour la mesure de force est donc la solution du "*mur rigide*" avec emploi d'un capteur piezoélectrique.

Comme mentionné dans la section 4.5.1.2, cette méthode nécessite non seulement une mesure de force à l'impact, mais également des mesures de déplacement du projectile. Cet aspect fait l'objet de la section suivante.

#### 4.5.1.4 La mesure du déplacement du point d'impact

Comme le choix de la mesure de force s'est porté sur la solution du capteur piezoélectrique, le but est de mesurer l'enfoncement du projectile pendant l'impact, caractérisé par son déplacement selon son axe pendant l'impact, la cible rigide restant immobile. Contrairement à l'étude de la mesure de force, le choix est ici extrêmement orienté : il est a priori de partir directement sur l'emploi de caméras haute-vitesse. Plusieurs raisons motivent ce choix :

- tout d'abord, la caméra haute-vitesse, en plus de la mesure du point d'impact au cours du temps, donne une grande quantité d'informations. Comme déjà mentionné, elle permet de procéder à la mesure de vitesse avant l'impact. Par ailleurs, elle donne énormément d'informations sur la dynamique de l'impact, qui seront utiles par la suite.
- De plus, quatre caméras haute-vitesse sont disponibles au département ABAL, deux caméras Photron Ultima APX et deux caméras photon SA5, dont les caractéristiques sont reprises en annexe H. Leur utilisation n'engendre donc pas de surcoût.
- Enfin, le département ABAL dispose d'une expérience considérable dans l'utilisation de ces caméras. Cette expérience peut donc être exploitée dans la présente étude.

Comme la solution technologique est à présent choisie, il reste à valider ce choix. Pour ce faire, des tirs de projectiles Spartan LE 40 mm de Nobel Sport sont effectués, et l'enfoncement du projectile est mesuré et traité à l'aide du logiciel Photron Motion Tool<sup>13</sup>. Celui-ci permet de faire de la poursuite de points spécifiques d'une vidéo. On voit sur la figure 4.20 quelques exemples de résultats. Le point poursuivi est le point se trouvant au milieu des bandes blanches sur le projectile, sur l'axe de tir, suivi à l'aide d'une reconnaissance de forme, implémentée dans le programme Photron Motion Tool. Les résultats obtenus consistent en des courbes de déplacement horizontal de ce point en fonction du temps. On en déduit les courbes de vitesses de ce point en fonction du temps. Les résultats semblent relativement satisfaisants et permettent de valider le principe. On note toutefois deux inconvénients. Tout d'abord, il existe un certain bruit autour du signal. Si cela ne saute pas forcément aux yeux sur la figure 4.20, on peut s'en rendre compte davantage sur la figure 4.21, représentant la vitesse de l'enfoncement du projectile en fonction du temps. Le deuxième inconvénient est que l'on ne maîtrise ni l'incertitude de mesure liée au

---

13. [http://www.photron.com/index.php?cmd=product\\_general&product\\_id=17](http://www.photron.com/index.php?cmd=product_general&product_id=17).

#### 4.5 Les mesures de balistique terminale

programme, ni les algorithmes, et que l'on ne dispose que de peu d'options quant aux points à poursuivre. Pour ces raisons, il est décidé de développer un programme de poursuite vidéo dédié à l'application des impacts non-létaux.

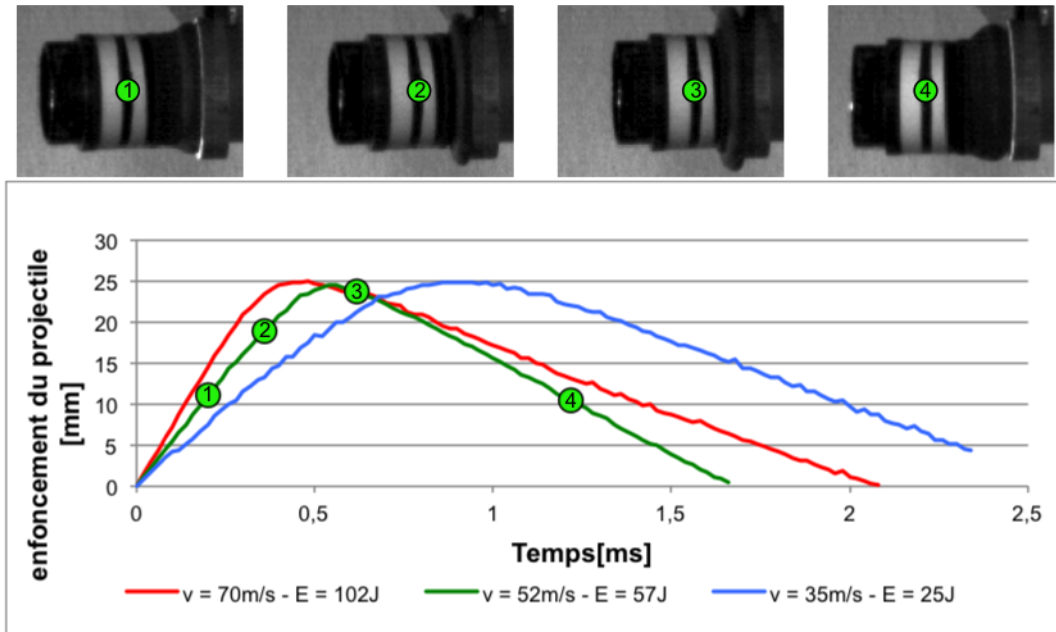


FIGURE 4.20. Courbes de l'enfoncement de la tête déformable d'un projectile Nobel Sport Spartan LE 40 mm en fonction du temps, pour différentes vitesses d'impact.

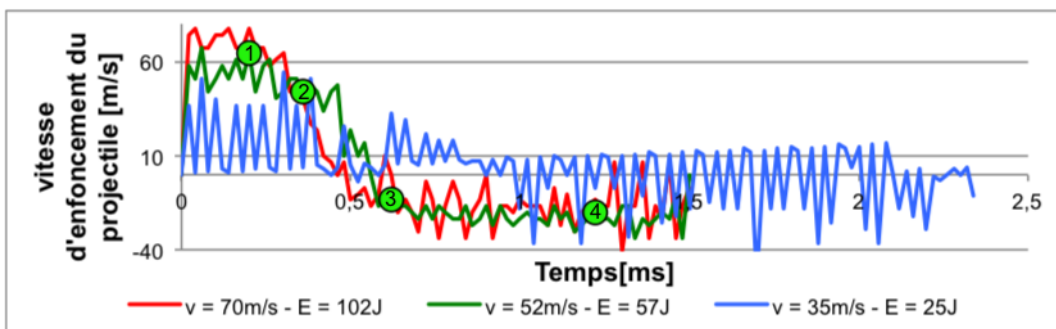


FIGURE 4.21. Courbes de la vitesse de l'enfoncement de la tête déformable d'un projectile Nobel Sport Spartan LE 40 mm en fonction du temps, pour différentes vitesses d'impact.

## 4.5.2 La métrologie de l'étude de la pénétration de la peau

Cette section sera beaucoup plus succincte que la métrologie dédiée à l'impact non-pénétrant. En effet, d'une part les contraintes métrologiques sont nettement moins nombreuses dans le cas présent, et d'autre part, certains éléments ont déjà été développés lors des discussions relatives à l'impact non-pénétrant. Comme précisé dans la section 3.3, deux études expérimentales doivent être réalisées : l'approche "*surrogate*" de WSU et l'approche "*Force Wall*".

### 4.5.2.1 La méthode "*WSU*"

Cette section est extrêmement succincte, puisqu'il n'y a en fait pas de métrologie de balistique terminale pour ce test, hormis l'examen attentif de la cible après l'impact permettant d'identifier le tir comme ayant entraîné une pénétration ou une non-pénétration, selon le critère détaillé dans la section 3.3. Les méthodes d'exploitation statistiques permettant l'exploitation des résultats expérimentaux seront développées ultérieurement. La seule métrologie employée pour cette méthode est identique à celle employée pour l'étude de l'impact non-pénétrant.

### 4.5.2.2 La méthode "*Force Wall*"

La métrologie relative à cette méthode est nettement plus compliquée que celle de la méthode "*WSU*". Néanmoins, l'essentiel a déjà été développé dans la section 4.5.1, dans le cadre de l'impact non-pénétrant. Par chance, la métrologie est en effet assez similaire<sup>14</sup>.

Il s'agit ici de procéder à la mesure d'une force sur mur rigide et à la mesure d'une surface d'impact sur ce mur. La première mesure est en tout point identique à celle développée dans la section 4.5.1.2. La deuxième mesure est assez proche de celle expliquée dans la section 4.5.1.4, hormis le fait qu'il faudra poursuivre un diamètre, caractérisant une surface d'impact, au lieu d'un seul point. Ce diamètre peut être caractérisé par ses deux points extrêmes, observables sur l'image générée par la caméra haute vitesse. Vu la particularité des points à poursuivre, un logiciel de poursuite non dédié à cette application risque d'avoir des difficultés à donner un résultat correct. Il est donc d'autant plus intéressant de développer un logiciel dédié.

---

14. Il est à noter que la détermination des moyens métrologiques employés pour l'étude de l'impact non-pénétrant a été effectuée indépendamment de la méthode "*Force Wall*", qui n'est d'ailleurs parvenue jusqu'au département ABAL que plus tard, via la participation de la Belgique dans les groupes OTAN.

## 4.6 Conclusion

Après tout ces développements, il est temps de conclure ce chapitre sur la mise au point expérimentale. Celle-ci doit permettre l'évaluation de l'impact thoracique non-pénétrant, ainsi que l'étude de la pénétration de la peau d'un projectile non-létal. L'essentiel des résultats est présenté ci-dessous :

- le premier accomplissement était de concevoir une ligne de tir dédiée à l'impact non-létal. Cette étape, simple, mais lourde de conséquences, a permis la réalisation de plus de deux mille tirs, en à peu près deux ans.
- Le deuxième accomplissement était de concevoir et réaliser un lanceur dédié au tir de projectiles non-létaux. Celui-ci apporte énormément de satisfaction, puisqu'il a déjà permis de tirer la majorité des projectiles non-létaux disponibles (une mise au point dédiée peut facilement être réalisée pour tirer un nouveau projectile qui sortirait du lot). En outre, il a permis le tir de projectiles en développement (le PMI) grâce à la mise au point d'un séparateur et d'un sabot dédiés à cette tâche. Pour tous ces projectiles, les vitesses semblent très bien maîtrisées, ainsi que l'attitude du projectile avant l'impact. Enfin, ce lanceur permet le tir de projectiles instrumentés. A la connaissance de l'auteur, tous ces points font de ce lanceur certainement l'un des plus performants dans son domaine.
- Le troisième accomplissement était de mettre au point une méthode permettant de réaliser une mesure de vitesse précise. Les contraintes spatiales font que le choix s'est porté vers une mesure à l'aide d'une caméra haute-vitesse, faisant de cet instrument un incontournable de la métrologie de cette étude.
- Enfin, le dernier accomplissement est la mise au point de la métrologie de la balistique terminale. De nombreuses questions se sont posées, de nombreuses solutions ont été testées, et de nombreux cheveux ont été arrachés. Qu'à cela ne tienne, les résultats sont là. Le choix s'est porté vers une approche qui consiste à tirer des projectiles non-létaux sur un mur rigide équipé d'un capteur de force piezoélectrique. La mesure de force ainsi effectuée, en parallèle avec l'emploi de caméras haute-vitesse capturant la dynamique de l'impact, va permettre non seulement l'évaluation de l'impact thoracique non-pénétrant, grâce à l'intervention de méthodes numériques additionnelles, mais également d'évaluer le potentiel de la méthode "*Force Wall*" proposée pour l'évaluation de la pénétration de la peau d'un projectile non-létal. Ce doctorat ayant pour objectif une mise au point expérimentale, la modélisation numérique sera réalisée en parallèle par un tiers en la personne de Nestor NSIAMPA, chercheur

à l'ERM au département ABAL. Cette étude numérique fait également l'objet d'un doctorat en cours de réalisation. Quelques résultats essentiels seront présentés par la suite. L'étude de la pénétration de la peau sera également étudiée à l'aide de la méthode "*WSU*", et n'engendre pas de mise au point métrologique supplémentaire.

C'est maintenant que tout se termine, ou plutôt que tout commence ! Les choix métrologiques étant à présent effectués, toute une mise au point reste à faire. Tout d'abord, la mise au point du logiciel de poursuite vidéo doit être réalisée. Par ailleurs, une mesure n'étant rien sans un estimateur de l'erreur commise, un énorme travail de validation, de calibration, et de quantification reste à faire avant de présenter les résultats définitifs. Ces deux points font l'objet des deux chapitres suivants.

# Chapitre 5

## Logiciels d'exploitation des mesures

### 5.1 Introduction

Plusieurs logiciels sont nécessaires pour exploiter l'ensemble des données fournies par les mesures expérimentales. Trois logiciels principaux ont été développés pour l'occasion. Voici en quelques mots les principaux objectifs de ces trois logiciels :

1. un premier logiciel traite les résultats issus des capteurs de force. Il est employé en parallèle avec le logiciel d'acquisition de données.
2. Un deuxième logiciel réalise la poursuite vidéo. Une variante de ce logiciel permet également le calcul de la vitesse avant impact à l'aide des images issues de la caméra haute-vitesse.
3. Enfin, un dernier logiciel effectue des calculs de dispersion. Contrairement à l'ensemble des exploitations de mesures de cette thèse, qui sont basées sur des mesures effectuées en tirant le projectile à l'aide du lanceur pneumatique, ce logiciel emploiera comme données de base des tirs réalisés à l'aide de systèmes d'armes commercialement disponibles.

Ces logiciels ont été développés grâce à l'environnement de conception de systèmes LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), basé sur un langage de programmation graphique appelé langage G<sup>1</sup>. Seul le logiciel permettant la poursuite vidéo sera détaillé dans ce chapitre, vu son caractère essentiel pour la suite de l'étude. Cependant, le lecteur intéressé trouvera des informations sur les

---

1. <http://www.ni.com/labview/f/>, et [http://fr.wikipedia.org/wiki/LabVIEW#Le\\_langage\\_G](http://fr.wikipedia.org/wiki/LabVIEW#Le_langage_G).



autres logiciels dans l'annexe I. Le but n'est pas de décrire toutes les fonctions de ces logiciels, mais de préciser les algorithmes employés pour en réaliser les fonctions essentielles.

Avant de poursuivre, quelques concepts liés à la caméra haute vitesse seront d'abord développés. Il s'agit de définir quelques termes et principes qui permettront ensuite de mieux expliquer les choix ayant amené à la version finale du logiciel de poursuite. Enfin, le chapitre se terminera par quelques exemples d'applications à l'étude de l'impact non-létal.

## 5.2 Quelques concepts d'une caméra haute-vitesse

Avant d'expliquer le fonctionnement du logiciel de poursuite, il est nécessaire de rappeler quelques concepts de fonctionnement d'une caméra haute-vitesse. Tout d'abord, il est à noter que les caméras employées (Photron SA-5 et Ultima APX, voir annexe H) sont monochromes. Chaque pixel est ainsi défini par son intensité lumineuse, comprise entre 0 et 255.

Définissons maintenant la fréquence temporelle de la caméra ("*frame rate*"), la résolution géométrique, la profondeur de champ, l'angle d'ouverture et le temps d'exposition ("*shutter time*").

"*La fréquence temporelle*" est le nombre d'image prise par la caméra pour chaque seconde de film.

« *La résolution géométrique d'une image composée de points est définie par la densité des pixels par unité de surface* »<sup>2</sup>. Les caméras employées (photon SA-5, Annexe H) nécessitent un compromis entre la fréquence temporelle et la résolution géométrique. De manière générale, plus la fréquence temporelle est importante, plus la résolution géométrique est faible.

« *La profondeur de champ est la zone de l'espace dans laquelle doit se trouver le sujet à photographier pour que l'on puisse en obtenir une image considérée comme nette* »<sup>3</sup>. Elle dépend de *l'ouverture du diaphragme de la caméra*, qui est un ensemble de pièces mécaniques, consistant en une ouverture circulaire, dont le diamètre est ajustable, et permettant de régler la luminosité de l'image. Plus le diaphragme réglera une ouverture d'un diamètre important, plus il admettra une grande

---

2. <http://tecfa.unige.ch/staf/staf-k/benetos/staf13/per1/tache5/resolution.html>, consulté en janvier 2013.

3. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Profondeur\\_de\\_champ](http://fr.wikipedia.org/wiki/Profondeur_de_champ), consulté en janvier 2013.

## 5.2 Quelques concepts d'une caméra haute-vitesse

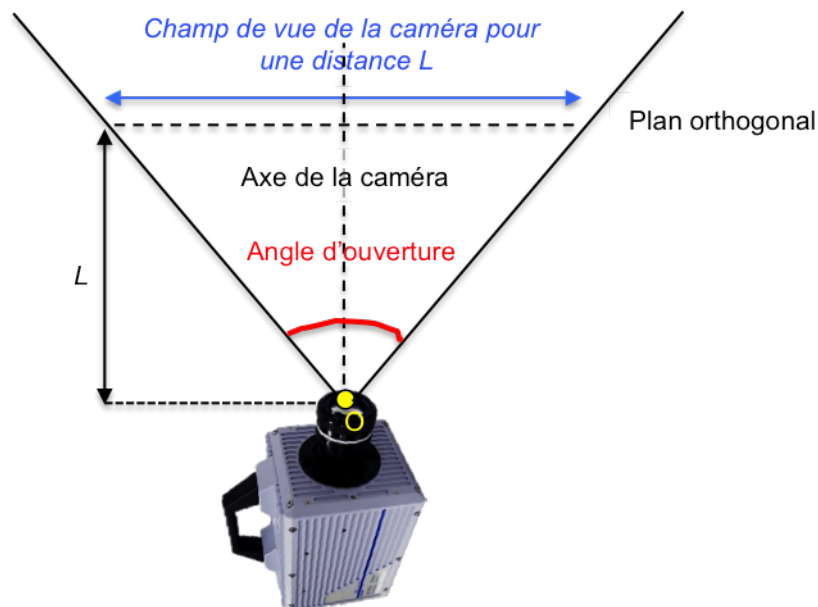
---

luminosité, et plus la profondeur de champ sera faible. On illustre cette profondeur de champ sur la figure 5.1.

"L'angle d'ouverture de la caméra" décrit l'amplitude angulaire de l'image photographiée par la caméra<sup>4</sup>(figure 5.2). Plus cet angle est important, plus l'étendue visualisée sur l'image est importante. Cependant, un angle important amène également un effet de perspective accru, amenant des distorsions radiales plus importantes. Ces concepts seront réabordés dans le chapitre suivant.



**FIGURE 5.1.** Une exemple de profondeur de champ réduite. On y voit bien la zone nette et la zone floue.



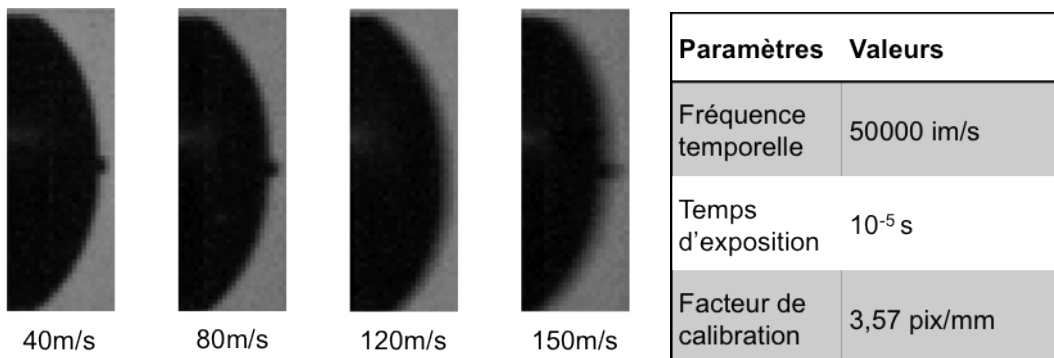
**FIGURE 5.2.** Représentation schématique de l'angle d'ouverture d'une caméra.

---

4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Angle\\_of\\_view](http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_view), consulté en avril 2013.

"Le temps d'exposition" est le temps durant lequel le capteur de la caméra est exposé pour chaque image prise. La valeur maximum de ce temps d'exposition est donc le temps de prise d'une image, et donc l'inverse de la fréquence temporelle. Cela dit, le temps d'exposition est généralement plus court, surtout lorsque l'on souhaite filmer un phénomène en mouvement, ce qui est bien le cas ici.

Illustrons ceci par un exemple simple. Supposons que l'on souhaite filmer une bille avançant à une vitesse de 100 m/s. Supposons également que sur l'image, 1 pixel équivaut à 1 millimètre. La caméra est réglée avec une fréquence temporelle de 10 000 images par seconde. Le temps d'enregistrer une image, le projectile a donc parcouru 10 mm. Si le temps d'exposition est égal au temps d'une image, cela veut dire que le capteur sera exposé pendant toute la durée du parcours du projectile sur ces 10 mm. Autrement dit, le projectile apparaîtra à la fois à un emplacement précis, mais également 10mm plus loin sur sa trajectoire. Ce phénomène amène donc un flou sur l'image, sur la trajectoire du projectile, appelé flou directionnel ("*motion blur*"). Plus le projectile sera rapide, plus ce flou sera important. Ce phénomène est illustré sur la figure 5.3.



**FIGURE 5.3.** Exemple du phénomène de flou directionnel lors d'un tir d'un projectile RB1FS à différentes vitesses.

On peut quantifier la distance en pixels sur laquelle apparaît le flou directionnel à l'aide de la formule :

$$FD = \text{calib} \cdot v \cdot TE \quad (5.1)$$

où

- $FD$  est le flou directionnel en nombre de pixels [-].
- $\text{calib}$  est le facteur de calibration, c'est à dire la taille réelle que représente chaque pixel [1/m].

- $v$  est la vitesse du projectiles [m/s].
- $TE$  est le temps d'exposition [s].

Pour s'en prémunir, il convient donc de minimiser le temps d'exposition, qui est bien évidemment contraint par la caméra. Par ailleurs, une diminution du temps d'exposition engendre également une diminution de la luminosité de l'image. Une augmentation du temps d'exposition doit donc aller de pair avec une augmentation de lumière de manière à garder une image suffisamment lumineuse.

Là encore, plusieurs options sont possibles. Soit on augmente la lumière en éclairant la scène filmée à l'aide de spots éclairants, soit on augmente l'ouverture du diaphragme de l'objectif de la caméra. Le revers de la médaille de cette deuxième méthode est qu'elle diminue également la profondeur de champ. A nouveau, les choix du temps d'exposition et de l'ouverture du diaphragme résultent donc d'un compromis.

## 5.3 Le logiciel de poursuite

Le logiciel de poursuite utilise des vidéos générées par une caméra, haute-vitesse dans le cas présent, et ressort des courbes de déplacement d'un point particulier en fonction du temps et de vitesse de ce point en fonction du temps. Le phénomène poursuivi est dans ce cas-ci le mouvement d'un projectile pendant son vol ou durant l'impact. D'autres applications sont également possibles. La qualité du résultat est grandement influencée par la qualité de la vidéo. L'utilisateur doit s'assurer de bien déterminer les paramètres décrits plus haut pour obtenir une bonne image. En particulier, l'image doit être suffisamment lumineuse, et présenter le moins de flou directionnel possible. Par ailleurs, le projectile à poursuivre doit être en contraste élevé par rapport au reste de l'image. D'autres paramètres influencent l'incertitude liée aux résultats, cet aspect fait l'objet d'un chapitre dédié.

La structure du logiciel de poursuite est divisée en quatre parties, qui correspondent aux quatre étapes nécessaires pour obtenir le résultat. Il s'agit de "*la calibration de l'image*", du "*pre-processing*", du "*processing*", et du "*post-processing*". A chaque étape, l'utilisateur doit introduire un ensemble de paramètres qui devraient permettre une bonne poursuite d'un point particulier du projectile. Il est à noter que ce logiciel est employé pour des séries de vidéos se ressemblant très fort, puisqu'il s'agira de la répétition d'un tir, à même ou différentes vitesses, dans des conditions d'éclairage et de géométrie identiques. Les paramètres, une fois définis, restent donc identiques pour l'ensemble des vidéos à traiter correspondant à une série de tir. Pour

cette raison, et afin de préserver une trace des paramètres employés, chaque étape permet de charger ou sauvegarder l'ensemble des paramètres à définir.

Les sections qui suivent expliquent les quatre différentes parties du logiciel.

### 5.3.1 La calibration de l'image

L'interface de cette partie est présentée sur la figure 5.4. Le but de cette section est de donner au logiciel une information lui permettant de traduire des mesures sur la vidéo, réalisées en pixels, en mesures réelles. Pour ce faire, deux options sont possibles :

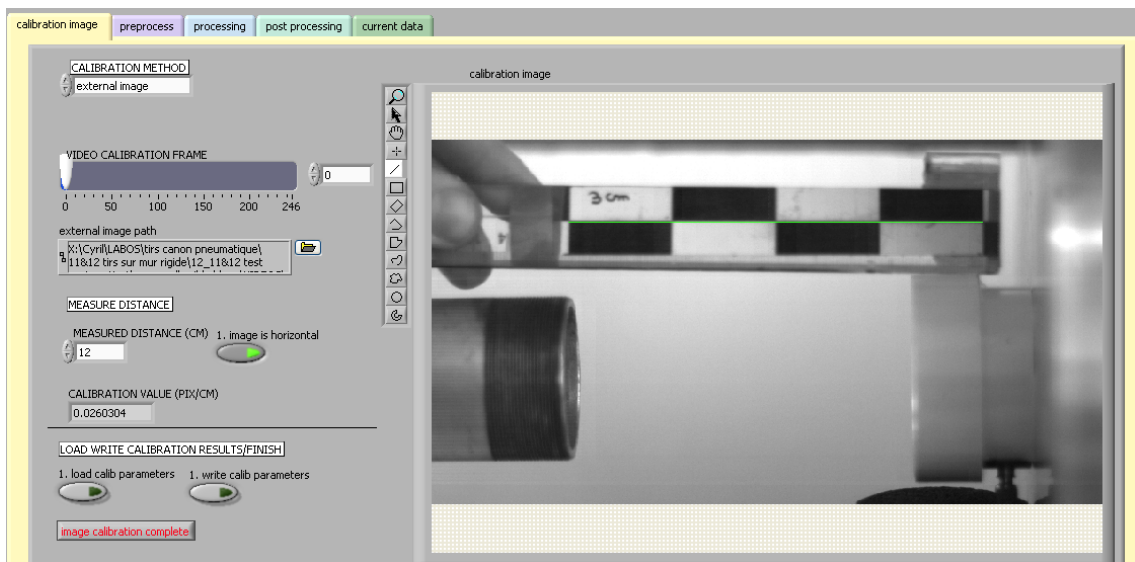


FIGURE 5.4. L'interface de l'étape "calibration de l'image".

- soit l'utilisateur mesure le rapport "*pixel/distance réelle*" à l'aide d'un référent présent sur une ou des images de la vidéo à traiter. un tel référent est un corps quelconque présent sur l'image et dont on connaît précisément la dimension. En raison de l'effet de perspective<sup>5</sup>, ce référent doit être placé dans le même plan normal à l'axe de la caméra que le phénomène à poursuivre. Si le référent est plus loin, il apparaîtra alors plus petit, en nombre de pixels sur l'image, et donc amènera à un rapport "*pixel/distance réelle*" trop faible, et inversement s'il est plus près. En conséquence, le projectile à poursuivre peut lui-même être le référent, à condition que l'on connaisse précisément une de ses dimensions, ce qui peut toutefois être délicat en pratique. Le phénomène de flou directionnel est également un facteur poussant à ne pas travailler de la sorte, puisqu'il a

tendance à agrandir les dimensions du projectile sur l'image. L'angle de yaw complique également la tâche.

- Soit l'utilisateur peut, avant ou après les tirs, placer un référent sur l'axe de tir, comme la mire présentée à la section 4.4, dont les dimensions sont connues très précisément, et prendre une photo de la situation à l'aide de la caméra. Plus le référent est grand, plus les mesures réalisées par la suite seront précises. Cette notion sera réabordée dans le chapitre suivant. Une fois cette calibration réalisée, la caméra ainsi que l'axe de tir devront rester exactement à leur même position. Si pour une quelconque raison, l'une de ces deux positions venait à changer, une nouvelle calibration serait alors rendue nécessaire.

#### 5.3.2 Le "*pre-processing*"

L'interface de cette partie est présentée sur la figure 5.5. Cette étape est certainement la plus complexe pour l'utilisateur, puisqu'il doit y définir un ensemble de paramètres qui permettent d'isoler le plus possible le projectile du décor environnant, en terme d'intensité lumineuse. Plus l'intensité lumineuse du projectile est différente de celle du décor, meilleurs seront les résultats. Pour ce faire, l'utilisateur peut dans un premier temps ajuster la luminosité et le contraste de l'image. Ensuite, il doit spécifier deux valeurs seuils d'intensité lumineuse, une inférieure, et une supérieure, déterminant ainsi un intervalle. On définit ainsi deux catégories d'intensité lumineuse : celles dont la valeur se trouve à l'intérieur de l'intervalle (catégorie 1), et celles dont la valeur se trouve à l'extérieur (catégorie 0). L'image sera alors traitée de manière à classer chacun des pixels de l'image dans l'une de ces deux catégories, l'objectif étant que le projectile à poursuivre se retrouve intégralement dans la catégorie 1, et le reste de l'image dans la catégorie 0, ce qui explique la nécessité de bien isoler le phénomène du décor. On obtient donc une image binaire, chaque point étant dans la catégorie 1 ou 0.

D'autres fonctions sont proposées pour améliorer le résultat. D'abord, l'utilisateur peut exclure certaines zones de l'image à l'aide d'outils de sélection liés à l'image "*original image*" (figure 5.5). Ensuite, un filtre gaussien [77, 78] peut être appliqué sur l'image pour la rendre plus lisse. Par ailleurs, on peut soustraire à chaque pixel une valeur d'intensité lumineuse égale à l'intensité du même pixel au temps  $t_0$  correspondant à la première image. Si cette image est définie de façon à ce que le phénomène à poursuivre ne soit pas encore présent sur l'image, cela permet de retirer l'arrière-plan de l'image sur l'ensemble de la vidéo. Cette opération donne de

---

4. « Technique de représentation des objets en trois dimensions sur une surface plane » <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/perspective/>, consulté en février 2013.

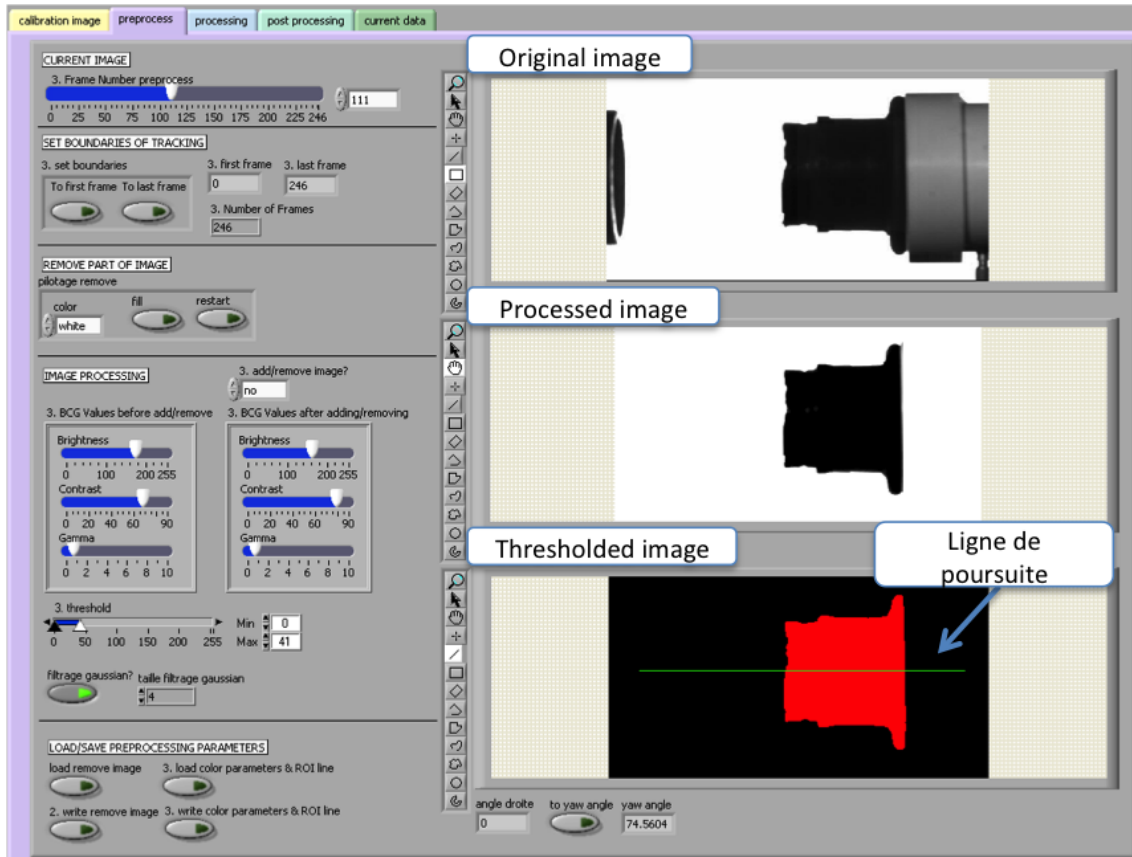
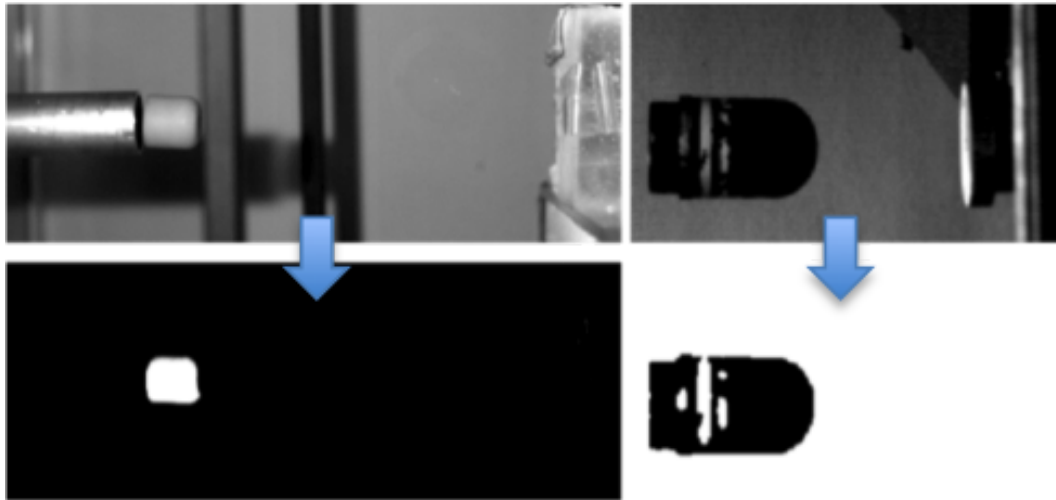


FIGURE 5.5. L'interface de l'étape "pre-processing".

très bons résultats lorsque le projectile à poursuivre est plus clair que le décor. Dans le cas contraire, on peut procéder à l'opération complémentaire, qui suit le même principe, excepté qu'on travaille alors sur les images inversées en terme d'intensité lumineuse, c'est à dire qu'on remplace l'intensité  $x$  de chaque pixel par sa valeur complémentaire  $255 - x$ . Un exemple de cette opération est présenté sur la figure 5.6. Enfin, une dernière opération est de définir sur l'image "thresholded image" (figure 5.5) une ligne sur laquelle la poursuite sera réalisée (ligne de poursuite), comme on le verra dans la section suivante.

### 5.3.3 Le "processing"

L'interface de cette partie est présentée sur la figure 5.7. Il s'agit de l'étape durant laquelle le logiciel effectue l'opération de poursuite. Les paramètres définis dans la section précédente sont appliqués à chaque image de la vidéo. Ensuite, le logiciel analyse chaque image binaire et y trouve des points spécifiques. Les points principaux qui sont recherchés sur l'image sont le point le plus haut, le plus bas, le



**FIGURE 5.6.** *L'opération de soustraction ou d'addition de l'image  $t_0$ . A gauche, on retire à chaque pixel sa valeur initiale ; à droite, on réalise l'opération complémentaire.*

plus à gauche, et le plus à droite se trouvant dans la catégorie 1. Si les paramètres de l'étape "*pre-processing*" ont bien été définis, ceux-ci devraient correspondre à des points intéressants à poursuivre. De plus, le logiciel peut également suivre ces points uniquement sur la ligne précédemment définie, ce qui est très utile pour capturer un phénomène uniquement horizontal, comme c'est le cas pour l'essentiel des mesures présentées dans cette thèse. Le logiciel peut également repérer la position du centre de gravité des points de catégorie 1, qui peut correspondre au centre de masse du projectile dans le plan orthogonal à l'axe de la caméra, si les catégories sont bien définies. Cette mesure sera également très intéressante par la suite. Enfin, le logiciel peut suivre un contour, comme le contour d'un projectile par exemple, ce qui n'est cependant pas nécessaire pour la présente étude. Un dernier paramètre permet de rééchantillonner la vidéo en terme du nombre d'images par seconde, de manière à ne prendre qu'un nombre réduit mais uniformément réparti d'images, ce qui diminue la résolution temporelle du résultat, mais diminue également le temps de calcul.



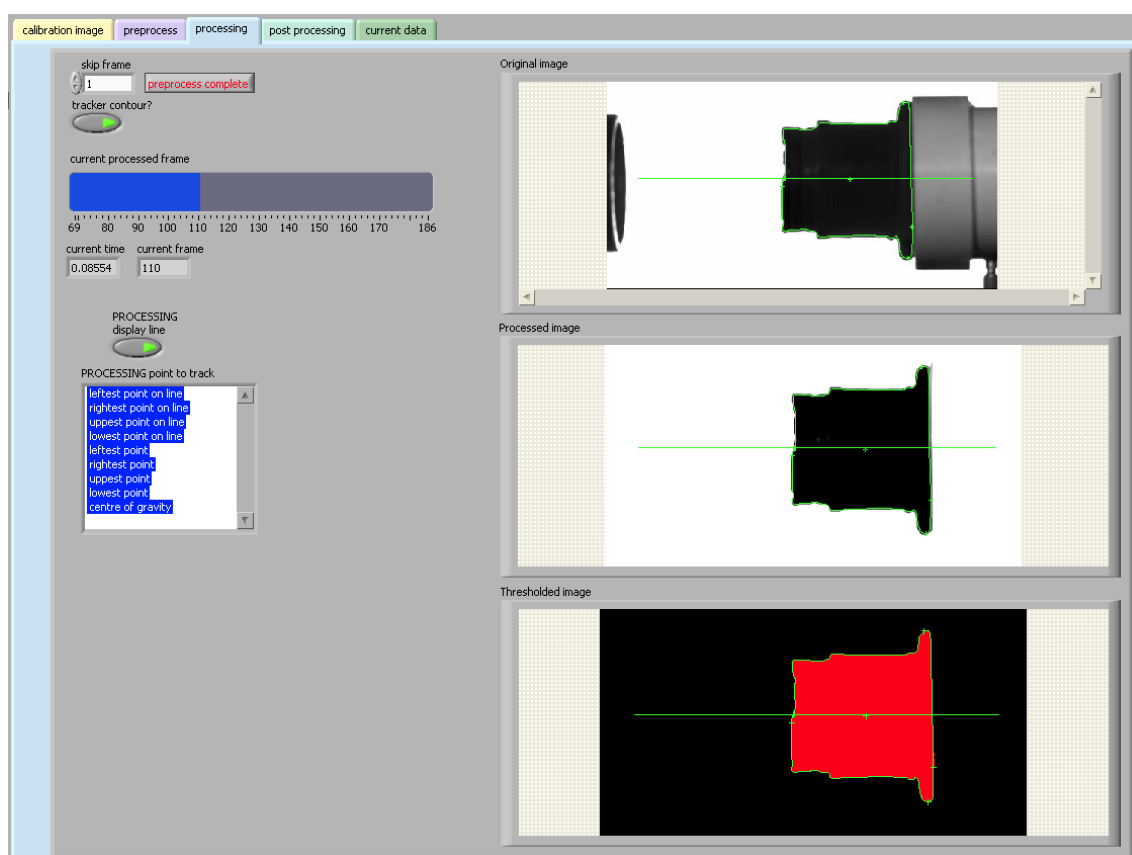


FIGURE 5.7. L'interface de l'étape "processing".

### 5.3.4 Le "post-processing"

L'interface de cette partie est présentée sur la figure 5.8. Lors de cette dernière étape, l'utilisateur peut définir quels points de poursuite seront traités et comment les traiter. Il peut également suivre l'évolution de la distance entre deux points au cours du temps. Le principal résultat est une courbe caractérisant le déplacement d'un point en fonction du temps, qui devrait correspondre au phénomène que l'utilisateur souhaite poursuivre. Le signal peut également être dérivé, de manière à obtenir la courbe vitesse de ce déplacement au cours du temps. En ajustant des paramètres de filtrage, l'utilisateur peut préciser comment cette dérivée est effectuée. En effet, suivant la fréquence temporelle d'image de la caméra, la dérivation peut engendrer un bruit catastrophique sur le signal dérivé, qui doit être traité. Ce cas particulier fait l'objet d'une explication complémentaire dans la section 5.3.5.

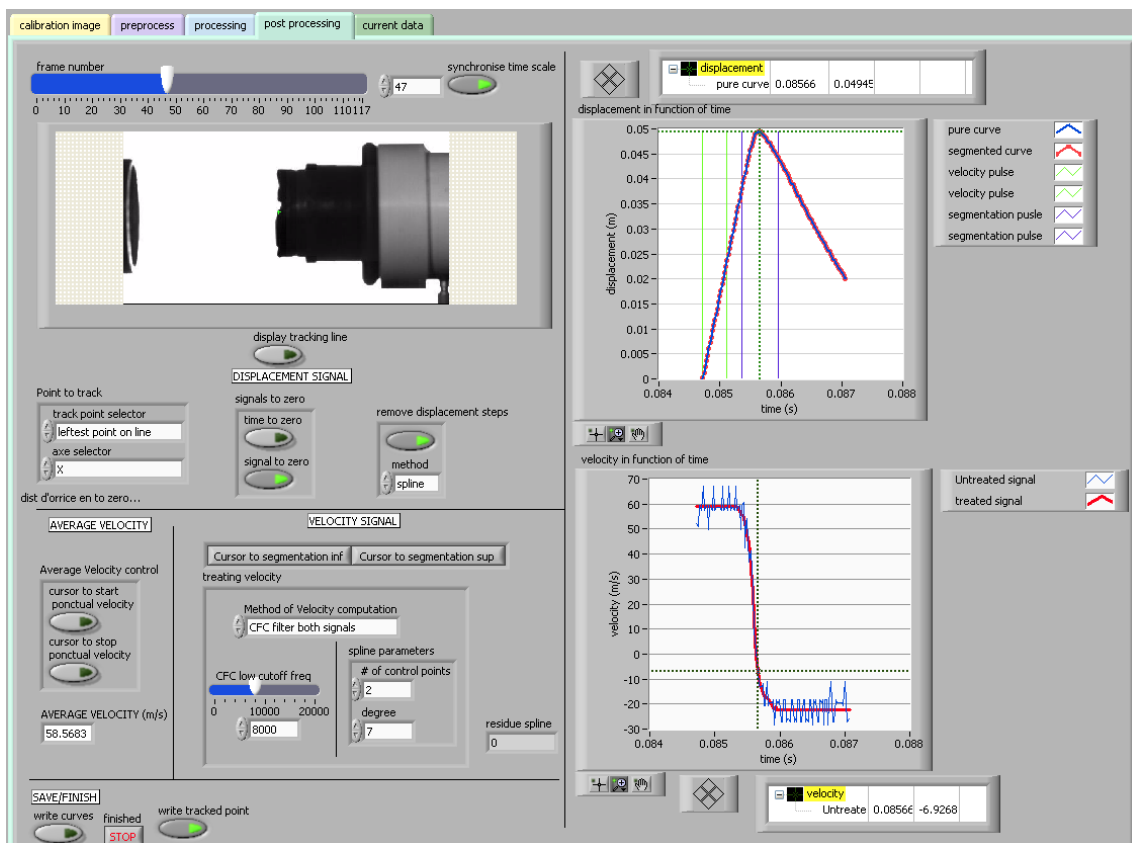


FIGURE 5.8. L'interface de l'étape "post-processing".

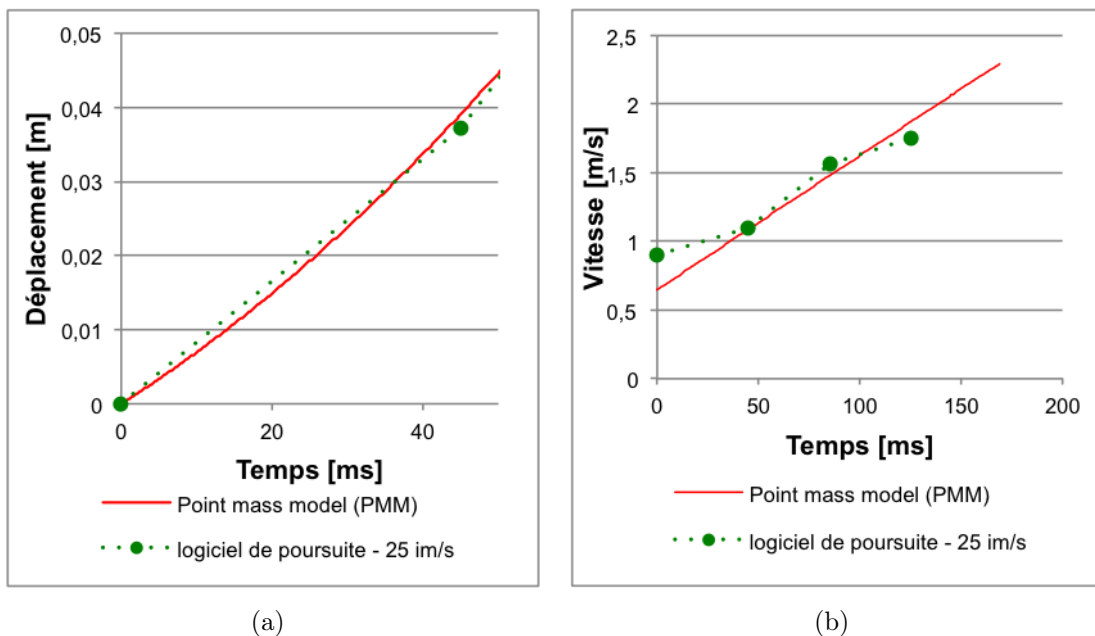
L'utilisateur peut aussi définir un intervalle de temps au cours duquel le logiciel va calculer une vitesse moyenne. Cette option est employée pour calculer la vitesse d'un projectile avant impact par exemple.

Une autre fonction intéressante est de pouvoir linéariser certaines parties de la courbe de vitesse. Une application de l'utilité de cette possibilité est le cas de poursuite d'un projectile impactant sur mur rigide, où la vitesse avant et après impact sera presque constante, et donc le déplacement sera relativement linéaire. Cette opération améliorera la détermination de la vitesse avant et après impact.

Enfin, l'utilisateur peut visualiser les résultats en synchronisant la vidéo avec les courbes obtenues, ce qui peut mettre en évidence des erreurs de poursuite, qui peuvent ensuite être corrigées en redéfinissant de meilleurs paramètres lors de l'étape "pré-processing".

### 5.3.5 La problématique du calcul de la vitesse

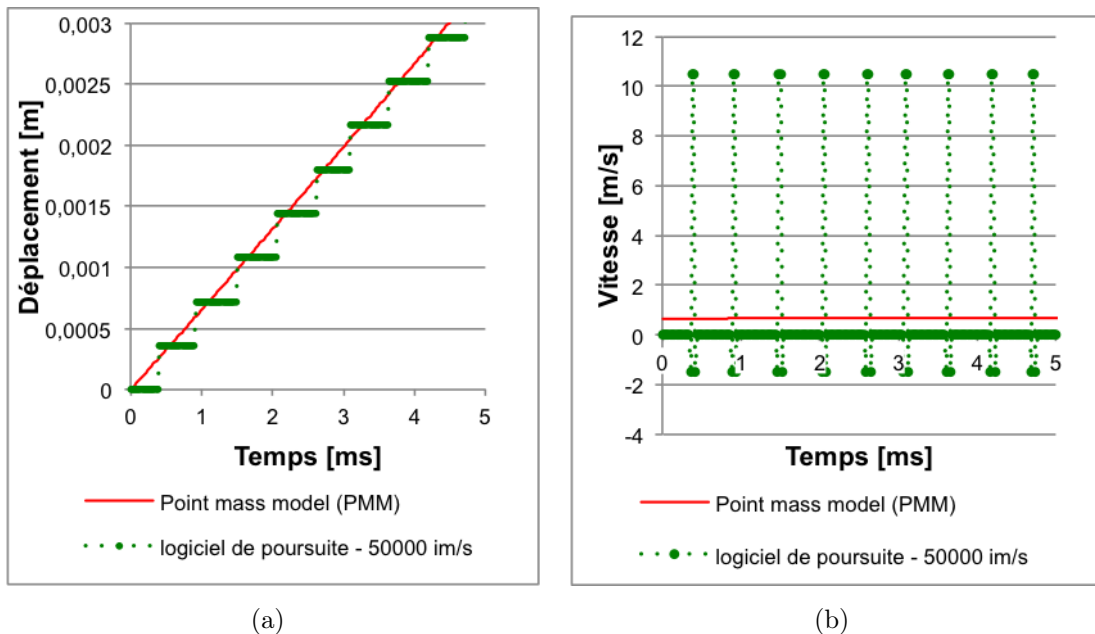
Suivant la fréquence temporelle de la caméra, le calcul de la vitesse par dérivation du signal déplacement peut engendrer énormément de bruit. Cette section explique ce phénomène plus en détail et explique comment s'en prémunir [79]. Pour caricaturer ce phénomène, le mouvement d'une sphère en chute libre sur 25 cm est filmé et poursuivi à l'aide du logiciel. Le phénomène est comparé à un modèle théorique balistique appelé le Point Mass Model (PMM) [80].



**FIGURE 5.9.** L'erreur de type 1 (a) sur le signal déplacement en fonction du temps, sur un faible intervalle de temps et (b) sur le signal vitesse en fonction du temps pour un mouvement de chute libre d'une sphère, sur un intervalle de temps plus long.

Il est à noter que plus la fréquence temporelle de la caméra est faible, plus la résolution temporelle du signal sera faible. En conséquence, des variations rapides du signal déplacement peuvent ne pas être capturées, et la vitesse correspondante sera linéarisée de manière inappropriée. Ce phénomène engendre un premier type d'erreur (erreur de type 1) qui est illustré sur la figure 5.9.

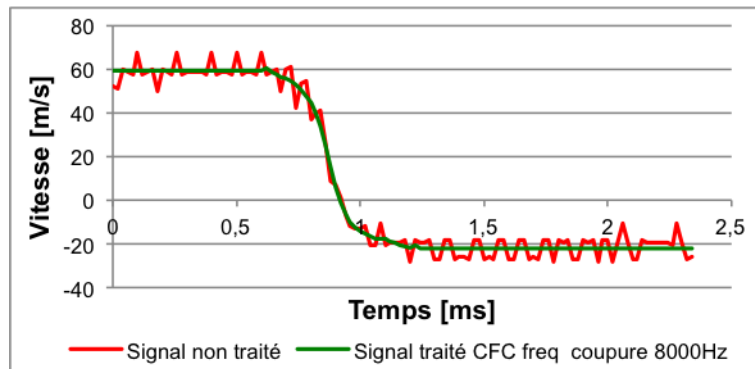
Cependant, si la fréquence temporelle est trop élevée, cela peut induire un deuxième type d'erreur (erreur de type 2) qui est dû à une trop faible résolution géométrique de la caméra. Ce phénomène est bien illustré avec une fréquence temporelle très élevée, qui amène un mouvement du phénomène à poursuivre parfois inférieur à 1 pixel d'une image à la suivante. Le signal déplacement aura alors une forme d'escalier, ce qui sera catastrophique pour le signal vitesse qui aura une valeur nulle pour chaque marche. Cette erreur est illustrée sur la figure 5.10.



**FIGURE 5.10.** L'erreur de type 2 sur (a) le signal déplacement en fonction du temps et sur (b) le signal vitesse en fonction du temps pour un mouvement de chute libre d'une sphère.

Ce phénomène peut être limité en réduisant la fréquence temporelle de la caméra, mais on augmente alors l'erreur de type 1. Une deuxième manière de procéder est de traiter le signal déplacement de manière à atténuer l'effet "escalier". Cela peut être réalisé avec l'utilisation d'un filtre. Habituellement un filtre *CFC* (Channel-Frequency-Class) est employé dans le milieu de l'imagerie de l'accidentologie automobile [81–83]. Ce dernier a l'avantage de ne pas déphaser le signal dans le temps. Ce filtre est décrit dans la norme [84]. Une implémentation particulière est proposée dans l'annexe I du STANAG 4569 [82], qui consiste en l'implémentation

d'un filtre passe bas de type butterworth d'une fréquence de coupure égale à 1,25 fois la valeur du filtre CFC, et appliqué deux fois, la première au signal lui-même et la deuxième au signal renversé. Cette démarche permet d'obtenir le filtre spécifié, et ne présente pas de déphasage. Un exemple d'application de ce traitement est présenté sur la figure 5.11. Un autre algorithme maison est décrit dans l'article [85].



**FIGURE 5.11.** Exemple du traitement du signal vitesse pour la poursuite du mouvement horizontal d'un projectile 40 mm lancé à 60 m/s et impactant un mur rigide.

### 5.3.6 La validation du logiciel

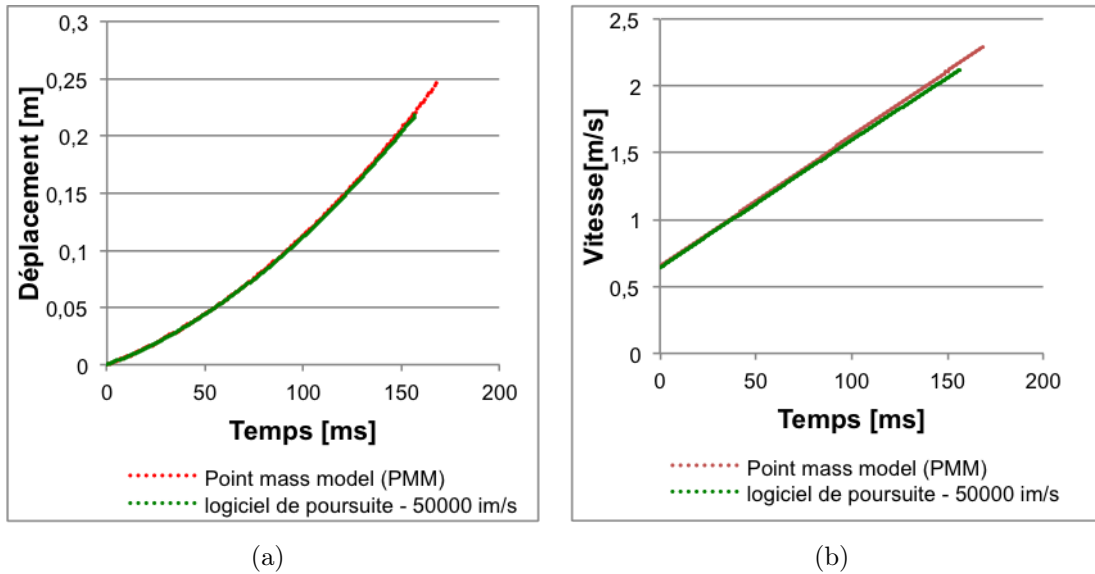
Les mesures du logiciel sont validées à l'aide de la même chute de sphère que celle étudiée dans la section précédente. On compare sur la figure 5.12 les résultats de mesure du logiciel de poursuite avec le modèle PMM.

Comme on peut le voir, les résultats sont très similaires, ce qui indique que les mesures à l'aide de ce logiciel sont bonnes. Une étude plus quantitative de l'analyse de la précision de ces mesures est présentée dans le chapitre suivant.

## 5.4 Utilisation du logiciel de poursuite

Comme déjà précisé, tout l'intérêt du développement de ce logiciel est d'avoir un outil flexible permettant de réaliser les mesures nécessaires à l'application du montage expérimental décrit dans la section 4.5.1.2. Ce logiciel de poursuite permet entre-autre de prendre les cinq mesures suivantes :

- la mesure de l'enfoncement du projectile selon son axe au cours du temps pendant l'impact de celui-ci sur une surface rigide.



**FIGURE 5.12.** La validation des mesures à l'aide du logiciel de poursuite par l'étude d'une sphère en chute libre et comparaison avec un modèle théorique (PMM).

- La mesure de la quantité de mouvement du projectile au cours du temps pendant l'impact de celui-ci sur une surface rigide.
- La mesure de l'évolution de la surface d'impact, pendant l'impact sur une surface rigide. Cette mesure est réalisée grâce à la mesure du diamètre d'impact, si l'on suppose que le contact est parfaitement circulaire, et plein. Grâce à la mesure de force, elle permet de mesurer la pression moyenne de contact au cours du temps.
- La mesure de vitesse du projectile avant impact.
- La mesure de l'inclinaison du projectile avant impact.

Le principe et la raison d'être de ces mesures sont expliqués dans les sections correspondantes à leur emploi. A côté de cela, de nombreuses autres mesures sont possibles à l'aide de ce logiciel. En particulier, il est possible de suivre l'évolution d'une cavité temporaire dans un bloc de gélatine, qui est, sans épiloguer sur le sujet, un phénomène intéressant pour l'étude de la balistique lésionnelle d'un projectile létal [86]. Il est également possible de calculer la mesure du critère  $(VC)_{max}$  induite suite à l'impact d'un projectile non-létal dans un corps transparent comme la gélatine [85].

## 5.5 Conclusions

Dans ce chapitre, le logiciel permettant la poursuite vidéo du projectile lors d'un impact a été présenté. Le principe et les algorithmes principaux ont été exposés. Le fonctionnement est basé sur l'isolement du projectile à poursuivre par rapport au décor, en terme d'intensité lumineuse. Grâce à de nombreux ajustements de paramètres, permettant de bien réaliser la poursuite ("*pré-processing*") et de traiter efficacement les mesures obtenues ("*post-processing*"), le logiciel est très flexible et peut fournir des résultats très précis. La comparaison avec un modèle théorique a permis de mettre en évidence des problèmes de mesure de vitesse et de proposer les outils adéquats pour les traiter, mais aussi de valider les résultats mesurés par le logiciel. L'emploi de cet outil peut être appliqué à de nombreux phénomènes balistiques. En effet, il permet non seulement, lors du phénomène d'impact, de prendre des mesures qui seront par la suite utilisées pour valider des modèles numériques, mais possède également d'autres fonctions. D'une part, une variante de ce logiciel permet de calculer rapidement et efficacement la vitesse d'un projectile avant impact et ce, quelle que soit la distance entre le canon et la cible. Cette fonction est essentielle pour l'intégralité des mesures qui seront réalisées par la suite. D'autre part, le logiciel peut réaliser un bilan de quantité de mouvement lors de l'impact d'un projectile sur une surface rigide. Enfin, le logiciel permet de mesurer l'évolution de la surface d'impact d'un projectile sur mur rigide, qui est une mesure essentielle pour l'évaluation de la pénétration de la peau du projectile pour la méthode "*Force Wall*".

Finalement, les mesures fournies par le logiciel qui seront exploitées se résument à la détermination d'une vitesse moyenne sur une certaine distance, et de déplacements au cours du temps. A ce stade, la précision de ces mesure n'a pas encore été abordée. L'objet du chapitre suivant porte sur cet élément essentiel.

# Chapitre 6

## Validation des mesures et détermination des incertitudes

« *La vérité, c'est toujours un pari sur l'incertitude.* » Jérôme Touzalin,  
dramaturge Français contemporain.

### 6.0.1 Introduction

Maintenant que l'ensemble des méthodes et des mesures à réaliser est défini, ce chapitre a la délicate tâche d'essayer d'estimer leur précision. En effet, une mesure, sans une indication de l'erreur potentielle commise, n'a aucun sens. On parlera donc d'incertitude de mesure. C'est un des points essentiels de cette étude.

On définit *l'erreur de mesure* comme « *le résultat d'un mesurage<sup>1</sup> moins une valeur vraie du mesurande<sup>2</sup>* ». En d'autres mots, l'erreur est la différence entre la valeur de la mesure effectuée et la valeur vraie de la mesure [87].

On définit *l'erreur relative* comme « *le rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie du mesurande* » [87].

On définit *l'incertitude de mesure* comme « *la mesure de l'erreur possible sur la valeur estimée du mesurande telle que fournie par le résultat d'un mesurage* ». L'incertitude permet « *d'estimer l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie d'une grandeur mesurée* ». L'incertitude est donc liée à une erreur maximum commise [87]. Elle est inversement proportionnelle à la précision de la mesure.

---

1. « Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur ».

2. « Grandeur particulière soumise à mesurage ».



Une brève quantification de l'incertitude de la mesure de la vitesse, en terme d'écart-type, a déjà été effectuée dans la section 4.4. Dans un premier temps, cette étude sera approfondie. Le lecteur retrouvera dans la section suivante une étude dont l'objectif est de quantifier l'incertitude théorique maximum commise lors d'une mesure de la vitesse d'un projectile non-létal avant impact, à l'aide d'une caméra haute-vitesse et du logiciel de poursuite. De nombreux paramètres influencent la précision de la mesure dans des proportions différentes. L'objectif sera de quantifier leur influence individuelle, et de voir quels paramètres sont prépondérants en terme de précision.

De nombreux concepts développés dans cette première partie sont extrapolables pour évaluer la précision des courbes "déplacement au cours du temps" générées par le logiciel de poursuite. C'est donc tout naturellement que la deuxième section de ce chapitre abordera ce sujet.

La dernière section parle de la validation de la mesure de force de la méthode "*mur rigide*" et de la quantification de l'incertitude liée à la mesure de force. Cette quantification s'appuie entre autres sur les deux premières sections de ce chapitre, et proposera un moyen innovant de procéder à la calibration du capteur de force, qui sera un paramètre essentiel quant à la précision de la mesure.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

Contrairement aux résultats exposés dans la section 4.4 où la mesure de vitesse était effectuée à l'aide du logiciel Photron Fastcam Viewer<sup>3</sup>, fournit avec les caméras, cette mesure est maintenant réalisée à l'aide d'une version simplifiée du logiciel de poursuite. L'estimation de l'incertitude porte sur la mesure de la vitesse réalisée à partir d'une caméra haute-vitesse, dont l'axe est placé orthogonalement à la trajectoire de tir, et dont l'image est traitée à l'aide du logiciel développé.

L'objectif du logiciel est de déterminer la vitesse du projectile avant et/ou après l'impact. La poursuite n'est réalisée que sur deux images définies par l'utilisateur. On détermine alors une méthode permettant de caractériser la position du projectile (recherche de l'avant ou l'arrière du projectile, de son centre de gravité, de son arrière sur une ligne définie, ...). Sur chaque image, on retrouve donc un point caractérisant la position du projectile. Le déplacement entre ces deux points est calculé, et la vitesse moyenne en est déduite, à l'aide des valeurs de temps respectifs

---

3. [http://www.photron.com/index.php?cmd=product\\_general&product\\_id=16](http://www.photron.com/index.php?cmd=product_general&product_id=16), consulté en février 2013.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

---

mesurées par le chronomètre de la caméra. Une fois la méthode caractérisant la position du projectile et les paramètres du "*pré-processing*" définis (voir section 5.3.2), l'utilisation du logiciel revient à choisir deux images correspondant à deux instants de la trajectoire du projectile, entre lesquels la vitesse moyenne du projectile est calculée. Cette opération est donc très simple et très rapide (quelques secondes), et peut donc être systématiquement réalisée entre deux tirs.

La première étape dans l'estimation théorique de l'incertitude est de réaliser une liste de l'ensemble des paramètres risquant d'influencer la précision de la mesure de vitesse. Dans le cas présent, on peut en dénombrer huit.

1. La distance orthogonale  $L$  entre la caméra et la trajectoire , en  $m$ .
2. L'angle d'ouverture  $\Omega$  de la caméra, en degrés  $^\circ$  (voir section 5.2).
3. La résolution temporelle  $FR$  (pour *frame rate*) de la caméra, en  $Hz$  (voir section 5.2).
4. La résolution géométrique maximum de la caméra  $res_g$ , sur l'axe de la trajectoire de tir sur l'image, en nombre de pixels (voir section 5.2).
5. La fréquence d'ouverture (qui est égale à l'inverse du temps d'exposition) de la caméra  $SS$  (pour *shutter speed*) , en  $Hz$  (voir section 5.2).
6. La distance  $d_c$  sur laquelle la calibration de l'image a été réalisée (voir section 5.3.1), en  $mm$  .
7. La distance  $d_p$  parcourue par le projectile pour la prise de mesure de vitesse , en  $mm$ .
8. La vitesse réelle du projectile  $v$ , en  $m/s$ .

Ces paramètres seront appelés "*paramètres du montage caméra*" tout au long de ce travail. Des valeurs typiques des paramètres du montage caméra employé pour la mesure de vitesse sont exposés dans la table 6.1. Ces valeurs seront employées tout au long de ce chapitre.

Comme la vitesse est amenée à changer d'un tir à l'autre, de manière à pouvoir comparer les résultats d'incertitude, quelle que soit la vitesse, il est logique de vouloir raisonner en terme d'incertitude relative à la valeur de la vitesse réelle, qui est le rapport entre l'incertitude absolue, et la vitesse réelle du projectile. Par abus de langage, sauf contre indication, on parlera d'incertitude tout au long de cette section comme étant l'incertitude relative.

paramètre	valeur
$L$ [m]	0,7
$\Omega$ [°]	22,86
$FR$ [Hz]	50000
$res_g$ [-]	1024
$SS$ [Hz]	100000
$d_c$ [mm]	120
$d_p$ [mm]	100
$v$ [m/s]	100

**TABLE 6.1.** Les paramètres typiques employés pour la prise de mesure de vitesse.

Le développement qui suit cherche à identifier les sources d'incertitude et à quantifier leur effet. Les différentes étapes nécessaires à la prise de mesure de la vitesse et les incertitudes induites sont reprises ci dessous.

- Dans un premier temps, une mire de dimension connue  $d_c$  est placée dans le plan de la trajectoire sur laquelle la mesure de vitesse  $v$  est effectuée. Une photo de la situation est alors prise, et une mesure sur l'image en nombre de pixels, correspondant à la distance connue, est alors réalisée. Les incertitudes générées par cette étape sont expliquées dans la section *incertitudes de calibration* (section 6.1.1.1).
- La deuxième étape consiste en la réalisation du film du projectile parcourant sa trajectoire  $d_p$  sur laquelle le calcul de sa vitesse  $v$  est effectué. L'incertitude liée est développée dans la section *incertitudes de prise du film* (section 6.1.1.2).
- Dans un troisième temps, il s'agit de définir l'emplacement du projectile sur sa trajectoire de tir, en deux points distincts, sur deux images différentes correspondant à deux instants différents. Les incertitudes liées sont développées dans la section *incertitudes de prise de mesure* (section 6.1.1.3).
- Enfin, des incertitudes plus générales sont également présentes, et sont classées sous l'appellation *autres incertitudes* (section 6.1.1.4).

La valeur de ces incertitudes est estimée pour une mesure de vitesse réalisée à l'aide des paramètres de la table 6.1. Dans un deuxième temps, une analyse de l'influence des paramètres de la table 6.1 sur l'incertitude induite est réalisée.

## 6.1.1 Quantification des incertitudes

### 6.1.1.1 Incertitudes de calibration

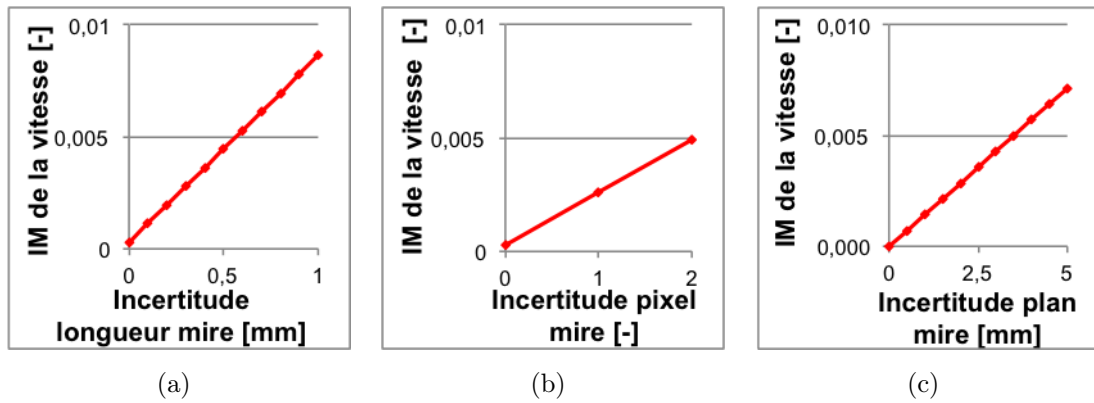
Trois sources d'incertitudes distinctes existent pour cette étape :

- une première incertitude est la valeur exacte de la distance  $d_c$  de calibration, mesurée sur la mire. Par exemple, une erreur est commise si la distance réelle  $d_c$  est de 121 mm alors que l'utilisateur définit cette mesure à 120 mm. Cette incertitude est liée à la qualité de la mire, est quantifiée en mm, et sera appelée "*incertitude longueur mire*".
- Une deuxième incertitude est liée à la précision avec laquelle le choix des pixels correspondant à la distance de référence  $d_c$  est réalisée. Par exemple, une mesure à un pixel près est liée à une incertitude moindre qu'une mesure à deux pixels près. Cette incertitude est quantifiée en nombre de pixels et sera appelée "*incertitude pixel mire*".
- La troisième incertitude est liée au fait que la mire ne se trouve probablement jamais exactement dans le plan vertical de la trajectoire du projectile sur laquelle la mesure de vitesse sera effectuée. Elle peut être 1 mm plus loin ou plus proche de la caméra par exemple, ce qui engendre une incertitude sur le facteur de calibration et donc sur la vitesse. Cette incertitude est quantifiée en mm et sera appelée "*incertitude plan mire*".

La résolution des calculs est intégrée dans le logiciel de poursuite, et amène aux résultats présentés sur la figure 6.1, qui montre l'évolution de l'incertitude relative de la mesure de la vitesse du projectile (IM de la vitesse) en fonction de ces trois incertitudes de mesure, lorsque l'on emploie les paramètres caméras définis dans la table 6.1. Dans les trois cas, l'évolution est linéaire. Typiquement, l'incertitude longueur mire est évaluée à 0,2 mm, l'incertitude pixel mire est évaluée à 1 pixel et l'incertitude plan mire est évaluée à 2 mm. Les valeurs respectives de l'incertitude induite sur la mesure de vitesse sont de 0,11 %, de 0,26 % et de 0,29 %.

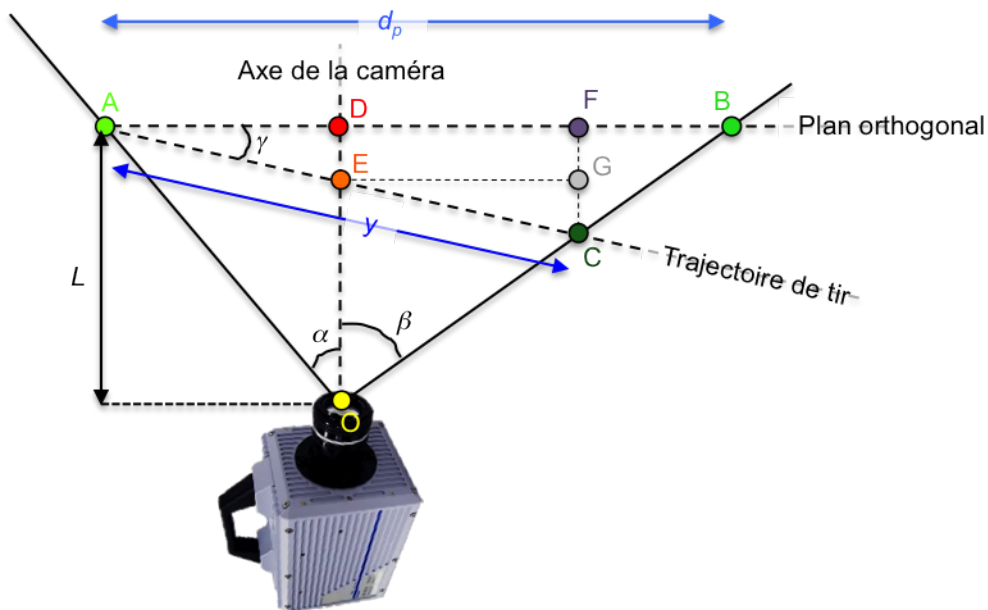
### 6.1.1.2 Incertitudes de prise du film

Tout d'abord, il est à noter que pour de nombreuses raisons pratiques, le projectile est toujours dans le même plan horizontal que la caméra. L'erreur de mesure associée à une éventuelle non horizontalité n'est donc pas étudiée. Cela permet de centrer la trajectoire de tir sur l'impact, et donc de capturer au mieux la trajectoire



**FIGURE 6.1.** L'influence (a) de l'incertitude longueur mire, (b) de l'incertitude pixel mire, et (c) de l'incertitude plan mire, sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

ou l'impact, si le projectile s'écrase sur la cible et s'étire radialement. Une erreur de mesure est commise si la trajectoire du projectile n'est pas parfaitement orthogonale à l'axe de la caméra dans ce plan horizontal, mais fait un certain angle non droit avec cet axe. L'incertitude de mesure liée à cet angle sera appelée *incertitude  $\gamma$*  et sera quantifiée en degrés. Un schéma représente la situation, vue du haut, sur la figure 6.2.



**FIGURE 6.2.** Illustration de la géométrie liée à la non-orthogonalité entre l'axe de la caméra et la trajectoire de tir, vu du haut.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

---

Une deuxième hypothèse y est posée : on suppose que le projectile est bien dans le plan orthogonal sur la première image (point A), mais pas sur la deuxième (point B). L'erreur consiste en la mesure  $y$  au lieu de la mesure  $d_p$ . Cette mesure  $y$  est quantifiable en résolvant la géométrie de la situation à l'aide des paramètres suivants :

- la distance  $L$  entre la caméra et la trajectoire idéale de tir.
- La distance  $[AD]$  mesurée entre la première position du projectile sur l'image et le centre de l'image.
- La distance  $[BD]$  mesurée entre la deuxième position du projectile sur l'image et le centre de l'image.
- L'angle  $\gamma$  entre le plan orthogonal et la trajectoire de tir.

Pour la résolution qui suit, une troisième hypothèse est posée : on considère que la trajectoire sur laquelle la mesure de vitesse est effectuée correspond à l'intégralité de l'image prise par la caméra, et que donc  $[AD] = [BD] = d_p/2$ . Les calculs sont généralisables pour toute autre situation.

Pour le calcul de  $y$ , on part du principe que  $y = [AE] + [CE]$  dans le triangle rectangle ADE, on a :

$$AE = \frac{[AD]}{\cos \gamma} \quad (6.1)$$

Le calcul de  $[CE]$  nécessite plus d'étapes. Le théorème de Thalès donne :

$$\frac{[AD]}{[AF]} = \frac{[AD]}{d_p - [BF]} = \frac{[AE]}{[AE] + [CE]} \quad (6.2)$$

dans le triangle rectangle BCF, on a :

$$BF = ([FG] + [GC]) \tan \beta \quad (6.3)$$

dans le triangle rectangle ADE, on a :

$$[FG] = [DE] = [AE] \sin \gamma \quad (6.4)$$

dans le triangle rectangle CEG, on a :

$$[CG] = [CE] \sin \gamma \quad (6.5)$$

En injectant (6.5) et (6.4) dans (6.3), on a :

$$BF = ([AE] \sin \gamma + [CE] \sin \gamma) \tan \beta \quad (6.6)$$

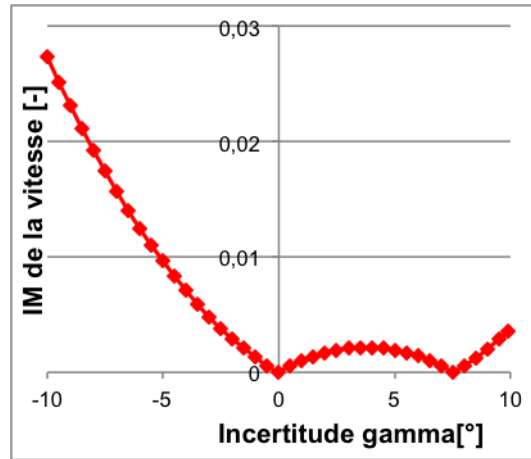
En injectant (6.6) dans le deuxième membre de (6.2), on a :

$$[CE] = \frac{([AE]d_p - [AD][AE] - [AE]^2 \tan \beta \sin \gamma)}{[AD] + [AE] \tan \beta \sin \gamma} \quad (6.7)$$

et finalement,

$$y = [AE] + [CE] \quad (6.8)$$

Le même développement géométrique peut être réalisé lorsque l'angle  $\gamma$  est de l'autre côté du plan orthogonal, à savoir lorsque le projectile s'éloigne progressivement de la caméra. Le résultat obtenu est identique. L'influence de l'angle  $\gamma$  sur l'incertitude commise est présentée sur la figure 6.3.



**FIGURE 6.3.** *L'influence de l'incertitude  $\gamma$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.*

On voit que la courbe d'incertitude n'est pas symétrique par rapport à l'axe vertical correspondant à  $0^\circ$ , et qu'un éloignement du projectile par rapport à la caméra est plus néfaste sur l'incertitude de mesure associée à la mesure de vitesse qu'un rapprochement. En pratique, on considère qu'avec le matériel actuellement disponible, l'incertitude de l'angle  $\gamma$  est de  $5^\circ$  de part et d'autre de l'axe orthogonal à l'axe de la caméra. L'incertitude est égale au maximum de l'erreur commise sur l'intervalle  $-5^\circ \leq \gamma \leq 5^\circ$ , qui sera maximum en  $-5^\circ$  et sera égale à 1,01% avec les paramètres mentionnés dans la table 6.1.

### 6.1.1.3 Incertitudes de prise de mesure

Trois erreurs de mesure sont à nouveau possibles.

D'une part, tout comme une erreur du choix du pixel pouvait être commise lors de la détermination de la distance du référent, il est également possible de choisir un mauvais pixel lors de la détermination de l'emplacement du projectile. L'incertitude liée sera appelée *incertitude pixel projectile*. Cette incertitude est ici fortement accentuée par le flou directionnel (défini dans la section 5.2), qui rend la détermination exacte de la position du projectile plus compliquée. En reprenant l'équation (5.1), on peut avoir une idée de l'influence de ce flou directionnel. En pratique, si l'éclairage est homogène, le flou directionnel est identique sur les deux prises d'image, et donc la mesure de distance est simplement faite sur une distance décalée, mais la valeur reste identique. Si par contre, on considère que le flou directionnel est présent sur une position du projectile, mais pas sur l'autre, alors l'intégralité du flou directionnel est à prendre en compte. En pratique, on constate expérimentalement qu'on se situe entre ces deux situations. Ces considérations amènent au raisonnement suivant :

*"l'incertitude pixel projectile", lorsque l'on emploie le logiciel de poursuite et que l'éclairage est suffisamment homogène, est au pire égale à la valeur du flou directionnel, en pixels, divisée par un coefficient appelé coeff FD qui est égal à 2.*

Cette relation est déterminée tout à fait empiriquement, explicitement pour l'application des montages expérimentaux présentés dans ce doctorat. La figure 6.4 donne une idée des conséquences de cette hypothèse. L'équation régissant *"l'incertitude pixel projectile"* est donc :

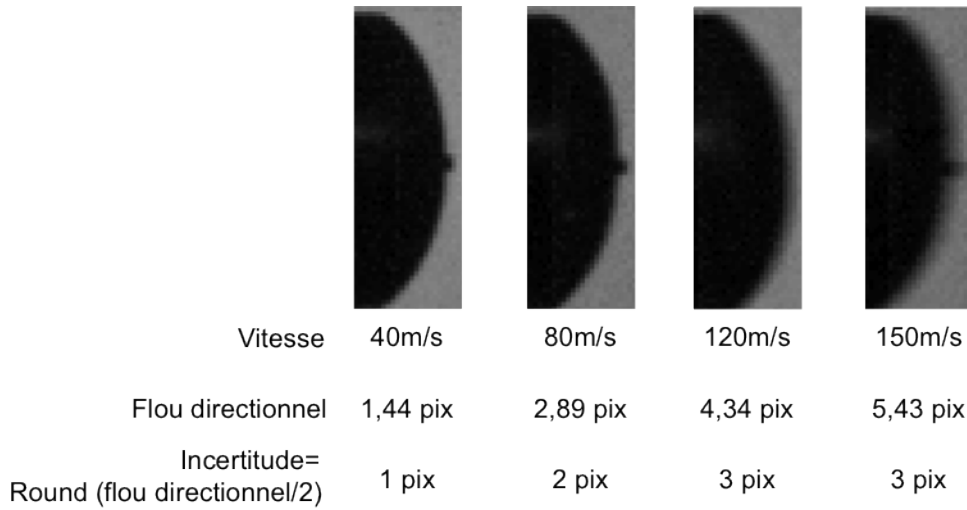
$$IPP = \lceil (calib \cdot v \cdot TE) / 2 \rceil \quad (6.9)$$

où

- $IPP$  est *"l'incertitude pixel projectile"* [-]
- $calib$  est le facteur de calibration, c'est à dire la taille réelle que représente chaque pixel [1/m].
- $v$  est la vitesse du projectiles [m/s].
- $TE$  est le temps d'exposition [s].
- $\lceil x \rceil$  veut dire l'arrondi de la valeur  $x$  vers la direction  $+\infty$

la valeur de l'incertitude de la mesure de vitesse est alors égal à 0,62 % pour les paramètres définis dans la table 6.1.





**FIGURE 6.4.** Implication de l'emploi de l'équation 6.9 pour le calcul de l'incertitude liée au flou directionnel, lors du tir du projectile RB1FS à différentes vitesses.

Une autre erreur de mesure est liée à l'effet de la parallaxe, et sera appelée "*erreur parallaxe*". Cette erreur, contrairement aux autres contributions mentionnées, ne dépend pas d'un paramètre non quantifiable mais est parfaitement définie. Il s'agit donc bien d'une erreur et pas d'une incertitude. Un petit schéma valant parfois mieux qu'un long discours, la situation est exposée sur la figure 6.5. On souhaite connaître la vitesse du projectile sur sa trajectoire [AC], mesurée à l'aide de deux images. On cherche donc à mesurer la distance  $d_p$ . Une façon de faire est de repérer par exemple l'avant du projectile sur les images correspondantes. Lorsqu'on repère le point avant du projectile sur l'image 1, c'est bien le point B qu'on va repérer et non le point A. Parallèlement, le point avant repéré sur la deuxième image est le point D et non le point C. On commet alors deux erreurs de mesure,  $d_1$  et  $d_2$ , qui se compensent partiellement. Finalement, on aura la mesure  $y$  au lieu de la mesure  $d_p$ . Cette situation simple est extrapolable pour toute forme de géométrie des projectiles travaillés dans cette thèse. L'incertitude est quantifiable en résolvant la géométrie du problème à l'aide des paramètres suivants :

- le rayon  $r$  du projectile, supposé sphérique.
- La distance  $L$  entre la caméra et la trajectoire de tir.
- La distance  $[BE]$  mesurée entre l'avant du projectile tel que vu sur l'image et le centre de l'image pour l'image 1.

6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

---

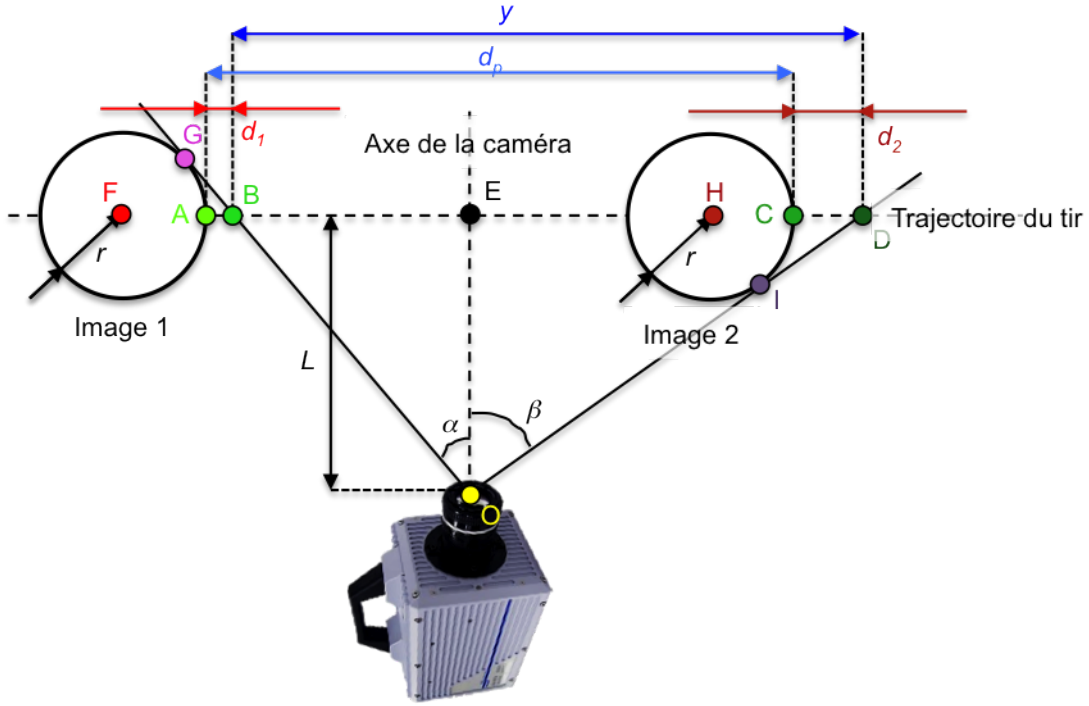


FIGURE 6.5. Illustration de l'effet de la parallaxe, vu du haut.

- La distance  $[DE]$  mesurée entre l'avant du projectile tel que vu sur l'image et le centre de l'image pour l'image 2.

La résolution géométrique va dépendre des longueurs relatives  $[AE]$  et  $[EC]$ . On distingue deux cas extrêmes :

- la mesure est prise parfaitement symétriquement autour de l'axe  $OE$ . Dans ce cas,  $[AE] = [EC] = d_p/2$ . Les équations à résoudre sont alors les suivantes.

Pour l'image 1, dans le triangle rectangle BEO on a :

$$\tan(\alpha) = \frac{BE}{L} = \frac{d_p/2 - d_1}{L} \quad (6.10)$$

Et dans le triangle rectangle BFG on a :

$$\sin(90^\circ - \alpha) = \frac{r}{r + d_1} \quad (6.11)$$

Pour l'image 2, dans le triangle rectangle CEO on a :

$$\tan(\beta) = \frac{CE}{L} = \frac{d_p/2 + d_2}{L} \quad (6.12)$$

Et dans le triangle rectangle DHI on a :

$$\sin(90^\circ - \beta) = \frac{r}{r + d_2} \quad (6.13)$$

- La mesure est prise uniquement sur une moitié de l'image. Dans ce cas, par exemple,  $[AE] = 0$  et  $[EC] = d_p$ . Les équations à résoudre sont alors les suivantes :

$$\tan(\beta) = \frac{CE}{L} = \frac{d_p+d_2}{L} \quad (6.14)$$

et dans le triangle rectangle DHI on a :

$$\sin(90^\circ - \beta) = \frac{r}{r+d_2} \quad (6.15)$$

Dans tous les cas,  $y = d_p - d_1 + d_2$ .

Lorsque le projectile est cylindrique, la géométrie est légèrement différente et n'est pas représentée ici. Si le rayon du cylindre est également noté  $r$ , les équations deviennent alors :

- lorsque la situation est symétrique

$$\tan(\alpha) = \frac{d_p/2-d_1}{L} \quad (6.16)$$

$$\tan(90^\circ - \alpha) = \frac{r}{d_1} \quad (6.17)$$

$$\tan(\beta) = \frac{d_p/2+d_2}{L} \quad (6.18)$$

$$\tan(90^\circ - \beta) = \frac{r}{d_2} \quad (6.19)$$

- Lorsque la mesure est prise sur la moitié de l'image

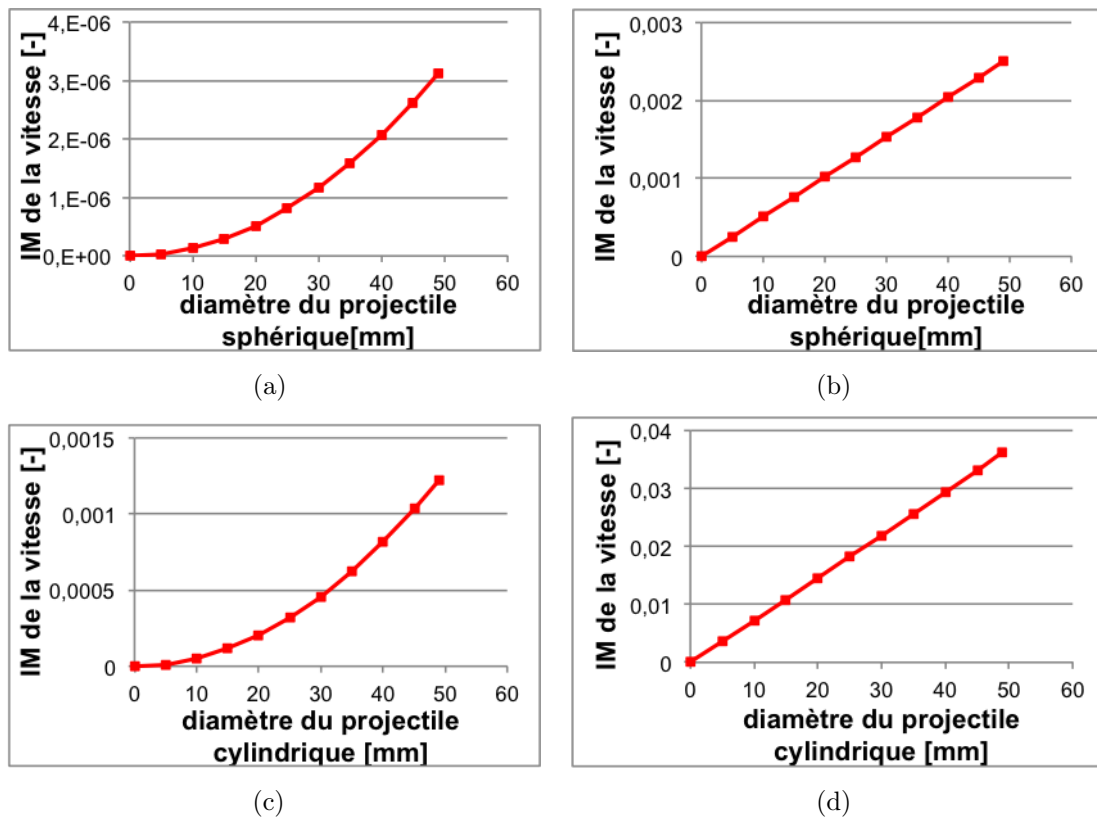
$$\tan(\beta) = \frac{d_p+d_2}{L} \quad (6.20)$$

$$\tan(90^\circ - \beta) = \frac{r}{d_2} \quad (6.21)$$

Dans tous les cas,  $y = d_p - d_1 + d_2$ .

Une résolution numérique permet de résoudre ces différents systèmes d'équations. Les résultats sont présentés sur la figure 6.6. On constate dans un premier temps que le calcul de la vitesse effectué symétriquement de part et d'autre du centre de l'image est très nettement favorable en terme de minimisation de l'erreur due à la parallaxe. Cette configuration est systématiquement approchée en pratique, de sorte que ce calcul est représentatif de l'effet parallaxe pour l'ensemble des mesures présentées dans ce travail. Par ailleurs, on voit également que le cas du projectile sphérique engendre une erreur de parallaxe moindre que pour le projectile cylindrique. Trois considérations pratiques de mesures sont déduites de ces résultats :

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact



**FIGURE 6.6.** L'influence de "l'erreur parallaxe" pour un projectile sphérique et pour un projectile cylindrique, (a) et (c) dans le cas d'une prise de mesure autour du centre de l'image, et (b) et (d) dans le cas d'une mesure sur une moitié d'image, sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

- tout d'abord, lorsque le projectile est caractérisé par une forme cylindrique d'un côté et d'une forme sphérique de l'autre, la mesure de vitesse est toujours effectuée du côté sphérique, de manière à minimiser l'erreur due à l'effet de parallaxe. Un autre avantage de travailler avec l'avant du projectile est qu'il permet de réaliser la mesure de vitesse sur une distance plus grande, la mesure étant réalisable dès que l'avant du projectile apparaît sur l'image.
- Ensuite, on essaie toujours de prendre cette mesure de manière symétrique autour du centre de l'image, de manière à minimiser l'erreur de l'effet de parallaxe. Dans ce cas, l'incertitude de mesure pour la mesure de la vitesse pour un projectile sphérique de 40 mm est de 0,0001 % pour les paramètres définis dans la table 6.1.
- Enfin, on note que ces calculs sont généralisables quel que soit l'endroit de la prise de mesure de vitesse sur l'image. On peut même tenir compte de l'effet de parallaxe dans la prise de mesure et corriger la mesure de manière à supprimer

l'erreur due à la parallaxe et donc l'incertitude liée. Ceci induit cependant qu'on spécifie alors systématiquement les dimensions du projectile au logiciel de poursuite pour effectuer cette correction. Comme on peut le voir, si l'on respecte les deux premiers points, l'incertitude est très faible, ce qui explique qu'une telle tâche n'a pas été réalisée.

Enfin, il existe également une incertitude sur la valeur de temps fournie par la caméra. L'incertitude liée sera appelée "*incertitude chrono*". Les fabricants mentionnent que la caméra Photron SA5 est caractérisée par une incertitude de mesure sur le chronomètre qui est de quelques nanosecondes. Cette incertitude sera donc très faible. Pour les paramètres définis sur la table 6.1, et pour une valeur d'incertitude de chronomètre de 10 ns, l'incertitude de la mesure de vitesse sera égale à  $1E - 5$ .

#### 6.1.1.4 Autres incertitudes

Deux sources d'erreurs globales viennent s'ajouter à cette liste :

- le phénomène de perspective va également engendrer une erreur de mesure qui sera appelée "*erreur perspective*". Cette erreur est liée à la représentation d'un phénomène géométrique tridimensionnel en dimensions réelles vers une représentation en deux dimensions en pixels. Une composante simple de cet effet perspective est la distorsion purement radiale, dont le principe est présenté sur la figure 6.7. La distance entre la caméra et le point A sur lequel est effectué une première mesure n'est pas la même que la distance entre la caméra et le point B d'une deuxième mesure. Ces différentes distances pour chaque point de l'image amène une relation locale [pixel-distance réelle] différente pour chaque point ce qui engendre une distorsion optique qui va modifier les distances affichées. En pratique, d'autres distorsions sont à prendre en compte, dues au système de lentilles de la caméra et de l'angle d'ouverture.

Ce phénomène est propre à chaque caméra, et peut être quantifié et corrigé à l'aide de modèles géométriques de la caméra, exposés dans la littérature. Le modèle le plus répandu est le modèle sténopé ou trou d'épingle ("*pinhole camera model*" en anglais)[88–90]. « *Il s'agit d'un modèle de projections qui consiste à simplifier l'ensemble des lentilles qui compose le système optique par un point où convergent tous les rayons lumineux pour aller se projeter sur le plan image . . .* » (adapté de [90]). Ce modèle est paramétré par un ensemble de facteurs liés à la caméra elle-même (paramètres intrinsèques) et par la géométrie du système "phénomène capturé - caméra" (paramètres extrinsèques).

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

---

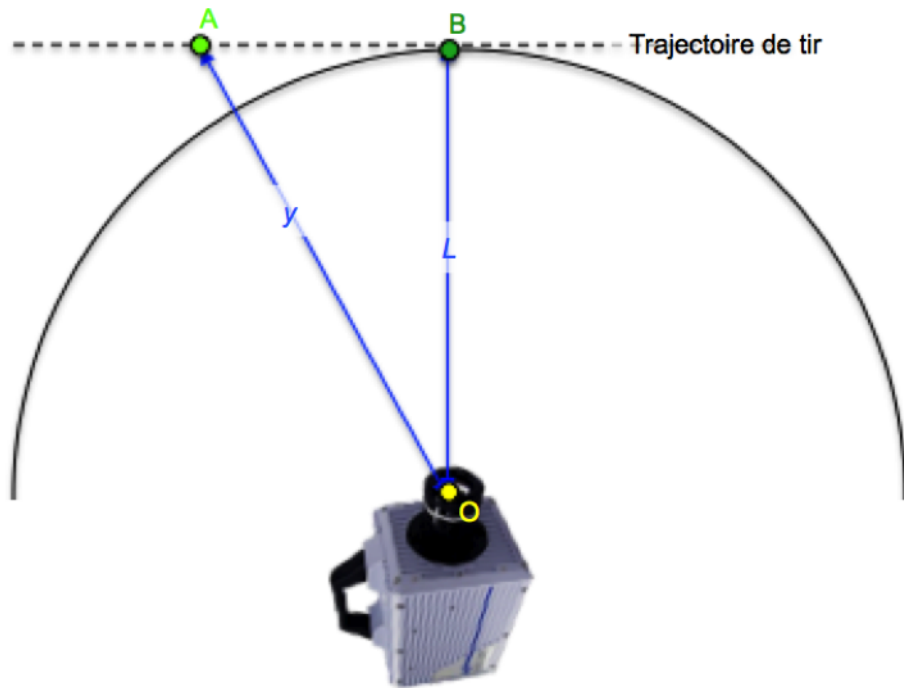


FIGURE 6.7. Illustration de l'effet de perspective, vu du haut.

On peut employer le logiciel gratuit « *Camera Calibration Toolbox for Matlab* »<sup>4</sup> pour obtenir ces paramètres et corriger l'effet de perspective.

Cette opération n'a pas été réalisée. En effet, un cas pratique de l'effet de la perspective est présenté sur la figure 6.8, où l'on a mesuré la même distance réelle en différents endroits de l'image. On constate que son influence est relativement limitée puisqu'une différence d'un seul pixel a pu être observée, qui peut être due à une erreur de discrétisation<sup>5</sup>. Par ailleurs, l'effet de la perspective est d'autant plus limité que l'intervalle sur lequel est fait la calibration est proche de celui employé pour réaliser la mesure de vitesse, ce qui est en pratique systématiquement le cas.

- Enfin, des erreurs de discrétisation liées aux diverses transformations "*distance en pixels - distance réelles*" sont présentes et tenues en compte tout aux long des calculs développés. On notera leur effet dans la section suivante.

---

4. disponible gratuitement à l'adresse suivante : [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/), en février 2013.

5. « Opération consistant à remplacer des relations portant sur des fonctions continues, dérivables, etc., par un nombre fini de relations algébriques portant sur les valeurs prises par ces fonctions en un nombre fini de points de leur ensemble de définition. » [www.larousse.fr](http://www.larousse.fr) - consulté en mars 2013.

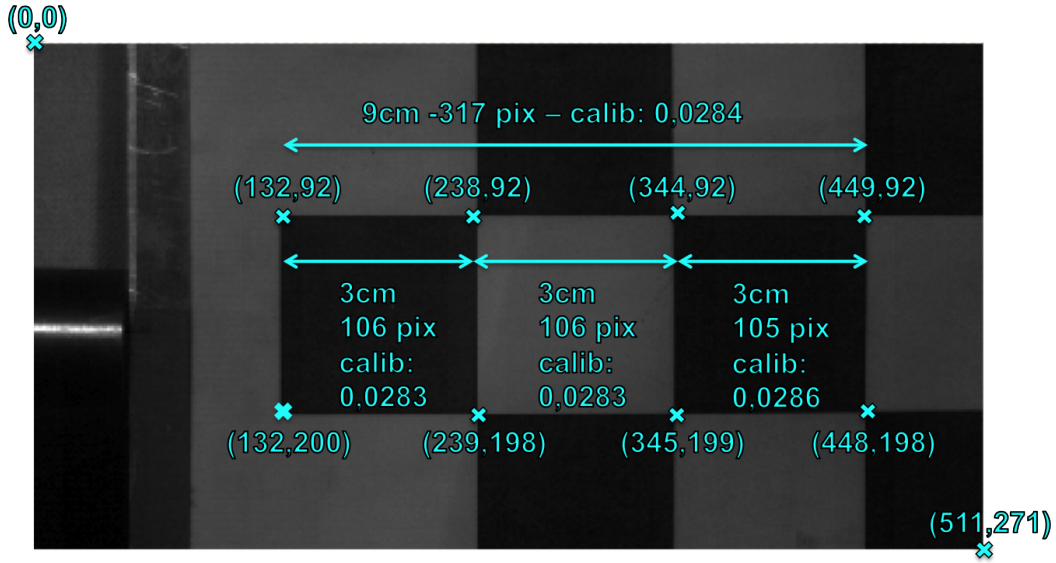


FIGURE 6.8. Influence de l'effet de distorsion sur le facteur de calibration.

#### 6.1.1.5 Bilan des incertitudes

En tenant compte de toutes ces incertitudes et erreurs, et en considérant qu'elles sont toutes indépendantes, on peut dresser un bilan de l'incertitude totale de mesure sur la mesure de vitesse, qui est, selon le théorème central limité, la somme quadratique des incertitudes individuelles [87] :

$$IM_{tot} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 IM_i^2} \quad (6.22)$$

où :

- $IM_{tot}$  est l'incertitude totale de la mesure de vitesse par la caméra haute-vitesse et le logiciel de poursuite associé.
- $IM_i$  sont les sept incertitudes individuelles étudiées dans la précédente sous-section.

Le bilan est présenté dans la table 6.2.

Les incertitudes et erreurs peuvent être classées en deux catégories : celles pouvant varier d'un tir à l'autre (pixel projectile, chrono, et parallaxe) et celles liées à tous les tirs réalisés à l'aide d'un même montage expérimental (longueur mire, pixel mire, plan mire, et  $\gamma$ ). Cette distinction n'engendre par contre pas de recommandations particulières lors d'une prise de vitesse du projectile avant impact.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

---

type d'incertitude/erreur	paramètre influençant l'incertitude/l'erreur	valeur	valeur de l'incertitude liée
longueur mire	erreur de mesure de distance [mm]	0,2*	0,11%
pixel mire	nombre de pixels [-]	1	0,26%
plan mire	espace entre le plan de la mire et le plan de la trajectoire du projectile [mm]	2	0,29%
$\gamma$	angle $\gamma$ (figure 6.2) [°]	5	1,01%
pixel projectile	coefficient FD [-]	2	0,62%
parallaxe	rayon du projectile sphérique [mm]	40	0,0002 %
chrono	précision chronomètre caméra [ns]	10**	0,001%
<b>Total</b>			<b>1,33%</b>
*vérifié au pied à coulisse d'une précision de 0,03mm [65].			
**valeur majorée de celle transmise par le fabricant (quelques ns)			

**TABLE 6.2.** Bilan des différentes erreurs et incertitudes sur l'incertitude totale de la mesure de vitesse.

On constate que le facteur le plus influant est l'incertitude liée à l'angle  $\gamma$ . Par ailleurs, le phénomène de flou directionnel influence également de façon prépondérante. Ensuite, les incertitudes liées à la calibration influencent de façon moins significative. Enfin, les phénomènes de parallaxe et d'incertitude du chronomètre n'influencent presque pas. Bien entendu, ces valeurs et conclusions sont liées non seulement aux paramètres influençant l'incertitude mais également aux paramètres définis dans la table 6.1. Une variation de ceux-ci peut amener d'autres résultats. C'est l'objet de la sous-section suivante.

### 6.1.2 Influence des paramètres de la mesure de vitesse sur l'incertitude induite

Dans cette section, une étude de sensibilité sur l'incertitude induite des paramètres caractérisant la mesure de vitesse (table 6.1) est réalisée. Pour ce faire, les



paramètres des incertitudes et erreurs seront cette fois-ci fixés, selon les valeurs présentées dans la table 6.2.

Cette étude de sensibilité aura pour but d'identifier les paramètres les plus influents et de voir comment ceux-ci entachent la mesure, pour ensuite minimiser l'incertitude totale en optimisant ceux-ci. Leur influence est étudiée indépendamment. Les paramètres de la caméra qui sont étudiés sont les suivants :

- la distance orthogonale  $L$  entre la caméra et la trajectoire de tir [m].
- L'angle d'ouverture  $\Omega$  de la caméra (qui peut être modifié en changeant l'objectif de la caméra) [ $^\circ$ ]
- La résolution géométrique  $res_g$  maximum de la caméra [-]
- La fréquence d'ouverture de la caméra SS [Hz]
- La distance sur laquelle la calibration de l'image est réalisée  $d_c$  [mm].
- La distance sur laquelle la mesure de l'image est réalisée  $d_p$  [mm].
- La vitesse du projectile [m/s].

Il est à noter que l'influence de la fréquence temporelle de la caméra n'est pas étudiée, puisque celle-ci n'a en effet aucune influence directe. Tant que la caméra fournit deux images du phénomène, la mesure de vitesse peut être effectuée. Indirectement, elle contraint la valeur de la distance de mesure  $d_p$ . En effet, si deux images seulement sont fournies, alors la distance sera dès lors fixée. Si plus d'images sont disponibles, un choix limité se présente alors.

Par ailleurs, comme il sera présenté sur les nombreuses figures qui suivent, des erreurs de discrétisations influencent différentes sources d'incertitudes. Elles ont pour conséquence des oscillations sur certaines des courbes présentées. Ces erreurs de discrétisations peuvent être réduites en augmentant la résolution géométrique de la caméra, ce qui diminuera les oscillations sur l'ensembles des courbes.

#### **6.1.2.1 Influence de la distance orthogonale entre la caméra et la trajectoire de tir**

On peut observer sur la figure 6.9 l'influence de cette distance sur l'incertitude totale. Le premier phénomène observable est le bruit omniprésent qui figure sur les courbes. La sous-figure fenêtrée confirme l'aspect harmonique de ce bruit. Ce bruit est dû aux erreurs de discrétisation.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

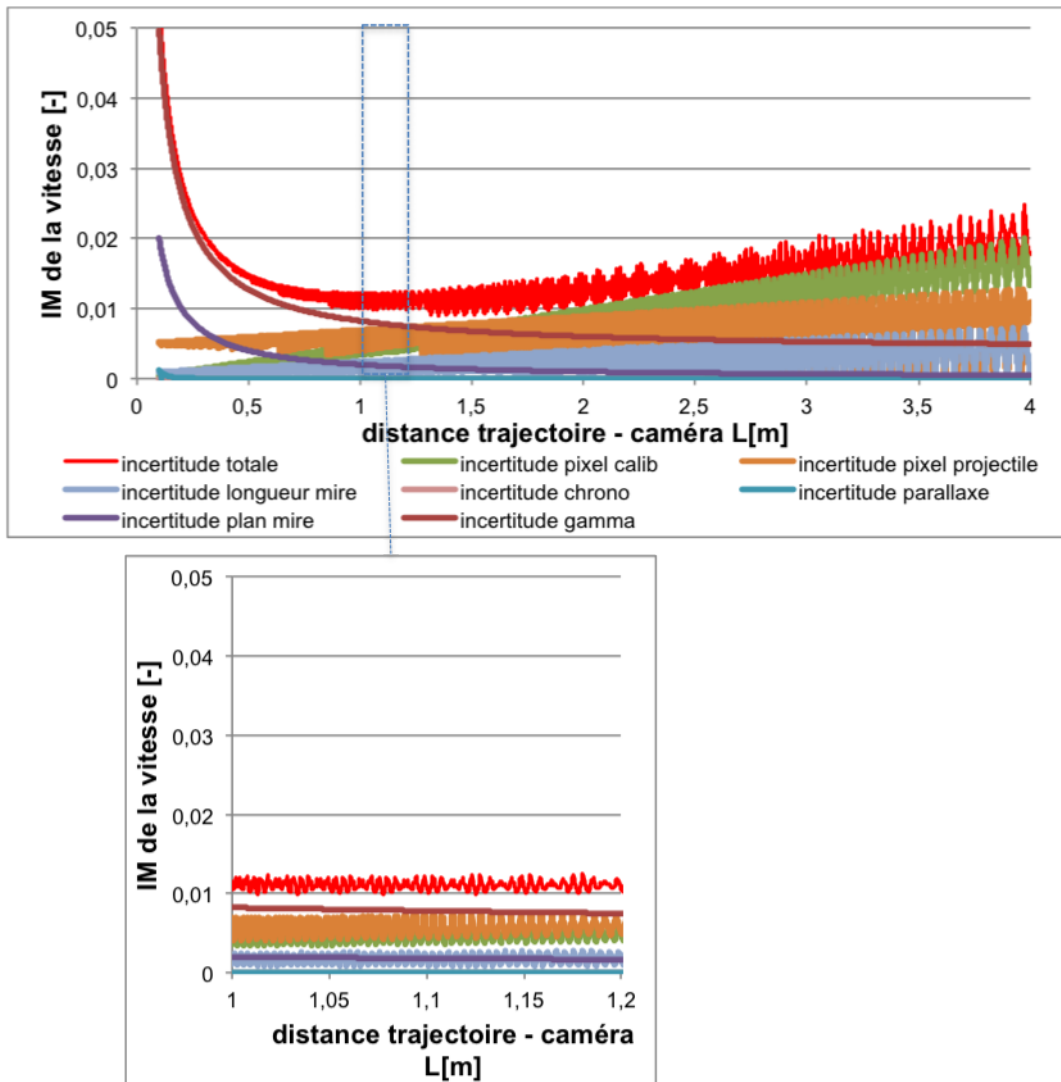


FIGURE 6.9. Influence de la distance  $L$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse, avec mise en évidence du bruit.

On constate que lorsque la distance  $L$  est inférieure à 0,5 m, la contribution de "l'incertitude  $\gamma$ " et "l'incertitude plan mire" sont prépondérantes sur l'incertitude totale. Il convient donc de ne pas trop rapprocher la caméra. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne, "l'incertitude pixel projectile" et "l'incertitude pixel calibre" augmentent, ce qui s'explique par le fait que la mesure de la distance parcourue par le projectile en nombre de pixels est de plus en plus faible, et qu'une erreur d'un pixel pèse donc d'autant plus. Le bruit augmente également pour les mêmes raisons. On voit particulièrement bien l'influence du phénomène de flou directionnel. En effet, lorsque la caméra est éloignée, le flou directionnel sollicite de moins en moins de pixels. A chaque diminution d'un pixel, le bruit de la courbe de l'incertitude to-

tale est radicalement changé. Les autres incertitudes restent relativement faibles sur l'intervalle considéré.

L'incertitude minimum est obtenue lorsque la distance est de 1,35 m. Cette incertitude est égale à 0,90 %. Cependant, le bruit est très fort dans cette partie du signal rendant la minimisation du bruit par l'ajustement de cette distance difficile en pratique. Il est techniquement plus facile de chercher le minimum de l'allure globale de la courbe, qui se situe entre 0,5 m et 1,5 m. Dans le cas défini de distance  $L = 0,7$  m, on retrouve bien l'incertitude totale de 1,33 %.

### 6.1.2.2 Influence de l'angle d'ouverture de la caméra

Comme on peut le voir sur la figure 6.10, l'incertitude est relativement peu influencée par l'angle d'ouverture de la caméra. Seules les incertitudes liées aux pixels sont augmentées, un pixel représentant de moins en moins d'espace réel au fur et à mesure que l'angle augmente. Le bruit augmente donc également, toujours à cause des erreurs de discrétisation. Un effet qui n'est pas développé est la distorsion radiale due à l'effet de perspective. Plus l'angle d'ouverture est important, plus cette distorsion est importante. Le cas n'est pas traité dans ce doctorat, dans la mesure où l'angle d'ouverture est contraint par le matériel disponible au laboratoire.

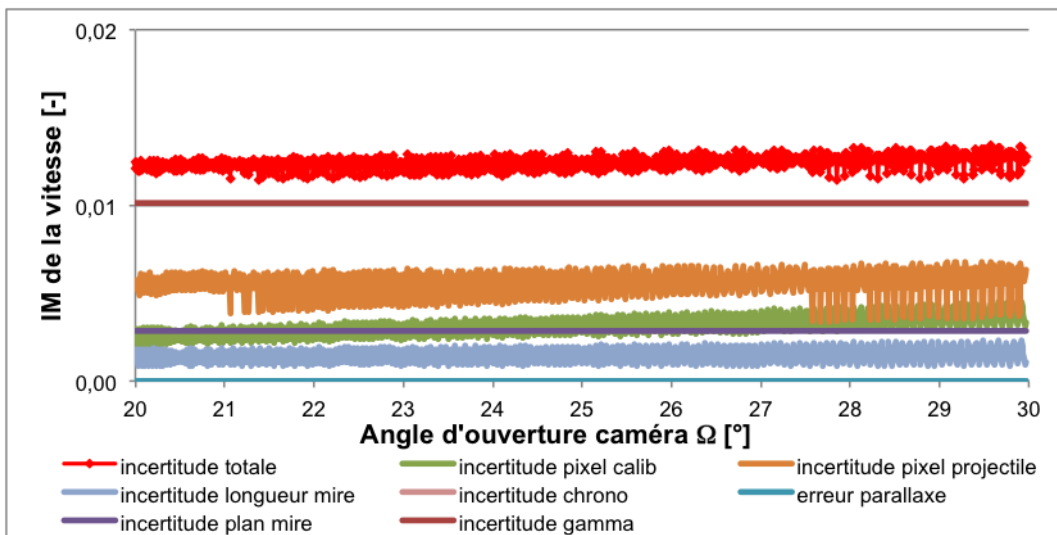


FIGURE 6.10. Influence de l'angle d'ouverture  $\Omega$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

### 6.1.2.3 Influence de la résolution géométrique de la caméra

Comme on peut le voir sur la figure 6.11, l'incertitude diminue naturellement lorsque la résolution géométrique augmente, ainsi que le bruit, ce qui s'explique par la diminution des erreurs de discrétisation. Seules les incertitudes liées aux pixels sont influencées.

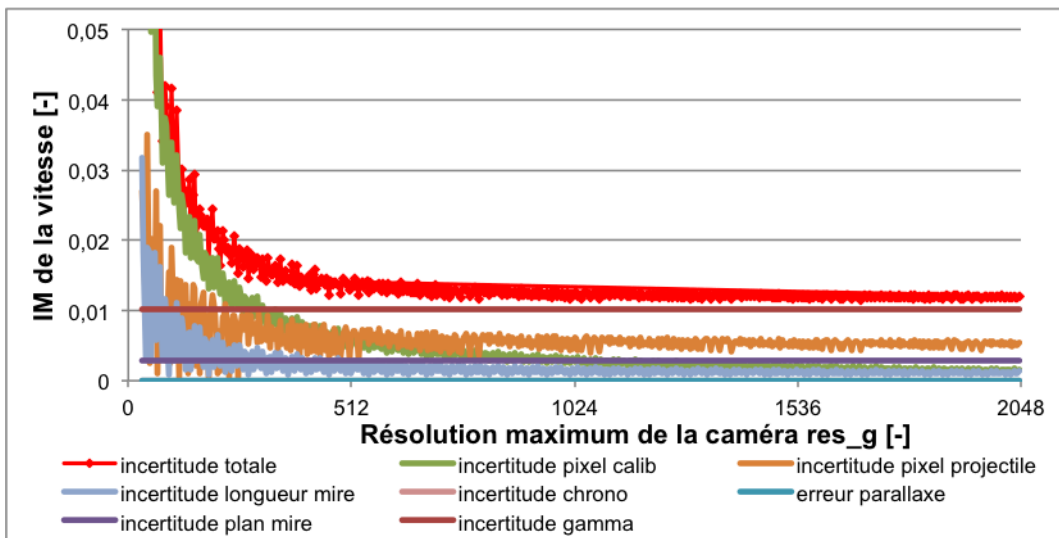


FIGURE 6.11. Influence de la résolution géométrique  $res_g$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

### 6.1.2.4 Influence de la fréquence d'ouverture de la caméra

Comme on peut le voir sur la figure 6.12, l'incertitude diminue naturellement lorsque la fréquence d'ouverture augmente. Seule l'incertitude liée à la mesure en pixels du mouvement du projectile est influencée, et ce par paliers très précis. Cette diminution de l'incertitude est due à la diminution du flou directionnel lorsqu'on augmente la fréquence d'ouverture. On voit que la valeur  $SS = 100000 Hz$  permet tout juste d'obtenir l'incertitude de 1,33 % qui est liée aux paramètres spécifiés dans la table 6.1. Les paliers suivants se situent à  $SS = 150000 Hz$  et  $SS = 250000 Hz$ , et seront visés pour les mesures présentées dans le chapitre suivant. Il serait intéressant d'essayer d'atteindre ces valeurs, en ajoutant la quantité de lumière nécessaire. Enfin, notons que les valeurs de  $SS$  correspondant à ces paliers sont influencées par la vitesse du projectile.

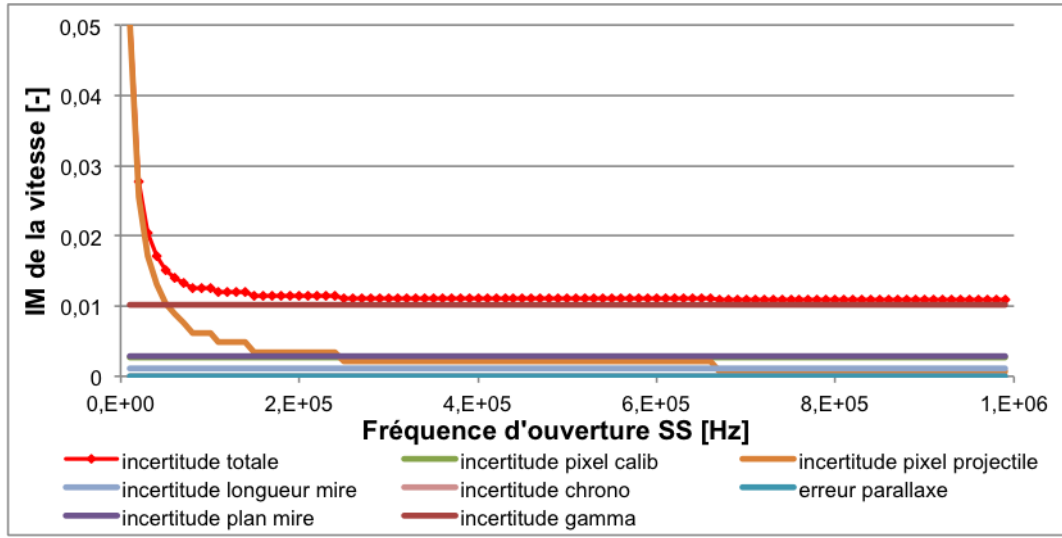


FIGURE 6.12. Influence de la fréquence d'ouverture de la caméra SS sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

#### 6.1.2.5 Influence de la distance $d_c$ sur laquelle la calibration de l'image est réalisée

Comme on peut le voir sur la figure 6.13, l'incertitude diminue lorsque cette distance augmente pour se stabiliser au delà de 100 mm. Seules les incertitudes liées aux mesures en pixels sont influencées. On déduit de ce graphe qu'il est intéressant de faire la calibration sur une distance la plus importante possible, qui sera contrainte par l'angle d'ouverture  $\Omega$  de la caméra, a priori fixé, et la distance  $L$  entre la caméra et la trajectoire de tir. La distance de calibration maximum est définie par :

$$(d_c)_{max} = 2L \tan(\Omega/2) \quad (6.23)$$

Comme une augmentation de  $L$  peut également aller de pair avec augmentation de l'incertitude (section 6.1.2.1), le choix de la distance  $L$  doit faire l'objet d'un compromis. En pratique, une distance de  $L$  égal à 0,6 m donne déjà une distance de calibration maximum  $d_c$  égale à 242,6 mm, qui est déjà dans la zone relativement plate. Une augmentation de  $L$  dans le but de diminuer l'incertitude liée à  $d_c$  n'est donc pas efficace puisqu'elle augmente alors également l'incertitude liée au flou directionnel et les incertitudes de calibration, comme visualisé sur la figure 6.9. En pratique, la distance  $L$  est donc dimensionnée en tenant compte d'une part de l'encombrement spatial du montage expérimental et d'autre part de l'incertitude de la mesure de la vitesse liée à la distance  $L$ .

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

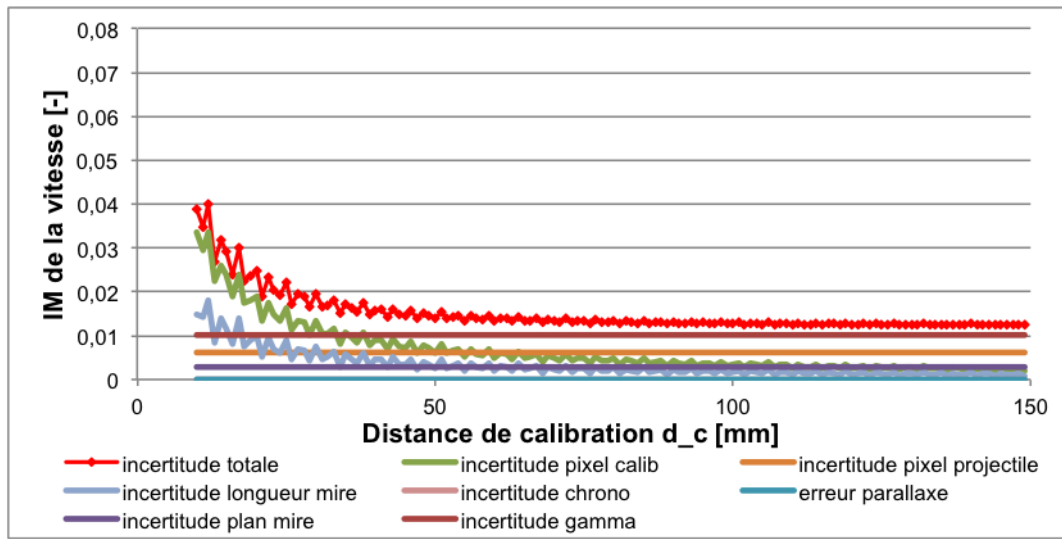


FIGURE 6.13. Influence de la distance  $d_c$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

### 6.1.2.6 Influence de la distance $d_p$ parcourue par le projectile

Comme on peut le voir sur la figure 6.14, une faible valeur de la distance  $d_p$  induit une incertitude relativement élevée. A partir de 60 mm, la valeur de l'incertitude devient raisonnable et descend sous la barre des 1,5 % d'incertitude. Par contre, plus étonnant, si cette valeur continue d'augmenter, l'incertitude va diminuer pour atteindre un minimum avant d'augmenter à nouveau.

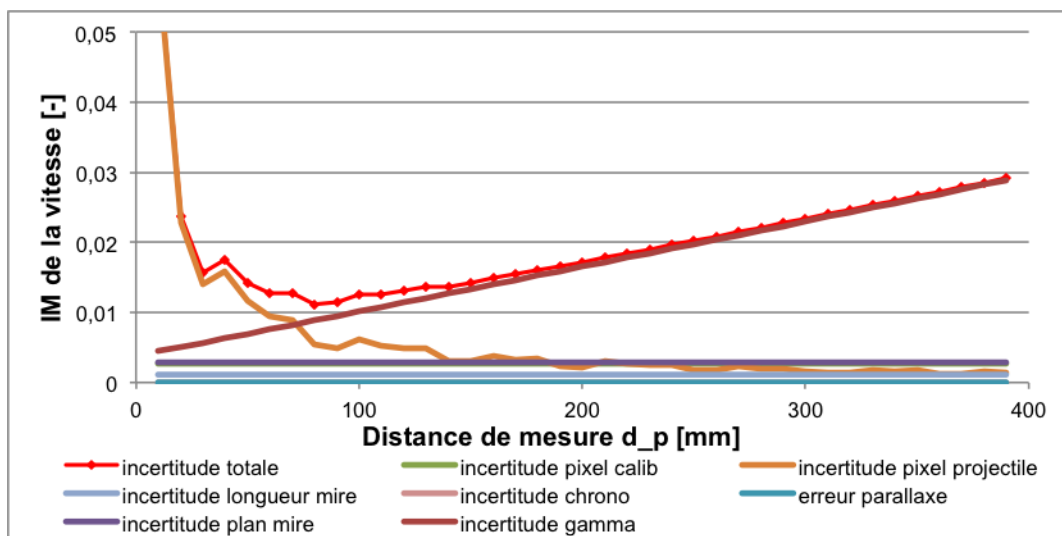


FIGURE 6.14. Influence de la distance  $d_p$  sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

Cette nouvelle augmentation est due à l'incertitude liée à l'angle  $\gamma$  qui est sans cesse croissante. Il convient donc de choisir une distance de mesure adéquate pour minimiser l'erreur. On constate que la valeur de 100 mm habituellement employée est proche du minimum.

### 6.1.2.7 Influence de la vitesse du projectile

Comme on peut le voir sur la figure 6.15, l'incertitude augmente avec la vitesse du projectile. Ceci est uniquement dû à l'effet de flou directionnel, qui se répercute dans "l'incertitude pixel calib". Ce graphe permet de dimensionner la fréquence d'ouverture par rapport à une vitesse de projectile supposée, de manière à s'assurer une incertitude de mesure voulue. Ce résultat est très intéressant car tant qu'on s'éloigne d'une valeur palier, l'incertitude de mesure de vitesse est insensible à la mesure elle-même. Cette constatation va permettre de calculer systématiquement l'incertitude réelle de la mesure de la vitesse réalisée par la caméra haute-vitesse à l'aide de la valeur mesurée. Comme la mesure est proche de la valeur réelle, un calcul de l'incertitude avec la mesure de vitesse ou sa valeur réelle donne exactement la même valeur. Cette constatation n'est plus valable si l'on franchit un palier sur le graphe, ce que l'on peut éviter en estimant grossièrement la vitesse, et en adaptant la fréquence d'ouverture en conséquence.

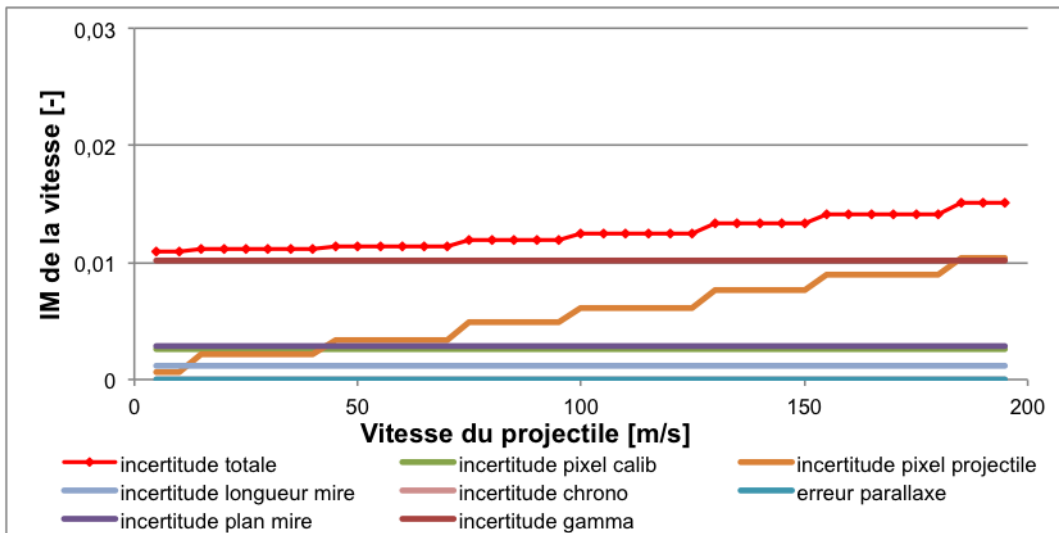


FIGURE 6.15. Influence de la vitesse  $v$  du projectile sur l'incertitude relative de la mesure de la vitesse.

### 6.1.3 Comparaison de l'incertitude théorique à l'erreur de vitesse mesurée expérimentalement

Cette dernière étape consiste à vérifier les résultats théoriques en les confrontant à des mesures expérimentales. Pour ce faire, un montage expérimental combinant prise de mesure de vitesse par base de mesure optique et par caméra haute-vitesse est réalisé. La base employée est celle de 25 cm, dont l'incertitude de mesure est approximée à 1 % (voir section 4.4). Le projectile choisi est un Brügger et Thomet SIR-X 40 mm, tiré à une vitesse de l'ordre de 60 m/s. Les paramètres du montage caméra employé sont définis dans la table 6.3. Ceux-ci ne sont pas optimisés.

paramètre	valeur
$L$ [m]	0,67745
$\Omega$ [°]	22,86
$FR$ [Hz]	50000
$res_g$ [-]	1024
$SS$ [Hz]	50000
$d_c$ [mm]	210
$d_p$ [mm]	250
$v$ [m/s]	60

**TABLE 6.3.** Les paramètres employés pour la comparaison de la mesure de vitesse à l'aide de la caméra et du logiciel de poursuite par rapport à celle de la base de mesure optique.

On retrouve dans la table 6.4 les résultats de ces essais, avec :

- $v_{cam}$ , la vitesse du projectile mesurée à l'aide de la caméra haute-vitesse et du programme de poursuite.
- $v_{Bmo}$ , la vitesse du projectile mesurée à l'aide de la base de mesure optique de 25 cm.

On constate d'une part que l'erreur de mesure relative de l'échantillon, caractérisée par le facteur  $\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$  est faible et inférieure à son écart-type, le résultat est donc peu biaisé. Dans le raisonnement qui suit, on s'intéresse uniquement à la dispersion des mesures, le biais sera donc considéré comme nul. On observe que l'incertitude totale, définie comme la moyenne quadratique de l'incertitude caméra et de l'incertitude de la base de mesure optique, est légèrement supérieure à deux écarts-type calculés sur l'échantillon. Ce résultat signifie que l'incertitude calculée est bien cohérente avec les résultats expérimentaux.



Tir	$v_{Bmo}$ [m/s]	$v_{cam}$ [m/s]	$\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$ [-]	Incertitude théorique [-]
1	56,87	56,42	-0,0079	0,0212
2	57,28	58,11	0,0145	0,0213
3	56,76	57,17	0,0073	0,0210
4	57,03	57,48	0,0079	0,0209
5	56,89	56,23	-0,0116	0,0208
6	56,84	57,89	0,0185	0,0214
7	55,91	56,77	0,0154	0,0216
8	51,74	51,92	0,0035	0,0214
9	54,58	55,34	0,0140	0,0212
10	56,04	55,63	-0,00734	0,0219
11	56,63	57,01	0,0068	0,0212
12	56,00	55,96	-0,0006	0,0214
13	56,91	56,85	-0,0011	0,0215
14	56,97	56,80	-0,0030	0,0218
15	55,41	55,10	-0,0056	0,0213
16	55,62	55,41	-0,0037	0,0218
17	55,52	56,28	0,0134	0,0215
18	56,16	57,03	0,0155	0,0217
19	57,05	57,81	0,0133	0,0216
20	56,19	57,17	0,0175	0,0216

Moyenne de l'erreur relative de l'échantillon  $\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$  [-] : 0,0053  
 Ecart-type de l'erreur relative de l'échantillon  $\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}$  [-] : 0,0098  
 Moyenne de l'incertitude théorique  $v_{cam}$  [-] : 0,0214  
 Incertitude de mesure  $v_{Bmo}$  [-] : 0,01  
 Incertitude totale [-] : 0,023577  
 2 écarts-type erreur relative de l'échantillon [-] : 0,0195  
 écarts-type réels erreur relative [-] : 0,0142  
 2 écarts-type réels erreur relative [-] : 0,0281

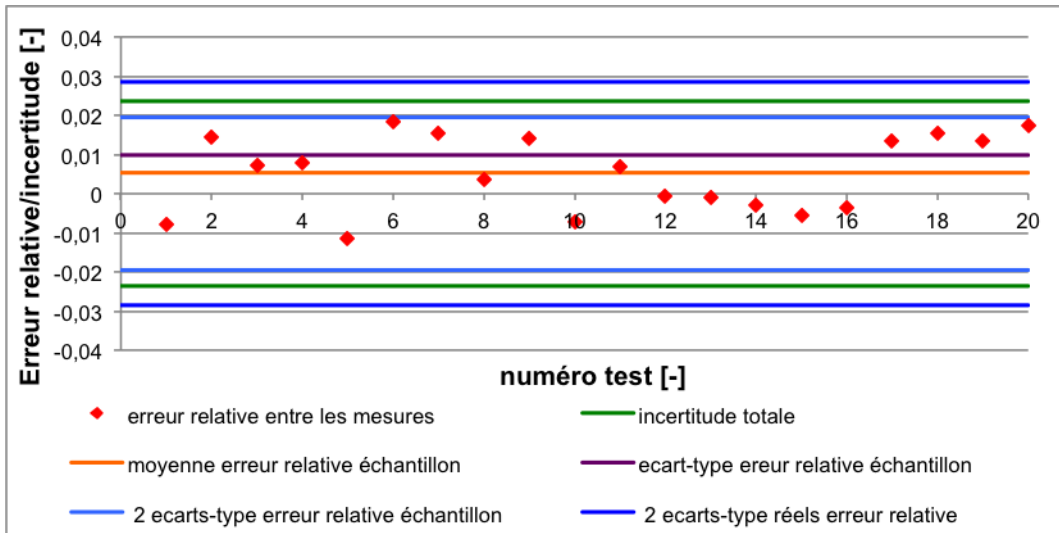
**TABLE 6.4.** Comparaison entre l'erreur de mesure de vitesse et l'incertitude théorique.

## 6.1 Estimation théorique de l'incertitude de mesure de la vitesse du projectile avant l'impact

L'écart-type réel de la mesure peut être majoré par rapport à la valeur fournie par l'échantillon représenté, avec une certitude de 95 %, grâce à la loi  $\chi^2$ , ce qui permet de tenir compte du nombre d'échantillons mesurés  $n$  [91] :

$$\sigma\left(\frac{(v_{Bmo}-v_{cam})}{v_{Bmo}}, reel\right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma^2_{(v_{Bmo}-v_{cam})}(n-1)}{v_{Bmo}^2 \chi^{2-1}(0,975; n-1)}\right)} = 0,0142 \quad (6.24)$$

où  $\chi^{2-1}$  est la loi de Khi carré inverse. On retrouve la valeur correspondante dans les tables statistiques. On constate cette fois que les 2 écarts-type réels sont légèrement supérieurs à l'incertitude théorique totale. Il conviendrait donc de reprocher à de nouveaux essais, avec un plus grand nombre d'échantillons, pour s'assurer définitivement de la validité de la mesure de l'incertitude. En attendant, les résultats sont considérés comme suffisamment proches pour déjà exploiter les mesures d'incertitudes définies. Cette situation est visualisée sur la figure 6.16.



**FIGURE 6.16.** Erreurs et incertitudes de mesure relatives entre la mesure de vitesse par base de mesure optique et par caméra haute-vitesse et incertitudes de mesures liées.

### 6.1.4 Conclusions sur l'incertitude de mesure de la vitesse

L'étude développée-ci dessus va apporter une quantité énorme d'informations qui vont permettre une meilleure précision de la mesure de vitesse. Les conclusions et perspectives sont les suivantes :

- tout d'abord, un ensemble de sources d'incertitudes a été listé et étudié. Cette étude permet de se faire une idée des phénomènes ayant une répercussion im-

portante sur la prise de mesure de vitesse à l'aide d'une caméra haute-vitesse. Huit sources d'incertitudes ont été étudiées, sept ont été quantifiées. On constate en particulier que le phénomène de flou directionnel, que l'angle  $\gamma$  et que les incertitudes de calibration vont avoir une influence importante sur l'incertitude de mesure de la vitesse. Certaines incertitudes ont une influence moindre, comme l'incertitude liée à la parallaxe, ou au chronomètre. Enfin, on constate que des incertitudes liées à la discrétisation du phénomène sont omniprésentes. Elles influencent toutes les mesures faisant intervenir une distance en pixels dans leur calcul, c'est-à-dire "*l'incertitude longueur mire*", "*l'incertitude pixel mire*", et "*l'incertitude pixel projectile*".

- De par ces résultats, l'utilisateur peut connaître quels sont les facteurs qu'il doit régler avec soin. Par exemple on constate que l'angle  $\gamma$  influence fortement l'incertitude de mesure. Il convient donc de disposer d'outils permettant de mesurer et régler cet angle avec la plus grande précision possible. Le phénomène de flou directionnel est également une source d'incertitude importante, la fréquence d'ouverture doit donc être choisie avec soin. En réduisant l'angle  $\gamma$  à  $1^\circ$ , en augmentant le  $SS$  à  $150000\text{ Hz}$  et en diminuant "*l'incertitude plan*" à  $1\text{ mm}$ , on peut obtenir une incertitude théorique de la mesure de vitesse par la caméra égale à  $0,99\%$ , du même ordre donc que celle de la base de mesure optique. Une perspective de cette étude sera donc de mettre au point un système mécanique/optique, permettant de minimiser l'angle  $\gamma$  et d'aligner parfaitement la mire de référence dans le plan vertical de la trajectoire de tir.
- Une étude de sensibilité des paramètres de la caméra et de l'incertitude induite a été réalisée. Elle donne des indications très précieuses pour bien choisir ces paramètres et les améliorer, dans le but de diminuer l'incertitude de mesure. Bien sûr d'autres choix matériels et d'autres contraintes existent pour choisir ces paramètres, qui sont liés au laboratoire et au matériel disponible. Des choix en conséquence seront opérés dans le chapitre suivant. En tenant compte de ces résultats, il est possible d'encore optimiser les paramètres pour encore réduire l'incertitude, et ce dans chaque conditions de tirs.
- Enfin, l'incertitude de mesure peut être quantifiée pour n'importe quelle valeur des paramètres choisis. Ce dernier point va permettre, à chaque mesure de vitesse, d'estimer l'incertitude liée à la mesure. Il s'agit d'une incertitude théorique maximum. Ce calcul est validé à l'aide de tests expérimentaux comparant l'incertitude théorique et une mesure de l'erreur commise calculée à l'aide d'une mesure de vitesse de référence fournie par une base de mesure optique.

- Ce calcul d'incertitude est intégré à la mesure de vitesse, si bien qu'à chaque mesure de vitesse réalisée à l'aide du logiciel de poursuite dédié, une mesure d'incertitude est associée.

Les paramètres employés pour les données présentées par la suite seront systématiquement présentés.

## 6.2 Détermination de l'incertitude de mesure d'un déplacement

Cette section étudie le déplacement horizontal d'un projectile non-létal pendant l'impact sur un mur rigide. Pour cette mesure, on emploie également le logiciel de poursuite. L'utilisateur définit à l'étape "*pré-processing*" (voir section 5.3.2) une ligne horizontale sur la trajectoire du projectile. Si le projectile est tiré de la gauche vers la droite de l'image, comme c'est le cas pour l'ensemble des essais réalisés pendant ce doctorat, le point de catégorie 1 le plus à gauche sur cette ligne correspond à l'arrière du projectile. Lorsque l'impact commence, puisque la cible est supposée indéformable, le déplacement de ce point va correspondre à l'enfoncement du projectile au cours du temps. Un exemple est présenté sur la figure 5.8 dans la section 5.3.4.

A la lumière de l'ensemble des résultats obtenus dans la section précédente, l'incertitude liée à la mesure du déplacement du projectile à l'aide de la caméra haute vitesse peut être déduite. Pour ce faire, de manière à simplifier le problème, seules "*l'incertitude  $\gamma$* ", "*l'incertitude plan mire*", "*l'incertitude pixel mire*" et "*l'incertitude pixel projectile*" sont considérées. Ces quatre incertitudes sont prépondérantes tant que la distance de mesure reste en dessous de 250 mm (figure 6.14), ce qui est bien le cas pour l'ensemble des mesures de déplacement qui sont effectuées dans ce doctorat. Des résultats correspondants aux paramètres montage caméra définis dans la table 6.1 sont présentés sur la figure 6.17.

On approxime l'incertitude liée au flou directionnel sur une courbe de déplacement à une incertitude systématique, qui définit un couloir dans lequel se trouve la courbe nominale (c'est-à-dire la courbe issue du logiciel de poursuite sans considération d'incertitude). Le flou directionnel défini correspond au flou lorsque la vitesse du projectile maximum. Sur la figure 6.17, la distance verticale systématique entre la courbe nominale et la courbe tenant compte du flou directionnel est la traduction du nombre de pixel considéré pour le calcul du flou directionnel, traduit en dimensions réelles à l'aide du facteur de calibration nominal.

L'incertitude liée à l'angle  $\gamma$  évolue en fonction de la distance parcourue. Le couloir autour de la courbe nominale aura donc tendance à s'agrandir lorsque la valeur de la distance parcourue augmente, et vice versa. C'est également le cas pour l'incertitude liée au plan de la mire.

En prenant ces informations en compte, on peut définir des corridors dans lesquels se trouve la courbe nominale, et représentant l'incertitude de la mesure. L'incertitude totale est définie comme la somme quadratique des différentes sources d'incertitudes, en chaque point de la courbe, selon le théorème central limite [87]. La courbe réelle se trouve alors théoriquement, selon l'approche suivie, à l'intérieur de ces corridors. Ces corridors sont illustrés sur la figure 6.17 pour la mesure du déplacement horizontal d'un projectile Nobel Sport impactant le capteur rigide à 60 m/s. Pour un déplacement, faible, l'incertitude du flou directionnel est prépondérante (en accord avec la figure 6.14), alors que pour un déplacement plus important, les incertitudes de l'angle  $\gamma$  et de calibration sont plus importantes. Les corridors sont symétriques par rapport à la courbe nominale. L'incertitude maximum est de 0,18 mm et est atteinte au maximum de la courbe, ce qui représente 0,74 % de la valeur nominale de la courbe en ce point. L'incertitude en % évolue tout au long de la courbe en raison de l'incertitude systématique due au flou directionnel. Elle tend vers l'infini en zéro, (en accord avec la figure 6.14). Il est donc plus intéressant de regarder l'incertitude maximum absolue, et de traduire cette valeur en incertitude relative en ce point. Ce paramètre sera l'indicateur numérique de l'incertitude des courbes de déplacement pour les mesures présentées dans le chapitre suivant. Le calcul est généralisable aux autres déplacements mesurés à l'aide de la caméra haute-vitesse.

## 6.2 Détermination de l'incertitude de mesure d'un déplacement

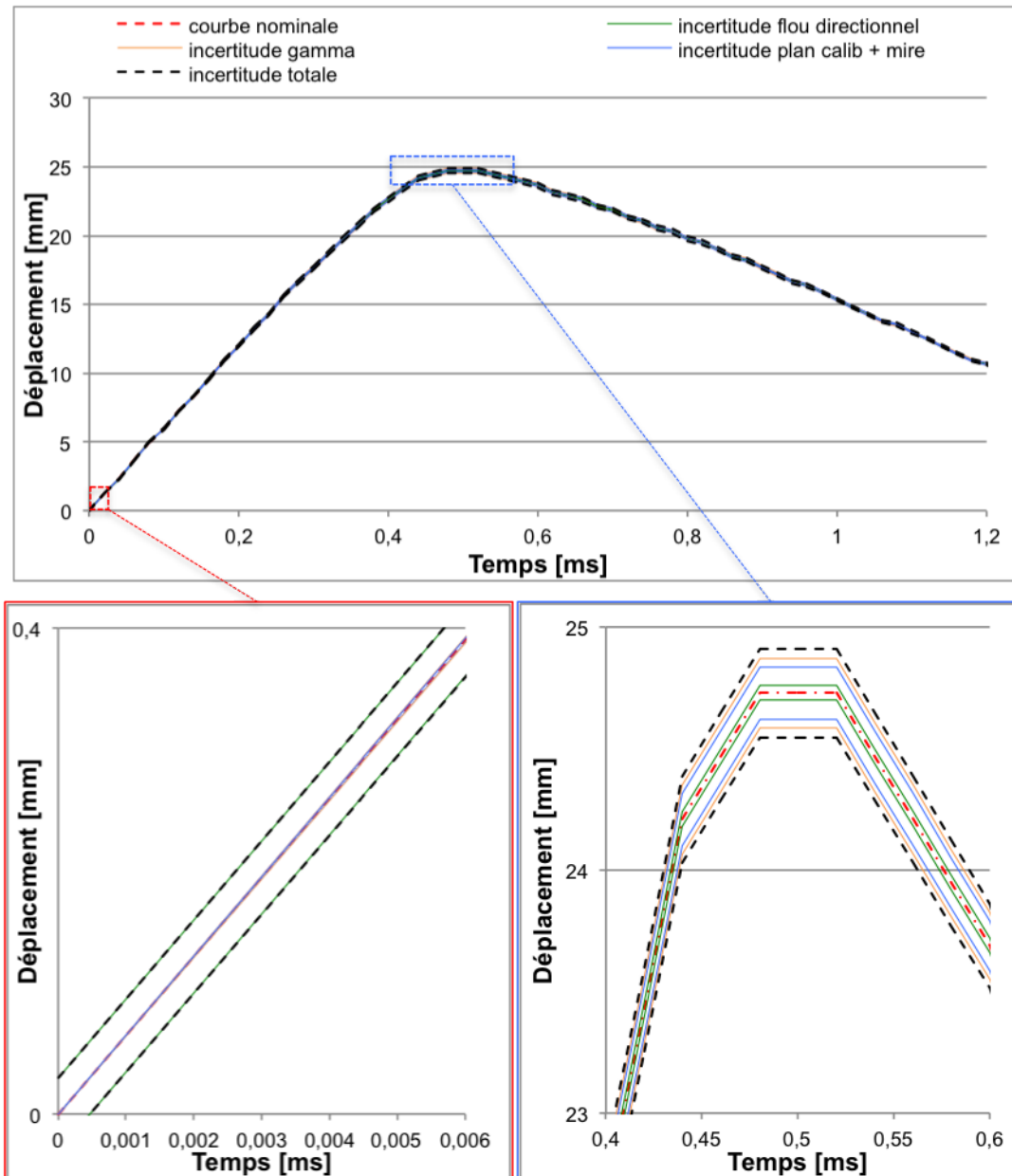


FIGURE 6.17. Détermination d'un corridor tenant compte de l'incertitude de la mesure de déplacement horizontal d'un projectile Nobel Sport impactant une surface rigide à 60 m/s.

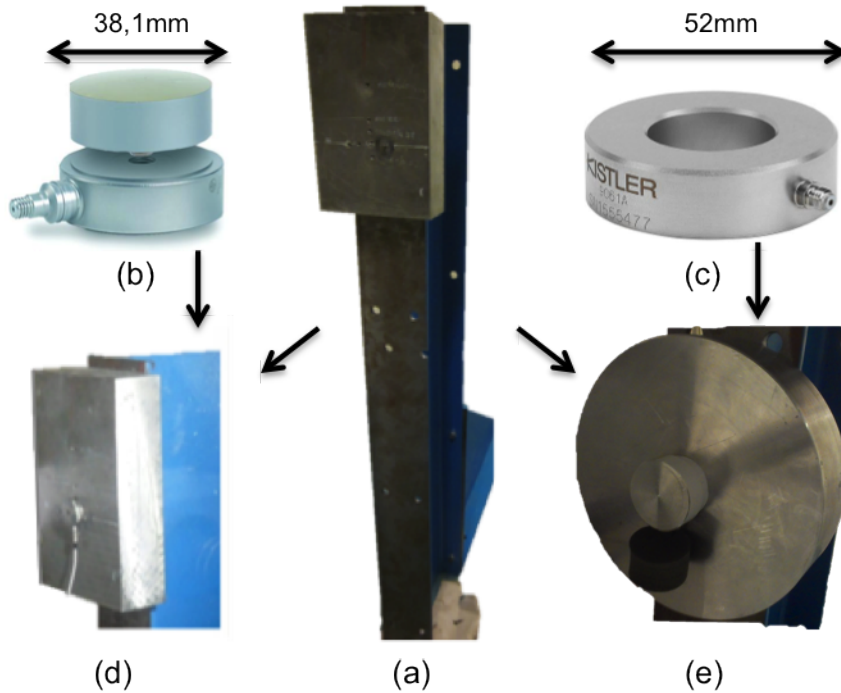
## 6.3 Validation de la mesure de force et détermination de l'incertitude liée

### 6.3.1 Le montage "*mur rigide*"

La validation de la mesure de force sur le montage "*mur rigide*" est une étude complexe dont les résultats sont primordiaux. Au départ de ce travail, le département ne disposait d'aucune expertise dans le domaine de l'étude de la force d'impact. L'objectif est donc de mettre au point la mesure de manière à ce que celle-ci soit exploitable, validée, et que la question de l'incertitude soit abordée. Il s'agit d'une étude essentielle de ce doctorat. Deux montages différents sont testés, chacun accueillant un capteur de force piézoélectrique différent. Le premier capteur est un capteur PCB200C20, dont le signal est traité à l'aide d'une alimentation/amplificateur 482B11, le deuxième est un capteur Kistler 9061A, dont le signal est traité à l'aide d'un amplificateur de charge Kistler 4603B (caractéristiques en annexe H). L'acquisition des deux capteurs se fait à l'aide d'une unité PXI NI BNC-2110, munie d'une carte d'acquisition PCI-6110 (voir H). L'ensemble de la chaîne et le montage du capteur est systématiquement étudié. Leur montage respectifs, baptisés "*montage PCB*" et "*montage Kistler*", sont présentés sur la figure 6.18 et schématisés sur la figure 6.19. Les composants en présence sont les suivants (avec la numérotation correspondante sur la figure 6.19) :

- (1) les capteurs.
- (2) Les palets d'impact. Dans le cas du capteur PCB, il s'agit simplement d'une petite pièce cylindrique bombée, vissée au capteur à l'aide des éléments de fixation (4). Son poids est de 76 g, et son diamètre est égal à 32,7 mm. Dans les cas du capteur Kistler, il s'agit d'une pièce multicylindrique disposant de trois diamètres différents. Un premier disque qui sert de palet d'impact, fait 60 mm de diamètre, et son épaulement permet également de coincer le capteur contre la structure rigide (3). Le deuxième diamètre fait 26,5 mm et traverse le capteur et la structure rigide. Ce diamètre sert à aligner les différents alésages. Le troisième diamètre est fileté M16 et permet d'accueillir les éléments de fixation qui permettront de serrer le capteur en sandwich entre le palet (2) et la structure rigide (3). La pièce fait 229 g au total.
- (3) La structure rigide sur laquelle le capteur est fixé.
- (4) Eléments de fixation du capteur PCB qui consiste en deux tiges filetées, l'une fixant le palet d'impact au capteur, l'autre fixant le capteur à la structure rigide.

- (5) Éléments de fixation du capteur Kistler. Il s'agit d'une rondelle et d'un écrou pouvant se serrer sur la structure rigide (3), ce qui permet le serrage du capteur (1) entre le palet (2) et la structure (3).



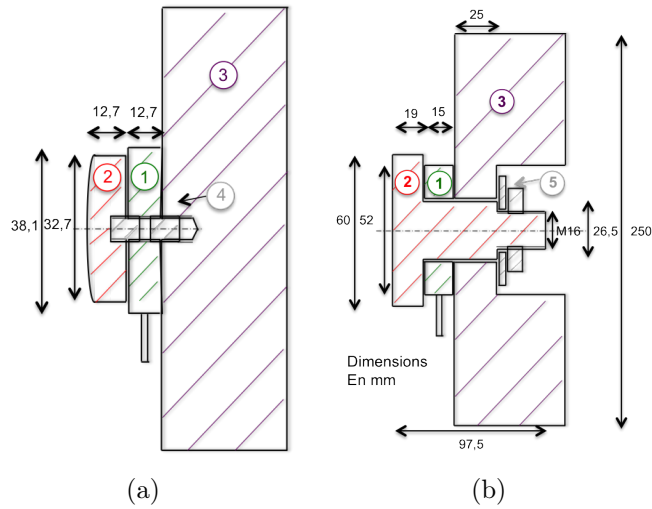
**FIGURE 6.18.** Le setup mis en place pour le mur rigide : (a) structure rigide, (b) le capteur PCB200C20, (c) le capteur Kistler 9061a, (d) l'assemblage vissé du capteur PBC ("montage PCB"), (e) l'assemblage en sandwich du capteur Kistler 9061a ("montage Kistler").

Des essais préliminaires avec le capteur PCB ont permis de conclure que la mesure présente un caractère moins oscillant en enlevant le palet d'impact. Comme on peut le constater sur la figure 6.20 que la courbe sans palet présente le même profil de courbe, avec néanmoins moins d'oscillations post-impact. Cette pré-étude met en évidence un problème de métrologie essentiel. La mesure effectuée ne dépend pas uniquement du capteur employé mais plutôt de l'ensemble du montage permettant la mesure. En particulier, il convient d'être attentif à la réponse fréquentielle du montage de mesure. Si le phénomène à mesurer se rapproche d'une ou plusieurs fréquences de résonance (ou fréquence propre) du système de mesure, des erreurs surviennent<sup>6</sup>. Pour dimensionner les caractéristiques fréquentielles de la mesure réalisable à l'aide d'un montage, deux phénomènes sont à prendre en compte : la fréquence maximum du phénomène que le capteur peut mesurer, et les fréquences de résonance du montage qui vont amener des erreurs de mesure.

---

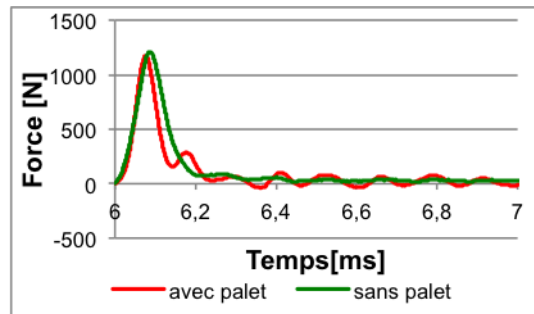
6. [http://www.omega.fr/prodinfo/cellules-de-charge\\_fr.html](http://www.omega.fr/prodinfo/cellules-de-charge_fr.html), consulté en mars 2013.





**FIGURE 6.19.** Les deux montages de fixations des capteurs piézoélectriques :  
 (a) le "montage PCB", (b) le "montage Kistler".

Les spécifications des capteurs mentionnent les informations suivantes : la limite fréquentielle du capteur PCB est fixée à 40 kHz. Les spécifications ne mentionnent toutefois pas quelle est la fréquence de résonance du capteur. Les spécifications du capteur Kistler mentionnent une fréquence de résonance de 48 kHz, sans spécifications de fréquence maximum. Des essais sont nécessaires pour déterminer l'ensemble des fréquences de résonance des montages envisagés, et les fréquences maximum mesurables.



**FIGURE 6.20.** Mesure de l'impact d'un projectile FN303 à 32 m/s sur le capteur PCB200C20 avec et sans palet d'impact.

### 6.3.2 Validation des mesures

La validation de la mesure est basée sur quatre points.

- Tout d'abord, la première étape consiste à regarder si les mesures issues de ces capteurs sont répétables, ce qui est une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour garantir une bonne mesure.
- La deuxième démarche de validation consiste à comparer les mesures issues de ces deux systèmes de mesure et d'en tirer les conclusions adéquates.
- La troisième étape consiste à réaliser une comparaison de mesures de force avec un signal de force de référence qui est maîtrisé. Cette mesure de force de référence consiste en la mesure de compression d'un ressort, lors de l'impact d'une masse sur celui-ci. Pour ce faire, une structure mécanique est développée pour l'occasion, baptisée "*calibrateur*".
- Enfin, une dernière piste consiste à comparer la mesure à d'autres mesures réalisées à l'aide de la caméra haute-vitesse. Le principe est alors de calculer l'évolution de la quantité de mouvement transmise au capteur au cours du temps, en intégrant le signal de force obtenu. Ce signal est alors comparé à la mesure de quantité de mouvement calculée à l'aide de la mesure de vitesse au cours du temps, grâce à la caméra haute-vitesse, et à la détermination de la masse du projectile par pesée.

Les sections qui suivent parcourent ces quatre points.

#### 6.3.2.1 Etude de répétabilité des mesures issues des deux capteurs de force

Dans un premier temps, une étude de répétabilité des deux systèmes est réalisée. Quelques résultats ont déjà été présentés en ce qui concerne le capteur PCB dans la section 4.5.1.2. Il reste donc à présenter des résultats du capteur Kistler. On présente sur la figure 6.21 des résultats de tir FN303 à différentes vitesses.

On constate que la répétabilité est excellente. Par contre, l'allure et le maximum de la courbe diffèrent des résultats mesurés à l'aide du capteur PCB. La comparaison fait l'objet de la section suivante.

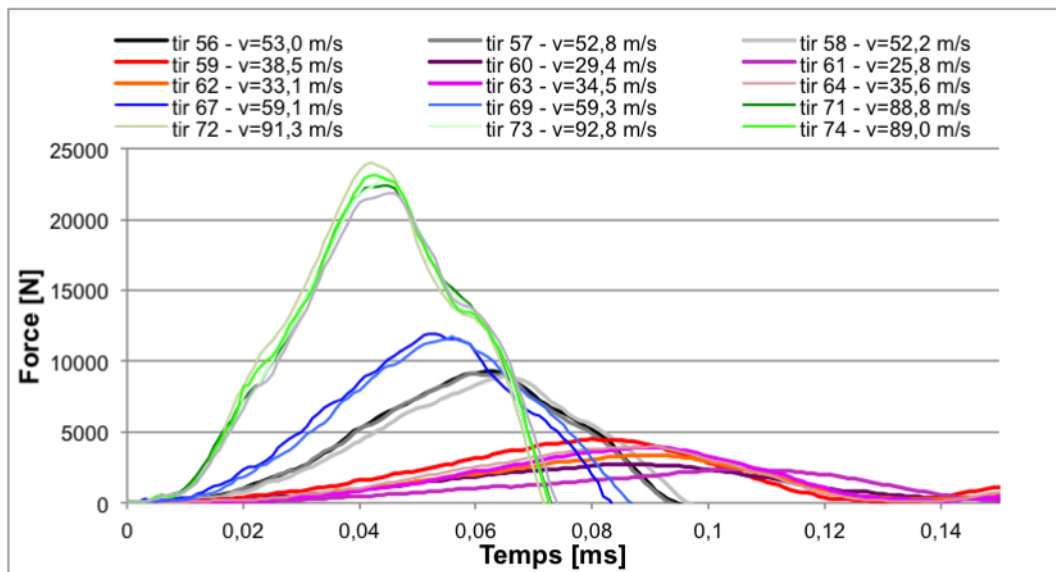


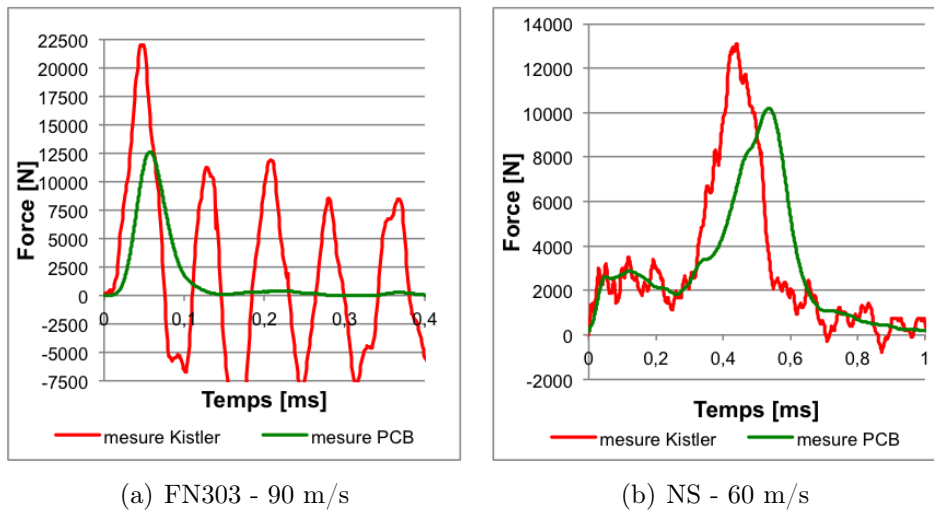
FIGURE 6.21. Exemple de répétabilité de la mesure de la force avec le montage Kistler.

### 6.3.2.2 Comparaison des résultats mesurés par les deux capteurs de force

On présente sur le graphe 6.22 une comparaison d'impacts identiques réalisés respectivement sur le montage Kistler et sur le montage PCB. Deux phénomènes sont observables :

- d'une part, les courbes issues du montage PCB sont beaucoup plus lisses que les courbes issues du montage Kistler. Pour ce dernier, les pentes sont plus raides, et les maximums sont plus importants. Au vu de ces courbes, il semblerait que la fréquence maximum du phénomène mesurable soit plus importante pour le capteur Kistler que pour le capteur PCB. Ce phénomène est dû aux limitations fréquentielles du capteur PCB ; fixée à 40 kHz.
- D'autre part, des oscillations non négligeables sont encore présentes sur la courbe de mesure du montage Kistler après l'impact. Vraisemblablement, certaines fréquences de résonances du montage sont atteintes, et le montage continue donc de vibrer après l'impact.

Une analyse fréquentielle de ces courbes pourrait apporter des indications sur ces deux points. Pour cela, on utilise l'outil "Auto Power Spectrum" de LabVIEW. Cette opération donne l'analyse fréquentielle réelle du signal sans information sur la



**FIGURE 6.22.** Comparaison des signaux de force issus d'impacts mesurés par le montage Kistler et le montage PCB.

phase, à l'aide d'une combinaison de transformations de Fourier<sup>7</sup>. Le résultat donne un graphe de la valeur efficace de l'unité considérée en fonction de la fréquence du phénomène<sup>8</sup>. Une fréquence fortement présente sur la courbe aura une valeur efficace importante et vice versa. On s'intéresse ici à l'allure générale des résultats générés par la transformation. Plus les valeurs de la courbe générée est élevée pour une fréquence donnée, plus le signal considéré contiendra de l'énergie à cette fréquence. On présente sur la figure 6.23 la comparaison de l'analyse fréquentielle réalisée pour les deux capteurs.

On constate dans les deux cas que le contenu fréquentiel chute pour le montage PCB à une valeur proche de 30 kHz (ce qui se rapproche de la fréquence limite mentionnée dans les spécifications), tandis que le montage Kistler présente un contenu fréquentiel toujours important au delà de cette valeur. On en tire la conclusion que le montage PCB ne dispose pas d'une fréquence de mesure suffisante pour mesurer certains phénomènes envisagés. Il est donc décidé de l'exclure.

Une autre question se pose en ce qui concerne les fréquences de résonances du montage Kistler. Pour étudier la question, une étude fréquentielle du signal post-impact du projectile NS et du FN303, après 1 ms, est réalisée. Passé cette valeur, le signal observé n'est plus que du bruit mécanique, dû aux vibrations du montage. Le résultat est présenté sur la figure 6.24.

7. Plus d'informations sont présentes à l'adresse suivante : <http://www.ni.com/white-paper/4541/en>, consulté en février 2013.

8. plus d'informations sur la valeur efficace d'un signal fréquentiel sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.referencedesigner.com/rfcal/vrms-to-vpeak-conversion.php>, consulté en février 2013.

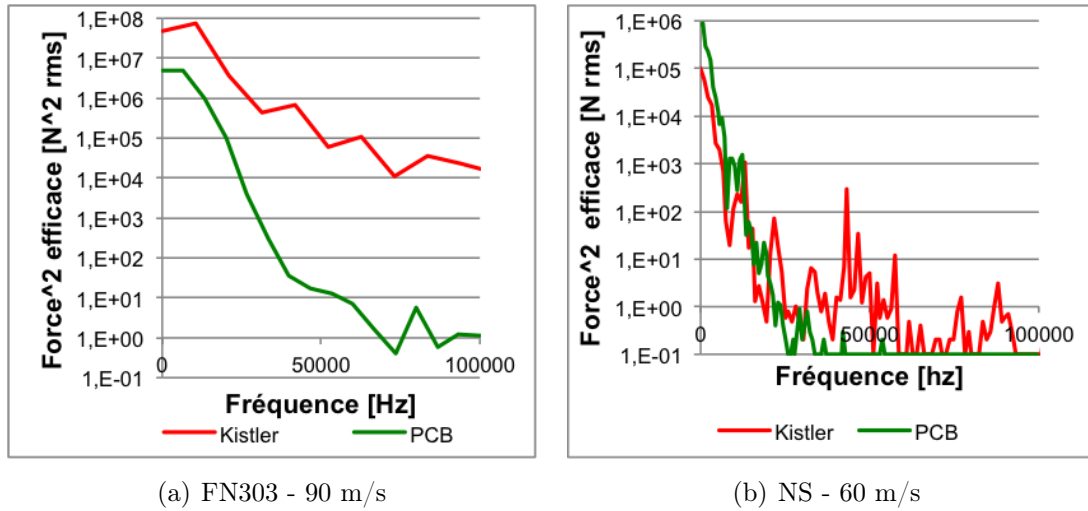


FIGURE 6.23. Comparaison des signaux de force issus d'impacts mesurés par le montage Kistler et le montage PCB.

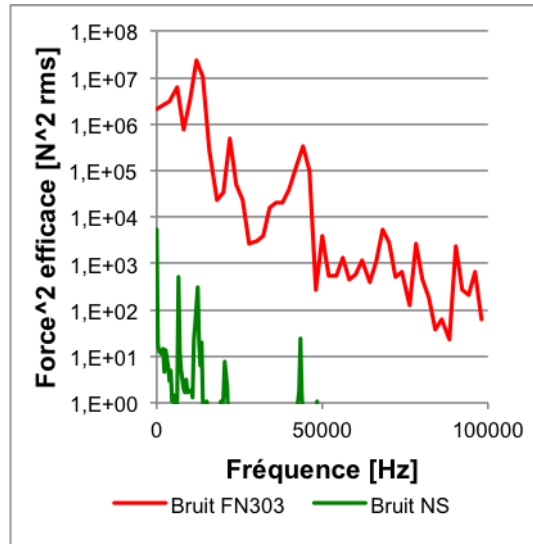


FIGURE 6.24. Comparaison de la réponse fréquentielle du bruit du signal Kistler après impact, pour l'impact d'un FN303 à 90 m/s et l'impact d'un Nobel sport à 60 m/s.

On constate que pour les deux signaux, des pics sont observés respectivement aux environs de 6000 Hz, de 12000 Hz, de 22000 Hz, et de 44000 Hz. Cette dernière valeur correspond à la fréquence de résonance du capteur. Les autres valeurs sont probablement des fréquences de résonances d'autres éléments du montage, et des multiples de ces valeurs. On en conclut que les signaux obtenus seront erronés pour ces valeurs fréquentielles. Pour éviter ce phénomène, il convient de changer la géométrie ou les matériaux du montage, et/ou de changer le capteur. Un filtrage passe bande est également envisageable. Pour ce doctorat, il est décidé de poursuivre avec ce montage, tout en étant conscient des erreurs possibles de ce fait. L'amélioration du montage sera donc une des perspectives principales de ce travail.

#### 6.3.2.3 Comparaison des résultats mesurés par le capteur de force et par la déformation d'un ressort

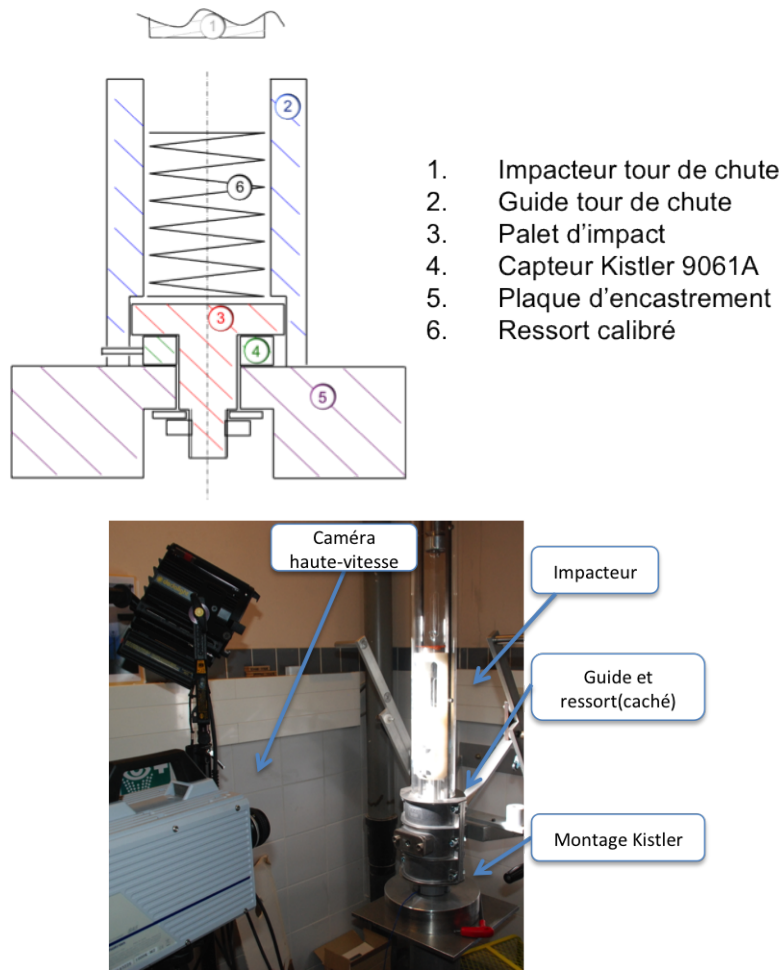
Un montage particulier, appelé "*calibrateur*", est développé pour valider la mesure issue du montage Kistler. Celui-ci consiste en une structure mécanique, un ressort, et une masse qui impacte le ressort. Celui-ci est alors comprimé et exerce à son tour une force de réaction qui est directement mesurée par le capteur. Connaissant les caractéristiques du ressort, si l'on suppose que la raideur est constante et que phénomène est étudié uniquement sur l'axe ressort-capteur de force, on peut calculer la force exercée par celui-ci en observant sa déformation au cours du temps, selon la formule

$$F = k_{ressort}\Delta x \quad (6.25)$$

où,

- $F$  est la force exercée par la masse impactant le ressort selon l'axe étudié, qui est égale à la force de réaction du ressort, appliquée sur le capteur. la force est exprimée en  $N$ .
- $k_{ressort}$  est la constante de raideur du ressort selon l'axe étudié. Cette raideur est exprimée en  $N/m$ .
- $\Delta x$  est la variation de longueur du ressort selon l'axe étudié.  $x$  est exprimé en  $m$ .

le ressort est aligné avec le capteur de manière à ce que la force produite par celui-ci soit intégralement mesurée par le montage Kistler. L'ensemble de la structure est schématisée sur la figure 6.25.



**FIGURE 6.25.** Le calibrateur permettant la calibration du montage Kistler à l'aide de la mesure de la déformation d'un ressort.

La mesure de force à l'aide du montage Kistler est réalisée à l'aide du facteur de calibration nominal du capteur  $k_{nominal,Kistler}$ . Or le facteur réel, de par le montage réalisé, est certainement différent de celui-ci. Ce calibrateur va donc servir à calculer un nouveau facteur de calibration qui est défini comme le rapport des forces maximum obtenues à l'aide des deux mesures :

$$k_{correction,Kistler} = \frac{F_{max,Kistler}}{F_{max,ressort}} \quad (6.26)$$

où

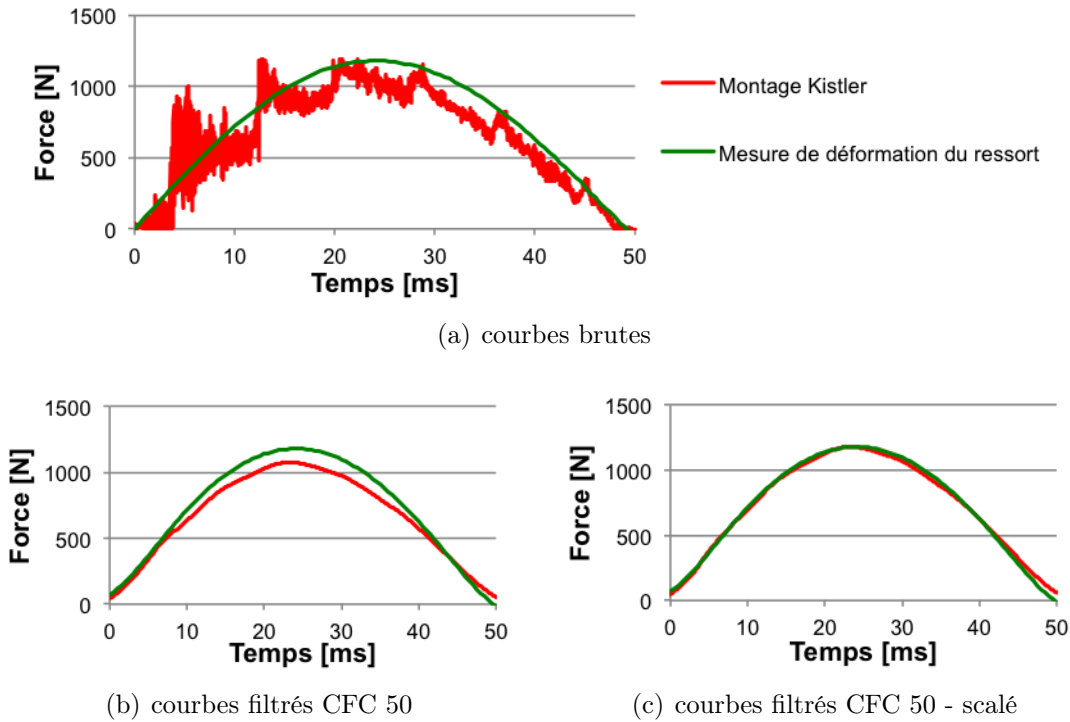
- $k_{correction,Kistler}$  est un facteur de correction du facteur de calibration Kistler, calculé à l'aide du calibrateur.
- $F_{max,kistler}$  est le maximum de la force mesurée à l'aide du montage Kistler, en [N], calculé à l'aide du facteur  $k_{nominal,Kistler}$ .

### 6.3 Validation de la mesure de force et détermination de l'incertitude liée

- $F_{max,ressort}$  est le maximum de la force mesurée à l'aide de la mesure de déformation du ressort, en [N].

La déformation du ressort est mesurée à l'aide d'une caméra haute-vitesse et du logiciel de poursuite. Un calcul d'incertitude sur la mesure de compression du ressort est réalisé à l'aide des résultats de la section 6.2, et donne une incertitude maximum de 0,4 mm sur la mesure de compression du ressort, ce qui correspond à moins de 0,87 % du déplacement total. Même si la précision du facteur de raideur  $k_{ressort}$  n'a pas été estimée, on considère la mesure comme fiable.

On retrouve sur la figure 6.26(a) la comparaison entre les mesures de force fournies par le montage Kistler et par la mesure de déformation du ressort.



**FIGURE 6.26.** Résultat du calibrateur : comparaisons entre les mesures de force du montage Kistler et de la déformation du ressort.

On observe de nombreuses oscillations sur la courbe de mesure de force du montage Kistler. On suppose que ces oscillations sont dues à une non constance du facteur de raideur du ressort  $k_{ressort}$  et à une interaction entre le ressort et le montage. On peut réduire l'influence de ce phénomène en filtrant les courbes, ce qui a été réalisé sur la figure 6.26(b). Enfin, le nouveau facteur de calibration est calculé comme le rapport des maximum des deux courbes.



Ce rapport est égal à 0,91 sur la figure 6.26. En tenant compte de celui-ci, on peut redessiner la courbe de force du montage Kistler, comme présenté sur la figure 6.26(c). On retrouve alors deux courbes quasiment identiques.

Cette opération a été réalisée une trentaine de fois, pour obtenir un rapport  $k_{correction,Kistler}$  statistiquement significatif. Les résultats sont exposés sur la table 6.5. L'écart-type est de 2,3 % de la valeur moyenne, ce qui semble être une précision tout à fait raisonnable.

Paramètre statistique de $k_{correction,Kistler}$	valeur
Moyenne [-]	0,875
Ecart-Type [-]	0,02
Ecart-type/Moyenne [-]	0,023

**TABLE 6.5.** *Résultat des essais de calibration du montage Kistler à l'aide du calibrateur.*

### 6.3.2.4 Bilan de quantité de mouvement lors d'un impact d'un projectile non-létal sur le capteur Kistler

Une dernière méthode pour pouvoir s'assurer de la fiabilité de la mesure de force est de procéder à un bilan de quantité de mouvement lors de l'impact du projectile non-létal sur le montage Kistler. Pour ce faire, on mesure à l'aide du logiciel de poursuite la position du centre de gravité d'un projectile non-létal pendant son impact sur le montage Kistler. On en déduit la vitesse de ce point au cours du temps. Connaissant la masse du projectile (supposée constante) on peut calculer à tout instant la quantité de mouvement du projectile  $m\vec{v}(t)$ . Cette mesure va pouvoir être comparée à l'intégrale temporelle de l'ensemble des forces appliquées sur le projectile, selon la deuxième loi de Newton sous sa forme intégrée :

$$\vec{p}(t) = m\vec{v}(t) = \int_0^t \vec{F}_i(t)dt \quad (6.27)$$

où

- $\vec{p}(t)$  est le vecteur quantité de mouvement au cours du temps, la quantité de mouvement est exprimée en  $kg\ m/s$ .
- $m$  est la masse du projectile, supposée constante pendant l'impact, en  $kg$ .
- $\vec{v}(t)$  est le vecteur vitesse du centre de gravité du projectile au cours du temps, la vitesse est exprimée en  $m/s$ .

### 6.3 Validation de la mesure de force et détermination de l'incertitude liée

---

- $\vec{F}_i(t)$  est l'ensemble des forces  $i$  agissant sur le projectile au cours du temps, les forces sont exprimées en  $N$ .

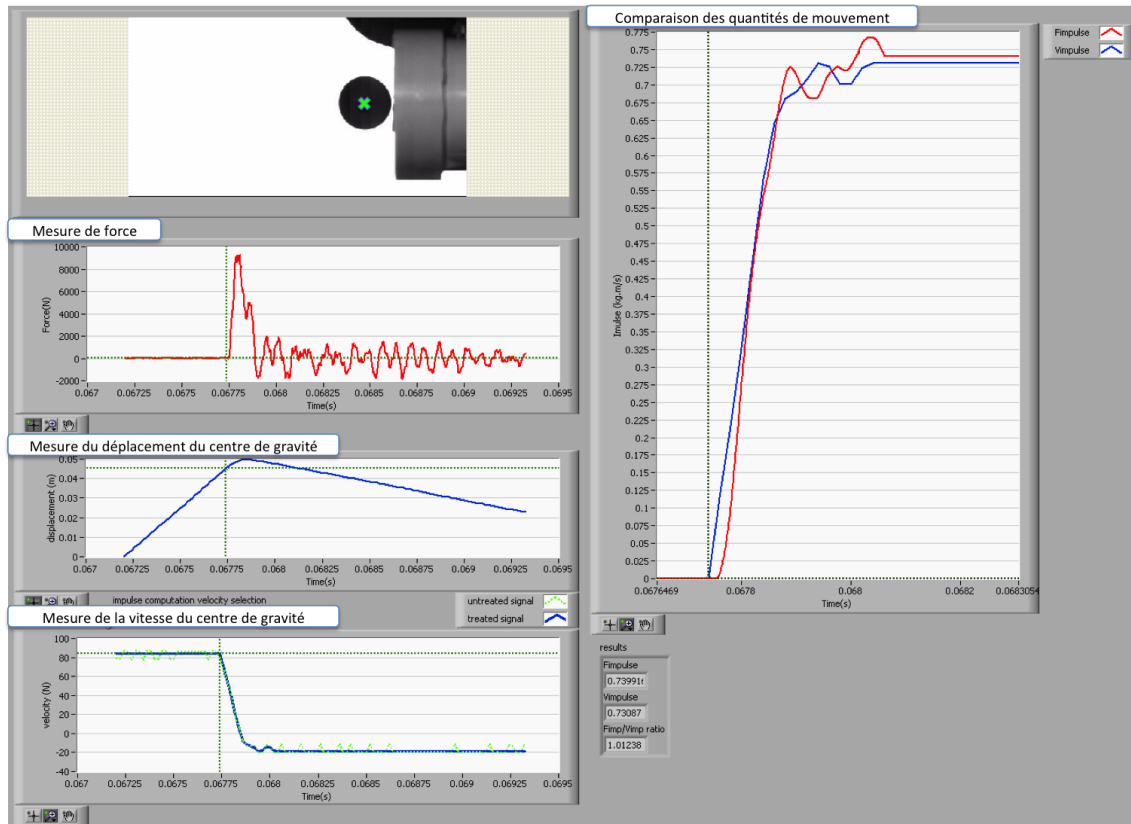
Si les forces de frottement dans l'air et la force de gravité sont négligeables, on peut supposer que l'unique force agissant sur le projectile est la force de réaction du montage Kistler pendant l'impact. Cette égalité permet de comparer l'intégrale du signal de force mesuré à l'aide du capteur de force, calculée numériquement, à l'évolution de la quantité de mouvement du projectile. Si le mouvement étudié est parfaitement rectiligne sur l'axe rectiligne de la trajectoire de tir, confondue avec l'axe du capteur de force, il reste :

$$p = \int_0^{t_{final}} F(t)dt = mv_1 + mv_2 \quad (6.28)$$

où

- $p$  est la norme du vecteur quantité de mouvement selon l'axe mentionné.  $p$  est exprimé en  $kg\ m/s$ .
- $t_{final}$  est la durée de l'impact, en  $s$ .
- $F(t)$  est le signal de force mesuré par le montage Kistler, en  $N$ .
- $v_1$  est la norme du vecteur vitesse du centre de gravité du projectile sur la trajectoire de tir, avant l'impact, en  $m/s$ .
- $v_2$  est la norme du vecteur vitesse du centre de gravité du projectile sur la trajectoire de tir, après l'impact, en  $m/s$ .

Une exemple de ce calcul à l'aide du logiciel de poursuite est présenté sur la figure 6.27. On y voit l'interface du logiciel. La vidéo du projectile est présentée en haut à gauche, avec en vert le centre de gravité poursuivi. En-dessous, de haut en bas, le graphe de force en fonction du temps mesuré par le capteur de force, le graphe du déplacement du centre de gravité au cours du temps, mesuré par la caméra et traité par le logiciel de poursuite, et enfin sa dérivée, le graphe de la vitesse du centre de gravité du projectile au cours du temps. A droite, on visualise la courbe de l'évolution de la quantité de mouvement calculée par la mesure de force du capteur et par la mesure de vitesse du centre de gravité par la caméra. On observe une correspondance relativement bonne. Pour la calibration, seule la somme des valeurs de quantité de mouvement initiales ( $mv_1$ ) et finales ( $mv_2$ ), selon l'équation 6.28, est employée et comparée à la valeur obtenue par la mesure de force.



**FIGURE 6.27.** Exemple de l'interface du logiciel de calcul de la quantité de mouvement à l'aide du capteur de force et à l'aide de la caméra haute vitesse.

Pour réaliser ces essais, un projectile non-létal plein, en caoutchouc, de forme sphérique de 22 mm de diamètre, et de 7,12 g est employé. La masse du projectile est supposé constante. Ce choix permet une bonne précision de la mesure de la vitesse du centre de masse. La vitesse d'impact est d'environ 80 m/s et la vitesse de rebond est d'environ 20 m/s. En prenant l'intégralité des paramètres du setup en compte, l'incertitude de la vitesse du projectile avant impact (voir section 6.1) est estimée à 1,28%, et à 1,20 % pour la vitesse après l'impact (cette valeur est différente car la vitesse est inférieure et la distance  $d_p$  est différente, voir section 6.1). Une démarche de quantification de l'incertitude totale sera présentée dans la section suivante.

Le calcul du facteur  $k_{correction,Kistler}$  est maintenant défini comme :

$$k_{correction,Kistler} = \frac{p_{kistler}}{p_{camera}} = \frac{\int_0^{t_{final}} F_{Kistler}(t) dt}{m(v_1 + v_2)} \quad (6.29)$$

où

- $k_{correction,Kistler}$  est un facteur de correction du facteur de calibration Kistler, calculé à l'aide du bilan de la quantité de mouvement introduite dans le capteur.
- $p_{kistler}$  est la quantité de mouvement introduite dans le capteur, calculée à l'aide de l'intégrale de la force  $\int_0^{t_{final}} F_{Kistler}(t)dt$ . La force  $F_{Kistler}$  est calculée à l'aide du facteur de calibration nominal du capteur  $k_{nominal,Kistler}$ .
- $p_{camera}$  est la quantité de mouvement introduite dans le capteur, calculée à l'aide de la mesure de la masse du projectile et la vitesse du projectile avant l'impact ( $v_1$ ) et après l'impact ( $v_2$ ).

Comme on le voit sur la figure 6.27, le signal de la mesure de force du montage Kistler présente encore beaucoup de bruit après l'impact, en raison des vibrations du montage (voir sous-section 6.3.2.2). Pour éviter une influence de ce phénomène sur le résultat, le signal est moyenné après l'impact, ce qu'on observe bien sur le graphe de la quantité de mouvement de la figure 6.27.

La comparaison des valeurs obtenues à l'aide du logiciel de poursuite et à l'aide de la mesure de force réalisée par le montage Kistler et son facteur de calibration  $k_{nominal,Kistler}$  permet une nouvelle calibration du capteur. On obtient cette fois-ci les résultats présentés dans la table 6.6.

Paramètre statistique de $k_{correction,Kistler}$	valeur
Moyenne [-]	0,89
Ecart-Type [-]	0,009
Ecart-type/moyenne [-]	0,0101

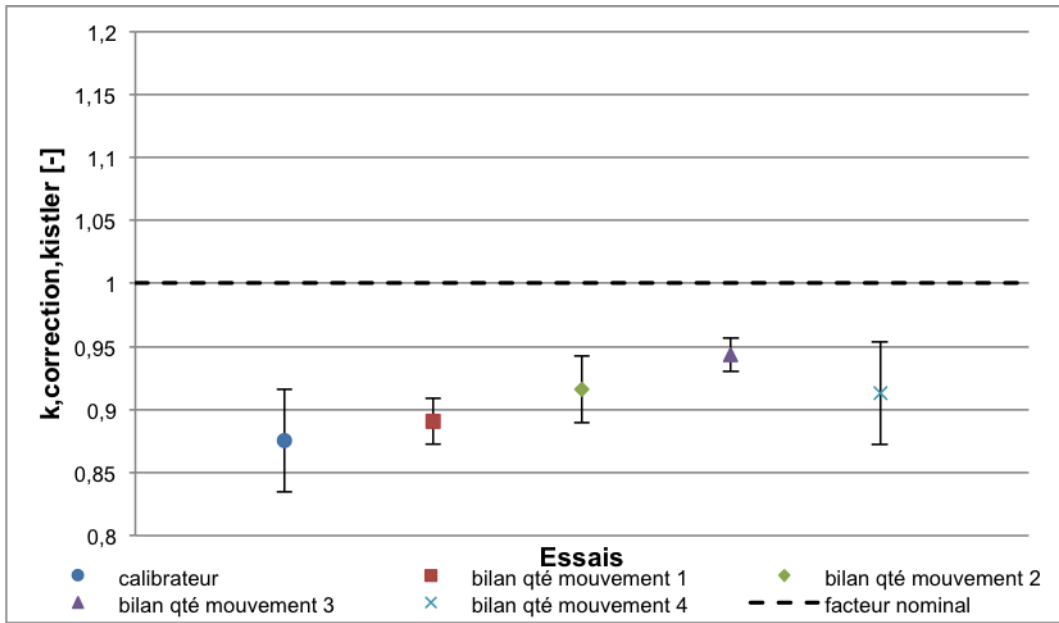
**TABLE 6.6.** *Résultat des essais de calibration du montage Kistler à l'aide du bilan de quantité de mouvement.*

Ces résultats sont proches de ceux obtenus à l'aide des essais réalisés à l'aide de la mesure de la déformation du ressort, ce qui valide les deux méthodes puisque celles-ci sont basées sur des principes fondamentalement différents. On observe également que les résultats sont très répétables puisque l'écart-type est très faible. La question est maintenant de savoir quelle valeur retenir.

### 6.3.2.5 Discussion sur la validation de la mesure de force à l'aide du montage Kistler

Deux méthodes différentes permettent de calibrer le montage Kistler. Comme on a pu le voir, celles-ci donnent des résultats proches, mais pas identiques. Dès lors

la question se pose de savoir si une méthode aurait plus de raisons d'être employée que l'autre. On présente sur la figure 6.28 le rapport  $k_{correction,Kistler}$  calculé à l'aide des deux méthodes, en fonction de la force appliquée sur le capteur. Diverses implémentations de la méthode du bilan de la quantité de mouvement ont été réalisées, avec différents serrages du capteur, ce qui peut expliquer les différences de leurs résultats. Les crochets correspondent aux intervalles de deux écart-types.



**FIGURE 6.28.** Comparaison des facteurs  $k_{correction,Kistler}$  obtenus grâce au calibrateur et à l'aide du bilan de quantité de mouvement.

On constate globalement que les résultats sont très comparables, mais qu'il y a une différence entre les différents résultats de tests. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ce phénomène :

- comme le fabricant le spécifie, la valeur de calibration peut être influencée par le montage qui est identique d'un essai à l'autre, à l'exception du serrage du capteur. Cette différence peut engendrer des différences de résultats.
- Par ailleurs, la valeur du facteur de calibration peut changer en fonction de la sollicitation. Le fabricant fournit d'ailleurs deux valeurs différentes selon les gammes d'applications envisagées.

Ces hypothèses poussent à prendre le facteur de calibration obtenu à l'aide d'une sollicitation proche de celle qu'on veut mesurer, et dans les conditions les plus proches. Pour cette raison, et du fait que la mesure est plus précise, la méthode de calibration retenue sera celle du bilan de quantité de mouvement.

### 6.3.3 Détermination de l'incertitude de mesure du facteur de correction $k_{correction,Kistler}$

Les calculs qui suivent ont été réalisés à l'aide de la série de donnée présentée dans la table 6.7.

$v_{impact}$ [m/s]	$v_{rebond}$ [m/s]	$p_{kistler}$ [kg m/s]	$p_{camera}$ [kg m/s]	$k_{correction,kistler}$ [-]
88,41	18,15	0,654	0,747	0,8755
88,1591	17,40	0,654	0,74	0,8838
90,5597	18,28	0,675	0,763	0,8847
90,1092	18,02	0,67	0,758	0,8839
87,8564	18,42	0,662	0,745	0,8886
92,2915	22,12	0,719	0,802	0,8965
90,9771	19,86	0,695	0,777	0,8945
90,479	20,51	0,701	0,778	0,9010
91,8058	19,89	0,699	0,783	0,8927
91,3789	21,60	0,717	0,792	0,9053
Moyenne de $k_{correction,kistler}$ : 0,89				
Ecart-type de $k_{correction,kistler}$ : 0,009				

**TABLE 6.7.** Données employées pour le calcul de l'incertitude du facteur de correction  $k_{correction,kistler}$ .

Pour des raisons de clarté, l'incertitude de mesure du facteur  $k_{correction,Kistler}$  sera appelée  $k$ , et  $IM_k$  l'incertitude de mesure de ce facteur :

$$k = \frac{p_{kistler}}{m(v_1 + v_2)} \quad (6.30)$$

$$IM_k = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial m}\right)^2 IM_m^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial(v_1 + v_2)}\right)^2 IM_{(v_1+v_2)}^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial p_{kistler}}\right)^2 IM_{p_{kistler}}^2} \quad (6.31)$$

Les dérivées donnent :

$$\frac{\partial k}{\partial m} = \frac{-p_{kistler}}{m^2(v_1 + v_2)} \quad (6.32)$$

$$\frac{\partial k}{\partial(v_1 + v_2)} = \frac{-p_{kistler}}{m(v_1 + v_2)^2} \quad (6.33)$$

$$\frac{\partial k}{\partial p_{kistler}} = \frac{1}{m(v_1 + v_2)} \quad (6.34)$$

La principale difficulté pour résoudre ces équations provient de la détermination de  $p_{kistler}$  et  $IM_{p_{kistler}}$ . En effet, d'un essai de calibration à l'autre, la quantité de mouvement réelle n'est pas constante et est inconnue. De ce fait, si l'on définit chaque mesure "i" de la quantité de mouvement  $p_{kistler}$  comme suit :

$$p_{i,kistler} = p_{i,reel,kistler} + \Delta p_{i,kistler} \quad (6.35)$$

$p_{i,kistler}$  est donc la somme de la valeur réelle de quantité de mouvement  $p_{i,reel,kistler}$ , calculée avec le facteur de calibration nominal, et d'un facteur de dispersion  $\Delta p_{i,kistler}$ . On ne connaît pas la part de l'un et de l'autre de cette somme.

Deux choix se présentent quant à la détermination de  $p_{kistler}$ . Soit on prend la valeur maximum des valeurs  $p_{i,kistler}$ , soit on prend sa valeur moyenne. L'ensemble des calculs présentés dans cette section ont été réalisés pour ces deux choix, et donnent des résultats très similaires. Les valeurs présentées ici emploient la valeur maximum.

La valeur de l'incertitude  $IM_{p_{kistler}}$  peut être caractérisée par l'incertitude de  $IM_{p_{reel,kistler}}$ , supposée nulle puisqu'il s'agit de la valeur réelle, et par l'incertitude  $IM_{\Delta p_{kistler}}$ , caractérisant l'incertitude de  $\Delta p_{kistler}$ , dont on ne connaît pas la valeurs. Pour son calcul, on va donc émettre l'hypothèse que la valeur réelle  $p_{i,reel,kistler}$  est la valeur mesurée par la caméra. Comme la valeur  $p_{i,kistler}$  est mesurée à l'aide du facteur de calibration nominal du capteur, il faut adapter la série  $p_{i,camera}$  à l'aide de facteur de correction  $k_{correction,Kistler}$ . Ce facteur est le facteur moyen défini dans la table 6.7 :

$$p_{i,reel,kistler} = \frac{p_{i,camera}}{k_{correction,Kistler,moyen}} \quad (6.36)$$

On a donc

$$\Delta p_{i,kistler} = p_{i,kistler} - \frac{p_{i,camera}}{k_{correction,Kistler,moyen}} \quad (6.37)$$

L'incertitude  $IM_{\Delta p_{kistler}}$  est caractérisé par la distribution des valeurs de l'échantillon  $\Delta p_{i,kistler}$ . La moyenne des valeurs de l'échantillon  $\Delta p_{i,kistler}$  tend vers 0 (-0,0001739 dans ce cas-ci). L'écart-type de  $\Delta p_{kistler}$  peut être évalué majoré, avec une certitude donnée, ici égale à 95%, à l'aide des valeurs de l'échantillon mesuré  $\Delta p_{i,kistler}$ , grâce à la loi de  $\chi^2$ , ce qui permet de tenir compte du nombre d'échantillons mesurés  $n$  [91]. Si  $\sigma_{ech}$  est l'écart-type de l'échantillon des mesures  $\Delta p_{i,kistler}$ , on a :

$$\sigma_{\Delta p_{kistler}} = \sqrt{\left( \frac{\sigma_{ech}^2 (n-1)}{\chi^2{}^{-1}(0,975; n-1)} \right)} \quad (6.38)$$

### 6.3 Validation de la mesure de force et détermination de l'incertitude liée

où  $\chi^{2-1}$  est la loi de Khi carré inverse. On retrouve la valeur correspondante dans les tables statistiques. L'incertitude de mesure  $IM_{\Delta p_{kistler}}$  est évaluée à deux fois l'écart-type  $\sigma_{\Delta p_{kistler}}$  calculé :

$$IM_{\Delta p_{kistler}} = 2\sigma_{\Delta p_{kistler}} \quad (6.39)$$

Comme cette incertitude est déterminée par les mesures de vitesses, elle tient compte implicitement des incertitudes liées à cette mesure. L'incertitude recherchée est donc finalement :

$$IM_{p_{kistler}} = \sqrt{IM_{\Delta p_{kistler}}^2 - IM_{(v_1+v_2)}} \quad (6.40)$$

On illustre cette démarche sur la figure 6.29. L'étape 1 est l'équation (6.36), l'étape 2 est l'équation (6.37), l'étape 3 est l'équation (6.38), et l'étape 4 est la résolution des équations (6.39) et (6.40).

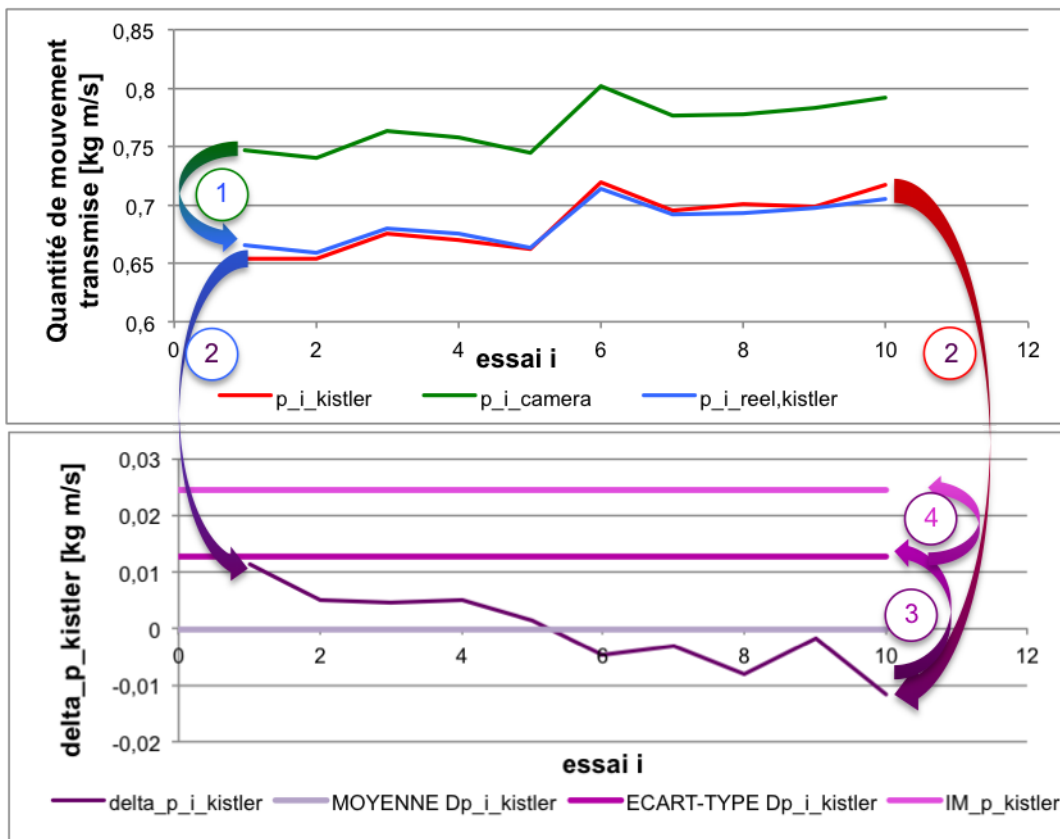


FIGURE 6.29. Illustration du calcul de l'incertitude de mesure  $IM_{p_{kistler}}$ .

Les valeurs numériques des paramètres sont :

- $p_{kistler}$  est approximée par sa valeur maximum, égale à  $0,719 \text{ kg m/s}$  dans le cas présent.



- $m$  la masse du projectile est de 0,007 kg.
- $v_1$  est approximée par la valeur maximum de la vitesse d'impact observée lors des essais. Elle est égale à 92,4m/s. La valeur  $v_2$  est également approximée par sa valeur maximum et est égale à 19,4 m/s.

les incertitudes de mesures donnent :

- $IM_m$  est l'incertitude de mesure de la masse du projectile, déterminée par la balance de pesée. Elle est évaluée à 0,001 g [65].
- $IM_{(v_1+v_2)}$  est l'incertitude de mesure de la somme des vitesses de l'impact et du rebond. On la définit par la formule qui suit :

$$IM_{(v_1+v_2)} = \sqrt{IM_{v_1}^2 + IM_{v_2}^2} \quad (6.41)$$

avec

- $IM_{v_1}$  est l'incertitude de mesure de la mesure de vitesse avant l'impact. Elle est estimée grâce à la démarche théorique proposée précédemment. Avec les paramètres employés, elle est égale à 0,0105  $v_1 = 0,97$  m/s.
- $IM_{v_2}$  est l'incertitude de mesure de la mesure de vitesse du rebond du projectile. Par le même raisonnement, elle est égale à 0,21 m/s.
- $IM_{pkistler}$  est la valeur étudiée précédemment. Elle est égale à 0,024 *kg m/s* dans le cas présent.

l'un dans l'autre, on obtient la valeur finale :

$$IM_k = 3,15\% \quad (6.42)$$

En conclusion, cette valeur semble suffisante pour pouvoir définitivement envisager de calibrer le capteur de cette manière. Cette valeur pourrait être encore améliorée en diminuant l'incertitude de la mesure de vitesse, grâce aux considérations présentées dans la section 6.1.

### 6.3.4 Conclusion sur la validation et la détermination de l'incertitude de la mesure de force

Après toutes ces considérations, les conclusions suivantes sont dressées :

- deux capteurs ont été envisagés pour la mesure de force d'impact d'un projectile non-létal. Le capteur Kistler et son montage dédié semble être plus adaptés aux sollicitations rencontrées. En effet, la limite fréquentielle du capteur PCB semble trop faible pour les impacts envisagés.
- Le montage Kistler tel que défini n'est pas parfait. On constate du bruit pendant et après le phénomène d'impact en raison de sollicitations atteignant une fréquence proche de différentes fréquences de résonances du montage. Il en résulte des erreurs de mesure, non quantifiées. L'étude fréquentielle du montage et son amélioration en conséquence constitueront une des perspectives principales de ce doctorat.
- Deux méthodes de calibration du montage Kistler ont été proposées : l'une basée sur une mesure de déformation d'un ressort lors de la chute d'une masse sur celui-ci, et l'autre basée sur un bilan de quantité de mouvement suite à un impact d'un projectile non-létal. Les résultats obtenus sont très proches, ce qui valide les deux méthodes. A la lumière des résultats, la deuxième méthode semble plus adaptée puisqu'elle donne non seulement des résultats plus répétables, mais qu'elle est basée sur un phénomène proche de la sollicitation envisagée.
- Si l'on considère que la seule source d'incertitude de mesure du montage Kistler est la valeur de la calibration du capteur, alors on peut caractériser celle-ci à l'aide du raisonnement présenté dans la section 6.3.3. On obtient alors une incertitude de 3,15 %. Cependant, cette hypothèse est réductrice puisqu'elle ne tient pas compte des problèmes de résonance susmentionnés. Cette valeur devra donc faire l'objet d'une nouvelle étude afin d'être validée ou infirmée.
- Il est suggéré de réaliser les essais de calibration à l'aide d'un tir d'une vitesse dans la même gamme que la mesure que l'on s'appête à faire. De cette façon, on s'approche autant que possible des conditions d'impact en terme de force et de fréquence d'impact, sans connaître ces données a priori. Cette méthodologie sera employée par la suite.

## 6.4 Conclusions

Au terme de ce chapitre, la validité et la précision de l'incertitude des mesures qui constitueront les résultats de ce doctorat ont été étudiées. La démarche employée est semi-théorique et semi-empirique. On distingue trois sections particulières, chacune apportant son lot de résultats. Dans un premier temps la mesure par caméra haute-vitesse a été étudiée et abouti à la détermination d'incertitudes théoriques validées.

Dans un deuxième temps, ces résultats ont été appliqués à la mesure de déplacement, qui donne comme résultat une information de l'incertitude maximum d'une courbe de déplacement générée par le logiciel de poursuite. Enfin, la mesure de force du montage "*mur rigide*" a été étudié et validé, et les incertitudes ont été dimensionnées.

En conclusion, les différents mécanismes de mesure qui seront présentés dans le chapitre suivant ont été validés et les erreurs de mesures liées ont été quantifiées. Tous les outils sont donc maintenant disponibles pour effectuer l'étude expérimentale proprement dite des impacts thoraciques et du phénomène de pénétration de la peau d'un projectile non-létal.

# Chapitre 7

## Réalisation des essais

### 7.1 Introduction

Après tous les développements exposés, ce chapitre justifie les efforts réalisés jusqu'ici, puisqu'il s'agit d'exposer les résultats expérimentaux et de les exploiter pour tirer des conclusions adéquates sur le potentiel lésionnel thoracique de plusieurs projectiles non létaux.

Ce chapitre est divisé en trois parties distinctes. Premièrement, les résultats expérimentaux de tirs de divers projectiles non-létaux sur "*mur rigide*" seront exposés et discutés. Deuxièmement, la méthode de l'étude de la pénétration et ses résultats seront présentés. A nouveau, plusieurs projectiles seront étudiés. Par ailleurs plusieurs pistes d'amélioration du "*surrogate*" seront explorées. Troisièmement, les résultats issus des deux premières sections seront exploités pour la réalisation d'une méthode intégrée faisant intervenir des simulations numériques, qui permet d'évaluer la létalité et l'efficacité du projectile dans différentes conditions de tir. Cette méthode aboutira à la discussion de la létalité et de l'emploi de deux projectiles : le Spartan LE-40 de Nobel Sport et le FN303.

### 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

Sept projectiles sont étudiés dans cette section : les trois projectiles 40 mm Spartan LE-40 de Nobel Sport (NS), le Sir de Brügger et Thomet (BT), et le Impulse de Nico Pyrotechnics (NP), le RB1FS, le FN303, le Beanbag (BB), et enfin un prototype de Projectile en Matériau Innovant (PMI). Les sous-sections qui suivent s'intéressent à ces projectiles un à un. Les projectiles sont repris sur la figure 7.1.

PROJ	NS	BT	NP	RB1FS	FN303	BB	PMI
Diamètre [mm]	40	40	40	Cal 12 (18,5mm)	17,2	Cal 12 (18,5mm)	18
Masse [g]	41,8	32,1	37,7	6,5	8,6	40,2	7,6
V0 [m/s]	92	105	92	152	90	90	NA

**FIGURE 7.1.** *L'intégralité des projectiles testés. De gauche à droite : le 40 mm Spartan LE-40 de Nobel Sport (NS), le Sir de Brügger et Thomet (BT), le Impulse de Nico Pyrotechnics (NP), le RB1FS, le FN303, le Beanbag (BB), et le prototype de projectile en matériau innovant (PMI).*

Le montage expérimental est présenté sur la figure 7.2. On y voit de gauche à droite :

- le lanceur pneumatique, présenté dans la section 4.3.2.
- La caméra haute vitesse (Photron SA-5) qui mesure la vitesse avant l'impact, l'angle de yaw, l'évolution du diamètre d'impact au cours du temps, et l'enfoncement du projectile selon son axe, qui est caractérisé par le déplacement horizontal du projectile au cours de l'impact.
- Le montage Kistler, accueillant le capteur Kistler 9061a, tel que présenté dans la section 6.3, qui mesure la force d'impact au cours du temps. Le signal généré par le capteur est traité à l'aide d'un amplificateur de charge Kistler 4603B, et l'acquisition du signal est effectuée avec une unité PXI NI BNC-2110, munie d'une carte d'acquisition PCI-6110.

Trois montages caméra différents sont employés : l'un pour les six premiers projectiles présentés, et deux autres montages pour le projectile PMI. Ces deux montages sont différents et ne sont pas optimisés. En effet, ceux-ci ont été définis avant l'aboutissement des raisonnements exposés dans le chapitre précédent. Les paramètres correspondant sont présentés dans la table 7.1.

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

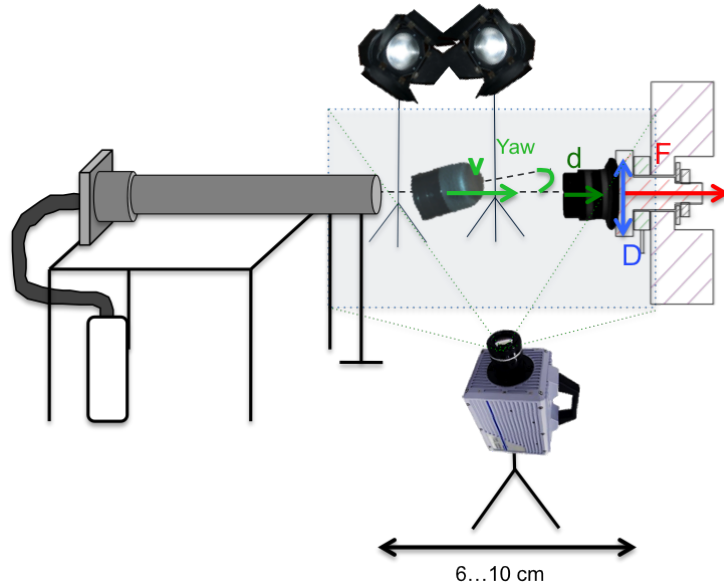


FIGURE 7.2. Le montage expérimental employé pour l'étude de l'impact du projectile sur mur rigide.

paramètre	FN303, BB, RB1FS, 40 mm NS, BT et NP	PMI 120 m/s et 150 m/s	PMI 90 m/s
$L$ [m]	0,78	0,61	0,58
$\Omega$ [°]	22,86	22,86	22,86
$FR$ [Hz]	100000	50000	50000
$res_g$ [-]	1024	1024	50000
$SS$ [Hz]	253000	99000	99000
$d_c$ [mm]	60	120	90
$d_p$ [mm]	$\cong 60$	$\cong 95$	$\cong 60$
$v$ [m/s]	$\cong 30, \cong 60, \cong 90$	$\cong 120, \cong 150$	$\cong 90$

TABLE 7.1. Les paramètres du montage caméra pour les différents essais réalisés.

Les données de calibration du capteur Kistler seront abordées dans la section 7.2.8.

Les sections qui suivent s'intéressent successivement à chaque projectile susmentionné. Dans un premier temps, l'ensemble des résultats obtenus pour un tir unique est présenté, et illustré par des captures d'écran de la caméra haute-vitesse. Trois courbes sont présentées : une courbe de force en fonction du temps, une courbe représentant le diamètre de la surface d'impact, observé par la caméra, en fonction du temps, et une courbe caractérisant l'enfoncement du projectile selon son axe au cours du temps. Il est à noter que lorsque cette troisième courbe dépasse sa valeur maximum, qui correspond à l'enfoncement maximum du projectile, la descente de la courbe ne caractérise alors plus que le rebond du projectile, et plus l'enfoncement du projectile. La courbe retombe alors inexorablement à une valeur nulle lorsque la position du point arrière du projectile est similaire à la position initiale de ce point, même si le projectile continue de se déformer. Pour mieux caractériser l'enfoncement après le maximum, il conviendrait de mesurer en tout instant la longueur du projectile. Les trois courbes sont présentées de façon à mettre en évidence la synchronisation de ces différentes courbes.

Dans un deuxième temps, on représente sur des graphes différents l'ensemble des résultats obtenus suite à l'impact de ces projectiles sur mur rigide. Trois graphes sont systématiquement présentés, correspondant aux courbes de force en fonction du temps, du diamètre de la surface d'impact en fonction du temps, et du déplacement horizontal du projectile en fonction du temps. Pour des facilités de présentation des résultats, les courbes ont été resynchronisées à  $t=0$ . Plusieurs vitesses sont présentées.

Une section dédiée étudiera ensuite l'incertitude liée à l'ensemble de ces résultats ( voir section 7.2.8).

### **7.2.1 Le 40 mm Spartan LE 40 de Nobel Sport**

On retrouve sur la figure 7.3 les résultats obtenus pour le tir d'un projectile Nobel Sport à 35 m/s sur le mur rigide. Les points ronds sur les figures correspondent à la valeur de ces courbes pour les captures d'écran de la vidéo, présentées à côté. Le point de poursuite du déplacement horizontal est présenté sur les captures d'écran, ainsi que le diamètre d'impact. Il en est de même pour les figures suivantes, présentant les mêmes données pour d'autres projectiles.

On observe une courbe de force en deux temps. Tout d'abord, on voit une première montée en force jusqu'à une valeur d'environ 1000 N. Pendant ce temps, le diamètre d'impact et le déplacement horizontal augmentent. Ensuite, la courbe de

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

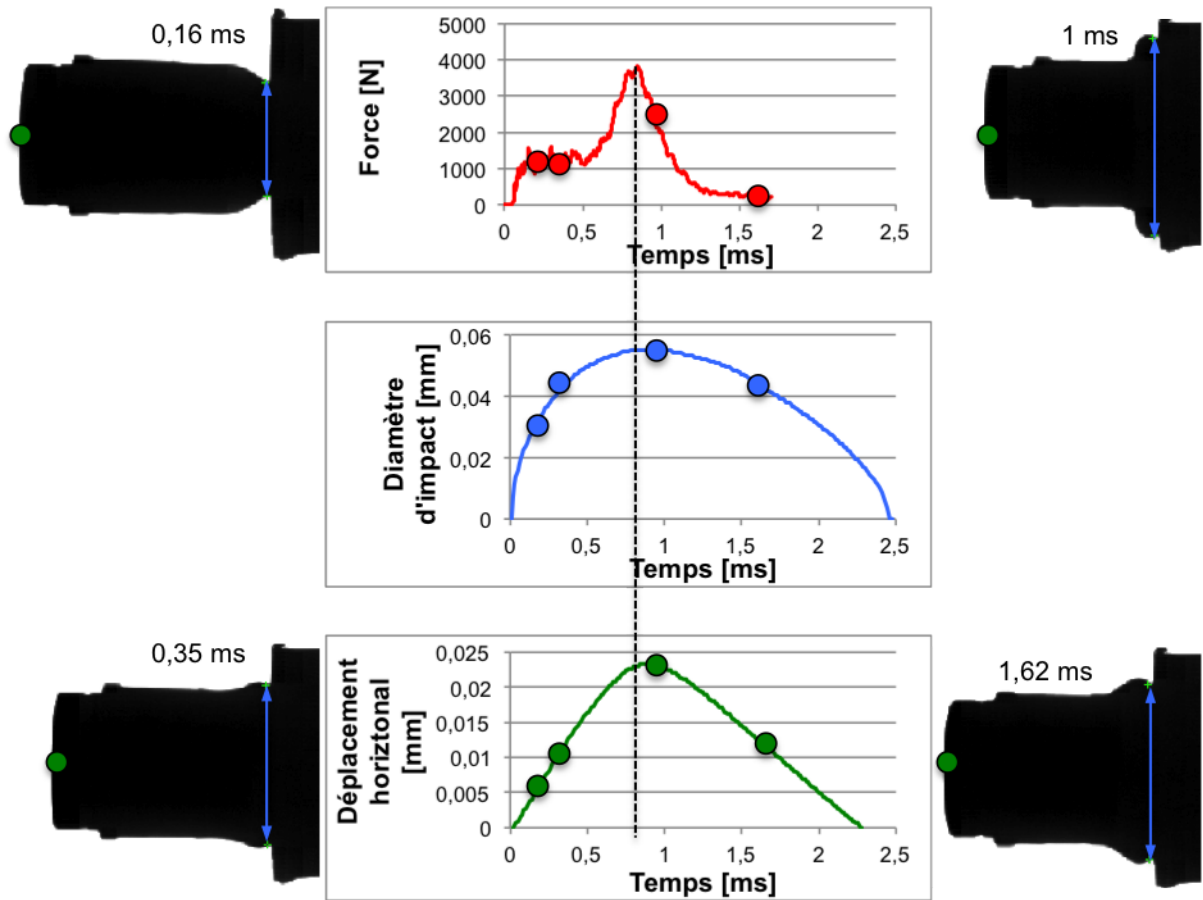


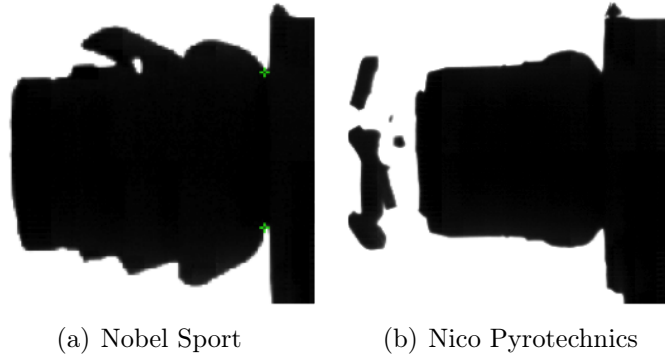
FIGURE 7.3. Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm NS sur mur rigide à une vitesse de 35 m/s.

force reste plus ou moins à cette valeur alors que les deux autres courbes continuent d'augmenter. Cette partie du phénomène correspond à la compression élastique de la tête du projectile. Lorsque celle-ci est trop comprimée, la force réaugmente, de façon plus brusque. A ce moment la tête déformable ne peut plus absorber d'énergie sous forme de déformation élastique, l'énergie cinétique restante dans le projectile est brusquement transmise à la cible, et la vitesse chute beaucoup plus rapidement. L'impact est alors beaucoup plus rigide, d'où l'augmentation de la force. Les trois courbes atteignent leur maximum de façon à peu près simultanée, avant de redescendre. Le phénomène de force dure près de 1,5 ms, tandis que les déplacements durent 2,5 ms.

Lorsque les vitesses augmentent, la partie arrière en plastique du projectile peut éventuellement se fragmenter (figure 7.4). Dans ce cas, la poursuite du point arrière ne correspond plus à l'enfoncement de la partie avant déformable du projectile, mais est gênée par la présence de débris, qui se dispersent de manière non-répétable. Certaines courbes présentées par la suite seront donc coupées, en raison de ce phé-



nomène. Ce phénomène influence également la mesure du diamètre d'impact, qui peut alors dévier de sa tendance initiale. Les vidéos seront cependant conservées, dans le but d'éventuellement modéliser cette fracture, si nécessaire.



**FIGURE 7.4.** *Exemple de profil de fracture de deux projectiles 40 mm.*

La figure 7.5 montre l'ensemble des résultats obtenus pour le projectile Nobel Sport. On y observe le même phénomène que celui décrit sur la figure 7.3, dans des proportions différentes toutefois, selon la vitesse. On constate que les résultats sont très répétables, surtout pour les vitesses élevées. Ceci s'explique par le fait que le projectile est plus stable aux vitesses plus élevées, et la variation de l'angle de yaw est donc moindre (les valeurs des angles de yaw ne sont pas présentées dans ce travail). Certaines courbes du déplacement du projectile de la figure 7.5 ne sont pas complètes, en raison de la fracture du projectile. On observe également une déviation de la courbe du diamètre.

Ces résultats de grande qualité permettront de valider des simulations numériques par la suite.

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

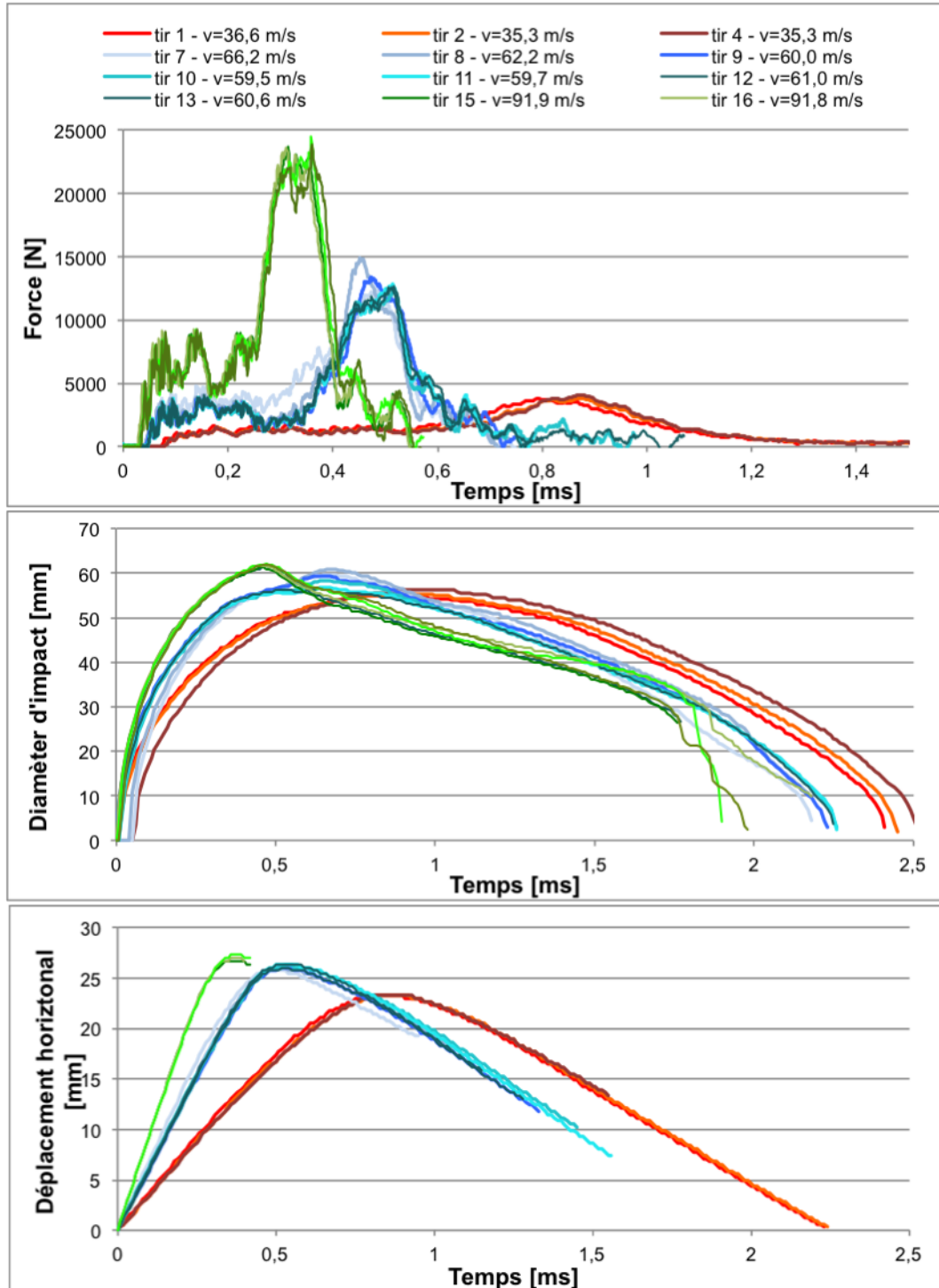
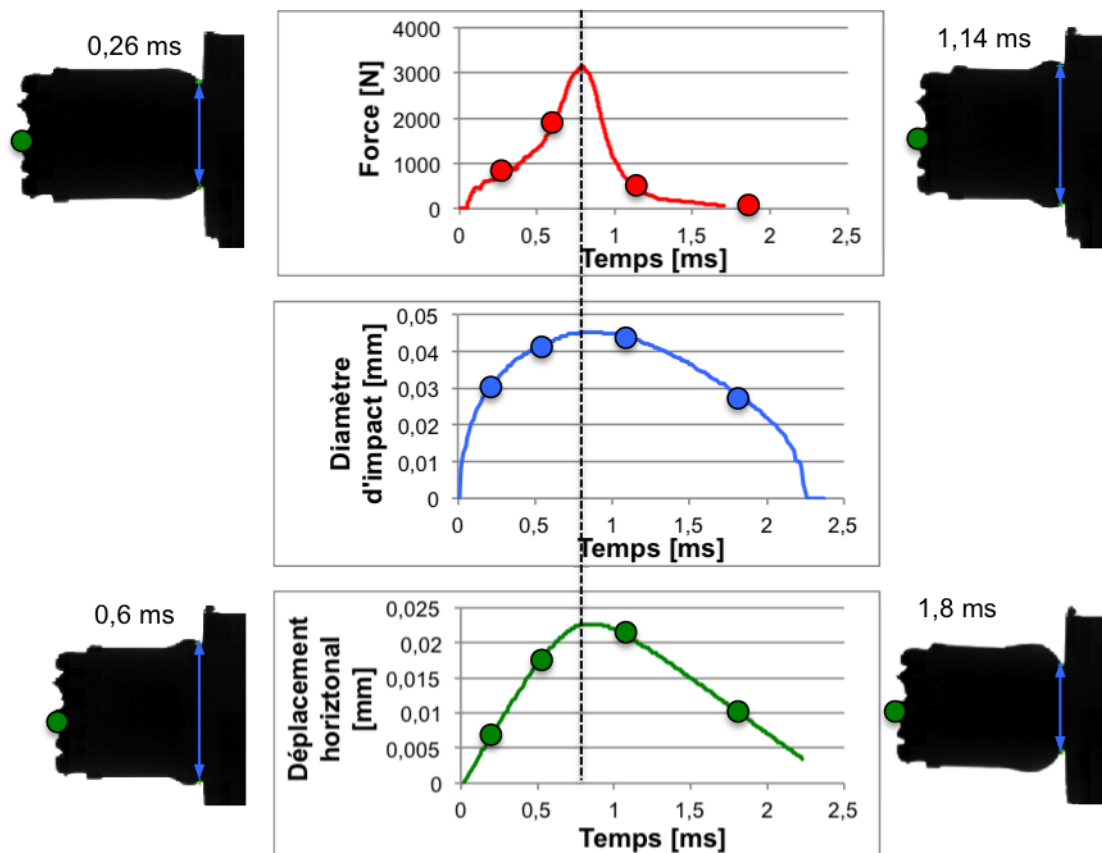


FIGURE 7.5. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm NS sur mur rigide.

## 7.2.2 Le 40 mm Sir de Brügger et Thomet

On retrouve sur la figure 7.6 un exemple de résultats obtenus pour le projectile Brügger et Thomet. On constate le même genre de phénomène que pour le projectile Nobel Sport, avec cependant un premier palier moins prononcé. La tête absorbe donc moins d'énergie. La synchronisation des maximum est également observée. Les durées du phénomène sont assez proches de celles du Nobel Sport, la force maximum est par contre plus élevée.



**FIGURE 7.6.** Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm BT sur mur rigide à une vitesse de 36 m/s.

La figure 7.7 présente l'intégralité des résultats. On observe une moins bonne répétabilité que pour le projectile Nobel Sport. Cette non-répétabilité s'explique par le fait que des projectiles usagés ont été employés pour réaliser ces tests. Des tests supplémentaires ont montré l'influence de l'usure du projectile, qui a tendance à augmenter le maximum des courbes de forces. Ceci est dû à une déformation plastique de la tête du projectile. D'autres tirs sont donc nécessaires, avec des projectiles neufs, pour pouvoir garantir la validité des résultats, et ensuite procéder à des simulations numériques.

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

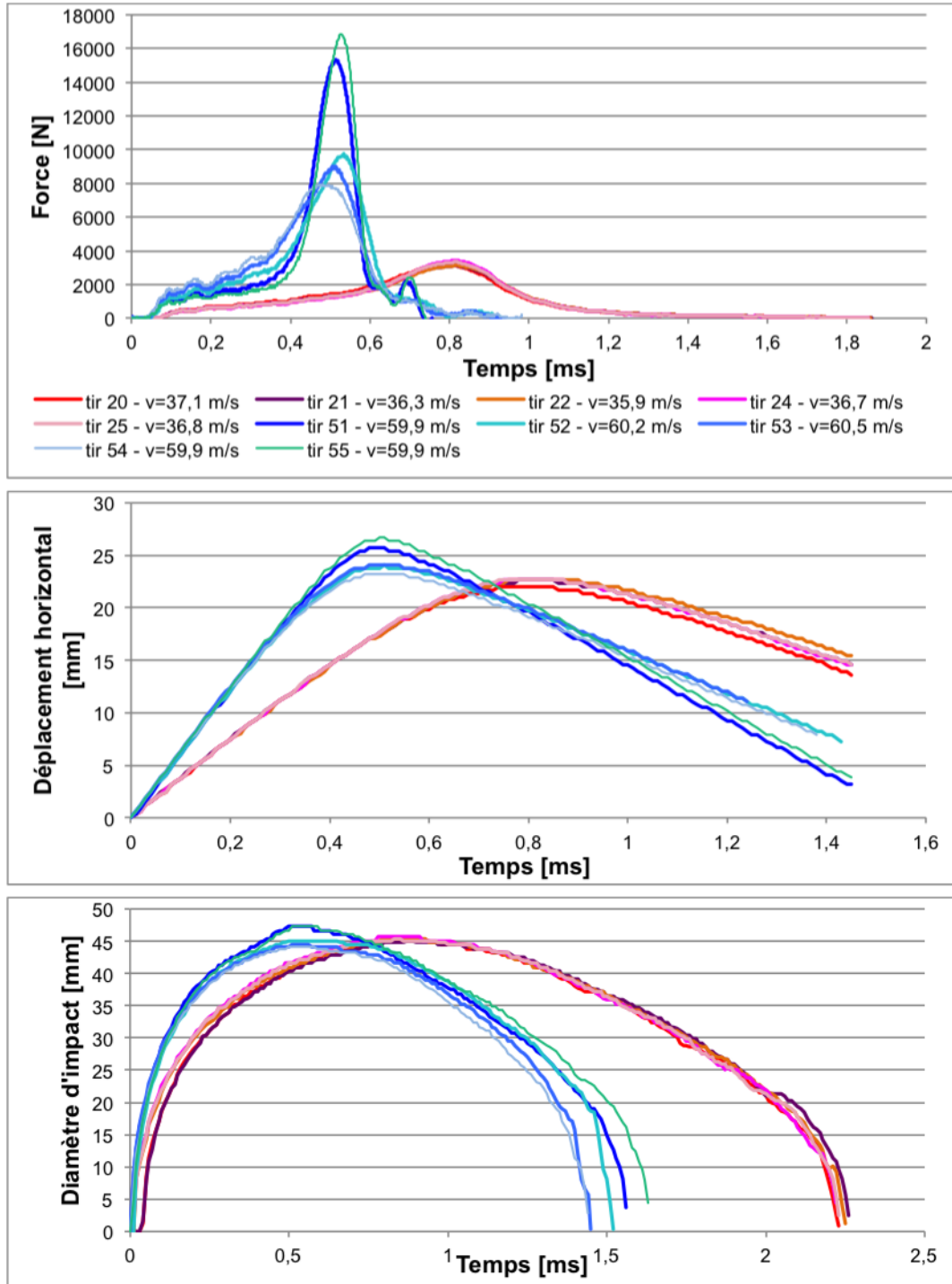
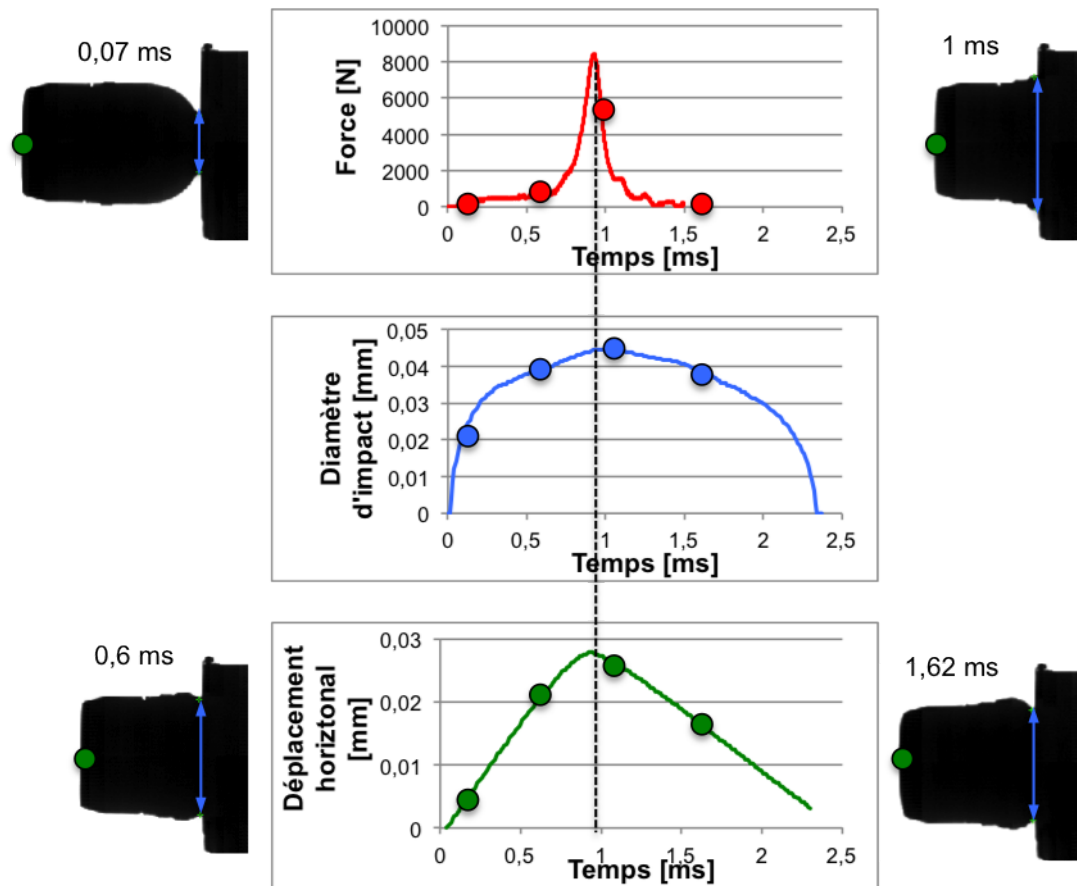


FIGURE 7.7. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm BT sur mur rigide.

### 7.2.3 Le 40 mm Impulse de Nico Pyrotechnics

On retrouve sur la figure 7.8 un exemple de résultats obtenus pour le projectile Nico Pyrotechnics. On constate le même genre de phénomènes que pour le projectile Nobel Sport, avec un palier encore plus faible. La synchronisation des maximum est également observée. Les durées sont toujours les mêmes, le maximum est encore plus élevé.



**FIGURE 7.8.** Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un 40 mm NS sur mur rigide à une vitesse de 36 m/s.

Les résultats de ces essais sont présentés sur la figure 7.9. Très peu de résultats sont présentés. Le projectile s'use également comme le projectile Brügger et Thomet, de part la déformation plastique de la tête, ce qui empêche de multiplier les tirs. On ne peut conclure sur la répétabilité des résultats, vu que trois résultats seulement sont présentés. D'autres essais sont nécessaires pour garantir la validité des résultats.

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

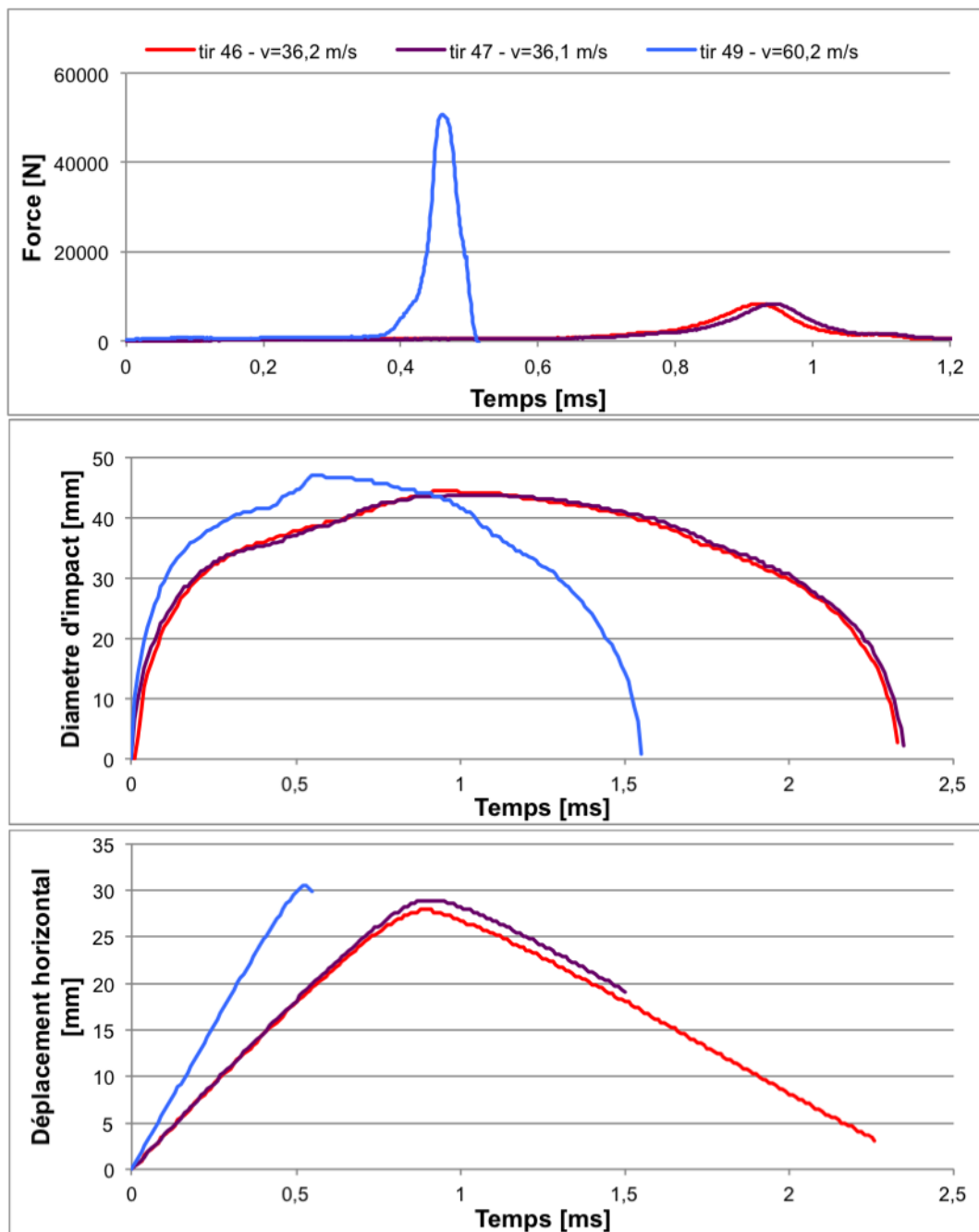


FIGURE 7.9. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles 40 mm NP sur mur rigide.

## 7.2.4 Le RB1FS

La figure 7.10 montre un exemple de résultats obtenus pour le projectile RB1FS. Le point de poursuite correspond cette fois à l'arrière de la tête du projectile. En effet, la queue a tendance à bouger verticalement et à tourner pendant le vol, ce qui rend la poursuite difficile. L'arrière de la tête est plus stable pendant le vol et l'impact, ce qui rend la poursuite plus aisée et plus pertinente. La poursuite est arrêtée aux environs du maximum de la courbe de force, car la présence de la queue gêne alors la mesure.

On constate également que le projectile affiché est endommagé, et ne possède pas toutes ses ailettes. De nombreux tests effectués amènent à la conclusion que la présence ou l'absence de ces ailettes, n'influence que très peu les résultats des essais sur mur rigide.

L'impact est beaucoup plus rapide que pour les 40 mm puisque la courbe de force retombe à sa valeur nulle après seulement 0,6 ms, et les courbes de déformation après moins d' 1 ms. En conséquence, les fréquences caractérisant l'impact seront plus élevées, et on peut donc s'attendre à plus de problème de résonance du montage Kistler que pour les courbes issues des tirs des projectiles 40 mm.

La figure 7.11 montre l'ensemble des résultats obtenus pour les tirs du projectile RB1FS. On constate plus d'oscillations sur les courbes de force, probablement dû au phénomène lui-même mais aussi aux problèmes de résonance du montage. Une modification du montage permettrait de discriminer la partie du signal due à l'impact, et la partie due à la résonance. En attendant, on constate que les courbes restent cohérentes et très répétables. De plus, un bilan de quantité de mouvement, présenté sur la table 7.2, a été réalisé et confirme la pertinence des courbes de force. En effet, les valeurs du rapport de quantités de mouvement transmises à la cible, mesurées à l'aide du capteur et de la caméra haute-vitesse, sont très proche de 1. L'écart entre ces mesures et 1 est inférieur à l'incertitude de mesure définie dans la section 6.3.3 et valide donc les mesures ( la valeur de l'incertitude de mesure pour ce test précis sera étudiée dans une section suivante, et amènera à la même conclusion). Cette comparaison est réalisable et précise pour le projectile RB1FS car celui-ci est composé d'un matériau unique, ce qui rend possible la mesure de la position de son centre de masse à l'aide de la caméra haute-vitesse. Une approximation pourrait également être réalisée pour les autres projectiles.

En conclusion, ces résultats constituent certainement une bonne base pour réaliser des simulations numériques.

## 7.2 Résultats de tirs sur mur rigide

Tir	Vitesse du projectile à l'impact [m/s]	Rapport de quantité de mouvement $\frac{p_{kistler, recalibre}}{p_{camera}}$ [-]
95	34,1	0,982
102	60,5	0,973
107	90,2	0,993

TABLE 7.2. Comparaison de la quantité de mouvement transmise à la cible, mesurée par le capteur de force et par la caméra haute-vitesse.

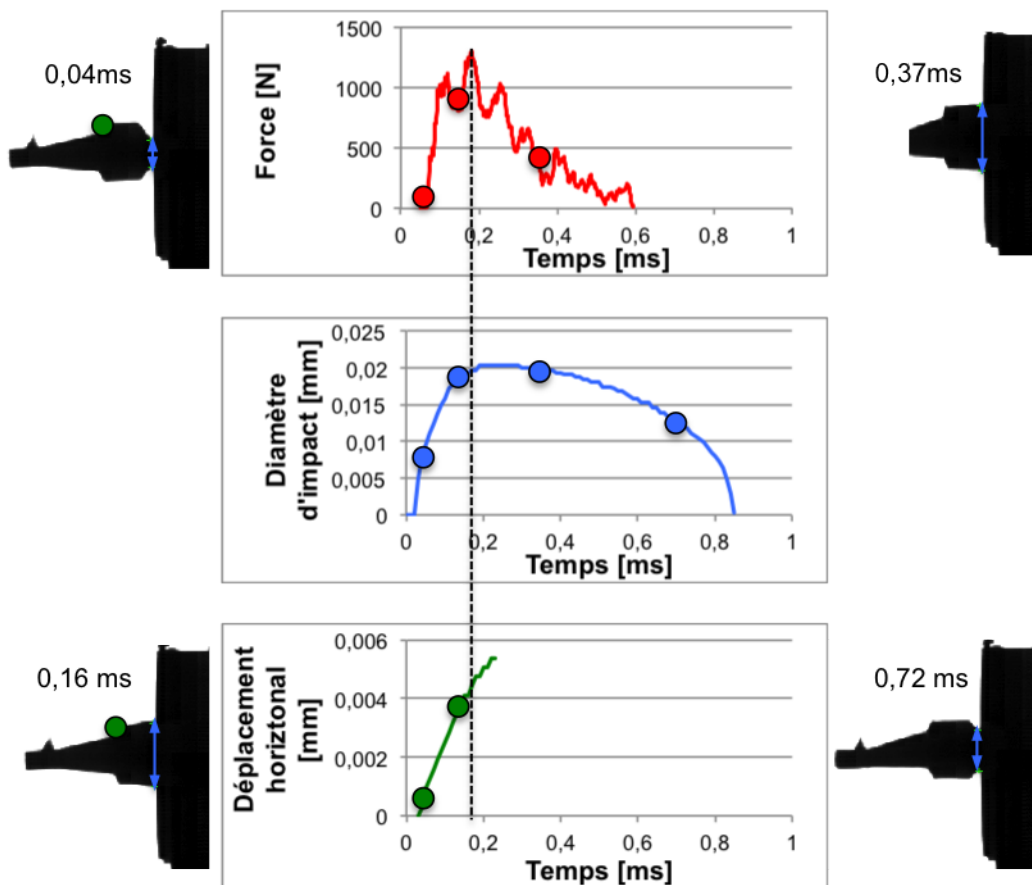


FIGURE 7.10. Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un RB1FS sur mur rigide à une vitesse de 33 m/s.



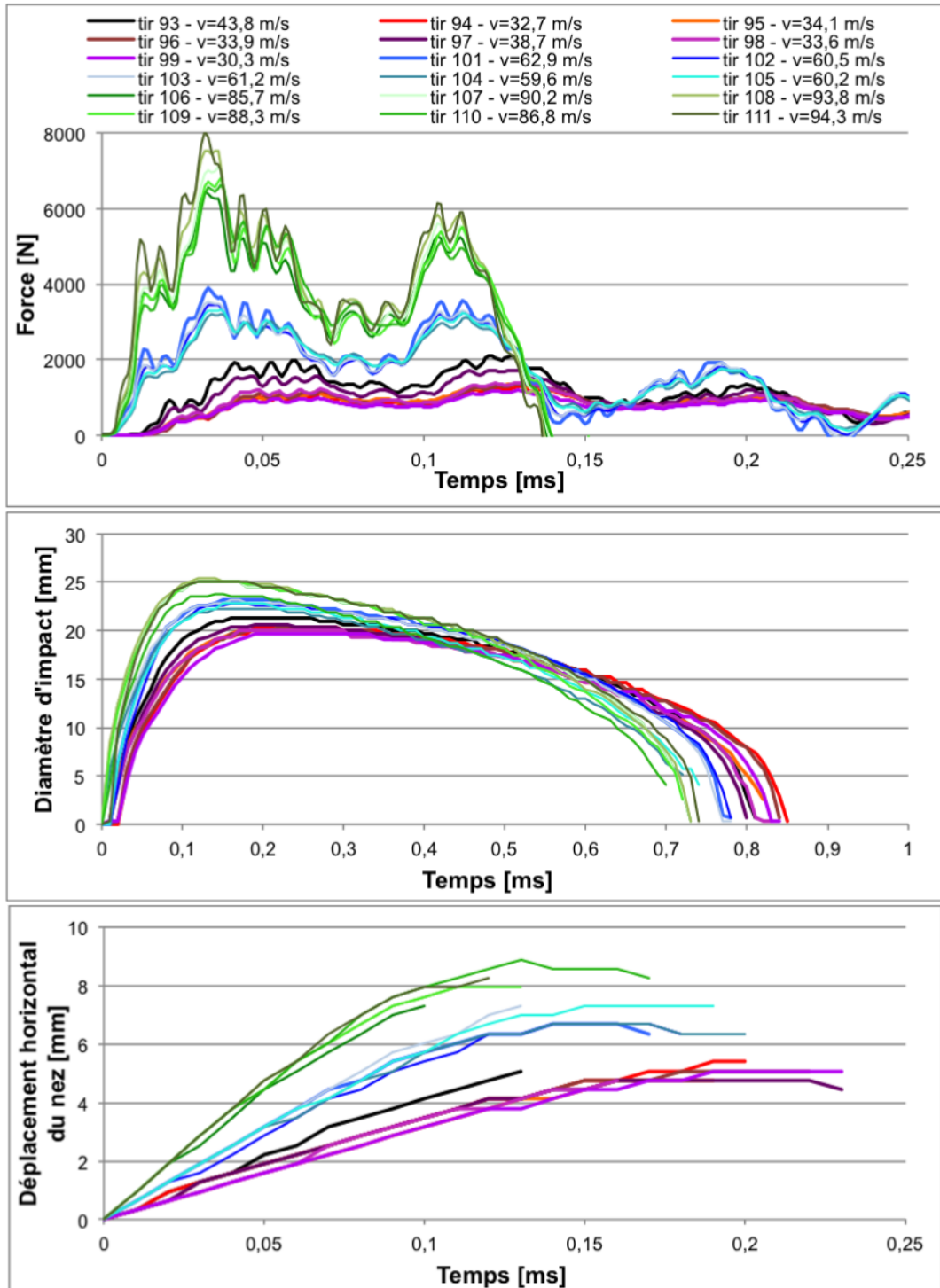
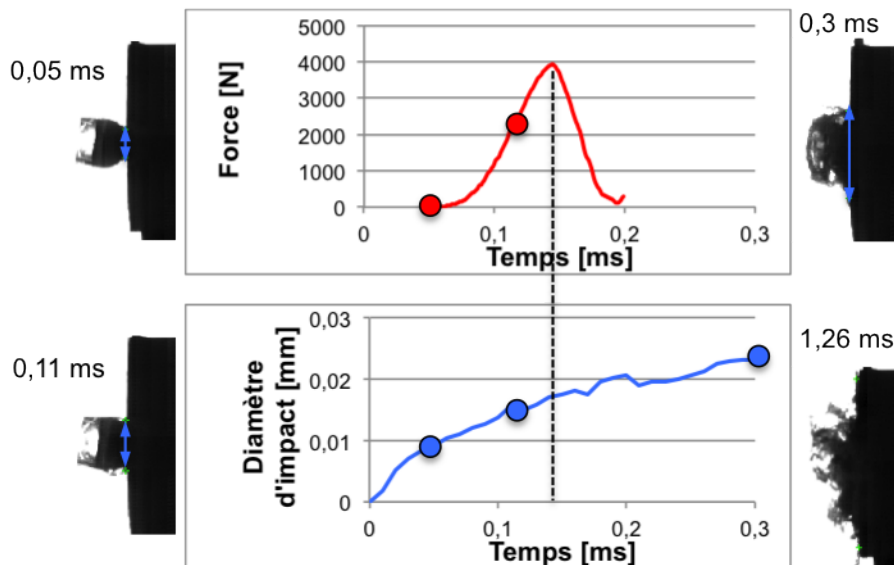


FIGURE 7.11. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles RB1FS sur mur rigide.

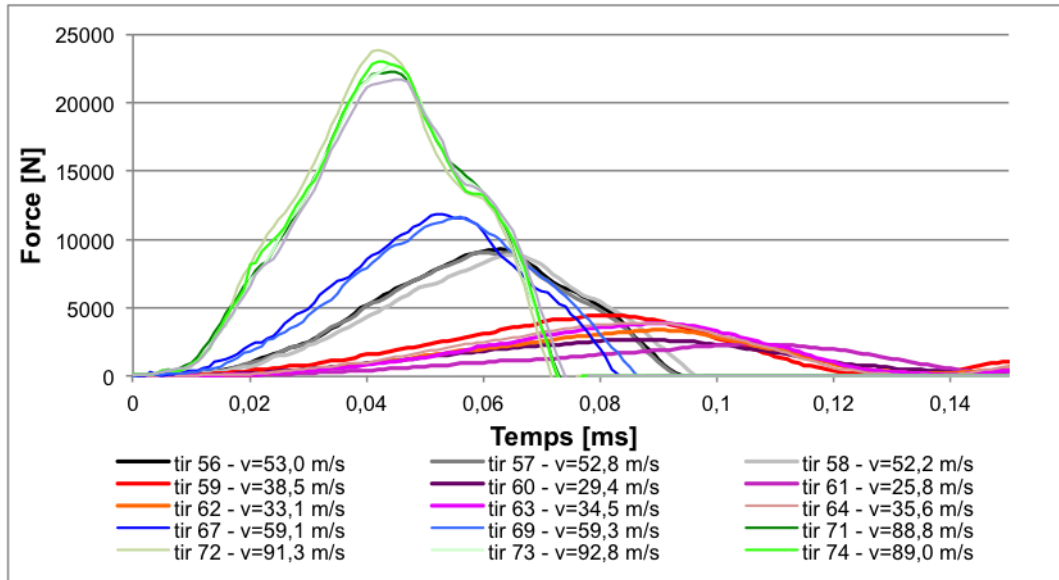
### 7.2.5 Le FN303

Le principe de ce projectile est de se briser à l'impact et donc de disperser les éléments le constituant. Un exemple de résultats est présenté sur la figure 7.12. Tout d'abord, on constate que le déplacement horizontal n'a pas été mesuré. En effet, la rupture du projectile fait que cette mesure ne caractérise plus un enfoncement du projectile. La mesure de diamètre n'a également de sens que pour avoir une idée de la synchronisation entre le phénomène de force et la fracture du projectile. En effet, la surface d'impact est très certainement loin d'être parfaitement circulaire, et surtout pleine. La courbe de force est caractérisée par une montée brusque, amenant à un pic unique, avant de redescendre brutalement. Ce phénomène dure moins de 0,2 ms. Il est donc beaucoup plus rapide que pour les autres projectiles. Cette courte durée caractérise un impact beaucoup plus rigide que les impacts des projectiles précédents, caractérisés par des matériaux plus déformables. De nombreuses oscillations suivent ce pic, qui caractérise la résonance du montage Kistler. Ces oscillations non pertinentes, qui apparaissent après les 0,2 ms présentées, ont donc été coupées.



**FIGURE 7.12.** Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un FN303 sur mur rigide à une vitesse de 34 m/s.

Les mesures de force est présentée sur la figure 7.13. On constate que malgré la fracture du projectile et la dispersion des morceaux constituant le projectile qu'on peut supposer aléatoire et donc non répétable par le fait même, les courbes sont très répétables et cohérentes. Ces résultats de force seront également employés pour des simulations numériques.



**FIGURE 7.13.** Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles FN303 sur mur rigide.

## 7.2.6 Le Beanbag

Un exemple de résultats du beanbag est présenté sur la figure 7.14. A nouveau, le déplacement horizontal du projectile n'a pas été mesuré. En effet, celui-ci disperse beaucoup, en raison d'une attitude initiale du projectile différente d'un tir à l'autre. La figure 7.15 montre deux attitudes possibles du projectile avant impact. On constate une différence notable, notamment en terme de longueur initiale du projectile, ce qui engendre une grande dispersion sur la mesure de déplacement horizontal pendant l'impact. La mesure n'est donc pas pertinente. En dehors de cela, le pic principal de force apparaît après une durée de l'ordre de 0,5 ms, ce qui est du même ordre de grandeur que pour le projectile RB1FS, mais plus lent que le projectile FN303. L'évolution du diamètre d'impact est relativement plus lente, et devient également peu pertinente pour des valeurs au-delà du maximum. En effet, la queue du projectile vient alors gêner la mesure. Les courbes seront donc coupées au-delà de cette valeur.

A nouveau, une différence est observée pour des projectiles non neufs, le stock de projectiles disponibles a malheureusement déjà été tiré.

L'ensemble des résultats est présenté sur la figure 7.16. On constate que la durée de la force à l'impact est relativement indépendante de la vitesse du projectile. Les valeurs dispersent, probablement à cause de l'usure des projectiles et de la différence d'attitude du projectile avant l'impact. Il faudrait probablement d'autres essais pour pouvoir valider ces résultats et ensuite procéder aux simulations numériques.

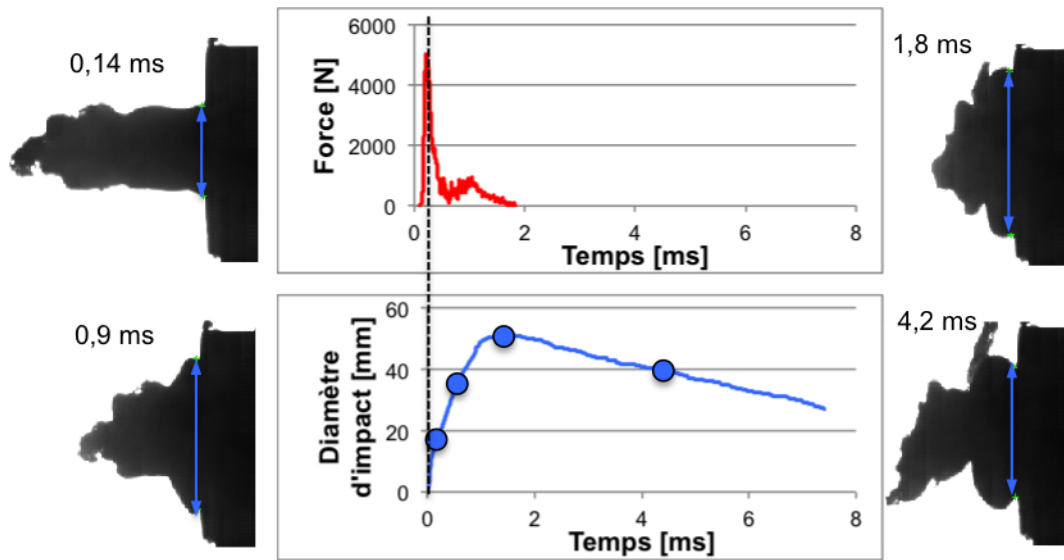


FIGURE 7.14. Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un beanbag sur mur rigide à une vitesse de 31 m/s.

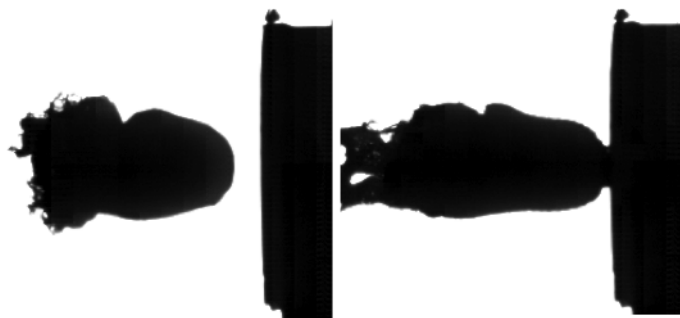


FIGURE 7.15. Différentes attitudes du projectile beanbag avant l'impact, pour une vitesse proche de 30 m/s.

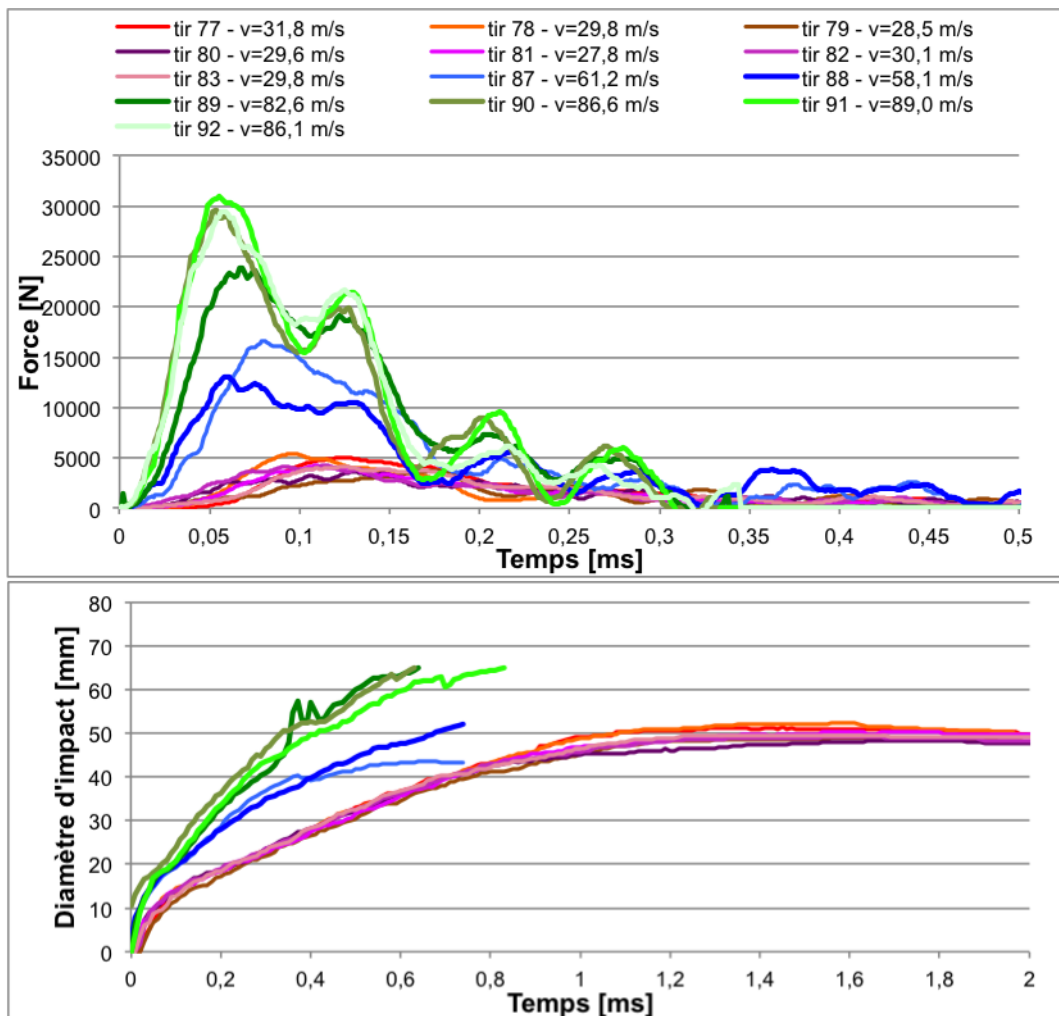


FIGURE 7.16. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles beanbag sur mur rigide.

### 7.2.7 Le Projectile en Matériau Innovant

Le dernier projectile étudié est le Projectile en Matériau Innovant. Ce projectile est développé de manière à pouvoir être tiré à des vitesses supérieures aux projectiles actuellement disponibles sur le marché. Les essais ont donc été réalisés à des vitesses plus élevées (de 90 m/s à 150 m/s). Un exemple de résultats obtenus est présenté sur la figure 7.17. A nouveau, la courbe de déplacement horizontal du projectile au cours du temps n'est pas affichée. En effet, celle-ci est systématiquement linéaire, et la pente de la droite correspond à la vitesse initiale du projectile. La courbe n'apporte donc pas d'information. La vitesse de l'arrière du projectile n'est donc pas ou peu influencée par l'impact, avant que le projectile ne soit vraiment très déformé et très plat. La courbe du diamètre est également stoppée à partir de sa valeur maximum. Pour des vitesses plus élevées, la mesure du diamètre est stoppée lorsque celle-ci dépasse la valeur de 60 mm, qui correspond au diamètre de la surface du palet d'impact. On constate que le phénomène de force présente de nombreuses oscillations autour d'une valeur moyenne. Le stade actuel de l'étude de ces projectiles ne permet pas encore de dire quelle part de ces oscillations est due à l'impact lui-même et à une vibration bien présente dans le projectile, et quelle part est due aux erreurs de mesures inhérentes aux problèmes de résonances du montage Kistler. Quoi qu'il en soit, la durée du phénomène est de l'ordre de 0,4 ms, ce qui est clairement beaucoup plus long que pour les autres projectiles de calibre plus ou moins identique, et qui est un peu plus bref que pour les projectiles 40 mm, à vitesse égale. De part ce fait, la valeur maximum de la force est nettement réduite.

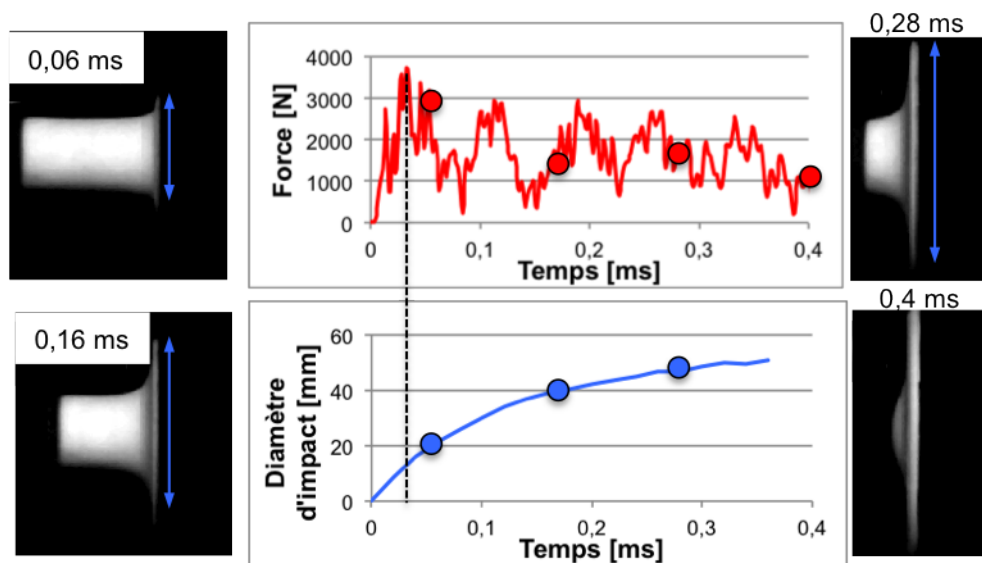


FIGURE 7.17. Exemple de résultats obtenus pour l'impact d'un PMI sur mur rigide à une vitesse de 92 m/s.

L'ensemble des résultats est présenté sur la figure 7.18. On observe une très bonne répétabilité des courbes en ce qui concerne la force à l'impact. La force reste relativement faible, même pour des vitesses de 150 m/s. Même si cette valeur de force n'est pas forcément corrélée à une lésion sur corps humain, on peut s'attendre à ce que cette caractéristique permette à ces projectiles un plus faible potentiel lésionnel à vitesse égale que pour les autres projectiles. Des simulations numériques permettraient de corroborer cette intuition. Les courbes de diamètre dispersent plus. On suppose donc que le diamètre d'impact ne suffit pas à bien caractériser la surface d'impact, et que la mesure doit donc être améliorée.

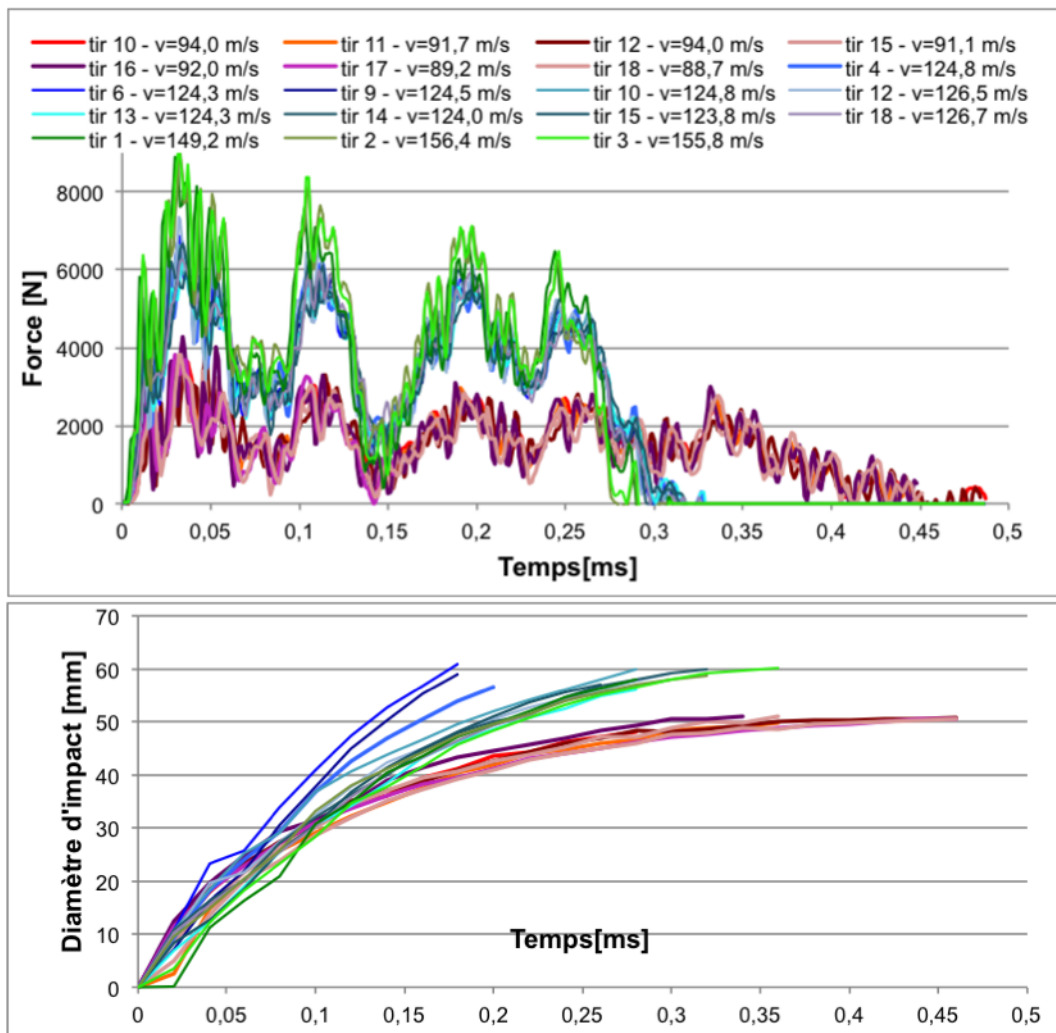


FIGURE 7.18. Ensemble des résultats obtenus pour le tir de projectiles PMI sur mur rigide.

### 7.2.8 Incertitude des mesures de forces, de déplacement, et du diamètre d'impact du projectile

Les résultats des calibrations réalisées pour les différents essais sont présentés dans la table 7.3. Le lien entre calibrations et mesures est quant à lui présenté dans la table 7.4. On remarque que les essais de calibration ont été réalisés à différentes vitesses. Ce résultat va à l'encontre de la méthodologie proposée dans la section 6.3.4, il s'agit en réalité d'essais réalisés avant l'établissement de cette méthodologie. Les montages caméras étant également différents, l'incertitude de la mesure de vitesse change également.

Série calib	vitesse [m/s]	nombre de test	moyenne $k_{correction, Kistler}$	écart-type $k_{correction, Kistler}$	IM vitesse impact	IM vitesse rebond	IM calib
calib 1	90	10	0,8906	0,0091	0,0105	0,0097	0,0315
calib 2	90	5	0,916	0,0133	0,0105	0,0097	0,0740
calib 3	50 à 90	5	0,9431	0,0067	0,0131	0,0112	0,0293
calib 4	60 à 90	3	0,9131	0,0205	0,0131	0,0125	0,57

**TABLE 7.3.** Les résultats des essais de calibration réalisés pour les mesures.

Les valeurs des incertitudes de la deuxième calibration, et surtout de la quatrième calibration, sont pénalisées par le faible nombre de tests. Par ailleurs, la quatrième calibration a été effectuée avant que le procédé ne soit bien au point. La valeur de l'écart-type  $\sigma_{\Delta p_{kistler}}$  (voir section 6.3.2.4) est donc plus importante. En effet, la vidéo fournie par la caméra haute-vitesse n'est pas assez longue pour mesurer la vitesse du projectile après l'impact précisément, d'où une dispersion sur la valeur du facteur de calibration. Pour ces deux tests, la valeur de calibration a été remplacée par le facteur de calibration global, calculé à l'aide de l'ensemble des essais de calibration réalisés. Ce facteur est moins représentatif des échantillons individuels, mais est caractérisé par une incertitude moindre, en raison du nombre d'essais plus grand. La valeur de ce facteur de correction  $k_{correctionKistler}$  est égal à 0,911, son écart-type est égal à 0,023, et son incertitude de mesure est de 4,40%.

Ces essais amènent à la définition des incertitudes de la mesure de force pour l'ensemble des tests réalisés. Ces valeurs pourraient encore être améliorées en augmentant la précision des mesures à l'aide de la caméra. Il s'agit d'une des perspectives principales de ce doctorat.

La table 7.4 résume les incertitudes de l'ensemble des tests présentés.



Mesure	Vitesse	Diamètre d'impact	Déplacement horizontal	Force
NS 35 m/s - calib 1	0,97%	0,72%	0,72%	3,15%
NS 60 m/s - calib 1	1,05%	0,72%	0,72%	3,15%
NS 90 m/s - calib 1	1,05%	0,72%	0,72%	3,15%
BT 30 m/s - calib 1	0,97%	0,72%	0,72%	3,15%
BT 60 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	0,72%	4,40%
NP 30 m/s - calib 2	0,97%	0,72%	0,72%	4,40%
NP 60 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	0,72%	4,40%
RB1FS 30 m/s - calib 2	0,97%	0,72%	0,73%	4,40%
RB1FS 60 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	0,74%	4,40%
RB1FS 90 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	0,75%	4,40%
FN303 30 m/s - calib 2	0,97%	0,72%	/	4,40%
FN303 60 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	/	4,40%
FN303 50 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	/	4,40%
FN303 90 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	/	4,40%
Beanbag 30 m/s - calib 2	0,97%	0,72%	/	4,40%
Beanbag 60 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	/	4,40%
Beanbag 90 m/s - calib 2	1,05%	0,72%	/	4,40%
PMI 90 m/s - calib 3	2,10%	0,98%	/	2,93%
PMI 120 m/s - calib 4	1,41%	1,16%	/	4,40%
PMI 150 m/s - calib 4	1,54%	1,16%	/	4,40%

**TABLE 7.4.** *Les incertitudes liées aux mesures des tirs des projectiles sur mur rigide.*

On constate que l'incertitude de la vitesse reste confinée autour de 1 % à 2,1 %, ce qui reste assez proche des performances des mesures par base de mesure optique.

Les incertitudes des diamètres et du déplacement horizontal restent en dessous de 1%. Il est à rappeler que ces valeurs caractérisent la valeur d'incertitude liée à la valeur maximum de la courbe. Les valeurs correspondant aux PMI sont plus élevées car les paramètres choisis pour le montage caméra sont moins pertinents. Par ailleurs, les mesures du diamètre d'impact caractérisent la longueur vue sur l'image, et ne permettent de calculer une surface d'impact qu'en émettant l'hypothèse d'une surface toujours parfaitement circulaire et pleine. En pratique, ce n'est très certainement pas le cas, ce qui engendrerait une erreur sur la surface d'impact plus importante. La difficulté de bien choisir l'emplacement de la mesure du diamètre d'impact sur l'image, à l'aide du logiciel de poursuite, peut amener également une erreur importante. Cette erreur n'est pas prise en compte. Les mesures du déplacement horizontal restent quant à elles bien maîtrisées.

Enfin, on retrouve les valeurs d'incertitude de la mesure de force qui sont comprises entre 3 et 4,5 %, valeurs qui semblent déjà très raisonnables vu la complexité et la dynamique du phénomène.

### 7.2.9 Discussion des résultats

Au terme de cette section, on est en mesure de conclure quant à la qualité des essais sur mur rigide. Ceux-ci sont nombreux et caractérisent des impacts de projectiles très différents les uns des autres. Des considérations matérielles font que certains projectiles sont moins étudiés que d'autres, et sont caractérisés par des dispersions de résultats plus grandes en raison de l'utilisation de projectiles usagés. A part ces exceptions, les résultats sont très répétables et traduisent la bonne qualité des mesures. En particulier, on considère que les résultats du Nobel Sport 40mm, du RB1FS, du FN303 et du PMI sont tout à fait acceptables pour réaliser des simulations numériques et amener à la définition du potentiel lésionnel de ces projectiles par l'étude du  $(VC)_{max}$ . Les autres projectiles sont à retravailler.

Grâce à la combinaison de cette technique de mesure et de l'emploi du lanceur pneumatique, la méthode est généralisable pour l'ensemble des projectiles non-létaux d'aujourd'hui et de demain. Mieux encore, elle pourrait donner des informations permettant de procéder à l'identification de propriétés dynamiques de matériaux dans d'autres domaines que l'étude des projectiles non-létaux. Cette piste est certainement à explorer dans le futur.

Malheureusement, tout n'est pas si idyllique, et les mesures ne sont pas encore parfaites. En effet, les problèmes de résonances constatés dans la section 6.3.2.2 en-

tachent certainement les mesures, de façon encore non quantifiable. Pour maîtriser le problème, il convient de faire des analyses fréquentielles systématiques pour chaque nouvel impact et d'adapter, si possible, la géométrie, les matériaux, et le capteur employé pour ce test. Ce point est certainement la perspective la plus cruciale de ce doctorat.

Une autre amélioration serait de réaliser systématiquement des bilans de quantité de mouvement, pour chaque mesure effectuée. En effet, la calibration a été effectuée de façon ponctuelle, sans réelle méthodologie définitive quant à sa fréquence. Il a par contre été observé que le bilan de quantité de mouvement réalisé lors d'un tir d'un autre projectile que celui employé lors de la calibration est tout a fait exploitable également. Même si sa précision risque d'être moindre en raison d'une difficulté de bien situer la position du centre de masse du projectile, en particulier pour des projectiles à plusieurs composants, ce bilan peut par contre donner une indication sur la répétabilité du test en cours, ce qui donne donc une information sur l'éventuelle nécessité de reproceder à une nouvelle calibration. Cette étape peut facilement être intégrée dans le logiciel d'acquisition de données, et sera implémentée très prochainement.

Enfin, l'incertitude déjà remarquablement faible vu la complexité et le caractère hautement dynamique du phénomène, pourrait encore être améliorée en diminuant l'incertitude relative liée à la mesure de vitesse à l'aide de la caméra haute-vitesse et du logiciel de poursuite dédié, grâce aux considérations abordées dans la section 6.1.4. Ces améliorations permettraient de diminuer les incertitudes de l'ensemble des mesures, même si celles-ci sont déjà relativement limitées et tout à fait suffisantes pour passer à l'étape de la modélisation des impacts à l'aide de simulations numériques.

## 7.3 Etude de la pénétration de la peau

Dans cette section, les projectiles seront testés avec les deux méthodes d'évaluation de la pénétration de la peau présentées dans le chapitre 2.

L'étude de la "*méthode WSU*" (voir section 3.3.1), correspondant à la méthode standardisée mise au point dans les groupe OTAN (STANREC 4744 /AEP 94 [24]) suivra les points suivants :

- dans un premier temps, la méthode décrite sera répliquée, et les résultats seront comparés à ceux de WSU. Les mêmes résultats doivent être obtenus afin de garantir la validité du "*surrogate*".

- Ensuite, des pistes d'amélioration du "*surrogate*" seront proposées. Des éléments seront substitués, l'objectif étant d'avoir un "*surrogate*" donnant des résultats plus répétables et plus reproductibles.
- Différents projectiles seront ensuite testés. Des tests menés par les Etat-Unis et par le Canada, communiqués durant les réunions OTAN [21] amènent à la conclusion que les projectiles 40 mm ne provoquent jamais de pénétration lors de leur tir sur le "*surrogate*", même pour des vitesses bien au-delà de leur vitesse nominale. En conséquence, seuls le RB1FS, le FN303, le beanbag et le PMI seront testés.
- Enfin, les mesures seront comparées et les incertitudes seront déterminées.

Par ailleurs, comme déjà précisé, l'étude de la méthode "*Force Wall*" (voir section 3.3.2) consistera uniquement en la réalisation de deux exemples de faisabilité. Les résultats seront rapidement comparés à ceux obtenus par la "*méthode WSU*".

L'ensemble des résultats présentés dans cette section est le fruit d'une collaboration entre le rédacteur de cette thèse, et des étudiants de l'ERM et d'ailleurs, ayant fait leur travail de fin d'étude ou stage sur le sujet [92–94].

#### 7.3.1 la "*méthode WSU*"

Les résultats seront présentés tout au long de cette section en terme de  $V_{50}$ , c'est-à-dire la vitesse du projectile amenant à une probabilité de pénétration, telle que définie dans la section 3.3.1, égale 50 %. Différentes méthodes existent pour calculer ce  $V_{50}$ , la méthode employée dans ce doctorat est la méthode Probit [31, 35]. Le principe est de prendre les résultats de vitesses associés à l'occurrence ou la non occurrence de pénétration, et de trouver une loi de probabilité normale, telle que celle-ci optimise la probabilité d'obtenir les résultats mesurés. Pour ce faire, un balayage est effectué sur le paramètre  $V_{50}$  et l'écart-type  $\sigma_{V_{50}}$ . La loi retenue par la méthode Probit est celle avec les paramètres  $V_{50}$  et  $\sigma_{V_{50}}$  qui correspond à la plus grande probabilité d'obtenir les résultats expérimentaux. Pour être implémentée, la méthode Probit nécessite que les résultats expérimentaux soient caractérisés par trois zones. Une zone à basse vitesse, où l'on retrouve aucune pénétration, une zone à haute vitesse où l'on retrouve que des pénétrations, et une zone mixte, caractérisée par des vitesses intermédiaires, où l'on retrouve des pénétrations et des non pénétrations. Dans cette zone mixte, la vitesse la plus élevée amenant une non-pénétration doit être plus élevée que la vitesse la plus basse amenant une pénétration. La présence de cette zone mixte est indispensable pour appliquer la méthode Probit.

Les résultats seront comparés aux résultats obtenus par WSU, appelés "*Surrogate Bir*" durant toute cette section, de manière à ne pas confondre la méthode et les résultats. Leurs courbes doivent donc d'abord être converties en terme de  $V_{50}$ . On retrouve sur la figure 7.19 ces résultats pour l'impact du projectile RB1FS sur cadavre et sur le "*surrogate*". Les valeurs des  $V_{50}$  sont mentionnées, on ne dispose malheureusement pas de la valeur de variation  $\sigma_{V_{50}}$ .

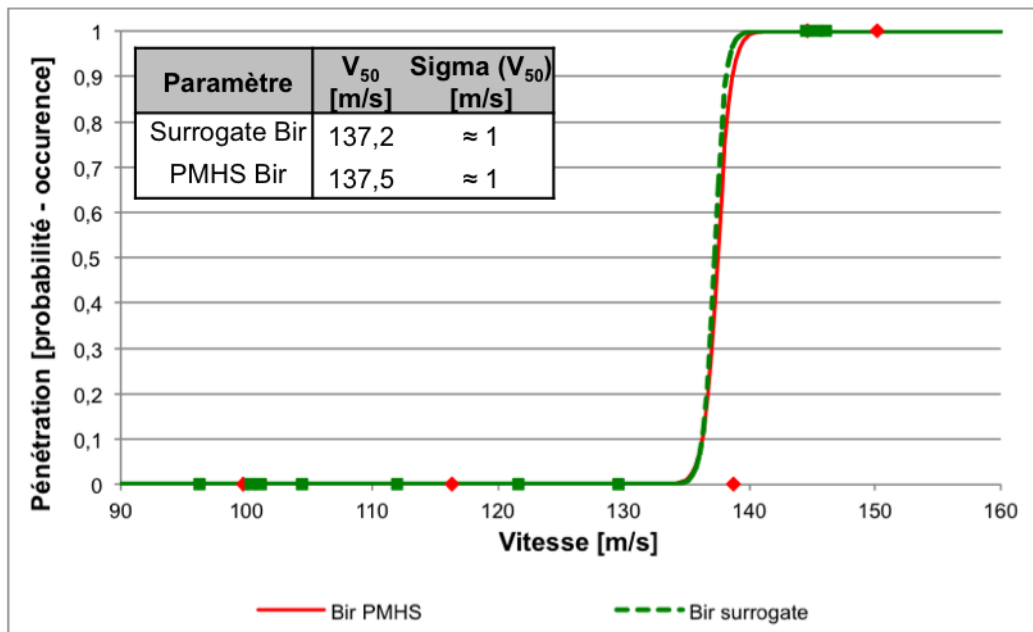


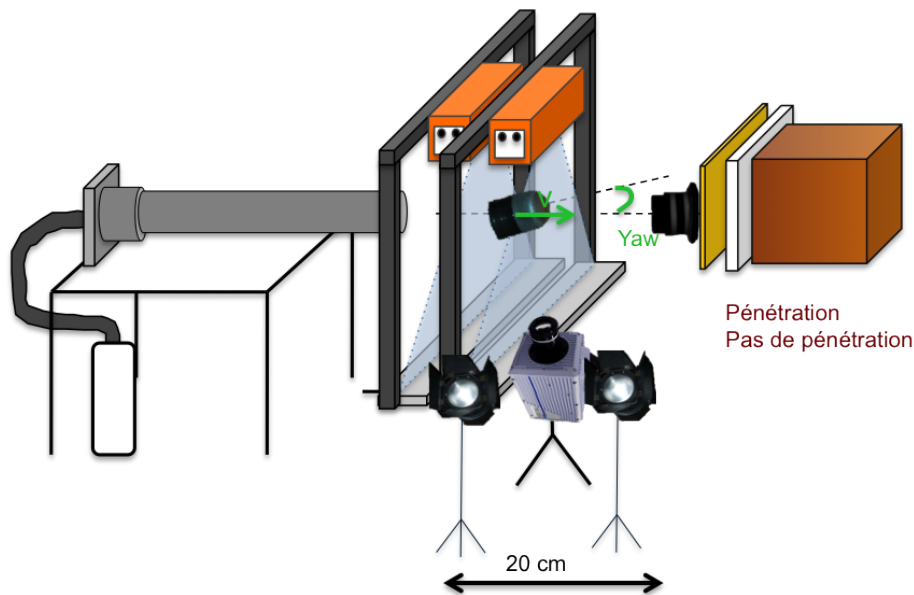
FIGURE 7.19. La courbe de  $V_{50}$  des essais de tirs sur PMHS et de tirs sur le "*surrogate*" mis au point par WSU (adaptés de [52–54]).

### 7.3.1.1 Validation du montage expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la figure 7.20. On y voit de gauche à droite :

- le lanceur pneumatique décrit dans la section 4.3.2.
- La base de mesure optique Drello LS9iN (spécification dans l'annexe H), dont le signal est récupéré par un chronomètre Fluke PM6680<sup>1</sup> pour mesurer la vitesse.
- La caméra haute vitesse Photron SA-5, pour mesurer l'angle de yaw.

1. [http://www.teknetelectronics.com/DataSheet/FLUKE/FLUKE\\_668085443.pdf](http://www.teknetelectronics.com/DataSheet/FLUKE/FLUKE_668085443.pdf) , consulté en avril 2013.



**FIGURE 7.20.** *Le montage expérimental de l'étude de la pénétration de la peau.*

- Le "surrogate" pour mesurer l'occurrence de la pénétration. Pour rappel, celui-ci est constitué de trois éléments : un bloc de gélatine, un panneau en mousse à cellule fermée de la firme Darice<sup>2</sup>, et un morceau de peau de chamois naturelle<sup>3</sup>. La pénétration est évaluée grâce à l'observation de fissures dans le bloc de gélatine après le tir.

La calibration de la gélatine, telle que décrite dans le protocole de WSU (voir section 3.3.1) est réalisée avec succès (plus d'informations sur les résultats de calibration sont disponibles dans le travail de J. Goffin [93]).

La distance de vol est de 25 cm, pour correspondre à la longueur de la base de mesure optique. De par cette distance plus longue, l'angle de yaw est moins bien maîtrisé et plus de tirs sont à rejeter. Ce montage a été effectué avant que la méthode de mesure de vitesse par caméra haute-vitesse ne soit tout à fait développée, d'où la présence de la base de mesure optique.

Les résultats sont présentés sur la figure 7.21.

On constate que les valeurs de  $V_{50}$  sont très proches, ce qui confirme la validité du montage expérimental. Un des essais présente un  $V_{50}$  significativement différent. Le grand nombre d'essais réalisés permet de dire que cette différence provient très

---

2. disponible chez le fournisseur suivant : Doll- Doo, 8521 Spencer Court, North Ridgeville, OH 44039-4493, USA ; [www.dolldoo.com](http://www.dolldoo.com) .

3. disponible chez le fournisseur suivant : J&T Beaven Ltd, 117 The Midlands Holt, Trowbridge Wiltshire BA14 6RJ England - <http://www.beaven.com/home> .

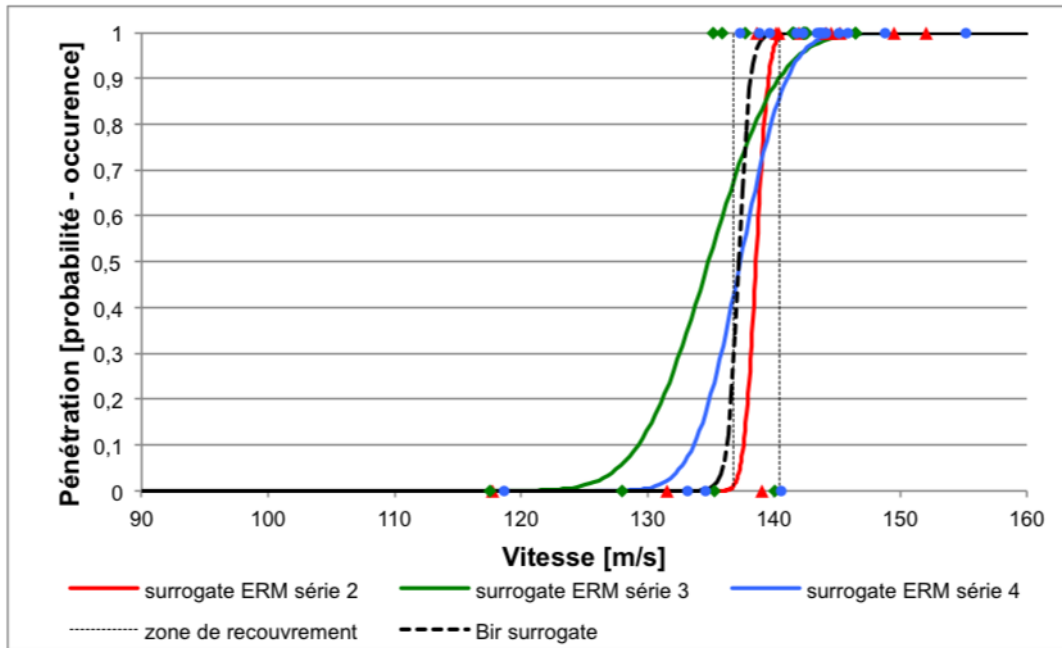


FIGURE 7.21. Les différentes courbes de  $V_{50}$  obtenues en répliquant le dispositif de WSU.

probablement d'un mauvais contrôle de la température de la gélatine. Les propriétés mécaniques de celle-ci sont en effet très sensibles à la température, il convient donc de contrôler ce paramètre avec soin.

### 7.3.1.2 Amélioration du "surrogate"

Comme déjà précisé, l'inconvénient principal de ce "surrogate" provient des éléments qui le constituent. En particulier, la peau de chamois naturelle, de part son caractère biologique, pourrait avoir des propriétés mécaniques qui changent d'un échantillon à l'autre, voire même d'un emplacement d'impact à un autre. Même si cette caractéristique existe également pour la peau humaine, elle peut également porté préjudice à la répétabilité et le reproductibilité des mesures. Des efforts sont donc réalisés pour tenter de substituer ce composant par un composant synthétique, dont les propriétés mécaniques pourraient être contrôlées. Deux substituts sont testés : de la peau de chamois synthétique, et du tuftane<sup>4</sup>. Les résultats sont présentés sur les figures 7.22 et 7.23.

4. Il s'agit d'un film de polyurethane thermoplastique destiné à des applications très diverses comme les textiles, les toboggans d'évacuation d'urgence des avions de lignes, ou la fabrication de convoyeurs pour l'industrie automatisée par exemple. Ce produit est fourni par la société Permali Gloucester Limited (<http://www.tuftane.com>).

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau

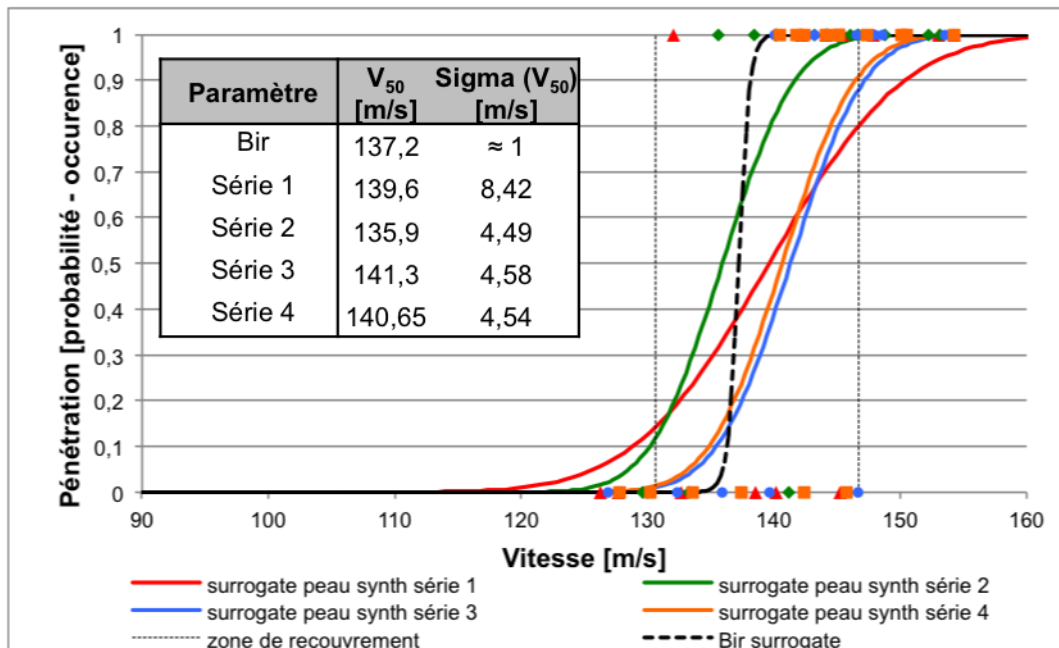


FIGURE 7.22. Résultats des courbes de  $V_{50}$  obtenus pour les tirs de projectiles RB1FS sur le "surrogate" constitué d'un bloc de gélatine, du panneau en mousse, et de peau de chamois synthétique.

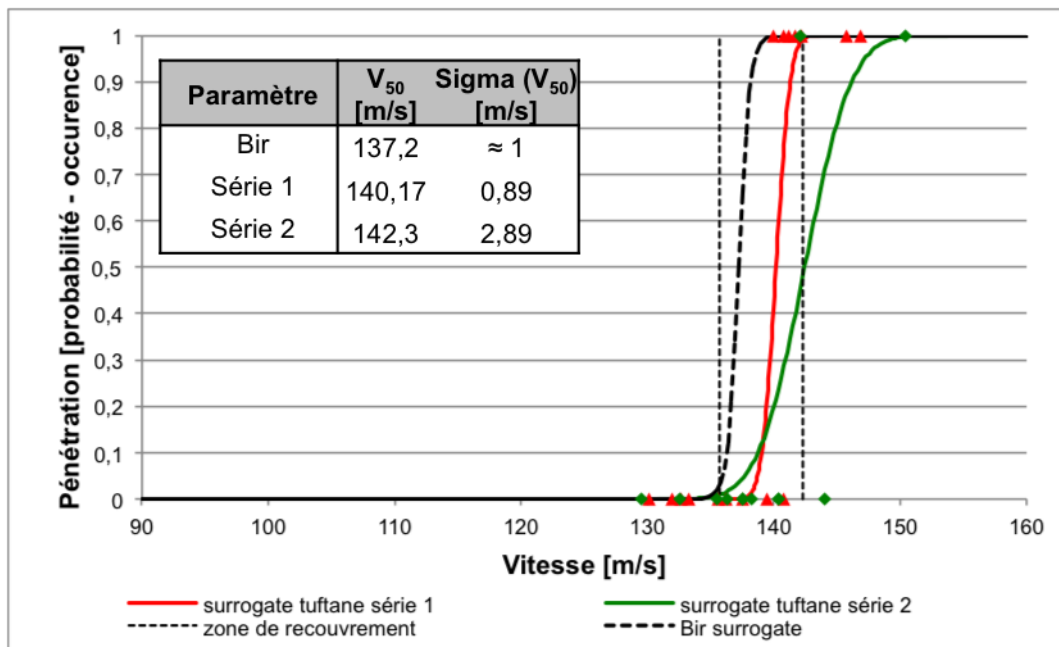


FIGURE 7.23. Résultats des courbes de  $V_{50}$  obtenus pour les tirs de projectiles RB1FS sur le "surrogate" constitué d'un bloc de gélatine, du panneau en mousse, et d'un film de tuftane.



On constate que contre toute attente, les résultats obtenus à l'aide de la peau de chamois synthétique présentent une dispersion plus grande que pour la peau de chamois naturelle. Cette dispersion est caractérisée par le facteur  $\sigma_{V_{50}}$  et visualisée par la pente de la courbe de probabilité. Ce composant est dès lors exclu.

Le "surrogate" employant le tuftane présente une dispersion plus faible que pour les deux autres configurations. Malheureusement, la valeur du  $V_{50}$  est légèrement plus élevée que celle obtenue à l'aide du "surrogate original", qui correspond mieux aux valeurs obtenues lors de tirs sur PMHS. Il serait intéressant de varier l'épaisseur du tuftane, ou de travailler éventuellement avec plusieurs couches, de manière à légèrement réduire cette valeur. Cette démarche n'a pas encore été effectuée.

En conclusion, le "surrogate" original semble produire les meilleurs résultats, en terme de biofidélité. C'est donc cette configuration qui sera employée par la suite.

### 7.3.1.3 Impacts de projectiles non-létaux

Hormis le RB1FS, dont les résultats viennent d'être présentés, trois autres projectiles ont été testés : le FN303, le beanbag, et le PMI. Comme déjà précisé, les 40 mm semblent ne présenter aucun risque de pénétration. Les résultats sont présentés sur les figures 7.24, 7.25 et 7.26.

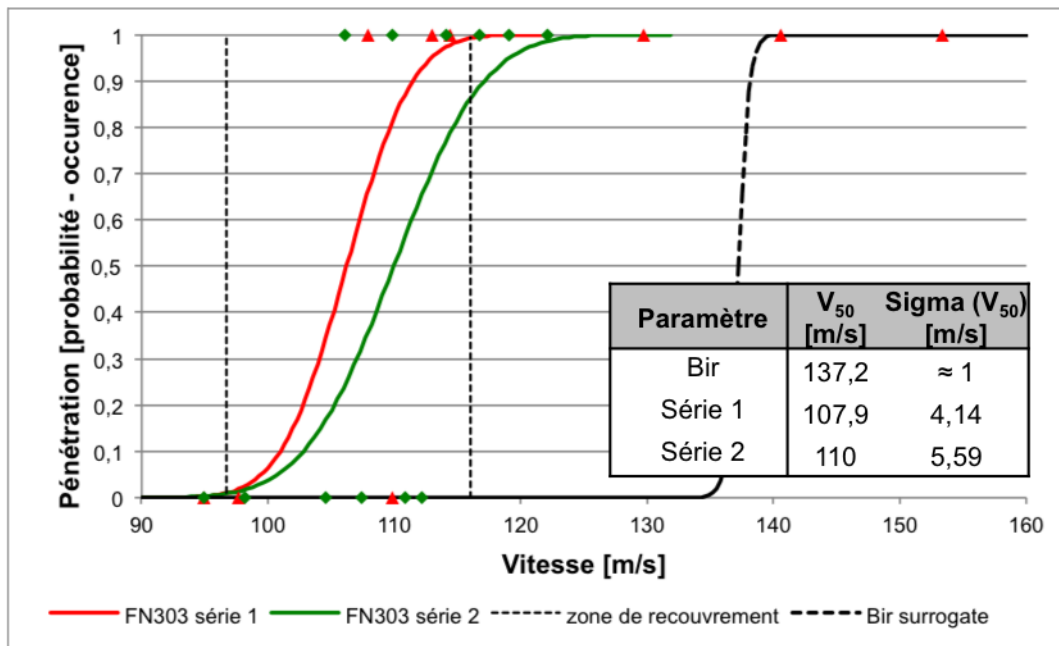


FIGURE 7.24. Résultats des courbes de  $V_{50}$  obtenus pour les tirs de projectiles FN303 sur le "surrogate original".

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau

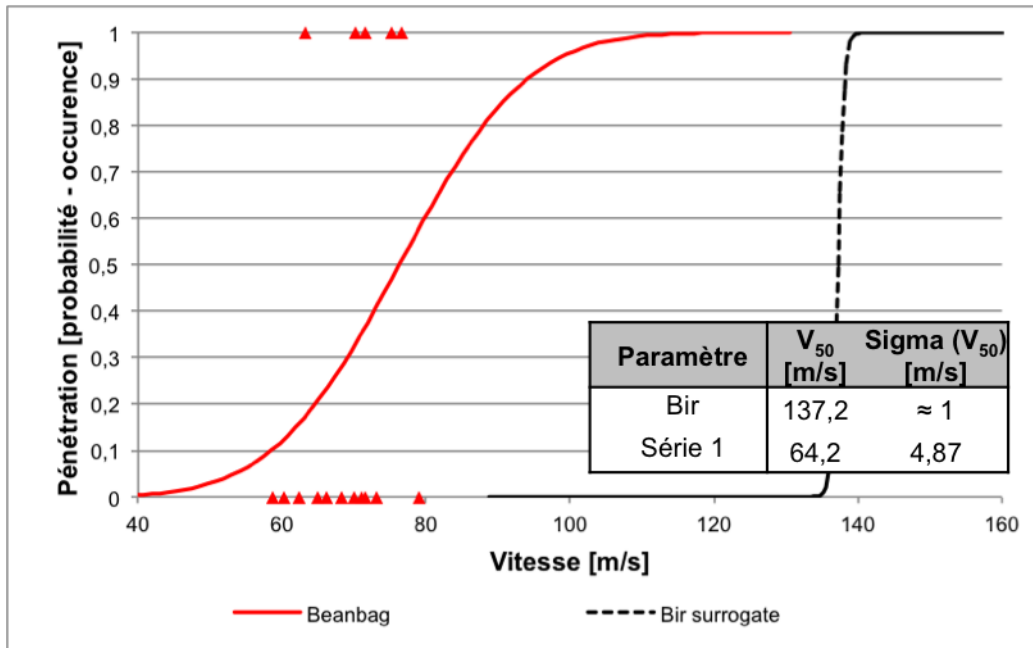


FIGURE 7.25. Résultats des courbes de  $V_{50}$  obtenus pour les tirs de projectiles beanbag sur le "surrogate original".

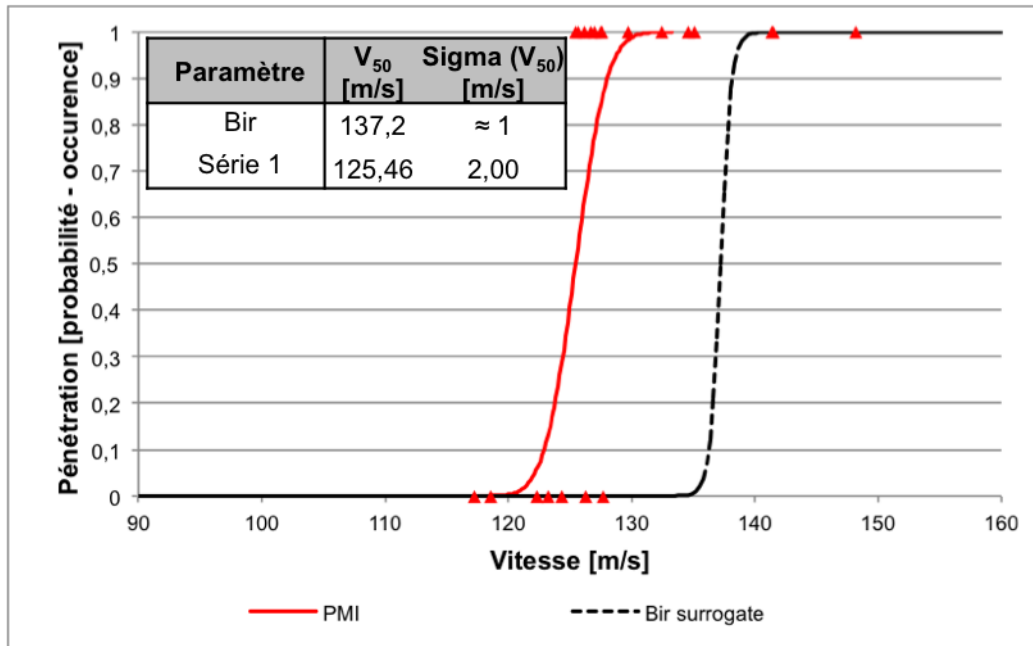


FIGURE 7.26. Résultats des courbes de  $V_{50}$  obtenus pour les tirs de projectiles PMI sur le "surrogate original".

On constate que le FN303 est caractérisé par une vitesse  $V_{50}$  inférieure à celle du RB1FS. Ceci est probablement dû à deux raisons. D'une part, le projectile est plus lourd, et donc dispose de plus d'énergie cinétique à l'impact. D'autre part le projectile est plus rigide. Quoi qu'il en soit, son  $V_{50}$  est largement supérieur à la vitesse du projectile à la bouche, qui est rappelons le, de 90 m/s. Cette vitesse est caractérisée par une probabilité de pénétration de la peau approximativement nulle. Le FN303 ne devrait donc jamais présenter de risque de pénétration. Il s'agit de la première conclusion de potentiel lésionnel d'un projectile présenté dans ce doctorat !

Les résultats du beanbag sont caractérisés par une courbe unique. D'autres tests ont été réalisés, mais les résultats n'étaient pas statistiquement suffisants pour appliquer la méthode Probit, de par l'absence de zone mixte. La vitesse  $V_{50}$  calculée est égale à 64 m/s, ce qui est bien inférieur à la vitesse nominale du projectile au moins égale à 70 m/s. Ces résultats permettent donc de conclure que le projectile beanbag présente des risques de pénétration de la peau lorsque le projectile est tiré à bout portant et que la vitesse avant impact est donc égale à la vitesse nominale du projectile. Ce résultat est en accord avec les différents cas de pénétration de la peau répertoriés dans la littérature [22, 23].

Enfin, les résultats du PMI sont caractérisés par un  $V_{50}$  égal à 125,5 m/s. Cette valeur est étonnante, puisque l'on s'attendait à retrouver une valeur supérieure à celle du RB1FS, de par l'aptitude qu'a le PMI à se déformer de manière spectaculaire. La masse est cependant plus élevée, ce qui pourrait expliquer la valeur plus faible du  $V_{50}$ . Contrairement aux deux autres projectiles, on ne peut conclure sur le potentiel de pénétration de la peau du projectile puisque celui-ci n'est pas encore caractérisé par une vitesse nominale de tir. Ces résultats aideront donc certainement le fabricant à dimensionner cette valeur.

#### 7.3.1.4 Comparaison des résultats et détermination de l'incertitude de mesure du $V_{50}$

L'incertitude de mesure du  $V_{50}$  est définie comme suit [93] :

$$IM_{v_{Tot}} = \sqrt{(IM_v)^2 + (IM_{v_{Probit}})^2} \quad (7.1)$$

avec :

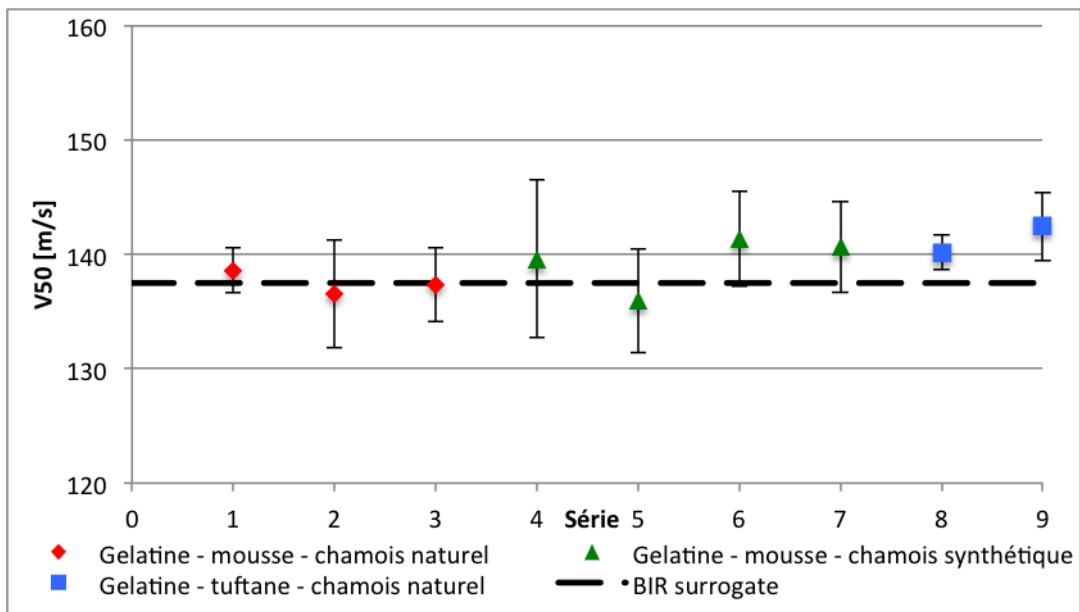
- $IM_{v_{Tot}}$  est l'incertitude de mesure de la vitesse  $V_{50}$ .
- $IM_v$  est l'incertitude de mesure de la vitesse, comme définie précédemment. Elle est évaluée à environ 1 % pour la base de mesure optique. Les calculs d'incertitudes ont été systématiquement effectués dans le travail de J. Goffin [93],

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau

mais ne sont pas présentés ici. L'incertitude de la mesure de vitesse par caméra haute-vitesse, employée uniquement pour déterminer la vitesse d'impact du projectile PMI, est évaluée, toujours par le même procédé, à 2,22 %.

- $IM_{v_{Probit}}$  est l'incertitude statistique liée à la détermination du  $V_{50}$  par la méthode Probit. Cette valeur détermine l'intervalle dans lequel le  $V_{50}$  se trouve avec une probabilité de 95 %. La démarche de calcul de ce paramètre est intégrée dans le logiciel implémentant la méthode Probit, développé par M. Maldague du département ABAL de l'ERM. Cette démarche, consiste à faire varier la valeur  $V_{50}$  en gardant le paramètre  $\sigma_{V_{50}}$  constant, et de regarder comment le paramètre de vraisemblance évolue. Cette évolution suit approximativement une loi normale. L'incertitude  $IM_{v_{Probit}}$  est caractérisée par deux fois l'écart-type de cette loi approximée, d'où l'intervalle de probabilité mentionné de 95 % [34].

Les résultats de la comparaison des différents "surrogates" étudiés sont présentés sur la figure 7.27. Les résultats comparant les différents projectiles sont présentés sur la figure 7.28. On y retrouve bien l'ensemble des conclusions précédemment présentées. L'intégralité des résultats est également reprise dans la table 7.5.



**FIGURE 7.27.** Ensemble des résultats de  $V_{50}$  obtenus pour l'étude du "surrogate", et incertitudes associées.

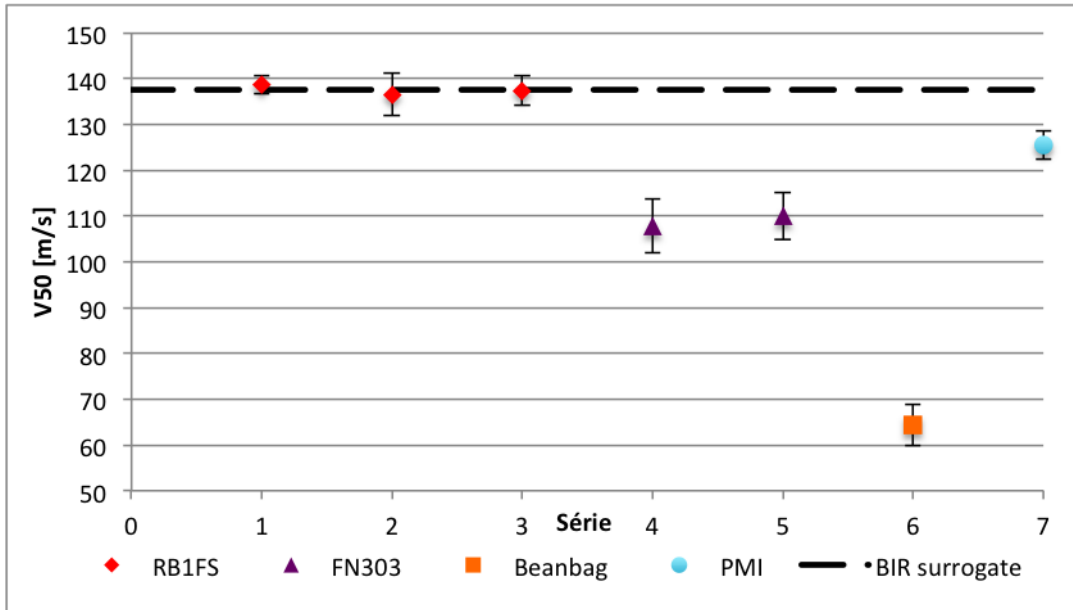


FIGURE 7.28. Ensemble des résultats de  $V_{50}$  obtenus pour l'étude de différents projectiles, et incertitudes associées.

"Surrogate"	Projectile	série	$V_{50}$ [m/s]	$\sigma_{V_{50}}$ [m/s]	$IM_{V_{50}}$ [m/s]
Bir	RB1FS	BIR	137,5	$\cong 1$	?
Bir	RB1FS	2	138,6	1,07	2
Bir	RB1FS	3	137,3	4,25	4,72
Bir	RB1FS	4	147,3	2,93	3,22
chamois synth	RB1FS	1	139,6	8,42	6,89
chamois synth	RB1FS	2	135,9	4,49	4,52
chamois synth	RB1FS	3	141,3	4,58	4,16
chamois synth	RB1FS	4	140,65	4,54	3,98
Tuftane	RB1FS	1	140,17	0,89	1,52
Tuftane	RB1FS	2	142,3	2,89	3,0
Bir	FN303	1	107,9	4,14	5,93
Bir	FN303	2	110	5,59	5,08
Bir	Beanbag	1	64,2	4,87	4,48
Bir	PMI	1	125,46	2,00	2,26

TABLE 7.5. Résumé des  $V_{50}$ , des  $\sigma_{V_{50}}$  et des incertitudes de mesure de la valeur  $V_{50}$  ( $IM_{V_{50}}$ ) obtenus pour les tirs sur "surrogate".

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau

Enfin, les résultats peuvent également être présentés en terme de densité énergétique  $DE_{50}$ , qui est la densité énergétique du projectile amenant une probabilité de pénétration de la peau du projectile égale à 50 %. Les résultats en ce qui concerne la comparaison des "surrogates" n'ont pas d'intérêt puisque le projectile tiré est systématiquement le même et que les conclusions sont donc tout à fait identiques à celles réalisées pour le  $V_{50}$ . Les résultats comparant les différents projectiles sont présentés sur la figure 7.29. On constate que le projectile Beanbag est maintenant caractérisé par une valeur  $DE_{50}$  supérieure aux autres projectiles. Le PMI et le RB1FS sont caractérisés par une  $DE_{50}$  relativement identique. Ceci indique que le caractère hautement déformable du projectile PMI n'apporte pas de performances supplémentaires quant à la non pénétration du projectile dans le "surrogate". Ce résultat aidera certainement le fabricant à dimensionner son matériau.

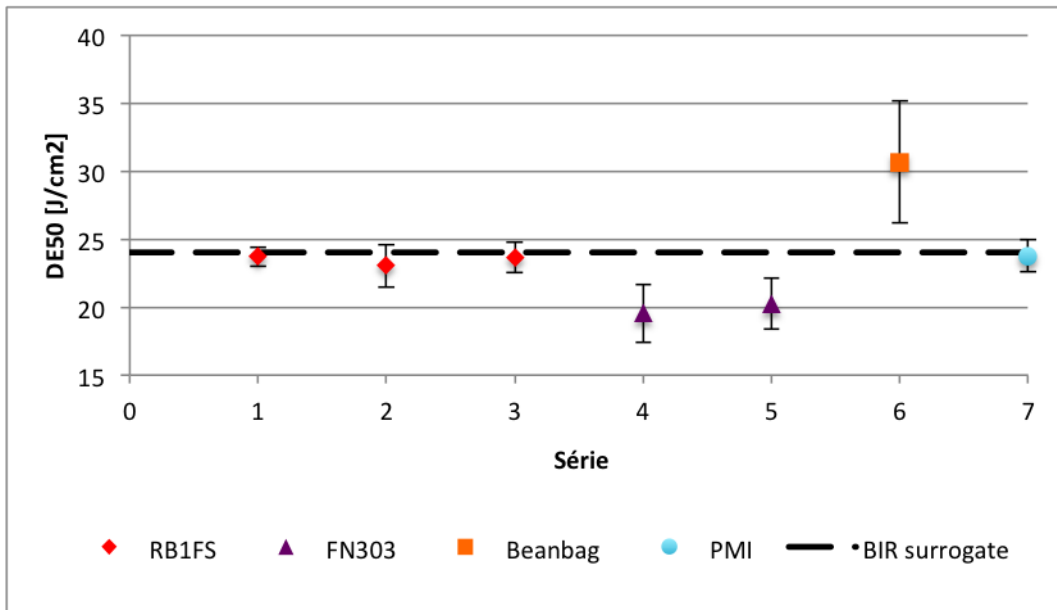


FIGURE 7.29. Ensemble des résultats de  $DE_{50}$  obtenus pour l'étude de différents projectiles, et incertitudes associées.

### 7.3.2 la méthode "*Force Wall*"

Les mesures nécessaires pour la méthode "*Force Wall*" ont déjà été expliquées. Il s'agit des mêmes mesures de force et de diamètres que celles présentées dans la section 7.2. Les incertitudes liées sont les mêmes également. L'idée est de mesurer la pression de contact durant l'impact. Si l'on émet l'hypothèse que la surface de contact est parfaitement pleine et circulaire, on peut en déduire la surface d'impact à tout instant. Par ailleurs, on suppose également que l'étude de l'impact se résume à son étude sur la direction de l'axe du projectile, considéré comme confondu avec l'axe du capteur. On peut donc calculer à tout moment la pression de contact moyenne opérée sur le capteur (on considère ici que le mouvement est parfaitement uniaxial) :

$$p(t) = \frac{F(t)}{\frac{\pi D(t)^2}{4}} \quad (7.2)$$

où

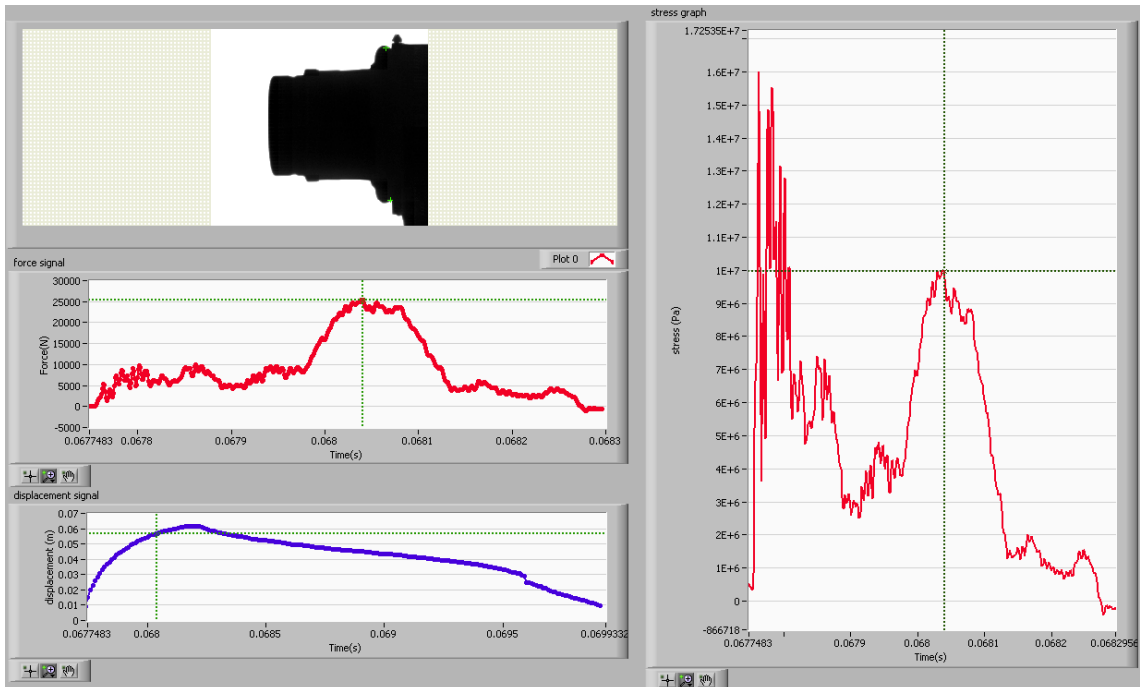
- $p(t)$  est la pression de contact moyenne au cours du temps, appliquée par le projectile sur le capteur de force, exprimée en  $Pa$ .
- $F(t)$  est la force axiale, appliquée au cours du temps, par le projectile sur le capteur, exprimée en  $N$ .
- $D(t)$  est le diamètre de la surface de contact au cours du temps, entre le projectile et le capteur de force, exprimé en  $m$ .

Cette pression est calculée à l'aide d'un logiciel dédié, présenté sur la figure 7.30.

Les résultats sont présentés pour le tir d'un projectile NS 40 mm et un projectile RB1FS (figures 7.31 et 7.32), tous deux tirés aux alentours de 90 m/s. La "*méthode WSU*" certifie la non-pénétration des deux projectiles à cette valeur, les cas rapportés ne répertorient d'ailleurs pas de pénétration de tels projectiles.

On constate dans les deux cas que la mesure de la contrainte dépasse la valeur seuil de 10 MPa spécifiée dans la section 3.3.2. La conclusion est donc que ces deux projectiles pénètrent la peau à cette vitesse, ce qui va en contradiction avec les résultats issus de la "*méthode WSU*". On en conclut donc que soit, la mesure n'est pas correcte, ou que soit la méthode n'est pas correcte. Des discussions dans les groupes OTAN présagent une modification de la mesure. Cette thèse n'étudiera donc pas davantage cette méthode. qui reste à valider.

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau



**FIGURE 7.30.** Exemple du calcul de la contrainte au cours du temps par le logiciel de poursuite.



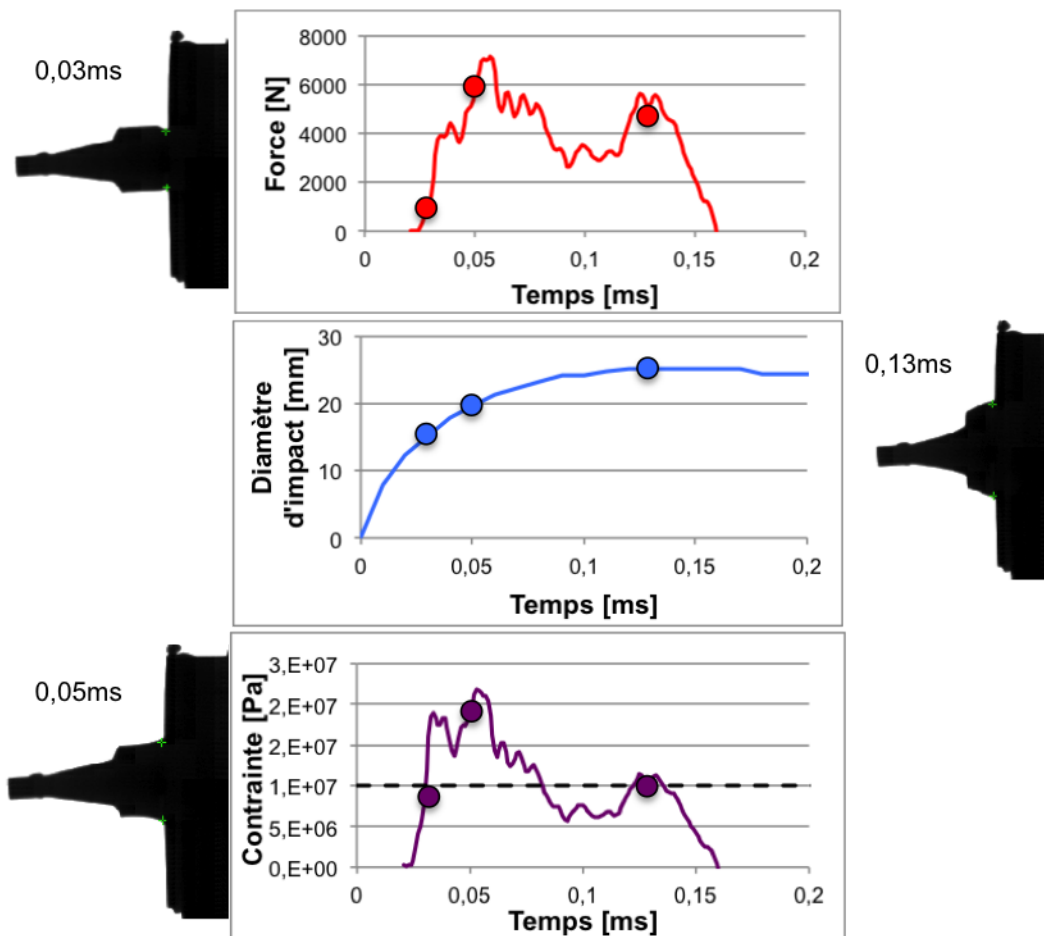


FIGURE 7.31. Exemple de la mesure de contrainte à l'impact au cours du temps pour le tir d'un projectile RB1FS impactant le capteur à une vitesse de 90,2 m/s.

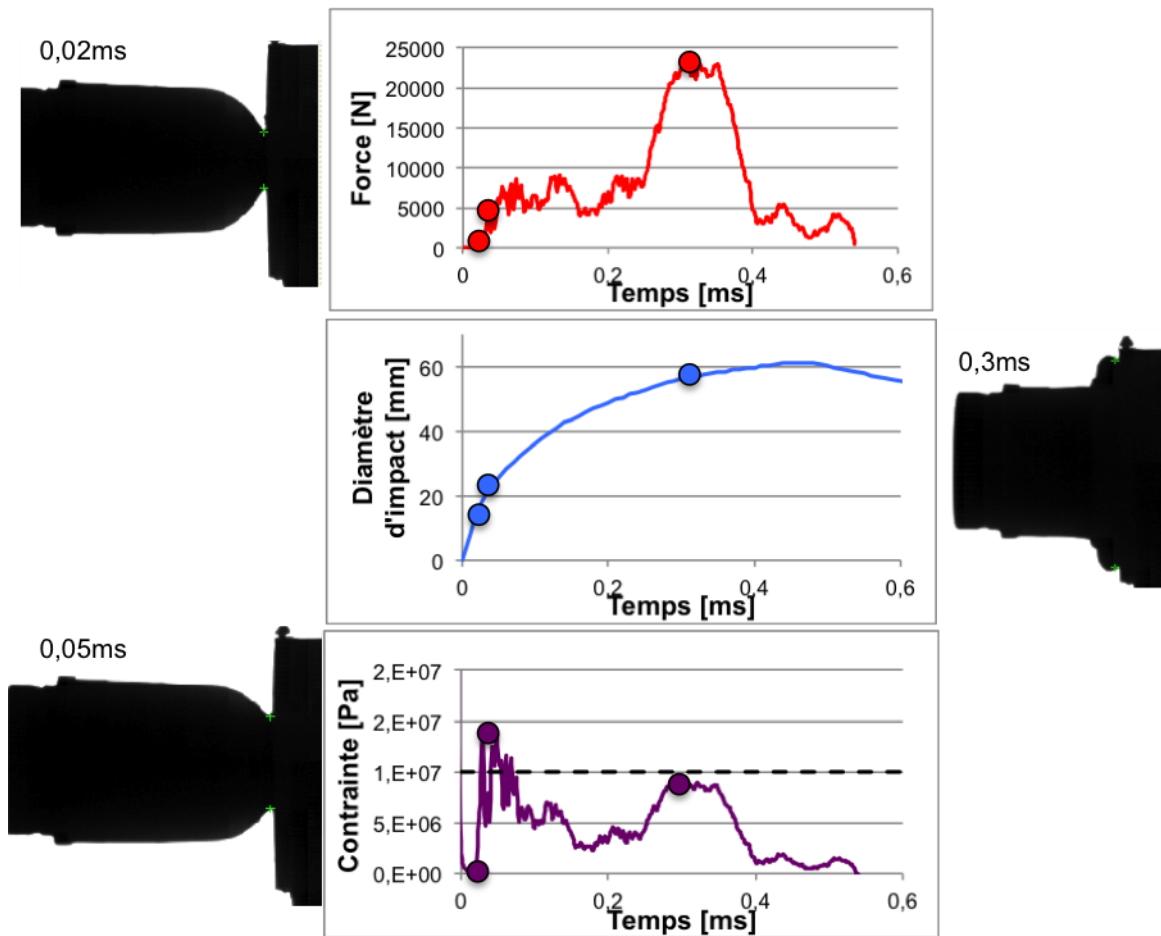


FIGURE 7.32. Exemple de la mesure de contrainte à l'impact au cours du temps pour le tir d'un projectile 40 mm NS impactant le capteur à une vitesse de 91,9 m/s.

### 7.3.3 Discussion des résultats

Au terme de cette section, deux méthodes ont été comparées : la "*méthode WSU*" et la méthode "*Force Wall*". Les deux méthodes donnent des résultats contradictoires, le choix se porte pour le moment sur la "*méthode WSU*", l'autre méthode étant pour l'instant jugée peu fiable.

La "*méthode WSU*" a fait l'objet de nombreux essais en vue d'améliorer ses composants, de manière à augmenter la répétabilité et la reproductibilité, sans succès. Dès lors, le "*surrogate*" original est employé.

L'application de cette méthode à différents projectiles permet de se faire une idée de leur potentiel de pénétration de la peau. Elle permet de s'assurer de la sûreté ou de la dangerosité d'un système existant, ou de dimensionner une vitesse de tir pour un projectile en développement. Ces deux démarches ont été appliquées, respectivement pour le FN303, le RB1FS et le beanbag d'une part, et pour le PMI d'autre part. Les résultats semblent cohérents avec les cas rapportés, ce qui rassure sur la validité de la méthode.

Les valeurs  $V_{50}$  obtenues sont relativement répétables d'un test à l'autre, malgré le caractère empirique du test, ce qui est certainement encourageant.

Bien sûr, les différents éléments constituant le "*surrogate*" ne sont pas dédiés à cette application. Cela pose certainement un problème de contrôle de la qualité des résultats. Rien n'assure que les fournisseurs mentionnés ne vont pas changer les propriétés d'un des matériaux à l'avenir. Par ailleurs, le caractère biologique de la peau de chamois rend également le contrôle sur ses propriétés mécaniques impossible. A l'avenir, il conviendrait donc de substituer ces éléments par des matériaux plus contrôlables et plus stables dans le temps en termes de propriétés mécaniques. C'est pourquoi des pistes d'améliorations ont été présentées, sans résultats définitifs pour l'instant.

Un moyen de contourner ce problème est de mettre au point un procédé de calibration des différents éléments constituant le "*surrogate*". Quelques pistes ont été imaginées, mais rien de concret n'est établi pour l'instant. Il s'agit donc d'une perspective, aussi bien de ce doctorat, que du document standardisé OTAN en cours d'approbation.

Un autre point négatif de cette méthode est la nécessité de varier la vitesse d'impact pour calculer la valeur  $V_{50}$ , ce qui nécessite en pratique l'ajustement de la vitesse à la bouche du projectile. Il est en effet difficile d'imaginer ce même test en faisant varier les distances de tirs pour faire varier la vitesse. Cette démarche poserait de gros problèmes de précision et de contrôle de l'attitude du projectile

### 7.3 Etude de la pénétration de la peau

---

à l'impact. Dans le cas présent, le problème est résolu grâce à l'emploi d'un canon pneumatique. Une autre approche, mise en avant dans le document standard OTAN, est de réaliser le test à une distance fixe, correspondant à la distance d'engagement étudiée. Le principe est alors de réaliser 28 tirs. Statistiquement, on peut dire que le projectile ne présente pas de risque de pénétration si aucune pénétration n'est observée lors de ces 28 coups [24]. Si au contraire, une ou plusieurs pénétrations sont observées, on peut conclure que le projectile a une probabilité non nulle de pénétration de la peau. Ce test a effectivement été réalisé pour le FN303, à une distance de un mètre, qui correspond à une vitesse proche de 90 m/s. La courbe du  $V_{50}$  montre à cette vitesse une probabilité de pénétration approximée à 0. Les résultats du test ne montrent aucune pénétration, ce qui est donc cohérent avec la démarche suivie.

En conclusion, même si certaines améliorations sont envisagées, le test en tant que tel donne déjà des résultats suffisamment satisfaisants pour être systématiquement employé pour une étude du potentiel de pénétration de la peau d'un projectile non-létal.

## 7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal

### 7.4.1 Introduction

Au terme de cette étude, les résultats sont enfin suffisants pour réaliser une étude globale de la létalité thoracique d'un système d'arme existant. Jusqu'à présent, les résultats présentés n'ont étudié que l'aspect projectile, cette section tient compte à présent également du lanceur.

Trois systèmes d'armes sont étudiés dans cette section. D'une part, le lanceur F2000 équipé d'un lance grenade UGL, qui emploie dans ce cas-ci le 40 mm Spartan LE de Nobel Sport, et d'autre part le FN303 et le FN303p, qui emploient tous deux le projectile FN303. Ces trois systèmes sont étudiés avec leurs organes de visée originaux<sup>5</sup>. Le lanceur donne une caractéristique de vitesse à la bouche du projectile, et de justesse et de dispersion d'impact du projectile qui varie avec la distance de tir<sup>6</sup>.

L'étude est divisée en deux parties : dans un premier temps, des tirs à l'aide du lanceur et du projectile envisagé sont effectués et des mesures de dispersion et de retardation sont réalisées<sup>7</sup>. La justesse est essentiellement dépendante de l'organe de visée employé. Comme la présente étude ne travaille qu'avec les organes de visée basiques de l'arme, peut adaptés aux distances de tir envisagées, cette justesse n'est pas étudiée. Dans un deuxième temps, l'impact est étudié en terme de pénétration de la peau et en terme d'impact non-pénétrant. L'étude de la pénétration exploite les résultats exposés préalablement dans ce chapitre (voir section 7.3), tandis que l'étude de l'impact non-pénétrant suit la méthode définie dans la section 4.5.1.2, et dont le schéma principal est repris sur la figure 7.33.

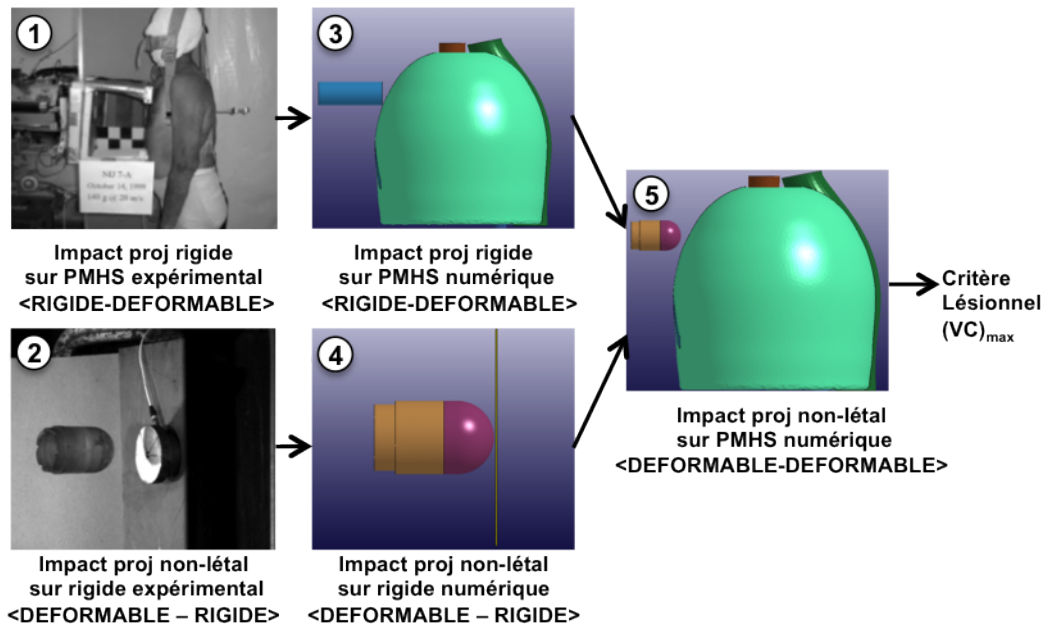
---

5. Ensemble de pièces servant à pointer une arme. En font partie la hausse et le guidon d'une arme à feu, par exemple. Ils permettent de réajuster le point visé et le point moyen des impacts [95].

6. La dispersion est définie comme la « distance entre le point d'impact ou d'éclatement d'un coup et le point d'impact moyen ou des éclatements (AAP-6, 1er mars 1973) ». La justesse est définie comme la « caractéristique d'un tir traduite par l'écart du point moyen des impacts par rapport à l'objectif (AAP-6, 1er octobre 1984). » [95].

7. La retardation moyenne est définie comme la perte de vitesse moyenne que subit le projectile pour chaque mètre parcouru.

## 7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal



**FIGURE 7.33.** La méthodologie de travail liée à l'emploi du capteur piézoélectrique.

Le point (1) correspondant aux résultats réalisés par WSU et présentés dans le chapitre 2, et le point (2) sont les résultats présentés préalablement dans ce chapitre (voir section 7.2). L'étude qui suit consistera donc brièvement à décrire les résultats des points (3), (4) et (5), dont l'objectif final est de déterminer le critère lésionnel  $(VC)_{max}$ . L'étude de ces trois points fait l'objet du doctorat de M. Nsiampa de l'ERM et est décrite dans les publications suivantes [73, 74]. L'ensemble des résultats des simulations numériques exposés par la suite est le fruit de son travail.

Les résultats de l'étude de l'impact dépendent bien évidemment de la vitesse d'impact du projectile. En effet, plus la vitesse du projectile est élevée, plus le potentiel du projectile est important. Or la vitesse d'impact est inversement proportionnelle à la distance de tir, selon la relation déterminée par la retardation, mesurée expérimentalement. Il est donc possible de relier le potentiel lésionnel à la distance de tir, ce qui détermine une distance de tir minimum pour garantir une lésion en deçà d'une certaine gravité, caractérisée par l'AIS.

La mesure de dispersion quant à elle permet de déterminer une distance de tir maximum, au-delà de laquelle la dispersion balistique est telle que l'atteinte de la cible, qui plus est dans une zone du corps spécifiée, ne pourra plus être garantie.

Enfin, l'efficacité, définie dans la section 3.4, est également évaluée et dimensionnée également une distance de tir maximum au delà de laquelle l'impact du projectile n'est plus efficace.

## 7.4.2 Détermination des valeurs seuils correspondant au potentiel lésionnel, à la dispersion et à l'efficacité

Le potentiel lésionnel maximum autorisé est défini comme dans le chapitre 2 :

« On accepte une probabilité maximum de 50 % d'obtenir une blessure caractérisée par un score de sévérité de l'échelle AIS >1. De plus on accepte une probabilité maximum d'observer une pénétration de la peau égale à 50 » % [14, 21, 33]

La lésion seuil spécifiée est caractérisée par un critère  $(VC)_{max}$  égal à 0,8m/s, tel que spécifié dans la section 3.2.4.

La probabilité de pénétration de la peau est évaluée à l'aide du "surrogate" et des résultats obtenus dans la section 7.3.1.3.

La dispersion maximum est basée sur des mesures anthropomorphiques, et suit le raisonnement suivant : on dimensionne la dispersion maximum telle qu'elle permette de minimiser la chance d'impacter la tête de la personne touchée, lors d'un tir visant le centre de masse de cette personne. Des données de la littérature définissent la distance moyenne entre le début de la tête et le centre de masse comme étant égale à 32 cm [96, 97]. Si l'on suppose que la dispersion est circulaire, et suit une loi normale, on peut la caractériser par sa valeur  $R_{90}$ , qui correspond au rayon du cercle contenant 90 % des impacts d'un système caractérisé par une certaine dispersion :

$$R_{90} = 2,146 \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \quad (7.3)$$

où

- $\sigma_x$  est l'écart type de la localisation de l'impact par rapport au point moyen, selon l'axe horizontal.
- $\sigma_y$  est l'écart type de la localisation de l'impact par rapport au point moyen, selon l'axe vertical.

La dispersion maximum acceptable est donc caractérisée par un rayon  $R_{90}$  égal à 32 cm.

Enfin, l'efficacité est garantie si la densité énergétique du projectile à l'impact est supérieure à 3,62 J/cm<sup>2</sup> (voir section 3.4).

### 7.4.3 Le modèle numérique thoracique

Le développement, les simulations et la validation du modèle numérique thoracique ont été réalisés à l'aide du code d'éléments finis LS-DYNA. Le thorax a été développé à l'aide de données de matériaux et de géométries issues de la littérature [69–72]. On retrouve sur la figure 7.34 une illustration du thorax numérique.

Il est validé pour les impacts de projectiles non-létaux à l'aide des résultats de WSU présentés dans la section 3.2.4 et dans l'annexe D. Les résultats des essais de validation sont présentés sur la figure 7.35. Cette validation correspond à la simulation d'un impact d'un projectile de 37 mm de diamètre, et de 140 g, supposé infiniment rigide. Le projectile est tiré à 20 m/s et 40 m/s. Les résultats numériques sont comparés aux corridors biomécaniques ( section 3.2.4 et annexe D). La validation à 60 m/s doit encore être effectuée. Les valeurs du critère  $(VC)_{max}$  sont reprises dans la table 7.6. On constate que les valeurs numériques se situent bien dans l'intervalle des mesures expérimentales effectuées. Les résultats sont considérés comme suffisamment valables pour poursuivre la résolution du schéma de la figure 7.33.

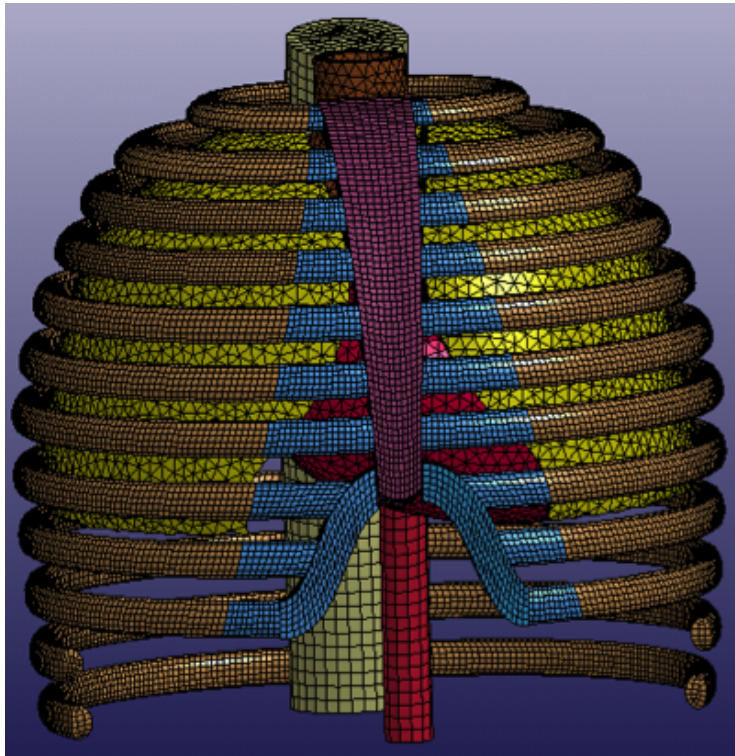
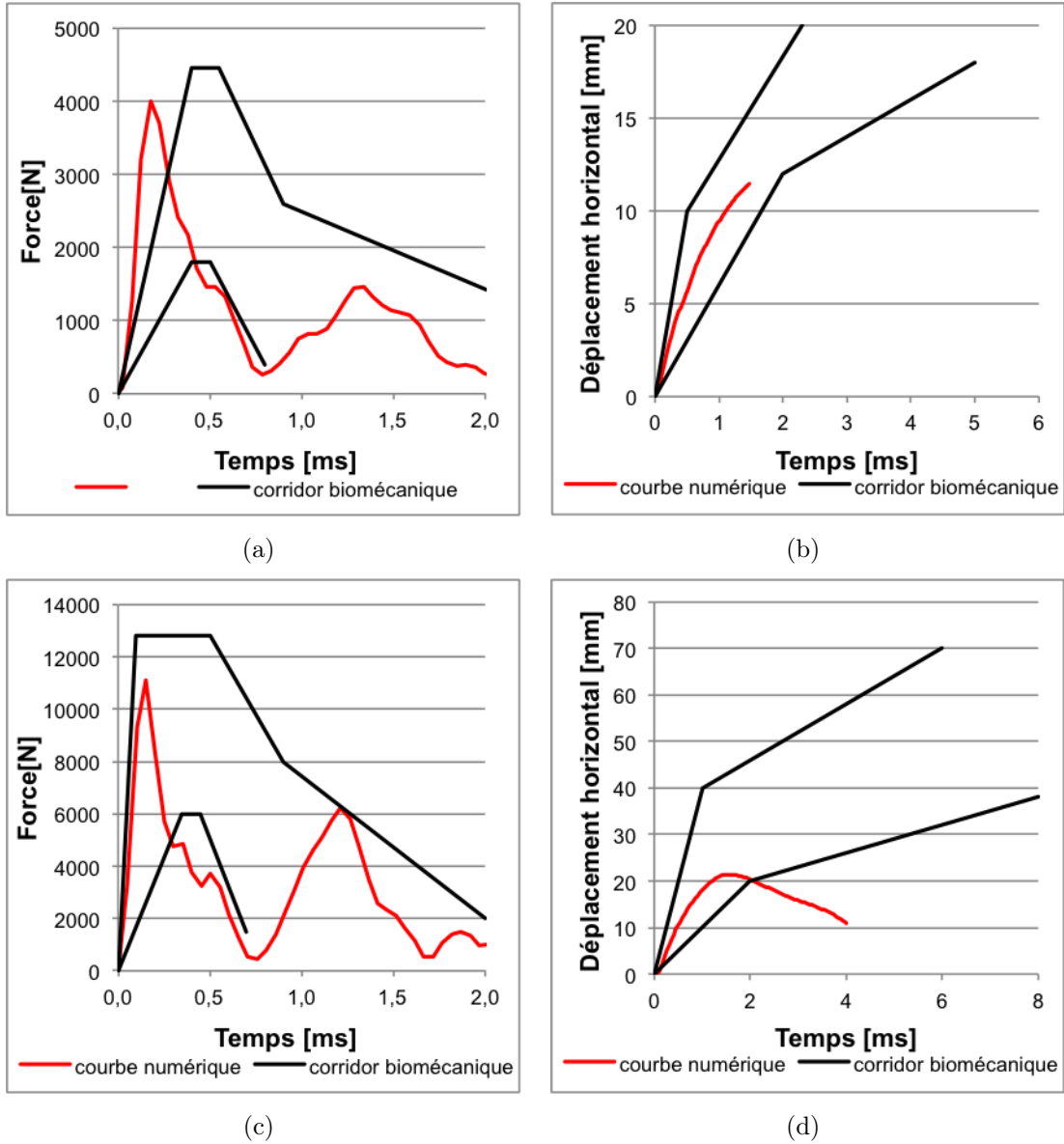


FIGURE 7.34. Illustration du thorax numérique développé en LS-DYNA.





**FIGURE 7.35.** Les résultats de validation du thorax numérique, grâce aux corridors biomécaniques. (a) Le graphe force en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 20 m/s. (b) Le graphe déplacement horizontal du thorax en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 20 m/s. (c) Le graphe force en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 40 m/s. (d) Le graphe déplacement horizontal du thorax en fonction du temps pour un impact du projectile de 140 g à 40 m/s.

## 7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal

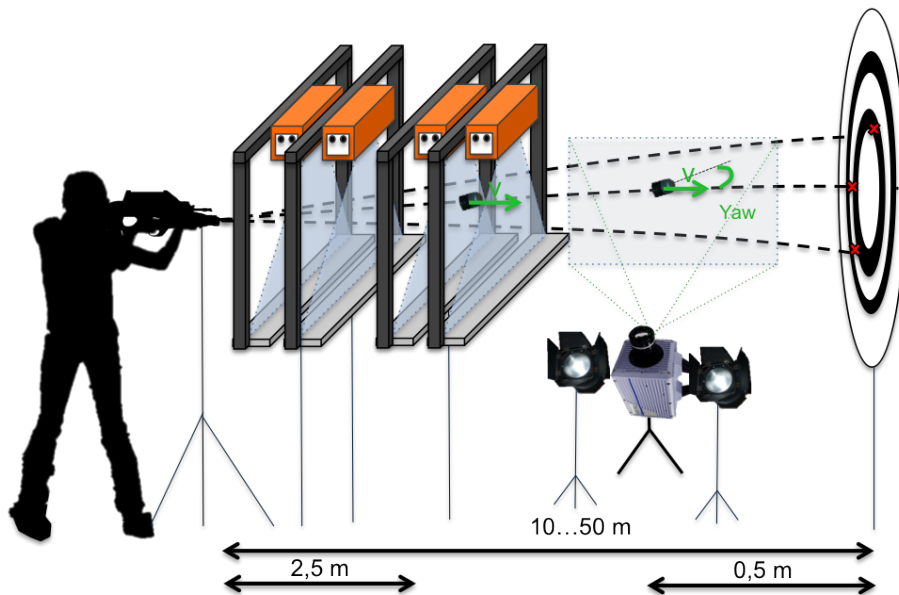
Vitesse du projectile [m/s]	$(VC)_{max}$ numérique [m/s]	Intevalles de $(VC)_{max}$ expérimentaux [m/s]
20	0,27	0,24 - 0,51
40	1,14	0,65 - 2,35

**TABLE 7.6.** Les valeurs du critère  $(VC)_{max}$  relevées expérimentalement et numériquement.

### 7.4.4 Étude du système d'arme F2000 tirant le projectiles Spartan LE 40 de Nobel Sport

#### 7.4.4.1 Réalisation de tirs à l'aide du lanceur F2000 et du projectile à différentes distances

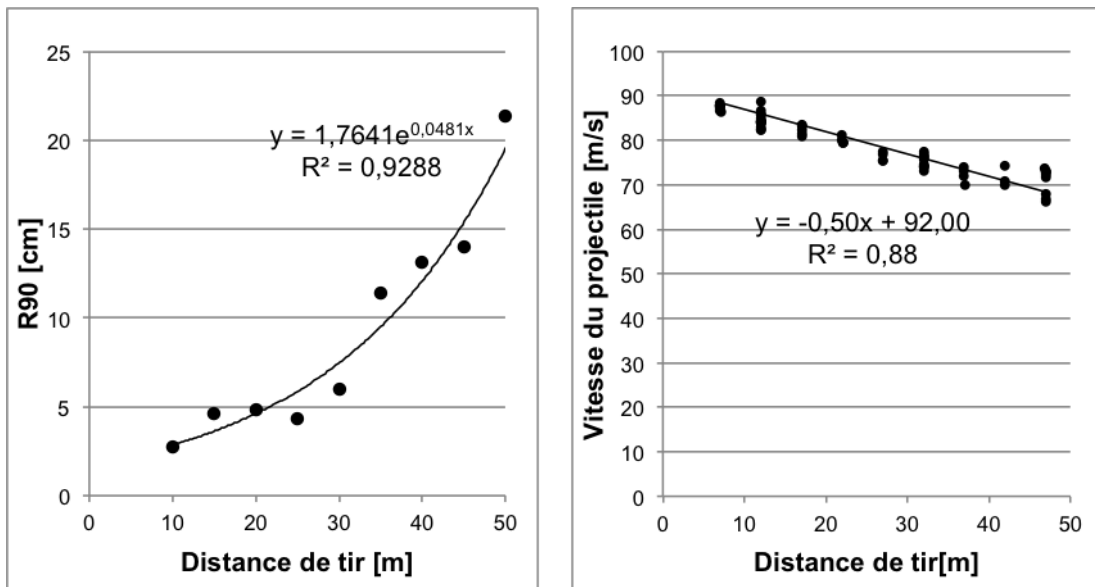
La première étude à réaliser est celle du tir du projectile à l'aide du lanceur F2000 à différentes distances de la cible. Ces tirs sont réalisés dans le laboratoire de balistique du département ABAL de l'ERM. Il s'agit donc de tirs en conditions intérieures sans vent. Le montage expérimental est présenté sur la figure 7.36.



**FIGURE 7.36.** La montage expérimental employé pour la mesure de la dispersion du système d'arme et la retardation du projectile.

Le tireur est placé en position debout avec support, de manière à maximiser sa précision. Une première mesure de vitesse est réalisée à une distance de 2,5 m de la bouche du canon à l'aide de base de mesure optique Drello LS9iN. Une deuxième

mesure de vitesse est réalisée à 0,5 m de la cible à l'aide d'une caméra haute vitesse, de manière à ne pas placer d'instruments sur la trajectoire potentielle du projectile. Les distances de tirs sont variées de 10 m à 50 m, et la position de l'impact est marquée à l'aide d'une cible en papier, perforée à chaque tir. La détermination et la visualisation du  $R_{90}$  est réalisée à l'aide d'un logiciel dédié, développé en LabVIEW et présenté dans l'annexe I. Les résultats de dispersion et de retardation sont présentés sur la figure 7.37.



**FIGURE 7.37.** (a) Les résultats de dispersion et (b) les résultats de retardation obtenus suite au tir du projectile NS à l'aide du lanceur F2000, en intérieur.

Sur chaque figure, on détermine des courbes de tendance qui maximisent la vraisemblance  $R^2$ . La dispersion suit une courbe exponentielle. On remarque que l'hypothèse d'une retardation constante sur la trajectoire de tir est tout à fait acceptable, au vu de la linéarité des résultats de la figure 7.37(b). La droite de tendance est caractérisée par une valeur égale à 92 m/s lorsque la distance est nulle. Cette valeur correspond à la vitesse à la bouche du projectile.

#### 7.4.4.2 Etude de la pénétration de la peau

Comme déjà mentionné, diverses sources indiquent que le projectile 40 mm ne pénètre jamais, même à vitesse nominale. La distance de tir minimum selon ce critère est de 0 m.

### 7.4.4.3 Etude de l'impact non-pénétrant

Déterminer le potentiel lésionnel du projectile en terme d'impact non-pénétrant, revient au calcul du critère  $(VC)_{max}$ . Il reste pour cela à réaliser les étapes 4 et 5 de la figure 7.33. La validation du projectile est basée sur les tirs réalisés sur mur rigide, présentés dans la section 7.2.1. La comparaison entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux est présentée sur la figure 7.38. Les courbes sont synchronisées de manière à ce que le temps  $t = 0$  corresponde au début du contact entre le projectile et le mur rigide.

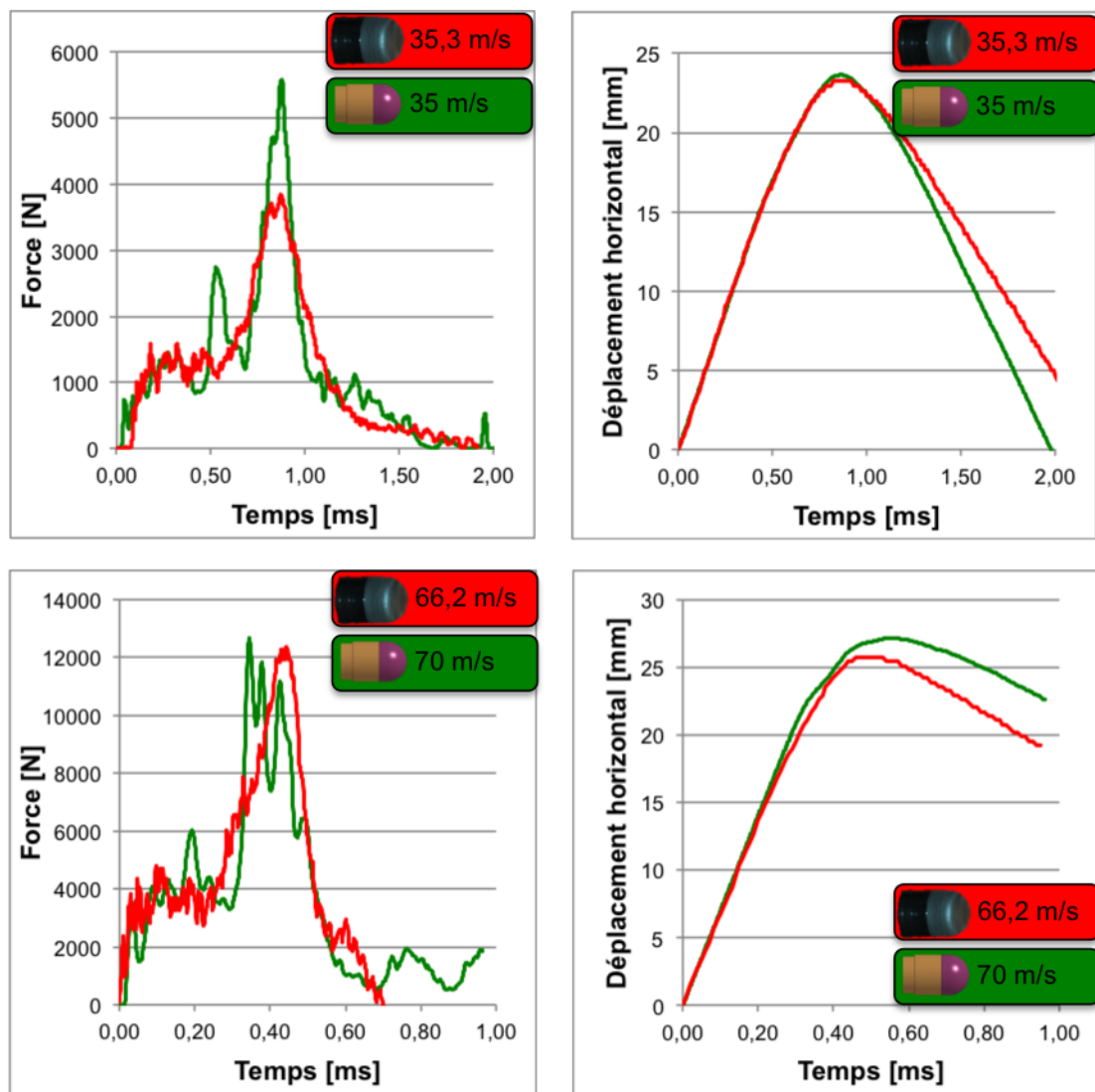


FIGURE 7.38. Comparaison des résultats expérimentaux de tirs du projectile NS sur mur rigide avec les résultats issus des simulations numériques.

On constate que les résultats sont relativement similaires, ce qui permet de pouvoir passer à l'étape suivante.

La dernière étape consiste à simuler le tir du projectile modélisé sur le thorax modélisé. Les résultats sont présentés sur la figure 7.39.

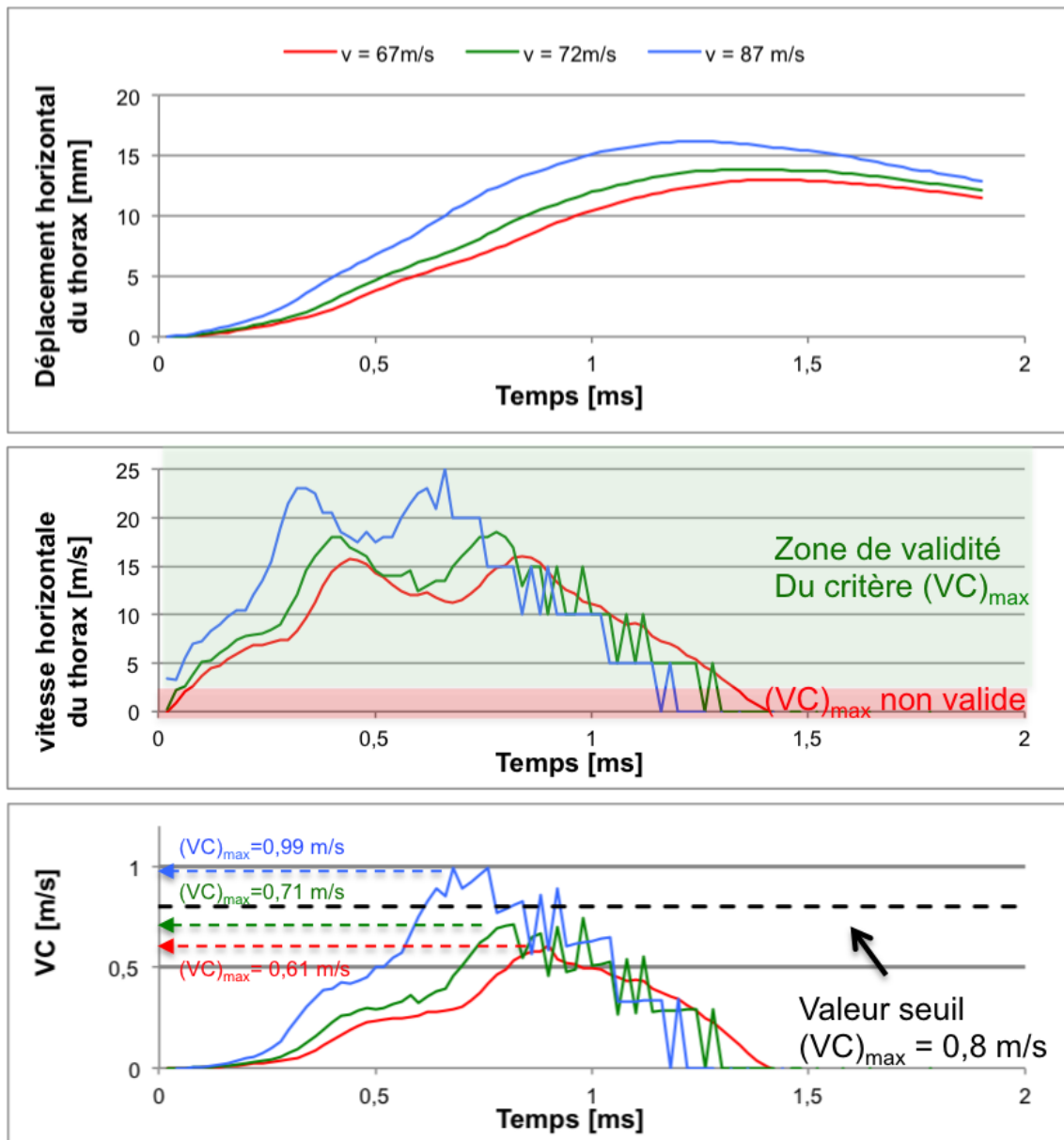


FIGURE 7.39. Les résultats du calcul du critère  $(VC)_{max}$  mesuré pour l'impact d'un projectile Nobel Sport impactant le thorax.

## 7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal

On y voit que le  $(VC)_{max}$  est atteint à peu près simultanément à la valeur de la vitesse maximum. On constate par ailleurs, grâce à la zone en vert, que la vitesse horizontale du thorax est bien dans l'intervalle de validité du critère  $(VC)_{max}$  mentionnées dans la section 3.2.1 (3 m/s à 30 m/s) [43, 44].

On peut comparer les valeurs  $(VC)_{max}$  ainsi calculées à la tolérance lésionnelle du thorax, fixée à  $VC_{max} = 0,8 \text{ m/s}$ . On constate par exemple que le tir à 87 m/s ne satisfait pas à ce critère, mais bien les deux autres vitesses. Ces résultats seront collationnés dans la section suivante.

### 7.4.4.4 Etude des distances d'emploi du système d'arme F2000 - NS

On résume l'ensemble de résultats obtenus dans la table 7.7.

Distance d'engagement	Vitesse du projectile à l'impact	Energie cinétique	Critère thoracique (VC)max<0,8 m/s	Pénétration de la peau évaluée sur le surrogat	Critère de dispersion R90<32cm	Efficacité DE>3,62 J/cm2	Resultat critère en échec
[m]	[m/s]	[J]	[m/s]	[-]	[cm]	[J/cm2]	[-]
0	92	177	1,08	NP	0,00	14,08	(VC)max
10	87	158	0,99	NP	2,78	12,59	(VC)max
20	82	141	0,90	NP	4,56	11,18	(VC)max
30	77	124	0,80	NP	5,96	9,86	OK
40	72	108	0,71	NP	13,15	8,62	OK
50	67	94	0,61	NP	21,37	7,47	OK
60	62	80	0,52	NP	30,37	6,39	R90?
70	57	68	0,43	NP	42,87	5,40	R90
80	52	57	0,33	NP	57,76	4,50	R90
90	47	46	0,24	NP	75,02	3,67	R90
100	42	37	0,14	NP	94,67	2,93	R90, DE

\* P= pénétration, NP = pas de pénétration

TABLE 7.7. Résultat final de l'analyse de létalité du projectile NS.

Le calcul de la vitesse du projectile à l'impact par rapport à la distance de tir se réalise grâce à l'utilisation de la figure 7.37(b). L'énergie cinétique est indiquée à titre informatif mais n'intervient pas dans l'analyse de létalité du projectile. Le critère thoracique est calculé pour chaque vitesse grâce à la simulation numérique de l'impact du projectile numérique sur le thorax numérique. L'évaluation de la pénétration de la peau se réalise en principe sur le "surrogate", mais n'a pas été réalisée ici, puisque le résultat exposé a déjà été démontré. Enfin, la dispersion est évaluée pour chaque distance grâce à l'exploitation de la figure 7.37(a) La valeur correspondante à 60 m est indiquée en orange, puisque cette valeur a du être extrapolée des

données de dispersion, car les résultats expérimentaux caractérisent des tirs de 10 m à 50 m. Sa valeur devrait idéalement être mesurée. L'efficacité consiste simplement au calcul de densité énergétique, calculée avec une surface d'impact caractérisée par le diamètre nominal du projectile. On constate que la distance de tir doit être comprise entre 30 m et 60 m pour satisfaire à l'ensemble des critères exposés. Le critère délimitant la distance minimum est le critère  $(VC)_{max}$ , tandis que le critère déterminant la distance maximum est le R90.

### 7.4.5 Etude des système d'arme FN303 et FN303p tirant le projectile FN303

La démarche employée est identique à celle démontrée pour l'analyse de létalité du système d'arme "F2000 - NS".

#### 7.4.5.1 Réalisation de tirs à l'aide du FN303 et du FN303p à différentes distances

Les résultats de dispersion et de retardation sont présentés sur la figure 7.40.

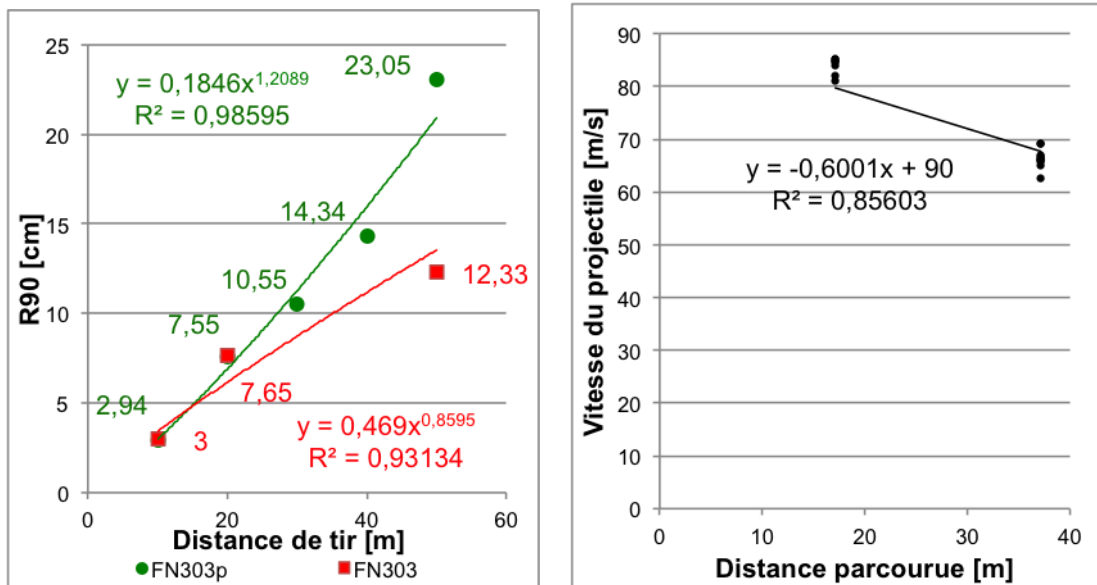


FIGURE 7.40. (a) Les résultats de dispersion et (b) les résultats de retardation obtenus suite au tir du projectile FN303 à l'aide du lanceur FN303 et du FN303p, en intérieur.

La retardation du projectile est identique pour les deux lanceurs, les résultats présentés ont été mesurés lors du tir du projectile dans le lanceur FN303.

#### 7.4.5.2 Etude de la pénétration de la peau

L'étude de la pénétration du projectile FN303 sur le "*surrogate*" a été réalisée dans la section 7.3.1.3 On observe sur la figure 7.24 que la valeur du  $V_{50}$  est située aux alentours de 108 m/s. On constate également que les vitesses nominales du FN303 (90 m/s) et du FN303p (80 m/s) correspondent à une probabilité de pénétration approximée à 0%. Par ailleurs, le test des vingt-huit tirs mentionné dans la section 7.3.3 précise que la vitesse nominale de 90 m/s n'amène aucun risque de pénétration. On en conclut que le projectile FN303 ne présente aucun risque de pénétration de la peau, quel que soit le lanceur employé.

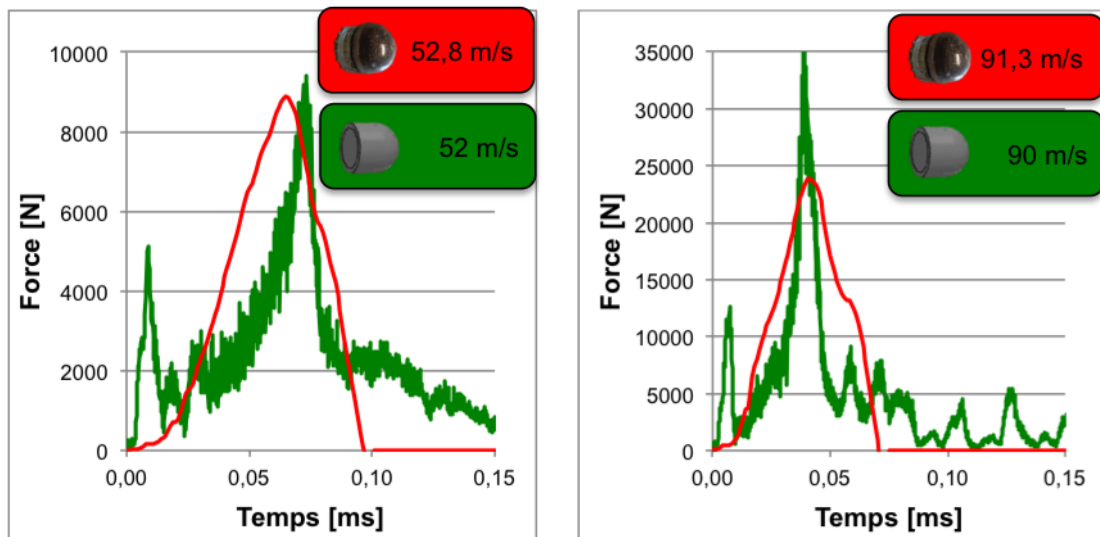
#### 7.4.5.3 Etude de l'impact non-pénétrant

L'impact du projectile FN303 est beaucoup plus complexe à simuler que le projectile Nobel Sport. La fragmentation du projectile nécessite des modèles de ruptures, et la dispersion des éléments rend la tâche encore plus complexe. Par ailleurs, la seule mesure de validation pertinente pour réaliser la comparaison entre les valeurs expérimentales et le modèle numérique sont les mesures de force. En effet, la fragmentation du projectile rend les mesures de déplacements non pertinentes.

En conséquence de tout cela, les résultats du modèle numérique n'ont pas encore atteint la qualité de ceux du modèle du projectile NS. La comparaison de la mesure de force expérimentale et celle issue des simulations numériques est présentée sur la figure 7.41. On y voit que les courbes numériques ont tendance à abréger le phénomène et à le rendre plus intense en terme de force. Le choc est donc plus rigide. On peut raisonnablement émettre l'hypothèse qu'un choc plus rigide est lié à un potentiel lésionnel plus important lors de l'impact sur thorax humain. Ce modèle a donc tendance à surestimer les critères lésionnels et les lésions induites.

Les résultats des mesures sur le thorax numérique sont présentées sur la figure 7.42. On observe que les valeurs du critères  $(VC)_{max}$  sont bien en deçà de la tolérance lésionnelle du thorax fixée à 0,8 m/s. Cette valeur faible est due à la faible contribution de la valeur de la courbe du déplacement horizontal. Le thorax ne s'enfonce effectivement que de quelques millimètres. On observe également beaucoup d'oscillations au début sur la courbe de vitesse de déplacement, sans conséquence sur le résultat du  $(VC)_{max}$  toutefois, puisque celui-ci est atteint plus tard aux alentours de 0,5 ms. Enfin, on constate que la vitesse horizontale du thorax est bien dans l'intervalle de validité du critère  $(VC)_{max}$  mentionnées dans la section 3.2.1 (3 m/s à 30 m/s) [43, 44].





**FIGURE 7.41.** *Comparaison des résultats expérimentaux de tirs du projectile FN303 sur mur rigide avec les résultats issus des simulations numériques.*

7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal

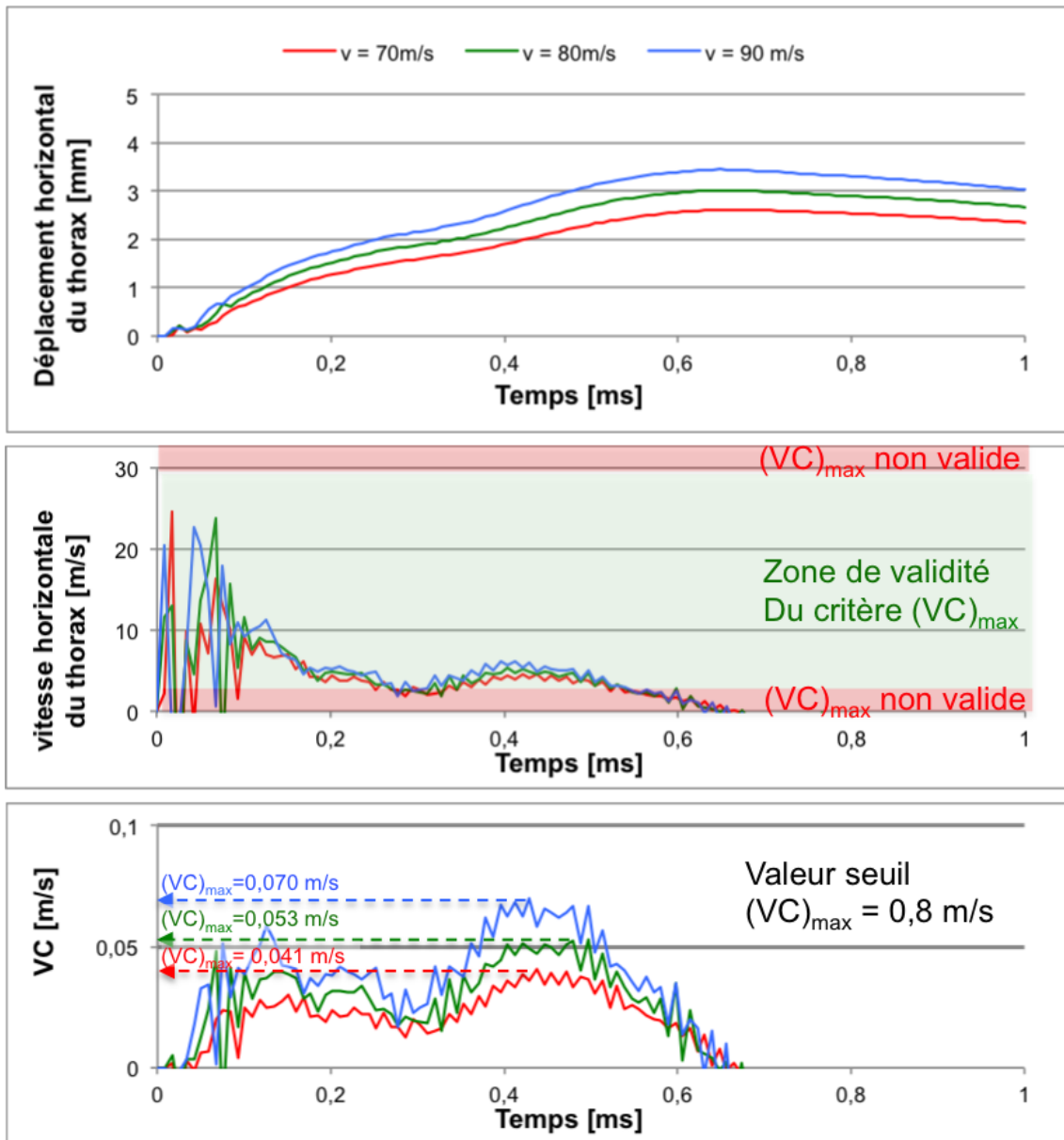


FIGURE 7.42. Les résultats du calcul du critère  $(VC)_{max}$  mesuré pour l'impact d'un projectile FN303 impactant le thorax.

#### 7.4.5.4 Etude de la distance d'emploi du FN303 et du FN303p

La table 7.8 récapitule la même démarche que celle effectuée pour le projectile NS, hormis le fait qu'on détaille cette fois deux lanceurs.

On constate que la distance minimum est de 0 m puisque les critères du  $(VC)_{max}$  et de la pénétration de la peau sont déjà satisfaits à cette distance. L'étude de la distance maximum est dimensionnée par le critère d'efficacité, qui donne une distance maximum de 72 m pour le FN303 et de 54 m pour le FN303p. Les valeurs de dispersion sont très bonnes, ce qui rend ce critère moins sévère que celui de l'efficacité. Il est toutefois à noter que les valeurs mentionnées de la dispersion au delà de 50 m ont dû être extrapolées. On peut donc émettre des réserves quant à leur pertinence. C'est pour cette raison qu'elle ont été mise en évidence en orange, ce qui signale qu'elle doivent être retravaillées.

Le résultat très intéressant exposé dans cette table est le fait que le projectile reste non dangereux, même à bout portant, ce qui est une caractéristique très recherchée par les utilisateurs, puisqu'elle écarte la question de l'évaluation de la distance avant tir pour garantir un tir sans risque de lésion importante. Elle permet ainsi un engagement en intérieur, où les distances sont souvent très courtes.

7.4 Détermination de la létalité thoracique et de l'efficacité d'un système d'arme non-létal

(a)

Distance d'engagement	Vitesse du projectile à l'impact	Energie cinétique	Critère thoracique (VC)max<0,8 m/s	Pénétration de la peau évaluée sur le surrogat	Critère de dispersion R90<32cm	Efficacité DE>3,62 J/cm2	Resultat critère en échec
[m]	[m/s]	[J]	[m/s]	[-]	[cm]	[J/cm2]	[-]
0	90	34	0,07	NP	0,00	12,81	OK
10	84	30	< 0,07	NP	3,39	11,16	OK
20	78	26	< 0,07	NP	6,16	9,62	OK
30	72	22	< 0,07	NP	8,72	8,20	OK
40	66	19	< 0,07	NP	11,17	6,89	OK
50	60	15	< 0,07	NP	13,53	5,69	OK
60	54	12	< 0,07	NP	15,83	4,61	R90?
70	48	10	< 0,07	NP	18,07	3,64	R90?
80	42	7	< 0,07	NP	20,27	2,79	DE
90	36	6	< 0,07	NP	22,43	2,05	DE
100	30	4	< 0,07	NP	24,56	1,42	DE

\* P= pénétration, NP = pas de pénétration

(b)

Distance d'engagement	Vitesse du projectile à l'impact	Energie cinétique	Critère thoracique (VC)max<0,8 m/s	Pénétration de la peau évaluée sur le surrogat	Critère de dispersion R90<32cm	Efficacité DE>3,62 J/cm2	Resultat critère en échec
[m]	[m/s]	[J]	[m/s]	[-]	[cm]	[J/cm2]	[-]
0	80	27	0,05	NP	0,00	10,12	OK
10	74	23	< 0,05	NP	2,99	8,66	OK
20	68	20	< 0,05	NP	6,90	7,31	OK
30	62	16	< 0,05	NP	11,27	6,08	OK
40	56	13	< 0,05	NP	15,96	4,96	OK
50	50	11	< 0,05	NP	20,90	3,95	OK
60	44	8	< 0,05	NP	26,05	3,06	DE
70	38	6	< 0,05	NP	31,39	2,28	DE
80	32	4	< 0,05	NP	36,89	1,62	DE, R90
90	26	3	< 0,05	NP	42,53	1,07	DE, R90
100	20	2	< 0,05	NP	48,31	0,63	DE, R90

\* P= pénétration, NP = pas de pénétration

TABLE 7.8. Résultat final de l'analyse de létalité du projectile FN303 tiré à l'aide du lanceur FN303(a), et du lanceur FN303p (b).

## 7.4.6 Discussion des résultats

La méthode et l'ensemble des résultats mis au point permettent enfin de conclure quant à la létalité thoracique d'un projectile non-létal. Comme présenté, cette méthode est applicable à des projectiles déformables ou fragmentables, contrairement aux résultats qu'on retrouve dans la littérature actuelle sur le sujet.

En collationnant les résultats de la méthode hybride, de l'étude de la pénétration à l'aide du "*surrogate*", et des résultats de balistique extérieure caractérisant la retardation du projectile et la dispersion d'un système d'arme, on est en mesure de prédire des distances d'emploi d'un système d'arme non-létal. Les résultats présentés concluent que le système d'arme F2000 - NS peut être employé de 30 à 60 m, tandis que les lanceurs FN303 et FN303p tirant le projectile FN303 peuvent tous deux être employés à bout portant, jusqu'à une distance respective de 72 m et 54 m. Cette méthode a l'immense avantage d'être généralisable à l'ensemble des projectiles actuellement disponibles et même aux projectiles de demain puisqu'une implémentation de cette méthode dédiée aux projectiles PMI, non présentée car pas encore tout à fait aboutie, est également en cours de travail.

Mieux que cela, cette méthode est finalement indépendante du critère lésionnel employé. En effet, si un nouveau critère lésionnel était à l'avenir mis en avant pour remplacer le critère  $(VC)_{max}$  comme meilleur critère prédisant l'occurrence de lésion suite à un impact non-pénétrant au niveau thoracique, le nouveau critère pourrait directement être calculé sur le modèle numérique, et les conclusions seraient immédiates. En outre, cette approche permet des études de sensibilité bien plus simples qu'une approche purement expérimentale. En particulier, une étude de sensibilité a été réalisée sur la localisation, et l'angle d'impact du projectile, ainsi que sur la localisation et l'orientation du calcul du critère  $(VC)_{max}$ . Cette étude est présentée dans l'article [75], et présente des résultats qui sortent du cadre de ce doctorat. D'autres études de sensibilité peuvent être réalisées sur la vitesse du projectile, sur les propriétés du matériau, ou ses géométries, ce qui permettrait d'optimiser le projectile pour diminuer le risque de lésion. Ce dernier point intéressera donc particulièrement l'industriel.

Il est par contre nécessaire de déterminer les bornes d'applications de la méthode. En effet, si le mécanisme d'impact observé sur le mur rigide est fondamentalement différent de celui observé lors d'un impact sur thorax humain, les conclusions pourraient être drastiquement faussées. Le cas du projectile FN303 est probablement particulièrement caricatural. Celui-ci éclate systématiquement sur le mur rigide, mais pas forcément sur le cas sur thorax humain. La question est donc de savoir en quoi cela affecterait alors les résultats et les conclusions. Il convient donc d'être prudent.

Dans le cas précis du FN303, la question ne se pose pas vraiment, vu la marge entre les valeurs du critères  $(VC)_{max}$  observées et les valeurs seuils.

Une question qui reste également en suspens est la question de la ou des vitesses de tir sur mur rigide employées pour valider le projectile. Dans la présente démarche, une gamme assez large a été employée. En pratique, le phénomène d'impact sur mur rigide est caractérisé par une fréquence de phénomène bien plus élevée que sur thorax humain. Une approche plus sûre serait de réaliser une première modélisation du projectile à l'aide de résultats de tirs sur mur rigide égale à sa vitesse nominale, et de simuler l'impact sur thorax. En regardant alors les sollicitations provoquées par le thorax sur le projectile lors de l'impact, on pourrait redimensionner une nouvelle vitesse de validation sur mur rigide, de manière à ce que le phénomène soit plus proche de la sollicitation envisagée. Ces nouvelles données amènerait à une nouvelle modélisation du projectile qui engendrerait une nouvelle réponse sur le thorax. Ce procédé pourrait être réitéré jusqu'à convergence des résultats. Bien sûr, si les paramètres obtenus pour modéliser le projectile restent relativement stables quelle que soit la vitesse de tir, ce procédé ne serait pas nécessaire. Quoi qu'il en soit, les données expérimentales sont déjà disponibles pour différentes vitesses, et sont déjà exploitables. La balle est donc dans le camp du numérique.

Une dernière faiblesse de la méthode est le fait que le thorax numérique n'est validé que sur une seule série de données, issues de WSU. Des réserves peuvent être émises sur ces données, comme déjà mentionné dans la section 3.2.6. Par ailleurs, s'inspirer d'une source unique est toujours dangereux puisque rien ne garantit alors qu'elle soit bien représentative de l'application souhaitée. Il conviendrait donc de trouver d'autres données de validations et de les implémenter. Pour le moment, hormis les données de WSU, aucune donnée de résultats de tirs de projectiles non létaux sur PMHS n'est disponible, mais des futurs tests sont envisagés par la France, et seront prochainement exploitables dans un contexte de confidentialité OTAN. Il s'agit certainement d'un premier pas pour améliorer le modèle. Une autre démarche consisterait à le valider sur des données issues d'autres domaines comme l'accidentologie, ou le domaine du sport, dans lesquels on retrouve également de nombreux impacts, correspondant cependant à des sollicitations plus lentes.

Enfin, une dernière approche de validation consisterait en la comparaison de ces résultats avec des résultats de tirs sur le "*surrogate*" thoracique prochainement disponible à l'ERM. A nouveau, il s'agit d'une perspective de ce travail.

En définitive, les résultats présentés sont déjà très complets, et caractérisent bien plus que le potentiel lésionnel d'un système d'arme non-létal sur le thorax. En effet, les impacts sur la tête resteront potentiellement dangereux pour l'ensemble des systèmes non létaux actuels et probablement également pour ceux de demain. En

particulier, la présence de l'oeil au niveau de la tête fait qu'un impact à ce niveau ne sera jamais sans danger, vu la faible tolérance lésionnelle de cet organe particulier<sup>8</sup>. Par ailleurs, les impacts au niveau des membres et de l'abdomen semblent moins dangereux que l'impact thoracique, comme déjà précisé dans la section 2.4.4. Le dimensionnement du système d'armes, son évaluation et ses performances seront donc déterminantes au niveau thoracique.

## 7.5 Conclusions

Au terme de ce chapitre, les résultats sont suffisants pour pouvoir quantifier le potentiel lésionnel d'un projectile d'impact. Sans vouloir reprendre l'intégralité des arguments présentés dans les différentes discussions, on peut en rappeler les points essentiels.

- Les résultats d'essais sur mur rigide ont été présentés. Ils donnent une grande quantité d'information permettant de modéliser les projectiles par la suite. Les essais sont bien maîtrisés, les incertitudes sont évaluées, et la répétabilité est assurée. Au terme de cette section, la qualité et la validité de ce type d'essais expérimentaux ont été démontrées et de nombreux résultats ont été présentés, qui devraient intéresser l'ensemble de la communauté impliquée par les armes non-létales à énergie cinétique.
- Le montage permettant d'évaluer la potentiel de pénétration de la peau d'un projectile a été réalisé, et des tentatives infructueuses d'amélioration ont été mises en place. Le "*surrogate*" original a donc été employé et des résultats directement exploitables permettent de conclure quant au potentiel de pénétration de la peau des projectile de calibre 12 et proche. Les projectiles 40 mm n'ont pas été testés, tant leur aptitude de ne pas occasionner de pénétration a été reconnue. Les résultats produits ont une valeur ajoutée directe sur la mise au point du standard OTAN abordant l'étude de la pénétration de la peau d'un projectile non-létal.
- Enfin, une méthode plus globale exploite ces deux résultats et, à l'aide de méthodes numériques additionnelles, permet de conclure non seulement sur la

---

8. on relève en effet des blessures graves aux yeux pour des impacts de Paintball ou d'air soft, qui sont caractérisés par des niveaux d'énergie de quelques Joules seulement, ce qui sera certainement toujours trop faible pour qu'un système non-létal soit efficace, même si aucune étude ne cherche actuellement à dimensionner cette valeur. On retrouve quelques valeurs de densité énergétiques liées à des blessures oculaires dans les références suivantes : [98, 99]. Les valeurs sont de l'ordre d' $1 J/cm^2$ .

létalité d'un projectile impactant le thorax dans une condition précise, mais permet également de définir des distances d'engagement qui amènent à la définition d'une doctrine d'emploi d'un système existant, ou de raffiner la qualité d'un système en développement. Le thorax étant un élément déterminant pour évaluer ces projectiles, le résultat fourni permet à lui seul de donner les informations capitales sur le potentiel lésionnel d'un projectile non-létal à énergie cinétique impactant le corps humain.

L'approche réalisée donne donc l'information essentielle d'évaluation. Elle sera très intéressante pour l'ensemble des acteurs impliqués dans le domaine des armes non-létales. Elle va permettre à l'acquéreur de choisir le système le plus adapté à ses besoins en comparant ces résultats pour divers projectiles, à la communauté impliquée par l'utilisation de ces armes de définir sa doctrine d'emploi de manière à assurer une létalité mesurée, et au fabricant de dimensionner son projectile de manière à améliorer les performances de ses systèmes d'armes et d'augmenter les plages d'utilisation.

Il s'agit du résultat final et essentiel de l'ensemble de cette thèse.





# Chapitre 8

## Conclusions et perspectives

Le but ultime de ce chapitre est de rappeler succinctement les objectifs de ce travail, de mettre en évidence les réalisations qui ont été effectuées, de rappeler quels sont les résultats essentiels de l'étude et enfin, de présenter quelques perspectives pour les résultats obtenus.

### 8.1 Objectif

L'objectif de ce travail était de mettre au point un système d'évaluation du risque lésionnel lié à l'impact d'un projectile non-létal au niveau du thorax. Pour ce faire, il est nécessaire d'évaluer les lésions produites par deux types de phénomènes : l'impact non-pénétrant, et le phénomène de pénétration de la peau. Ces deux directions ont chacune nécessité une démarche de résolution propre, mais toutes deux exécutées en parallèle et traitées indépendamment. Les résultats devaient s'appuyer sur des sources bibliographiques développées dans le chapitre 3, mais également être extrapolables à de nouvelles données bibliographiques qui pourraient apparaître à l'avenir. L'aspect efficacité est également succinctement abordé.

### 8.2 Réalisations

De nombreuses réalisations ont été accomplies au cours de ce doctorat.

Un lanceur pneumatique a été développé. Celui-ci permet de tirer l'ensemble des projectiles non-létaux disponibles sur le marché, mais également les PMI, très déformables, grâce à l'ajout d'un couple séparateur-sabot adéquat. Il permet en outre de tirer des projectiles instrumentés. Sa flexibilité et la répétabilité des vitesses

mesurées à la bouche font de ce lanceur certainement l'un des plus performants dans son domaine.

Une comparaison de trois technologies de mesure de force à l'impact a été effectuée. L'étude compare ainsi la mesure de force réalisée à l'aide d'un capteur Flexiforce, d'un projectile instrumenté d'un accéléromètre, et d'un capteur piezo-électrique encastré dans une cible supposée infiniment rigide. Le choix final s'est porté sur la mesure de force par le capteur piezoélectrique. Les autres méthodes ont néanmoins été implémentées, et sont toujours utilisables au département ABAL, si l'opportunité se présentait à l'avenir.

Une nouvelle méthode d'évaluation des impacts non-pénétrants de projectiles non létaux, exposée dans la section 4.5.1.2 a été imaginée et implémentée. Cette méthode inédite, et les moyens mis en oeuvre pour la réaliser constitue certainement l'une des réalisations des plus remarquables de ce travail.

Un logiciel dédié à la poursuite de phénomènes d'impacts lors du tir d'un projectile non-létal sur une surface rigide, a également été mis au point. Le principal atout de ce logiciel est sa grande flexibilité pour mesurer des phénomènes variés. De nombreuses utilisations de ce logiciel ont été nécessaires tout au long de ce travail.

Des calculs d'incertitudes intégrés dans le logiciel de poursuite, basés sur une étude semi-théorique et semi-empirique, quantifient de manière inédite les incertitudes liées aux mesures dynamiques à l'aide de caméra haute-vitesse. Cette étude est indispensable dans le cadre présenté, puisque l'intégralité des résultats s'appuie sur ces incertitudes.

### 8.3 Résultats

Les résultats sont regroupés dans le chapitre 7. On retrouve des résultats de tirs de projectiles non létaux sur mur rigide en terme de mesures de force pendant l'impact. Quand la déformation du projectile le permet, des mesures de l'évolution de l'enfoncement et du diamètre du projectile pendant l'impact ont également été réalisées. Ces résultats sont nombreux, répétables, et caractérisés par une incertitude réduite. La plupart des mesures peuvent être employées pour la réalisation de modèles numériques de projectiles non-létaux et, in fine, pour déterminer la létalité de l'impact non-pénétrant d'un de ces projectiles sur cible humaine.

Par ailleurs, deux méthodes d'évaluation de la pénétration de la peau d'un projectile non-létal ont été comparées. La méthode sélectionnée et une approche basée sur un "*surrogate*". Celle-ci porte également ses fruits, puisqu'elle a permis l'évalua-

---

tion du potentiel de pénétration de quatre projectiles de calibre 12 et proches. Les 40 mm sont quant à eux reconnus comme ne présentant aucun risque de pénétration, d'où l'inutilité de les tester sur ce "*surrogate*".

Ces deux précédents résultats ont été intégrés dans une démarche d'évaluation, non plus de l'impact du projectile, mais du système d'armes lui-même. Par l'intervention de méthodes numériques et de tirs de dispersion à l'aide des lanceurs originaux, ils permettent de conclure sur la létalité du projectile NS tiré avec le F2000 et du projectile FN303 tiré avec le lanceur FN303 et le lanceur FN303p, dans différentes conditions d'impacts. Finalement, des distances de tirs effectives ont été dimensionnées pour ces trois systèmes, une distance minimum garantissant un potentiel lésionnel réduit, et une distance maximum garantissant une dispersion réduite et une efficacité suffisante. Il s'agit de l'aboutissement final de ce doctorat.

## 8.4 Perspectives

Deux catégories de perspectives sont présentées dans cette section.

Dans un premier temps, certaines perspectives qui amélioreraient les résultats de ce même travail ont été identifiées.

La principale d'entre elle est d'améliorer la mesure de force à l'impact du projectile non-létal sur mur supposé rigide. Pour ce faire, il convient de résoudre les problèmes de fréquences de résonances mentionnés dans la section 6.3.2.2.

Par ailleurs, les incertitudes liées aux mesures dynamiques réalisées à l'aide de la caméra haute-vitesse et du logiciel peuvent être diminuées, selon les considérations présentées dans la section 6.1.4.

D'autre part, l'implémentation du calcul systématique de la quantité de mouvement mesurée par la caméra haute-vitesse et par le capteur, selon la méthodologie présentée dans la section 7.2.9, reste également un élément à implémenter, de manière à encore augmenter la fiabilité des mesures.

La méthode d'évaluation de la peau quant à elle doit être également affinée. En effet, le caractère biologique, et non contrôlé des matériaux rend les résultats potentiellement non reproductibles. Une démarche de calibration des constituants, ou une substitution de ceux-ci, doit être réalisée.

Pour finir, les résultats du "*surrogate*" en tant que tel restent à valider à l'aide de tirs sur PMHS avec d'autres projectiles que le RB1FS, qui est actuellement le projectile de référence.

Dans un deuxième temps, d'autres perspectives, qui sortent du domaine de l'évaluation des armes non-létales, sont également à mettre en évidence.

D'une part, le lanceur pneumatique, employé conjointement au montage Kistler, permet bien plus que la détermination du potentiel lésionnel thoracique d'un projectile non-létal. En effet, les outils expérimentaux développés permettent tout d'abord d'étudier l'effet lésionnel de ces projectiles impactant d'autres zones du corps. D'autres types d'impacts peuvent également être étudiés avec ces outils, comme des impacts qu'on retrouverait dans le milieu sportif par exemple. En effet, le lanceur permet d'accélérer des projectiles de tout type, de dimensions comprises entre 10 et 45 mm, de masses allant jusqu'à 150 g, et pour des vitesses atteignant jusqu'à 200 m/s. Ces gammes et son habilité à tirer des projectiles de matériaux très divers pourraient contribuer à procéder à de l'identification de propriétés dynamiques de matériaux.

Par ailleurs, le logiciel de poursuite a également un bel avenir devant lui, puisque son utilisation, de par sa grande flexibilité, pourrait être rapidement étendue à la balistique classique. Plusieurs intervenants ont déjà émis le souhait de l'employer de la sorte.

Toute ces considérations, ainsi que les nombreuses références faites aux groupes OTAN travaillant sur le sujet, soulignent le caractère très vivant de l'étude en cours, et font ressentir à l'auteur de la présente thèse non seulement un grand sentiment de satisfaction, mais également une grande détermination à poursuivre l'étude de ce sujet passionnant qu'est l'évaluation expérimentale de l'impact thoracique des projectiles non-létaux.

# Bibliographie

- [1] Sun Tzu. *The Art of War*. Shambhala Publications, translated by Thomas Cleary, 5e siècle BC, traduit en 1988.
- [2] NATO. Non-lethal weapons effectiveness assessment development and verification study,. RTO TR SAS 60 disponible sur internet en mars 2013 : [ftp://ftp.rta.nato.int/PubFullText/RTO/TR/.../RTO-TR-SAS-060/\\$TR-SAS-060-ES.pdf](ftp://ftp.rta.nato.int/PubFullText/RTO/TR/.../RTO-TR-SAS-060/$TR-SAS-060-ES.pdf), 2009.
- [3] R Scott. Conflict without casualties : Non-lethal weapons in irregular warfare. Master's thesis, Naval postgraduate School, Monterey, California, 2007.
- [4] N Davison. *Non Lethal Weapons*. Global Issues, 2009.
- [5] L Mampaey. Les armes non-létales, une nouvelle course aux armements. disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.grip.org/fr/node/17>, 1999.
- [6] N Davison. Bradford non-lethal weapons research project. plus d'informations sur <http://www.brad.ac.uk/acad/nlw/publications/>, 2006.
- [7] Ministère de la Défense (française), secrétariat général pour l'administration. *Manuel de droit des conflits armés ( disponible sur internet en janvier 2013 à l'adresse suivante : <http://www.defense.gouv.fr/sga/le-sga-en-action/droit-et-defense/droit-des-conflits-armes/droit-des-conflits-armes>)*, 2000.
- [8] G Allison and P Kelly. Non lethal weapons and capabilities. Concil on Foreign Relations, USA, disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.cfr.org/issue/nonlethal-weapons/ri61>, 2004.
- [9] NATO. Dat 11 kick off meeting. document non publié, introduction de la nouvelle initiative DAT11, 2012.
- [10] Review of the department of justice's use of less-lethal weapons. disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.justice.gov/oig/reports/plus/e0903/final.pdf>, 2009.

- [11] P Cassar. Notions sur les alr-mfi (disponible sur internet, en date de janvier 2013 : [http ://spiral.univ-lyon1.fr/files\\_m/m9747/files/653173\\_6601.pdf](http://spiral.univ-lyon1.fr/files_m/m9747/files/653173_6601.pdf)). communication orale à la colloque "ALR-MFI", Marseille, 2009.
- [12] NATO. Non-lethal weapons capabilities-based assessment. RT0 TR SAS 078 Document classifié, non publié, 2012.
- [13] C Robbe, E Lemaire, A Papy, and V Esters. *Traité de médecine légale, Chapitre "Armes non-létales"*. Deboek, 2011.
- [14] C Bir. *The evaluation of blunt ballistic impacts of thorax*. PhD thesis, Wayne State University, 2000.
- [15] J Steele, S Mcbride, and J Kelly. Plastic bullet injuries in northern ireland : experiences during a week of civil disturbance. *Journal of Trauma*, 46 :711–714, 1999.
- [16] D Hughes, K Maguire, F Dunn, and S Pitzpatrick. Plastic baton round injuries. *Journal of Medical Emergencies*, 22(111-112), 2005.
- [17] K Maguire, D Hughes, M Fitzpatrick, F Dunn, L Rocke, and C Baird. Injuries caused by the attenuated energy projectile : the latest less lethal option. *Journal of Medical Emergencies*, 24(103-105), 2007.
- [18] E Olajos and H Salem. Riot control agents : Pharmacology, toxicology, biochemistry and chemistry. *Journal of Applied Toxicology*, 21(355-391), 2001.
- [19] P Carron and B Yersin. Management of the effects of exposure to tear gas. *British Medical Journal*, 338(1554-1558), 2009.
- [20] S Miller and G Svitak. Workshop on counter piracy equipment and technologies ([http ://www.nato.int/structur/ac/141/pdf/s-b/raytheon.pdf](http://www.nato.int/structur/ac/141/pdf/s-b/raytheon.pdf), consulte en mars 2013). Technical report, NATO Naval Armaments Group, 2009.
- [21] NATO. Dat 11 blunt trauma experts workshop final report. document non publié, distribué dans les groupes OTAN DAT et LCG, 2010.
- [22] D De brito, K Challener, and A Sehgal. The injury pattern of a new law enforcement weapon : the police bean bag. *Annals of Emergency Medecine*, 38 :383–390, 2001.
- [23] K Hubbs and D Klinger. Impact munitions data base of use and effects, disponible sur internet en mars 2013 : [https ://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/204433.pdf](https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/204433.pdf). Technical report, U.S. Department of Justice, 2004.

- 
- [24] NATO. Stanrec 4744 edition 1 - aep 94 skin penetration assessment of non-lethal projectiles. document non publié, en cours de revue, écrit par le groupe NATO-LCG-DSS-NLC-SG-NLKE-TOE, 2012.
- [25] <http://www.innerbody.com/>, consulté en janvier 2013.
- [26] T Genneralli and E Wodzin. Abbreviated injury scale 2005, from association for the advancement of automotive medicine. plus d'informations sur <http://www.aaam.org/>, exemple disponible sur internet en mars 2013 : [https://ssl-w03dnn0374.websiteseguro.com/sbn-neurocirurgia/site/download/artigos/injury\\_severity\\_scoring.pdf](https://ssl-w03dnn0374.websiteseguro.com/sbn-neurocirurgia/site/download/artigos/injury_severity_scoring.pdf), 2005.
- [27] K Schmitt, P Niederer, and M Muser. *Trauma biomechanics : accidental injury in traffic and sports*, volume 2nd edition. Springer, 2007.
- [28] E Lemaire. Note de synthèse concernant les projectiles d'impact. document non publié, disponible chez l'auteur, 2008.
- [29] NATO. Test methodology for protection of vehicle occupants against anti-vehicular landmine effects, chapter 3 - injury criteria and tolerance levels". RTO-TR-HFM-090, document non publié, voir sur <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-TR-HFM-090> pour distribution, 2007.
- [30] P Preux, O Odermatt, Perna A, Marin B, and A Vergnenègre. Qu'est-ce qu'une régression logistique? Service de l'Information Médicale et de l'Evaluation, UF de Recherche Clinique et Biostatistique, Hôpital du Cluzeau, Limoges, France. Disponible sur internet en janvier 2013 : [http://www.ifmt.auf.org/IMG/pdf/Qu\\_est-ce\\_qu\\_une\\_regression\\_logistique\\_-\\_Rev\\_Mal\\_Respir\\_2005\\_22\\_159-162.pdf](http://www.ifmt.auf.org/IMG/pdf/Qu_est-ce_qu_une_regression_logistique_-_Rev_Mal_Respir_2005_22_159-162.pdf), 2004.
- [31] D Mauchant, K Rice, M Riley, D Leber, D Samarov, and A Forster. analysis of three different regression models to estimate the ballistic performance of new and environmentally conditioned body armor. National Institute of Standards and Technology NIST Interagency, disponible sur internet en mars 2013 : <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2011/ir7760.pdf>, 2011.
- [32] L Koene, F Boufker, and A Papy. Kinetic non-lethal weapons. In *4th Symposium of Non lethal weapons proceedings*, 2008.
- [33] C Bir, S J Stewart, and M Wilhelm. Skin penetration assessment of less lethal kinetic energy munitions. *Journal of Forensic Sciences*, Vol 50(6) :4, November 2005.
-



- [34] M Maldague. Evaluation of methods in order to determine v50 (new results since 2006) evaluation of methods in order to determine v50 (new results since 2006). Aeroballistic Range Association (ARA), document non publié, disponible chez l'auteur, 2008.
- [35] M Maldague. v50 estimation : which method ? Aeroballistic Range Association (ARA), disponible chez l'auteur, 2006.
- [36] D Viano and A King. *The Biomedical Engineering Handbook : Second Edition, chapitre "Biomechanics of Chest and Abdomen Impact"*, page 13. CRC, Springer, 2000.
- [37] J Cavanaugh, Y Zhu, and Y Huang. Injury and response of the thorax in side impact cadaveric tests. In *Proceedings of the 37th Stapp Car Crash Conference*, pages 199–222, 1993.
- [38] J Cavanaugh. *Accidental Injury : Biomechanics and Prevention*, chapter The Biomechanics of Thoracic Trauma, pages 362–391. Springer, 1993.
- [39] S Rouhana. *Accidental Injury : Biomechanics and Prevention, chapitre "The Biomechanics of Abdominal Trauma"*, pages 391–428. Springer, 1993.
- [40] D Viano. Biomechanical responses and injuries in blunt lateral impact. In *33rd Stapp Car Crash Conference*, pages 113–142, 1989.
- [41] C Bir, D Viano, and A King. Development of biomechanical response corridors of the thorax to blunt ballistic impacts. *Journal of Biomechanics*, 37 :73–79, 2004.
- [42] J Widder. Assessing the blunt trauma potential of free flying projectiles for development and safety certification of non lethal kinetic impactors. Battelle Columbus operations, disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA351147>, 1998.
- [43] J Horsch, I Lau, D Viano, and D Andrzejak. Mechanism of abdominal injury by steering wheel loading. In *29th Stapp Crash Car Conference*, 1985.
- [44] D Viano and I Lau. Thoracic impact : A viscous tolerance criterion. In *Tenth International Conference on Experimental Safety Vehicles*, 1985.
- [45] C Bir and D Viano. Design and injury assessment criteria for blunt ballistic impacts. *The journal of Trauma, injury, infection, and critical care*, page 7, 2004.

- 
- [46] L Sturdivan, D Viano, and H Champion. Analysis of injury criteria to assess chest and abdominal injury risks in blunt and ballistic impacts. *The journal of Trauma, injury, infection, and critical care*, page 13, 2004.
- [47] C Robbe, A Papy, and N Nsiampa. Impact measurements of different 40mm non-lethal sponge grenades. In *Ballistics 2011 : 26th International Symposium*, 2011.
- [48] NATO. The unsuitability of kinetic energy and the blunt criterion bc as criteria for assessing blunt trauma by a low lethality projectile. document non publié, communication lors de la réunion NATO-LCG-DSS-NLC-SG-NLKE-TOE, 2012.
- [49] J Pavier, A Langlet, N Eches, J Jacquet, and R Cayzac. Analysis of existing injury criteria in order to evaluate the severity of thoracic impact injury. In *Ballistics 2011 : 26th International Symposium*, 2011.
- [50] M Courtney and A Courtney. Apparent measurement errors in "development of biomechanical response corridors of the thorax to blunt ballistic impacts". *Journal of Biomechanics*, 41 :486, 2008.
- [51] NATO. Commentaires français sur les essais relatifs au document : The evaluation of blunt ballistic impact of the thorax by bir - wsu (unpublished). communication lors de la réunion NATO-LCG-DSS-NLC-SG-NLKE-TOE, mars 2012, non publiée.
- [52] WSU. Wayne state university, penetration assessment of less lethal munitions : Draftreport,presentedduring dat 11 workshop (unpublished). thèse de doctorat non finie, et donc non publiée, distribuée dans les groupe OTAN DAT et LCG, 2010.
- [53] C Bir, Steward S, and M Wilhelm. Skin penetration assessment of kinetic energy munitions. Jane's Less-Lethal Weapons Conference, Leeds, non publié, disponible chez l'auteur, 2005.
- [54] WSU. Wayne state university, penetration assessment of less lethal munitions. Penetration standard, document non publié, distribué dans les groupes OTAN DAT et LCG.
- [55] NATO. Method based on measurement of maximum contact stress for a low lethality projectile against a rigid wall. document non publié, base du futur STANREC 4744 AEP94, communication lors de la réunion NATO-LCG-DSS-NLC-SG-NLKE-TOE, 2012.
-

- [56] V DiMaio, A Copeland, P Bsant-Matthews, L Fletcher, and A Jones. Minimal velocities necessary for perforation of skin by air gun pellets and bullets. *Journal of Forensic Sciences*, 27(4) :5, October 1982.
- [57] N Nicholas and J Welsch. Ballistic gelatin. institute for Non-Lethal Defense Technologies. Disponible en mars 2013 sur internet : <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA446543>, 2004.
- [58] C Jacquemoud. *Caractérisation des propriétés mécaniques de la peau humaine à faible vitesse de déformation*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2007.
- [59] O Mauzac, C Paquier, E Debord, F Barbillon, P Mabire, and J Jacquet. A substitute of gelatin for measurement of dynamic back face deformation. In *Personal Armour System Symposium (PASS) conference proceedings, Quebec*, 2010.
- [60] direction générale des armements (DGA) France. Influence de la température sur les propriétés mécaniques de la gélatine. communication orale à la DGA à Bourges, le 15/3/2011, disponible chez l’auteur de cette thèse.
- [61] J Simonds. Crowd control cep blunt impact induced effectiveness assessment (disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a416787.pdf>). Technical report, United States Air Force Research Laboratory, 2003.
- [62] J Van Cauwenberghe. Development of an évaluation process for non lethal weapons. Master’s thesis, Ecole Royale Militaire, Katholieke Hogeschool Sint-Lieven, 2011.
- [63] M Maldague. Procédure technique, abal-tp-5.4-11, incertitudes de mesures. document interne non publié, disponible chez l’auteur, 2012.
- [64] V De Briey. Impacts des projectiles non létaux, disponible chez l’auteur de cette thèse. Master’s thesis, Ecole Royale Militaire, 2009.
- [65] M Maldague. Ab516 : Application du calcul des probabilités et des statistiques en balistique. document interne non publié, disponible chez l’auteur, 2007.
- [66] R Rakotomalala. Test de normalité, techniques empiriques et tests statistiques. Université Lumière Lyon 2, disponible sur internet en mars 2013 : [http://eric.univ-lyon2.fr/ricco/cours/cours/Test\\_Normalite.pdf](http://eric.univ-lyon2.fr/ricco/cours/cours/Test_Normalite.pdf), 2008.
- [67] unknown author. Chaîne de mesure et acquisition de données, <http://iutlpa.u-strasbg.fr/...> consulté en janvier 2013. IUT Louis Pasteur, Strasbourg, disponible sur internet en mars 2013 : [http://iutlpa.u-strasbg.fr/montaned/capt\\_acqui\\_e.pdf](http://iutlpa.u-strasbg.fr/montaned/capt_acqui_e.pdf), unknown year.

- 
- [68] Jerome Eck. *Biomechanical response and abdominal injury due to blunt ballistic impacts*. PhD thesis, Wayne State University, 2006.
- [69] A Bouamoul and H Levesque. Development and validation of a finite element human torso model under blunt ballistic impact drdc-valcartier-tm-2006-560. Technical report, Defence Research and Development Canada (DRDC) (<http://pubs.rddc.gc.ca>), 2007.
- [70] J Stitzel, F Gayzik, J Hoth, J Mercier, D Gage, K Morton, S Duma, and R Payne. Development of a finite element-based injury metric for pulmonary contusion part i : Model development and validation. *Stapp Car Crash Journal*, 49 :271–289, 2005.
- [71] D Vawter. A finite element model for macroscopic deformation of the lung. *Journal of Biomedical Engineering*, 102/1, 1980.
- [72] Shen W, R Niu, Y Mattrey, A Fournier, J Corbei, Y Kono, and J Stuhmiller. Development and validation of subject-specific finite element models for blunt trauma study. *Journal of Biomedical Engineering*, 130, 2008.
- [73] N Nsiampa, C Robbe, and A Papy. Numerical investigation of impact of non lethal kinetic projectiles onto human thorax. *6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings*, 2011.
- [74] N Nsiampa, C Robbe, and A Papy. Numerical simulation of non lethal projectiles on human thorax. *Ballistics 2011 : 26th International Symposium*, 2011.
- [75] N Nsiampa, C Robbe, A Oukara, and A Papy. Sensibility study of viscous criterion for kinetic energy non lethal projectile thoracic impacts. In *International Symposium of Ballistics 2013 proceedings*, 2013.
- [76] N Nsiampa, C Robbe, A Oukara, and A Papy. Comparison of less lethal 40mm sponge projectile and the 37 mm projectile for injury assessment on human thorax. In *10th International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loadings proceedings*, 2012.
- [77] C Nguyen. Traitement d’images, concepts fondamentaux. Département d’informatique, Université de Toulon et du var, disponible sur internet en janvier 2013 : [http://nguyen.univ-tln.fr/share/trans\\_trait\\_im.pdf](http://nguyen.univ-tln.fr/share/trans_trait_im.pdf).
- [78] P Hebert. Traitement de base d’une image (partie 1). Université Laval - département de génie électrique et de génie informatique - disponible sur internet en janvier 2013, disponible sur internet en mars 2013 :
-

- [http://wcours.gel.ulaval.ca/2012/a/GIF4100/default/5notes/Traitement\\_imagesPartie1.pdf](http://wcours.gel.ulaval.ca/2012/a/GIF4100/default/5notes/Traitement_imagesPartie1.pdf), 2008.
- [79] Y Feng and B Liu. Errors in particle tracking velocimetry with high-speed cameras. *Review of Scientific Instruments*, 2011.
- [80] G Dyckmans. <http://e-ballistics.com/> consulté en janvier 2013.
- [81] Tema user'guide, <http://www.tema.org>. Technical report, Image Systems, 2009.
- [82] NATO. Stanag 4569 annex i – test protocol for occupant safety measurements and injury assessment. RTO-TR-HFM-090, non publié, voir sur <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-TR-HFM-090> pour distribution, 2007.
- [83] K Pfefferle. *Design and Evaluation of Measurement Instrumentation used for high Energy Impacts on Fresh Post-Mortem Human Subjects*. PhD thesis, The Ohio University, 2006.
- [84] SAE. Sae j211-1 instrumentation for impact test, part 1, electronic instrumentation. SAE The engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space International, plus d'informations sur : [http://standards.sae.org/j211/1\\_199503/](http://standards.sae.org/j211/1_199503/), 1995.
- [85] C Robbe, N Nsiampa, A Papy, and A Oukara. Practical considerations for using high-speed camera to measure dynamic deformation occurring at the impact of a kinetic energy non-lethal weapon projectile on ballistic simulant. In *Pass conference proceedings, Nuremberg*, 2012.
- [86] M Pirlot, A Chabotier, F Demanet, and J Beauthier. *Traité de médecine légale, chapitre "Balistique lésionnelle"*. Deboek, 2011.
- [87] unknown authors. Jcgm100 :2008 - gum 1995 avec des corrections mineures - évaluation des données de mesure - guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), disponible sur internet en mars 2013 : [http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_-F.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_-F.pdf), 2008.
- [88] Y Morvan. *Acquisition, Compression and Rendering of Depth and Texture for Multi-View Video*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2009.

- 
- [89] G Bebis. Computer vision. University of Nevada, Reno, Computer Science Department, disponible sur internet en mars 2013 : <http://www.cse.unr.edu/bebis/>, 2004.
- [90] A ElOuhahabi. Etude métrologique de la prise de vue haute vitesse dans le domaine des impacts de projectiles non létaux, disponible chez l'auteur de cette thèse. Master's thesis, Ecole Royale Militaire - Institute de promotion sociale de la communauté Française - Uccle, 2011.
- [91] M Maldague. Contrôle des bases de vitesses de 0,25 m. rapport qualité interne ABAL ERM, disponible chez l'auteur, décembre 2012.
- [92] G Jacobs. Etude de la pénétration dans le cadre de la létalité réduite. Master's thesis, Ecole Royale Militaire, 2011.
- [93] J Goffin. Contribution à la standardisation du test de la pénétration de la peau dans le cadre de la létalité réduite, disponible chez l'auteur de cette thèse. Master's thesis, Ecole Royale Militaire, 2012.
- [94] M Van Essen. Bijdrage aan de studie huidpenetratie van kinetische niet-letale projectielen. disponible chez l'auteur de cette thèse. Stage de deux mois à l'Ecole Royale Militaire d'un élève officier de la Koninklijk Instituut voor de Marine Nederlandse Defensie Academie, 2013.
- [95] ERM. Dictionnaire militaire, document de travail. Dictionnaire définissant un ensemble de termes militaires. Disponibles à la demande, auprès de l'auteur, 2005.
- [96] NATO. Stanag 4512 land (edition 1) - dismounted personnel target. document non publié, Standard OTAN, plus d'information à l'OTAN, 2004.
- [97] A Tilley. *The measure of man and woman, revised edition, Human factors in design*. Wiley and Sons, 2002.
- [98] S Duma, P Ng, E Kennedy, J Stitzel, I Herring, and F Kuhn. Determination of significant parameters for eye injury risk from projectiles. *The Journal of Trauma, Injury, Infection, and Critical Care*, 59 :960–964, 2005.
- [99] Kenn, Ng, McNally C, J Stitzel, and S Duma. Risk functions for human and porcine eye rupture based on projectile characteristics of blunt objects. *Stapp Car Crash Journal*, 50 :651–671, 2006.
- [100] S Haywood. The use of flexiforce sensors for the sct end-caps, disponible sur internet en mars 2013 sur google.com. Technical report, 2006.
-

- 
- [101] C Robbe, A Papy, and N Nsiampa. Measurement of the force occurring at the impact of a non-lethal projectile with the flexiforce sensor. In *6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings*, 2011.
- [102] Tekscan. flexiforce manual, <http://www.tekscan.com/pdf/flexiforce-sensors-manual.pdf>. Technical report, tekscan, 1998.
- [103] C Lebossé and B and Bayle. Nonlinear modeling of low cost force sensors and mathelin, m. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- [104] C Robbe, A Papy, and N Nsiampa. Dynamic calibration of flexiforce sensors for ballistic measurements. In *Recent Advances in Textile Composites*, 2010.
- [105] C Robbe. Rapport de calibration des capteurs flexiforce pour des impacts de projectiles non létaux, non publié, disponible chez l'auteur de cette thèse. Technical report, Ecole Royale Militaire - Département ABAL, 2010.
- [106] J Eck, R Hammond, D Sherman, E Dawe, and C Bir. Biomechanical assessment of blunt ballistic impacts to the abdomen. non publié, presentation transmise dans les groupe OTAN DAT et LCG.

---

# Annexes



---

# Annexe A

## Témoignage d'emplois d'armes non-létales par la DSU

Cette annexe consiste en un extrait d'un article prochainement publié au "*7th Symposium on Non-Lethal Weapons*", en 2013. L'extrait explique deux situations d'emploi d'armes non-létales par la Direction des Unités Spéciales de la Police Fédérale belge (DSU) : la première implique l'emploi d'un FN303, et la deuxième implique l'emploi d'un FN303 et d'un Taser. Ce témoignage, très difficile à obtenir de manière formel, illustre parfaitement le genre de situations dans lesquelles l'emploi d'une arme non-létale peut être plus efficace que l'utilisation d'une arme à feu classique.

### **FN303 on a Armed Barricaded Man**

#### **Situation**

*A 45 year old man argues with his wife and threatens her with a rifle. She escapes and calls the local police. When they arrive, they are shot at by the man who had barricaded himself in his house. Nobody is hurt, and a security perimeter is set up by the local forces waiting for our arrival.*

#### **Resolution**

*As always, the first mean to solve that kind of situation is negotiation. In this particular case, the Target seems to be really upset and loses his sense of reality. We hear from his family doctor that he often uses drugs in combination with alcohol.*

*As it seems that the negotiation won't make him surrender, and as we do not want to put him in a "suicide by cop" situation by assaulting his house, we choose to wait for another opportunity. We expect him to come outside to check the surroundings, as we see he does that very often through the barricades he has set up.*

*In case he does that with his weapon in the hand, the plan is to neutralize him by FN303 saturation, while a hidden team would arrest him, being "covered" by the less lethal impacts.*

*That is what finally happens : the Target comes outside, holding his weapon. As he's armed and not far away from his door, we want to catch him under two conditions : that he should not be able to use his weapon (in that case the risk for us would increase a lot, but for him also, because we would have to neutralize him with firearms), and that he should not be able to go back inside. These two conditions are met thanks to the FN303 saturation, allowing the team to catch him manu militari without use of firearms.*

## **Debriefing**

*This case is a good example of balance between our own security and the one of the Target. Shooting the Target down just because he holds a weapon is not an acceptable solution. Seen the mental condition of the man, shouting at him to give orders would probably have lead to an attempt of armed response, immediately followed by a neutralization of our forces. So the balance was to use a mean to "disturb" the Target and make it impossible for him to use his weapon or to go back inside. Our knowledge of the expected effectiveness of the FN303 has been determining in the risk assesment. We would not have accepted the risk if we had not evaluated this mean as trustworthy in this specific situation on this specifig Target.*

## **Taser on a Barricaded Man (and FN303 on a dog . . . )**

### **Situation**

*A 40 year old man fights with his neighbor and threatens him with a weapon. As he sees the local police arriving, he barricades himself in his house. The colleagues think they hear a gunshot from inside and decide to set up a perimeter and call us. It appears to be the same man that already had barricaded himself six months earlier in the same house, and*

---

*that we managed to arrest by going silently in his house while he was fallen asleep in his sofa. We know he would this time probably wait for us...*

## **Resolution**

*As the negotiation seems to be blocked, we decide to go inside through the back of the house (knowing that he probably expects us at the front door). We put some distraction at his front window to cover our approach at the back.*

*During our movement in the garden, we see his dog running out of the house (an American Staff) to attack us. We stop him by fire once with the FN303, making him running back to the house. Thanks to the fact that this weapon makes a lower and different noise than a firearm, the Target does not realize that we shot at his dog. He keeps shouting at the barricaded front door. We decide to go on silently.*

*Once inside, we see him partially and as he still does not notice our presence, we try to come as close as possible. While this approach, we leave an escape possibility for his dog (open door to the garden) which simply decides to run away. As we approach the Target, who we still only partially see, he hears us and begins to shout at us, standing 3 meters away with one of his hands hidden behind a wall and refusing to show it. To avoid being put in a situation of self defense in case the Target has a weapon in that hand, we decide to use the Taser by firing to his chest. We know it works only if both of the fired arrows touch his body. As he moves, one of the arrows miss him, but the operator immediately follows the Target and puts the Taser in contact with the body of the Target, gaining control over him thanks to the fact that one of the arrows was attached to his body. It finally appeared he had no weapon in his hand.*

## **Debriefing**

*In this situation, not having a less lethal mean would have forced us to choose between two "bad" options : wait that the Target shows his hand and decide what to do in function of the threat This case also proves that even a less lethal weapon has to be highly trained : for example, the operator has to be drilled to react to a missed neutralization, what he perfectly did here.*



## Annexe B

# Cas de décès rapportés dans l'étude NIJ 2004

Cette annexe est une citation mot pour mot des cas rapportés ayant amené la mort dans l'étude NIJ 2004 [23]. Comme on peut le voir, la majorité des cas rapportés ayant amené la mort sont dus à des impacts thoraciques avec ou sans pénétration de la peau.

1. *A 42-year-old male who stood approximately 5'10" and weighed approximately 165 lbs engaged in an altercation with several officers. After the officers had used an electronic "TASER" 22 times with no effect, they fired several 37 mm foam rubber and 37 mm bean bag rounds at the subject (a total of 13 combined). One bean bag struck the subject in the throat. He died weeks later as a result of the impact to the throat.*
2. *A 60 year-old male (5' 4", 160 lb.) was struck three times with ARWEN AR1 37 mm PBR's from approximately 10 feet; once in his left arm, and twice in his chest. One of rounds impacting the subject's chest fractured a rib, a portion of which penetrated his heart and one of his lungs.*
3. *A 61 year-old female (5' 4", 110 lbs.) was struck once in the chest with an ARWEN AR1 PBR round from approximately 9 feet. The impact fractured a rib, which penetrated the subject's heart and one of her lungs.*
4. *A 34-year-old male (height and weight unknown) was struck twice in the chest with 12 gauge bean bags from approximately 21 feet. One of the bean bags broke two ribs, penetrated his chest cavity, and lodged in his heart.*

5. *A 29-year-old male (height and weight unknown) was struck with five (5) 12 gauge bean bags from 21 to 30 feet. The last round, fired from approximately 26 feet, penetrated his chest and punctured one of his lungs.*
6. *A 68 year-old male who weighed some 270 lbs was struck by a total of more than 100 KO1 plastic batons, foam rubber, wood, and bean bag munitions from a distance less than 20 feet. He succumbed to the injuries 18 months later.*
7. *A 22-year-old male who stood approximately six feet tall and weighed approximately 200 lbs was struck one time in the chest with a 12 gauge bean bag round from a distance of 21 feet. While, the official cause of death was still pending at time of this report, the case is included for the sake of thoroughness.*
8. *A 30-year-old male (approximately 5'9", 257 lbs.) was struck several times in the head, neck, and chest with KO1 PBR's. The autopsy report identified the cause of death as blood clots due to blunt trauma to the head, coupled with respiratory distress from chemical agent (CS) exposure.*
9. *A 42-year-old male died after being struck in the chest when a lethal 12 gauge door-breaching round that was loaded by an officer who believed that the shotgun shell in question contained a bean bag projectile.*
10. *An 18-year-old male was accidentally killed when he was struck in the chest by a 12 gauge barricade penetrating OC projectile that was miss-loaded in place of a bean bag projectile.*

## Annexe C

# Liste des participants des groupes OTAN

Cette annexe reprend les différents pays représentés dans les groupes OTAN DAT et LCG qui sont mentionnés tout au long du document principal (table C.1). On y retrouve également des pays de l'organisation « *Partnership For Peace* », qui est un conglomérat de pays hors OTAN, qui participent également aux travaux des groupes mentionnés. On retrouve ensuite le « *Term of Reference* » TOR qui définit la mission du groupe NATO-LCG-DSS NLCSG-NLKE-TOE, qui travaille sur le sujet.

Pays représenté
Allemagne
Belgique
Canada
Danemark
Etats-Unis
France
Norvège
Pays-Bas
Royaume-Uni
Russie
Suède
Suisse

**TABLE C.1.** *Les pays représentés dans les différents groupe OTAN mentionnés dans le document principal.*



## **NAAG LCG/1 on Dismounted Soldier System Terms of Reference for the Team of Experts on Non Lethal Kinetic Energy Projectiles Standardization**

### **Area of Responsibility**

*The Team of Experts (ToE) on Non Lethal (NL) Kinetic Energy (KE) Projectiles Standardization (NLKE ToE) will be responsible for developing, supporting, and sustaining a STANAG / STANREC for a NL KE Projectiles Capability.*

### **Objectives**

Develop a common frame of reference to promote the exchange of performance test results of NL KE projectiles : the effort is primarily aimed at writing & supporting a STANAG / STANREC on the Non-Lethal Capability of "Degrade/Stop/Disable individual(s)" (with a low probability of fatality or permanent injury), with the overarching objective to strive to significantly improve NATO and Partnership for Peace (PfP) Capability in NL KE projectiles across the full spectrum of operational requirements, mission areas, and operating environments.

Review & Summarize Best Practices / Procedures, Test, Methodology :

- Propose and Socialize
- Harmonize / Unify Approaches
- Focus on skin, chest, head, abdomen and accuracy

Develop a test methodology to assess the capability of NLC that are used to de-grade/stop/disable individuals :

- Identify Capability Objectives
- Define relevant performance based on Capability Objectives
- Identify Quantitative Metrics for sought performance
- Identify Parameters influencing Metrics
- List best practices for obtaining Metrics and Parameters

- 
- Develop format suitable for promulgation (STANAG/STANREC)
  - Exchange National test results; refine

## **Method of Work**

NLKE ToE is a non-entitled team under the NAAG's Land Capability Group 1 on Dismounted Soldier System.

NLKE TOE will report to the LCG/1 through its non-entitled Sub-Group on Non-Lethal Capabilities.

LCG/1 will be the decision making and approval authority for the NLKE ToE products.

NLKE ToE is open to participation of all member nations of the LCG/1.

NLKE ToE has an open mandate starting from 2012.

NLKE ToE may work up to NATO Secret level of classification, however most of the work will remain at the NATO/PFP Unclassified level.

NLKE ToE will be chaired by a Chairman elected by the ToE participants.

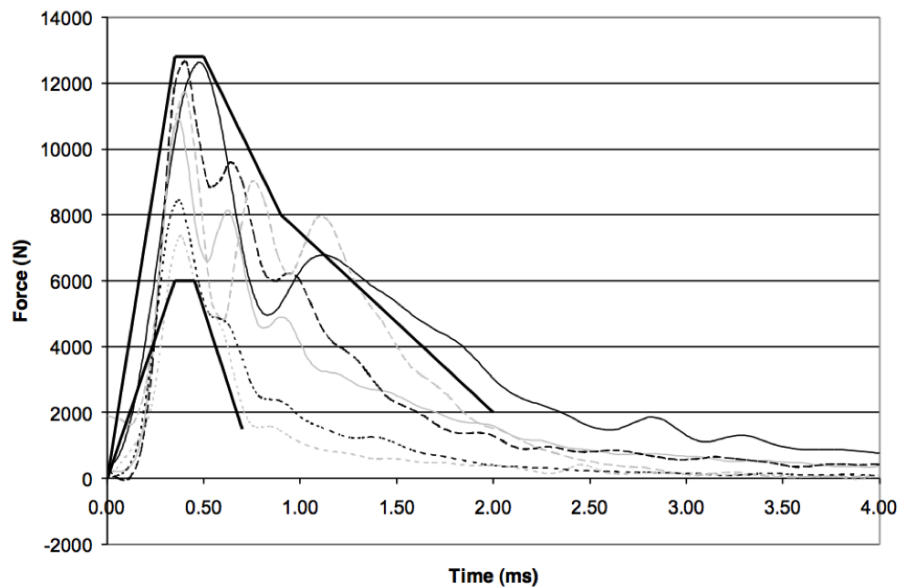
Annexe C : Liste des participants des groupes OTAN

---

## Annexe D

# Quelques résultats essentiels de l'étude de WSU par Bir

Les résultats présentés dans cette annexe consistent en les corridors biomécaniques, non présentés dans le document principal, obtenus lors de tirs de projectiles non-létaux sur thorax PMHS à WSU, par C. Bir [14]. Les impacts A, B, et C sont caractérisés dans la table 3.2. On retrouve ensuite les mesures du critère  $(VC)_{max}$  pour l'ensemble des tirs effectués.



**FIGURE D.1.** Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition B [14].

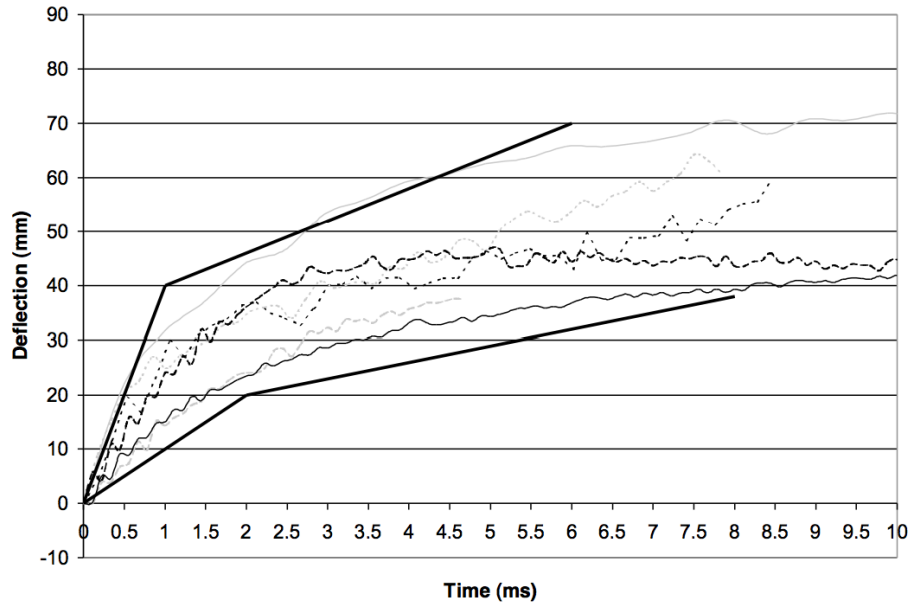


FIGURE D.2. Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition B [14].

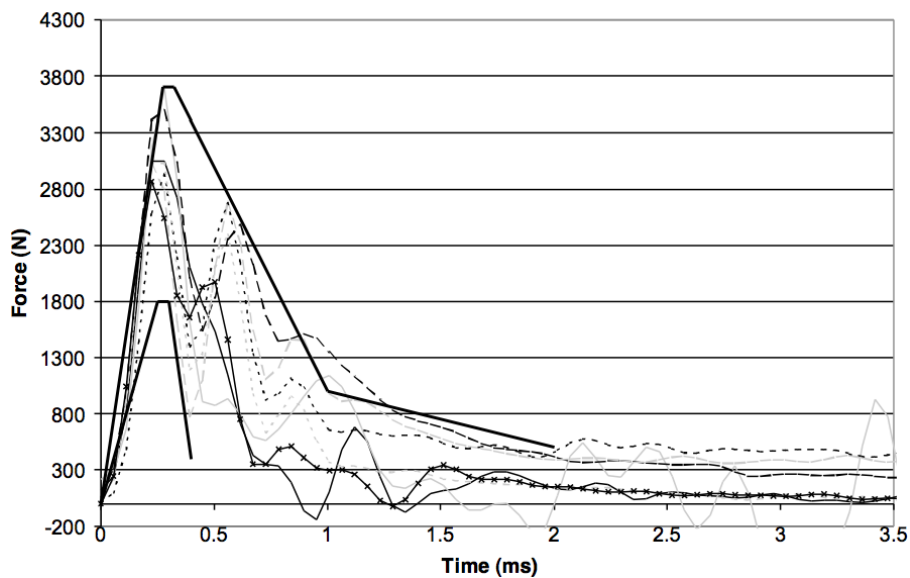


FIGURE D.3. Force à l'impact sur thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition C [14].

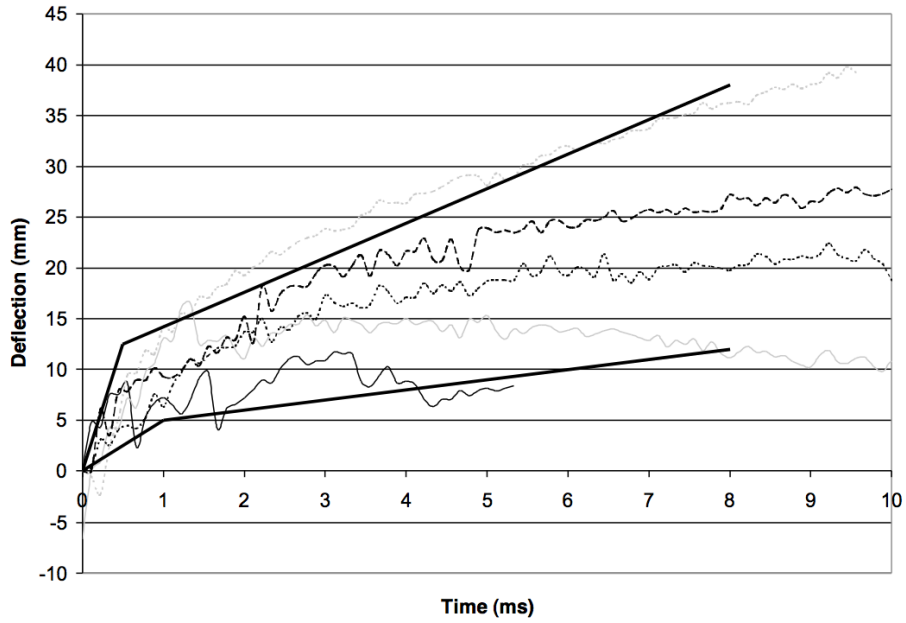


FIGURE D.4. Déplacement du point d'impact du thorax PMHS en fonction du temps pour un impact de condition C [14].

Specimen ID	Impact condition	$VC_{max}$	AIS
NIJ10	A	.51	0
NIJ11	A	.24	0
NIJ12	A	.46	0
NIJ13	A	.24	0
NIJ8	A	.26	0
NIJ7	B	1.97	2
NIJ8	B	2.35	2
NIJ10	B	2.18	2
NIJ11	B	1.01	3
NIJ13	B	.65	2
NIJ9	C	.14	0
NIJ10	C	.59	0
NIJ11	C	.24	0
NIJ12	C	.60	2
NIJ13	C	.30	0

TABLE D.1. Les résultats bruts de la mesure du critère  $(VC)_{max}$  obtenus lors des tirs sur thorax PMHS dans les conditions A, B, et C [14].



## Annexe E

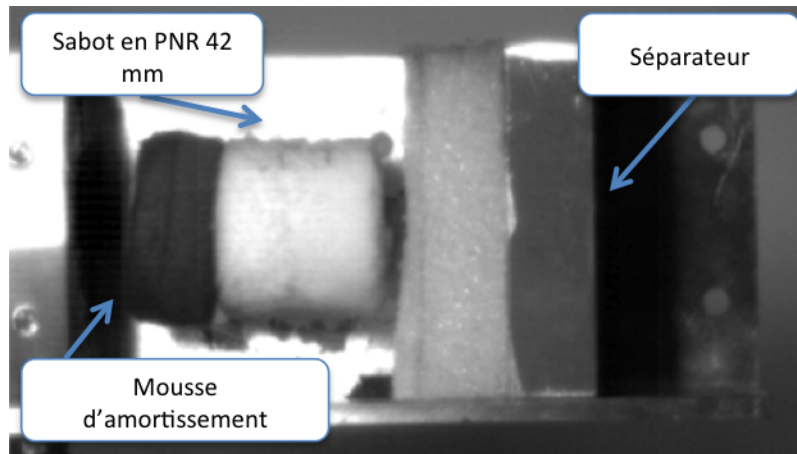
# Mise au point du couple séparateur-sabot

Globalement, deux principes ont été testés. La première solution, appelée « *solution droite* » consiste en un sabot de forme cylindrique d'un diamètre égal au calibre du canon, percé pour accueillir le projectile. Différents matériaux ont été testés, catégorisés comme soit durs, soit fortement déformables. Les matériaux dits durs sont des plastiques rigides de type ABS<sup>1</sup> et les matériaux dits déformables sont constitués d'une mousse expansée, la solution retenue étant le polyéthylène non-réticulé (PNR) d'une densité de  $105 \text{ kg/m}^3$ . Ce dernier matériau permet un écrasement progressif du sabot lors de son impact avec le séparateur, le freinage du sabot est ainsi progressif, amenant à moins de forces d'interaction projectile-sabot, et permettant donc une meilleure attitude du projectile après séparation. Le problème est qu'en raison du matériau du sabot, le projectile n'est pas toujours bien retenu dans le sabot pendant sa course dans le canon, et la séparation peut alors s'effectuer avant la sortie du canon, amenant tous les problèmes d'un tir sans sabot. Ce problème est résolu en plaçant un amortisseur, constitué d'un cylindre en mousse, de quelques millimètres d'épaisseur, et de densité plus légère que le sabot. L'écrasement de ce cylindre permet une accélération plus progressive du sabot, qui permet d'éviter la séparation prématurée du sabot et du projectile. Le séparateur consiste alors simplement en une plaque d'aluminium présentée en face du canon, percée d'un trou d'un diamètre adapté. Une plaque de PNR est également ajoutée, dans le but de rendre la séparation plus progressive. Un exemple de cette implémentation est présentée à la figure E.1.

---

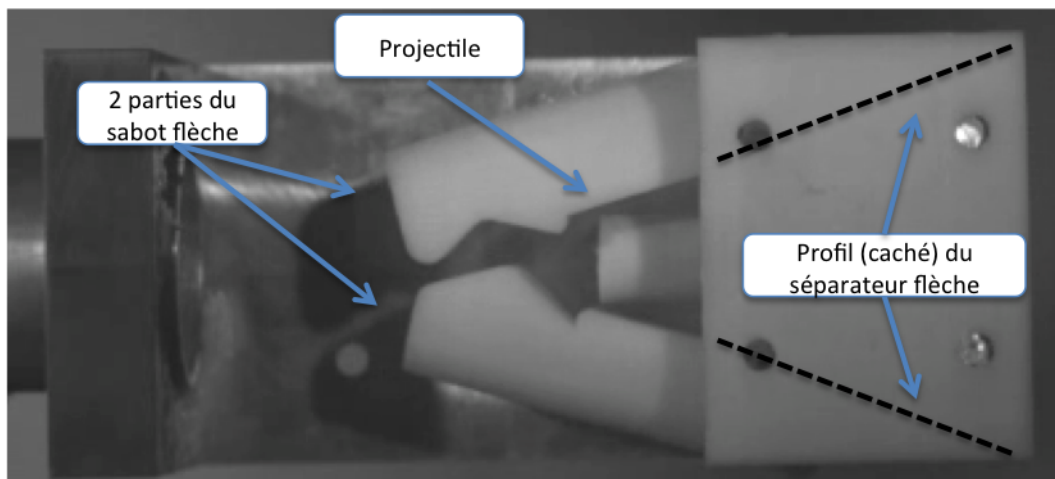
1. Acrylonitrile Butadiène Styène, [http://fr.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiène\\_styrène](http://fr.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiène_styrène)





**FIGURE E.1.** *Un exemple de la séparation droite avec un sabot de 40 mm en matériau PNR et un amortisseur en mousse.*

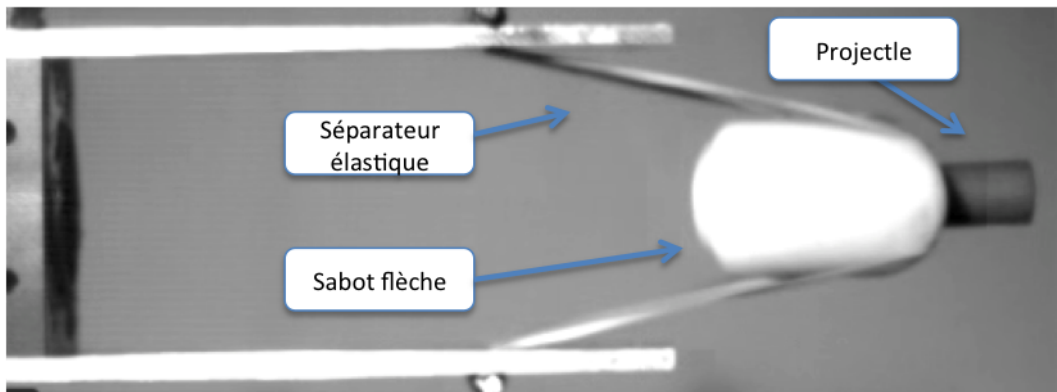
Une autre solution, complètement différente, consiste en l'utilisation d'un sabot plus complexe, inspiré d'un projectile flèche<sup>2</sup>. Ce sabot est composé de deux parties destinées à se séparer l'une de l'autre lors de leur contact avec le séparateur. Deux séparateurs ont été testés. Le premier présente un guide sur lequel les deux parties du sabot viennent glisser pour s'éloigner de la trajectoire de tir, ne laissant ainsi que le projectile sur la trajectoire initiale (figure E.2). Le deuxième séparateur est constitué d'élastiques, freinant et séparant les deux parties du séparateur progressivement (figure E.3).



**FIGURE E.2.** *Un exemple de la séparation type projectile flèche avec un sabot en deux parties plastique ABS et un séparateur en ABS présentant un guide aidant à la séparation.*

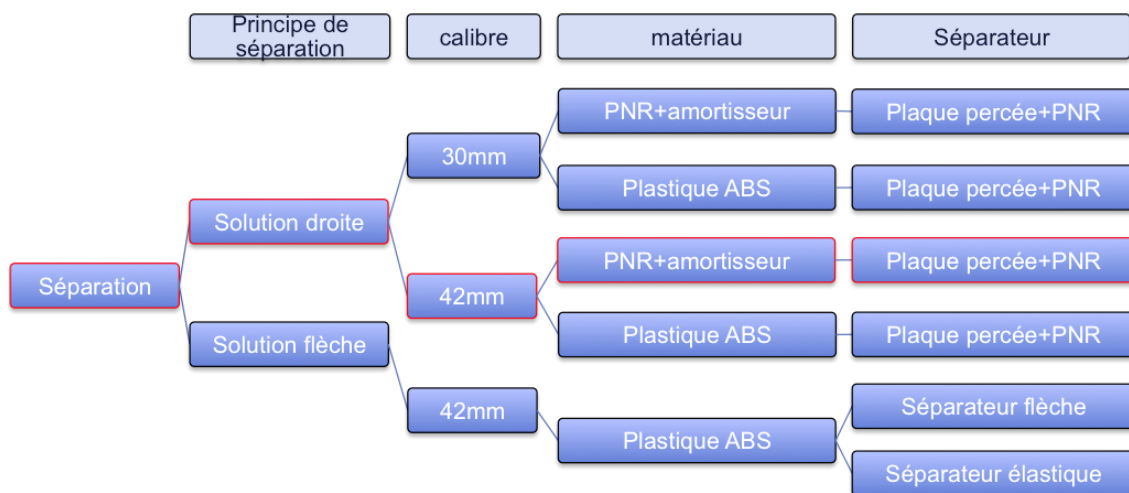
---

2. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pénétrateur\\_à\\_énergie\\_cinétique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pénétrateur_à_énergie_cinétique)

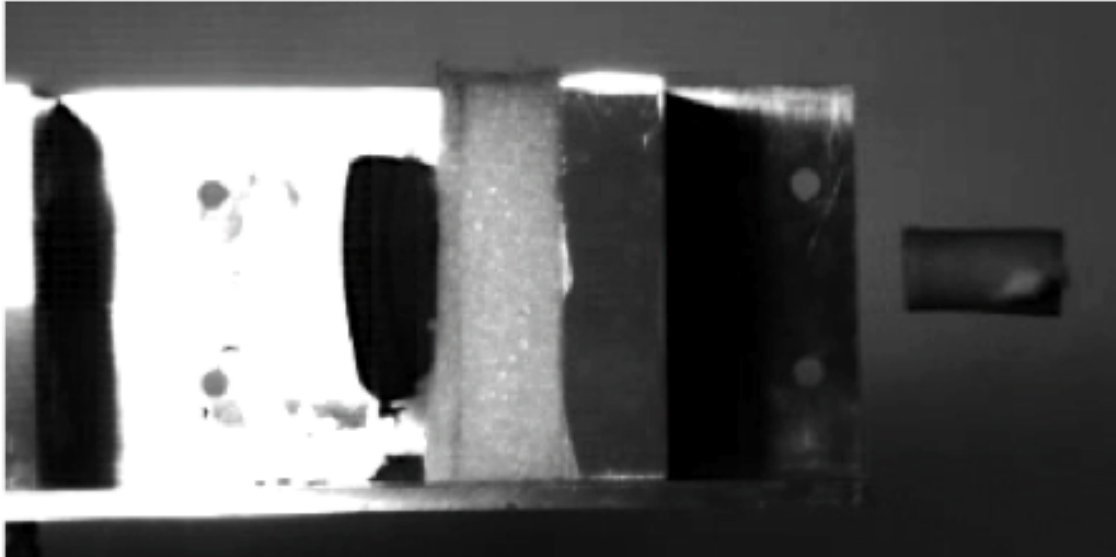


**FIGURE E.3.** *Un exemple de la séparation élastique avec un sabot en plastique ABS et un séparateur constitué d'élastiques.*

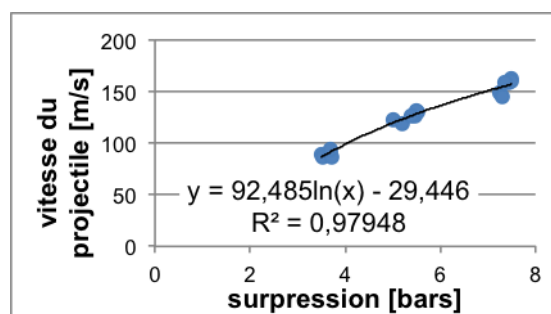
L'ensemble des solutions testées est schématisé et récapitulé sur la figure E.4. La solution retenue y est présentée en rouge, il s'agit d'une séparation droite d'un sabot de 42 mm en PNR d'un amortisseur cylindrique en mousse, et d'un séparateur constitué d'une plaque d'aluminium percée et d'un panneau en mousse en PNR. Afin d'obtenir le meilleur alignement possible entre le canon et le séparateur, ce qui optimise la séparation, celui-ci est vissé sur le canon lui-même. Un exemple de séparation typique est présenté sur la figure E.5. Une courbe pression-vitesse est présentée à la figure E.6. Ces résultats sont également présentés dans le corps principal du doctorat.



**FIGURE E.4.** *Les différentes solutions de séparation testées.*



**FIGURE E.5.** *Un exemple de séparation du projectile PMI tiré à une vitesse de 110 m/s.*



**FIGURE E.6.** *La vitesse du projectile à la bouche du canon en fonction de la surpression réglée dans le réservoir du canon pneumatique pour des PMI.*

# Annexe F

## La mesure de force par capteur flexiforce

### 1 La mesure de force par capteur flexiforce

Le capteur Flexiforce est un capteur dit piézorésistif, c'est-à-dire qu'il est caractérisé par une résistance électrique qui varie en fonction de la force appliquée sur la surface sensible du capteur. Plus précisément sa conductance électrique varie linéairement en fonction de la force qui lui est appliquée. C'est cette propriété qui est exploitée pour réaliser une mesure de force. En outre, il est très fin (0,208 mm) et très flexible (ses caractéristiques sont détaillées dans l'annexe H). Il est également bon marché.

L'avantage de ce système de mesure est qu'il permet d'étudier l'impact d'un projectile déformable sur une cible déformable, mesure encore inédite dans la littérature.

Concrètement, ce capteur Flexiforce est connecté à un circuit électrique alimenté par une source de tension, et des mesures de tensions sont prises, permettant de déduire à tout moment la résistance proposée par le capteur, qui peut ensuite être mise en corrélation avec la force appliquée.

Le circuit employé est représenté sur la figure (F.1). On y retrouve :

- le capteur Flexiforce.
- Une résistance fixe, dite de référence. En pratique, la valeur de cette résistance va permettre de mesurer une force d'une certaine amplitude. Plus cette

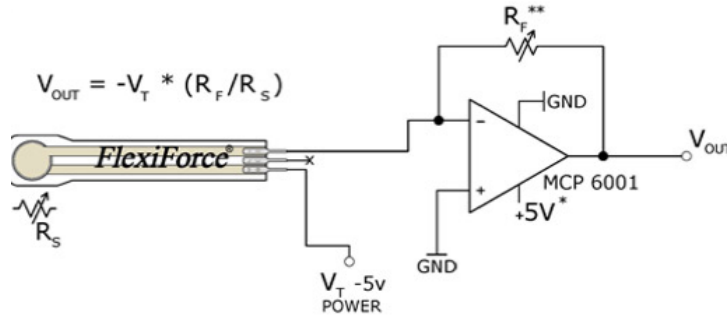


FIGURE F.1. Le circuit électrique du capteur Flexiforce.

résistance est grande, plus la force maximum mesurable est faible. Il est donc intéressant de pouvoir changer la valeur de cette résistance facilement.

- Un amplificateur opérationnel (OPAM), permettant d'amplifier le signal mesuré. En pratique, cet OPAM est nécessaire pour supprimer l'influence éventuelle des instruments de mesures, et de limiter le bruit associé à la mesure.
- Une source de tension continue permettant d'alimenter aussi bien le circuit que l'OPAM.

De ce circuit, on tire la relation :  $V_{out} = -V_T (R_F/R_S)$  Le principe de mesure est le suivant :

- la tension  $V_{out}$  est mesurée à l'aide d'un instrument de mesure. Il peut s'agir d'un simple multimètre, ou un système d'acquisition de données. Pour cette étude, il s'agit d'une console d'acquisition PXI fournie par la société National instrument<sup>TM</sup>.
- Connaissant  $V_T$  et  $R_F$ , la valeur de  $R_S$  peut être calculée.
- De cette valeur  $R_S$  est déduite la conductance  $G_S$  du capteur Flexiforce, qui est par définition l'inverse de  $R_S$  :  $G_S = 1/R_S$ .
- Les propriétés du capteur sont telles que  $G_S$  évolue de façon linéaire avec la force appliquée, ce qui veut dire qu'il existe un coefficient unique  $K$ , tel que  $F = G_S/K$ .

Tout l'enjeu de la calibration de ces capteurs va être de trouver ce coefficient  $K$ , en appliquant une charge  $F$  connue et en mesurant le  $G_S$  du capteur lors de cette charge.

---

On retrouve quelques documents techniques du fabricant, et quelques études sur le capteur dans les références [100–103]. Aux dires de ces sources, le facteur de calibration est supposé différent d’un capteur à l’autre. Le procédé de calibration doit donc être non seulement précis mais également très répétable, reproductible et facile à mettre en oeuvre. Par ailleurs, la réponse du capteur semble dériver au cours du temps [100, 102], puisqu’elle chute de quelques dixièmes de pourcent par minute, ce qui ne devrait néanmoins pas poser de problèmes pour des mesures hautement dynamiques. Enfin, la réponse du capteur semble être influencée par la surface d’impact. Sachant que la surface d’impact d’un projectile non-létal évolue pendant l’impact, ce problème nécessite l’emploi d’une pièce mécanique supplémentaire placée sur le capteur, de manière à s’assurer que la force reste répartie sur une surface la plus constante possible. Des tests réalisés semblent prouver ce point. Un rapport interne au département décrit ce procédé de calibration, ainsi que deux articles publiés [101, 104, 105]. En résumé, des essais de calibration statique ont été effectués à l’aide d’une presse, et un montage dédié a été conçu et validé pour procéder à une calibration dynamique. Le principe est alors basé sur un essai de chute de masse, avec une première mesure de force de référence à l’aide d’un capteur de force piezoélectrique, et une deuxième mesure de force calculée à partir de la mesure de déformation d’un ressort.

Ces deux points sont présentés dans les sections qui suivent.

## 2 Calibration statique

Dans un premier temps, une calibration statique est mise en oeuvre. Elle consiste à placer le capteur sous une presse mécanique, disponible au département COBO (construction) de l’Ecole Royale Militaire (figure F.2).

Les résultats sont présentés dans des articles publiés ainsi que dans le rapport interne sur la calibration du capteur [101, 104, 105]. L’essentiel est repris sur le graphe F.3.

On y observe deux ensembles de résultats différents. Le premier type de test, appelée ici « *charge par paliers* » consiste en la charge du capteur d’une certaine valeur, et la prise de mesure de conductance induite, une fois la charge atteinte. Cette opération est répétée plusieurs fois pour différentes valeurs de charge. Avant chaque nouvelle valeur de palier, le capteur est préchargé plusieurs fois à une valeur supérieure à la charge testée (rodage du capteur). On constate que les résultats sont relativement répétables (voir table F.1), mais différents d’un capteur à l’autre.

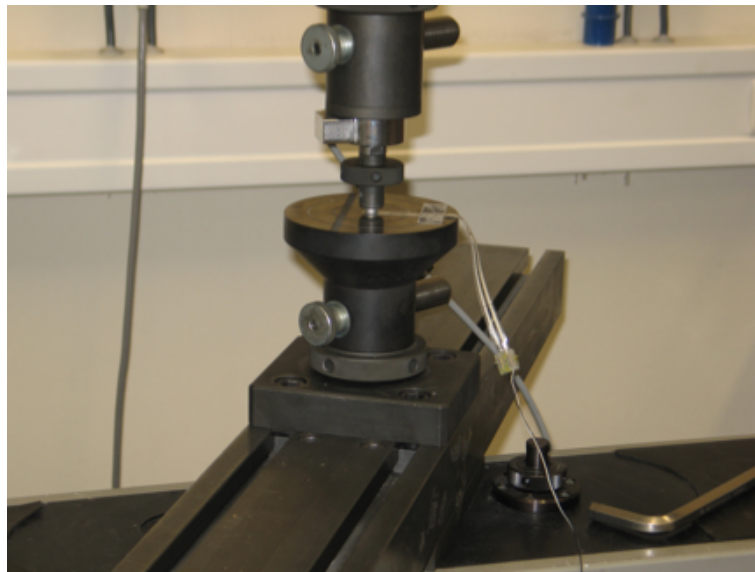


FIGURE F.2. La presse mécanique employée pour la réalisation de la calibration statique du capteur.

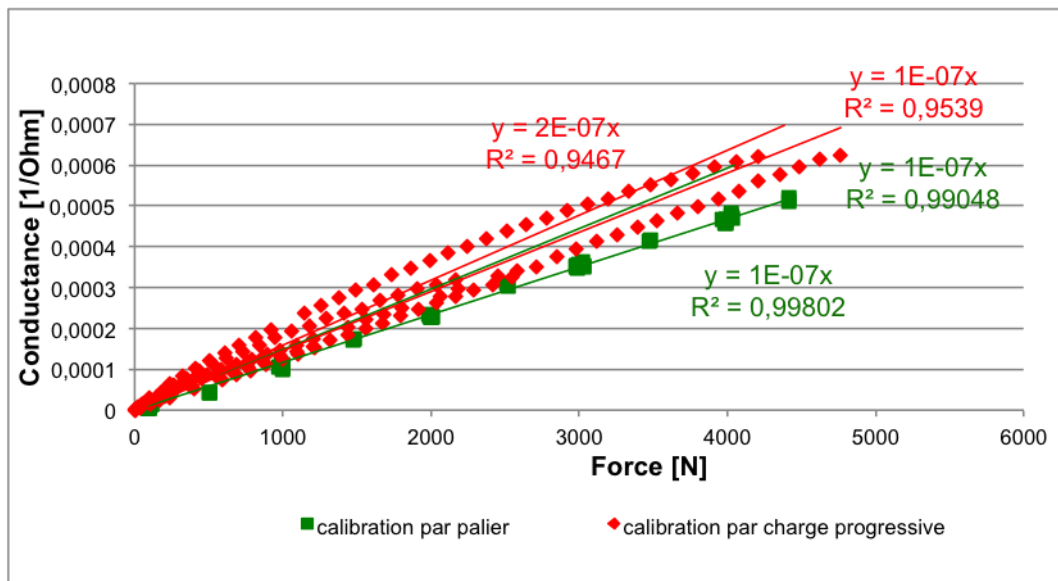


FIGURE F.3. Les résultats de la calibration statique des capteurs Flexiforce.

Paramètre statistique de $K$	Valeur
Moyenne	$1,17978 \times 10^{-7} [1/Ohm]$
Ecart type	$5,72257 \times 10^{-9} [1/Ohm]$
Ecart type/moyenne	4,85%

TABLE F.1. Résultats statistiques du test statique par palier.

---

Le deuxième type de test consiste à prendre la mesure de conductance pendant la charge et la décharge ( « *charge progressive* »). On observe sur la figure F.3 un phénomène d'hystérèse assez prononcé, ce qui engendre un écart-type du facteur de calibration élevé (table F.2). Cette observation nous indique que l'observation de la courbe de force en fonction du temps générée par le capteur Flexiforce ne sera pas précise. Le capteur peut par contre toujours être employé pour obtenir la valeur de force maximum  $F_{max}$  apparaissant lors d'un impact.

Paramètre statistique de $K$	Valeur [1/Ohm]
Moyenne	$1,68625 * 10^{-7}$
Ecart type	$4,4866 * 10^{-8}$
Ecart type/moyenne	26,61%

**TABLE F.2.** *Résultats statiques du test statique par charge progressive.*

### 3 Calibration dynamique

Le but de cette calibration dynamique est d'appliquer au capteur une charge rapide, obtenue à l'aide de la chute d'une masse sur le capteur, et dont l'intensité est mesurable par un autre dispositif de mesure. Pour ce faire, un capteur de force piezoélectrique est employé, prévu pour travailler dans des conditions dynamiques, et dont la calibration est connue. Celui-ci devra mesurer la même force que le capteur Flexiforce à calibrer. En pratique, le dispositif schématisé sur la figure F.4(a), baptisé pour l'occasion "*calibrateur dynamique*" est employé. Il s'agit d'un ensemble de dix pièces permettant d'appliquer une charge identique sur les deux capteurs de façon précise et répétable. Parmi d'autres pièces, on voit notamment la présence d'un ressort, qui subira l'impact de la masse et transmettra une force aux capteurs, en fonction de ses propriétés mécaniques. Les capteurs ne subissent donc pas une force d'impact directe, mais plutôt la force de réaction du ressort à cet impact. Ce système permet de déduire la force transmise aux capteurs en mesurant la déformation de ce ressort au cours de l'impact à l'aide d'une caméra haute-vitesse. En effet, mesurant la déformation et connaissant la raideur du ressort, on peut très simplement calculer la force résultante ( $F = k\Delta x$ ). On émet de ce fait l'hypothèse que le ressort est caractérisé par une raideur  $k$  constante. Il s'agit donc d'une troisième mesure de la force appliquée aux capteurs, qui permettra de valider le système de calibration, en cas de bonne adéquation entre ces différentes mesures.

1. Impacteur : il s'agit d'une masse déterminée qui va tomber sur le ressort du système, ce qui engendre une compression de ce dernier, induisant une certaine

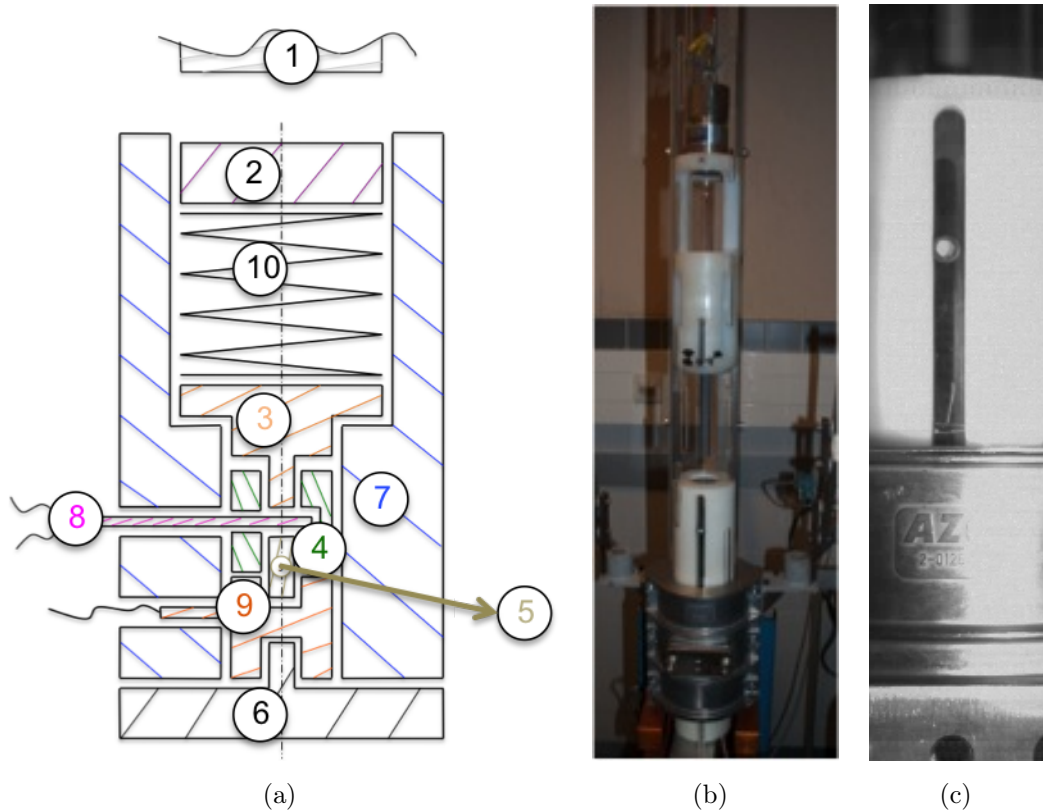


force sur les capteurs. En pratique, un module est placé dans le système tour de chute du département ABAL, comme expliqué par la suite.

2. Interface impacteur ressort : petite pièce permettant de ne pas impacter directement le ressort. On y place un témoin visuel qui suit à tout moment le mouvement de déformation du ressort, qui permettra de calculer la force appliquée aux capteurs.
3. Interface ressort/flexi : pièce permettant de transmettre la force du ressort au capteur Flexiforce. De par sa forme particulière, elle permet que l'intégralité de la force d'impact soit transmise sur la surface sensitive du capteur. Il est à noter que le matériau employé doit être suffisamment rigide pour éviter une déformation significative de cette pièce, ce qui influencerait la force transmise au capteur. Cette pièce est fabriquée en aluminium.
4. Guide Flexiforce : permet d'aligner le Flexiforce avec les pièces en contact (interface ressort/flexi et interface flexi/capt ref). Ce bon alignement est indispensable pour que les deux capteurs mesurent bien la même force.
5. Interface flexi/capt ref : petite pièce permettant de transmettre la force entre le Flexiforce et le capteur de référence. Cette pièce doit être la plus rigide possible, de manière à ce que la force mesurée soit identique pour les deux capteurs. Cette pièce est réalisée en aluminium.
6. Socle système de calibration Il s'agit du support de l'ensemble du système. Le capteur de référence est vissé à ce socle et en est donc solidaire.
7. Chassis : permet le bon alignement de l'ensemble des pièces
8. Capteur de référence : Quartz Force Link (model series 221A-227A)
9. Capteur Flexiforce
10. Ressort : il s'agit d'un ressort de compression de la société Danly, modèle 9-1224-11 : 20 mm de diamètre pour le logement, longueur 150 mm, d'une raideur égale à  $7,9 \text{ N/mm}$

L'ensemble du système est placé dans un module tour de chute, disponible au laboratoire ABAL. On voit ce module sur la figure F.4(b). Le principe est de porter une masse d'une à l'aide d'un électro-aimant, d'amener cette masse à une certaine hauteur, et ensuite de couper l'électro-aimant de manière à faire tomber cette masse. L'ensemble du système est placé dans un tube plastique transparent permettant le bon alignement des constituants. Ce système permet de lâcher des masses de plusieurs kilos d'une hauteur de plus de 2 m.

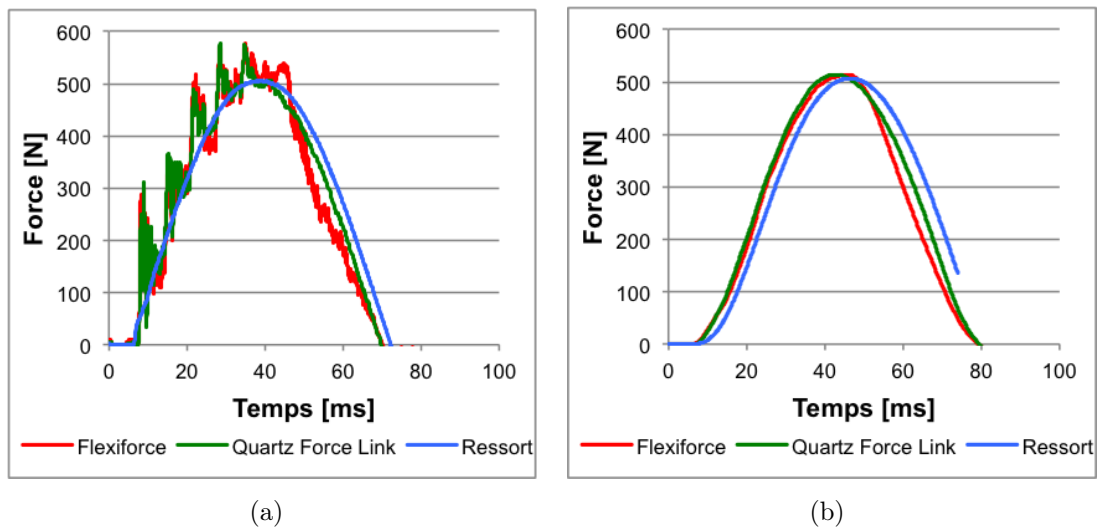
Enfin, pour mesurer la déformation du ressort, une caméra haute vitesse Photron Ultima APX est employée avec une fréquence d'image de 8000 images par seconde. Celle-ci va filmer le mouvement d'un témoin placé sur la pièce interface impacteur ressort, qui caractérise la déformation du ressort ( figure F.4(c)).



**FIGURE F.4.** (a) Le calibrateur dynamique - (b) la tour de chute du département ABAL - (c) zoom sur la pièce interface-ressort du calibrateur dynamique.

Les résultats de comparaisons des signaux issus des trois types de mesures sont observés sur la figure F.5(a). Le facteur de calibration du capteur Flexiforce utilisé est un facteur normalisé, choisi de façon à ce que la force maximum corresponde à la force maximum du capteur de référence. Ce facteur normalisé est donc le facteur de calibration dynamique recherché. On remarque en procédant de la sorte que la mesure de force Flexiforce et la mesure du capteur de référence sont quasiment identiques. Les deux capteurs mesurent donc bien la même force. Les profils de force des capteurs et de la mesure issue de la vidéo suivent également globalement la même allure. Par contre, les courbes des capteurs présentent des oscillations autour de la mesure vidéo. Ce phénomène est probablement dû à une variation du coefficient de raideur  $k$  du ressort autour de sa valeur moyenne. Ce phénomène peut être filtré à l'aide d'un filtre passe-bas, à une fréquence de coupure de 30 Hz (valeur faible

en raison de la relative lenteur du phénomène par rapport à un impact balistique). Les résultats sont présentés sur la figure F.5(b). On remarque sur ce graphe que le phénomène d'oscillations des capteurs a totalement disparu, et mieux, que les courbes sont quasiment identiques. En conclusion, le calibrateur dynamique semble tout à fait adéquat pour effectuer la calibration dynamique des capteurs Flexiforce. Le procédé de calibration est ainsi validé, puisque des phénomènes mesurés à l'aide de technologies différentes donnent les mêmes résultats en terme de profil de force d'impact.

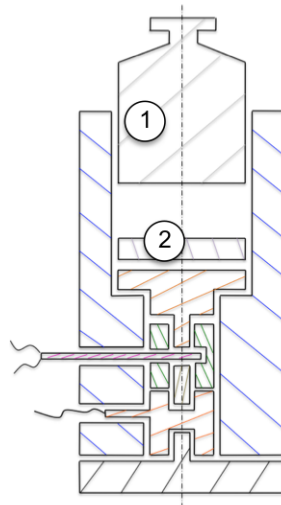


**FIGURE F.5.** La comparaison des signaux purs (a) et filtrés (b) obtenus à l'aide du calibrateur dynamique.

On constate par contre que le phénomène est relativement lent et faible en amplitude (près de 70 ms et 500 N comparés aux 1 à 2 ms et 3500 N de la figure D.3). Puisque la mesure de référence est validée, on peut maintenant enlever le ressort et impacter directement la pièce 3 à l'aide de l'impacteur, ce qui rendra le phénomène plus rapide et plus intense. Le nouveau calibrateur est ainsi décrit sur la figure F.6, avec :

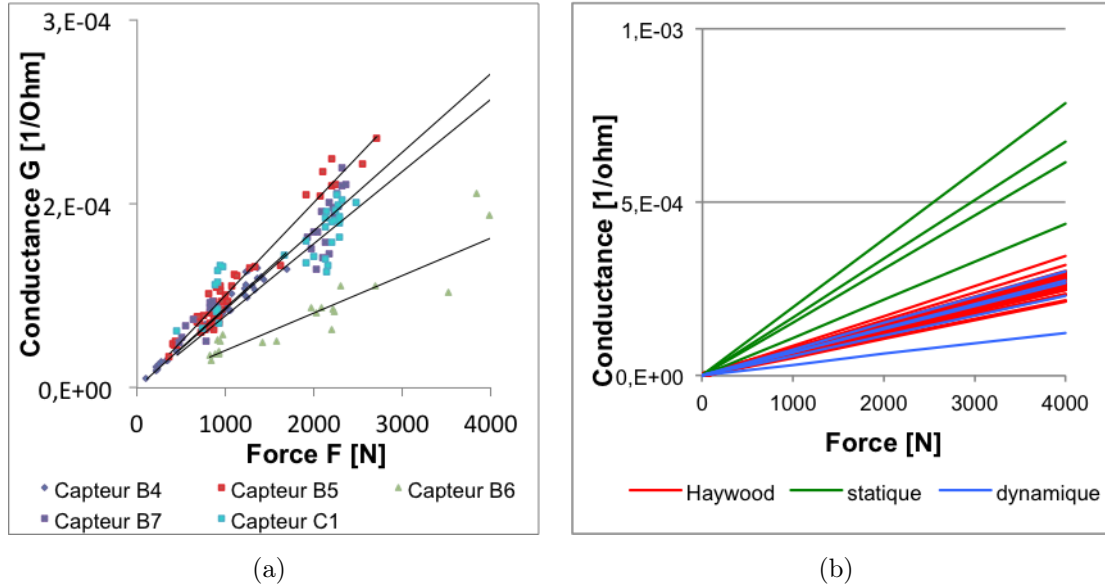
1. nouvel impacteur, qui est cette fois une masse d'1 kg.
2. Différentes pièces d'amortissement, qui consistent en des mousses de différentes épaisseurs allant de quelques millimètres à 2 cm). Avec le choix de la hauteur de chute, ils permettent d'ajuster la durée de l'impact et l'intensité de la force d'impact.

Ce nouveau calibrateur ne nécessite plus l'emploi de la tour de chute vu les faibles hauteurs employées, de quelques centimètres. Différents capteurs sont testés, et les



**FIGURE F.6.** *Le nouveau calibrateur dynamique.*

valeurs de conductances maximum observées durant l'impact sont comparées aux valeurs de force maximum mesurées par le capteur de force de référence. Les résultats sont repris sur la figure F.7 et sur la table F.3.



**FIGURE F.7.** (a) Résultats des essais de calibration dynamique de différents capteurs. (b) Comparaison aux résultats statique et aux résultats obtenus dans la littérature [100].

Capteur	Facteur de calibration [1/(Ohm*N)]	Coefficient de corrélation droite $R^2$ [-]	Ecart type/moyenne [%]
Capteur dyn B4	6,526E-08	0,96	8,53%
Capteur dyn B5	7,555E-08	0,96	12,66%
Capteur dyn B6	3,050E-08	0,88	18,91%
Capteur dyn B7	6,398E-08	0,95	12,40%
Capteur dyn C1	5,875E-08	0,90	11,50%
Capteur stat 6	1,180E-08	0,99	4,85%
Capteur stat A1	1,451E-07	0,95	4,30%
Capteur stat A2	1,59E-07	0,95	26,61%
Capteur stat A4	1,481E-08	0,99	38,21%

**TABLE F.3.** Résultats des différents tests de calibration.

---

## 4 Discussion

On voit sur la figure F.7(a) différents capteurs testés correspondant chacun à une couleur spécifique. Chaque point représente un essai de chute de masse liant force maximum appliquée et mesure maximum induite du capteur. Idéalement, ces points doivent être alignés, le rapport de ces deux mesures étant alors constant. Les droites en présence montrent la meilleure approximation de ce rapport constant. La figure F.7(b) représente uniquement ces droites, et les compare à celles obtenues à l'aide des essais statiques, et à d'autres résultats disponibles dans la littérature [100]. Les résultats numériques sont présentés dans la table F.3.

On tire les conclusions suivantes :

- les facteurs de calibrations sont bien propre à chaque capteur. Il est donc primordial, également pour des applications dynamiques, de procéder à une calibration individuelle des capteurs.
- Ensuite, on remarque de par les coefficients de corrélation  $R^2$  que la tendance linéaire est bien observée pour tous les capteurs.
- Le graphe semble présenter deux groupes. En effet, les calibrations statiques présentent des facteurs de calibration plus élevés que les facteurs de calibration dynamiques.
- Si l'on compare ces valeurs à des valeurs de calibration statique obtenues dans la littérature par Haywood [100], on constate que celles-ci sont plus proches des valeurs statiques. Cette constatation met probablement en évidence l'effet de la surface sur le facteur de calibration. En effet, l'intégralité de la surface sensitive de plus ou moins 9 mm est sollicitée lors des tests statiques réalisés, tandis que la surface d'impact pour la calibration dynamique réalisée est caractérisée par un cercle d'un diamètre de 6 mm. La calibration de Haywood emploie quant à elle également une surface sollicitée bien déterminée, sans quantification spécifiée [100]. En conclusion, il est donc indispensable d'avoir la même surface lors du procédé de calibration que lors des mesures effectives.



## Annexe G

# La mesure de force par accéléromètre

Cette étude expérimentale consiste à répliquer les moyens métrologiques mis en place par Wayne State University (WSU) pour mesurer la force d'impact d'un projectile non-létal supposé rigide sur PMHS[14, 68, 106]. Le principe est de tirer un projectile dédié équipé d'un accéléromètre et de mesurer la décélération du projectile pendant l'impact. Les caractéristiques de l'accéléromètre employé sont décrites dans l'annexe H. Cette mesure permet de calculer la force pendant l'impact, grâce à la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_i(t) = m\vec{a}(t) \quad (\text{G.1})$$

où

- $\vec{F}_i(t)$  est l'ensemble des vecteurs force appliqués au projectile, au cours du temps. La force est exprimée en  $N$ .
- $m$  est la masse du projectile, supposée constante pendant l'impact. Elle est exprimée en  $kg$ .
- $\vec{a}(t)$  est le vecteur accélération du projectile au cours du temps. l'accélération est exprimée  $m/s^2$ .

Si l'on néglige les forces de frottement et la force de gravité, et que l'on étudie l'impact de manière unidimensionnelle sur la trajectoire de tir, on a :

$$F(t) = md(t) \quad (\text{G.2})$$

où



- $F(t)$  est la force appliquée sur le projectile par la cible, qui est égale à la force appliquée par le projectile sur la cible, selon la troisième loi de Newton,  $d(t)$  est la décélération du centre de gravité du projectile.

Pour réaliser la mesure, on émet l'hypothèse que le projectile est parfaitement rigide par rapport à la cible. L'accélération du projectile, mesurée par l'accéléromètre, est donc identique en tout point, et est égale à l'accélération du centre de gravité.

L'emploi de cette méthode nécessite de modifier un projectile de par la présence de l'accéléromètre. En effet, la masse de l'accéléromètre employé est de 4,2 g, ce qui représente une masse significative comparée aux masses habituelles des projectiles non létaux, mentionnées dans la section 2.3.1.

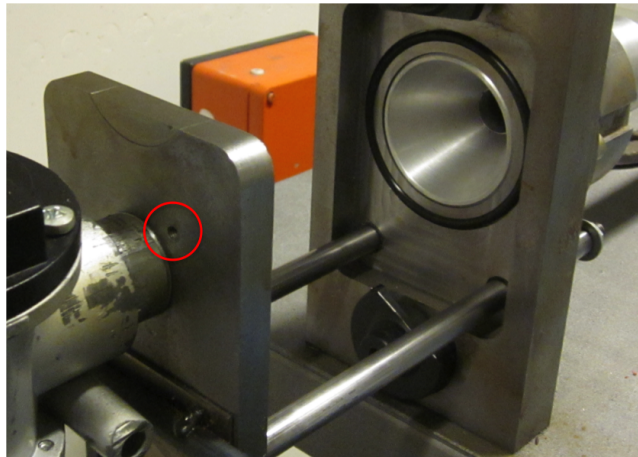
La situation étudiée est donc différente de l'impact d'un projectile non-létal commercial disponible, impactant une cible. Cette mesure de force sera donc utile uniquement pour valider la biofidélité d'un modèle, mais ne sera pas d'application pour mesurer la force apparaissant à l'impact d'un projectile non-létal commercialement disponible.

Pour parvenir à réaliser ce type de tests, deux problèmes sont à résoudre. Tout d'abord, il s'agit de concevoir un projectile instrumenté pouvant accueillir l'accéléromètre, et ensuite de pouvoir relier cet accéléromètre par un fil aux instruments d'acquisition de mesure. C'est l'objet des deux sections suivantes.

## 1 Tir du projectile instrumenté à l'aide du lanceur pneumatique

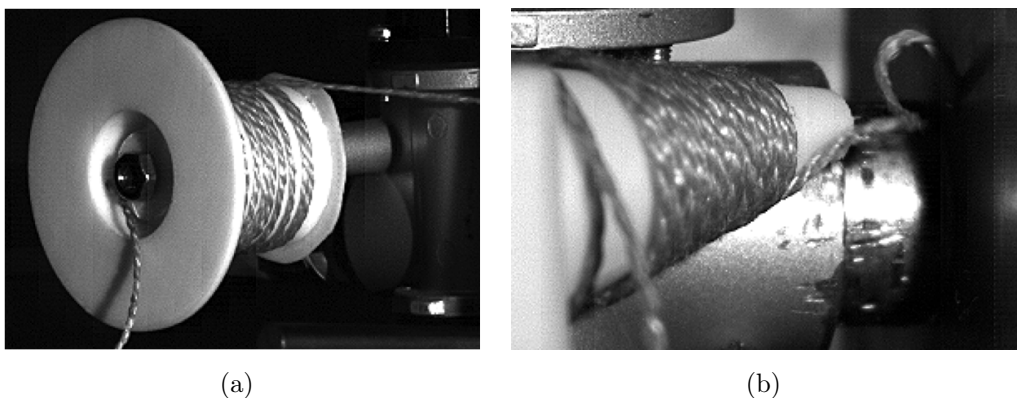
Deux problématiques sont à résoudre pour permettre ce type de tir. D'une part, le lanceur doit disposer d'une ouverture pour laisser passer le fil reliant l'accéléromètre à l'unité d'acquisition de données. D'autre part, le fil reliant le projectile doit permettre au projectile de parcourir une distance égale à la longueur du canon plus la distance entre la bouche du canon et la cible. Le plus simple pour permettre cette opération est d'enrouler le fil sur une bobine, et de permettre son déroulage lors du tir.

Le premier problème est aisément résolu : un trou fileté obturable à l'aide d'une vis est percé sur la culasse du lanceur, près de l'électrovanne de tir, tel que présenté sur la figure G.1. Son petit diamètre et un élément d'étanchéité permettent une perte de pression raisonnable.



**FIGURE G.1.** *L'ouverture permettant le passage du fil de l'accéléromètre.*

La deuxième fonction est plus délicate à satisfaire. Deux solutions sont envisagées : soit le bobinage est réalisé dans le canon même, à l'arrière du projectile, soit celui-ci est réalisé sur une bobine placée à l'extérieur du lanceur. Là encore, deux options sont possibles : soit l'axe de la bobine est perpendiculaire à la trajectoire du fil, et le débobinage est rendu possible par la rotation de la bobine autour de son axe (Figure G.2(a)), soit l'axe de la bobine est confondu avec la trajectoire de tir, et la bobine est conique. La bobine est alors fixe lors du débobinage (G.2(b)).



**FIGURE G.2.** *(a) La bobine perpendiculaire à la trajectoire du fil, débobinage par rotation de la bobine, (b) la bobine conique d'axe confondu à la trajectoire du fil, débobinage sans rotation.*

La meilleure solution semble être la bobine conique dans l'axe du fil. Le tir le plus rapide fut effectué à 68 m/s. La solution fut améliorée en terme de design par une bobine pouvant également tourner sur son axe, de manière à faciliter le bobinage.

## 2 Conception du projectile instrumenté

Le projectile instrumenté idéal doit satisfaire aux conditions suivantes :

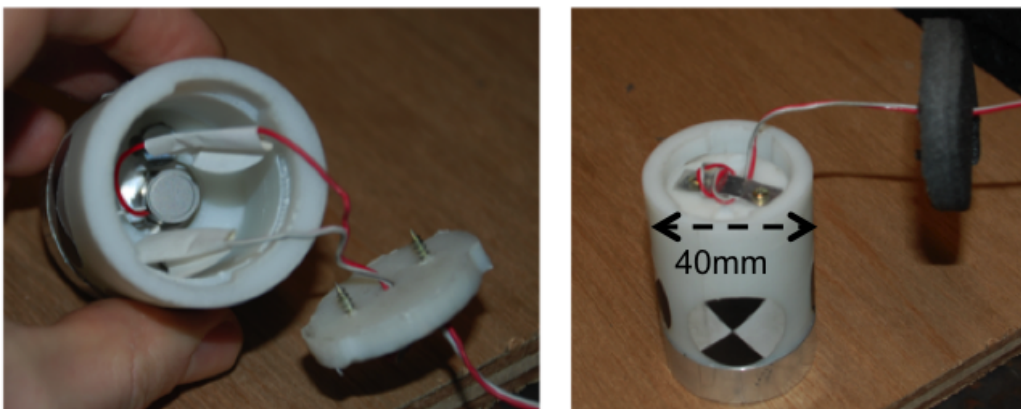
- il doit permettre l'accueil de l'accéléromètre décrit dans l'annexe H.  
L'accéléromètre a été choisi pour permettre une mesure allant jusqu'à 50000 g, tout en étant suffisamment compact pour tenir dans le projectile envisagé. Celui-ci doit être vissé dans un filetage adéquat.
- L'hypothèse de rigidité du projectile doit être satisfaite. Plus il sera rigide, meilleure sera la mesure.
- Immanquablement, pendant le parcours du projectile dans le canon et sur sa trajectoire de vol, le fil reliant le projectile aux instruments d'acquisition de mesure sera sous tension. Cette tension ne doit pas endommager l'accéléromètre. Le projectile doit donc faire en sorte que cette tension ne parvienne pas jusqu'à l'accéléromètre.
- Le projectile est susceptible de rebondir après l'impact, et pourra donc éventuellement impacter un autre corps que la cible. L'accéléromètre doit donc être protégé de tout éventuel impact direct.
- Le projectile doit pouvoir être tiré à des vitesses allant jusqu'à 90 m/s, et les vitesses doivent être répétables et reproductibles.

Différentes versions ont été réalisées (figure G.3), pour arriver à la version finale décrite sur les figures G.4 et G.5. L'accéléromètre est vissé dans un palet en aluminium, supposé infiniment rigide par rapport à la cible. La coque et la pièce de fermeture en plastique ABS assurent la protection du projectile. La pièce d'enroulement permet de coincer le fil de l'accéléromètre sur la pièce de fermeture, ce qui permet de faire en sorte que la tension du fil ne soit pas propagée au niveau de l'accéléromètre. Les vis fixent les différents éléments entre eux. Une dernière pièce est ajoutée à ce montage, qu'on observe sur la figure G.4. Il s'agit d'un cylindre en mousse, placé contre l'arrière du projectile dans le canon, destiné à assurer une meilleure étanchéité au niveau de l'interface canon - projectile.

Les essais de validation de mesure consistent à tirer le projectile sur un capteur de force piézoélectrique. Bien entendu, on viole ici l'hypothèse de rigidité du projectile. Le projectile est tiré à une vitesse inférieure à 10 m/s de manière à éviter une trop grande déviation de la mesure de force due à ce phénomène. Les résultats complets sont exposés dans l'article [101], et sont résumés ci-dessous.



**FIGURE G.3.** *Les différentes versions du projectile instrumenté, les versions évoluant de gauche vers la droite. En haut, une vue du haut, avec l'accéléromètre vissé au centre, caché pour le projectile final. En bas, vue latérale, avec présence d'un palet en aluminium pour le projectile final.*



**FIGURE G.4.** *La version finale du projectile instrumenté.*

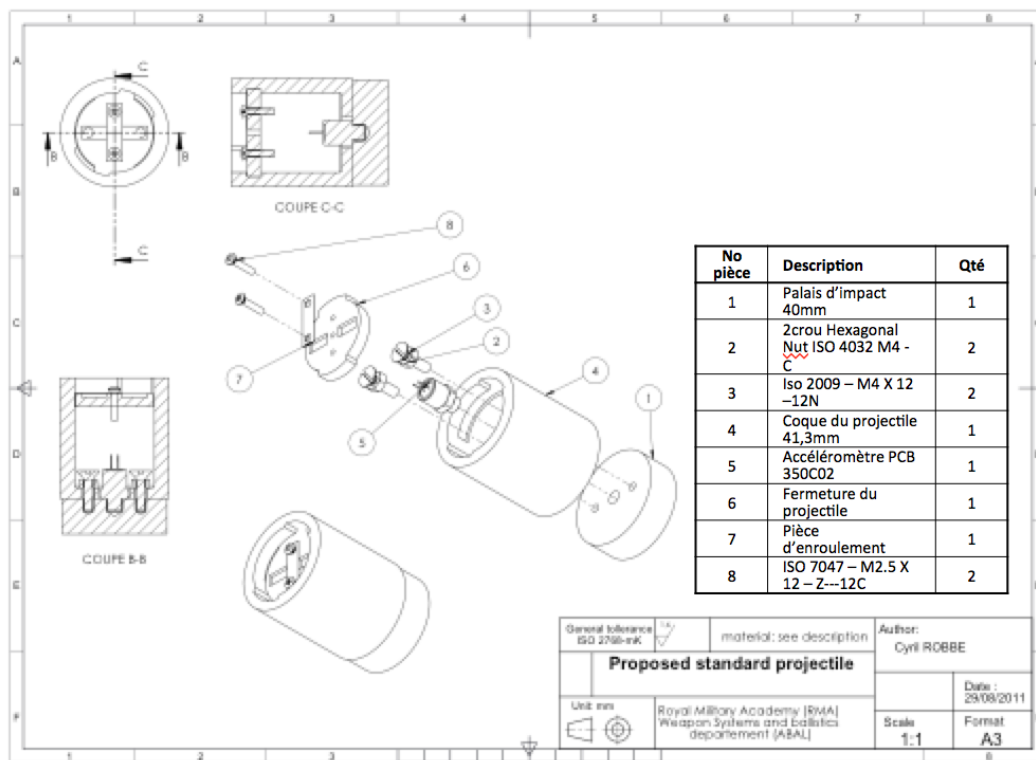
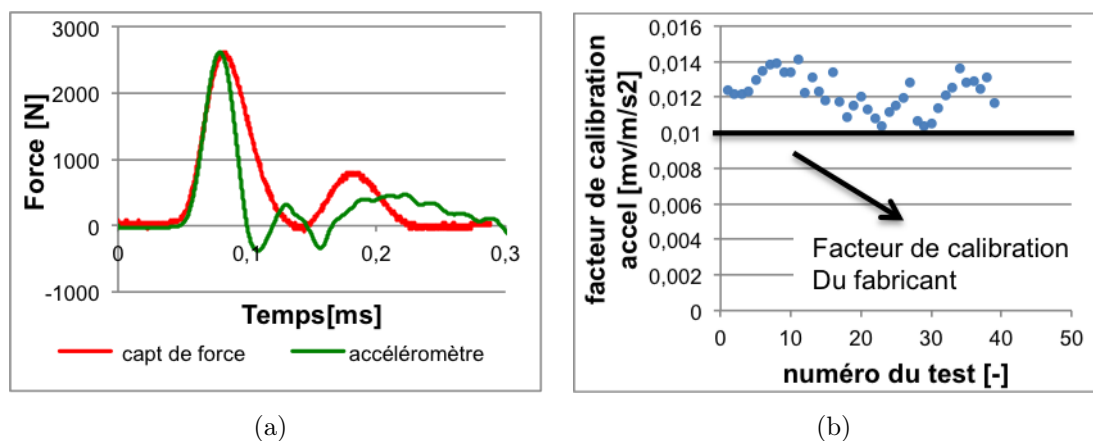


FIGURE G.5. Le plan d'assemblage de la version finale du projectile instrumenté.

Une quarantaine de tirs sont effectués, à différentes vitesses, et un exemple de résultat est présenté sur la figure G.6(a). Les courbes sont coupées après 3 ms. En comparant systématiquement pour chaque tir les valeurs de la force maximum  $F_{max}$  observée à l'impact, on peut réaliser une nouvelle calibration de l'accéléromètre. Les résultats sont présentés sur la figure G.6(b) et dans la table G.1. On constate que les courbes semblent relativement similaires jusqu'à ce que les courbes de forces des deux mesures atteignent leur maximum. Ensuite, la courbe de l'accéléromètre oscille autour de zéro. Cette oscillation caractérise la vibration du palet d'impact. Les oscillations présentes sur la courbe rouge caractérisent les vibrations de la cible après l'impact, plus rapidement amorties. Ces résultats sont fort satisfaisants. Par ailleurs, le facteur de calibration est proche du facteur fourni par le fabricant, ce qui est également rassurant. Cela dit, une dispersion non négligeable du facteur de calibration est observée. On attribue ce phénomène à deux sources. D'une part, le non respect de l'hypothèse de rigidité parfaite peut amener de la dispersion au niveau du facteur de calibration. Comme les tests n'ont pas été effectués à vitesse d'impact identique, le palet d'impact supposé rigide va réagir de façon non répétable. Par ailleurs, l'accéléromètre employé est uniaxial. Un angle non nul entre l'axe du capteur de force et l'accéléromètre pourrait expliquer également une dispersion supplémentaire.



**FIGURE G.6.** (a) Comparaison de courbes de force en fonction du temps fournies par le capteur de force de référence et par l'accéléromètre - (b) Résultats des tests de calibration de l'accéléromètre.

Paramètre statistique de $K^*$	Valeur [ $\frac{mv}{m/s^2}$ ]
Moyenne	0,012
Ecart type	0,00103
Ecart type/moyenne	8,47%
* nouveau facteur de calibration de l'accéléromètre	

**TABLE G.1.** Paramètres statistiques de  $K$ , nouveau facteur de calibration de l'accéléromètre PCB 350C02.

## Annexe H

# Caractéristiques techniques des instruments employés



## Annexe H : Caractéristiques techniques des instruments employés



	ENGLISH	SI	
<b>Performance</b>			
Sensitivity (±15 %)	0.25 mV/lb	56.2 mV/kN	
Measurement Range (Compression)	20000 lb	88.96 kN	[2]
Maximum Static Force (Compression)	30000 lb	133.44 kN	[2]
Bandwidth Resolution (1 to 10000 Hz)	0.30 lb-rms	1.3 N-rms	[3]
Low Frequency Response (-5 %)	0.0003 Hz	0.0003 Hz	[4]
Upper Frequency Limit	40 KHz	40 KHz	[5]
Non-Linearity	≤1 % FS	≤1 % FS	[5]
<b>Environmental</b>			
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤0.08 %/°F	≤0.144 %/°C	
<b>Electrical</b>			
Discharge Time Constant (at room temp)	≥2000 sec	≥2000 sec	[1]
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤100 ohm	≤100 ohm	
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	[2]
Spectral Noise (1 Hz)	0.039 lb/√Hz	0.17 N/√Hz	[2]
Spectral Noise (10 Hz)	0.012 lb/√Hz	0.054 N/√Hz	[2]
Spectral Noise (100 Hz)	0.0034 lb/√Hz	0.015 N/√Hz	[2]
Spectral Noise (1000 Hz)	0.00088 lb/√Hz	0.0039 N/√Hz	[2]
Output Polarity (Compression)	Positive	Positive	[2]
<b>Physical</b>			
Stiffness	6.3 lb/in	11 kN/μm	[2]
Size (Diameter x Height)	1.5 in x 0.5 in	38.1 mm x 12.7 mm	
Weight	3.1 oz	88 gm	
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Sealing	Hermetic	Hermetic	
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting Thread	1/4-28 Female	Not Applicable	
	[6]		
<p>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.                      ICP® is a registered trademark of PCB group, Inc.</p>			
<p><b>Optional Versions</b> (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.)                      N - Negative Output Polarity                      Output Polarity (Compression)                      W - Water Resistant Cable                      Electrical Connector                      Electrical Connection Position</p> <p>Sealed Cable                      Side</p> <p>Sealed Cable                      Side</p> <p><b>Notes</b>                      [1] Minimum 25 VDC required for maximum output voltage.                      [2] Typical.                      [3] Calculated from discharge time constant.                      [4] Estimated using rigid body dynamics calculations.                      [5] Zero-based, least-squares, straight line method.                      [6] See PCB Declaration of Conformance P5023 for details.</p> <p><b>Supplied Accessories</b>                      080A81 Thread Locker (1)                      081A06 Mounting stud, 1/4-28 to 1/4-28 x .37 in. long, BeCu, no shoulder (1)                      081B20 Mounting Stud, with shoulder (1/4-28 to 1/4-28) (1)                      084B23 Impact cap, convex (for Model 200C20) (1)                      M081A61 Mounting Stud 1/4-28 to M6 X 1 (1)</p>			
Entered: BLS	Engineer: BAM	Sales: RMM	Approved: EB
Date: 02/10/2009	Date: 02/04/2009	Date: 02/09/2009	Date: 02/09/2009
			Spec Number: 5889
 <p><b>PCB PIEZOTRONICS™</b>                      FORCE / TORQUE DIVISION</p> <p>3425 Walden Avenue                      Depew, NY 14043                      UNITED STATES                      Phone: 888-684-0004                      Fax: 716-684-8877                      E-mail: force@pcb.com                      Web site: www-pcb.com</p>			

FIGURE H.1. Les spécifications techniques du capteur de force PCB200C20.



Annexe H : Caractéristiques techniques des instruments employés

	ENGLISH	SI											
<b>Performance</b>													
Channels	1	1											
Voltage Gain ( $\pm 1\%$ )	x1 x10 x100	x1 x10 x100											
High Frequency Response (-5%) (Gain x1)	85 kHz	85 kHz											
High Frequency Response (-5%) (Gain x10)	85 kHz	85 kHz											
High Frequency Response (-5%) (Gain x100)	60 kHz	60 kHz											
Fault/Bias Monitor/Meter (meter)	24 VDC FS	24 VDC FS											
<b>Environmental</b>													
Temperature Range	+30 to +130 °F	-1.1 to +54.4 °C											
<b>Electrical</b>													
AC Power (50-400Hz)	105 to 125 VAC	105 to 125 VAC	[1]										
AC Power	0.25 amps	0.25 amps											
Excitation Voltage (To Sensor)	+24 VDC	+24 VDC											
DC Offset (Maximum)	±30 mV	±30 mV											
Constant Current Excitation (To Sensor)	2 to 20 mA	2 to 20 mA	[2]										
Discharge Time Constant	3 sec	3 sec											
Spectral Noise (1 Hz)	4.3 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-107 dB											
Spectral Noise (10 Hz)	1.3 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-118 dB											
Spectral Noise (100 Hz)	0.37 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-129 dB											
Spectral Noise (1 kHz)	0.16 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-136 dB											
Spectral Noise (10 kHz)	0.12 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-138 dB											
Broadband Electrical Noise (1 to 10000 Hz) (Gain x1)	29 $\mu\text{V}$	-91 dB											
Spectral Noise (1 Hz)	31 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-90 dB											
Spectral Noise (10 Hz)	13 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-98 dB											
Spectral Noise (100 Hz)	3.7 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-109 dB											
Spectral Noise (1 kHz)	1.8 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-115 dB											
Spectral Noise (10 kHz)	0.80 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-122 dB											
Broadband Electrical Noise (1 to 10000 Hz) (Gain x10)	198 $\mu\text{V}$	-74 dB											
Spectral Noise (1 Hz)	274 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-78 dB											
Spectral Noise (10 Hz)	126 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-88 dB											
Spectral Noise (100 Hz)	39 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-96 dB											
Spectral Noise (1 kHz)	15 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-104 dB											
Spectral Noise (10 kHz)	6.6 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$	-113 dB											
Broadband Electrical Noise (1 to 10000 Hz) (Gain x100)	2.2 $\mu\text{V}$	-71 dB											
<b>Physical</b>													
Electrical Connector (Input, sensor)	BNC Jack	BNC Jack											
Electrical Connector (Output)	BNC Jack	BNC Jack											
Size (Height x Width x Depth)	4.3 in x 1.8 in x 6.0 in	109.2 mm x 45.7 mm x 152.4 mm											
Weight	2 lb	907.2 gm											
<b>Notes</b>	<p>Optional Versions (Optional versions have identical specifications and accessories as listed for standard model except where noted below. More than one option maybe used.)</p> <p>[1] Unit set to 230 VAC when ordered as model F482B11.</p> <p>[2] User adjustable, factory set at 4 mA (<math>\pm 0.5</math> mA).</p> <p>Supplied Accessories 017AXX Power Cord (1)</p>												
<table border="1"> <tr> <td>Entered: LLH</td> <td>Engineer: KL</td> <td>Sales: JUM</td> <td>Approved: BAM</td> <td>Spec Number:</td> </tr> <tr> <td>Date: 04/24/2012</td> <td>Date: 04/11/2012</td> <td>Date: 04/13/2012</td> <td>Date: 04/17/2012</td> <td>482-210-80</td> </tr> </table> <p><b>PCB PIEZOTRONICS</b> ELECTRONICS DIVISION</p> <p>3425 Walden Avenue Depew, NY 14043 UNITED STATES Phone: 800-828-8840 Fax: 716-684-0987 E-mail: info@pcb.com Web site: www.pcb.com</p>				Entered: LLH	Engineer: KL	Sales: JUM	Approved: BAM	Spec Number:	Date: 04/24/2012	Date: 04/11/2012	Date: 04/13/2012	Date: 04/17/2012	482-210-80
Entered: LLH	Engineer: KL	Sales: JUM	Approved: BAM	Spec Number:									
Date: 04/24/2012	Date: 04/11/2012	Date: 04/13/2012	Date: 04/17/2012	482-210-80									

FIGURE H.3. Les spécifications techniques de l'alimentation/amplificateur PCB ICP 482 B11.

### Données techniques

Type <sup>1)</sup>		9001A	9011A	9021A	9031A	9041A	9051A	9061A	9071A	
Gamme de mesure	kN	0 ... 7,5	0 ... 15	0 ... 35	0 ... 60	0 ... 90	0 ... 120	0 ... 200	0 ... 400	
Gamme étalonnée	100 %	kN	0 ... 7,5	0 ... 15	0 ... 35	0 ... 60	0 ... 90	0 ... 200	0 ... 400	
	10 %	kN	0 ... 0,75	0 ... 1,5	0 ... 3,5	0 ... 6	0 ... 9	0 ... 12	0 ... 40	
Surcharge	kN	9	18	42	72	108	144	240	480	
Moment de flexion max. $M_{x,y}$ <sup>2)</sup>	N·m	5	15	60	130	240	390	800	2 400	
Rigidité	kN/μm	≈1	≈1,8	≈3,5	≈6	≈7,5	≈9	≈14	≈26	
Capacité	pF	≈8	≈23	≈37	≈54	≈65	≈64	≈148	≈203	
Dimensions										
Diamètre intérieur	d	mm	4,1	6,5	10,5	13	17	21	26,5	40,5
Diamètre extérieur	D	mm	10,3	14,5	22,5	28,5	34,5	40,5	52,5	75,5
Hauteur	H	mm	6,5	8	10	11	12	13	15	17
Poids	g	3	7	20	36	70	80	157	370	

### Données générales

Sensibilité <sup>3)</sup>	pC/N	≈-4,3							
Seuil de réponse	N	≤0,01							
Plage de température d'utilisation	°C	-196 ... 200							
Linéarité typ., précontraint <sup>3)</sup>	%FSO	≤±1 (±0,3)							
Hystérésis typ., précontraint <sup>3)</sup>	%FSO	≤0,5 (0,1)							
Résistance d'isolement	Ω	≥1·10 <sup>14</sup>							
Coefficient de température	%/°C	-0,02							
Fréquence propre	kHz	65	65	65	65	62	55	48	30
Classe de Protection selon EN60529									
avec câble connecté	IP	65							
avec câble type 1983AD... et avec connecteur soudé	IP	67							

<sup>1)</sup>  $F_v$  = précontrainte = 0,5 · plage de mesure;  $F_z = 0$

<sup>2)</sup> ne vaut que pour le capteur sans boulon de précontrainte (voir page 4, montage)

<sup>3)</sup> s'applique au capteur installé avec le kit de montage de type 9422A... ou avec le kit de précontrainte de type 9420A...

<sup>4)</sup> s'applique au capteur installé avec le kit de montage de type 9455/56

<sup>5)</sup> s'applique au capteur non installé (sans précontrainte); la fréquence propre va être réduite par la masse additionnelle due au montage

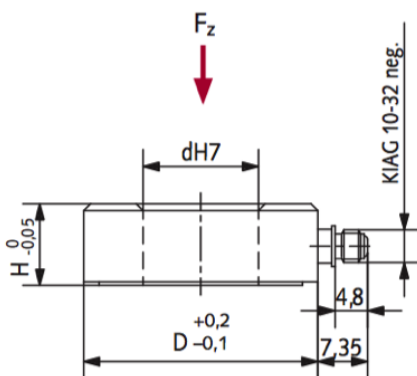


Fig. 1 : Dimensions rondelle de charge, Type 9001A ... 9031A

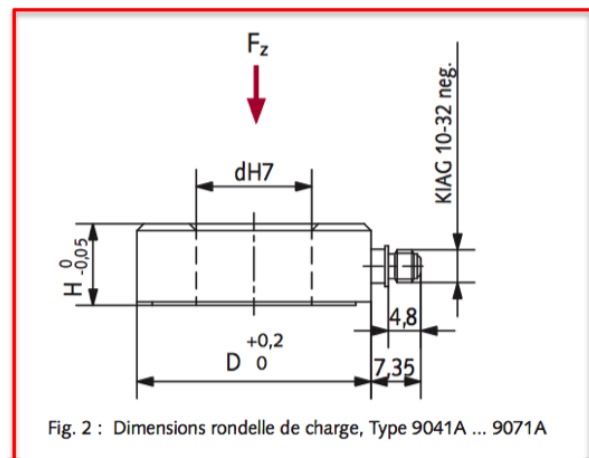


Fig. 2 : Dimensions rondelle de charge, Type 9041A ... 9071A

FIGURE H.4. Les spécifications techniques du capteur de force Kistler 9061a.

**Electronics & Software**



measure. analyze. innovate.

## Piezoresistive Amplifier

Type 4603B...

### All Purpose

The microprocessor-controlled piezoresistive amplifier Type 4603B... is mainly used with pressure sensors of the Types 4043A..., 4045A..., 4073A... and 4075A... for measuring in the range 1 ... 500 bar. The amplifier excites the sensor, conditions the signal and displays directly the measured value. For measuring simultaneously pressure and temperature, the amplifier Type 4618... with a sensor of the Types 4065A... or 4067... is recommended.

- Two sensor power supply selectable
- Scalable voltage output
- Parallel current output
- Low-pass filter
- Interfaces with transmission of measured values

#### Description

All amplifier functions can be set menu-controlled and in dialogue via the 2-line LCD high contrast display by means of 4 keys.

Type of excitation, calibration current (for current-fed sensors), pressure measuring range, sensor sensitivity, zero measurand output, zero displacement, pressure display unit (bar, Pa, psi), low-pass filter, output voltage and output current.

The voltage output can be scaled 1, 2, 5, 10 Volt, e.g., according to the actual sensor measuring range. Moreover, an output with load independent current 0/4 ... 20 mA is available in parallel.



#### Technical Data

##### Sensor Output

Constant current output		
Setting range	mA	1 ... 9,999
Source resistance	MΩ	>20
Load resistance (max.)	kΩ	5,2
Voltage compliance	VDC	>20
Accuracy	%	±0,07
Stability	ppm/a	200
Voltage output		
Voltage (max. current)	VDC (mA)	24 ±10 % (30)
Short circuit proof		yes

##### Amplifier

Input (differential)		
Range	V	±0,1 ... 1
Overload (permanent) max.	V	±15
Input resistance	Ω	>10 <sup>10</sup>
Common mode rejection	dB	>80 (DC ... 100 Hz)
Zero measurand output comp.	mV	±50,0

**FIGURE H.5.** Les spécifications techniques de l'amplificateur de charge Kistler 4603b, partie 1.

### Technical Data (Continuation)

#### Outputs

Voltage output		
Ranges for FS	V	±1/2/5/10
Linearity	%	<0,05
Accuracy (input – output)	%	±0,3
Output resistance	Ω	10
Frequency response (±1 %)		
1 & 2/5 & 10 V FSO	kHz	0 ... 30/0 ... 20
Rise time 10 ... 90 %	μs	<2,5
Hum and noise		
Program/measuring mode	mV	<30/<40
Zero 1 & 2/5 & 10 V FSO	mV	<±2/<±10
Current output		
Range	mA	0/4 ... 20
Linearity	%	±0,1
Accuracy	%	±0,6
Frequency response (±1 %)	kHz	0 ... 20
Rise time (10 ... 90 %)	μs	<2,5
Zero	μA	<±20
Hum and noise	μA	<40
Load resistance (max.)	Ω	500
Low-pass filter (-20 dB/Dec.)		
Cut-off frequencies (-3 dB)	Hz	10 <sup>1</sup> /10 <sup>2</sup> /10 <sup>3</sup> /10 <sup>4</sup>
Zero suppression		
Range	% FS	±110
Accuracy	%	±0,1
Overload indication		
Response level	% FSO	±115
Parameter/reading display		
Type Dot Matrix, 2 lines		LCD, high contrast
Units of reading		bar, psi, Pa
Display range of reading (max.)		4 Dig. + D.P.
Min.-/max. memory		
min. signal duration	ms	>300

#### General Specifications

Operating temperature range	°C	0 ... 50
Line power	V~ (%)	230/115 (-22 ... 15)
(degree of protection 1)	Hz	48 ... 62, ca. 20 VA
ΔV max. protection line/ground	V~	<50
Connections		
Sensor		Fischer D103 A054-6 for Type 1571 connector, PHÖNIX – 5 pole plug-in screw terminal
Voltage output		BNC neg.
Current output		banana-plug socket ø4 mm
Dimensions		
DIN 41494 part 5	TFxHF mm	14x3 70,9x128,7
Desk-top housing	mm	95x150x195
Weight		
with housing	kg	2,070
Interface Type 5605A...		
Type 5611A...	kg	+0,115

Conformity to EC Directive: EMC Emission EN 50081-1;  
EMC Immunity EN 50082-1.

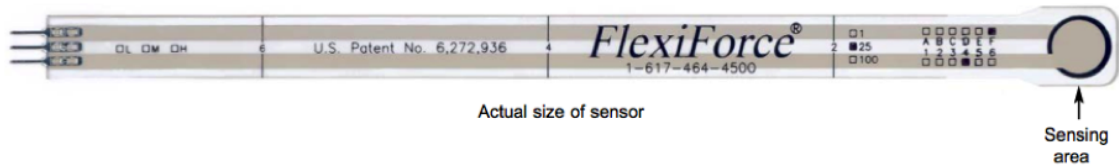
Safety requirements: EN 61010-1.

1) M.U. = Mechanical Unit (e.g. bar, N, g)

FIGURE H.6. Les spécifications techniques de l'amplificateur de charge Kistler 4603b, partie 2.



## Annexe H : Caractéristiques techniques des instruments employés



### Physical Properties

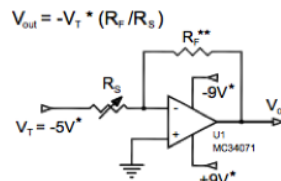
Thickness	0.008" (0.208 mm)
Length	7.75" (197 mm), <i>optional trimmed lengths: 6" (152 mm), 4" (102 mm), or 2" (51mm)</i>
Width	0.55" (14 mm)
Sensing Area	0.375" diameter (9.53 mm)
Connector	3-pin Male Square Pin (center pin is inactive)
Substrate	Polyester (ex: Mylar)

### Standard Force Ranges (as tested with circuit shown below)

0 - 1 lb. (4.4 N)  
0 - 25 lb. (110 N)  
0 - 100 lb. (440 N)\*

In order to measure forces above 100 lb (up to 1000 lb), apply a lower drive voltage and reduce the resistance of the feedback resistor (1kΩ min.)

### Recommended Circuit



- \* Supply Voltages should be constant
- \*\* Reference Resistance  $R_F$  is 1kΩ to 100kΩ
- Sensor Resistance  $R_S$  at no load is > 5MΩ
- Max recommended current: 2.5 mA

### Typical Performance

Linearity (Error)	< ±5%
Repeatability	< ±2.5% of full scale
Hysteresis	< 4.5 % of full scale
Drift	< 3% per logarithmic time scale
Response Time	< 5 μsec

Operating Temperature 15°F - 140°F (-9°C - 60°C)\*

*Ask about our High Temperature force sensor (model HT201)*

\*Force reading change per degree of temperature change = ±0.2%/°F (0.36%/°C)

\*For loads less than 10 lbs., the operating temperature can be increased to 165°F (74°C)

### Evaluation Conditions

Line drawn from 0 to 50% load  
Conditioned sensor, 80% of full force applied  
Conditioned sensor, 80% of full force applied  
Constant load of 25 lb (111 N)  
Impact load, output recorded on oscilloscope  
*Time required for the sensor to respond to an input force*

Tekscan, Inc. 307 West First Street South Boston, MA 02127-1309 USA tel: 617.464.4500/800.248.3669 fax: 617.464.4266  
e-mail: marketing@tekscan.com URL: www.tekscan.com

Rev C\_122104



FIGURE H.7. Les spécifications techniques du capteur de force FlexiForce.

# S Series Multifunction DAQ 12 or 16-Bit, 1 to 10 MS/s, 4 Analog Inputs

## Specifications

These specifications are typical for 25 °C unless otherwise noted.

### Analog Input

#### Input Characteristics

Number of channels	
NI 6110, NI 6115, NI 6120	4 pseudodifferential
NI 6111	2 pseudodifferential
ADC resolution	
NI 6110, NI 6111, NI 6115	12 bits, 1 in 4,096
NI 6120	16 bits, 1 in 65,536
ADC pipeline	
NI-6110, NI 6111	3
NI 6115	4
NI 6120	0
Maximum sampling rate	
NI 6110, NI 6111	5 MS/s
NI 6115	10 MS/s
NI 6120	1 MS/s <sup>1</sup>
Minimum sampling rate	
NI 6110, NI 6111	1 kS/s
NI 6115	20 kS/s
NI 6120	No minimum
Input signal ranges (selectable by channel)	+42, ±20, ±10, ±5, ±2, ±1, ±0.5, ±0.2 V
Input coupling	AC or DC
Max working voltage for all analog input channels	
Overvoltage protection (ACH+, ACH-)	+42 V
Input FIFO buffer	
NI 6110, NI 6111	8,192 samples
NI 6115, NI 6120	16 Msamples or 32 Msamples
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Analog filter type	
NI 6115	3-pole Bessel
NI 6120	5-pole Bessel
Analog filter frequency (-3 dB)	
NI 6115	50 and 500 kHz
NI 6120	100 kHz

<sup>1</sup>800 kS/s with NI-DAQmx, 1 MS/s with additional download. Special conditions apply.

### Analog Output

#### Output Characteristics

Number of channels	2 voltage
Resolution	
NI 6110, NI 6111, NI 6120	16 bits, 1 in 65,536
NI 6115	12 bits, 1 in 4,096
Max update rate	
1 channel	4 MS/s
2 channel	2.5 MS/s
Output FIFO buffer size	
NI 6110, NI 6111	2,048 samples
NI 6115, NI 6120	16 or 32 Msamples
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O

#### Voltage Output

Ranges	±10 V
Output coupling	DC

#### Digital I/O

Number of channels	8 input/output
Compatibility	TTL/CMOS
Power-on state	Input (high-impedance)
Data transfers	
NI 6110, NI 6111	Programmed I/O
NI 6115, NI 6120	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Transfer rate	
NI 6115, NI 6120	10 Mbytes/s
Input buffer size	
NI 6115, NI 6120	2,048 bytes
Output buffer size	
NI 6115, NI 6120	2,048 bytes

### Timing I/O

Number of channels	
Up/down counter/timers	2
Frequency scaler	1
Resolution	
Up/down counter/timers	24 bits
Frequency scaler	4 bits
Compatibility	TTL/CMOS
Base clocks available	
Up/down counter/timers	20 MHz, 100 kHz
Frequency scaler	10 MHz, 100 kHz
Base clock accuracy	±0.01%
Maximum source frequency	
Up/down counter/timers	20 MHz
Minimum source pulse duration	10 ns, edge-detect mode
Minimum gate pulse duration	10 ns, edge-detect mode
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O

### Triggers

#### Analog Trigger

Purpose	
Analog input	Start and stop trigger, gate, clock
Analog output	Start trigger, gate, clock
General-purpose counter/timers	Source, gate
Source	All analog input channels, PFIQ/TRIG1
Level	
Internal source, ACH<0..3>	±Full-scale
External source, PFIQ/TRIG1	±10 V
Slope	Positive or negative; software-selectable
Resolution	
NI 6110, NI 6111, NI 6115	8 bits, 1 in 256
NI 6120	12 bits, 1 in 4,096
Hysteresis	Programmable
Bandwidth (-3 dB)	
Internal source, ACH<0..3>	5 MHz
External source, PFIQ/TRIG1	5 MHz

#### Digital Trigger

Purpose	
Analog input	Start and stop trigger, gate, clock
Analog output	Start trigger, gate, clock
General-purpose counter/timers	Source, gate
External Sources	PFI<0..9>, RTSI<0..6>
Compatibility	5 V/TTL
Response	Rising or falling edge
Pulse width	10 ns minimum

#### PXI Trigger Bus (PXI only)

Trigger lines	7
---------------	---

#### RTSI Bus (PCI only)

Trigger lines	7
---------------	---

### Bus Interface

PXI or PCI	Master, slave
------------	---------------

### Physical

Dimensions (not including connectors)	
PCI	31.2 by 10.6 cm (12.3 by 4.2 in.)
PXI	16 by 10 cm (6.3 by 3.9 in.)
I/O connector	68-pin male SCSI II type

FIGURE H.8. Les spécifications techniques du dispositif d'acquisition de données NI PCI6110.



## Annexe H : Caractéristiques techniques des instruments employés

Specifications: Partial Frame Rate / Recording Duration Table									
FRAME RATE (fps)	MAXIMUM RESOLUTION		MAXIMUM SHUTTER SPEED	RECORD DURATION (12-BIT)					
	Horizontal	Vertical		TIME (Sec.)			FRAMES		
				8GB	16GB	32GB	8GB	16GB	32GB
1,000	1,024	1,024	1 μs 1/1,000,000 sec	5.46	10.92	21.84	5,457	10,918	21,841
2,000	1,024	1,024		2.73	5.46	10.92	5,457	10,918	21,841
4,000	1,024	1,024		1.36	2.73	5.46	5,457	10,918	21,841
5,000	1,024	1,024		1.09	2.18	4.37	5,457	10,918	21,841
7,000	1,024	1,024		0.78	1.56	3.12	5,457	10,918	21,841
7,500	1,024	1,000		0.75	1.49	2.98	5,588	11,180	22,365
9,300	1,024	800		0.75	1.50	3.01	6,985	13,975	27,956
10,000	1,024	744		0.75	1.50	3.01	7,511	15,027	30,061
15,000	960	528		0.75	1.51	3.01	11,289	22,587	45,182
20,000	832	448		0.77	1.54	3.07	15,352	30,716	61,443
30,000	768	320		0.78	1.55	3.11	23,284	46,586	93,189
50,000	512	272		0.82	1.64	3.29	41,090	82,211	164,452
75,000	320	264		0.90	1.81	3.61	67,737	135,523	271,097
100,000	320	192		0.93	1.86	3.73	93,138	186,345	372,758
150,000	256	144		1.03	2.07	4.14	155,230	310,575	621,264
300,000	256	64		1.16	2.33	4.66	349,269	698,794	1,397,845
420,000	128	64		1.66	3.33	6.66	698,538	1,397,589	2,795,690
525,000	128	48		1.77	3.55	7.10	931,384	1,863,452	3,727,587
775,000	128	24		2.40	4.81	9.62	1,862,769	3,726,904	7,455,175
930,000	128	16		369 ns	3.00	6.01	12.02	2,794,154	5,590,357
1,000,000	64	16	1/2,712,000 sec	5.59	11.18	22.37	5,588,309	11,180,714	22,365,525

OPTION SUBJECT TO EXPORT LICENSE CONTROL RESTRICTIONS WHERE APPLICABLE

<b>Sensor</b>	12-bit ADC (Bayer system color, single sensor) with 20 μm pixel	<b>Event Markers</b>	Ten user entered event markers mark specific events within the image sequence in real time. Immediately accessible through software
<b>Shutter</b>	Global electronic shutter from 16.7ms to 1 μs independent of frame rate	<b>Dual Speed Recording</b>	Enables the recording speed to be changed up or down by a factor of 2, 4 or 8 during a recording
<b>Lens Mount</b>	Interchangeable F-mount and C-mount using supplied adapters	<b>Trigger Modes</b>	Start, End, Center, Manual, Random, Random Reset, Random Center, Random Manual and Duals Speed Recording
<b>Extended Dynamic Range</b>	Selectable in twenty steps (0 to 95% in 5% increments) to prevent pixel over-exposure	<b>Saved Image Formats</b>	JPEG, AVI, TIFF, BMP, RAW, PNG, MOV and FTIF. Images can be saved with or without image or comment data
<b>Memory</b>	8GB (standard: 5,457 frames @ maximum resolution) 16GB (option: 10,913 frames @ maximum resolution) 32GB (option: 21,841 frames @ maximum resolution)	<b>Data Display</b>	Frame Rate, Shutter Speed, Trigger Mode, Date or Time, Status (Playback/Record), Real Time, Frame Count and Resolution
<b>Video Output 1</b>	NTSC/PAL composite VBS (BNC). Ability to zoom, pan and tilt within image via keypad. Live video during recording	<b>Partitioning</b>	Up to 64 memory segments for multiple recording in memory
<b>Video Output 2</b>	HD-SDI: HD-SDI 2 channel (BNC) digital output	<b>Data Acquisition</b>	Supports Photron MCDL and DAQ
<b>Camera Control</b>	Through optional keypad with integrated viewfinder and Gigabit Ethernet or RS-422	<b>Cooling</b>	Actively cooled
<b>User Preset Switches</b>	Four user selectable camera function controls mounted on the camera's rear panel	<b>Operating Temperature</b>	0 - 40 degrees C (32 - 104 degree F)
<b>Low Light Mode</b>	Low light mode drops the frame rate and shutter time to their maximum values, while maintaining other set parameters, to enable users to position and focus the camera	<b>Mounting</b>	1 x 1/4 - 20 UNC, 1 x 3/8 - 16 UNC, 6 x M6
<b>Triggering</b>	Selectable positive or negative TTL 5Vp-p or switch closure	<b>Dimensions</b>	165mm (6.50")H×153mm (6.02")W×242.5mm (9.55")D *excluding protrusions
<b>Trigger Delay</b>	Programmable delay on selected input and output triggers, 100ns resolution	<b>Weight</b>	6.2 kg (13.67 lbs)
<b>Timing</b>	Internal clock or external source	<b>Power Requirements</b>	100V - 240V AC ~ 1.5A, 50-60Hz DC operation 18 - 36 V DC, 100VA
<b>Phase Lock</b>	Enables cameras to be synchronized precisely together to a master camera or external source, such as IRIG/GPS time codes		

FIGURE H.9. Les spécifications techniques de la caméra haute-vitesse Photron SA5.

SPECIFICATIONS								
Frame Rate (fps)	Max. Resolution		Record Time (seconds)			Record Time (frames)		
	Horizontal	Vertical	2GB	8GB	16GB	2GB	8GB	16GB
60	1,024	1,024	34.1	102.4	204.8	2,048	6,144	12,288
125	1,024	1,024	16.4	49.2	98.3	2,048	6,144	12,288
250	1,024	1,024	8.2	24.6	49.2	2,048	6,144	12,288
500	1,024	1,024	4.1	12.3	24.6	2,048	6,144	12,288
1,000	1,024	1,024	2.0	6.1	12.3	2,048	6,144	12,288
2,000	1,024	1,024	1.0	3.1	6.1	2,048	6,144	12,288
3,000	1,024	1,024	0.7	2.0	4.1	2,048	6,144	12,288
5,000	768	768	0.7	2.2	4.4	3,641	10,923	21,845
9,000	640	480	0.8	2.3	4.7	6,991	20,972	41,943
10,000	512	512	0.8	2.5	4.9	8,192	24,576	49,152
10,000	512	528	0.8	2.4	4.8	7,944	23,831	47,663
15,000	384	384	1.0	2.9	5.8	14,564	43,691	87,381
30,000	256	256	1.1	3.3	6.6	32,768	98,304	196,608
50,000	256	144	1.2	3.5	7.0	58,254	174,763	349,525
70,000	128	128	1.9	5.6	11.2	131,072	393,216	786,432
100,000	384	48	1.2	3.5	7.0	116,508	349,525	699,051
150,000	128	48	2.3	7.0	14.0	349,525	1,048,576	2,097,152
210,000	256	16	2.5	7.5	15.0	524,288	1,572,864	3,145,728
250,000	128	16	4.2	12.6	25.2	1,048,576	3,145,728	6,291,456

<b>Sensor</b>	10-bit CMOS (Bayer system color, single sensor) with 17µm pixels, 16.7ms to 2µs global electronic shutter independent of frame rate and overexposure protection
<b>Saved Image Formats</b>	AVI, JPEG, PNG (10-bit), TIFF, FTIF (10-bit), BMP, and Bayer and RS-170 Video output. Images can be saved with or without image or comment data
<b>Extended Dynamic Range</b>	Selectable from 4 presets to prevent over exposure
<b>Phase Lock</b>	Enables cameras to be synchronized precisely together to a master camera or external source
<b>Triggering</b>	Selectable positive or negative TTL 5Vp-p, switch closure
<b>Lens Mount</b>	Interchangeable F-mount and C-mount supplied standard. Optional High-G block mount
<b>Data Display</b>	Frame Rate, Shutter Speed, Trigger Mode, Date or Time (can be switched), Status (Playback/Record), Real Time, Frame Count, Resolution System or IRIG time, and user-edited comments can be displayed beside or in the saved image area for all formats
<b>Video Output</b>	NTSC or PAL Live video during recording. Ability to zoom and pan within image via keypad
<b>Dual Speed Recording™</b>	Enables the recording speed to be changed, up or down, by a factor of 2, 4 or 8 during a recording
<b>Timing</b>	Internal clock or external source such as IRIG or GPS. Indicators show current status of timing source
<b>Event Markers</b>	Ten user-entered event markers mark specific events within the image sequence in real time. Immediately accessible through software
<b>Recording Modes</b>	Start, End, Center, Manual, Random, Random Reset, Random Center, Random Manual, and Dual Speed Recording™
<b>Partitioning</b>	Up to 64 memory segments for multiple recordings in memory
<b>Camera Control</b>	Through supplied keypad and RS-422A. And either via the Photron Gigabit Optical Network, Gigabit Ethernet or FireWire
<b>Software</b>	Includes image rotation and ability to save images with or without time codes or comment data
<b>Shock</b>	100G @ 10ms any axis
<b>Dimensions</b> (no lens mount)	H 6.24" (158.6mm) (add 2.13" [54mm for handle and feet] x W 5.17" (131.4mm) x L 11.39" (289.2mm)
<b>Weight</b>	10.8lb (4.9kg)

FIGURE H.10. *Les spécifications techniques de la caméra haute-vitesse Photron Ultima APX.*

<b>Technical data</b>		<b>Model</b>
		<b>LS 11</b>
Measurement basis	500 mm, 1000 mm or on request	
Velocity	10 - 1000 m/s	
Measurement error	± 3.0 ‰	
Caliber	4 - 9 mm	
<b>Electrical</b>		
Supply voltage	15 - 24 V DC	
Power consumption	220 mA	
<b>Environmental conditions</b>		
Operating temperature	-10 to +50 °C	
Air humidity	≤ 80%, non-condensing	
<b>Dimensions, active</b>		
Width	50 - 500 mm	
Height	665 mm	
<b>Dimensions, light</b>		
Width	655 mm	
Height	665 mm	
<b>Dimensions, overall</b>		
Width	685 mm	
Height	840 mm	
Weight	approx. 18 kg	
<b>Accessories</b>		
Intelligent Measuring System	IMS 8500	

**FIGURE H.11.** *Les spécifications techniques de la base de mesure optique Drello LS1.*

# Annexe I

## Deux logiciels développés pour l'étude

### 1 Le logiciel de traitement de la mesure de force

Ce logiciel est employé en parallèle avec un logiciel d'acquisition de données. Celui-ci est une version modifiée d'un logiciel d'acquisition disponible dans la librairie de LabVIEW, qui correspond à l'acquisition de mesure à l'aide des cartes d'acquisitions disponibles au département ABAL. On retrouve sur la figure I.1 un aperçu de l'interface de ce logiciel d'acquisition. On retrouve toute une série de paramètres à définir.

- Les *DAQ parameters*, qui regroupent l'ensemble des paramètres à définir pour l'acquisition. En particulier, on s'intéresse au *scan rate*, qui définit la fréquence d'acquisition, et le *number of scan to acquire*. Le rapport *number of scan to acquire/scan rate* définit la durée de l'acquisition en secondes, et devra être compatible avec le phénomène à observer. On définit également quel capteur est connecté à quel canal. Les informations du capteur comme son facteur de calibration sont reprises dans le logiciel également.
- Les *Trigger parameters* qui permettent de donner le signalement du trigger
- *amplifier information* qui permet de donner les informations liées à l'amplificateur employé et les valeurs réglées sur celui-ci.
- *PROCESSING control*, qui permet directement de traiter le signal à l'issue de l'acquisition. Le traitement sera décrit par la suite

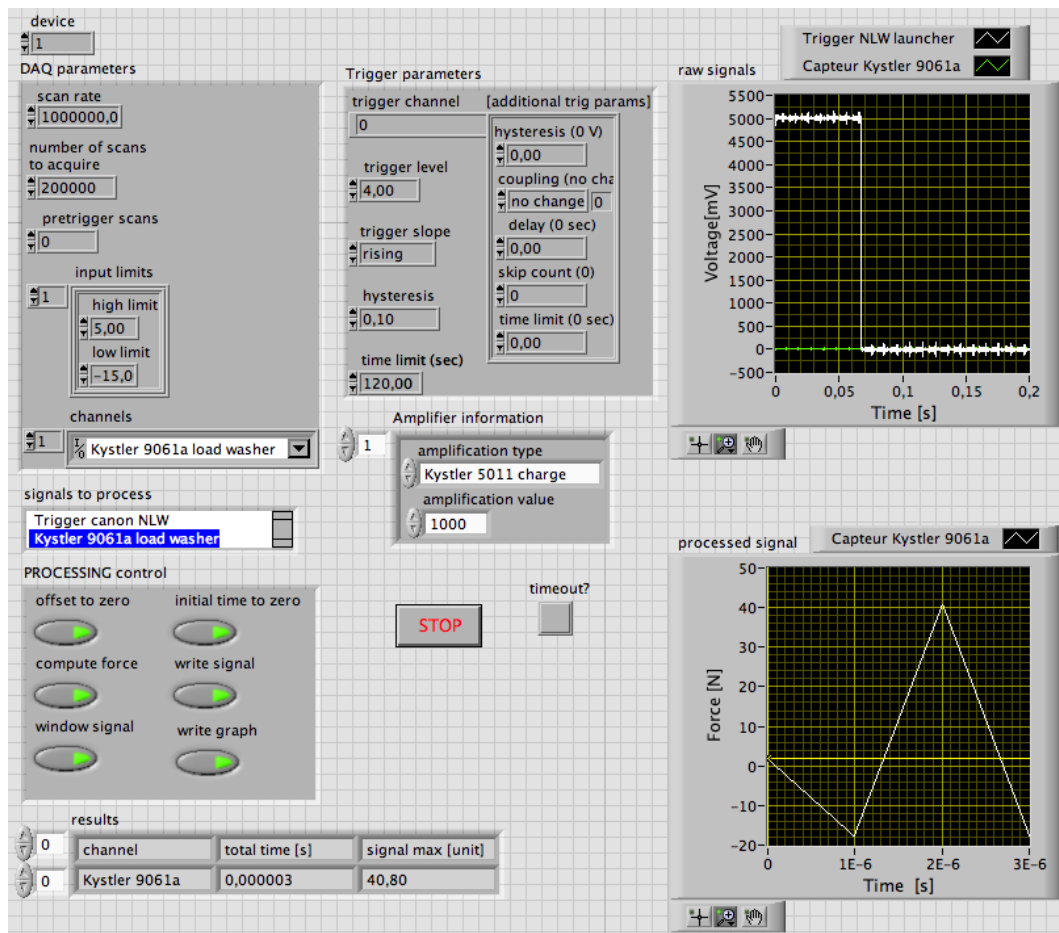


FIGURE I.1. L'interface du logiciel d'acquisition.

---

En terme de résultats, on observe le graphe des données acquises brutes (*raw signal*), le graphe des données traitées (*processed signal*), et quelques valeurs particulières du résultat (*results*).

Le principe de cette version altérée de l'acquisition est de sauvegarder pour chaque acquisition enregistrée un fichier lié, appelé METADATA, qui reprend l'ensemble des paramètres définis lors de l'acquisition, ainsi que quelques informations supplémentaires comme la date du tir. Ces informations seront employées pour le traitement du signal, et permettent de garder une trace des paramètres employés.

Le traitement de données se présente comme suit (figure I.2) :

- *I/O parameters* permet de définir comment charger les fichiers à traiter, et quels résultats exporter à quels emplacements
- *processing control* et *processing parameters* permet de définir quel traitement effectuer. Quatre opérations sont possibles : *offset to zero*, *compute force*, *window signal*, et *initial time to zero*. Ces étapes sont décrites par la suite. Les paramètres *write signals* et *write graph* permettent d'écrire ou non les résultats.
- Les figures présentent les résultats du fichier en cours de traitement, et l'ensemble des courbes traitées.
- *Start reprocessing* et *choose file to reprocess* permettent de retraiter des fichiers manuellement, si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisant.

les quatre opérations de traitement sont les suivantes :

- *offset to zero* permet de rétablir un éventuel décalage du signal à une valeur nulle. Concrètement, il arrive que le signal avant impact ne soit pas nul, alors qu'aucune force n'est appliquée sur le capteur. Ce décalage n'est donc pas lié à la mesure mais provient d'une perturbation extérieure. On peut facilement le traiter. Le principe est de ramener le signal initial à zéro en regardant la valeur moyenne du signal sur un intervalle défini, qui doit correspondre à un morceau du signal avant impact. La valeur du signal est alors moyennée sur cet intervalle, et l'on retire à l'ensemble du signal cette valeur moyenne, ce qui corrige bien le décalage. La longueur de l'intervalle est définie par le paramètre *length of offset*. On prend bien un intervalle et pas une valeur unique du signal de manière à également tenir compte du bruit du signal. En effet, le signal avant impact est non seulement décalé, mais oscille également faiblement autour de sa valeur constante non nulle. Cette perturbation est due à la présence de bruit dans le signal.
- *computs force* transforme le graphe *raw signal [mV]* en fonction du temps en un graphe *force [N]* en fonction du temps. Pour ce faire, le logiciel emploie les paramètres définis dans le fichier METADATA qui correspondent au facteur de calibration du capteur et aux paramètres d'amplifications. Le programme effectue simplement une multiplication de l'ensemble du signal par ces valeurs.
- *window signal* est certainement l'opération la plus compliquée. Il s'agit de l'algorithme de fenêtrage du signal. Son objectif est de retirer du signal la partie qui correspond au signal avant l'impact, et celle qui correspond au signal après l'impact. Le traitement de données est illustré sur la figure I.3 avec les opérations annotées en vert de plus en plus foncé selon l'ordre chronologique.
  - Le maximum du signal est recherché. Selon toute logique, ce maximum aura lieu pendant l'impact, à moins d'une erreur de mesure.
  - L'algorithme recherche de part et d'autre une valeur du signal proche de zéro, correspondant à une fraction du maximum (ici 10 %), et mesure de part et d'autre du maximum les différences de temps  $\Delta t$  entre le temps correspondant au maximum et le temps correspondant à ces valeurs. Cette fraction est définie par le paramètre *signal threshold window signal*.
  - Ces  $\Delta t$  de part et d'autre sont multipliées par une valeur définie par *Time multiplier window signal*. Ces nouveaux seuils correspondent respectivement aux valeurs de temps définissant le début et la fin du fenêtrage.

De cette manière, on évite autant que possible de trouver un minimum local comme valeur de fenêtrage, dans le cas où le signal oscille autour d'une valeur faible. Cet algorithme a prouvé sa valeur à de nombreuses reprises, à condition de bien définir ses paramètres. Un fenêtrage manuel reste toujours possible.

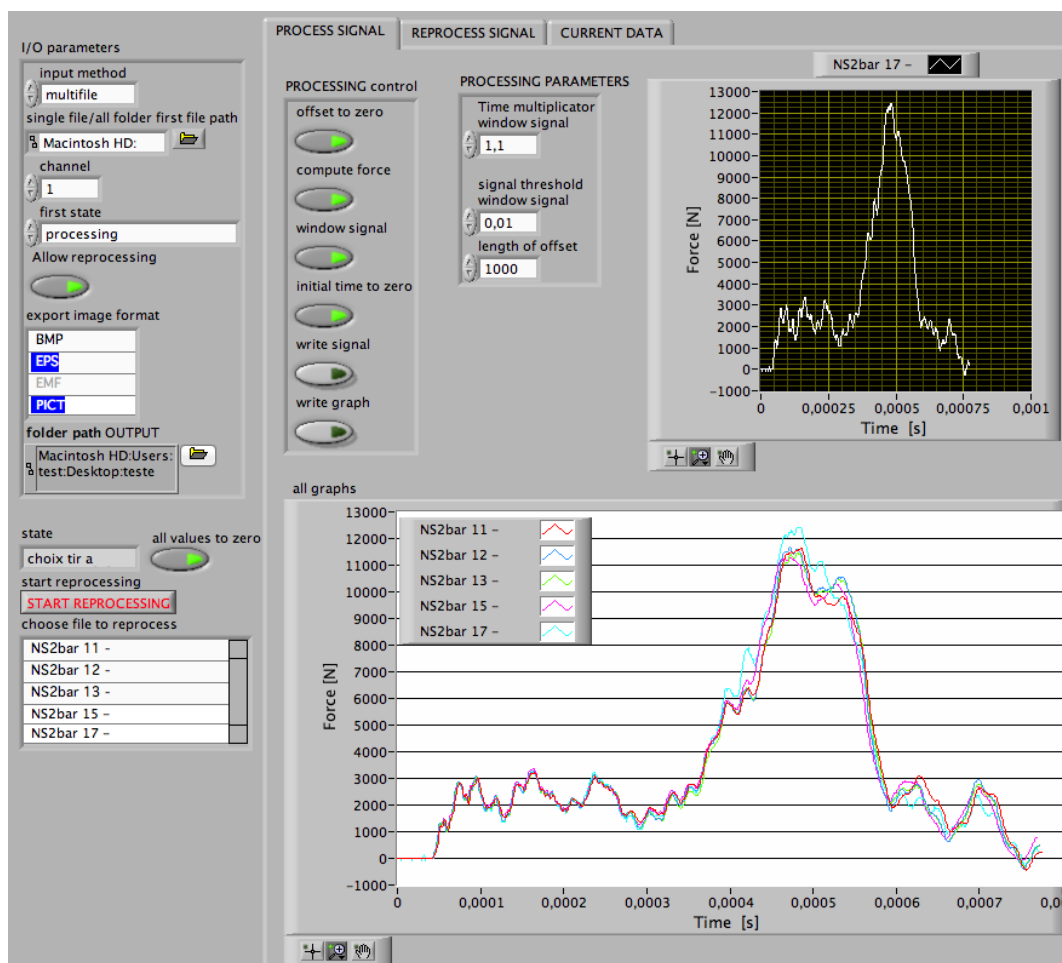


FIGURE I.2. L'interface du logiciel de traitement de données.



- Enfin, *Initial time to zero* permet de décaler le signal dans le temps, de manière à ce que la valeur du temps au début du signal corresponde à zéro.

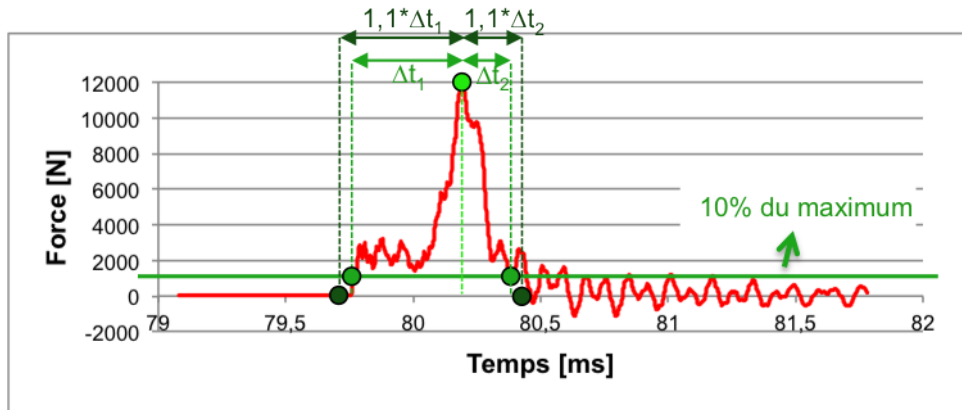
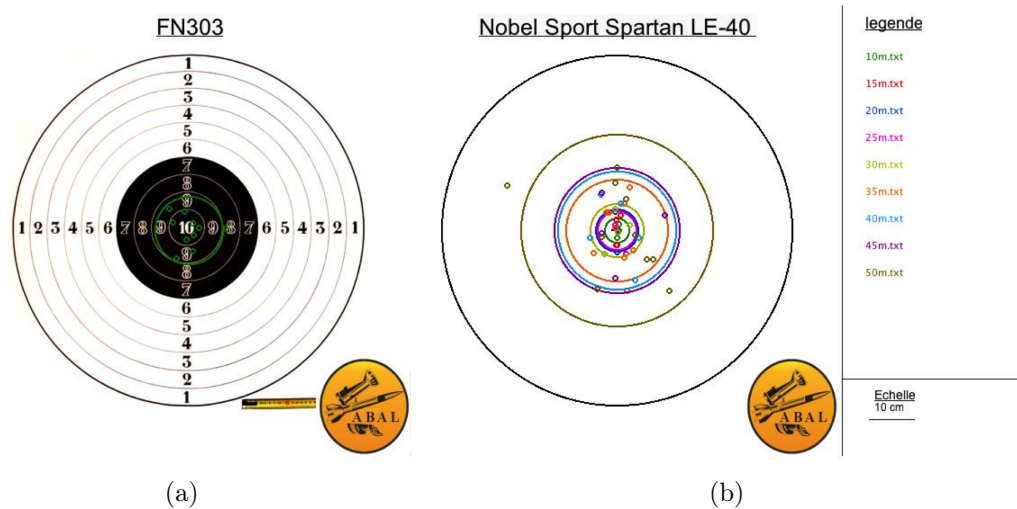


FIGURE I.3. L'algorithme de fenêtrage du signal.

## 2 Le logiciel des calculs de dispersion

L'objectif de ce logiciel est de pouvoir comparer des résultats de tirs de dispersion de système d'armes. Ce logiciel est alimenté par des fichiers composés des coordonnées géométriques d'impacts, mesurés expérimentalement lors d'une session de tir. Le programme permet de visualiser ces impacts sur une feuille de tir virtuel, de comparer visuellement une série de tirs à une autre, d'ajouter des informations comme les distances de tirs ou les lanceurs, et d'exporter cette image. On retrouve sur la figure I.4 un exemple des images générées par ce logiciel. Il permet rapidement de comparer un système d'arme à un autre en terme de dispersion, grâce notamment à l'affichage du cercle caractérisé par le  $R_{90}$  voir section 7.4.2.

L'ensemble des résultats statistiques, dont les valeurs de  $R_{90}$ , peuvent également être exportées.



**FIGURE I.4.** Exemple d'images exportées par le logiciel de calcul de dispersion d'impact. Les  $R_{90}$  (voir section 7.4.2) y sont représentés. (a) les résultats de dispersion du FN303, pour des tirs à une distance de 20 m. (b) Une comparaison des résultats de dispersion du Nobel Sport Spartan LE 40 (NS), à différentes distances.



# Annexe J

## Publications réalisées dans le cadre de ce doctorat

### Auteur principal

#### Chapitre d'un livre

- C. Robbe, E. Lemaire, A. Papy, and V. Esters. *Traité de médecine légale*, Chapitre "Armes non-létales". Deboek, 2011.

#### Conference proceedings and presentation

- C. Robbe, A. Papy, and N. Nsiampa. Dynamic calibration of flexiforce sensors for ballistic measurements. In *Recent Advances in Textile Composites*, 2010.
- C. Robbe, A. Papy, and N. Nsiampa. Measurement of the force occuring at the impact of a non-lethal projectile with the flexiforce sensor. In *6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings*, 2011.
- C. Robbe, A. Papy, and N. Nsiampa. Impact measurements of different 40mm non-lethal sponge grenades. In *Ballistics 2011 : 26th International Symposium*, 2011.
- C. Robbe, N. Nsiampa, A. Papy, and A. Oukara. Practical considerations for using high-speed camera to measure dynamic deformation occurring at the impact of a kinetic energy non-lethal weapon projectile on ballistic simulant. In *Pass conference proceedings, Nuremberg*, 2012.

- C. Robbe, A. Papy, N. Nsiampa, and A. Oukara. Development of a tracking software for assessing the impacts of kinetic energy non-lethal weapon projectiles. Aeroballistic Range Association ARA 2012 conference, oral presentation, 2012.
- C. Robbe, A. Papy, N. Nsiampa, and A. Oukara. An hybrid experimental/numerical method to assess the lethality of a kinetic energy non-lethal weapon system. Article awarded by the Student Award. In Ballistics 2013 : 27th International Symposium, 2013.
- C. Robbe, A. Papy, N. Nsiampa, A. Oukara and B Paps .A complete injury assessment of FN303 and FN303p impacts. To be published In 7th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2013 proceedings, 2013.

## Auteur secondaire

### Conference proceedings and presentation

- Nestor Nsiampa, C Robbe, A Papy. Numerical investigation of impact of non lethal kinetic projectiles onto human thorax. In regional ANSYS User Group, 2010.
- N. Nsiampa, C. Robbe, and A. Papy. Numerical investigation of impact of non lethal kinetic projectiles onto human thorax. 6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings, 2011.
- A. Papy, C. Robbe, and N. Nsiampa. A pragmatic approach to quantify the effects of KENLW. 6th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2011 proceedings, 2011.
- Nestor Nsiampa, Cyril Robbe, Amar Oukara, Alexandre Papy. Numerical simulation of 40mm sponge grenade on rigid wall for injury assessment. In Ansys Regional Conference 2011.
- N. Nsiampa, C. Robbe, and A. Papy. Numerical simulation of non lethal projectiles on human thorax. Ballistics 2011 : 26th International Symposium, 2011.
- A. Papy, C. Robbe, and N. Nsiampa. Standardization of skin penetration assessment for non-lethal impact projectiles. Ballistics 2011 : 26th International Symposium, 2011.

- 
- Nestor Nsiampa, Cyril Robbe, Alexandre Papy Development of a thorax finite element model for thoracic injury assessment. In 8th European LS-DYNA Users Conference, 2011.
  - Alexandre Papy, Cyril Robbe, Nestor Nsiampa, Amar Oukara, Julien Goffin. Definition of a standardized skin penetration surrogate for blunt impacts. In IRCOBI Conference 2012.
  - N. Nsiampa, C. Robbe, A. Oukara, A. Papy. Comparison of less lethal 40mm sponge projectile and the 37 mm projectile for injury assessment on human thorax . In 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loadings, 2012.
  - N. Nsiampa, C. Robbe, A. Oukara, A. Papy Investigation of non-lethal projectile injury on thorax using laboratory test data. Aeroballistic Range Association ARA 2012 conference, oral presentation, 2012.
  - A. Oukara, A. Papy, N. Nsiampa, and C. Robbe. Experimental study of kinetic energy non-lethal projectiles impacts. Aeroballistic Range Association ARA 2012 conference, oral presentation, 2012.
  - N. Nsiampa, C. Robbe, A. Oukara, and A. Papy. Sensibility study of viscous criterion for kinetic energy non lethal projectile thoracic impacts. In International Symposium of Ballistics 2013 proceedings, 2013.
  - A. Papy, C. Robbe, N. Nsiampa, and A. Oukara. Enhancement of a skin penetration surrogate for non-lethal kinetic impacts. In International Symposium of Ballistics 2013 proceedings, 2013.
  - A. Oukara, A. Papy, C. Robbe, and N. Nsiampa. Comparison of the lethality of different kinetic energy non-lethal projectiles using a new french assessment approach for head impacts. In International Symposium of Ballistics 2013 proceedings, 2013.
  - A. Papy, C. Robbe, N. Nsiampa, and A. Oukara. Towards a standardization in the assessment of non-lethal weapons effects within NATO. To be published In 7th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2013 proceedings, 2013.
  - A. Oukara, N.Nsiampa, C. Robbe and A. Papy. Assessment of kinetic energy non-lethal projectiles impacts using a validated finite element head model. To be published In 7th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2013 proceedings, 2013.

- N.Nsiampa, C.Robbe, A. Papy, and A. Oukara. Comparison of thoracic injury criteria for non-lethal impacts using numerical simulations. To be published In 7th European Symposium on Non-Lethal Weapons 2013 proceedings, 2013.

## Travaux de fin d'études et stages réalisés dans le cadre de la létalité réduite, ayant contribué à cette thèse

V. De Briey. Impacts des projectiles non létaux, disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude à l'Ecole Royale Militaire, Promoteur : A. Papy, deuxième lecteur : C. Robbe 2009.

G. Jacobs. Etude de la pénétration dans le cadre de la létalité réduite. disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude à l'Ecole Royale Militaire, Promoteur : A. Papy, deuxième lecteur : C. Robbe 2011.

Y Vets. De analyse van de FN303 voor gebruik binnen de Belgische Defensie door middel van een Monte-Carlo simulatie. disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude à l'Ecole Royale Militaire, Promoteur : A. Papy, deuxième lecteur : C. Robbe 2011.

J. Cauwenberghe. Development of an évaluation process for non lethal weapons, disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude en cotutelle : Ecole Royale Militaire et Katholieke Hogeschool Sint-Lieven. Promoteurs : A. Papy, C. Robbe, I. Van de Voorde, B. De Man, 2011

A. El Ouhahabi. Etude métrologique de la prise de vue haute vitesse dans le domaine des impacts de projectiles non létaux, disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude en cotutelle : Ecole Royale Militaire et Institut de promotion sociale de la communauté Française - Uccle. Promoteurs : M. Decoster, A. Guiri, A. Papy, encadrement : C. Robbe 2011.

C. Thilemans. Studie van de Candle Gel in het domein van de niet-letale wapens. disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude à l'Ecole Royale Militaire, Promoteur : A. Papy, deuxième lecteur : C. Robbe 2012.

J. Goffin. Contribution à la standardisation du test de pénétration de la peau dans le cadre de la létalité réduite. disponible chez l'auteur de cette thèse. Travail de fin d'étude à l'Ecole Royale Militaire, Promoteur : A. Papy, deuxième lecteur : C. Robbe 2012.

---

V. Martin, Comparaison de la létalité de différents projectiles non létaux grâce à des tirs sur simulant, disponible chez l'auteur de cette thèse. Stage de deux mois à l'Ecole Royale Militaire d'un élève officier de l'Ecole de L'air - Salon de Provence - France. Promoteur : A. Papy. encadrement : C. Robbe, A. Oukara, 2012

M Van Essen, Bijdrage aan de studie huidpenetratie van kinetische niet-letale projectielen, disponible chez l'auteur de cette thèse. Stage de deux mois à l'Ecole Royale Militaire d'un élève officier de la Koninklijk Instituut voor de Marine Nederlandse Defensie Academie. Promoteurs : A. Papy, L. Koene, A. Oukara, 2013