



Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse : influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur la justesse et la dispersion

Mathilda Liennard

► To cite this version:

Mathilda Liennard. Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse : influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur la justesse et la dispersion. Autre. Université d'Orléans, 2015. Français. NNT : 2015ORLE2033 . tel-03081288

HAL Id: tel-03081288

<https://theses.hal.science/tel-03081288>

Submitted on 18 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE (ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS)

LABORATOIRE PRISME

THÈSE présentée par :
Mathilda LIENNARD

soutenue le : 16 octobre 2015

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline : Mécanique

Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse

Influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur la justesse et la dispersion

THÈSE dirigée par :

Patrice BAILLY
André LANGLET

Professeur des universités, INSA Centre Val de Loire
Maître de conférence, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Jean-Luc DION
Patrice LONGERE

Maître de conférence, Supméca Paris
Professeur des universités, ISAE-SUPAERO

JURY:

Nourredine AIT HOCINE
Patrice BAILLY
Ophélie CHEVALIER
Alain GASSER
Grégory GIRAULT
André LANGLET

Professeur des universités, INSA Centre Val de Loire
Professeur des universités, INSA Centre Val de Loire
Ingénieur expert, Nexter Systems
Professeur des universités, Université d'Orléans
Maître de conférence, Université de Bretagne Sud
Maître de conférence, Université d'Orléans

A mon grand-père qui ne perdait jamais une occasion de rire :
« Qu'est-ce qu'une catapulte à salade ?
Un lance-roquette. »

Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse, influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur la justesse et la dispersion

La précision de tir d'une arme dépend de nombreux facteurs intervenant aux différentes étapes du parcours de la munition (balistique intérieure, intermédiaire et extérieure). Certains travaux ont démontré l'importance de la phase de balistique intérieure, pendant laquelle la munition traverse le tube, sur les résultats à la cible. En effet, c'est cette phase qui détermine les conditions de sortie du tube de la munition et par conséquent son comportement au cours du vol. Les conditions d'entrée du projectile, la géométrie du tube et de l'arme, et les mouvements de ces derniers au cours du tir, sont autant de paramètres pouvant modifier l'interaction tube/projectile et ainsi entraîner un changement des vitesses angulaires et de translation de la munition au moment du largage.

Cette étude a donc pour but de mettre en exergue les paramètres géométriques de l'arme et du tube qui influencent la justesse et la dispersion. Une analyse statistique a été réalisée à partir de la base de données des résultats de tir du 25 mm. Elle a permis de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres dont la rectitude du tube. Par la suite, des essais ont été conduits en appareil de tir dans le but d'isoler la part de la géométrie du tube sur les écarts à la cible et ainsi de confirmer la contribution de la rectitude. Un modèle numérique tridimensionnel a été développé afin de faire varier ce paramètre et d'étudier son influence sur le comportement de la munition en phase de balistique intérieure. La représentativité du modèle a été vérifiée à l'aide d'accéléromètres embarqués dans la munition. Ces tirs ont nécessité le développement d'une solution innovante optoélectronique afin de transmettre les accélérations en temps réel. Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de constater que les accélérations de la munition modélisée étaient représentatives. Le modèle permet maintenant de réaliser des études paramétriques et de déterminer les profils de tube les plus pénalisants pour la précision de tir.

Mots clés : Tube d'arme, précision de tir, balistique intérieure, rectitude, modélisation numérique 3D, interaction tube/projectile.

Dynamic of tubes crossed by high speed projectiles, influence of tube and weapon geometry on accuracy and dispersion

Gun accuracy is influenced by several factors during the stages of the ammunition course (internal, intermediate and external ballistics). According to previous studies, internal ballistics are the major contributor to deviations from target. Indeed, this phase determines projectile exit conditions and, consequently, his behavior during the flight. The projectile entry conditions, the weapon and barrel geometry and their movements during firing, can modify the interaction tube / projectile and change ammunition angular rates and its transversal velocities.

The purpose of this thesis is to determine the parameters related to barrel and gun geometry, which influence the bias and the dispersion. A statistical analysis was led thanks to the data base of the 25 mm firing results. It was found that some parameters, including barrel straightness, affect accuracy. Subsequently, tests were conducted with a firing appliance in order to isolate the barrel geometry influence on the deviations from the target and to confirm the straightness impact. A tridimensional numerical model was created in order to vary this parameter and to study its influence on the ammunition behavior during internal ballistics. The representativeness of the model was validated using accelerometers embedded in the ammunitions. The firing of these ammunitions has required the development of an optoelectronic system to transmit accelerations in real time. The comparison between experimental and numerical results has shown close amplitudes and similar shapes curves that proves the representativeness of the model. The model can be used now to lead parametric analysis and to determine the straightness shapes the most penalizing for gun accuracy.

Keywords: Gun Barrel, gun accuracy, internal ballistics, straightness, tridimensional numerical analysis, projectile/tube interaction.

Remerciements

Le travail de thèse présenté dans ce document a été possible grâce à l'élaboration d'une convention CIFRE entre le Laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans et le bureau d'études de Nexter Systems.

Je souhaiterais remercier Monsieur André LANGLET pour toute l'aide qu'il a su apporter à mon travail et pour le temps qu'il a passé à me réexpliquer certains aspects de la mécanique.

Merci à Monsieur Yann GUILMARD pour ses conseils avisés et le soutien dont il a fait preuve au cours des différents projets réalisés au cours de la thèse.

Un grand merci à Madame Ophélie CHEVALIER pour m'avoir suivi rigoureusement et avoir partagé toute son expérience de travail de thèse. Elle a su être à l'écoute et m'apporter le soutien qu'il fallait, quand il fallait.

Merci également à mon voisin de bureau, Monsieur Antoine OGER, pour m'avoir aidé et avoir répondu patiemment à toutes les questions que je lui ai posées.

Merci à Monsieur Patrice BAILLY pour sa disponibilité et sa confiance.

Mes remerciements à Monsieur Jean Michel REMBLIERE pour ses conseils et remarques qui auront permis d'apporter de la précision à la présentation de mon travail.

Mes remerciements à Monsieur Yann MENARD sans qui tous les essais réalisés au cours de cette thèse n'auraient pas pu se dérouler dans d'aussi bonnes conditions.

Merci à Monsieur Joël DION, Monsieur Jean-Paul FAUCHON, Monsieur Steeve COLIMOT et Monsieur Frédéric BAILLY qui ont grandement contribué au bon déroulement des essais et de leur préparation.

Pour avoir accepté d'être juges de mon travail, pour leurs lecture attentive, leurs corrections et remarques, je souhaite exprimer ma gratitude à Monsieur Jean-Luc DION et Monsieur Patrice LONGERE.

Je souhaite également remercier Monsieur Nourredine AIT HOCINE, Monsieur Alain GASSER et Monsieur Grégory GIRAULT pour avoir bien voulu faire partie de mon jury de thèse.

Un grand merci à mes compagnons du midi, qui se reconnaîtront. Sans vous les journées auraient paru beaucoup plus longues.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein de Nexter, et j'en remercie ici tous le bureau d'études. Merci également à mes collègues du laboratoire PRISME avec qui j'ai partagé de très bons moments et notamment au séminaire annuel où l'ambiance était au rendez-vous.

Pour leurs encouragements, leur soutien moral et affectif, je tiens à remercier mes amis, ma famille et ma moitié.

Sommaire

Table des figures	12
Liste des tableaux.....	18
I. Introduction.....	21
I.1. Préambule	22
I.2. Quelques définitions préliminaires	22
I.2.1. L'arme 25M811 et son fonctionnement	22
I.2.2. Critères de performance	27
I.2.3. Propriétés géométriques.....	30
I.3. Objectifs	36
II. Etude bibliographique.....	39
II.1. Les paramètres jouant sur la précision	40
II.1.1. Ecart à la cible	40
II.1.2. Les phénomènes en phase de balistique intérieure	41
II.2. Etudes statistiques.....	43
II.3. Modélisation du couple arme/projectile	47
II.3.1. Modèles basés sur la théorie des poutres et des oscillateurs.....	47
II.3.2. Modèles numériques	56
II.4. Dispositifs expérimentaux.....	59
II.4.1. Mesure des déplacements d'un projectile	60
II.4.2. Accéléromètres embarqués	62
II.4.3. Moyens d'acquisition des données	64
II.4.4. Mesure du gonflement du tube	66
II.4.5. Mesure des déplacements de la bouche du tube	67
II.5. Conclusions.....	69
III. Etude statistique.....	71
III.1. Paramètres étudiés.....	72
III.2. Corrélation paramètres/performances	74
III.2.1. Méthode d'analyse	74
III.2.2. Résultats	77
III.3. Analyse approfondie de la rectitude.....	81
III.3.1. Rayon de courbure des tubes.....	81
III.3.2. Influence du nombre de pics	89
III.4. Conclusions.....	91
IV. Mesure de la géométrie des tubes et de leur réponse en appareil de tir	93
IV.1. Présentation de l'appareil de tir	94
IV.2. Etapes préliminaires	95
IV.2.1. Choix des tubes	95

IV.2.2.	Mesures des profils de rectitude.....	95
IV.2.3.	Mesures de l'arcure des tubes	97
IV.3.	Essais de tirs d'OX	100
IV.3.1.	Présentation des essais	100
IV.3.2.	Résultats	100
IV.3.3.	Interprétations des résultats	104
IV.4.	Essais de tirs d'OFL.....	104
IV.4.1.	Présentation des essais	104
IV.4.2.	Résultats	105
IV.4.3.	Interprétations des résultats	112
IV.5.	Conclusions.....	112
V.	<i>Tirs de munitions avec instrumentation embarquée</i>	115
V.1.	Présentation du projet	116
V.1.1.	Présentation de la méthode d'acquisition en temps réel	116
V.1.2.	Modifications de la géométrie des OX	117
V.1.3.	Etapes du projet	119
V.1.4.	Tube choisi	119
V.2.	Déroulement des essais préliminaires	120
V.2.1.	Etape 1	120
V.2.2.	Etape 2	126
V.3.	Etape 3	133
V.3.1.	Présentation des essais	133
V.3.2.	Résultats de vitesse et pression	135
V.3.3.	Gonflement du tube	137
V.3.4.	Déplacements de la bouche du tube	141
V.3.5.	Accélérations des projectiles.....	144
V.4.	Conclusions et perspectives	152
VI.	<i>Modèle numérique de tir de 25M811.....</i>	155
VI.1.	Construction du modèle.....	156
VI.1.1.	Présentation des logiciels utilisés.....	157
VI.1.2.	Repère du modèle	157
VI.1.3.	Maillage	158
VI.1.4.	Modélisation du tir	164
VI.2.	Recalage du modèle.....	169
VI.2.1.	Gonflement au passage du projectile.....	169
VI.2.2.	Accélérations du projectile	170
VI.3.	Conclusions et perspectives	177
VII.	<i>Conclusions et perspectives</i>	179
VII.1.	Conclusions.....	180
VII.2.	Perspectives.....	181
VIII.	<i>Références</i>	183
IX.	<i>Annexes.....</i>	189
	Annexe 1 : Graphiques comparant la flèche de corde aux résultats de tir d'OX.....	190

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des différents matériels de mesure utilisés	192
Annexe 3 : Documentation des triaxes PCB.....	193
Annexe 4 : Plan de modification des corps d'obus d'OXT pour instrumentation embarquée	195
Annexe 5 : Plan de modification des fausses fusées d'OX pour instrumentation embarquée	196
Annexe 6 : Modes propres du tube à géométrie réelle	197
Annexe 7 : Modes propres du tube à géométrie simplifiée	199

Table des figures

Figure I-1 : Arme 25M811 et ses sous-ensembles.....	23
Figure I-2 : Coupe transversale du tube de 25M811.....	23
Figure I-3 : Munition de plein calibre explosive avec sa cartouche.	24
Figure I-4 : Vitesse et pression d'une munition de plein calibre en phase de balistique intérieure.	25
Figure I-5 : Munition flèche avec sa cartouche.	25
Figure I-6 : Munition flèche sans cartouche avant et après séparation des sabots.	26
Figure I-7 : Vitesse et pression d'une munition flèche en phase de balistique intérieure.....	26
Figure I-8 : Tranche arrière du tube avec une munition mise à poste.	27
Figure I-9 : Evolution de la pression chambre et la pression culot au cours de la phase de balistique intérieure d'un tir d'OFL.	27
Figure I-10 : Définition de la justesse.....	28
Figure I-11 : Définition en H+L de la dispersion.	29
Figure I-12 : Définition de l'obliquité.....	30
Figure I-13 : Définition de la rectitude et du profil de rectitude.	31
Figure I-14 : Dispositif de mesure de la rectitude à l'aide d'un capteur photosensible [BUN 07].....	32
Figure I-15 : Moyen de mesure de la rectitude Nexter.	33
Figure I-16 : Moyen de mesure des sous-traitants Nexter.	33
Figure I-17 : Vue en coupe transversale du tube avec la souris.....	34
Figure I-18 : Défaut de concentricité âme/fond en une section du tube.	34
Figure I-19 : Représentation du jeu entre le doigt de manchon et le berceau.	35
Figure I-20 : Calcul du jeu pour un doigt de manchon à section non circulaire.	35
Figure I-21 : Démarche scientifique adoptée afin de répondre à la problématique de thèse.	37
Figure II-1 : Ecart entre la visée du tube et l'impact sur cible [NEW 01].....	40
Figure II-2 : Vue en coupe longitudinale de l'arme, du berceau et du tube [BAE 13].....	46
Figure II-3 : Zoom sur le blocage en rotation entre le manchon tenant le tube et le berceau [BAE 13].....	46
Figure II-4 : Représentation du système tube/projectile simplifié.	49
Figure II-5 : Déformée de la poutre au temps zéro et à l'instant t_k	50
Figure II-6 : Discrétisation de la poutre en éléments finis prenant en compte le cisaillement [TO 81].....	51
Figure II-7 : Influence d'un défaut de rectitude sinusoïdal sur les déplacements en translation du tube au cours du temps et en fonction de l'abscisse du tube (à gauche tube avec courbure due au poids propre uniquement et à droite ajout d'un défaut sinusoïdal).	54

Figure II-8 : Représentation d'un système masse/ressort pouvant être modélisé à l'aide de SIMBAD [GUI 05].	55
Figure II-9 : Définition des vitesses de sortie du projectile par rapport à l'axe du tube [NEW 02].	57
Figure II-10 : Maillage d'une munition flèche de 60 mm de diamètre [CHE 07].	58
Figure II-11 : Déformées fondamentales du tube utilisées pour le plan d'expérience [CHE 07].	58
Figure II-12 : Mouvements de tangage, lacet et roulis.	59
Figure II-13 : Mesure des déplacements par laser [HAU 77].	60
Figure II-14 : Autre méthode de mesure des déplacements par laser [OWE 11].	61
Figure II-15 : Implantation d'accéléromètres dans une munition d'artillerie [LAU 08].	62
Figure II-16 : Accélérations longitudinale et radiales expérimentales (155 mm) [LAU 08].	64
Figure II-17 : Schéma de principe de la méthode de tir au fil [WEG 87].	65
Figure II-18 : Schéma de principe d'un système optoélectronique pour l'acquisition de données en phase de balistique intérieure [WEG 84].	66
Figure II-19 : Déformations du tube dues au gonflement [SAF 11].	66
Figure II-20 : Sens de positionnement des jauges de déformation sur le tube pour la mesure du gonflement.	67
Figure II-21 : Vue en coupe d'un tube avec des jauges de déformation en demi-pont.	67
Figure II-22 : Mesure du déplacement de la bouche du tube à l'aide d'un suiveur électro-optique [STE 78].	68
Figure II-23 : Schéma de positionnement des capteurs à courant de Foucault [BAE 13].	68
Figure III-1 : Pression dans la chambre lors des coups de flambage.	72
Figure III-2 : Pression dans la chambre lors des tirs suivant les coups de flambage.	73
Figure III-3 : Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, r , calculé à partir de différents nuages de points [ULB 15].	75
Figure III-4 : Explication de l'utilité de confronter chaque paramètre aux valeurs absolues.	76
Figure III-5 : Schéma explicatif du calcul de la flèche.	81
Figure III-6 : Calcul de la flèche pour une grande distance entre les points considérés.	82
Figure III-7 : Calcul de la flèche pour une courte distance entre les points considérés.	82
Figure III-8 : Calcul du rayon de courbure.	83
Figure III-9 : Autre cas de positionnement des points d'une courbe.	83
Figure III-10 : Exemple de profils de rectitude avec leurs courbes de flèche absolue associées.	84
Figure III-11 : Dispersion horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale.	86
Figure III-12 : Dispersion verticale en fonction de la valeur absolue de la flèche maximale de la courbe de rectitude verticale.	86

Figure III-13 : Dispersion globale en fonction de la flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'axe.....	87
Figure III-14 : Justesse horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale.	87
Figure III-15 : Justesse horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale (sans le tube 50129).....	88
Figure III-16 : Justesse verticale en fonction de la flèche maximale verticale.	88
Figure III-17 : Justesse globale en fonction de la flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'origine.....	89
Figure III-18 : Justesse globale des OFL en fonction du nombre de pics dont la flèche dépasse 0.019 mm.....	90
Figure IV-1 : Photo d'un appareil de tir.	94
Figure IV-2 : Profil de rectitude du tube 445.	96
Figure IV-3 : Profil de rectitude du tube 41388.	96
Figure IV-4 : Profil de rectitude du tube 41433.	96
Figure IV-5 : Profil d'arcure du tube 445.....	97
Figure IV-6 : Profil d'arcure du tube 41388.....	97
Figure IV-7 : Profil d'arcure du tube 41433.....	98
Figure IV-8 : Position de la clavette et sens d'observation de l'arcure.	98
Figure IV-9 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 445.	99
Figure IV-10 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 41388.....	99
Figure IV-11 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 41433.....	99
Figure IV-12 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 445.	101
Figure IV-13 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41388.....	101
Figure IV-14 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41433.....	101
Figure IV-15 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 445 sans frein de bouche.....	102
Figure IV-16 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41388 sans frein de bouche..	103
Figure IV-17 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41433 sans frein de bouche..	103
Figure IV-18 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 445.....	105
Figure IV-19 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41388.....	106
Figure IV-20 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41433.....	106
Figure IV-21 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 445 sans frein de bouche. ...	107
Figure IV-22 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41388 sans frein de bouche.	108
Figure IV-23 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41433 sans frein de bouche.	108

Figure IV-24 : Déplacements de la bouche du tube 445 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.	109
Figure IV-25 : Déplacements de la bouche du tube 41388 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.	110
Figure IV-26 : Déplacements de la bouche du tube 41433 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.	111
Figure V-1 : Schéma de l'instrumentation de la munition.	116
Figure V-2 : Principe de transmission optique.	117
Figure V-3 : Photo des nervures usinées à l'intérieur du corps de la munition avant instrumentation.....	118
Figure V-4 : Photo de l'obus avec l'électronique intégré non résiné.....	118
Figure V-5 : Profil de rectitude du tube choisi pour les essais de munitions instrumentées.	120
Figure V-6 : Intérieur du corps d'obus avec l'électronique embarquée résinée.	121
Figure V-7 : Photo du dispositif de mesure par Télémétrie.	121
Figure V-8 : Pression chambre au cours des deux tirs.....	122
Figure V-9 : Images de la caméra rapide au moment de la sortie du projectile.	123
Figure V-10 : Signal reçu par la lentille de Fresnel au cours du premier tir.	123
Figure V-11 : Cible montrant les impacts des deux tirs réalisés lors des essais.	124
Figure V-12 : Ajout de la lentille convergente.	126
Figure V-13 : Temps d'incrémentation de la rampe du signal en créneau.	126
Figure V-14 : Capteur de temps de bouche.	127
Figure V-15 : Courbes de pression chambre pour chaque tir de munition instrumentée.	128
Figure V-16 : Tension brute de l'accéléromètre PCB lors du tir numéro 2.....	129
Figure V-17 : Tension brute obtenue lors du tir numéro 3.....	129
Figure V-18 : Tension de la voie de l'accéléromètre et tension de la voie test lors du tir 2..	130
Figure V-19 : Tension de la voie de l'accéléromètre et tension de la voie test lors du tir 3..	130
Figure V-20 : Accélérations radiales obtenues et profil de rectitude du tube utilisé.....	131
Figure V-21 : Vue 3D de l'instrumentation des corps d'obus.	133
Figure V-22 : Zones d'implantation des jauges de déformations pour la mesure du gonflement du tube.....	134
Figure V-23 : Coupe transversale du tube à la section D ou E avec l'implantation des quarts de pont (vue depuis la tranche arrière).	135
Figure V-24 : Pression dans la chambre au cours des tirs.	136
Figure V-25 : Déformation circonférentielle de la section A.	137
Figure V-26 : Déformation circonférentielle de la section B.	137

Figure V-27 : Déformations circonférentielles de la section D enregistrées par les quarts de pont lors du premier tir.....	138
Figure V-28 : Déformations circonférentielles de la section E enregistrées par les quarts de pont lors du premier tir.....	138
Figure V-29 : Déformation circonférentielle de la section C.	139
Figure V-30 : Pression de la ceinture sur le tube aux sections A, B et C.....	140
Figure V-31 : Déplacement du projectile obtenu à l'aide des pics de déformation.	141
Figure V-32 : Déplacements horizontaux de la bouche du tube lors de la phase de balistique intérieure (valeurs positives vers la droite vue depuis la tranche arrière du tube).	142
Figure V-33 : Déplacements verticaux de la bouche du tube lors de la phase de balistique intérieure (valeurs positives vers le haut).....	142
Figure V-34 : Déplacements de la bouche du tube dans le plan où ils sont mesurés.....	143
Figure V-35 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 6).	144
Figure V-36 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 7).	145
Figure V-37 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 13).	146
Figure V-38 : Comparaison entre l'accélération longitudinale du projectile calculée à partir de la pression et celle mesurée (tir 6).....	147
Figure V-39 : Vitesse obtenue par simple intégration de l'accélération longitudinale (tir 6).	148
Figure V-40 : Courbe de déplacement obtenue par double intégration de l'accélération longitudinale (tir 6).....	148
Figure V-41 : Coupe longitudinale d'une munition instrumentée passant par son axe de symétrie.	149
Figure V-42 : Influence d'un angle de 5° sur l'accélération mesurée par l'axe x.	150
Figure V-43 : Vue en coupe transversale d'une munition instrumentée.	151
Figure V-44 : Accélération centripète à l'origine des axes x et y au cours du tir.....	151
Figure VI-1 : Démarche suivie pour la réalisation du modèle dynamique de simulation de tir.....	156
Figure VI-2 : Position du repère du modèle.	157
Figure VI-3 : Maillage du tube à géométrie réelle.	158
Figure VI-4 : Représentation des conditions d'appui du tube à géométrie réelle (Abaqus)..	159
Figure VI-5 : Représentation du maillage du tube à géométrie simplifiée.	160
Figure VI-6 : Maillage des rayures du tube.	160
Figure VI-7 : Représentation des conditions d'appui du tube à géométrie simplifiée (Abaqus).....	161
Figure VI-8 : Représentation du maillage de la munition.....	163

Figure VI-9 : Modélisation du bloc d'électronique par le maillage d'un bloc de résine.....	164
Figure VI-10 : Maintien du tube en appareil de tir (LS-Dyna).	165
Figure VI-11 : Flèche du tube due au poids propre.	165
Figure VI-12 : Application des efforts permettant d'imposer un profil de rectitude.....	166
Figure VI-13 : Comparaison entre la rectitude du tube 445 et du modèle numérique.....	166
Figure VI-14 : Accélération longitudinale de la munition dans le tube au cours du temps (Sibil).	167
Figure VI-15 : Position du centre de gravité du frein de bouche et du filetage permettant sa fixation sur le tube.	168
Figure VI-16 : Pressions appliquées aux tranches du tube et pression culot Sibil.....	168
Figure VI-17 : Comparaison entre les pics de déformation expérimentaux et ceux du modèle de simulation aux sections A, B et C.	169
Figure VI-18 : Pression expérimentale et numérique de la munition sur le tube.....	170
Figure VI-19 : Position des nœuds du modèle permettant la comparaison des accélérations.	171
Figure VI-20 : Accélération longitudinale du modèle, comparée à l'accélération Sibil et à celle mesurée.	171
Figure VI-21 : Accélérations radiales brute et recalée selon l'axe y de mesure (Essai 6)....	173
Figure VI-22 : Accélérations du modèle de simulation dans les repères des axes de mesure x et y.	175
Figure VI-23 : Accélérations expérimentales et numérique dans l'axe x de mesure.....	175
Figure VI-24 : Accélérations expérimentales et numérique dans l'axe y de mesure.....	176

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coefficients de corrélation des dispersions calculées par rapport aux expérimentales [GUR 07].	44
Tableau 2 : Test de significativité du coefficient de corrélation de Pearson.	76
Tableau 3 : Coefficients de corrélation des paramètres géométriques influençant la précision de tir des OX.	80
Tableau 4 : Coefficients de corrélation des paramètres géométriques influençant la précision de tir des OFL.	80
Tableau 5 : Récapitulatif des coefficients de corrélation obtenus pour les OX.	85
Tableau 6 : Récapitulatif des coefficients de corrélation obtenus pour OFL.	89
Tableau 7 : Données concernant les trois tubes retenus.	95
Tableau 8 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OX avec frein de bouche.	102
Tableau 9 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OX sans frein de bouche.	103
Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OFL avec frein de bouche.	106
Tableau 11 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OFL sans frein de bouche.	108
Tableau 12 : Masses et V_0 des projectiles obtenues lors des deux tirs.	122
Tableau 13 : Masses et V_0 des projectiles obtenues lors des trois tirs.	127
Tableau 14 : Masses et V_0 des projectiles ainsi que les pressions maximales à la chambre obtenues lors des 13 tirs.	136
Tableau 15 : Moyennes des pics obtenus lors des 13 coups en chaque section.	139
Tableau 16 : Comparaison entre la masse du modèle numérique et la masse du vrai tube.	159
Tableau 17 : Modes propres de la modélisation du tube à géométrie réelle.	159
Tableau 18 : Comparaison entre la masse du tube à géométrie simplifiée et la masse réelle.	161
Tableau 19 : Modes propres de la modélisation du tube à géométrie simplifiée.	162
Tableau 20 : Comparaison des premiers modes propres des deux tubes modélisés.	162
Tableau 21 : Valeurs ayant permis la détermination des angles de positionnement des accéléromètres embarqués.	172

Notations et symboles

ARL : Army Research Laboratory

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

EFAB : Etablissement de Fabrication d'Armement de Bourges

I-DEAS : Integrated Design Engineering and Analysis Software

ISL : Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint Louis

OX : Obus d'eXercice

OFL : Obus FLèche

SIMBAD : SIMulation of Barrel Dynamics

VBCI : Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie

I. Introduction

I.1. Préambule

Le but de ces travaux est de déterminer quels paramètres géométriques de l'arme de 25M811 et de son tube sont les plus influents sur la précision de tir. Pour répondre à cette question, comprendre les phénomènes ayant lieu en phase de balistique intérieure lors d'un tir est nécessaire. Ainsi, sont étudiées les interactions entre le tube et le projectile mais aussi celles entre le tube et l'arme. Cette étude ne concernant que l'arme et ses sous-ensembles, les mouvements du véhicule ne sont pas pris en compte.

Les résultats devront permettre de quantifier l'impact sur la précision de tir des différents facteurs intervenant en phase de balistique intérieure, l'objectif final étant de réduire leur influence et par conséquent l'écart à la cible.

Dans le présent document, une première étape permet l'identification des paramètres pouvant influencer le parcours du projectile. Ensuite, la base de données des recettes d'arme de 25M811 permet un premier tri des paramètres identifiés à l'aide d'une analyse statistique. Une troisième partie présente les expériences menées afin de confirmer leur influence sur la précision de tir. Un quatrième chapitre est consacré à la présentation du projet de munitions instrumentées qui a permis la réalisation et la validation d'un modèle de simulation de tir d'OX de 25 mm qui fait l'objet du dernier chapitre.

I.2. Quelques définitions préliminaires

Les armes de moyen calibre permettent de tirer des munitions allant de 12.7 à 60 mm de diamètre. Elles peuvent être utilisées en combat aérien, maritime ou terrestre. Les travaux de recherche présentés ici concernent l'arme de moyen calibre terrestre, le 25M811.

I.2.1. L'arme 25M811 et son fonctionnement

I.2.1.1. L'arme et ses sous-ensembles

Le 25M811 est un système de tir équipé d'un canon de 25 mm, intégré dans la tourelle du VBCI (Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie). C'est une arme auto-mécanique, ce qui signifie que les mouvements de l'arme et son ensemble sont transmis par un moteur. L'ensemble du système de tir est constitué de l'arme, du tube avec son frein de bouche, du berceau, du moteur et du lien élastique (Figure I-1).

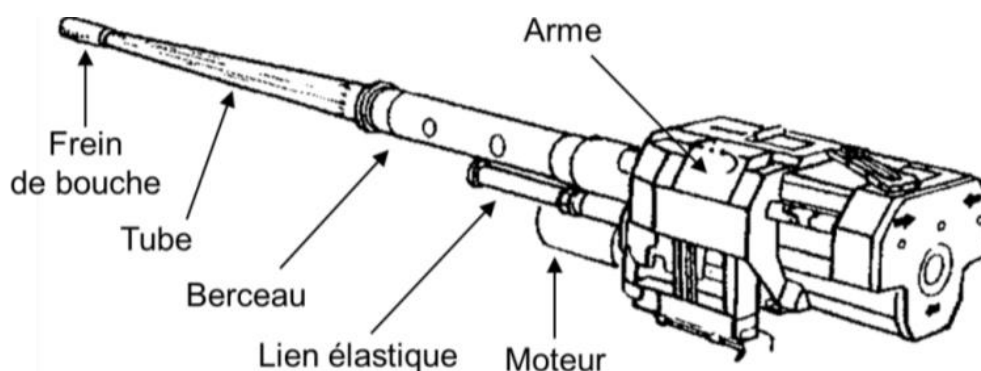


Figure I-1 : Arme 25M811 et ses sous-ensembles.

Le tube a pour rôle de guider la munition vers la cible. Il permet aussi à la munition de prendre de la vitesse. L'âme du tube est rayée de façon hélicoïdale avec un pas progressif afin de mettre en rotation le projectile qui sera ainsi stabilisé en vol (Figure I-2). Cette prise de vitesse et de rotation ont également pour fonction d'armer la munition.

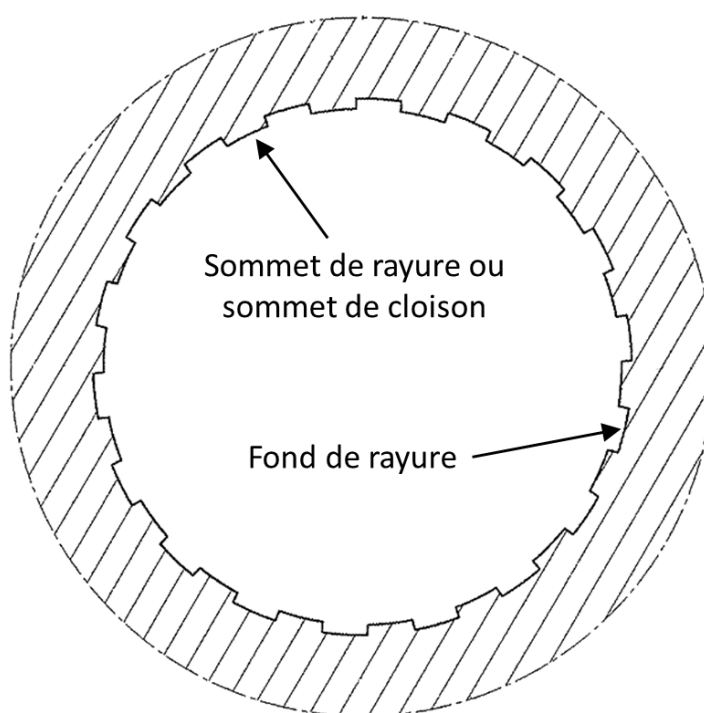


Figure I-2 : Coupe transversale du tube de 25M811.

Le moteur, quant à lui, entraîne les vis et les pignons qui permettent le positionnement des munitions en face du percuteur, dans l'axe du tube. C'est ce que l'on appelle le chambrage de la munition, ou mise à poste. Lors d'un tir, l'arme recule, c'est pourquoi certains éléments sont utilisés afin de freiner ce mouvement. Pour cela, il y a le frein de bouche, fixé à l'avant du tube, intervenant au moment de la sortie du projectile. Il permet le renvoi vers l'arrière d'une partie des gaz de combustion qui propulsent le projectile, ce qui

applique au tube un effort dans le sens opposé à la force de recul. Il en va de même pour le lien élastique qui freine le mouvement du tube. Enfin, le berceau permet de maintenir l'arme dans l'axe de tir lors de son mouvement de recul, ceci afin d'éviter de changer la direction du projectile et minimiser les écarts sur cible.

I.2.1.2. Cadences de tir

Il est possible de tirer selon plusieurs modes, en coup par coup ou en rafale. Le premier mode signifie que les cycles de tir, comprenant chambrage et tir d'une munition jusqu'à sa sortie du tube, ne se suivent pas immédiatement. Lors de tirs en rafale, les cycles de tir se succèdent, la cadence de tir pouvant varier entre 125 et 400 coups par minute.

L'arme 25M811 a la spécificité d'être munie d'une double alimentation permettant de changer rapidement de type de munition.

I.2.1.3. Les munitions

Selon le besoin, plusieurs types de munitions existent en 25 mm : celles dites de plein calibre et les flèches.

I.2.1.3.1. Le plein calibre

Les munitions de plein calibre sont des munitions explosives ou perforantes, ou les deux à la fois. Elles sont constituées d'un corps, d'une fusée, d'une ceinture et d'une cartouche contenant la poudre propulsive, sur laquelle se trouve l'amorce permettant l'allumage de la poudre (Figure I-3). C'est une munition dite poussée, car son centre de gravité se trouve à l'avant de la ceinture.

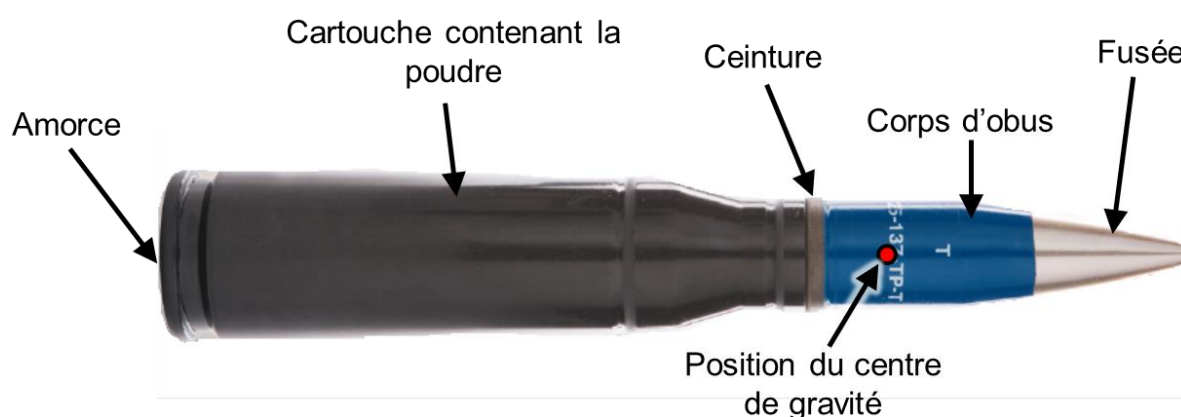


Figure I-3 : Munition de plein calibre explosive avec sa cartouche.

Selon le rôle de la munition, sa fusée peut avoir une géométrie différente. Ce type de munition atteint une vitesse maximale de 1 100 m/s (temps de parcours dans le tube de 2.7

ms), ce qui représente une accélération maximale de 75 000 g et une pression culot (pression à l'arrière du projectile) de 260 MPa. La Figure I-4 présente la courbe de pression culot et la courbe de vitesse d'une munition de plein calibre de 25 mm en phase de balistique intérieure.

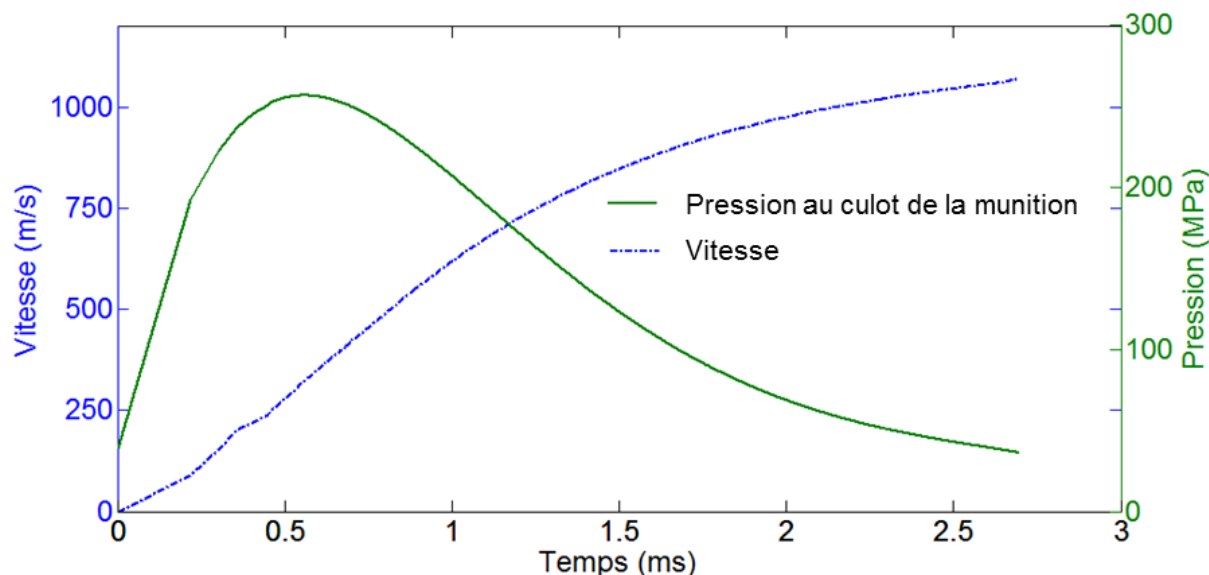


Figure I-4 : Vitesse et pression d'une munition de plein calibre en phase de balistique intérieure.

I.2.1.3.2. Les munitions flèches

Les munitions flèches sont des munitions cinétiques perforantes. Elles sont constituées de sabots qui se détachent à la sortie du tube (Figure I-5). Ils permettent le guidage de la munition dans le tube et assurent l'étanchéité des gaz de poussée (Figure I-6). Cette munition est dite tractée, puisque contrairement au plein calibre, son centre de gravité se trouve à l'arrière de la ceinture. La Figure I-7 ci-après permet de rendre compte du profil des courbes de pression culot et de vitesse d'une munition flèche de 25 mm. Ainsi une munition flèche atteint une vitesse de 1 350 m/s en 2.2 ms, temps de passage dans le tube. La pression culot atteint 350 MPa, soit une accélération maximale de 130 000 g.

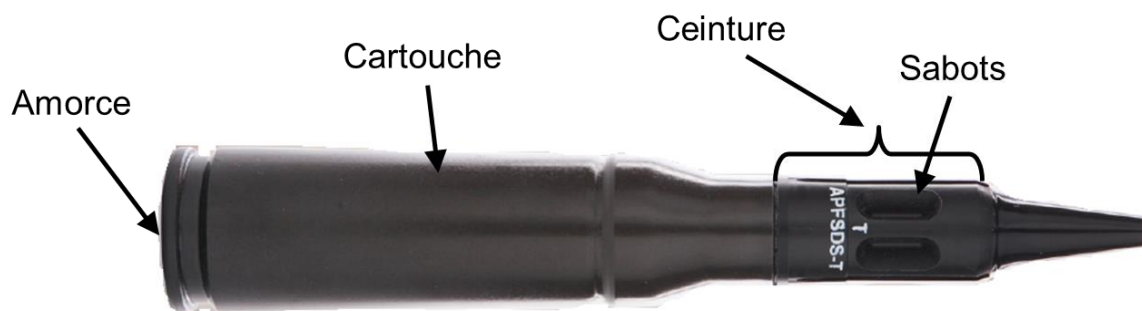


Figure I-5 : Munition flèche avec sa cartouche.

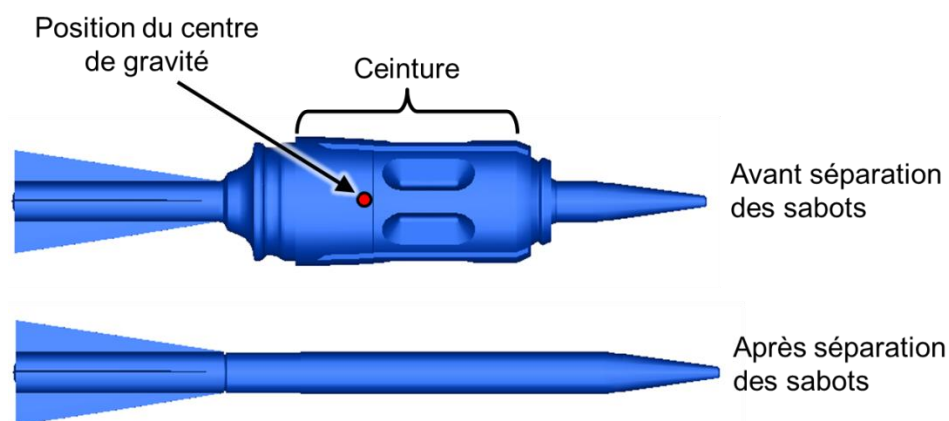


Figure I-6 : Munition flèche sans cartouche avant et après séparation des sabots.

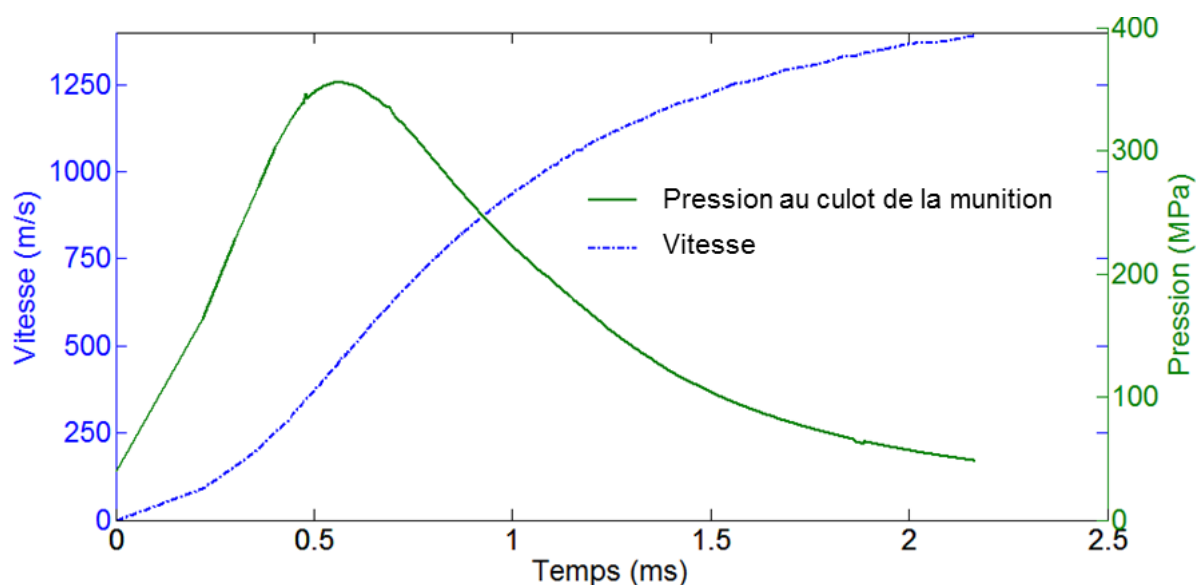


Figure I-7 : Vitesse et pression d'une munition flèche en phase de balistique intérieure.

I.2.1.4. Parcours d'une munition

Avant le tir, la munition est mise à poste par le mécanisme de l'arme (Figure I-8). Une fois la munition en place, lorsque l'ordre est donné, le percuteur vient toucher l'amorce démarrant ainsi le processus pyrotechnique. C'est le début de la phase de balistique intérieure où la poudre contenue dans la cartouche commence sa combustion, augmentant ainsi la pression à l'arrière de la munition (Figure I-9). Cette pression va la pousser dans le cône de forçement où sa ceinture va prendre la forme des rayures et être comprimée afin d'assurer l'étanchéité vis-à-vis des gaz. Ainsi la pression continue d'augmenter à l'arrière de la munition, la propulsant dans le tube. Durant ce parcours elle prend de la vitesse et est mise en rotation. Ensuite a lieu la phase de balistique intermédiaire où le projectile sort de la bouche du tube, (extrémité avant du tube) permettant ainsi aux gaz de sortir. On parle aussi de largage du projectile. La phase de balistique extérieure commence lorsqu'il n'y a plus

d'interaction entre les gaz de combustion qui s'échappent du tube et la munition. A ce moment-là, la munition vole librement jusqu'à sa cible.

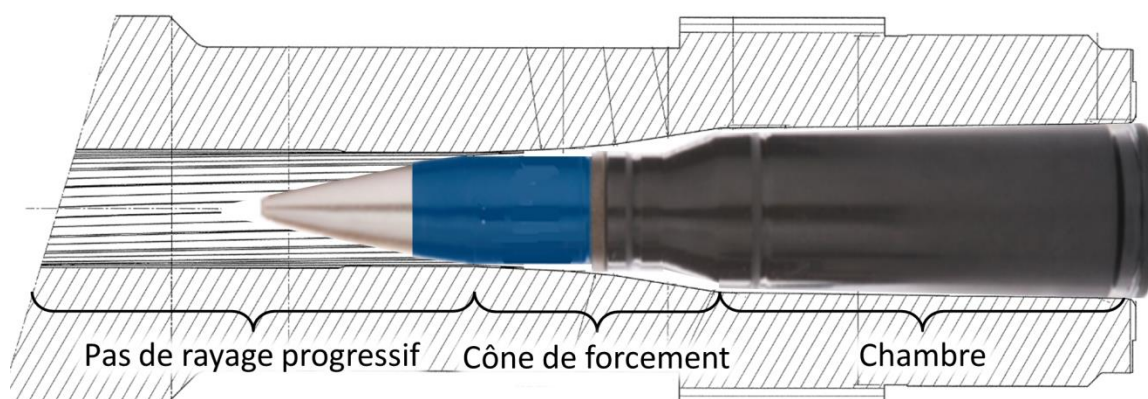


Figure I-8 : Tranche arrière du tube avec une munition mise à poste.

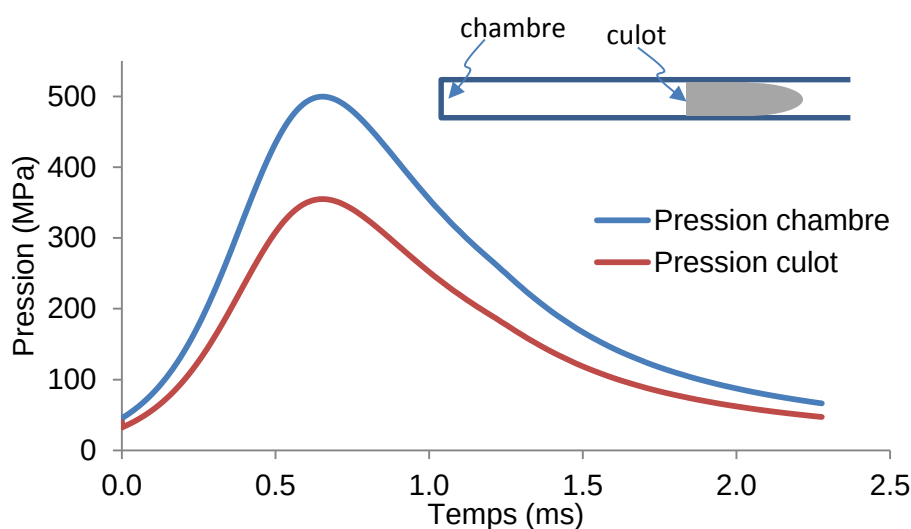


Figure I-9 : Evolution de la pression chambre et la pression culot au cours de la phase de balistique intérieure d'un tir d'OFL.

I.2.2. Critères de performance

Afin de vérifier la performance des armes en sortie de production, il est réalisé des tirs de recette. Ainsi, chaque arme, avec son tube, tire 10 munitions de plein calibre d'exercice, OX (Obus d'eXercice), et 10 munitions flèches, OFL (Obus FLèche), sur une cible à 100 mètres afin de déterminer la dispersion et la justesse. Les OX sont des munitions utilisées pour les recettes uniquement car elles ne sont ni explosives, ni perforantes. Cependant, elles ont la même géométrie et la même masse que les munitions de plein calibre utilisées au combat.

I.2.2.1. Justesse

Le but premier d'un tir de justesse est de se rapprocher au mieux du point de visée du tube. Ce critère est défini par la justesse, aussi appelé biais. Lors des tirs de recette, le point de visée est repéré sur la cible à 100 m à l'aide d'une lunette de bouche. Après le tir de 10 coups, l'emplacement du point moyen des 10 impacts sur la cible est calculé. La justesse horizontale, J_H , est la distance entre le point moyen des impacts et l'axe vertical passant par le point de la visée du tube, et la justesse verticale, J_V , la distance entre ce point moyen et l'axe horizontal passant par le point de visée (Figure I-10).

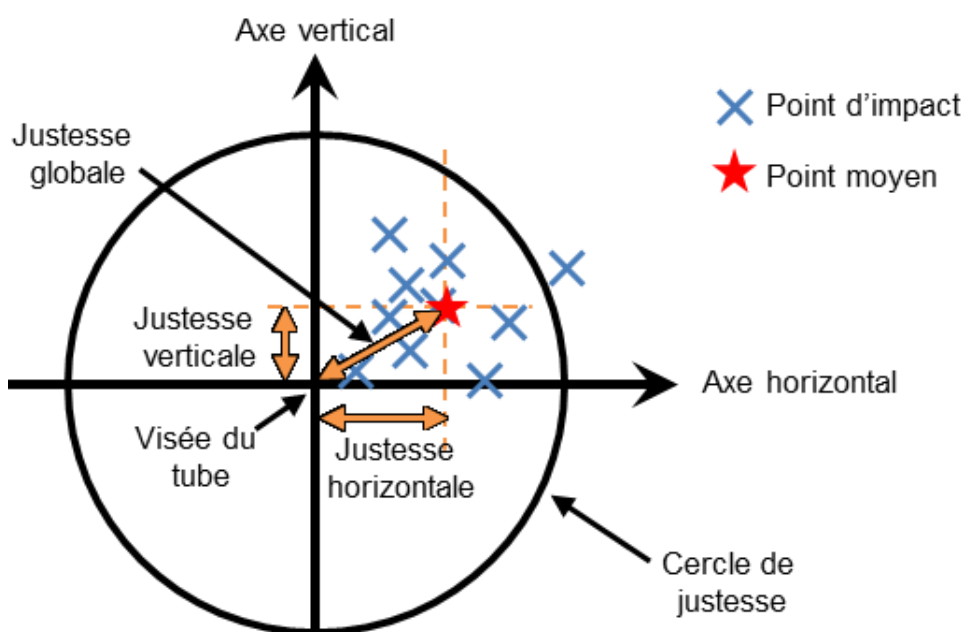


Figure I-10 : Définition de la justesse.

La justesse globale, J_G , se trouve être la distance entre le point de visée et le point moyen, calculée selon la formule (1.1).

$$J_G = \sqrt{J_H^2 + J_V^2} \quad (1.1)$$

L'exigence concernant ce critère est que la justesse globale soit inférieure à la valeur du rayon du cercle de justesse. Cette valeur dépend de la limite du rattrapage mécanique possible par la tourelle sur laquelle est montée l'arme.

I.2.2.2. Dispersion

Le second critère observé est la dispersion, c'est-à-dire la capacité d'une arme à tirer au même endroit. Il y a deux façons de calculer la dispersion. La première est de mesurer la hauteur, H , entre les deux impacts les plus éloignés dans le sens vertical et de faire de

même à l'horizontale, ce qui donne le L (Figure I-11). On en déduit une valeur de dispersion en H+L.

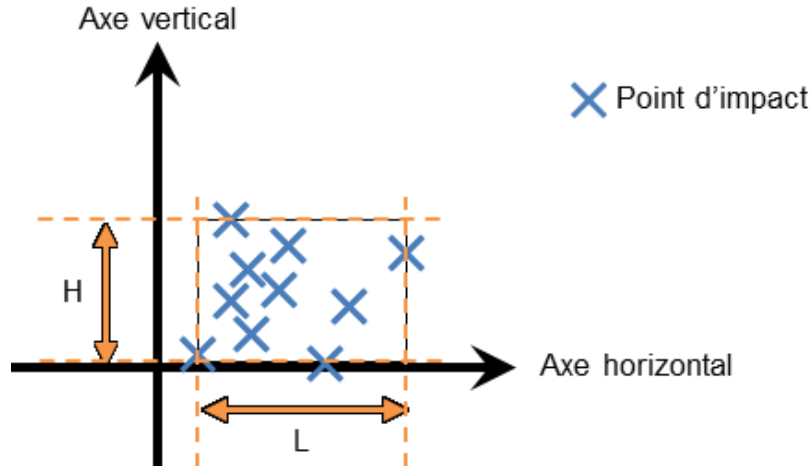


Figure I-11 : Définition en H+L de la dispersion.

La seconde méthode est celle qui est utilisée afin de vérifier les conditions du STANAG 4173 [STA 98], qui impose que la dispersion globale ne dépasse pas 0.5 milliradian (mrad) pour les tirs d'OX et 0.8 mrad pour les tirs d'OFL. La dispersion globale, notée σ_G , se calcule à partir de la dispersion horizontale, σ_H , et de la dispersion verticale, σ_V , comme le montre l'équation (1.2).

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{\sigma_H^2 + \sigma_V^2}{2}} \quad (1.2)$$

Les dispersions verticale et horizontale pour n coups se calculent à partir des coordonnées des n impacts, avec les abscisses notées de x_1 à x_n et les ordonnées de y_1 à y_n [TRA 85] :

$$\sigma_H = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{d} \quad (1.3)$$

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}}{d} \quad (1.4)$$

Dans les équations (1.3) et (1.4) :

- d est la distance entre la bouche du tube et la cible ;

- $\bar{x}$ et $\bar{y}$ sont les moyennes des x_i et des y_i respectivement ;
- n est le nombre de coups tirés.

Dans le cas des recettes d'arme, d vaut 100 puisque la cible est placée à 100 m, et n vaut 10 car 10 coups sont tirés. Le calcul de la dispersion verticale et de la dispersion horizontale revient à diviser l'écart-type sans biais des ordonnées et des abscisses respectivement, par d .

Une arme de 25M811 est considérée comme précise lorsqu'elle respecte à la fois les critères de justesse et de dispersion imposés par le STANAG et ceux du cahier des charges. Cependant, la précision n'est pas la seule condition pour qualifier un tir de réussi.

I.2.2.3. Conditions de perforation

Pour que les munitions perforantes puissent jouer leur rôle, une obliquité inférieure à 11° à 100 m est une condition nécessaire. L'obliquité est l'angle existant entre l'axe de la munition et l'axe du tir (Figure I-12). A la sortie du tube, le mouvement du projectile se compose d'un roulis dû au rayage du tube, d'un tangage et d'un lacet. Les deux derniers paramètres dépendent du parcours de balistique intérieure et intermédiaire. Ils conduisent à une obliquité de la munition, qui, dans le cas où elle serait trop importante, rendrait le tir inefficace.

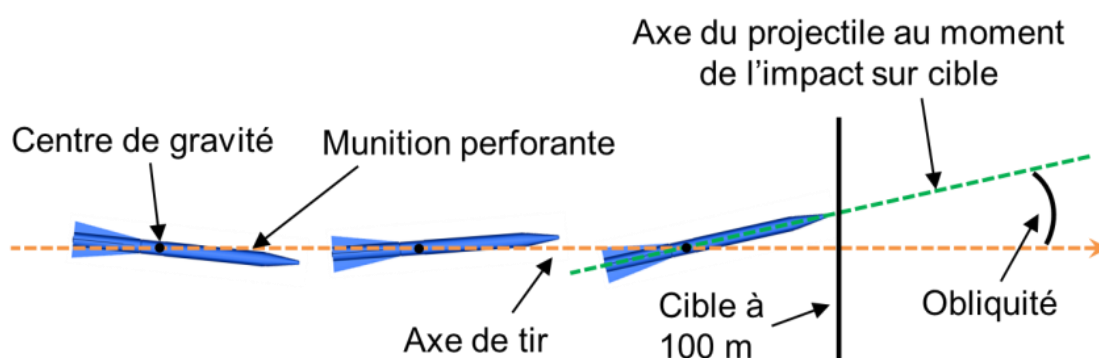


Figure I-12 : Définition de l'obliquité.

Afin de respecter au mieux les conditions de performance et de permettre le montage des éléments constitutifs du système de tir, les plans de définition de l'arme et ses sous-ensembles ont des tolérances adaptées.

I.2.3. Propriétés géométriques

Ce paragraphe permet de définir certaines propriétés géométriques de l'arme et son tube pouvant jouer un rôle dans la précision de tir.

I.2.3.1. Rectitude et arcure

I.2.3.1.1. Définitions

La rectitude est définie comme étant le diamètre du plus petit cylindre englobant l'axe du cylindre considéré et le profil de rectitude est l'allure de l'axe de ce dernier (Figure I-13).

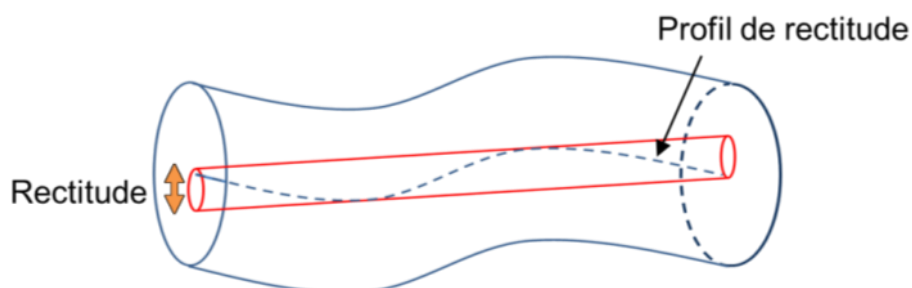


Figure I-13 : Définition de la rectitude et du profil de rectitude.

Dans le cas d'un tube d'arme, la rectitude concerne le cylindre formé par les sommets ou par les fonds de rayure suivant le cas étudié. Dans le présent document, on s'intéressera à la rectitude liée aux sommets de cloison. L'allure du profil extérieur d'un tube est appelé arcure. Un tube peut avoir une très bonne arcure et un profil de rectitude très accidenté et vice-versa. En revanche, si un tube est parfaitement concentrique, son arcure et sa rectitude auront la même allure.

I.2.3.1.2. Moyens de mesure

Il existe plusieurs moyens pour mesurer le profil de rectitude. La première consiste au passage d'une carotte (objet en plastique ayant la géométrie d'un OX) poussée mécaniquement, c'est-à-dire sans pyrotechnie, afin de vérifier qu'il n'existe pas de défaut suffisamment important risquant de bloquer la munition dans le tube. Cette méthode est utilisée sur le terrain lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser des outils de mesure encombrants. Elle permet uniquement de vérifier que le profil ne dépasse pas une valeur seuil au-delà de laquelle il existe un réel risque d'accident.

En 2007, l'armée Américaine a développé une méthode de mesure plus précise transposable à tous les moyens calibres [BUN 07]. La mesure est réalisée avec le tube positionné de la même façon que dans l'arme, c'est-à-dire à l'horizontale. Une source lumineuse de type laser est dirigée dans l'axe du tube, en partant du centre de la section arrière de ce dernier. Une tige se déplace dans le tube partant de la bouche vers le laser, en s'appuyant sur les sommets de rayure. Au bout de cette tige se trouve un capteur photosensible permettant de déterminer l'emplacement du point du faisceau laser par rapport au centre du capteur. La Figure I-14 présente la partie arrière où est maintenu le

tube et d'où part le laser (a), et présente également la partie avant du tube avec la tige munie du capteur (b).

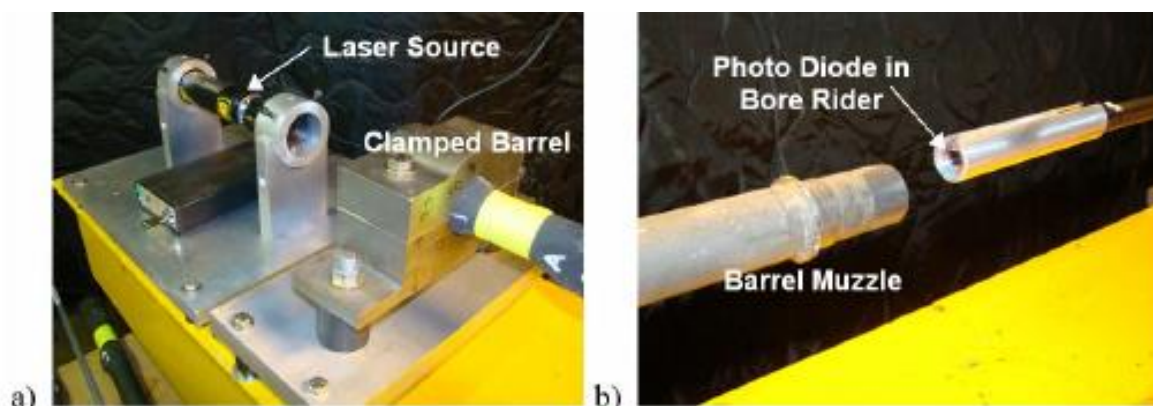


Figure I-14 : Dispositif de mesure de la rectitude à l'aide d'un capteur photosensible [BUN 07].

Cette solution a l'avantage d'observer la rectitude du tube lorsque ce dernier est fixé à l'arme. En revanche, elle ne permet pas de s'affranchir de l'effet de la pesanteur et le système de fixation du tube doit être adapté à chaque calibre.

Chez Nexter, le principe est le même sauf que la mesure est réalisée avec le tube à la verticale, maintenu en haut et en bas par des cônes permettant d'aligner le centre de la section arrière avec le centre de la section avant (Figure I-15). Le support du capteur s'appelle un poisson. Ce dernier gonfle afin de s'appuyer sur les sommets de rayure. L'avantage de cette méthode est de ne pas faire intervenir l'effet de la pesanteur mais également de pouvoir réaliser les mesures rapidement puisqu'un seul passage est nécessaire afin de définir le profil du tube.

Cette méthode est actuellement utilisée dans un but d'amélioration des procédés de contrôles dimensionnels des armes de moyen calibre. Elle est ainsi employée plusieurs fois au cours de leur processus de fabrication. Les mesures des profils de rectitude des tubes en sortie de production sont actuellement réalisées par des sous-traitants. Le principe de mesure qu'ils utilisent est le même, mis à part la position du tube (Figure I-16), et la forme du support du capteur. Ce support, appelé souris, est muni de deux patins fixes qui se positionnent en fond de rayure et d'un patin à ressort qui se place en sommet (Figure I-17). Ainsi, la mesure de la rectitude en une section est faite 18 fois pour pouvoir passer par les 18 rayures du tube. Le barycentre des 18 points est alors calculé afin de définir le centre de la section considérée. Cette technique de mesure donne des résultats précis. Cependant elle fait intervenir les défauts de concentricité âme/fond, notion qui sera abordée dans la suite de ce chapitre. De plus, cette technique nécessite de réaliser les mesures avec le tube

positionné sur des « v » et implique que ces dernières sont influencées par un fléchissement du tube dû à la pesanteur.

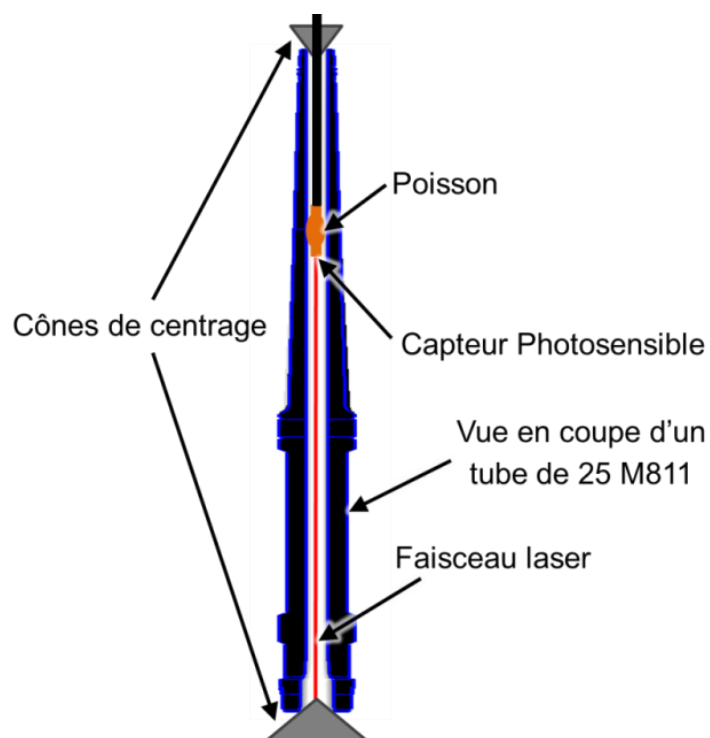


Figure I-15 : Moyen de mesure de la rectitude Nexter.

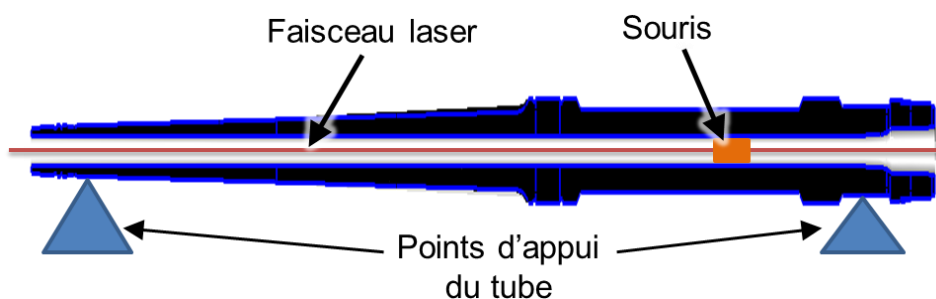


Figure I-16 : Moyen de mesure des sous-traitants Nexter.

La dernière méthode présentée devrait donner des profils similaires à ceux obtenus grâce à la méthode employée par Nexter, à condition que le cylindre formé par les sommets de rayure et celui formé par les fonds soient parfaitement concentriques.

Chacune des méthodes de mesure de la rectitude présentées précédemment utilise un système passant dans le tube qui, selon sa longueur, peut atténuer les imperfections du profil du tube. En effet, les défauts ayant un rayon de courbure inférieur à la longueur du système utilisé, ne seront pas détectables.

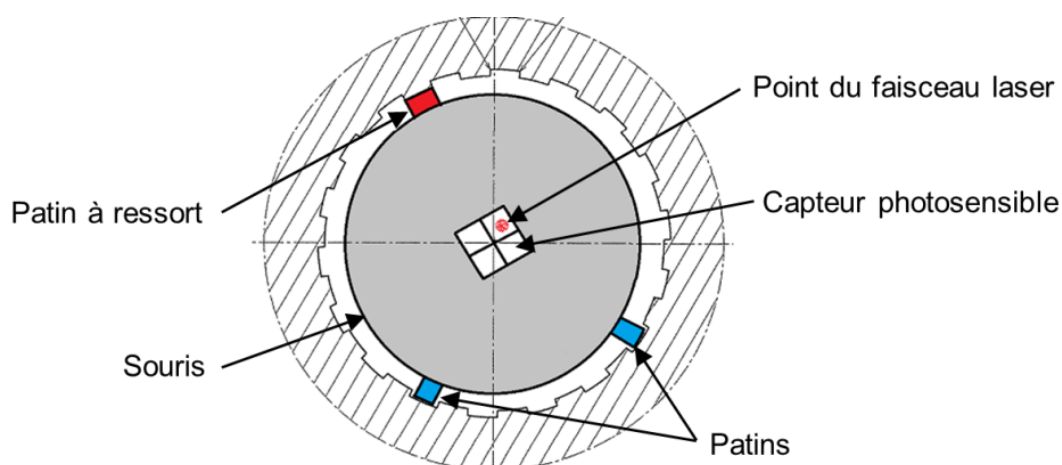


Figure I-17 : Vue en coupe transversale du tube avec la souris.

I.2.3.2. Concentricité

Deux cercles sont considérés comme concentriques lorsqu'ils partagent le même centre. Le plan de définition d'une arme et celui de son tube font appel à cette propriété afin d'avoir des éléments conformes aux besoins auxquels ils sont destinés. Par exemple, afin de guider correctement la munition, un tube ne doit pas dépasser un certain écart de concentricité âme/fond (Figure I-18), l'âme du tube étant l'axe du cylindre constitué par les sommets de rayure.

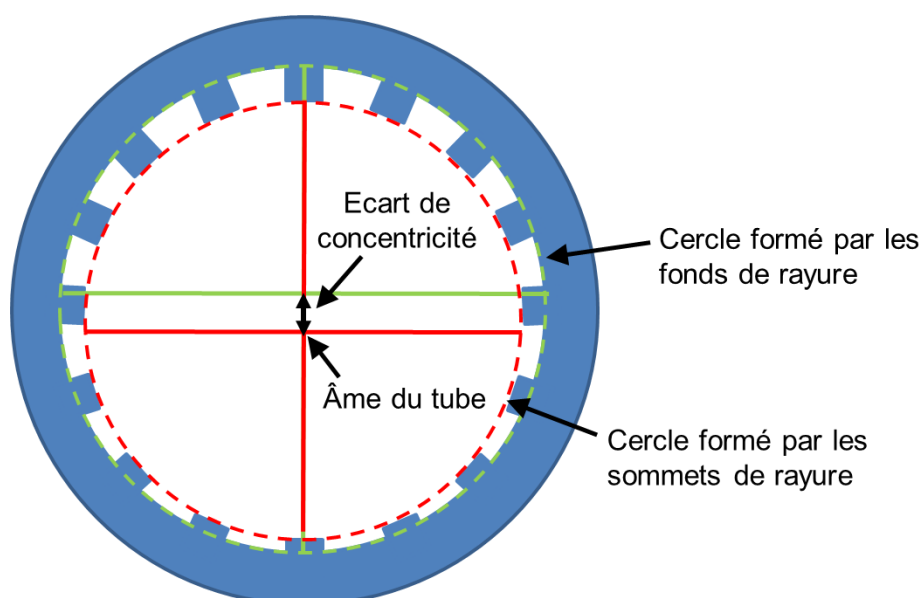


Figure I-18 : Défaut de concentricité âme/fond en une section du tube.

I.2.3.3. Jeux, diamètres et circularité

La majorité des pièces d'une arme présentent un jeu avec l'élément auquel elles sont rattachées. Ce jeu doit être maîtrisé afin de ne pas risquer un problème de montage ou de

fonctionnement de l'arme. Lors d'un tir, un couple est appliqué sur le tube, et par conséquent sur l'arme, en raison de la mise en rotation de la munition. Afin d'empêcher le mouvement de rotation, un doigt de manchon fixé à l'arme est en contact avec le berceau qui lui, est fixé au bâti de tir lors des recettes, ou au véhicule. Si le jeu entre le doigt de manchon et le berceau est trop important, l'ensemble tube/arme effectue un mouvement de rotation pouvant perturber le tir (Figure I-19).

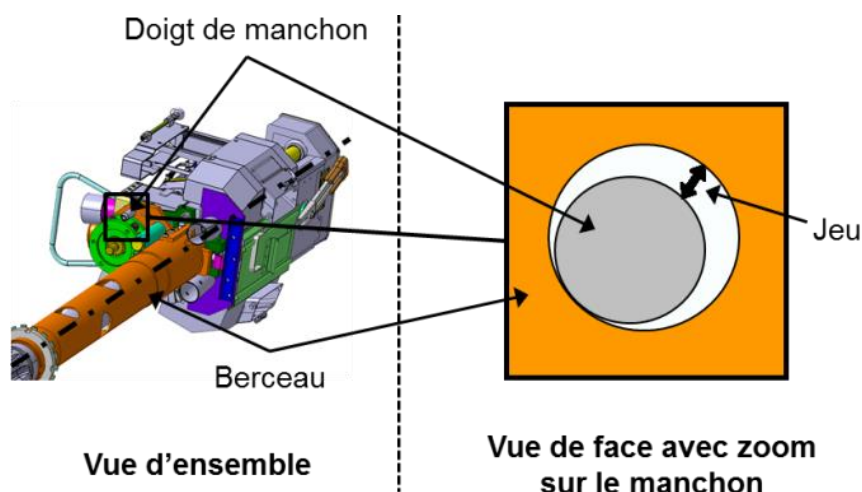


Figure I-19 : Représentation du jeu entre le doigt de manchon et le berceau.

Dans le cas du doigt de manchon, son diamètre et celui de son logement dans le berceau ont des tolérances dimensionnelles maximales et minimales à respecter afin que le jeu entre ces deux éléments soit suffisamment faible pour éviter un mouvement de rotation.

Un diamètre peut être calculé de différentes façons. Une seule mesure peut suffire à la condition que l'objet de la mesure soit parfaitement circulaire. Dans le cas du doigt de manchon, si celui-ci présente une certaine ovalisation, des diamètres minimal et maximal pouvant être déterminés afin de connaître les jeux maximal et minimal entre les deux pièces (Figure I-20). Il est donc important d'apporter le plus grand soin aux contrôles géométriques.

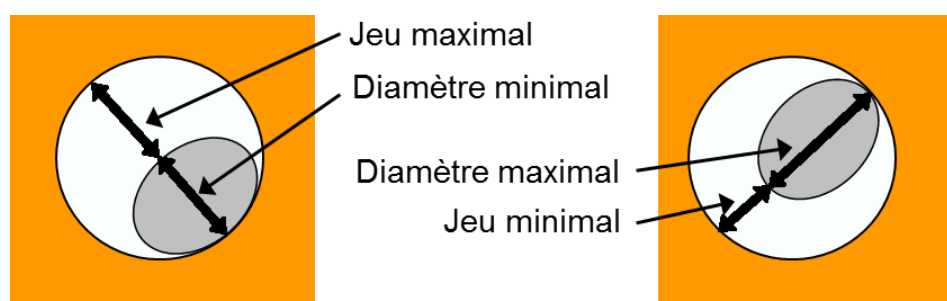


Figure I-20 : Calcul du jeu pour un doigt de manchon à section non circulaire.

Après avoir identifié les mesures pouvant caractériser la géométrie de l'arme et du tube, leur influence sur la précision de tir peut être analysée expérimentalement ou bien à l'aide de modèles de simulation de tir. De nombreuses études antérieures ont été menées sur ce sujet dans le domaine de l'artillerie et du moyen calibre.

I.3. Objectifs

Cette thèse s'inscrit dans une volonté d'amélioration des performances des armes de moyen calibre. Elle a pour but de déterminer quels sont les paramètres liés à la balistique intérieure, et plus particulièrement ceux attachés à la géométrie de l'arme et du tube, qui influencent la précision de tir. Ainsi tous les phénomènes intervenant pendant le vol de la munition sont négligés. Pour que cette hypothèse soit justifiée tous les essais sont réalisés en gaine de tir, soit en intérieur, et les impacts sont analysés à des distances relativement faibles par rapport aux portées de tir des armes étudiées. Les cibles utilisés sont placées à 100 mètres et les armes tirent jusqu'à 3 kilomètres. Quant aux munitions, fournies par Nexter Munitions, elles sont considérées comme de géométrie parfaite. Ces dernières sont choisies parmi des lots de référence ayant de hautes performances, c'est-à-dire peu de dispersion. La répartition de la pression des gaz à l'arrière de la munition est un paramètre complètement maîtrisé à l'heure actuelle et est donc considérée comme parfaitement homogène.

Cette thèse étant la première chez Nexter sur ce sujet, elle n'a pas pour vocation de réduire la dispersion ou le biais à des valeurs définies, mais de caractériser ces paramètres. La démarche utilisée pour répondre à la problématique est schématisée au travers de la Figure I-21. La première étape a consisté en la réalisation de l'état de l'art des études antérieures concernant la recherche des paramètres influençant la justesse et la dispersion. Dans le même temps, des mesures géométriques et de nouveaux tirs ont permis d'alimenter la base de données existante sur les armes de moyen calibre Nexter. Cette dernière a ensuite permis d'effectuer une analyse statistique, basée sur les régressions linéaires. Ainsi, un premier tri parmi 72 paramètres géométriques mesurables et pouvant jouer sur la réponse du tube en dynamique, ou encore sur l'interaction tube/projectile, a pu être effectué. A partir de l'état de l'art et des résultats de l'analyse statistique, le choix d'étudier l'influence de la rectitude des tubes a été fait. Dans cette optique, un modèle numérique de simulation de tir a été constitué. Afin de valider ce modèle, des mesures du gonflement du tube et des accélérations de la munition ont été réalisées. La mesure des accélérations en phase de balistique intérieure n'étant pas triviale, notamment du fait de la présence du tube, un protocole expérimental novateur a dû être mis au point et testé. Ce protocole, bien que

perfectible, a permis d'en apprendre davantage sur le parcours de la munition dans le tube et de nous donner ses accélérations radiales jusqu'alors inconnues. Grâce aux résultats obtenus, le modèle numérique de simulation a pu être validé et sera par la suite utilisé dans le but de donner des recommandations pour la fabrication des tubes.

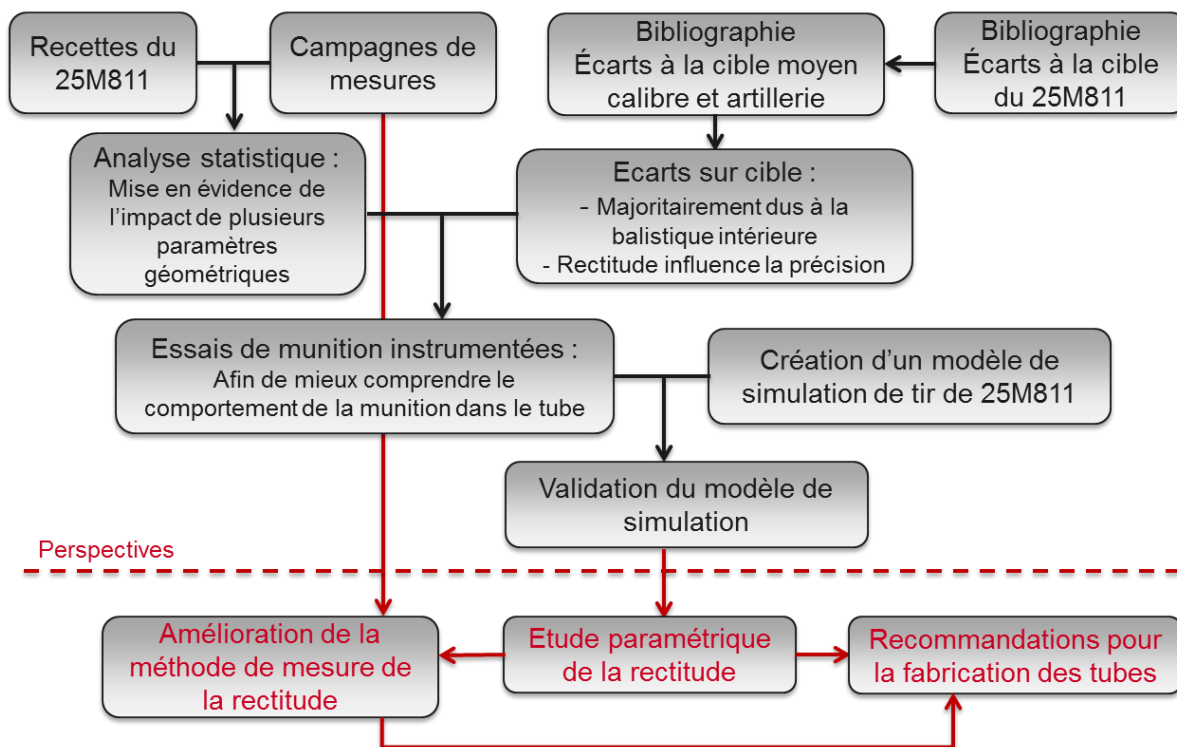


Figure I-21 : Démarche scientifique adoptée afin de répondre à la problématique de thèse.

II. Etude bibliographique

II.1. Les paramètres jouant sur la précision

II.1.1. Ecart à la cible

Au cours d'un tir, de nombreux paramètres peuvent perturber le parcours du projectile, ce qui induit un écart potentiel entre la visée statique du tube (1) et l'impact sur cible (2). Ces paramètres peuvent agir en phase de balistique intérieure, intermédiaire ou de vol et peuvent être regroupés selon les catégories présentées par la Figure II-1 ci-dessous.

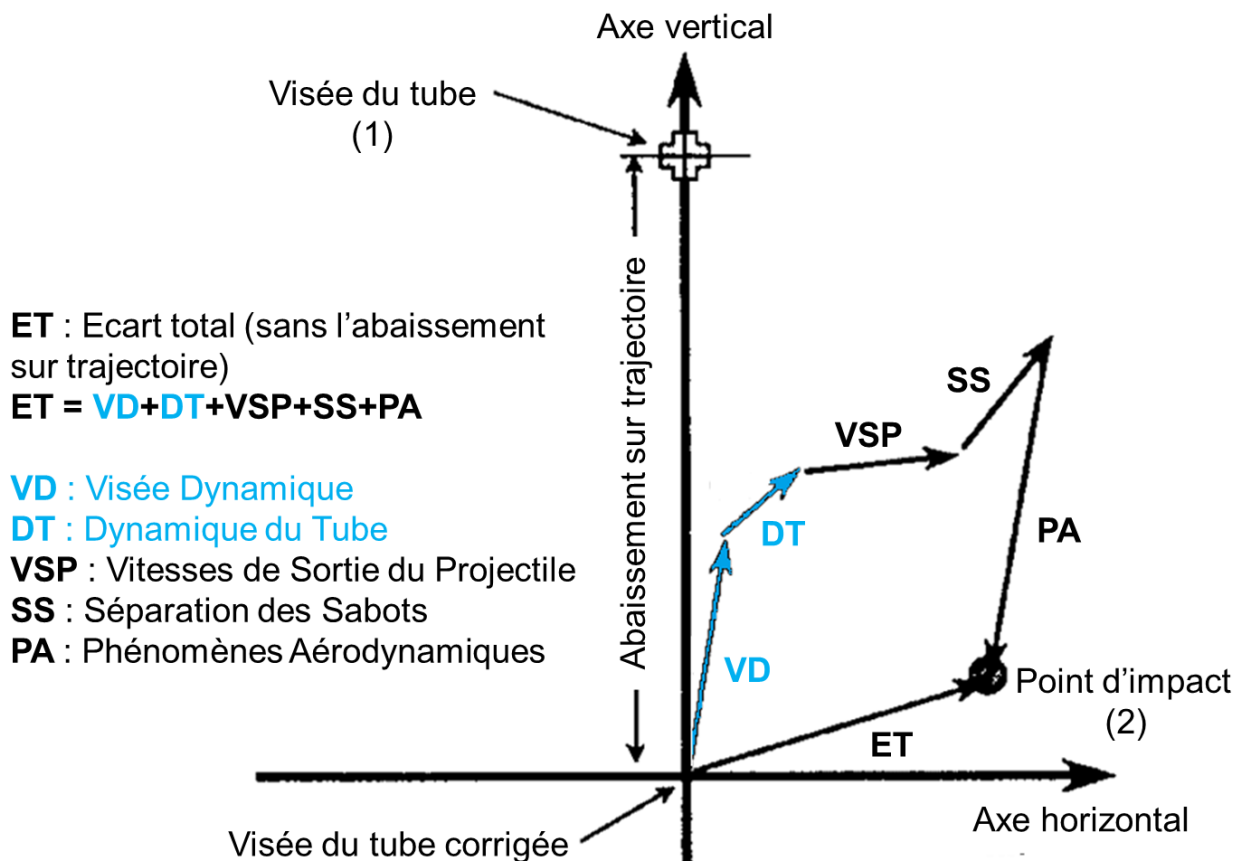


Figure II-1 : Ecart entre la visée du tube et l'impact sur cible [NEW 01].

Dans la Figure II-1, l'effet de l'abaissement sur trajectoire du projectile dû à sa perte de vitesse au cours du vol n'est pas pris en compte car parfaitement connu par ailleurs. La visée dynamique représente la visée du tube au moment du largage du projectile. Elle peut être différente de celle à l'instant initial (visée statique), du fait des mouvements liés à la cinématique de l'arme, mais aussi de l'interaction avec le projectile. La dynamique du tube concerne le mouvement du tube au moment du largage du projectile, c'est-à-dire la vitesse appliquée à la munition par les mouvements de la bouche du tube. Les vitesses de sortie du projectile, soit les vitesses de rotations et de déplacement dans l'axe de tir, déterminent les

conditions de vol de la munition (tangage, lacet et roulis) au moment du largage. Pour les munitions flèches, les sabots qui se séparent à la sortie sont également susceptibles de perturber le parcours du projectile. Enfin, les phénomènes aérodynamiques (vitesse du vent, température, humidité...) influencent également la trajectoire du projectile pendant son vol. Tous ces effets permettent d'expliquer l'écart à la cible et sont intimement liés.

En s'appuyant sur des résultats expérimentaux, une étude américaine a utilisé la décomposition de l'écart à la cible présentée en Figure II-1, afin de comprendre quelle est l'étape du parcours du projectile qui induit le plus de dispersion [GAR 99]. Ainsi, la dispersion à la cible au carré, σ^2_{IMPACT} , est donnée par la formule suivante :

$$\sigma^2_{IMPACT} = \sigma^2_{VD} + \sigma^2_{DT} + \sigma^2_{CG} + \sigma^2_{PA} + Cov \quad (2.1)$$

avec :

- σ_{VD} , σ_{DT} et σ_{PA} respectivement les dispersions dues à la visée dynamique, à la dynamique du tube et aux phénomènes aérodynamiques ;
- σ_{CG} la dispersion due aux vitesses de sortie du projectile et à la séparation des sabots des munitions flèches ;
- Cov la covariance des facteurs deux à deux, afin de tenir compte de leur interdépendance.

La conclusion de l'étude semble montrer que la relation entre les mouvements du projectile et ceux de la bouche du tube au moment du largage est le contributeur majeur des écarts sur cible. C'est pourquoi il est important de comprendre les phénomènes ayant lieu en phase de balistique intérieure et de déterminer quels sont les paramètres pouvant contribuer à augmenter ce rapport.

II.1.2. Les phénomènes en phase de balistique intérieure

II.1.2.1. Présentation des phénomènes influents

Le Mémorial de l'artillerie française présente les paramètres pouvant perturber le parcours du projectile dans le tube et ainsi diminuer la précision de tir des armes de gros calibre (domaine de l'artillerie) [DAR 57] :

- Un décalage du centre de gravité de la munition par rapport à son axe de rotation peut créer une force centrifuge causant ainsi un balourd ;

- Un jeu entre le tube et le projectile peut entraîner un désaxage du centre de gravité de la munition par rapport à l'axe du tube ce qui produirait un balourd ;
- Une combustion inhomogène de la poudre propulsive peut conduire à une force de poussée ayant une résultante ne se trouvant pas alignée avec le centre de gravité du projectile, créant ainsi un moment sur la munition qui entrerait de travers dans le tube et balloterait ;
- Une arcure du tube peut mener à l'application d'une force latérale sur le projectile créant du ballottement ;
- Le tube fléchissant sous son poids propre, le déplacement du projectile lors de son passage dans le tube amène ce dernier à se redresser. Cela conduit à changer la direction de pointage du tube et, par conséquent, celle de la munition au moment du largage. Ce mouvement peut également donner lieu à une composante latérale de vitesse ou à un déplacement transverse déviant la munition de sa trajectoire initiale. Ce phénomène est appelé « effet Bourdon ».

Les phénomènes présentés peuvent être amplifiés par l'effet gyroscopique appliqué au projectile dans la phase de balistique intérieure. Les travaux de recherche présentés ici ne s'intéressant qu'à l'amélioration de la géométrie de l'arme et ses sous-ensembles, les effets dus à un défaut géométrique de la munition ne seront pas étudiés. Ainsi, la répartition des masses du projectile sera considérée comme parfaite et la combustion de la poudre propulsive comme parfaitement homogène.

En phase de balistique intérieur, d'autres phénomènes peuvent intervenir dans la précision de tir [CHE 10] :

- Un décalage entre l'axe de la chambre et celui du tube peut conduire à un défaut de concentricité entre la ceinture et le centre de gravité de la munition qui serait amenée à balloter ;
- Un profil de rectitude accidenté peut perturber le parcours du projectile en lui appliquant des forces latérales et ainsi le faire balloter.

Les paramètres présentés ici ont une influence importante sur la précision de tir dans le domaine de l'artillerie, mais nous ne savons pas dans quelles proportions ces facteurs influent sur les écarts à la cible des munitions de moyen calibre. En effet, le maintien des tubes et le mécanisme des armes étant différents, d'autres paramètres, ignorés dans le

domaine de l'artillerie, interviennent dans la précision de tir, pouvant avoir une influence plus grande que celle des paramètres évoqués précédemment.

II.1.2.2. Paramètres géométriques

Au sein de Nexter, plusieurs études ont traité de la précision des armes de moyen calibre et pour certaines, du 25M811 en particulier. En effet, des analyses empiriques ont permis de comprendre l'influence de certains paramètres sur la justesse et la dispersion. Un document de 1986 a permis de faire le point sur toutes ces études et sur leurs conclusions [PIC 86].

Les conclusions rappellent l'importance de la fixation au sol de l'affût sur lequel l'arme est maintenue. En effet, la dispersion et la justesse sont très affectées par un mauvais serrage du fait des mouvements laissés possibles par le jeu dans le maintien de l'affût. Cela induit que le serrage doit être effectué avec un protocole précis, reproductible.

Le frein de bouche semble avoir un effet important sur la dispersion. Il est précisé qu'il faut un frein de bouche parfaitement symétrique et orienté par rapport au sol pour ne pas déséquilibrer la répartition des gaz à la sortie du projectile.

Les mouvements des pièces de l'arme, telles que la boîte de culasse sous l'effet de la traction de bande par exemple, semblent affecter la justesse et la dispersion mais dans de faibles proportions.

Il est important que le centre de gravité de la masse reculante (ensemble tube/arme), se trouve dans l'axe de tir. Si ce n'est pas le cas, il y aura alors un couple, lors du recul, conduisant à un mouvement de rotation du tube pouvant ainsi augmenter l'écart sur cible dû à la visée dynamique.

Certaines études statistiques ont été réalisées dans le but de confirmer l'importance de l'influence de certains paramètres sur la précision de tir.

II.2. Etudes statistiques

Afin de faire ressortir l'influence d'un paramètre sur un autre, il est possible d'avoir recours à des analyses statistiques. Une étude américaine de 2011 visait à l'amélioration de la précision de tir des armes de petit calibre [CEL 11]. Au départ, l'analyse a consisté à mesurer expérimentalement les variations de chaque catégorie de facteurs présentée en Figure II-1 selon plusieurs cas de configuration (tirs avec ou sans frein de bouche par exemple). Ensuite, les différents paramètres ont été confrontés un à un en calculant les coefficients de corrélation. Cela a permis de rendre compte des configurations les plus

favorables à une bonne précision de tir. Le frein de bouche, la rectitude du tube et la géométrie des munitions ont ainsi été définis, comme des paramètres ayant une forte influence sur la dispersion.

Dans une étude israélienne, les coefficients de corrélations ont été utilisés afin de vérifier la fiabilité du modèle de prédiction de tir obtenu de façon empirique pour deux types d'arme différents [GUR 07]. Le but de cette analyse était de pouvoir prédire les résultats sur cible d'un tube à partir de son profil de rectitude. Pour cela, de nombreux essais ont été réalisés avec des tubes de rectitude connue. Un modèle de prédiction a pu ainsi être développé par type d'arme, afin de définir l'écart moyen des impacts sur cible d'un tube avant tir. Les équations (2.2) et (2.3) présentent respectivement les formules de prédiction des écarts horizontaux et verticaux des impacts sur cible.

$$Jump(Horizontal) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times x_i \quad (2.2)$$

$$Jump(Vertical) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \times y_i \quad (2.3)$$

avec :

- x_i, y_i les valeurs de défaut de rectitude dans le sens horizontal et vertical respectivement ;
- a_i et b_i les coefficients empiriques ;
- n le nombre de points de mesure de la rectitude.

Les dispersions calculées à partir des modèles ont été confrontées aux valeurs expérimentales à l'aide d'un calcul de coefficient de corrélation (Tableau 1).

Coefficient de corrélation R	Axe vertical	Axe horizontal
Type d'arme A	0.878	0.959
Type d'arme B	0.811	0.917

Tableau 1 : Coefficients de corrélation des dispersions calculées par rapport aux expérimentales [GUR 07].

Une étude statistique sur l'influence des paramètres géométriques du 25M811 a été réalisée par Nexter [BAE 13]. Les résultats des recettes des tubes et des armes issus de production ont été mis en relation avec certains de leurs paramètres géométriques. Ces

derniers ont été choisis parmi la liste des tolérances de fabrication de l'arme et de son tube pouvant potentiellement agir mécaniquement au cours du tir. Par exemple, la concentricité âme/fond de rayure (définition donnée au paragraphe I.2.3.2) a été analysée, car, selon sa valeur, elle peut créer une dissymétrie de l'usure de la ceinture engendrant un balourd de la munition et une modification du coefficient de traînée. Ainsi, plus de 70 paramètres ont été mesurés parmi des valeurs de concentricité, de jeux dans l'arme, de rectitude et d'arcure du tube et parmi des valeurs de diamètres. Les coefficients de corrélation de chaque paramètre géométrique mis en relation avec la dispersion ou la justesse ont alors été calculés afin de déterminer leur degré d'influence sur la précision de tir. La formule utilisée pour le calcul du coefficient de corrélation est celle de Bravais-Pearson [AIV 78] :

$$r_p = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.4)$$

avec :

- σ_{xy} la covariance des deux paramètres confrontés ;
- σ_x ou σ_y leur écart type ;
- x_i et y_i une valeur de l'un des deux échantillons étudiés ;
- $\bar{x}$ et $\bar{y}$ les moyennes de tous les x_i et les y_i respectivement.

Lorsque la population considérée était suffisante et que la valeur absolue du coefficient de corrélation dépassait 0.7, alors le paramètre géométrique observé était considéré comme ayant une forte influence. Ainsi, la concentricité des portées du tube (la portée arrière, c'est-à-dire dans l'arme, et les portées du berceau), la concentricité âme/fond de rayure à la bouche du tube, la concentricité entre le diamètre du tube et celui de la chambre, la rectitude et l'arcure du tube et certains jeux permettant au tube de tourner autour de son axe sont ressortis comme des paramètres ayant une forte influence sur les résultats à la cible.

Un écart important au niveau des concentricités des portées peut entraîner une dissymétrie des efforts mécaniques par rapport à l'axe du tube et créer des mouvements parasites du tube modifiant le parcours du projectile (Figure II-2).

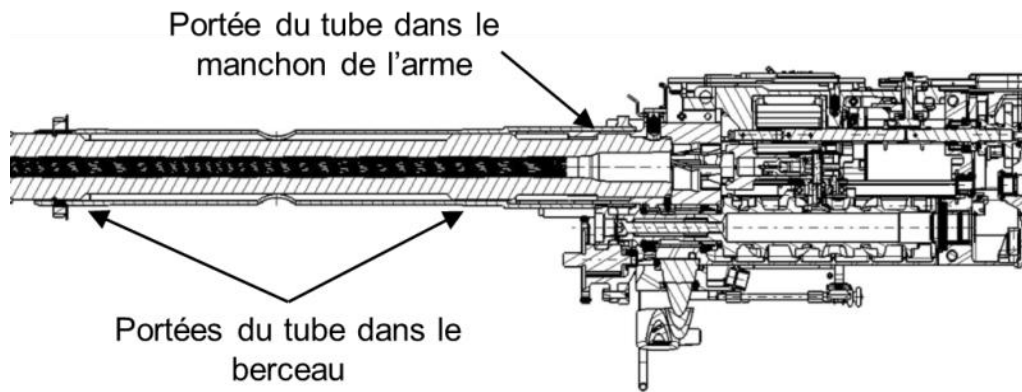


Figure II-2 : Vue en coupe longitudinale de l'arme, du berceau et du tube [BAE 13].

Un désaxage de la chambre par rapport au diamètre du tube, quant à lui, peut entraîner un décentrage de la munition au moment de sa prise de rayure, créant ainsi un balourd perturbant son parcours de balistique intérieure. La rectitude du tube peut avoir un impact direct sur la ligne suivie par la munition au cours de son déplacement. Un important défaut d'arcure du tube peut amener ce dernier à se redresser au passage du projectile. Le tube sera alors amené à se comporter différemment, pouvant également entraîner un changement des mouvements de la munition. Enfin, un jeu important entre le berceau et le manchon dans lequel est maintenu le tube peut conduire à un couple d'entraînement et changer le guidage de la masse reculante et par conséquent celui du tube. Ce sont les doigts de manchon qui permettent de bloquer en rotation le berceau par rapport au manchon, c'est donc à cet endroit qu'est mesuré le jeu (Figure II-3).

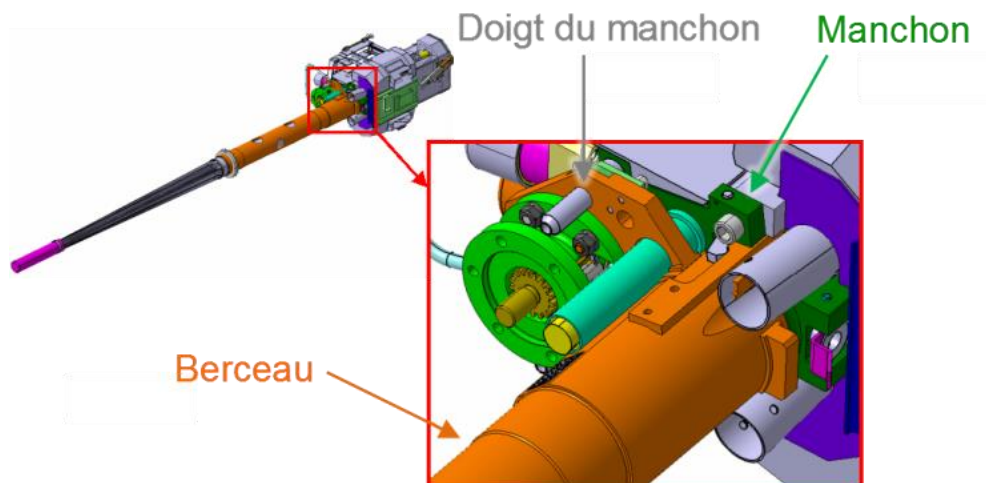


Figure II-3 : Zoom sur le blocage en rotation entre le manchon tenant le tube et le berceau [BAE 13].

Dans cette étude, un défaut de concentricité au niveau des portées du frein de bouche semble jouer un rôle important sur la précision de tir. Cela peut s'expliquer par le fait que si

l'axe du frein de bouche n'est pas aligné avec celui du tube, alors un déséquilibre dans la répartition des gaz qui entoure le projectile peut avoir lieu, perturbant ainsi le début de la phase de vol de ce dernier. De plus, si le frein de bouche bouge pendant le tir alors les modes vibratoires du tube évoluent et par conséquent l'interaction tube/projectile sera modifiée. Les résultats de cette analyse auront permis de déterminer sur quels paramètres se focaliser.

Ce type d'analyse statistique présente des résultats fiables, mais est coûteux du fait du nombre important de tests à réaliser. Dans le cadre de l'amélioration des performances d'une arme, il est intéressant d'utiliser des modèles semi-analytiques ou numériques de simulations, tout d'abord pour pouvoir faire varier facilement les paramètres du système étudié, mais aussi afin d'obtenir des résultats rapidement.

II.3. Modélisation du couple arme/projectile

Certaines études se sont appuyées sur des modèles basés sur la théorie des poutres et des modèles de type masse/ressort, ceci dans le but de comprendre l'influence de certains paramètres géométriques sur la précision de tir. Ainsi, il est possible de définir le système d'arme à l'aide de formules analytiques ou bien de modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis.

II.3.1. Modèles basés sur la théorie des poutres et des oscillateurs

II.3.1.1. Modèles masse/poutre

II.3.1.1.1. Généralités

Le système de tir peut être défini comme une structure à chargements variables et mobiles. De nombreux travaux théoriques ont été menés sur ce type de problématiques notamment dans le domaine du génie civil avec le cas des ponts parcourus par des véhicules roulants [PES 01]. Ainsi, le tube peut être considéré comme une poutre et la munition comme le chargement mobile. De manière générale, il y a trois façons d'exprimer le chargement sur la poutre [LAM 08]. La première consiste à exprimer le chargement comme une force constante qui se déplace à une vitesse imposée fonction du temps. Dans la seconde, la force est appliquée par un oscillateur en mouvement. Enfin, la troisième présente le chargement comme une masse liée à la poutre, appliquant une force constante à cette dernière (fonction de la réponse de la poutre), qui se déplace à une vitesse fonction du temps imposée.

Dans le cas d'une force constante, F_0 , l'interaction entre le chargement et la poutre n'est pas prise en compte. Ainsi, afin de connaître la réponse de cette dernière, il faut résoudre ses équations aux dérivées partielles lorsqu'elle est excitée par une force qui s'écrit de la manière suivante :

$$F_0 \cdot \delta(x - x_c(t)) \quad (2.5)$$

où :

- δ est la distribution de Dirac ;
- x est la coordonnée longitudinale de l'axe de la poutre non déformée à laquelle est calculée la réponse ;
- $x_c(t)$ est l'abscisse du point où est appliquée la force.

Dans le second cas, la masse, m , est reliée à la poutre à l'aide d'un ressort de raideur k et d'amortissement c . La force de contact, f , est exprimée ainsi :

$$f = \left\{ mg + k[z(t) - w(x_c, t)] + c \left[\frac{dz}{dt} - \frac{\partial w}{\partial t} \right] \right\} \cdot \delta(x - x_c) \quad (2.6)$$

avec :

- g l'accélération due à la pesanteur ;
- $z(t)$ le déplacement de la masse m ;
- $w(x_c, t)$ le déplacement en translation dans la direction où est appliquée la force.

Dans la formule (2.6), le couplage avec la poutre s'effectue par l'amortissement c , et par la raideur k .

Dans le troisième cas, l'expression de la force f fait intervenir des termes d'inertie. Ainsi, ce cas permet de prendre en compte la force centrifuge et la force de Coriolis dépendantes de la vitesse v , à laquelle se déplace la masse. Lee a utilisé cette méthode en étudiant la possibilité d'une séparation entre la poutre et la masse [LEE 98]. Dans le cas d'un tube d'arme, cela équivaldrait à une munition pouvant ne plus être en contact avec le tube. Cela ne doit pas arriver pour plusieurs raisons évidentes de performances de tir, notamment celles qui concernent l'étanchéité des gaz à l'arrière du projectile.

Au sein du laboratoire PRISME un modèle a été réalisé à partir de ce troisième cas, afin d'évaluer l'influence de la rectitude sur la réponse de la poutre et ainsi sur la force d'interaction entre cette dernière et le chargement mobile. La méthode de résolution choisie est la synthèse modale simplifiée afin de réduire au maximum le coût en termes de temps de calcul.

II.3.1.1.2. Modèle développé par le laboratoire

Le système tube/projectile est représenté de façon simplifiée par une poutre encastree-libre à section variable parcourue par un chargement (Figure II-4). Le diamètre intérieur est constant et le diamètre extérieur varie continument entre l'origine et l'extrémité de la poutre.

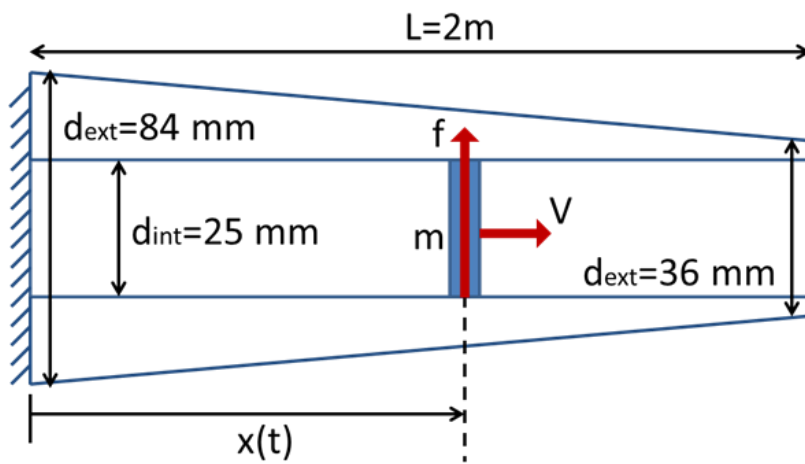


Figure II-4 : Représentation du système tube/projectile simplifié.

La force de couplage entre la poutre et la masse est obtenue à l'aide de l'équation (2.7) ci-après.

$$f = m[g - v^2 w_0'' - \dot{v} w_0']_{x_p} - m[\ddot{w} - 2v\dot{w}' - v^2 w'' - \dot{v} w']_{x_p} \quad (2.7)$$

Les termes en $\dot{}$ et en $\ddot{}$ sont respectivement les dérivées premières et secondes par rapport au temps, et les termes en ' et en '' , les dérivées premières et secondes dans l'espace. Les termes w_0 et w sont respectivement la déformée au temps zéro et celle à l'instant t par rapport à l'initiale (Figure II-5). Grâce à cette formulation de la force de contact, il est aisé de déterminer l'influence d'une variation de la courbe de vitesse de déplacement de la masse, d'une variation de la masse du tube ou de celle du chargement mobile ou encore de différents profils de rectitude.

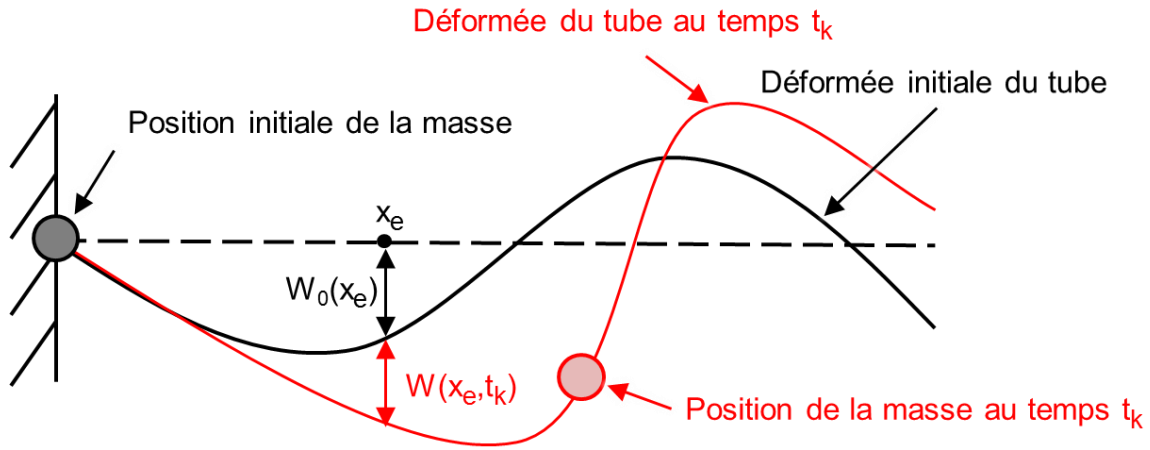


Figure II-5 : Déformée de la poutre au temps zéro et à l'instant t_k .

La déformée de la poutre à un instant t_k , et en un point x_e , $w_t(x_e, t_k)$, peut s'écrire comme suit :

$$w_t(x_e, t_k) = w(x_e, t_k) + w_0(x_e) \quad (2.8)$$

où $w_0(x_e)$ est la déformée initiale de la poutre à l'abscisse x_e (déformée statique).

Afin de déterminer la réponse de la poutre au passage de la masse, il est nécessaire de calculer la force de couplage, f , donnée par l'équation (2.7). La méthode de résolution choisie est une approche modale simplifiée car elle est stable et converge rapidement. Pour ce faire, on prend en compte les modes et fréquences propres de la poutre seule, avec ses conditions limites, et on réalise une projection de f dans la base obtenue. Cette résolution a été possible grâce à la méthode de Newmark.

La poutre considérée est de longueur L , de section tubulaire. En utilisant la théorie des poutres de Timoshenko, on discrétise la poutre en N_e éléments de longueur L_e (Figure II-6), selon la méthode donnée par To [TO 81].

Cette discrétisation permet de prendre en compte l'angle de gauchissement s dû au cisaillement. Ainsi, le vecteur des déplacements nodaux est noté de la façon suivante :

$$Q^e = \{w_i \ \psi_i \ s_i \ w_j \ \psi_j \ s_j\}^T \quad (2.9)$$

où :

- i et j sont respectivement les nœuds à gauche et à droite de l'élément considéré (Figure II-6) ;
- w est le déplacement en translation ;

- ψ est la rotation de la section droite ;
- T désigne la transposée du vecteur.

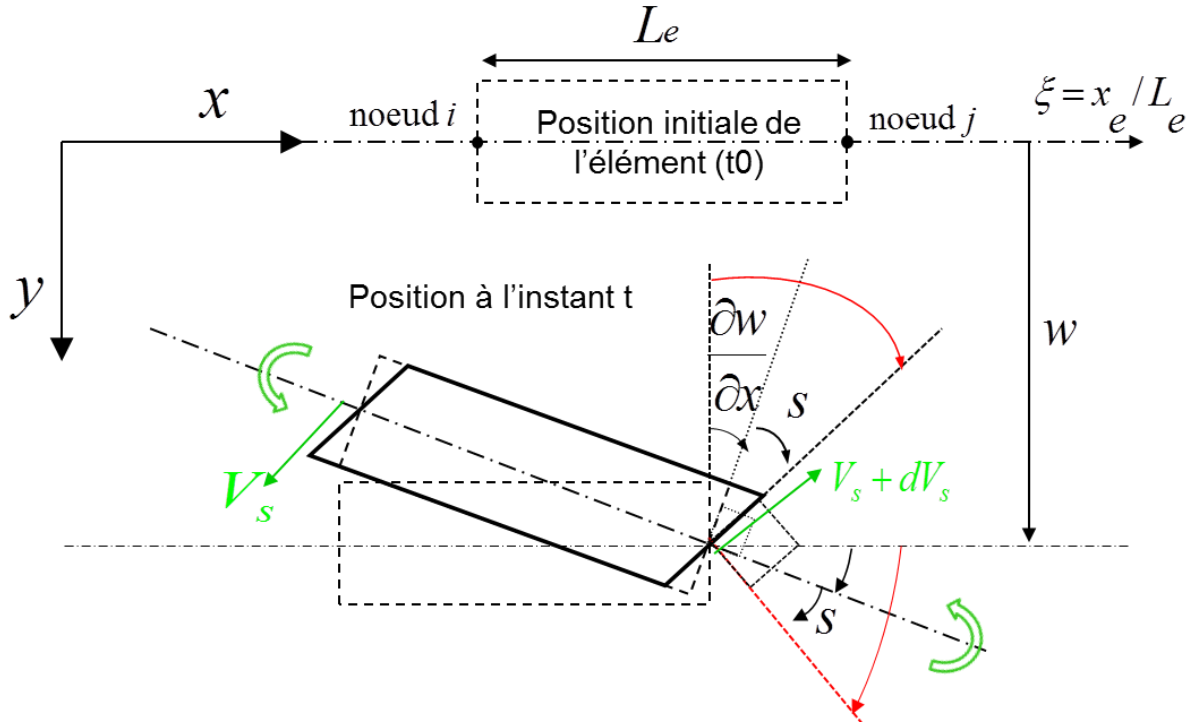


Figure II-6 : Discrétisation de la poutre en éléments finis prenant en compte le cisaillement [TO 81].

Afin de représenter la section variable de la poutre, l'aire de la section $A(x_e)$ et le moment d'inertie $I(x_e)$ de l'élément suivent une fonction donnée de la coordonnée x_e . Les déplacements sont ensuite formulés à la manière de To [TO 81], reprise par Hou [HOU 96], en tenant compte des conditions aux limites de la poutre.

Les matrices de masse m_e et de rigidité k_e sont calculées pour chaque élément. L'étape suivante consiste à assembler toutes les matrices élémentaires dans le but d'exprimer les énergies cinétiques T et les énergies potentielles U de la poutre dans son intégralité. Ces assemblages permettent d'obtenir les matrices M_0 et K_0 qui sont les matrices de masse et de rigidité de la poutre complète.

En appliquant les équations de Lagrange, il est possible d'écrire l'équation des vibrations libres de la poutre puis d'obtenir l'équation aux valeurs propres ci-après :

$$(K_0 + \omega^2 M_0) \bar{\zeta} = 0 \quad (2.10)$$

Les solutions de l'équation (2.10) sont les modes propres associés aux pulsations propres de la poutre. Un mode propre K est noté $[H_k(x), \omega_k]$ où H_k est le vecteur des fonctions propres $\Phi_k(x)$, $\Psi_k(x)$ et $S_k(x)$ associées à la valeur propre ω_k . Ainsi, les fonctions propres sont connues et sont au nombre de $N_x = N_e + 1$. Le nombre de degrés de liberté N_d est égal à $3N_x$.

Afin de déterminer la réponse de la poutre au passage du projectile, nous utilisons une méthode par superposition modale. Compte tenu des explications données par G radin et Rixen, il faut retenir un nombre de modes N inférieur à $N_d/2$ [GER 96]. Ensuite, il est nécessaire de résoudre le système à N équations d coupl es à l'aide des méthodes d'analyse modale et des propriétés des fonctions propres :

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{1}{\mu_i} \phi_i(x_p) f(x_p) \quad \text{avec } i = 1, \dots, N \quad (2.11)$$

Dans l'équation (2.11), μ_i est la masse modale du mode i et q_i la coordonn e g n ralis e de ce même mode. La résolution des N équations permet d'obtenir les coordonnées g n ralis es avec :

$$W(x, t) = \sum_{i=1}^N H_i(x) q_i(t) \quad (2.12)$$

Ainsi, l'équation (2.7) projet e dans la base des modes propres peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{aligned} f_c(x_p) = m[g - v^2 w_0''(x_p) - \dot{v} w_0'(x_p)] \\ - m \sum_{i=1}^N \phi_i(x_p) \ddot{q}_i + 2v \phi_i'(x_p) \dot{q}_i + \dot{v} \phi_i'(x_p) q_i + v^2 \phi_i''(x_p) q_i \end{aligned} \quad (2.13)$$

Grâce au développement de Taylor à l'ordre 1 et 2, il est possible d'effectuer l'approximation des $\ddot{q}_i$ et des $\dot{q}_i$:

$$\ddot{q}_i = \frac{q_{is} - 2q_i + q_{ip}}{\Delta t^2} = \frac{1}{\mu_i} \phi_i(x_p) f_c(x_p) - \omega_i^2 q_i \quad (2.14)$$

$$\dot{q}_i = \frac{q_{is} - q_{ip}}{2\Delta t} = \frac{q_i - q_{ip}}{\Delta t} + \frac{\ddot{q}_i}{2} \Delta t = \frac{q_i - q_{ip}}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\phi_i(x_p)}{\mu_i} f_c(x_p) - \omega_i^2 q_i \right] \quad (2.15)$$

où q_{is} est q_{ip} sont respectivement les coordonnées g n ralis es au nœud suivant et précédent le nœud i . On peut alors noter la force de couplage comme suit :

$$\begin{aligned}
f_c(x_p) = & m[g - v^2 w_0''(x_p) - \dot{v} w_0'(x_p)] \\
& - m f_c(x_p) \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\phi_i^2(x_p)}{\mu_i} + \frac{v \phi_i'(x_p) \phi_i(x_p)}{\mu_i} \right\} \\
& - \sum_{i=1}^N \left\{ -\phi_i(x_p) \omega_i^2 q_i + 2v \phi_i'(x_p) \frac{q_i - q_{ip}}{\Delta t} + v \Delta t \phi_i'(x_p) \omega_i^2 q_i \right. \\
& \left. + \dot{v} \phi_i'(x_p) q_i + v^2 \phi_i''(x_p) q_i \right\}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Il est possible d'en déduire l'équation ci-après :

$$q_{is} = 2q_i - q_{ip} + \Delta t^2 \frac{\phi_i(x_p)}{\mu_i} f_c - \omega_i^2 q_i \quad \text{avec } i = 1, \dots, N \tag{2.17}$$

Enfin, la formule suivante donne les déplacements de la poutre en tout point et en tout temps :

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \phi_j(x) q_j(t) \tag{2.18}$$

Il est également possible de déterminer les contraintes et les déformations. En utilisant ces équations, une routine Matlab a été développée ayant permis de faire des études paramétriques sur le comportement du tube au cours du tir.

Une comparaison a été réalisée entre les déplacements d'une poutre uniquement déformée par la gravité et une dont un défaut de rectitude sinusoïdal a été ajouté (l'ordre de grandeur de l'amplitude du défaut appliqué est réaliste). La Figure II-7 permet d'observer la déformée du tube pour les deux profils étudiés où la courbe bleue correspond à la position de la munition au cours du temps. Le constat est qu'un défaut de rectitude influence de façon non négligeable le comportement de la poutre puisque la valeur maximale de déplacement du tube avec défaut sinusoïdal est 20 fois plus importante que pour le tube rectiligne fléchissant sous son poids propre. D'autres comparaisons ont mis en avant l'amplification des déplacements du tube au passage de la munition lorsque le nombre d'oscillations du profil de rectitude augmente (nombre de période du défaut sinusoïdal).

Le modèle semi-analytique présenté ici, a mis en exergue l'influence de la rectitude, de la masse de la munition et de sa courbe de déplacement au cours du temps sur le comportement du tube. Du fait des hypothèses du modèle (encastrement de la poutre par

exemple) les déplacements calculés se sont trouvés être très inférieurs à ceux pouvant être mesurés expérimentalement.

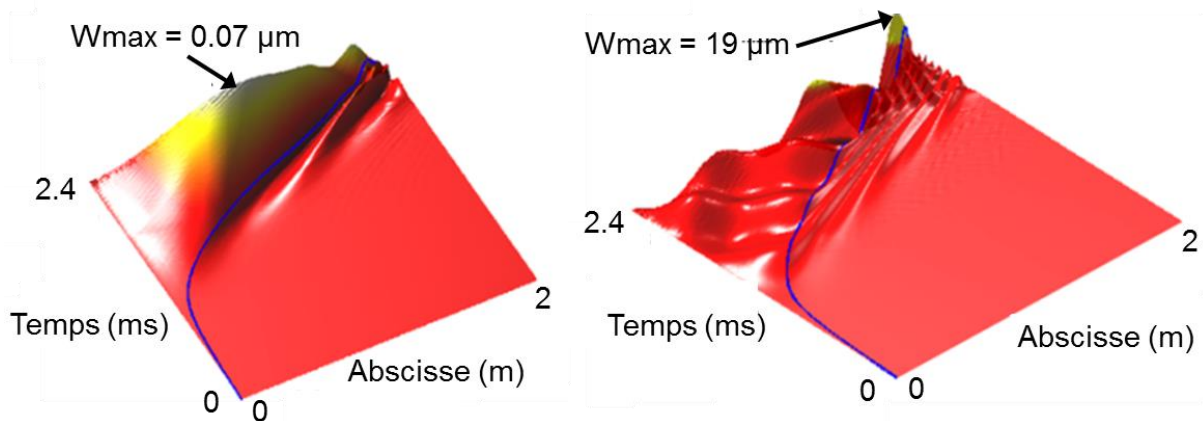


Figure II-7 : Influence d'un défaut de rectitude sinusoïdal sur les déplacements en translation du tube au cours du temps et en fonction de l'abscisse du tube (à gauche tube avec courbure due au poids propre uniquement et à droite ajout d'un défaut sinusoïdal).

Ce modèle permet uniquement d'observer le comportement du tube puisqu'il ne tient pas compte de la différence de géométrie des munitions OFL et OX. Afin d'observer le comportement du projectile, d'autres études peuvent être réalisées à partir des modèles masse/ressort.

II.3.1.2. Modèles masse/ressort

L'une des manières de représenter un système de tir est d'utiliser des modèles masse/ressort/amortisseur comme le fait le logiciel SIMBAD (SIMulation of Barrel Dynamics). Ce code est conçu pour simuler la dynamique des tubes d'arme [GUI 05]. Il permet notamment de connaître l'ordre de grandeur des mouvements du tube et de la munition pendant la phase de balistique intérieure. Les simulations peuvent être réalisées en deux ou trois dimensions. Les trois principaux éléments sont la masse reculante, comprenant l'arme et le tube avec son frein de bouche, le support et le projectile. Ils interagissent via leurs interfaces caractérisées par des raideurs et des jeux (Figure II-8). L'ensemble est mis en mouvement par une pression appliquée à la culasse de la masse reculante et une accélération communiquée au projectile suivant l'axe du tube.

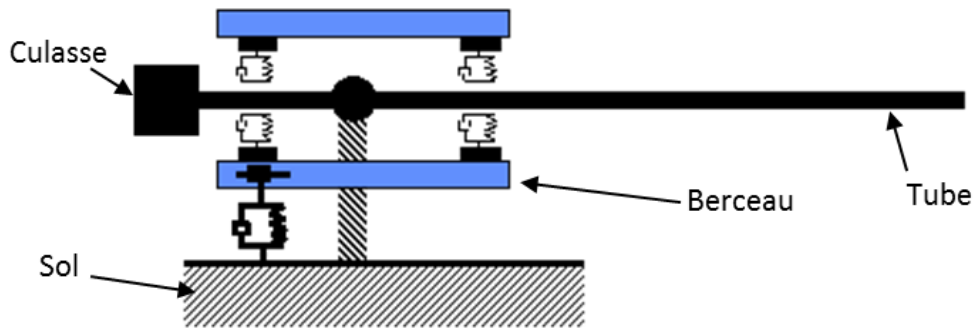


Figure II-8 : Représentation d'un système masse/ressort pouvant être modélisé à l'aide de SIMBAD [GUI 05].

Le tube est considéré comme un ensemble d'éléments poutres reliés entre eux par des nœuds vérifiant la théorie des poutres d'Euler Bernoulli ou bien celle de Timoshenko dans le cas où le cisaillement et l'inertie de rotation ne sont pas négligeables. La théorie des éléments finis permet de traiter les éléments de poutres dans leur ensemble. Pour ce faire, la matrice de rigidité $[K]$ de l'ensemble est calculée afin de relier les déplacements et rotations du tube à chaque nœud $[\delta]$ aux forces extérieures appliquées $[F_t]$:

$$[F_t] = [K] \cdot [\delta] \quad (2.19)$$

Afin de prendre en compte les forces statiques ainsi que les forces d'inertie et d'amortissement, la matrice de l'ensemble des forces est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$[F] = [F_t] - [M] \cdot [\ddot{\delta}] - [C] \cdot [\dot{\delta}] \quad (2.20)$$

avec :

- $[M]$ la matrice équivalente des masses et des inerties du tube ;
- $[C]$ la matrice des coefficients d'amortissements ;
- $[\dot{\delta}]$ la matrice des vitesses ;
- $[\ddot{\delta}]$ la matrice des accélérations.

Ce logiciel a permis de réaliser de nombreuses modélisations de tirs de 40 mm afin de comprendre l'intervention de certains paramètres sur le comportement du tube et du projectile, comme la rectitude par exemple. L'intérêt du logiciel SIMBAD est qu'il est facile de faire varier les paramètres dimensionnels des éléments constitutifs du système étudié. Ainsi, les mouvements du projectile en phase de balistique intérieure ont pu être observés tout en

faisant varier le profil de rectitude du tube. Il en ressort que la courbure du tube joue un rôle important sur les déplacements transversaux de la munition. Il a également été démontré que, lorsque la résultante des efforts s'appliquant au système ne se trouve pas dans l'axe de tir théorique (droite tangente à la zone de maintien du tube), alors les mouvements du tube sont amplifiés, ce qui peut entraîner une augmentation des mouvements de la munition. Enfin la répartition de masse de cette dernière va déterminer sa tendance à basculer dans le tube. Ce phénomène pouvant être amplifié avec les mouvements du tube.

L'utilisation de ce code permet ainsi de calculer rapidement la réponse du tube mais aussi de faire varier facilement les paramètres d'entrée. Il est parfaitement adapté à la simulation macroscopique d'un système, mais ses possibilités sont limitées dès lors qu'il s'agit d'explorer des phénomènes localisés. Cela est dû en partie au fait que le rayage n'est pas pris en considération. Or la mise en rotation du projectile induit des effets supplémentaires sur l'interaction de ce dernier avec le tube. Pour pouvoir prendre en compte les phénomènes liés au rayage, il est possible d'utiliser des logiciels basés sur les éléments finis capable de réaliser des modèles numériques tridimensionnels appliquant une résolution explicite.

II.3.2. Modèles numériques

Pour l'analyse de systèmes dynamiques, voire de dynamique rapide, des logiciels de simulation numérique basés sur les éléments finis existent. Ils permettent de résoudre des systèmes en deux ou trois dimensions. Dans le cas de l'analyse des phénomènes ayant lieu en phase de balistique intermédiaire ou extérieure, il est possible de faire intervenir la mécanique des fluides pour ce qui est de l'interaction entre le projectile et l'air ambiant. Elle peut également être utilisée pour observer l'impact de la développée de pression des gaz de combustion en phase de balistique intérieure sur les comportements mécaniques du tube et du projectile. Le modèle de simulation présenté dans la suite de l'étude ne prendra pas en compte les phénomènes de mécanique des fluides. En effet, dans notre cas, la pression des gaz à l'arrière du projectile sera considérée comme parfaitement homogène et l'analyse prendra en compte uniquement les phénomènes de balistique intérieure.

Plusieurs études se sont déjà penchées sur la question de l'influence de la rectitude du tube d'arme sur les performances de tir en utilisant la modélisation numérique [NEW 02] [CHE 07]. L'analyse réalisée par NEWILL prend en compte des déformées de tubes de 120 mm (M256) dans le plan vertical uniquement [NEW 02]. Les amplitudes des défauts ont été choisies de façon à correspondre à des ordres de grandeurs observables en sortie de production. Ainsi, des profils sinusoïdaux avec 1 variation et avec 2 à 10 variations de pente

ont été testés (une variation de pente correspond à un changement de signe de la dérivée seconde de la courbe de rectitude). Le modèle numérique a été réalisé à l'aide du logiciel LS-Dyna et d'un code appelé DYNA3D développé par l'ARL (Army Research Laboratory) afin de prendre en compte les comportements particuliers de certains matériaux composites utilisés pour la fabrication des munitions flèches. Le modèle tridimensionnel prend en compte l'effet de la pression des gaz sur les parois du tube et le recul possible de ce dernier dans le berceau. Une fois les calculs réalisés, les conditions de sortie du projectile, soit les vitesses transversales et angulaires du projectile autour de son centre de gravité, ont été évaluées (Figure II-9). Ces vitesses ont permis de calculer l'écart à la cible dû aux conditions de sortie du projectile et ainsi, de déterminer quel est le profil de rectitude optimal afin d'améliorer les performances de tir. Les résultats ont montré que les écarts à la cible ont une composante plus importante dans le sens vertical et que plus le nombre de changements de pente est important et plus l'amplitude des pics des défauts de rectitude est grande, plus les performances de tir diminuent. Ainsi, un tube parfaitement rectiligne permettrait d'obtenir les meilleurs résultats de tir. Cette étude est la première à prouver l'influence de la rectitude sur les mouvements du projectile.

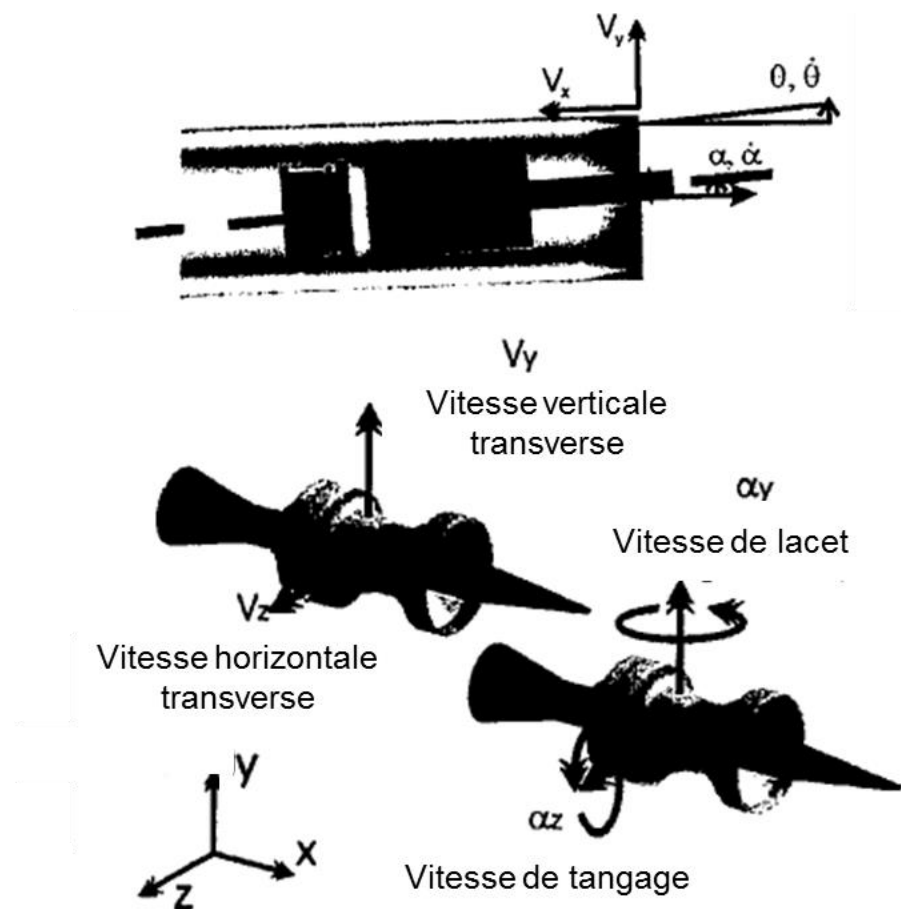


Figure II-9 : Définition des vitesses de sortie du projectile par rapport à l'axe du tube [NEW 02].

L'étude réalisée par CHEN en 2007 utilise une autre approche [CHE 07]. Le tube est divisé en 5 tronçons afin d'analyser l'effet de différentes combinaisons de défauts par le biais d'un plan d'expérience. Comme dans l'étude précédente, les calculs sont réalisés à l'aide du solveur explicite de LS-Dyna et sont tridimensionnels. Le tube considéré est lisse, de calibre 60 mm, et mesure 3.8 mètres de longueur. Le projectile a été modélisé à partir d'éléments hexaédriques à huit nœuds, et sa géométrie simplifiée (Figure II-10).

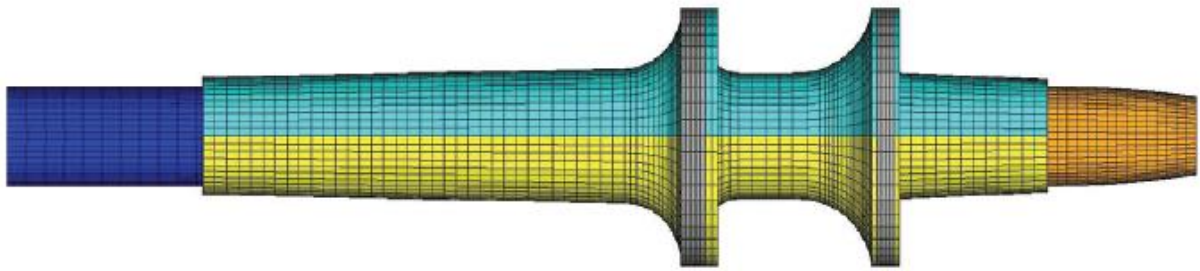


Figure II-10 : Maillage d'une munition flèche de 60 mm de diamètre [CHE 07].

Le contact entre le projectile et le tube est modélisé à l'aide d'un « surface_to_surface ». Le tronçon 5, soit la partie arrière du tube maintenue dans l'arme, est toujours aligné avec l'axe de tir quel que soit le cas de configuration. Ainsi, les formes fondamentales de rectitude testées sont présentées en Figure II-11, où la déformée du tube est augmentée.

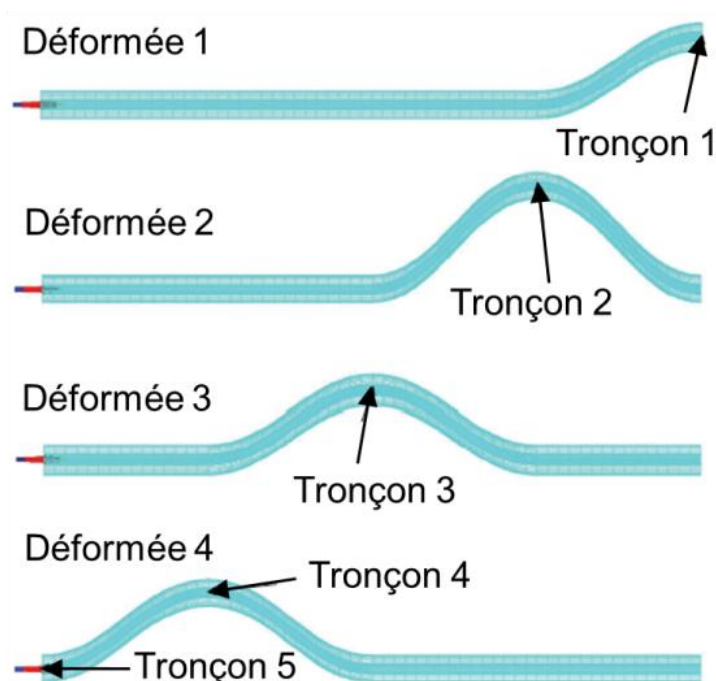


Figure II-11 : Déformées fondamentales du tube utilisées pour le plan d'expérience [CHE 07].

Les géométries fondamentales ont été combinées avec différentes amplitudes de défauts en accord avec les tolérances de fabrication du tube. Le nombre de cas testés était de 225. Les résultats ont montré que, plus l'angle de la déformée à la bouche (tronçon 1) est important, plus la vitesse latérale du projectile à sa sortie est importante. En ce qui concerne les vitesses de tangage et de lacet du projectile, elles sont amplifiées à la sortie par un défaut positionné après la chambre (tronçon 4), donc plutôt au départ du coup.

Ces études permettent de donner des exemples de méthodologie pour l'analyse numérique de défauts géométriques du tube sur la réponse du projectile. Afin de s'assurer de la représentativité d'un modèle, des expériences doivent être menées afin de pouvoir comparer leur résultats avec ceux du modèle. Pour que la comparaison soit possible, les conditions initiales des essais doivent être les plus proches possible de celles données au modèle.

II.4. Dispositifs expérimentaux

Le mouvement de la munition se compose du mouvement longitudinal de translation vers la bouche et du mouvement de rotation imposé par le rayage (roulis). Cependant, en raison des défauts géométriques du tube et des hétérogénéités de la munition, celle-ci peut présenter des mouvements supplémentaires de translation et de rotation (angles d'Euler) autour des autres axes. Ainsi la munition ne subit pas que du roulis, mais également du tangage et du lacet (Figure II-12).

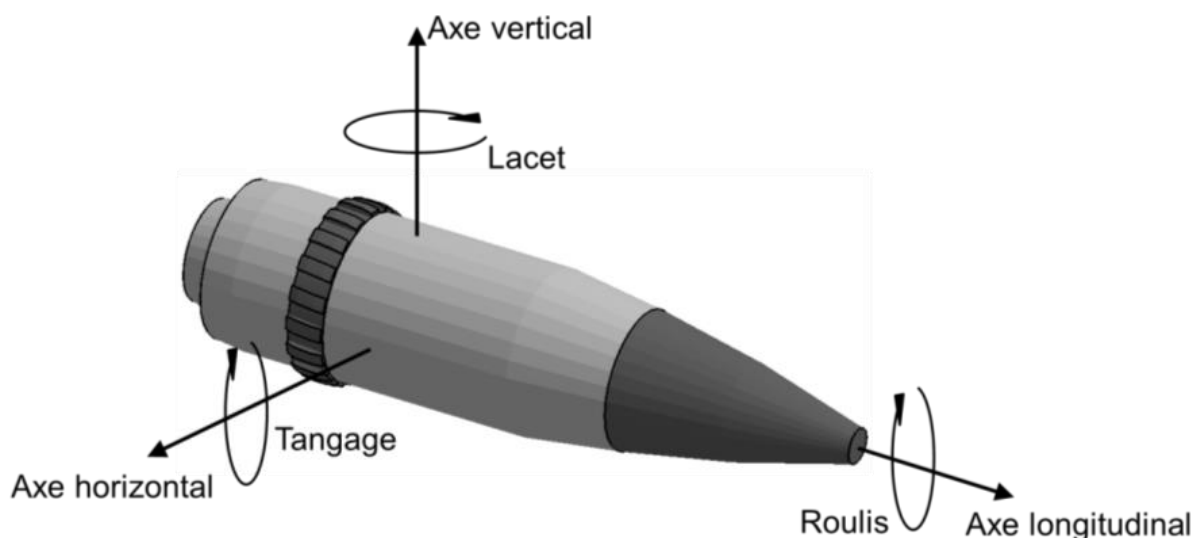


Figure II-12 : Mouvements de tangage, lacet et roulis.

Ces mouvements supplémentaires sont appelés « ballottement ». Bien qu'ils soient de faibles amplitudes, il a été démontré que, dans le domaine de l'artillerie, ces ballottements

peuvent conduire à une usure prématurée du tube, mais aussi à des écarts de performances à la cible [ANS 88]. De plus, une étude menée en 1974 a révélé que le ballotement était la cause de dommages causés sur un XM201 (calibre de 120 mm) [WAL 74].

La partie qui va suivre présente les différentes méthodes permettant la mesure des déplacements d'un projectile.

II.4.1. Mesure des déplacements d'un projectile

De nombreuses méthodes existent pour enregistrer les mouvements des projectiles en phase de balistique intermédiaire, comme des caméras ou appareils photos [EIC 10], des radars doppler [ECK 02] ou des rayons X [BOR 88]. Cependant, ces solutions ne permettent généralement pas d'avoir des mesures continues puisqu'elles n'enregistrent des données que sur des portions de trajectoire. Ainsi, seuls les déplacements longitudinaux peuvent être mesurés mais pas les déplacements transversaux. De plus, il est compliqué, voire impossible, d'employer ces méthodes en phase de balistique intérieure.

Actuellement, la seule solution permettant de mesurer ces déplacements, dans le sens radial et de façon directe, est d'utiliser un laser. Une première possibilité est de pointer le laser sur une surface réfléchissante placée sur la tête d'obus pendant le tir comme le montre la Figure II-13.

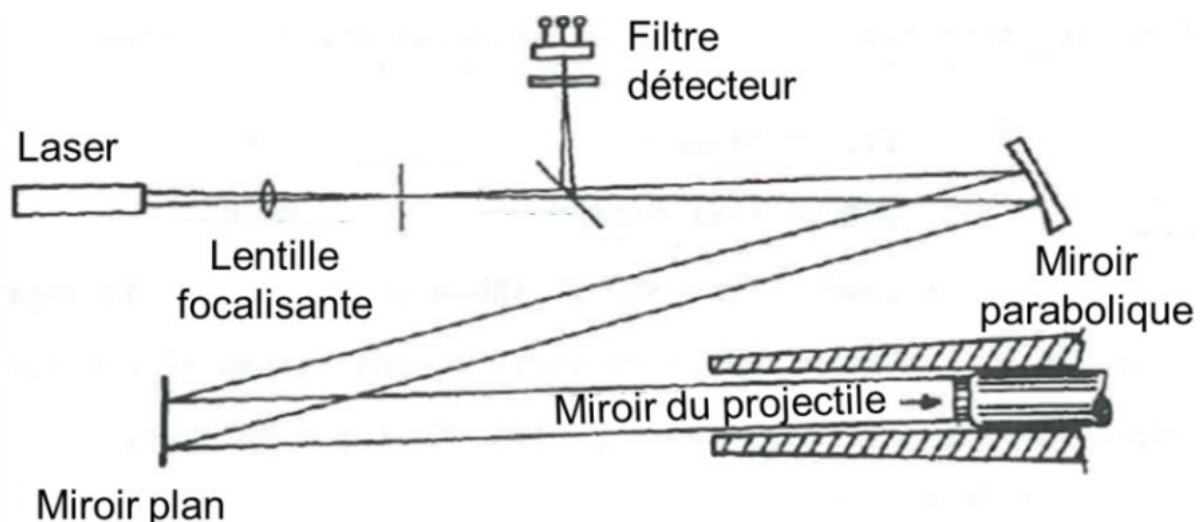


Figure II-13 : Mesure des déplacements par laser [HAU 77].

Une autre solution est de placer un laser dans la fusée afin de suivre les mouvements de la pointe de la munition. Cette technique a été utilisée pour connaître les déplacements d'un projectile d'artillerie (105 mm) en phase de balistique intermédiaire (Figure II-14). Cette solution est intéressante mais n'est peut-être pas adaptée à la mesure des déplacements en phase de balistique intérieure, pendant laquelle l'amplitude des mouvements est moins

importante. En effet, lors de cette phase, la géométrie de l'intérieur du tube et de la munition vont restreindre le ballotement de cette dernière (pour l'OXT de 25 mm, le déplacement de la pointe de la fusée ne peut pas dépasser 0.11 mm), alors que pendant la phase de vol elle est complètement libre de bouger.

Ces techniques ne permettent pas d'obtenir de bons résultats en raison de la précision de mesure. En règle générale, en phase de balistique intérieure, le diamètre du point formé par le laser est quasiment du même ordre de grandeur que l'amplitude des déplacements recherchés, sauf à pouvoir obtenir une focalisation suffisante.

Une autre méthode consiste à utiliser des capteurs d'accélération angulaire. Ainsi, à l'aide des données sur le pas de rayage du tube et des angles d'Euler, il doit être possible de remonter à tous les déplacements de la munition. Cette méthode a déjà été utilisée dans le domaine de l'artillerie de campagne en phase de balistique intermédiaire [WIL 04]. Elle est difficilement transposable au moyen calibre du fait des conditions plus sévères que subit la munition. En effet, les capteurs de vitesse angulaire les plus performants existant à l'heure actuelle ne supporteraient pas les contraintes liées au tir du 25M811, soit une accélération maximale de 75 000 g et une vitesse de rotation de 1 750 tours/seconde en sortie de tube.

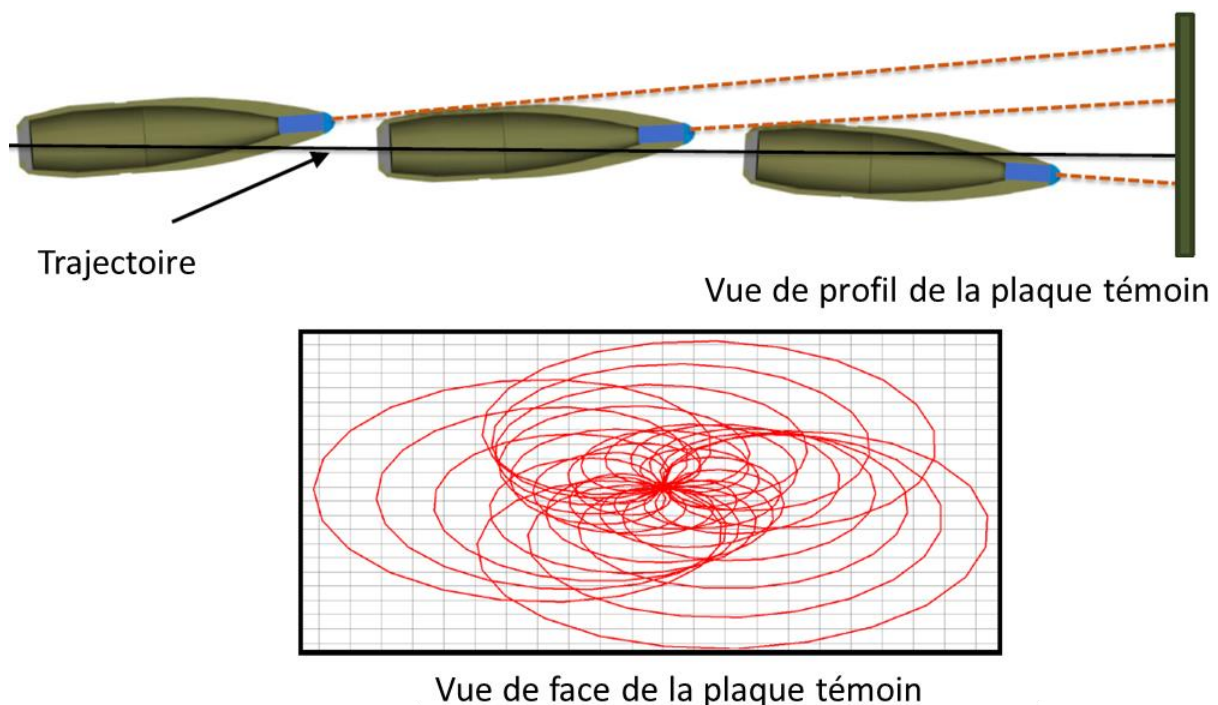


Figure II-14 : Autre méthode de mesure des déplacements par laser [OWE 11].

La dernière solution est d'utiliser des accéléromètres triaxiaux et de définir les déplacements de l'obus à l'aide d'un modèle dynamique recalé grâce aux données expérimentales.

II.4.2. Accéléromètres embarqués

L'enregistrement des accélérations d'un projectile à l'aide d'accéléromètres embarqués a déjà été réalisé de nombreuses fois dans le domaine de l'artillerie, mais aujourd'hui, aucun document ne relate une telle mise en œuvre en moyen calibre. Cela peut s'expliquer par le fait que la place disponible à l'intérieur des munitions d'artillerie est plus importante, ce qui facilite l'implantation de l'instrumentation et le choix du matériel de mesure. Un exemple d'implantation d'accéléromètres est visible en Figure II-15.

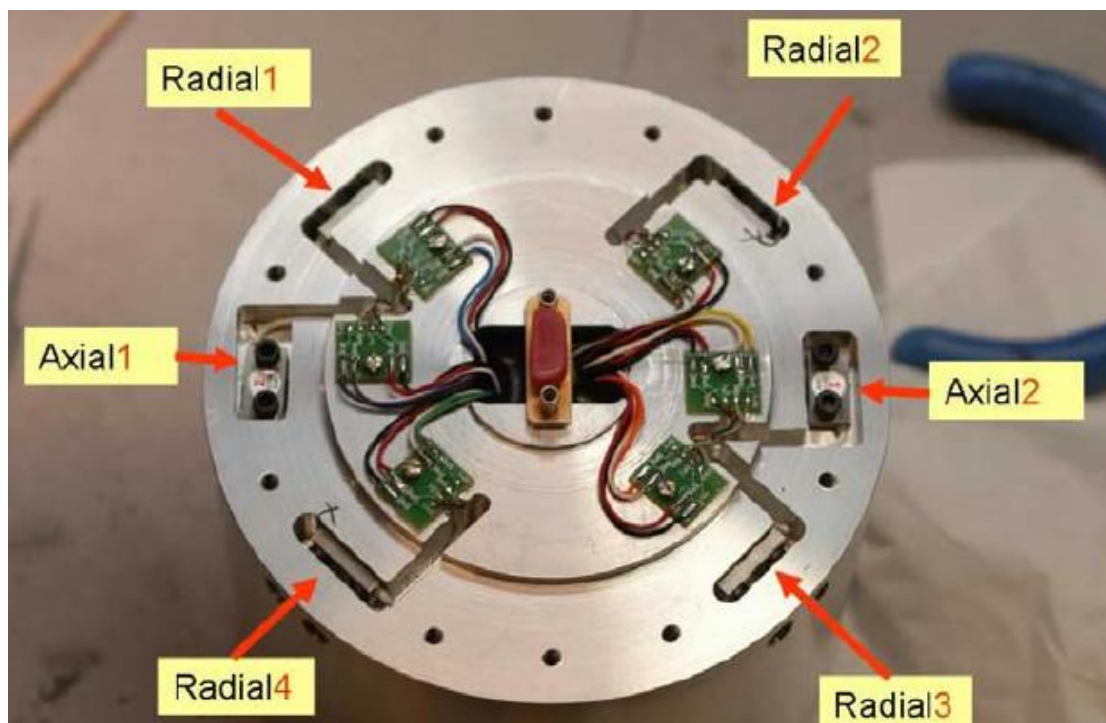


Figure II-15 : Implantation d'accéléromètres dans une munition d'artillerie [LAU 08].

Selon une étude de LODGE, la rectitude des tubes et leurs arcures influencent beaucoup le modèle dynamique de l'arme [LOD 01]. Ces travaux visaient à mesurer les accélérations, selon les trois axes, d'une munition de 120 mm tirée dans un tube lisse ayant un profil de rectitude dégradé à l'extrême. Le but de l'étude était de pouvoir remonter aux déplacements du projectile. Le rapport démontre qu'il est difficile d'obtenir les accélérations dans le sens transversal du tube. En effet, si l'axe de mesure dans les sens radial n'est pas parfaitement orthogonal à l'axe de symétrie de la munition, alors cet axe mesurera une part de l'accélération longitudinale. Cette dernière étant beaucoup plus importante que les accélérations transverses, on risque d'avoir des erreurs du même ordre de grandeur que les

accélérations elles-mêmes. Pour contrer ce problème, les accéléromètres sont placés à 30° par rapport à l'axe longitudinal. Malgré les nombreuses précautions prises lors de la préparation de ces essais, le matériel n'a pas résisté aux contraintes liées au tir.

Toujours en artillerie, des accélérations longitudinales ont été mesurées en phase de balistique intérieure [MUL 06]. Les essais ont été réalisés avec des munitions ayant des ceintures dérapantes afin de s'affranchir de la rotation de la munition. Les résultats chiffrés étant classifiés, ils ne sont pas reproduits dans le rapport. Cependant, les courbes sont dites exploitables par les auteurs.

Une étude récente a été menée afin de mesurer les accélérations d'une munition de 120 mm pendant son passage dans le tube et pendant son vol [GRZ 12]. Le projectile avait été modifié afin de réduire sa vitesse de rotation. Des accéléromètres différents ont été utilisés pour la phase de balistique intérieure et intermédiaire car les accélérations subies dans le tube sont plus importantes. Les résultats sont qualifiés de satisfaisants. Cependant les courbes des accélérations dans le sens transversal ne sont pas présentées.

Dans chacun des cas étudiés, soit la munition avait une vitesse de rotation quasiment nulle, soit elle était modifiée pour éviter d'avoir une rotation trop importante. Ceci montre bien la complexité d'instrumenter des projectiles de 25 mm à l'aide d'accéléromètres.

Afin de bien choisir les accéléromètres qui permettront la réalisation des essais, il est nécessaire de connaître les ordres de grandeurs des accélérations que subira la munition de plein calibre de 25M811. La courbe d'accélération longitudinale est parfaitement connue grâce au fichier Sibil¹. En revanche, il est plus difficile de savoir quelles seront les accélérations de la munition dans le sens radial. Il est possible de trouver des éléments de réponse dans le domaine de l'artillerie. Les études ayant été réalisées sur le sujet montrent bien que les accélérations radiales maximales ne dépassent jamais les valeurs d'accélération longitudinale [COR 06] [LAU 08] [ZU 10], et qu'elles sont généralement 1.5 à 5 fois moins importantes (Figure II-16).

¹ Sibil est un code de calcul des données de balistique intérieure (déplacement, vitesse, accélération de la munition ainsi que la pression culot). Il calcul la cinématique de réaction de la poudre en fonction d'un type de munition, d'un type d'arme et d'un type de poudre donnés (qualité, quantité ...).

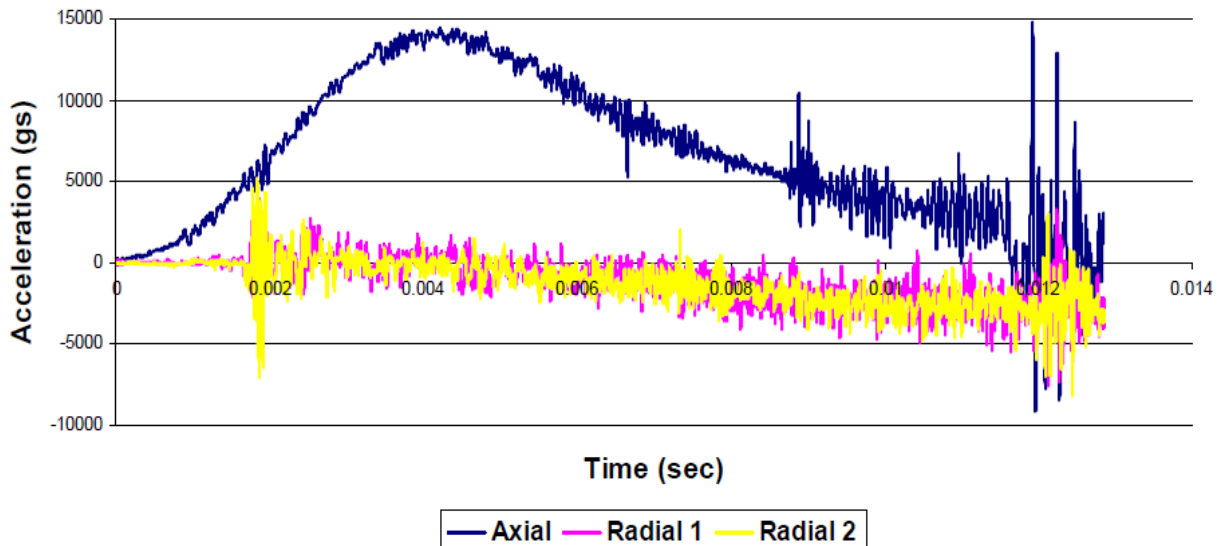


Figure II-16 : Accélérations longitudinale et radiales expérimentales (155 mm) [LAU 08].

II.4.3. Moyens d'acquisition des données

II.4.3.1. Récupération des données en différé

A ce jour, les mesures des paramètres de translation, rotation et vibration d'un projectile durant son temps de parcours à l'intérieur du canon sont réalisées par des enregistreurs « data logeurs » embarqués dans le projectile. Les données sont recueillies après récupération du projectile. Pour les petits projectiles, cela limite la quantité d'informations pouvant être stockée. De plus, il faut que le matériel résiste à l'impact en phase de balistique terminale, ce qui est rarement le cas malgré des solutions de récupération « douces » (caisses à chiffons ou à copeaux, ou systèmes réalisés à partir de pneus recyclés [BER 04]). En général, seule une munition sur trois est récupérable.

Il existe des solutions d'acquisition en temps réel comme la technique du « tir au fil » présentée en Figure II-17 [WEG 87]. Un fil en cuivre est tendu entre la pointe du projectile et la bouche du tube, fil permettant la transmission des données en temps réel. Cette même technique peut être utilisée pour connaître le déplacement du projectile au cours du temps en remplaçant le fil de cuivre par un fil de résistance. La variation de résistance au cours du temps permet de connaître la longueur du fil et ainsi de déterminer la position de la munition. Cette technique nécessite des changements géométriques importants de la munition, puisqu'elle doit avoir une forme d'entonnoir à l'avant. Ces modifications géométriques peuvent considérablement changer le comportement du projectile et donc ne pas donner des résultats représentatifs de la réalité. De plus, ce type d'essais est généralement réalisé à l'aide de tubes lisses. C'est pourquoi il a été fait le choix de la télémétrie, présentée dans le paragraphe suivant.

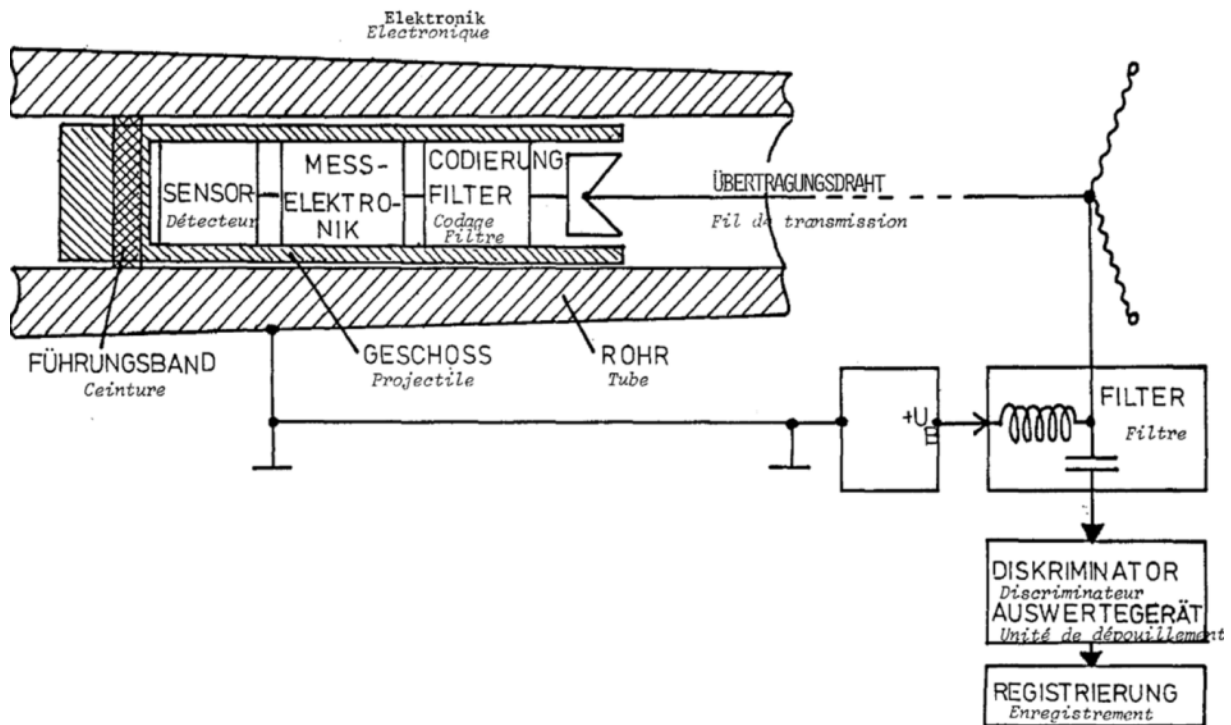


Figure II-17 : Schéma de principe de la méthode de tir au fil [WEG 87].

II.4.3.2. Acquisition en temps réel

Il est possible d'utiliser la télémétrie afin de récupérer les données en temps réel. Une méthode consiste à utiliser des signaux GPS [GRZ 12]. Une telle solution nécessite une antenne d'émission de grande taille qui ne pourrait pas entrer dans un OX de 25 mm. De plus, la majorité des systèmes de télémétrie nécessite l'utilisation de signaux qui seraient perturbés par la présence du tube.

Un document de l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint Louis (ISL) présente un schéma de principe d'un système optoélectronique pour l'acquisition de données à partir d'un projectile au départ du coup [WEG 84] (Figure II-18). Cependant, ce dispositif n'a jamais été appliqué jusqu'à ce jour.

Un tel système permet l'acquisition de données en temps réel. C'est cette solution qui sera exploitée dans le but d'enregistrer les accélérations radiales d'une munition de plein calibre de 25 mm en phase de balistique intérieure. Ces accélérations permettront de recalculer celles obtenues à l'aide du modèle numérique de simulation de tir. Une fois cette opération effectuée, il sera possible d'utiliser le modèle afin d'étudier l'impact de la variation de certains paramètres géométriques du tube sur les conditions de sortie du projectile.

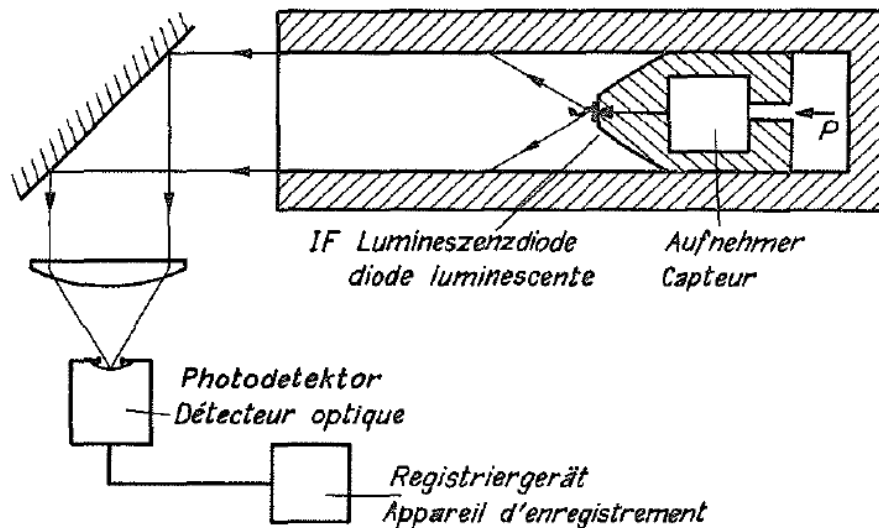


Figure II-18 : Schéma de principe d'un système optoélectronique pour l'acquisition de données en phase de balistique intérieure [WEG 84].

II.4.4. Mesure du gonflement du tube

Afin de mesurer le gonflement d'un tube d'arme au passage d'un projectile, il est possible d'utiliser des jauges de déformations [SAF 11]. Pour assurer l'étanchéité des gaz, la ceinture de la munition est légèrement plus large que le diamètre intérieur du tube et applique un effort sur ce dernier lors de son passage, le faisant gonfler. Le gonflement entraîne des déformations maximales au niveau de la paroi interne du tube et minimales sur la paroi externe (Figure II-19).

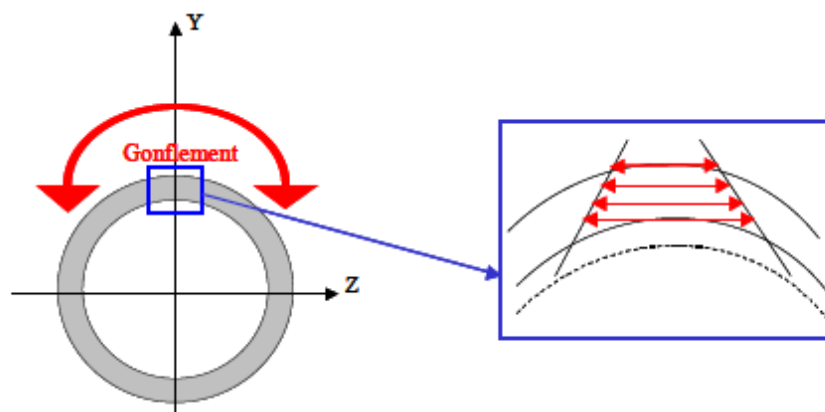


Figure II-19 : Déformations du tube dues au gonflement [SAF 11].

Alors que la flexion conduit à une compression ou bien un étirement des fibres longitudinales du tube, le gonflement mène à des déformations circonférentielles, soit à un allongement dans le plan tangent à la section du tube. La Figure II-20 présente le sens de positionnement des jauges de déformations pour la mesure du gonflement et la mesure de la flexion.

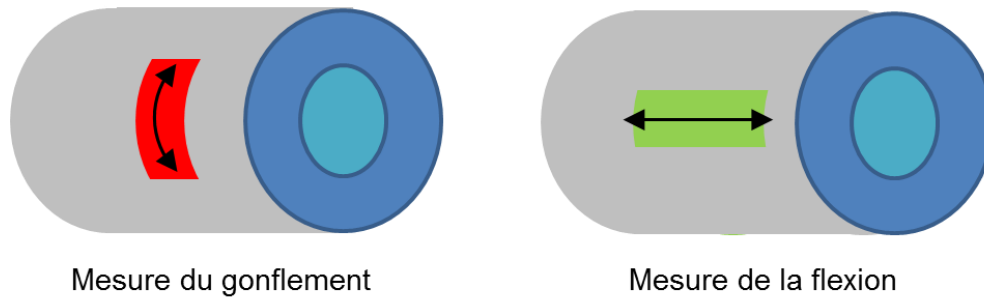


Figure II-20 : Sens de positionnement des jauges de déformation sur le tube pour la mesure du gonflement.

Dans le but de ne mesurer que les déformations de gonflement et faire abstraction de celles dues à la flexion, le gonflement peut être mesuré à l'aide de deux jauges montées en demi-pont de Wheatstone diamétralement opposées (Figure II-21).

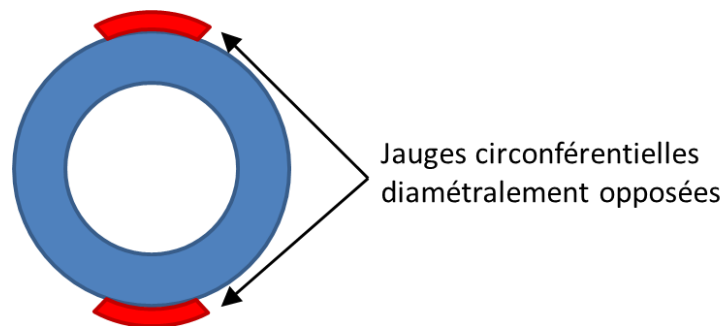


Figure II-21 : Vue en coupe d'un tube avec des jauges de déformation en demi-pont.

Mesurer le gonflement du tube est utile afin de recalibrer un modèle numérique de simulation de tir. La valeur du gonflement étant directement liée au contact entre le tube et la munition, si le modèle présente un gonflement proche des mesures expérimentales, alors cela donne une première indication quant à la représentativité du contact modélisé.

II.4.5. Mesure des déplacements de la bouche du tube

Afin de déterminer si le comportement du tube entre différents tirs est reproductible ou non, il est possible de mesurer les déplacements de la bouche. Il existe plusieurs méthodes afin de mesurer ce paramètre. L'une d'entre elles utilise un miroir positionné au niveau de la bouche du tube qui reflète un faisceau lumineux jusqu'à un convertisseur analogique. La source lumineuse et le détecteur sont montés à l'extrémité de la culasse du tube. Ce système permet d'obtenir la déviation angulaire de la bouche du canon par rapport à la culasse grâce au déplacement du faisceau de lumière au niveau du détecteur [BLA 78]. Une autre technique consiste à utiliser un suiveur électro-optique de déplacement qui est en mesure de détecter une cible ayant une discontinuité dans l'intensité de la lumière, réfléchi ou émise (voir Figure II-22) [STE 78].

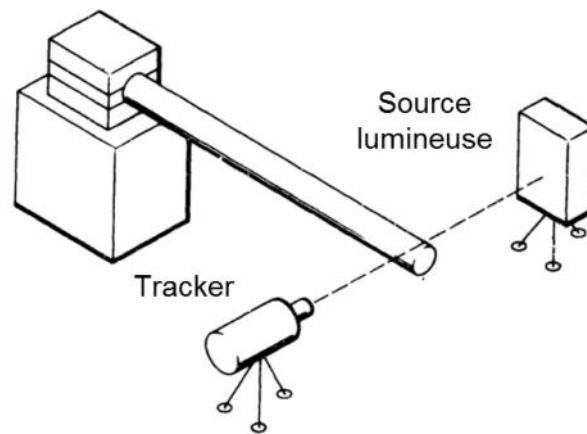


Figure II-22 : Mesure du déplacement de la bouche du tube à l'aide d'un suiveur électro-optique [STE 78].

Tous ces systèmes restent complexes à mettre en place. Aujourd'hui, il existe des capteurs à courant de Foucault permettant de mesurer la variation d'impédance au cours du temps (voir Figure II-23) [BAE 13], et de connaître la distance entre le capteur et la surface du tube.

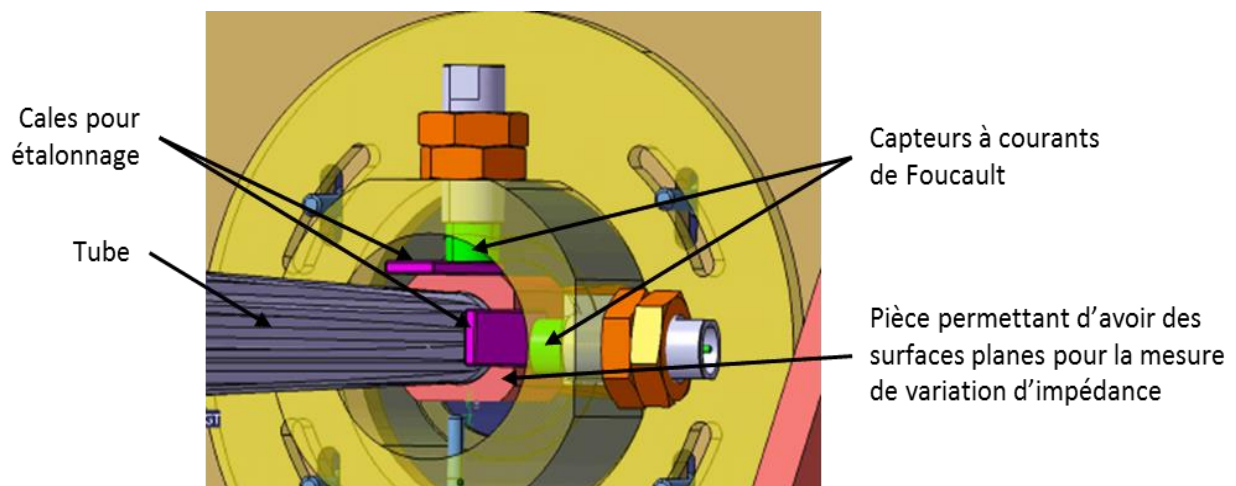


Figure II-23 : Schéma de positionnement des capteurs à courant de Foucault [BAE 13].

En positionnant un capteur au-dessus du tube et un second sur l'un des côtés comme présenté sur la Figure II-23, il est alors possible de mesurer les déplacements verticaux et horizontaux de la bouche du tube lors de chaque tir. L'inconvénient de ces capteurs est qu'il est nécessaire d'avoir une surface plane afin de mesurer les variations d'impédance. Un tube par définition a une section cylindrique ne permettant pas l'utilisation directe de ce type de moyen de mesure. C'est pourquoi il a été nécessaire d'ajouter une pièce attachée au frein de bouche du tube de 25M811 afin de mesurer les déplacements de la bouche.

II.5. Conclusions

Une étude américaine a permis la décomposition des écarts à la cible en différents facteurs liés à la balistique intérieure, intermédiaire ou extérieure. La conclusion de l'étude est que le contributeur majeur des écarts à la cible est la balistique intérieure. L'état de l'art dans le domaine de la précision de tir des armes de gros et moyen calibre a permis de faire un récapitulatif de tous les paramètres qui influencent le parcours de la munition au cours de la phase de balistique intérieure. Parmi ces paramètres, certains sont liés à la géométrie de la munition, à la répartition des gaz propulsifs et d'autres, liés à la géométrie de l'arme et du tube (rectitude, alignement de la chambre avec l'âme du tube...). Ce sont ces derniers qui nous intéressent, et plus particulièrement, ceux jouant sur la précision de l'arme de 25 mm.

De nombreuses études empiriques ont été réalisées au début du développement de cette arme. Les conclusions des différentes études ayant révélé que le maintien de l'arme sur affût a un effet important sur la précision, un protocole de serrage a été développé afin de ne pas faire varier ce paramètre lors des recettes. Le frein de bouche est présenté comme un élément qui nécessite d'être parfaitement symétrique et dont les ouïes doivent être positionnées à l'horizontale afin d'éviter une mauvaise répartition des gaz. Le tirage de bande joue sur la justesse et la dispersion dans des proportions relativement faibles par rapport au décentrage du centre de gravité de la masse reculante par rapport à l'axe du tube par exemple. Depuis ces observations, des améliorations ont été apportées à l'arme de 25 mm ayant pu changer l'ordre d'importance des différents paramètres considérés comme influents et en mettre de nouveaux en exergue.

Les méthodes empiriques étant coûteuses, des études statistiques permettent également de mettre en avant les paramètres jouant sur la précision de tir. La démarche consiste à calculer les coefficients de corrélation de Bravais-Pearson de deux paramètres confrontés et ainsi de pouvoir déterminer si ce dernier est important ou non. Ce type d'étude a été réalisé à partir de la base de données de la version de l'arme de 25 mm obtenue après améliorations. Ainsi, la concentricité des portées du tube, la concentricité âme/fond de rayure à la bouche du tube, la concentricité entre le diamètre du tube et celui de la chambre, la rectitude, l'arcure du tube et certains jeux permettant au tube de tourner autour de son axe sont ressortis comme des paramètres ayant une forte influence sur les résultats à la cible. Cette base de données ayant été enrichie depuis cette analyse, elle sera de nouveau étudiée et fera l'objet du chapitre III du présent document.

Une autre façon de déterminer l'influence d'un paramètre est de simuler le système étudié à l'aide d'un modèle semi-analytique ou numérique et de faire varier ce paramètre

dans des proportions réalistes. Dans le cas de l'interaction tube/projectile, afin d'observer des phénomènes localisés, il est nécessaire d'avoir recours à des modèles numériques tridimensionnels. Parmi les études de ce type, certaines se sont intéressées à l'influence de la rectitude sur le comportement d'une munition de 60 ou 120 mm au cours de son passage dans le tube. Elles ont permis de démontrer l'influence de la rectitude et de donner les conditions de sortie de la munition en fonction de ce paramètre. Ces analyses permettent de faire varier un à un les paramètres géométriques du tube, sans être dépendant des conditions de fabrication des armes et tubes. La modélisation est alors la méthode la moins coûteuse et la plus robuste afin de réaliser une étude paramétrique. Cependant, afin de disposer d'un modèle fiable, il est nécessaire de vérifier sa représentativité.

La représentativité d'un modèle de simulation est vérifiée à l'aide de données expérimentales. Dans le cadre de l'analyse du comportement de la munition en phase de balistique intérieure, il est nécessaire de connaître les déplacements de cette dernière afin de vérifier que ceux obtenus numériquement sont corrects. A l'heure actuelle, aucune méthode connue ne permet de les mesurer avec précision. C'est pourquoi d'autres solutions ont été imaginées et réalisées dans le domaine de l'artillerie, permettant de mesurer les accélérations de la munition en phase de balistique intérieure à l'aide d'électronique embarquée. Ce type d'instrumentation est plus difficile à mettre en œuvre en moyen calibre du fait des contraintes de tir plus pénalisantes (accélérations et chocs subies par la munition) et du volume disponible pour l'instrumentation, à l'intérieur du corps d'obus. D'autres mesures sont généralement réalisées afin d'ajuster un modèle de simulation de tir : ce sont celles du gonflement du tube. Elles peuvent ainsi être réalisées à l'aide de jauges de déformations positionnées en demi-pont de Wheatstone. Afin de rendre compte du comportement du tube, il est également possible de mesurer les déplacements de la bouche à l'aide de capteurs à courant de Foucault.

Le chapitre suivant présente l'étude statistique menée à partir de la base de données du 25M811 après son enrichissement. Elle permet de déterminer les paramètres géométriques du tube et de l'arme ayant la plus grande influence sur les résultats à la cible.

III. Etude statistique

III.1. Paramètres étudiés

Une nouvelle analyse statistique concernant l'influence des paramètres géométriques de l'arme et du tube de 25M811 sur la précision de tir est présentée dans ce chapitre. Elle reprend la méthode précédemment présentée dans la partie II.2 [BAE 13]. Elle permettra également une étude plus approfondie de la rectitude.

Dans le cas de l'analyse réalisée ici, les conditions initiales de température ambiante et du tube sont considérées comme identiques pour toutes les recettes. Ces hypothèses sont recevables car tous les tirs de recette sont effectués dans une gaine où la température est maintenue à 21°C. De plus, ces tirs ont lieu après trois coups de flambage permettant ainsi de chauffer le tube et de caler le bâti de la même manière pour tous les tirs. Le chauffage du tube est nécessaire afin d'obtenir des courbes de développée de pression dans la chambre identiques. L'allure de ces pressions est différente pour chacun des trois coups de flambage réalisés dans les mêmes conditions (Figure III-1). En revanche, une fois le tube chauffé, les tirs suivants montrent une courbe de pression identique à quantité de poudre égale (Figure III-2). Les tirs numéro 4 et 5 ont été réalisés avec une quantité de poudre inférieure à celle utilisée pour les coups de flambage. Le bâti est toujours serré de la même manière avec un couple bien défini, ceci afin de ne pas faire varier un paramètre supplémentaire. Les munitions sont considérées comme parfaitement identiques, c'est-à-dire que nous ne nous préoccupons pas de la variabilité de leurs paramètres géométriques (tolérances de définition).

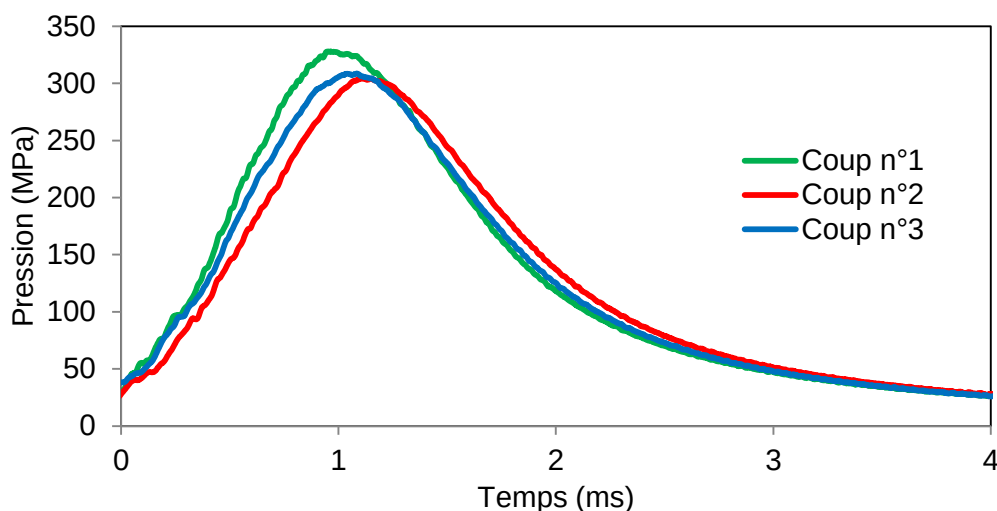


Figure III-1 : Pression dans la chambre lors des coups de flambage.

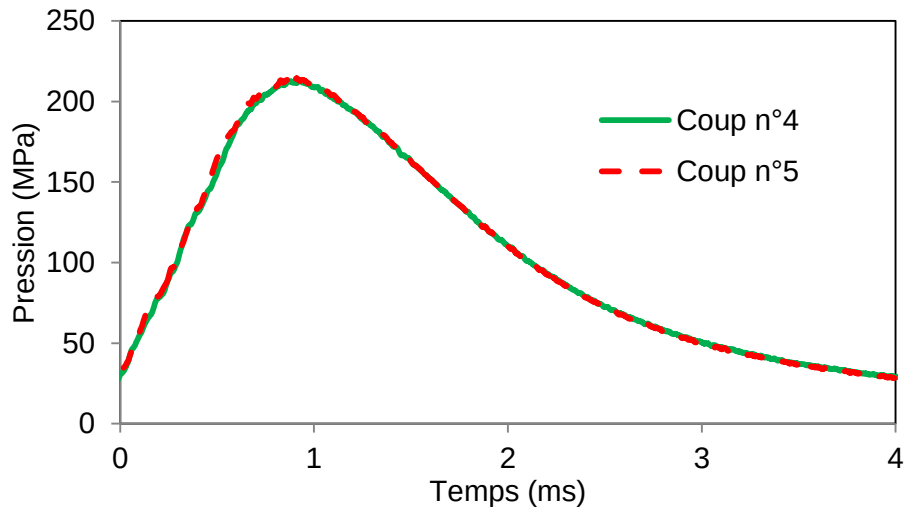


Figure III-2 : Pression dans la chambre lors des tirs suivant les coups de flambage.

Le fait de réaliser les essais dans une gaine permet de réduire au maximum l'influence des paramètres intervenant au cours de la phase de balistique extérieure tels que le vent par exemple.

Les paramètres retenus pour l'étude sont ceux pour lesquels la tolérance peut être resserrée grâce à une amélioration des procédés de fabrication. L'analyse est réalisée à l'aide de mesures et de recettes réalisées sur du matériel issu de production.

Ainsi 78 paramètres géométriques ont été retenus pour l'analyse. Ils concernent des :

- Concentricités entre les diamètres des portées du tube et l'âme du tube : ces défauts peuvent conduire à des déformations du tube dans des axes préférentiels et une possible amplification du phénomène avec l'interaction du tube avec le berceau ou l'arme ;
- Coaxialité entre la chambre et l'âme du tube : elles peuvent impliquer un angle d'introduction du projectile dans le tube ;
- Concentricités entre des diamètres extérieurs du tube et l'âme de ce dernier : ces défauts peuvent entraîner des déformations du tube dans des axes préférentiels ;
- Concentricités entre les portées du frein de bouche et l'âme du tube : un tel écart de concentricité signifie un défaut de parallélisme entre l'axe du frein de bouche et celui du tube pouvant causer une inhomogénéité de l'évacuation des gaz au largage de la munition, et modifier les conditions de sortie de cette dernière ;

- Concentricité âme/fond à la bouche du tube : un tel défaut peut entraîner un balourd du projectile ;
- Diamètres extérieurs du tube au niveau de ses portées et zones de maintien : une différence trop importante entre ces diamètres peut occasionner un jeu entre le tube et le berceau ou l'arme ;
- Diamètres intérieurs de la chambre : ils peuvent conduire à une variation du jeu entre la cartouche de la munition et le tube donc à une variabilité dans l'introduction du projectile ;
- Valeurs d'arcure : peuvent entraîner un redressement du tube au passage du projectile dans un axe préférentiel ;
- Valeurs de rectitude : influencent directement l'interaction tube/projectile ;
- Valeurs de diamètres et autres tolérances du manchon et du berceau : peuvent jouer un rôle dans le maintien du tube ;
- Diamètre du doigt de manchon : peut changer les conditions de maintien de l'arme ;
- Jeux tube/manchon, manchon/berceau et doigt de manchon/berceau : peuvent induire des variations des conditions de maintien du tube.

Ces paramètres ont ensuite été confrontés aux résultats des recettes, c'est-à-dire à la dispersion et la justesse sur cible à 100 mètres.

III.2. Corrélation paramètres/performances

III.2.1. Méthode d'analyse

Afin de rendre compte de l'influence d'un paramètre sur la précision de tir, les paramètres ont été confrontés un à un aux caractéristiques définissant la précision d'une arme à l'aide d'un calcul de coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (2.4). Par définition, plus le coefficient de corrélation calculé se rapproche de 1 ou -1, plus les deux paramètres confrontés sont interdépendants (Figure III-3). Si le coefficient calculé est supérieur à 0.7 ou bien inférieur à -0.7 alors il est nécessaire d'observer le nuage des points considérés. En effet, le calcul du coefficient de corrélation ne permet de donner qu'une indication quant à l'interdépendance des paramètres analysés. En réalité, une ou plusieurs valeurs aberrantes peuvent entraîner un changement de signe ou bien de la valeur du coefficient de corrélation. C'est pourquoi il est important d'observer le nuage de points afin

de vérifier qu'ils suivent bien une droite, celle de la régression linéaire permettant le calcul du coefficient de corrélation.

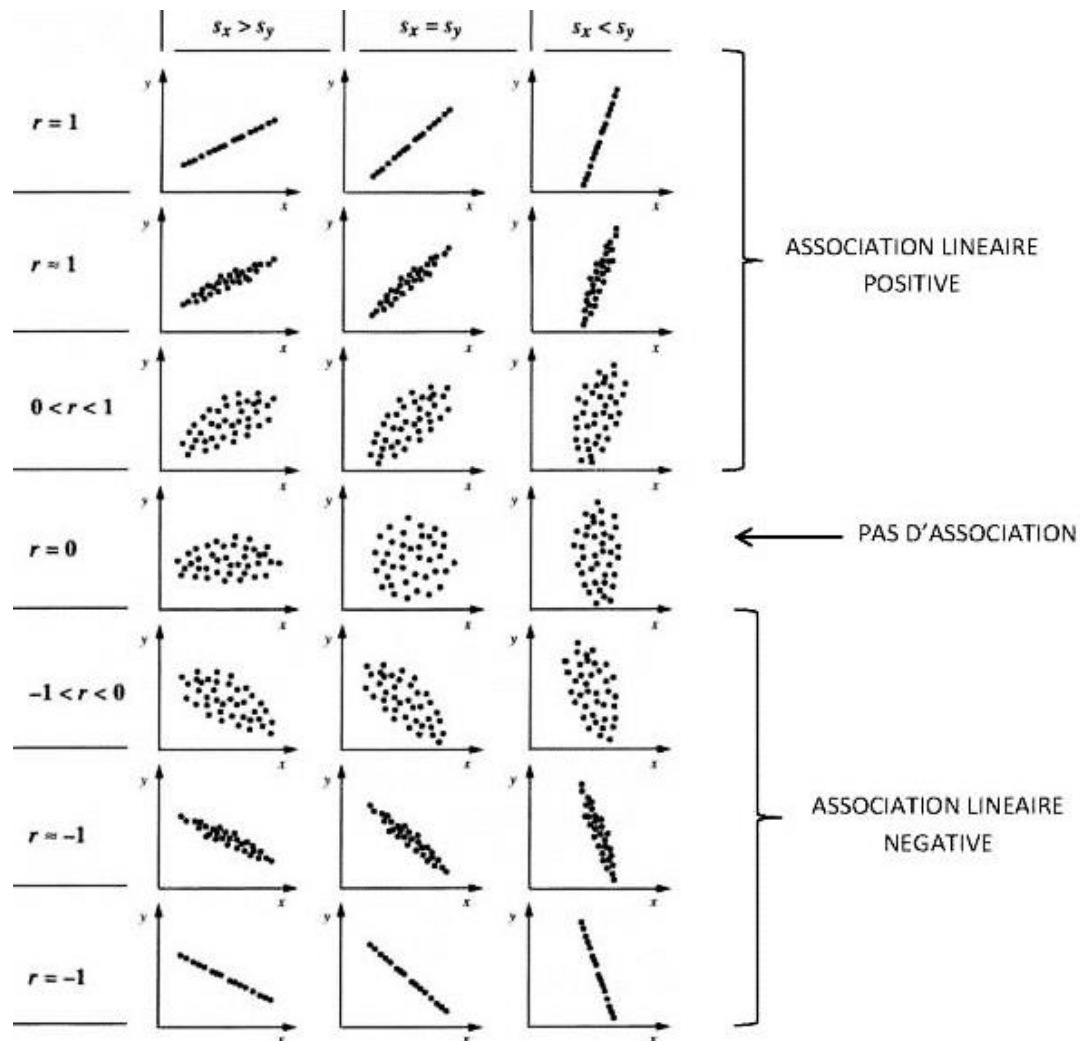


Figure III-3 : Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, r , calculé à partir de différents nuages de points [ULB 15].

Un paramètre est considéré comme ayant une forte influence sur la dispersion ou sur la justesse si le coefficient de corrélation calculé est proche de 1 ou -1, mais ça n'est pas l'unique condition à respecter. En effet, plus la taille de l'échantillon observé est faible, plus un fort coefficient peut être dû au hasard. A l'inverse, lorsque l'échantillon est très important, un faible coefficient de corrélation peut cacher un important lien entre les deux paramètres confrontés. C'est pourquoi il est nécessaire de vérifier la significativité du coefficient à l'aide du test du r [SNE 71]. Pour ce faire, il est nécessaire de se référer au Tableau 2. Dans ce tableau, p représente le pourcentage de chance que le coefficient de corrélation calculé soit dû au hasard bien qu'il soit supérieur à la valeur minimale indiquée. Par exemple, pour un échantillon de taille 10, les valeurs critiques du coefficient de Pearson sont 0.632 au seuil de 5% et 0.765 au seuil de 1 %. Ainsi, si le coefficient de corrélation calculé est de 0.98 alors il

n'y a qu'un pourcent de risque de se tromper lorsque l'on considère les deux paramètres observés comme interdépendants.

Tableau du coefficient de Corrélation minimum		
degré de liberté (taille de l'échantillon-2)	p=5%	p=1%
3	0.878	0.959
4	0.811	0.917
5	0.754	0.874
6	0.707	0.834
7	0.666	0.798
8	0.632	0.765
9	0.602	0.735
10	0.576	0.708
15	0.482	0.606
20	0.423	0.537
30	0.349	0.449
50	0.273	0.354
100	0.195	0.254

Tableau 2 : Test de significativité du coefficient de corrélation de Pearson.

Tous les paramètres géométriques retenus pour l'étude sont confrontés aux justesses verticale, horizontale et globale ainsi qu'aux dispersions verticale, horizontale et globale. La dispersion est une valeur toujours positive. Ce n'est pas le cas de la justesse verticale et de la justesse horizontale. Ainsi, il est possible d'obtenir des nuages de points suivant une fonction carrée montrant qu'il existe une corrélation non linéaire. C'est pourquoi les paramètres géométriques sont également confrontés aux valeurs absolues des justesses verticale et horizontale (Figure III-4).

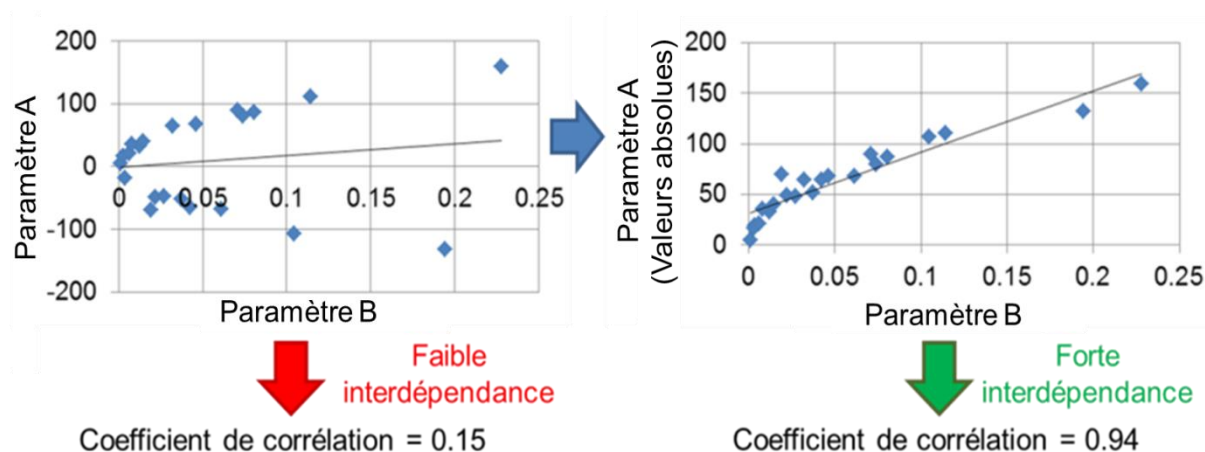


Figure III-4 : Explication de l'utilité de confronter chaque paramètre aux valeurs absolues.

III.2.2. Résultats

Les paramètres retenus comme influençant la précision de tir sont ceux pour lesquels au moins un des coefficients de corrélation calculés à partir des résultats sur cible est significatif au seuil de 1 %. Le Tableau 3 présente les coefficients des paramètres retenus pour des résultats de tir d'OX, et le Tableau 4 pour des résultats de tir d'OFL. Afin de faciliter la lecture des deux tableaux, les valeurs surlignées en orange sont supérieures au seuil de représentativité de 5% et celles surlignées en vert sont supérieures au seuil de représentativité de 1 %. Ce code couleur sera réutilisé par la suite. Pour rappel, la justesse est d'autant plus importante que le biais mesuré à la cible est petit.

III.2.2.1. Tirs d'OX

Concernant les tirs d'OX, les paramètres intervenant sur la dispersion sont les suivants :

- Concentricité entre l'âme du tube et la chambre ;
- Diamètre du cylindre formé par les fonds et les sommets de rayure.

Ainsi, plus l'écart de concentricité entre l'âme du tube et la chambre est important, plus la dispersion verticale est grande. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un écart au niveau de cette concentricité conduit la munition à arriver dans le cône de forçement avec un angle par rapport à l'axe de tir, apportant une dissymétrie de la ceinture amenant le projectile à balloter davantage.

Dans le cas des diamètres intérieurs du tube, plus le serrage de la ceinture est grand, plus il y a de dispersion verticale et de dispersion horizontale. La logique voudrait, au contraire, que plus le diamètre intérieur du tube est important, plus la munition ballote (plus de liberté de mouvement). Ainsi, il est possible que ce défaut en compense un autre, ce qui conduirait à une mauvaise interprétation du coefficient de corrélation. Une autre possibilité est qu'il existe un diamètre idéal afin de réduire la dispersion et ainsi qu'un serrage trop important ou trop faible est préjudiciable pour le parcours du projectile.

Les paramètres influençant la justesse des munitions de plein calibre sont les suivants :

- Concentricité entre le diamètre extérieur du tube se trouvant dans le berceau (pas de contact) et celui maintenu par le manchon ;
- Diamètre extérieur du tube où se trouve la portée avant du berceau ;
- Concentricité entre l'âme et le diamètre extérieur du tube maintenu par le manchon ;

- Centrage du logement du doigt de manchon dans le manchon.

Tous les paramètres qui ont été identifiés comme influençant la justesse des OX sont liés au maintien du tube.

Le Tableau 3 montre que plus le diamètre extérieur du tube, au niveau de la portée avant du berceau, est grand, plus la justesse du tube sera importante, ce qui peut signifier que moins il y a de jeu au niveau du maintien de la portée avant du tube, moins ce dernier subira de mouvements parasites pouvant dévier le projectile.

De plus, il est important que le maintien du tube dans le manchon ne soit pas désaxé par rapport à l'âme du tube ou par rapport au diamètre extérieur du tube dans le berceau afin de ne pas augmenter le biais.

Enfin, plus le logement du doigt de manchon se trouve décalé par rapport au doigt de manchon lui-même, moins la justesse sera grande (biais important). Ainsi, il est possible qu'un décalage du logement vienne perturber l'interaction avec le doigt de manchon. Cela pourrait alors conduire à des mouvements de la masse reculante dans un plan privilégié et ainsi donner des composantes latérales de vitesse à la munition la déviant de sa trajectoire.

III.2.2.2. Tirs d'OFL

La dispersion des OFL est principalement influencée par le diamètre de maintien de la cartouche dans la chambre du tube. Plus ce diamètre est important, plus la dispersion dans le sens vertical augmente. Si ce diamètre est trop important, l'ensemble cartouche/projectile ne sera pas parallèle à l'axe de tir puisque la munition sera appuyée sur le cône de forcement. Cela entraînera un angle d'introduction de celle-ci dans le tube pouvant conduire à une perturbation de son parcours de balistique intérieur (ballotement).

Les paramètres agissant sur la justesse des munitions flèches sont (Tableau 4) :

- La concentricité entre l'âme et le diamètre extérieur du tube maintenu par la portée arrière du berceau ;
- La concentricité entre l'âme du tube et la portée du frein de bouche ;
- Le diamètre au niveau de la portée du frein de bouche ;
- Le diamètre du cône de forcement ;
- La rectitude du tube.

Un défaut de concentricité entre l'âme et le diamètre extérieur du tube au niveau de la portée arrière du berceau augmente le biais dans le sens horizontal probablement pour les raisons évoqués précédemment (paragraphe III.1).

La concentricité entre l'âme et la portée du frein de bouche, quant à elle, agit sur le biais horizontal, mais aussi sur le biais vertical. Ainsi, plus il y a d'écart entre le centre de la portée du frein de bouche et l'âme du tube, moins la justesse sera grande. En effet, si le frein de bouche se trouve excentré par rapport à l'âme du tube, alors les gaz au moment de la sortie du projectile ne seront pas répartis de manière homogène autour de ce dernier, perturbant ainsi ses conditions de sortie (déviation angulaire du projectile). Plus le diamètre de la portée du frein de bouche est proche de la limite haute des tolérances fixées, plus le biais augmente. Cela peut venir du fait que le frein de bouche vibre différemment selon le jeu avec lequel il se trouve fixé au tube (modes propres de l'ensemble tube/frein de bouche).

Dans le cas du cône de forçement, plus le diamètre est important, plus il engendre de biais. Comme ce diamètre intervient directement sur les conditions d'entrée dans le tube des munitions, il est possible que les OFL soient plus sensibles que les OX à une légère inclinaison par rapport à l'axe du tube au début de leur parcours de balistique intérieure.

Enfin, les munitions flèches semblent affectées par le profil de rectitude du tube. En effet, l'amplitude du défaut de rectitude et ce, dans n'importe quel plan, semble perturber le parcours du projectile. Ainsi, les biais vertical et horizontal des OFL augmentent lorsque le profil du tube est accidenté.

III.2.2.3. Conclusion partielle

De manière générale, il semblerait que chaque paramètre retenu ne joue que sur la justesse ou la dispersion mais pas sur les deux en même temps.

Il est possible que la faible taille de certains échantillons n'ait pas permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres géométriques, car plus le nombre de points considéré est petit, plus un point aberrant influencera le coefficient de corrélation calculé. Toutefois, quel que soit le nombre de facteurs qui se sont révélés comme influents, tous ne pourront être étudiés de manière approfondie. De plus, la majorité des paramètres mis en avant par cette étude sont complexes à modéliser (interaction entre le tube et le berceau par exemple). La rectitude étant un paramètre particulièrement observé dans la littérature et qui s'avère jouer un rôle important sur le comportement du projectile en phase de balistique intérieure, la suite de l'étude s'intéressera principalement aux profils de l'âme des tubes et sur leur contribution dans les écarts à la cible [NEW 02] [CHE 07] [GUR 07] [CEL 11].

R : Coefficient de corrélation		Concentricités entre différents diamètres du tube		Diamètres intérieurs du tube		Diamètres extérieurs du tube	Paramètres du manchon	
		Âme/chambre du tube	Maintien manchon/ diamètre de la partie libre dans le berceau	Cylindre formé par les fonds de rayure	Cylindre formé par les sommets de rayure	Maintien dans le berceau en partie avant	Concentricité du maintien de la portée arrière/âme du tube	Centrage du logement du doigt de manchon
Paramètres de justesse	Biais horizontal	0.58	0.84	-0.03	-0.01	0.00	-0.39	0.06
	Biais vertical	-0.84	-0.16	-0.07	-0.12	-0.17	-0.68	0.70
	Biais horizontal absolu	-0.51	-0.77	-0.03	0.11	-0.10	0.15	0.26
	Biais vertical absolu	-0.77	0.25	0.06	0.06	-0.26	-0.55	0.63
	Biais global	-0.73	-0.63	0.02	0.12	-0.22	-0.34	0.62
Paramètres de dispersion	Dispersion horizontale	0.73	-0.26	-0.33	-0.26	-0.18	0.31	-0.43
	Dispersion verticale	0.97	0.19	-0.32	-0.37	-0.08	-0.12	-0.03
Taille de l'échantillon		5	8	110	114	119	21	21

Tableau 3 : Coefficients de corrélation des paramètres géométriques influençant la précision de tir des OX.

R : Coefficient de corrélation		Concentricités entre certains diamètres du tube		Diamètres extérieurs du tube	Diamètres intérieurs du tube		Amplitude maximal du profil de rectitude		
		Âme/ portée arrière du berceau	Âme/ portée du frein de bouche	Portée du frein de bouche	Dans la chambre : maintien de la cartouche	Cône de forcement	Rectitude horizontale	Rectitude verticale	Rectitude distance à l'âme parfaite du tube*
Paramètres de justesse	Biais horizontal	-0.64	0.02	0.73	0.80	0.80	-0.09	-0.76	-0.17
	Biais vertical	0.45	-0.19	-0.57	-0.24	-0.25	-0.37	0.38	-0.31
	Biais horizontal absolu	1.00	0.70	0.80	0.82	0.81	0.49	0.63	0.55
	Biais vertical absolu	0.55	0.71	0.56	-0.18	0.53	0.73	0.63	0.76
	Biais global	0.83	0.83	0.80	0.81	0.97	0.63	0.68	0.67
Paramètres de dispersion	Dispersion horizontale	0.08	0.26	0.57	0.97	-0.76	-0.25	-0.24	-0.27
	Dispersion verticale	0.88	-0.05	-0.20	-0.31	-0.47	0.05	0.40	0.10
Taille de l'échantillon		5	25	16	6	5	14	14	14

* L'âme parfaite du tube est la droite passant par le centre de la section arrière et avant du tube.

Tableau 4 : Coefficients de corrélation des paramètres géométriques influençant la précision de tir des OFL.

III.3. Analyse approfondie de la rectitude

D'après les résultats présentés précédemment, la rectitude du tube semble liée à la précision de tir. Cependant, la seule caractéristique du profil de rectitude qui a été comparée aux résultats à la cible jusqu'à présent, est l'amplitude maximale du défaut. D'autres caractéristiques peuvent être analysées comme le rayon de courbure ou encore le nombre de variations de pente du profil.

Les profils de rectitude observés ici ont été obtenus à l'aide de la méthode de mesure utilisée par les sous-traitants de Nexter (paragraphe I.2.3.1.2).

III.3.1. Rayon de courbure des tubes

III.3.1.1. Définition

Le rayon de courbure permet de connaître le niveau d'incurvation du profil de rectitude d'un tube. Plus ce rayon est grand, plus le profil est droit. En mathématiques, le rayon de courbure est le rayon du cercle osculateur à la courbe, au point considéré.

Le rayon de courbure à l'abscisse x_i est calculé à partir de la flèche de la corde formée par les deux points de part et d'autre de l'abscisse considérée (Figure III-5). Sur la Figure III-5, P_1 et P_3 doivent être à égale distance en x de P_2 .

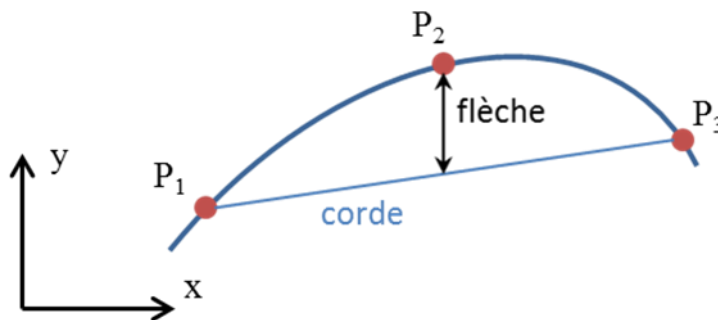


Figure III-5 : Schéma explicatif du calcul de la flèche.

L'équation (3.1) ci-après permet de calculer la flèche de la corde, f_c , à l'aide des coordonnées en y des points 1, 2 et 3 présentés en Figure III-5.

$$f_c = \text{moyenne}(y_{P1}; y_{P3}) - y_{P2} \quad (3.1)$$

Dans le cas où les points P_1 et P_3 seraient trop éloignés de P_2 , le risque est de ne pas faire ressortir certains pics (Figure III-6). A l'inverse, si la distance entre les points est très courte, il est possible de ne plus pouvoir observer les variations de flèche sur la longueur du

tube (Figure III-7). En effet, à ce moment-là, f_1 sera si petit qu'il ne variera pas beaucoup selon l'abscisse à laquelle il sera mesuré.

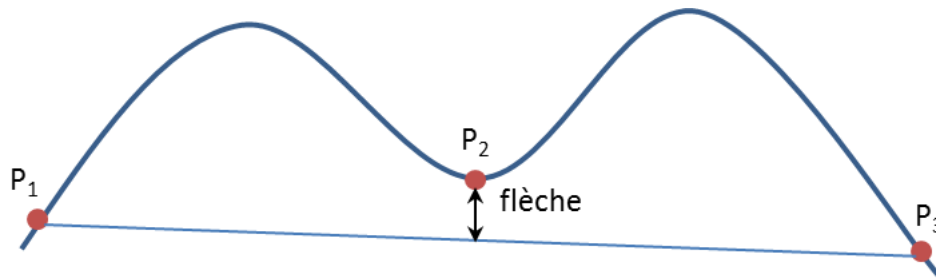


Figure III-6 : Calcul de la flèche pour une grande distance entre les points considérés.

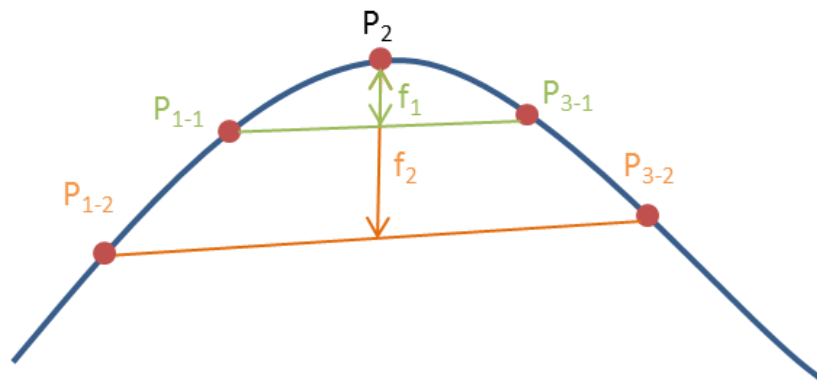


Figure III-7 : Calcul de la flèche pour une courte distance entre les points considérés.

L'intervalle entre les points utiles au calcul de la flèche doit être judicieusement choisi afin d'être représentatif des courbures que suit la munition. Pour ce faire, il ne doit pas être supérieur à une demi-longueur de projectile, ni être inférieur à la demi-largeur de la ceinture. Ainsi, la distance entre deux points a été choisie à 50 mm.

III.3.1.2. Calcul du Rayon de courbure

Une façon de déterminer le rayon de courbure R est d'utiliser la dérivée première, y' , et seconde, y'' , de l'équation de la courbe considérée (équation (3.2)).

$$R = \frac{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{y''} \quad (3.2)$$

Cette première méthode n'est pas adaptée à un cas discret. En effet, dans un tel cas, les dérivées ne peuvent être qu'approximées au risque de faire intervenir des erreurs de calcul. Ainsi, le calcul du rayon de courbure sera fait grâce à la flèche et à la relation présentée en équation (3.3), où L_{corde} est la longueur de la corde de l'arc considéré (Figure III-8).

$$R = \frac{f_c}{1 - \cos(\arcsin(\frac{L_{corde}}{2R}))} \quad (3.3)$$

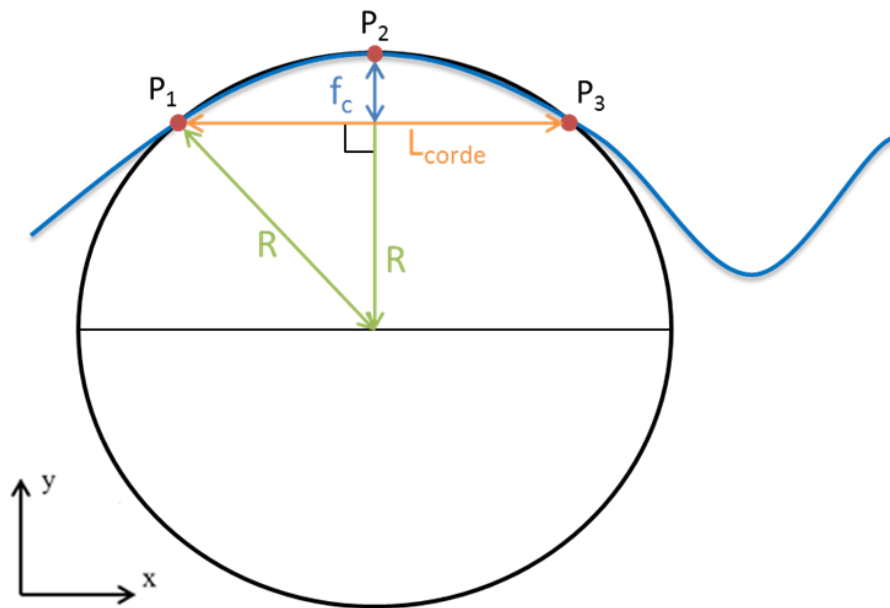


Figure III-8 : Calcul du rayon de courbure.

Le cas présenté en Figure III-8 est un cas parfait où P_1 et P_3 ont les mêmes coordonnées en y . La Figure III-9 est plus réaliste car P_1 et P_3 sont rarement alignés, et ainsi L_{corde} est différent de dx . Comme, de manière générale, dy est très petit face à dx (dy est de l'ordre du dixième de nanomètre et dx des centaines de millimètre), l'angle α est très petit. Ainsi, en utilisant l'approximation de Gauss, L_{corde} peut être remplacé par dx afin de calculer f_c qui sera considérée comme égale à la vraie flèche, f , de la corde du cercle passant par les trois points P_1 , P_2 et P_3 .

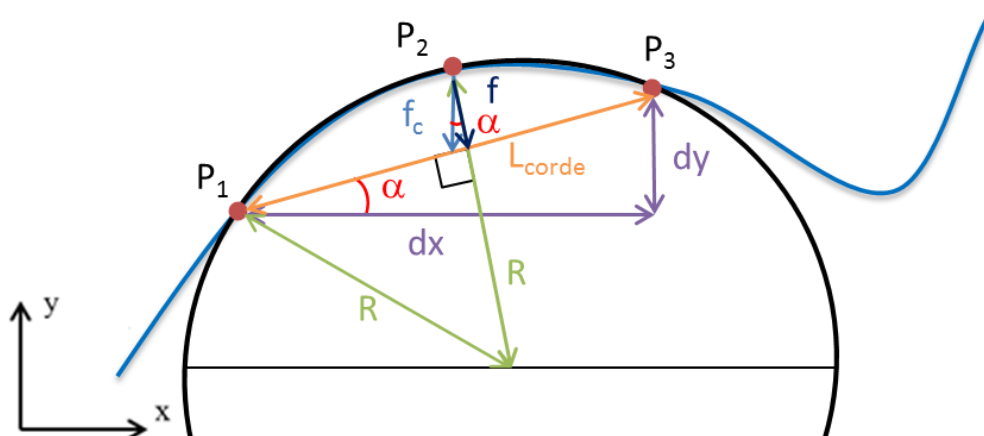


Figure III-9 : Autre cas de positionnement des points d'une courbe.

Compte tenu de la relation reliant la flèche de la corde au rayon du cercle, plus la flèche est grande, plus le rayon du cercle sera petit et l'incurvation du profil de rectitude sera important. La confrontation avec les résultats sur cible sera réalisée à l'aide des flèches obtenues. Dès lors, plus la flèche de la corde sera importante, plus il y aura de risque de perturber le passage de la munition.

III.3.1.3. Comparaison avec les résultats sur cible

Les tubes dont le profil de rectitude est connu sont au nombre de 20. Le premier graphique de la Figure III-10 présente trois profils de rectitude et le second permet d'observer les profils des courbes de flèche associés.

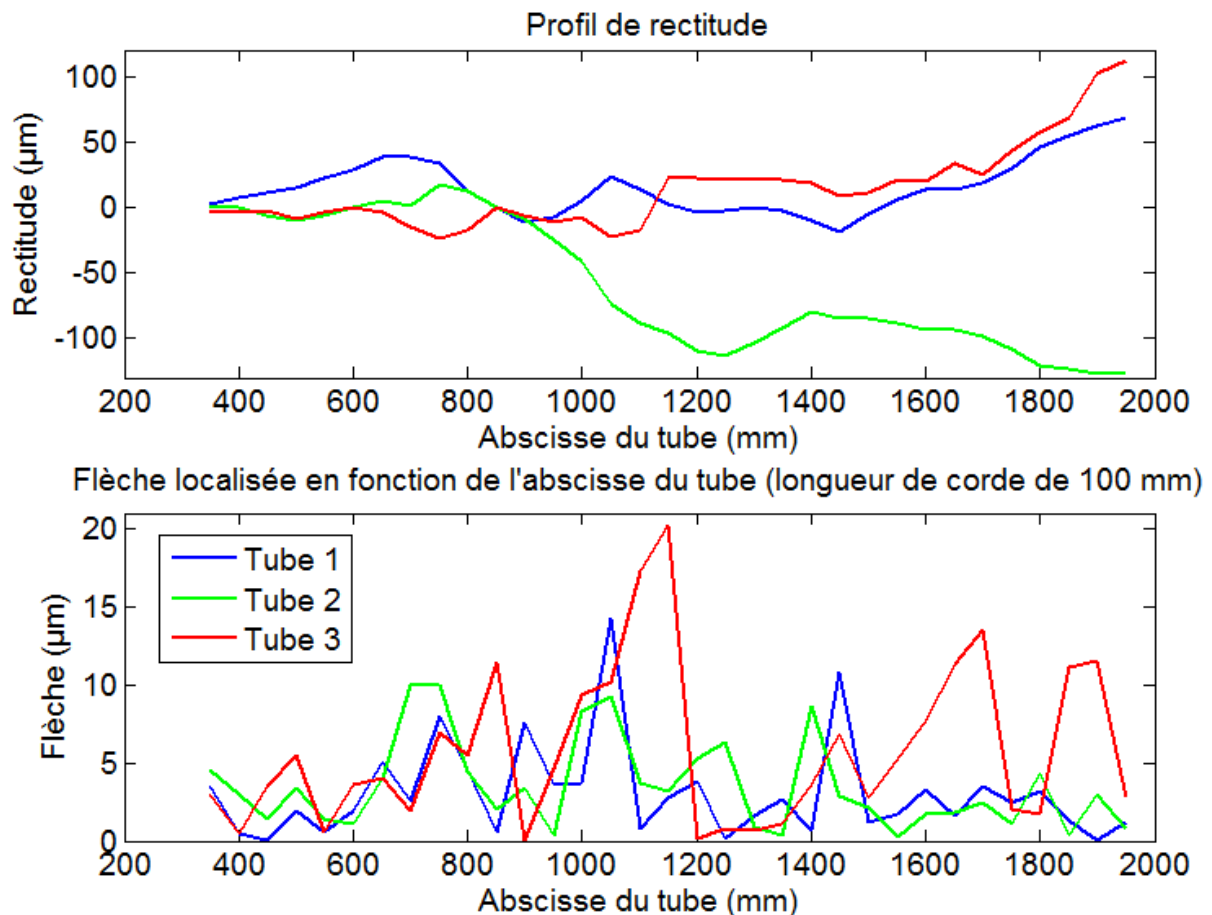


Figure III-10 : Exemple de profils de rectitude avec leurs courbes de flèche absolue associées.

III.3.1.3.1. Résultats de tir d'OX

Dans un premier temps les valeurs maximales de flèche ont été confrontées aux résultats sur cible des tirs d'OX. La dispersion étant une grandeur toujours positive, elle sera confrontée à la valeur absolue de la flèche de corde maximale, qui, elle, peut être positive ou négative (équation (3.1)). Il en sera de même pour la justesse globale. En effet, pour ces

deux caractéristiques de la précision seule l'ordre de grandeur du rayon de courbure maximal est pris en compte mais pas son orientation.

Aucune corrélation importante n'a été mise en évidence, tant pour la dispersion que la justesse. Sur les 20 tubes étudiés, tous les coefficients de corrélation donnés par le Tableau 5 sont inférieurs aux seuils présentés dans le Tableau 2. Les graphiques permettant le calcul des coefficients de corrélation R sont visibles en Annexe 1.

Coefficients de corrélation	Flèche maximale du profil horizontal	Flèche maximale du profil vertical	Flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'axe
Dispersion horizontale	-0.16		
Dispersion verticale		0.25	
Dispersion globale ²			0.10
Justesse horizontale	-0.23		
Justesse verticale		0.13	
Justesse globale ³			0.04

Tableau 5 : Récapitulatif des coefficients de corrélation obtenus pour les OX.

D'après les résultats obtenus, le rayon de courbure du profil de rectitude n'apparaît pas comme un paramètre influençant les performances de tir des munitions de plein calibre.

III.3.1.3.2. Résultats de tir d'OFL

La même démarche a été appliquée aux résultats de tir avec des OFL. Seuls 17 tubes sur les 20 observés précédemment ont tirés des recettes de munitions flèches. Dans un premier temps, la dispersion dans le sens horizontal a été tracée en fonction de la flèche maximale calculée sur le profil de la courbe de rectitude horizontale (Figure III-11). Le coefficient de corrélation est nul ce qui signifie que l'analyse réalisée ici ne montre aucun lien entre les deux paramètres.

² La dispersion globale est calculée à partir de la racine carrée de la somme de la dispersion horizontale et verticale, le tout divisé par deux.

³ La justesse globale est la distance entre le point moyen des impacts et l'origine du repère de la cible.

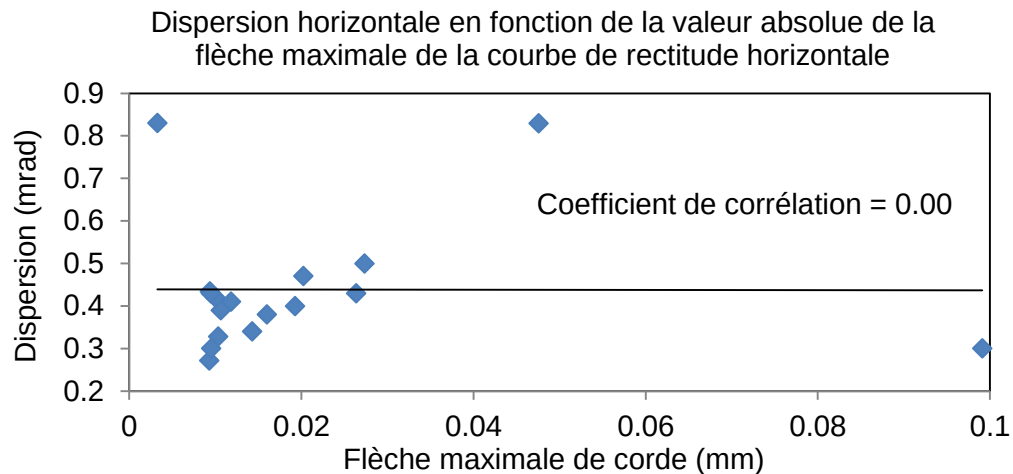


Figure III-11 : Dispersion horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale.

La Figure III-12 ci-après permet de confronter la dispersion verticale à la flèche maximale calculée sur le profil de la courbe de rectitude verticale. Il apparaît que lorsque la flèche maximale verticale est importante, alors la dispersion dans le sens vertical a tendance à l'être aussi.

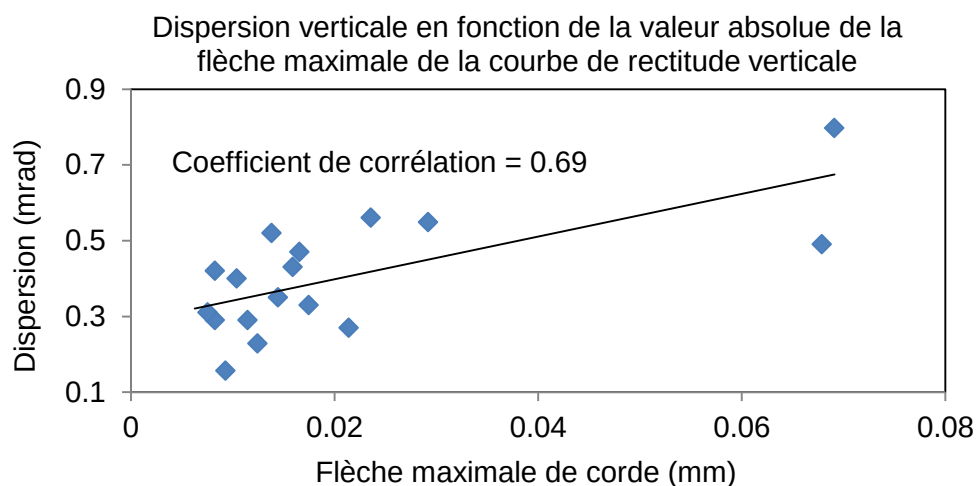


Figure III-12 : Dispersion verticale en fonction de la valeur absolue de la flèche maximale de la courbe de rectitude verticale.

Lorsque l'on étudie, cette fois-ci, la flèche maximale du profil dessinée par la distance à l'axe en fonction de la dispersion globale (Figure III-13), l'influence entre les deux paramètres semble moins grande. Cela s'explique par le fait que le calcul de la dispersion globale fait intervenir la dispersion horizontale et que cette dernière n'est pas influencée par la flèche maximale du profil horizontal (Figure III-11).

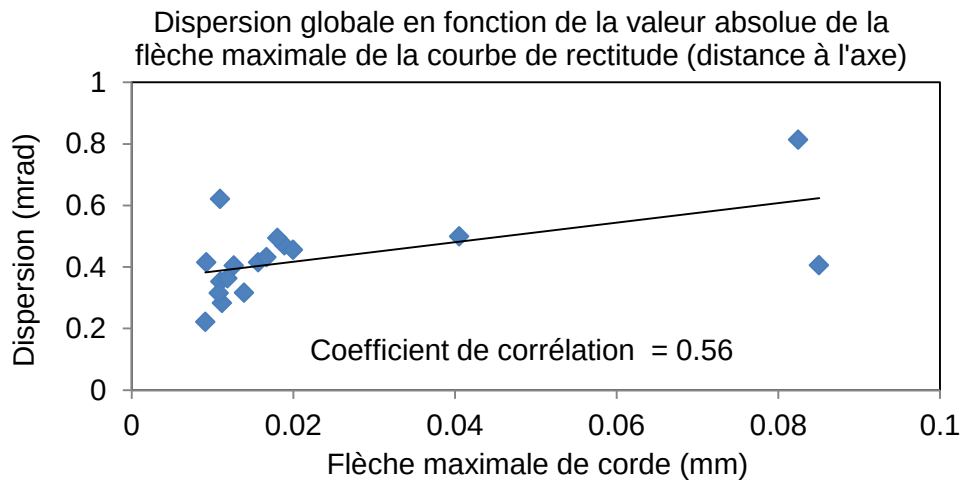


Figure III-13 : Dispersion globale en fonction de la flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'axe.

La Figure III-14 ci-après représente la justesse horizontale en fonction de la flèche maximale du profil de rectitude horizontale. La valeur du coefficient de corrélation permet de dire qu'un lien est possible entre les deux paramètres confrontés. Cependant, le graphique montre que la courbe de tendance est très influencée par un point qui est très éloigné des autres. En effet, si ce seul point est isolé, le nuage de points présente une régression linéaire avec une pente inversée (Figure III-15). Cela permet de dire que l'échantillon étudié est trop faible pour donner des résultats fiables. Ainsi, soit la justesse horizontale est influencée à partir d'un certain ordre de grandeur de flèche maximale, soit le point représenté en rouge dans la Figure III-14 est un point aberrant dû à un autre paramètre influençant davantage la justesse. Dans ce dernier cas, l'analyse serait faussée par cet unique point. Un échantillon plus important permettrait d'atténuer l'influence de points aberrants.

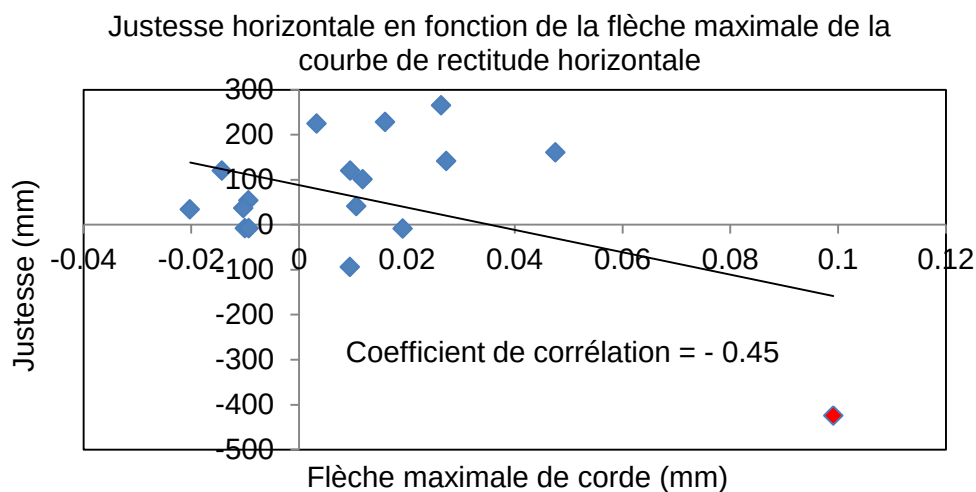


Figure III-14 : Justesse horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale.

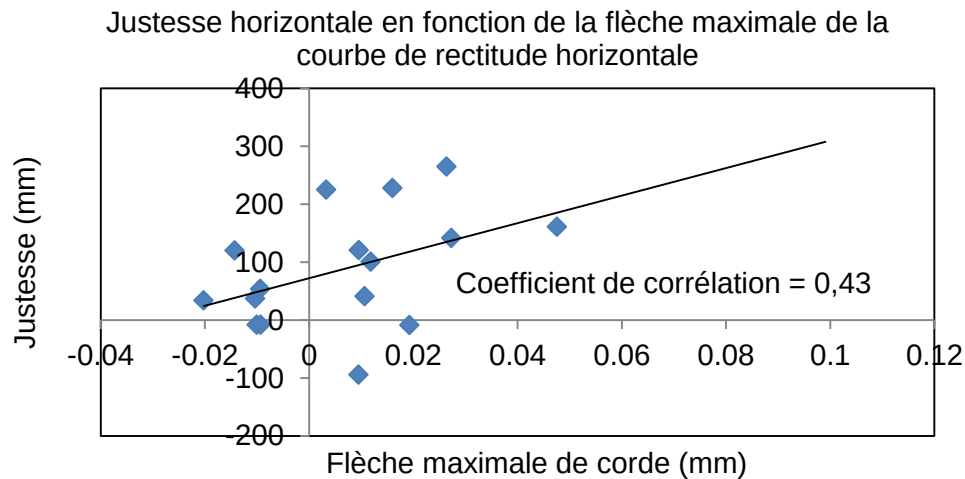


Figure III-15 : Justesse horizontale en fonction de la flèche maximale horizontale (sans le tube 50129).

La Figure III-16 permet d'analyser la justesse verticale en fonction de la flèche maximale du profil vertical. Aucun point ne semble se détacher du nuage de façon significative. La valeur du coefficient de corrélation obtenue n'est pas suffisamment importante pour correspondre à un seuil de significativité à 5%. Ainsi, le lien entre les deux paramètres confrontés ne peut pas être considéré comme avéré.

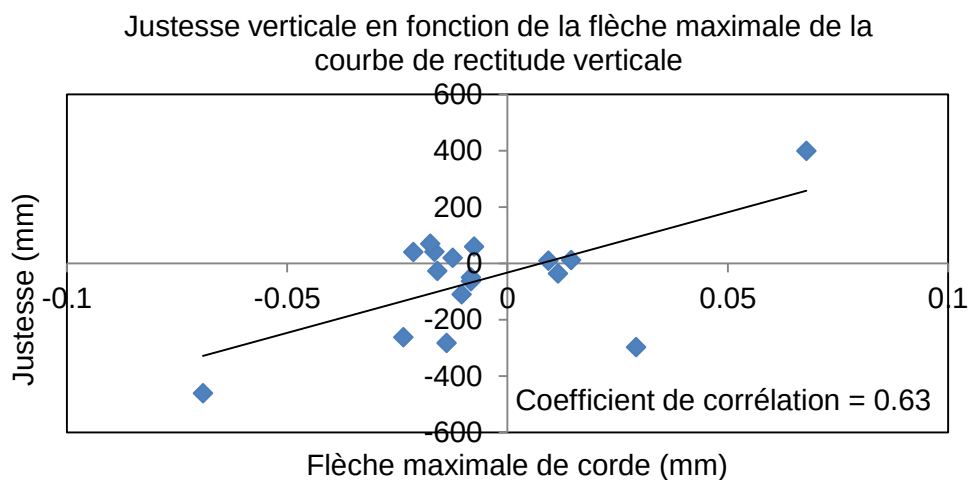


Figure III-16 : Justesse verticale en fonction de la flèche maximale verticale.

La mise en relation de la justesse globale et la flèche maximale du profil de rectitude (profil dessiné par la distance l'axe), aboutit à un coefficient de corrélation de 0.85 (Figure III-17). Ainsi, la justesse présente un lien étroit avec le rayon de courbure du profil de rectitude des tubes.

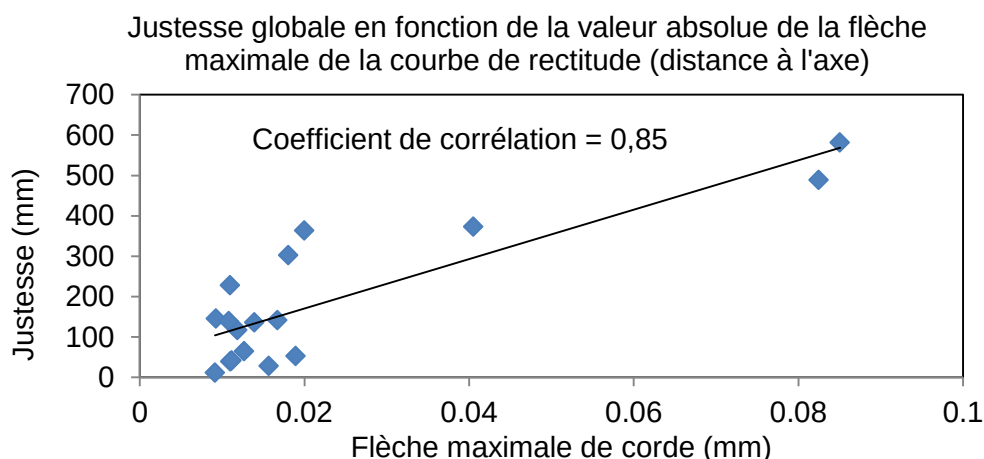


Figure III-17 : Justesse globale en fonction de la flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'origine.

Le Tableau 6 ci-après permet de rassembler tous les coefficients de corrélation calculés. Les valeurs obtenues et les graphiques précédemment présentés montrent que la dispersion verticale a un lien avec le rayon de courbure. Ce lien semble plus fort entre la justesse et la flèche maximale (voir coefficient de corrélation calculé pour la justesse globale).

Coefficients de corrélation	Flèche maximale du profil horizontal	Flèche maximale du profil vertical	Flèche maximale du profil dessiné par la distance à l'axe
Dispersion horizontale	0.00		
Dispersion verticale		0.69	
Dispersion globale			0.56
Justesse horizontale	0.43		
Justesse verticale		0.63	
Justesse globale			0.85

Tableau 6 : Récapitulatif des coefficients de corrélation obtenus pour OFL.

Ainsi, il apparaît que les munitions flèches sont plus sensibles aux rayons de courbure que les munitions de plein calibre.

III.3.2. Influence du nombre de pics

Dans cette partie, le nombre de pics, ou nombre de variations de pente du profil de rectitude, est étudié. Dans le cadre de l'étude de la précision de tir de l'arme de 40 CTA (canon de 40 mm de diamètre), ce paramètre était ressorti comme influent [GUI 05]. Plus le profil de rectitude du tube de 40 CTA présente de variations de pente, plus les écarts à la cible sont importants. Afin d'évaluer le nombre de pics, il faut calculer le coefficient directeur

de la tangente⁴ à la courbe à chaque point mesuré et observer le nombre de fois où le signe du coefficient change.

Dans un premier temps, tous les pics ont été comptabilisés quelle que soit leur amplitude. La confrontation avec les paramètres de précision n'a pas révélé d'importantes corrélations. En suivant toujours la même démarche d'analyse, les pics ont ensuite été comptabilisés lorsqu'ils dépassaient une certaine amplitude, c'est-à-dire que seuls les pics pour lesquels la valeur de la flèche calculée dépassait une certaine valeur ont été pris en compte. Lorsque la valeur seuil de flèche est fixée à 19 μm , alors une forte interdépendance entre la justesse des munitions flèches et le nombre de pics est observée (Figure III-18). Ainsi, pour les tubes n'ayant aucun pic notable, la justesse peut varier du fait de l'intervention d'autres paramètres. En revanche, au-delà de 3 pics dépassant les 19 μm de flèche, la justesse diminue significativement. L'influence du nombre de pics ne concerne qu'un faible nombre de tubes sortis de production puisque peu d'entre eux ont un profil où les flèches calculées dépassent les 19 μm .

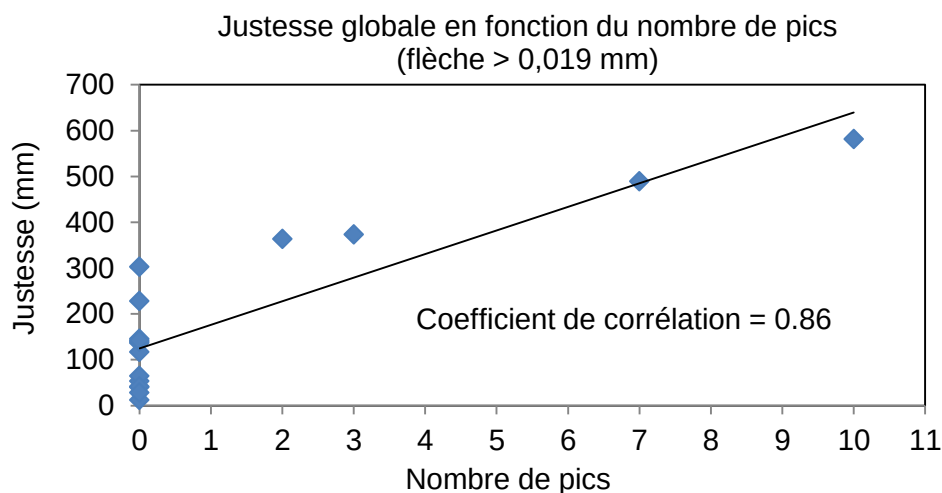


Figure III-18 : Justesse globale des OFL en fonction du nombre de pics dont la flèche dépasse 0.019 mm.

Les tirs d'OX ne sont pas fortement influencés par le nombre de pics et ce quels que soient leurs amplitudes puisque les coefficients de corrélation calculés n'ont jamais dépassé une valeur de 0.5.

⁴ Le coefficient directeur de la tangente en un point est égal à la dérivée de la fonction définissant la courbe en ce même point. Dans le cas présenté ici, la fonction définissant la courbe de rectitude n'est pas connue, c'est pourquoi la dérivée a été calculée à l'aide de la méthode des différences finies.

III.4. Conclusions

L'analyse statistique réalisée dans ce chapitre a permis de démontrer l'influence de certains paramètres géométriques de l'arme de 25M811 et de son tube, sur la justesse et la dispersion. Ainsi, les performances de tir des OX et des OFL sont influencées par l'interaction entre le tube et le berceau et par les paramètres liés au doigt de manchon. Les OX sont également influencés par la concentricité de la chambre par rapport à l'âme du tube et par le diamètre extérieur de la bouche. En ce qui concerne les OFL, ces derniers sont également perturbés par des défauts au niveau de la chambre, du cône de forçement et des portées du frein de bouche. Enfin il est ressorti que la rectitude d'un tube influence le parcours des projectiles flèches. C'est ce dernier paramètre que nous avons choisi de traiter de manière plus approfondie car c'est un paramètre qui, dans la littérature, a déjà été présenté comme jouant un rôle important sur les performances de tir.

Une étude plus complète de l'influence de la rectitude a été réalisée. Les premières observations ont montré que la flèche de corde maximale des profils de rectitude, ou par association le rayon de courbure minimum, n'a qu'un faible impact sur les performances de tirs d'OX. En revanche, lors de tirs d'OFL, la dispersion, notamment dans le sens vertical, et les justesses globales apparaissent comme être influencées par un faible rayon de courbure. Il est possible que du fait de sa différence de rigidité, l'OX, qui est moins flexible qu'un OFL, ne soit pas affecté par le rayon de courbure très petit. Les munitions flèches, quant à elles, se déforment pendant leur passage dans le tube. Une étude récente portant sur la manière de mesurer les déformations des barreaux de munitions flèches permet d'en témoigner [ECH 11]. Ainsi, ce type de munitions peut être plus sensible à des changements brusques de direction dus à des défauts de rectitude localisés. Les mouvements en flexion des OFL risquent ainsi d'apporter des perturbations sur sa trajectoire de vol, ce qui expliquerait qu'un profil de rectitude très accidenté puisse dégrader les résultats sur cible.

Dans un premier temps, le calcul du nombre de pics des courbes de rectitude n'a pas permis de mettre en évidence de corrélation avec les résultats sur cible tant pour les tirs d'OFL que d'OX. Cependant, si les pics ne sont comptabilisés que lorsque leur amplitude de flèche dépasse les 0.019 mm, alors la confrontation avec la justesse globale des munitions flèches révèle un coefficient de corrélation important.

Les résultats obtenus à l'aide de l'analyse statistique présentée dans ce chapitre permettent d'orienter nos recherches. Cependant, comme certaines mesures n'ont pas été fiabilisées et que la taille de certains échantillons était relativement faible, il est nécessaire de valider les conclusions tirées de l'analyse statistique à l'aide d'études complémentaires.

Afin de mieux comprendre comment intervient le profil de rectitude sur le comportement du tube et donc du projectile, des essais à l'aide de tubes ayant des profils de rectitude bien distincts ont été réalisés.

IV. Mesure de la géométrie des tubes et de leur réponse en appareil de tir

IV.1. Présentation de l'appareil de tir

L'étude statistique réalisée précédemment a identifié la rectitude comme étant un paramètre jouant sur la précision des tirs de munitions flèches, mais pas sur celle des munitions de plein calibre. Cette étude s'est appuyée sur l'analyse des recettes d'armes pour lesquelles les 78 paramètres étudiés variaient pour chaque arme/tube. En effet, chaque tube tirait avec une arme, un berceau ainsi qu'un frein de bouche différents. Ainsi, afin d'analyser l'impact de la rectitude sur les résultats de tir, des essais ont été menés en ne faisant varier que les paramètres liés au tube. De plus, pour ne pas faire intervenir le berceau, la cinématique de l'arme et les différents jeux présents en arme, tous les tirs ont été effectués en appareil de tir (Figure IV-1).



Figure IV-1 : Photo d'un appareil de tir.

Pour ce genre d'appareil, sont utilisés des tubes EPVAT⁵ qui sont des tubes d'arme de 25M811 ayant subi quelques modifications. Ils servent aux recettes des lots de munitions de Nexter Munitions. En appareil de tir, les tubes ne sont maintenus qu'au niveau de la tranche arrière puisqu'il n'y a pas de berceau. Le maintien est réalisé par un centrage long, soit une longueur faisant plus de deux fois le diamètre de la tranche arrière du tube. Le recul est guidé par deux liens symétriques, positionnés de chaque côté du tube.

⁵ Tube EPVAT : Tube de 25M811 ayant subi quelques modifications permettant la mesure de la pression dans la chambre et en milieu de tube. Une bague à la tranche arrière a été rajoutée afin d'adapter le diamètre à celui de l'appareil de tir.

IV.2. Etapes préliminaires

Avant de réaliser les essais, certaines étapes sont indispensables : le choix des tubes et la mesure de leurs arcures et rectitudes.

IV.2.1. Choix des tubes

Les tubes retenus pour ces essais sont ceux pour lesquels le nombre de coups tirés est faible par rapport à la durée de vie du tube afin de ne pas faire intervenir l'usure du tube dans la comparaison réalisée. Ainsi, trois tubes ont été sélectionnés, dont le nombre de coups est compris entre 75 et 220. Leurs dispersions mesurées au cours de tirs de recette sont données par le Tableau 7. Elles sont du même ordre de grandeur que celles constatées en arme.

N° tube	Nombre de coups	Dispersion verticale (sur cible à 200 m)	Dispersion horizontale (sur cible à 200 m)	Dispersion globale (sur cible à 200 m)
41388	75	0.31	0.37	0.34
445	200	0.37	0.41	0.39
41433	218	0.57	0.33	0.47

Tableau 7 : Données concernant les trois tubes retenus.

L'état des tubes sélectionnés a été vérifié à l'aide d'endoscopies. Cela était nécessaire afin de s'assurer que le parcours de balistique intérieure des munitions ne serait pas modifié par l'état de surface des rayures. Les endoscopies réalisées ont révélé quelques marques de corrosion à l'intérieur du 41388 surtout en sommet de cloison.

Toujours en sommet de rayure, les trois tubes présentent quelques ablations de petite taille, plus particulièrement entre 300 mm de la tranche avant et le milieu de la longueur du tube. Malgré ces observations, les tubes sont en bon état compte tenu du nombre de coups tirés, notamment à la prise de rayure. Le 445 est celui qui a présenté le moins de défauts lors de l'endoscopie.

L'état d'usure des trois tubes retenus pour les essais est très satisfaisant.

IV.2.2. Mesures des profils de rectitude

Les mesures de rectitude des tubes sélectionnés ont été réalisées à l'aide du banc de mesure de Nexter Systems (paragraphe I.2.3.1.2). Les profils des tubes 445, 41388 et 41433 sont donnés par la Figure IV-2, la Figure IV-3 et la Figure IV-4 respectivement.

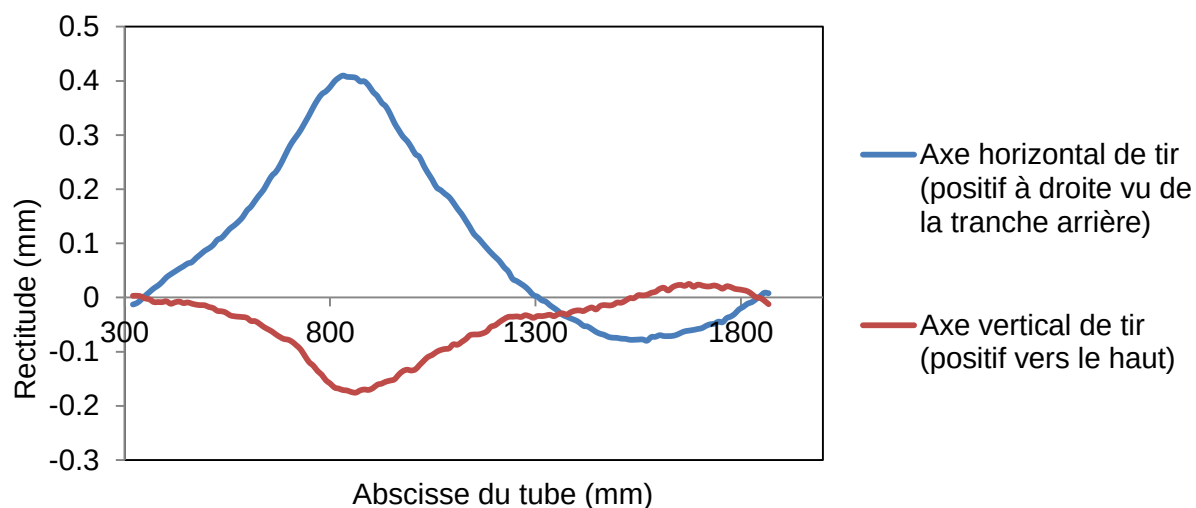


Figure IV-2 : Profil de rectitude du tube 445.

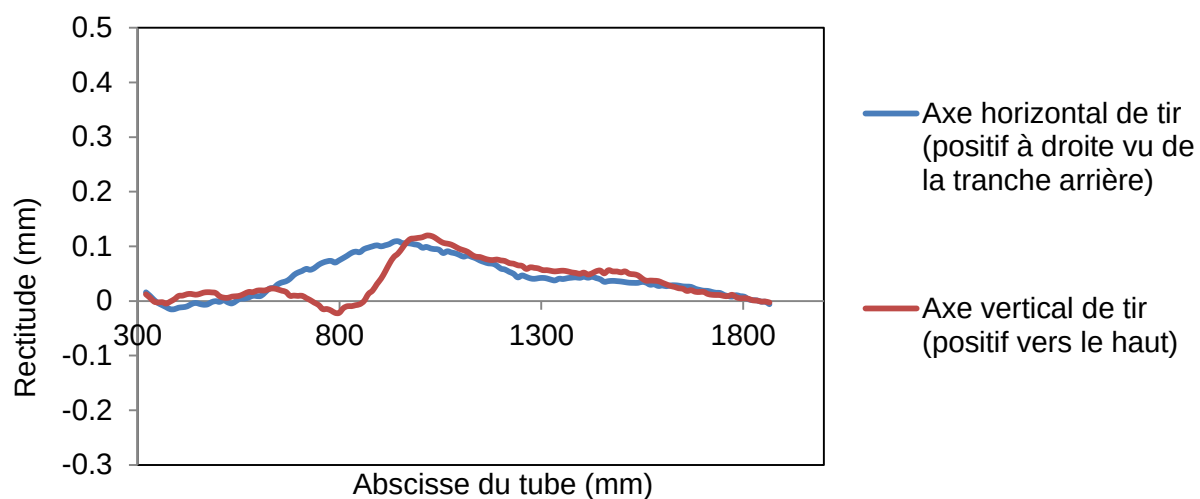


Figure IV-3 : Profil de rectitude du tube 41388.

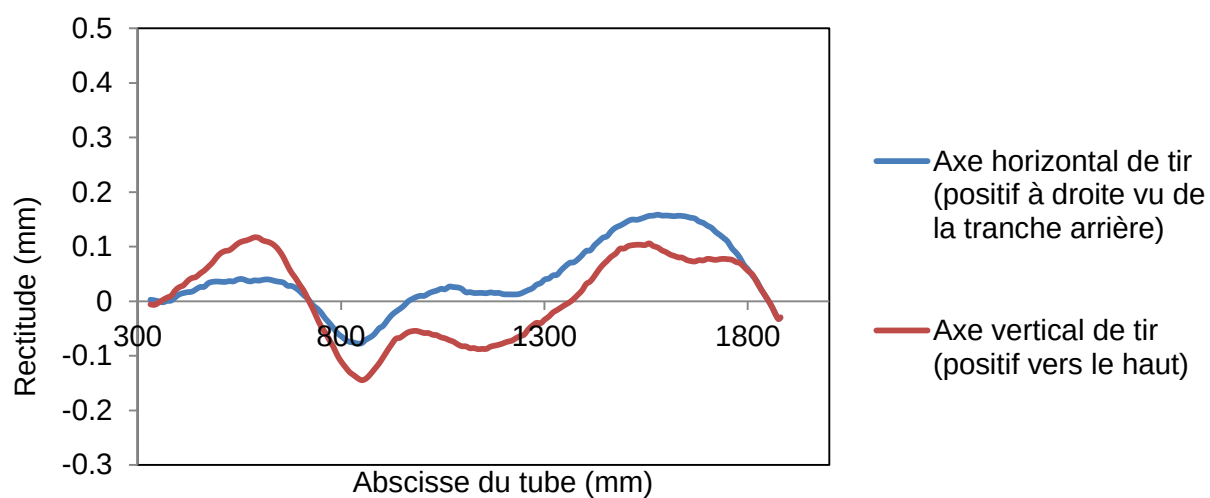


Figure IV-4 : Profil de rectitude du tube 41433.

Dans le sens vertical ou horizontal, le tube 445 présente les plus grandes amplitudes de défaut de rectitude (maximum de 0.4 mm). Par contre, le tube présentant le plus de variations de pente, soit le plus accidenté, est le tube 41433, avec un défaut maximum de 0.17 mm. Enfin, le 41388 est celui présentant le profil le plus droit, comparativement aux deux autres tubes. Ainsi, les trois tubes retenus présentent des profils très différents. Le tube 41388 est le tube présentant la meilleure rectitude des trois tubes sélectionnés.

IV.2.3. Mesures de l'arcure des tubes

L'arcure des tubes a été mesurée afin de déterminer si le profil extérieur du tube peut intervenir sur la précision de tir où sur l'orientation du point moyen des coups. Les arcures des tubes 445, 41388 et 41433 sont présentées respectivement en Figure IV-5, IV-6 et IV-7.

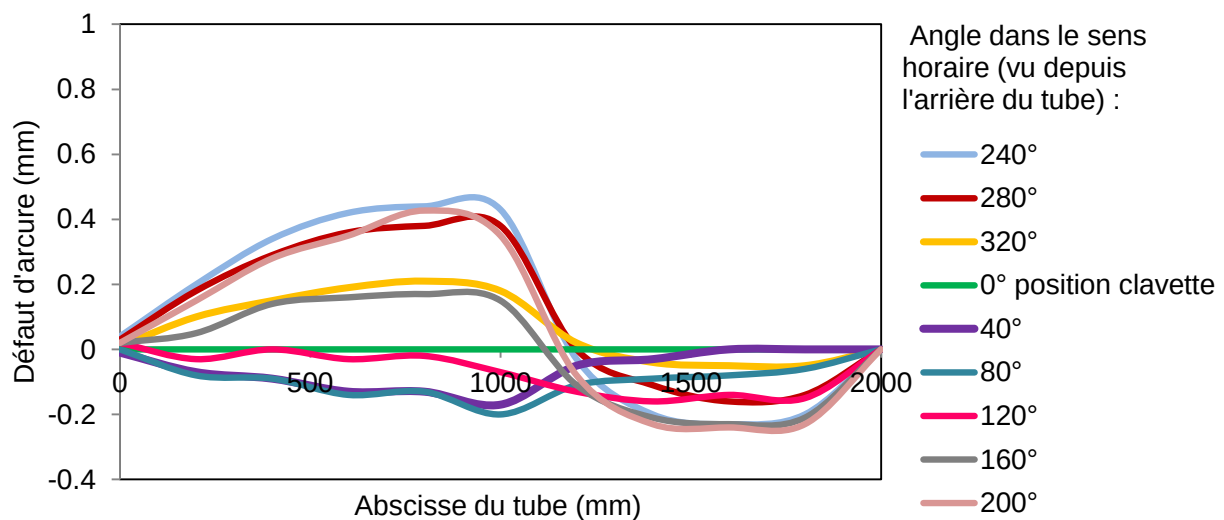


Figure IV-5 : Profil d'arcure du tube 445.

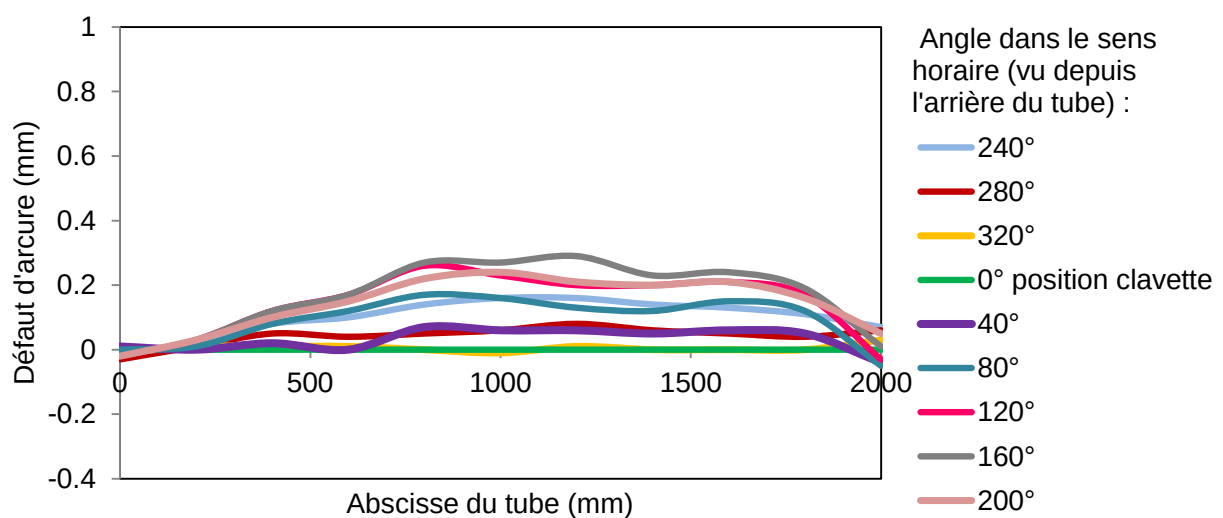


Figure IV-6 : Profil d'arcure du tube 41388.

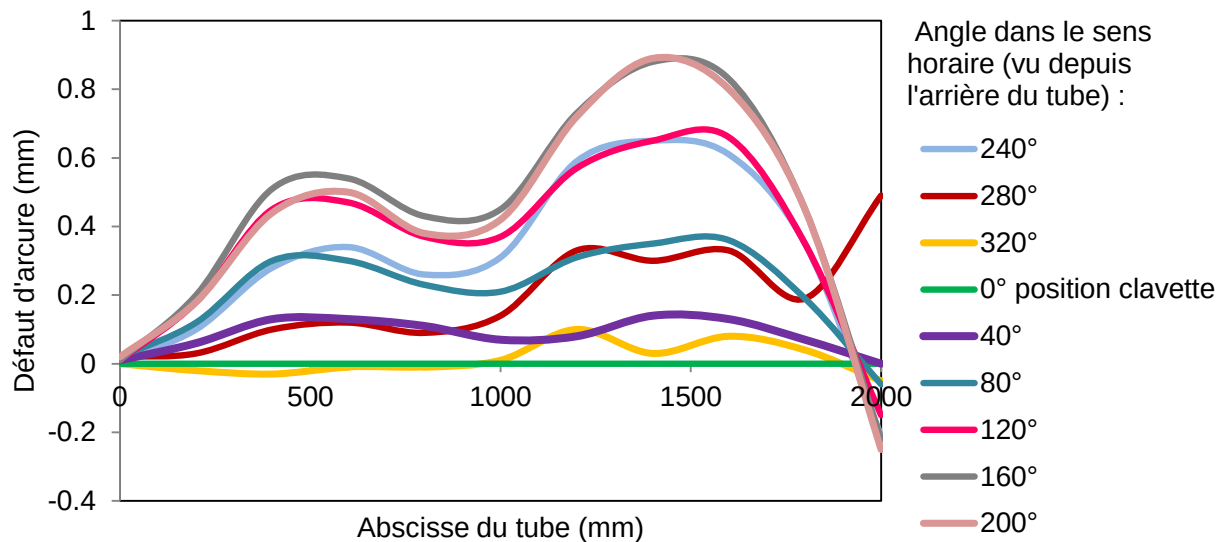


Figure IV-7 : Profil d'arcure du tube 41433.

La mesure de l'arcure est effectuée 9 fois afin de passer en chaque sommet de nervure. Elle est réalisée à l'aide d'un comparateur mécanique à cadran à tige rentrante radiale. Pour qu'aucune flèche due au poids propre n'intervienne, la mesure est réalisée sur le côté en faisant tourner le tube à chaque nouveau sommet de nervure mesuré. Le profil de chaque nervure est donné par rapport à celui de la nervure à 0° (position de la clavette), qui est considérée comme parfaitement droite. La clavette est positionnée à la verticale, vers le haut (Figure IV-8).

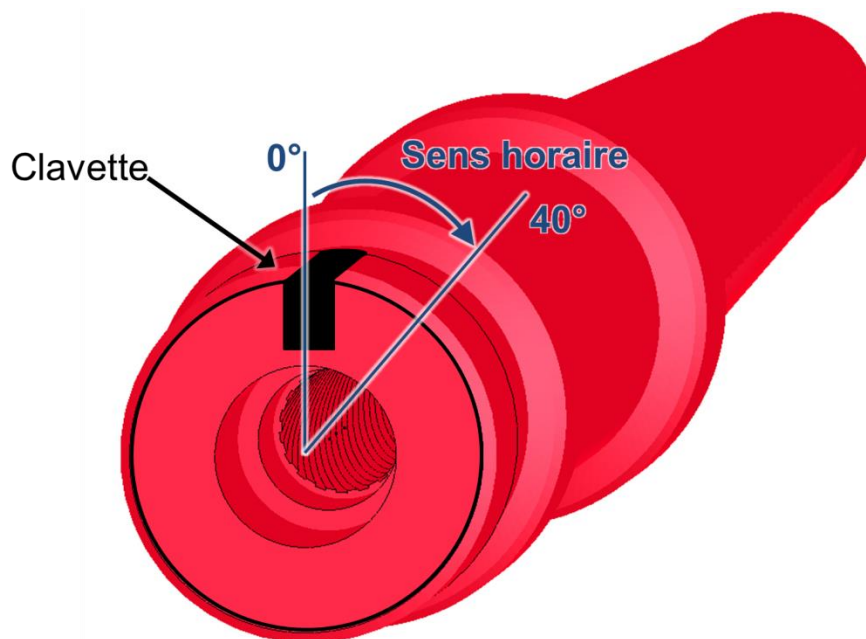


Figure IV-8 : Position de la clavette et sens d'observation de l'arcure.

En analysant les profils des arcures mesurées, ceux se trouvant dans les plans les plus proches de la verticale et de l'horizontale ont des similitudes avec les profils de rectitude (Figures IV-9, IV-10 et IV-11).

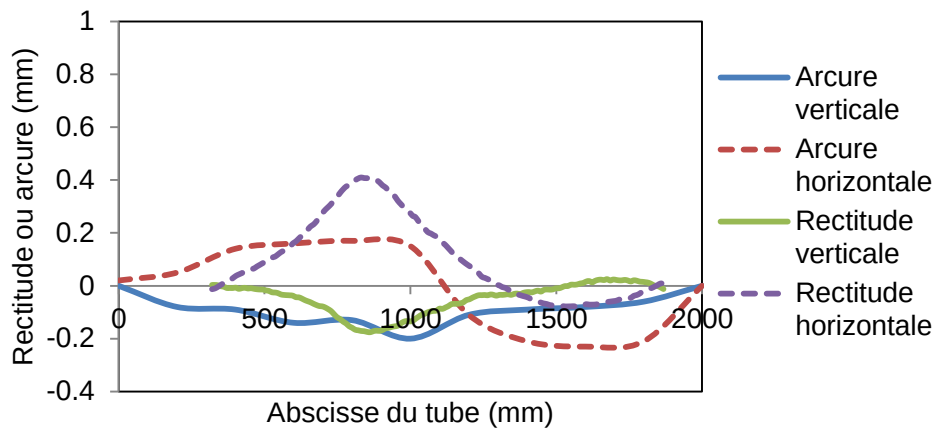


Figure IV-9 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 445.

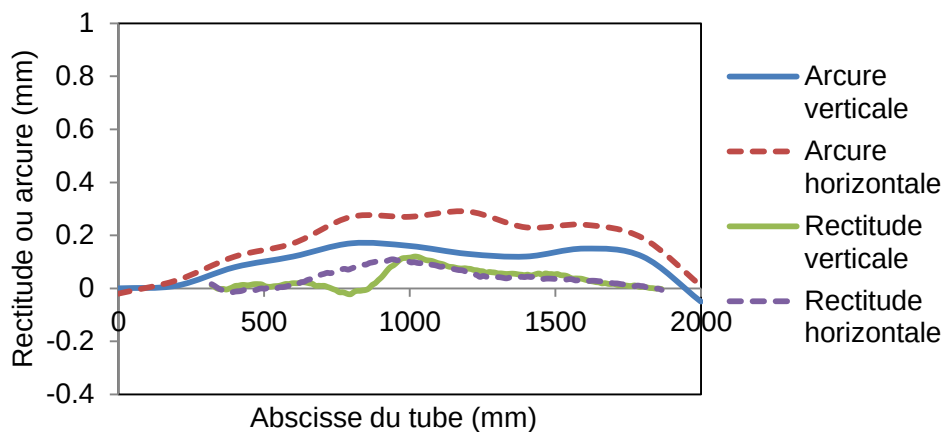


Figure IV-10 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 41388.

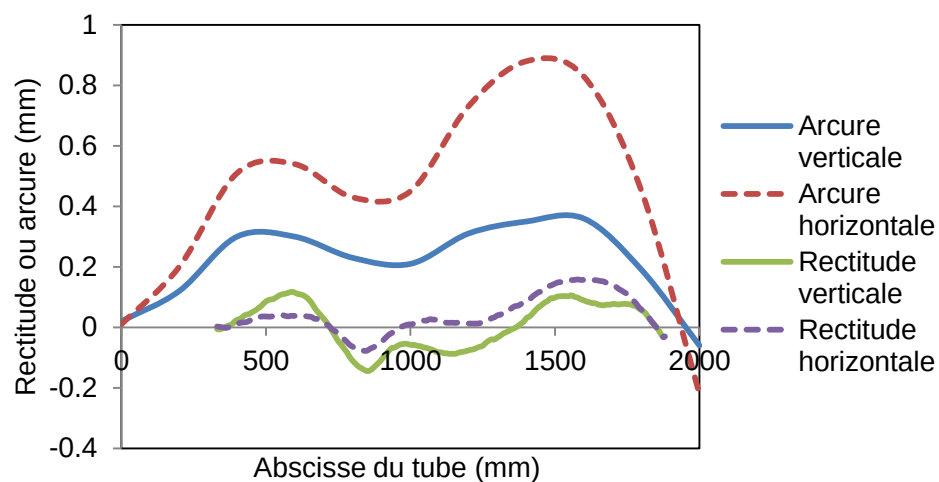


Figure IV-11 : Comparaison entre arcure et rectitude du tube 41433.

Cette observation montre bien que le profil intérieur du tube suit le profil extérieur. La concentricité entre le diamètre intérieur et extérieur est par conséquent bonne.

Afin de comprendre si les paramètres mesurés sur les tubes retenus ont une influence sur la précision de ces derniers, des tirs ont été effectués en appareil de tir. Ces essais se sont déroulés en deux étapes. La première concernait les tirs de munitions de plein calibre et la seconde les tirs des munitions flèches.

IV.3. Essais de tirs d'OX

IV.3.1. Présentation des essais

Les essais en appareil de tir se sont déroulés en gaine de tir, c'est-à-dire à l'abri du vent et des changements brusques de température. Les tirs étaient au nombre de 20 par tube, avec 10 coups avec frein de bouche et 10 coups sans frein de bouche. Avant ces 20 tirs, 5 coups de flambage étaient tirés afin de chauffer le tube et d'effectuer les essais dans les mêmes conditions initiales (positionnement du bâti de tir). Le frein de bouche utilisé était le même pour tous les essais. Avant les tirs, la visée du tube avait été repérée sur une cible à 100 mètres pour pouvoir calculer la justesse. La visée du bâti de tir a également été mesurée dans le but de voir si un relèvement du tube est observable ou non (cf. effet Bourdon au paragraphe II.1.2.1).

Afin de caractériser les mouvements verticaux de la bouche du tube au cours du tir, une caméra rapide filmait la bouche à une vitesse de 1 000 images/seconde. Une barrière de vitesse permettait également de mesurer la vitesse de la munition à la sortie du tube, V_0 . Tous les matériels de mesure utilisés sont présentés dans un tableau récapitulatif en Annexe 2, dans lequel sont présentées les incertitudes de mesure.

IV.3.2. Résultats

IV.3.2.1. Résultats avec frein de bouche

Les Figures IV-12, IV-13 et IV-14 représentent respectivement les cibles à 100 mètres du 445, du 41388 et du 41433 après les 10 tirs réalisés avec frein de bouche. Le Tableau 8 présente les valeurs des justesses, des dispersions et des V_0 obtenues. Les vitesses moyennes et les écart-types sont observés afin de vérifier la cohérence avec les écarts observés lors des tirs en arme avec un même lot de munition. On constate que le tube 41388 présente les meilleurs résultats en termes de justesse, mais aussi de dispersion. Les valeurs en rouge sont celles pouvant être considérées comme les plus défavorables dans chaque catégorie. De manière générale, les résultats en dispersion sont assez proches pour

les trois tubes. En revanche, les biais du 445 et du 41433 sont bien plus grands que celui du 41388.

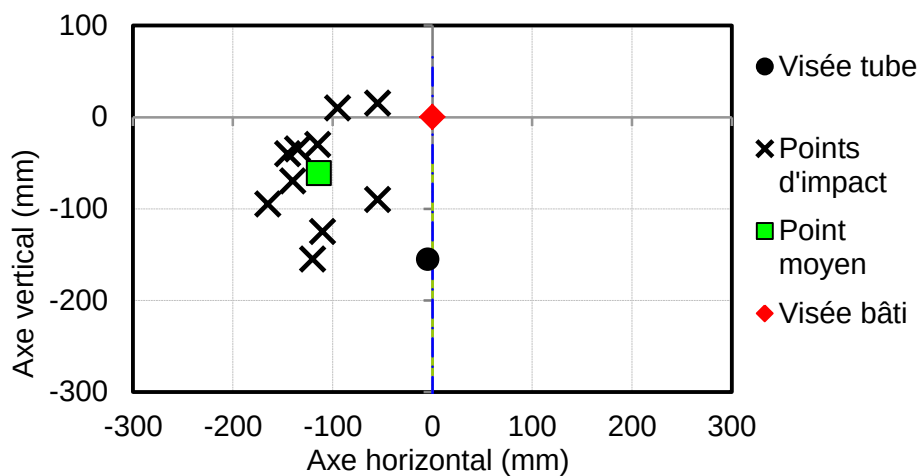


Figure IV-12 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 445.

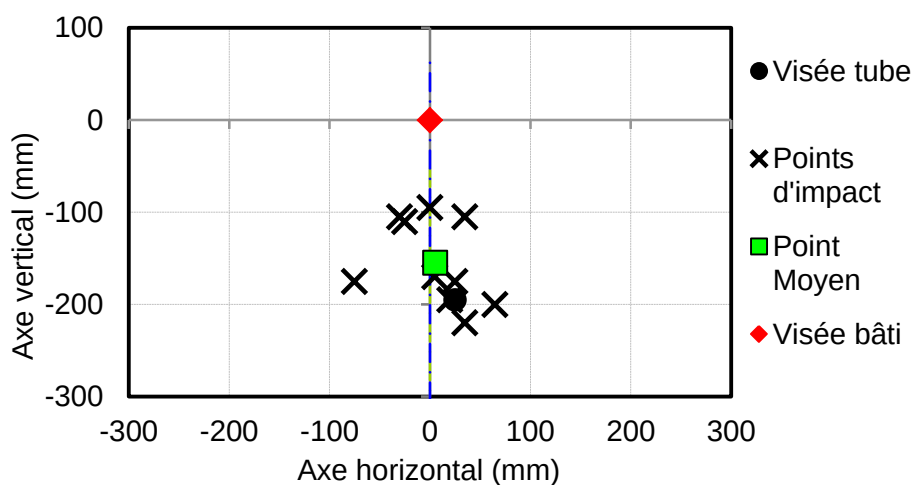


Figure IV-13 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41388.

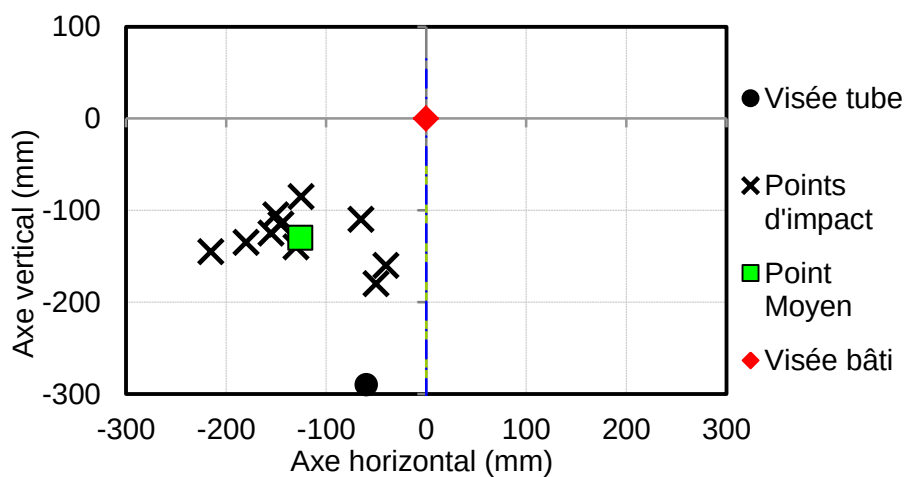


Figure IV-14 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41433.

Numéro du tube	445	41388	41433
Justesse en x (mm)	-109	-20	-66
Justesse en y (mm)	94	40	160
Justesse globale (mm)	143	45	173
Dispersion en x (mrad)	0.37	0.40	0.57
Dispersion en y (mrad)	0.56	0.47	0.28
Dispersion globale (mrad)	0.47	0.44	0.45
V_0 moyenne (m/s)	1100.9	1099.3	1102.5
Ecart type de V_0	4.29	4.02	2.92

Tableau 8 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OX avec frein de bouche.

Les V_0 moyennes, sont proches les unes des autres. Cela signifie que les conditions initiales de tir étaient proches et que l'usure du tube était suffisamment faible pour ne pas perturber le parcours de la munition. En effet, lorsque le tube arrive en fin de vie, il arrive que les munitions commencent à perdre de leur vitesse du fait d'une moins bonne étanchéité des gaz. Les vitesses sont cohérentes avec les résultats de tirs en arme.

IV.3.2.2. Résultats sans frein de bouche

Les répartitions des coups à 100 mètres des tubes 445, 41388 et 41433 sont présentées en Figures IV-15, IV-16 et IV-17 respectivement. Les valeurs de justesse et de dispersion sont données par le Tableau 9. Ainsi, les tubes 445 et 41388 ont une plus faible dispersion lorsque les tirs ont lieu sans frein de bouche et une moins bonne justesse. Concernant le tube 41433, les observations sont contraires, la justesse est meilleure et la dispersion plus grande. Ainsi, le frein de bouche semble avoir un effet non négligeable sur le parcours du projectile et son impact à la cible.

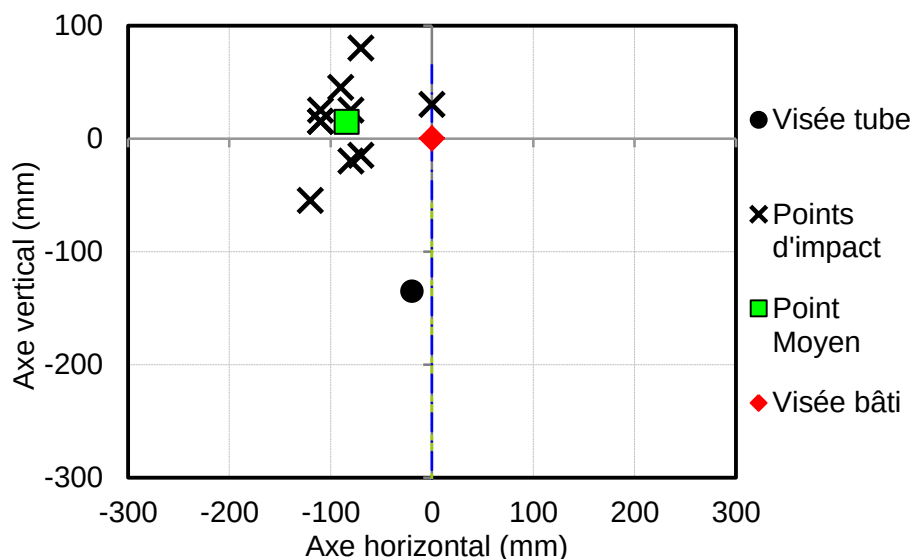


Figure IV-15 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 445 sans frein de bouche.

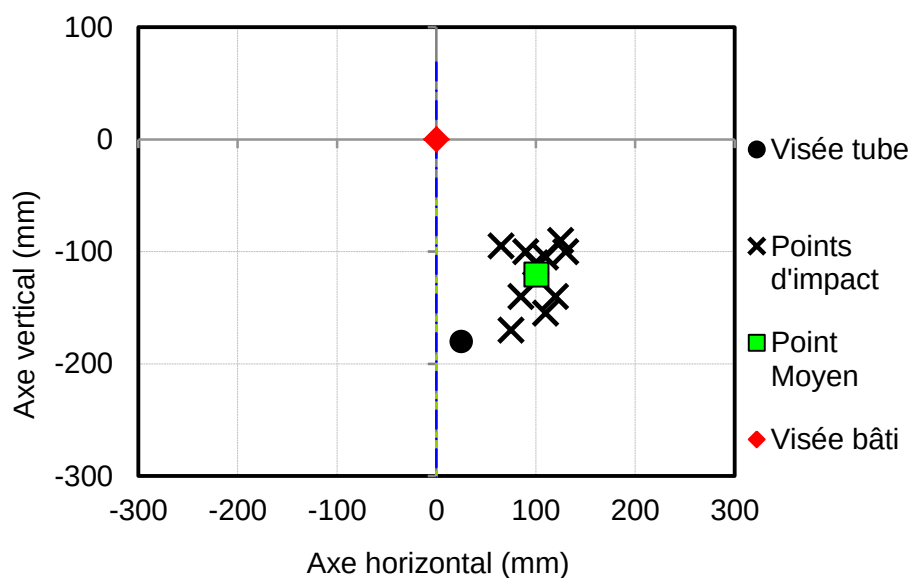


Figure IV-16 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41388 sans frein de bouche.

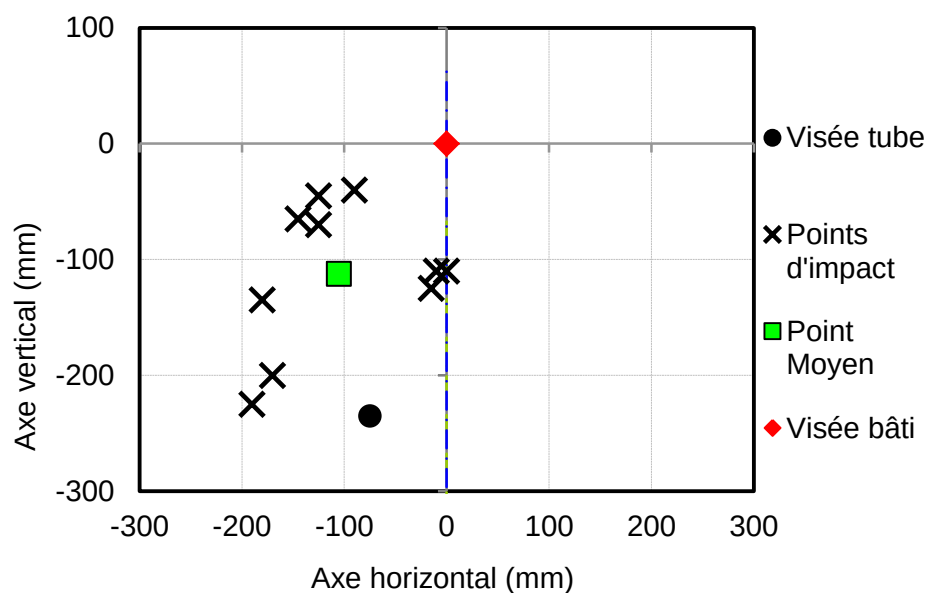


Figure IV-17 : Résultats des tirs d'OX à 100 mètres du tube 41433 sans frein de bouche.

Numéro du tube	445	41388	41433
Justesse en x (mm)	-64	76	-30
Justesse en y (mm)	150	60	123
Justesse globale (mm)	163	97	126
Dispersion en x (mrad)	0.35	0.22	0.73
Dispersion en y (mrad)	0.37	0.28	0.62
Dispersion globale (mrad)	0.36	0.25	0.68
V_0 moyenne (m/s)	1099.5	1094.2	1100.2
Ecart type de V_0	5.83	4.79	3.82

Tableau 9 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OX sans frein de bouche.

Les V_0 moyennes des munitions sont plus faibles que précédemment, mais restent proches et sont toujours comprises dans l'intervalle des valeurs observées en arme (écarts entre les vitesses moyennes obtenus lors des tirs avec et sans frein de bouche inférieurs à 6 m/s).

Le tube 41388 reste le tube ayant la meilleure dispersion globale et la meilleure justesse globale par rapport aux deux autres.

IV.3.3. Interprétations des résultats

Les tirs réalisés ont permis de montrer que le frein de bouche fait varier les résultats à la cible. C'est pourquoi ce sont les tirs sans frein de bouche qui sont utilisés afin d'analyser l'influence de la rectitude. D'après les résultats des essais sans frein de bouche, le tube ayant la meilleure rectitude est aussi celui ayant les meilleurs résultats sur cible (paragraphe IV.2.2). De plus, le tube qui a les plus grands défauts de rectitude en termes d'amplitude (tube 445) a la moins bonne justesse globale. Dans l'étude statistique réalisée précédemment, l'amplitude du défaut de rectitude est apparue comme influençant particulièrement la justesse des munitions flèches (paragraphe III.2.2). Ainsi, il apparaît que ce paramètre n'affecte pas uniquement le parcours des OFL mais également celui des OX. Enfin, les tirs sans frein de bouche ont également permis de constater que la dispersion est plutôt affectée non pas par l'amplitude du défaut de rectitude, mais davantage par le nombre de pics. En effet, c'est bien le tube 41433, le plus accidenté, qui présente la moins bonne dispersion.

L'ordre de grandeur des déplacements de la bouche du tube jusqu'à la sortie de la munition étant inférieur au millimètre, la caméra rapide n'a pas été un moyen de mesure suffisamment précis pour pouvoir comparer le comportement du tube entre les tirs. Dès lors pour les tirs d'OFL, les déplacements ont été mesurés à l'aide de capteurs à courant de Foucault.

IV.4. Essais de tirs d'OFL

IV.4.1. Présentation des essais

Le protocole des tirs de munitions flèches a été le même que précédemment, à l'exception de la mise en place de capteurs à Courant de Foucault (paragraphe II.4.5). Ce moyen de mesure nécessite l'utilisation d'un frein de bouche quelque peu modifié (ajout de plats dans un matériau détectable par les capteurs). Cela signifie que les mesures n'ont pu être réalisées que lors des tirs avec frein de bouche.

Cette seconde phase n'ayant pas eu lieu au même moment que la première, entre temps le tube 41388 a été utilisé afin de réaliser des tirs de recette d'OFL. Ainsi, 450 munitions flèches ont été tirées avec ce dernier, ce qui correspond à 1350 coups de munitions de plein calibre en termes d'usure du tube. Cela est dû à la quantité de poudre, au diamètre du projectile ainsi qu'à sa vitesse de passage dans le tube, qui ne sont pas les mêmes. Ainsi, avant cette phase, le tube 41388 avait tirés 1470 coups en équivalent OX, le tube 445, 312 coups et enfin le tube 41433, 284 coups.

IV.4.2. Résultats

IV.4.2.1. Précisions et vitesses

IV.4.2.1.1. Résultats avec frein de bouche

Les Figures IV-18 à IV-20 présentent les cibles obtenues après les tirs d'OFL avec frein de bouche. Le récapitulatif des valeurs de dispersion et de justesse, ainsi que les vitesses moyennes de sortie des munitions sont données par le Tableau 10.

Dans le cas des tirs de munitions flèches, il est possible de constater que le tube ayant le mieux tiré est le 445. En effet, la justesse et la dispersion sont meilleures que pour les deux autres tubes. A contrario, le tube 41388 est le tube ayant présenté les plus mauvais résultats sur cible, avec une justesse 9 fois supérieure à celle du 445 et 3 fois supérieure à celle du 41433.

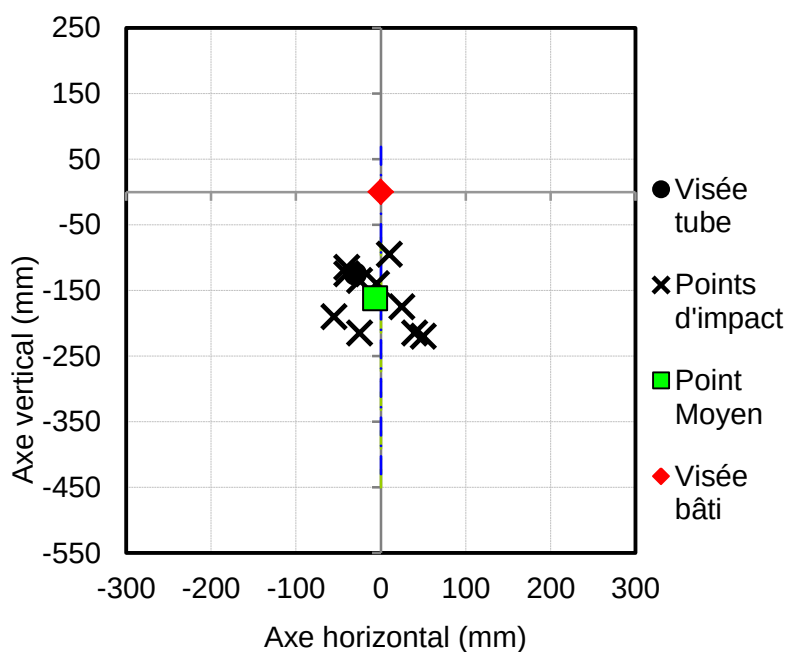


Figure IV-18 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 445.

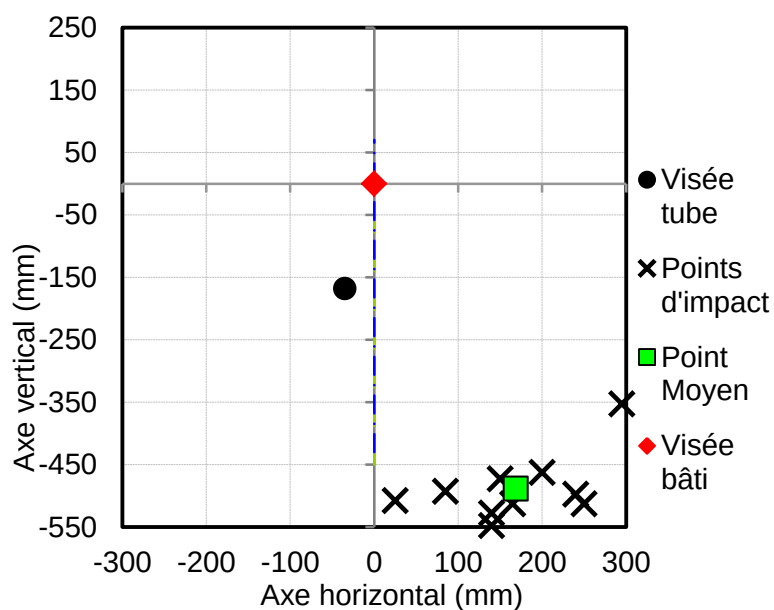


Figure IV-19 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41388.

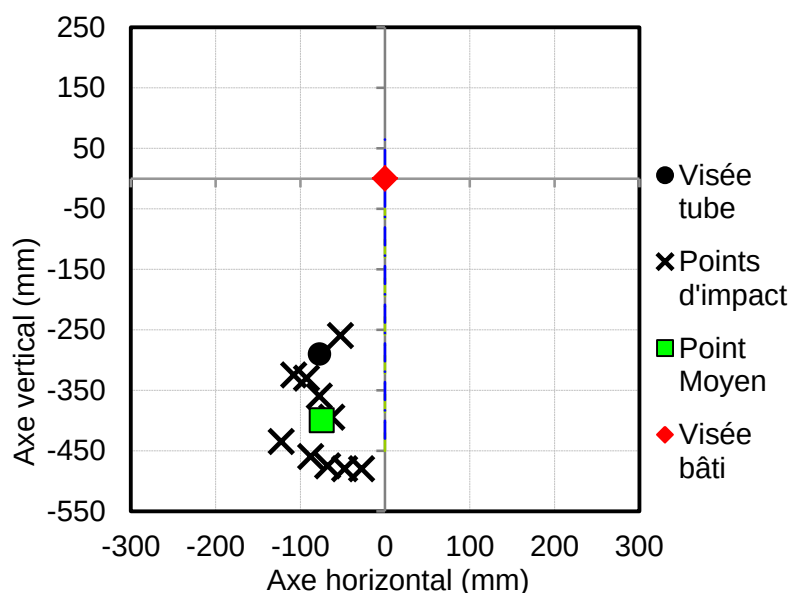


Figure IV-20 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41433.

Numéro du tube	445	41388	41433
Justesse en x (mm)	24	204	3
Justesse en y (mm)	-38	-321	-110
Justesse globale (mm)	44,3	380	110
Dispersion en x (mrad)	0,36	0,8	0,29
Dispersion en y (mrad)	0,46	0,54	0,78
Dispersion globale (mrad)	0,42	0,68	0,59
V_0 moyenne (m/s)	1383	1369	1387
Ecart type de V_0	1,78	3,59	2,76

Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OFL avec frein de bouche.

Les tirs d'OX réalisés précédemment, dans les mêmes conditions, avaient donné des résultats très différents. En effet, les dispersions étaient plus faibles et relativement proches les unes des autres et les justesses étaient elles aussi plus faibles globalement. De plus, le tube le moins précis lors des tirs d'OX n'est pas le moins précis lors des tirs d'OFL. Ainsi, les résultats confirment la différence de comportement entre les deux types de munitions.

L'usure du tube 41388 ayant évolué entre les deux phases des essais, les conditions initiales des tirs avec OFL étaient différentes de celles des tirs d'OX. Ainsi, les comparaisons réalisées entre les différents tirs de la phase 2 sont moins fiables.

Le tube 41388 est celui dont les vitesses de sortie des munitions sont les plus faibles, comme cela avait été observé dans le cas des tirs d'OX.

IV.4.2.1.2. Résultats sans frein de bouche

Les cibles obtenues lors des tirs d'OFL sans frein de bouche sont présentées en Figures IV-21 à IV-23. Les valeurs des justesses et des dispersions sont données par le Tableau 11. Les résultats obtenus montrent que le tube 445 a les moins bonnes justesses et le tube 41388 les moins bonnes dispersions. Dans le cas des tirs sans frein de bouche, le tube tirant le mieux est le 41433. Ainsi, entre les tirs avec ou sans frein de bouche les tendances ont été complètement inversées, sauf concernant les dispersions du tube 41388. Cette observation prouve l'influence non négligeable du frein de bouche sur les tirs d'OFL également.

Les vitesses moyennes sont très proches puisque qu'entre les tirs avec ou sans frein de bouche, les écarts sont inférieurs à 3 m/s. Les vitesses sont toujours dans les ordres de grandeurs constatés en arme.

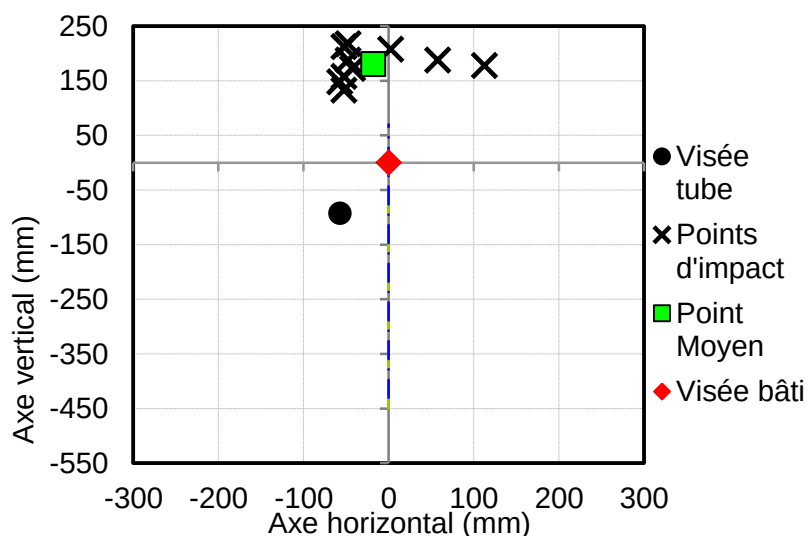


Figure IV-21 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 445 sans frein de bouche.

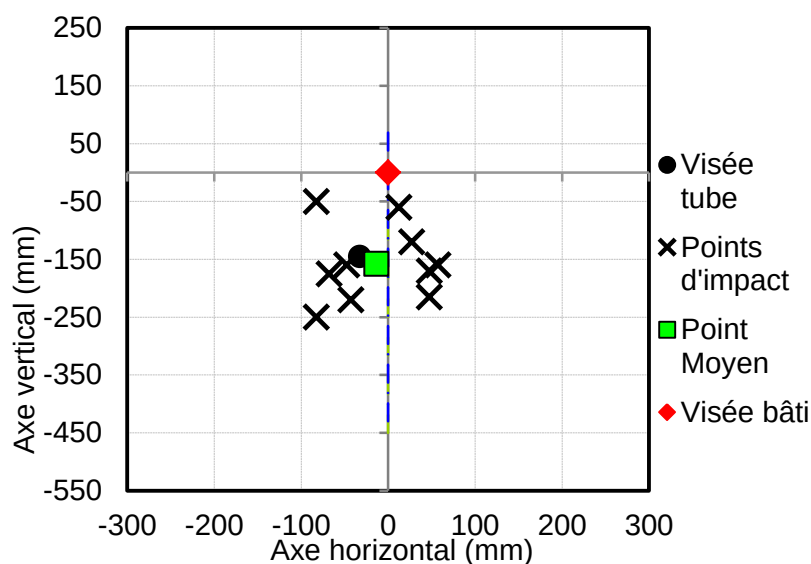


Figure IV-22 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41388 sans frein de bouche.

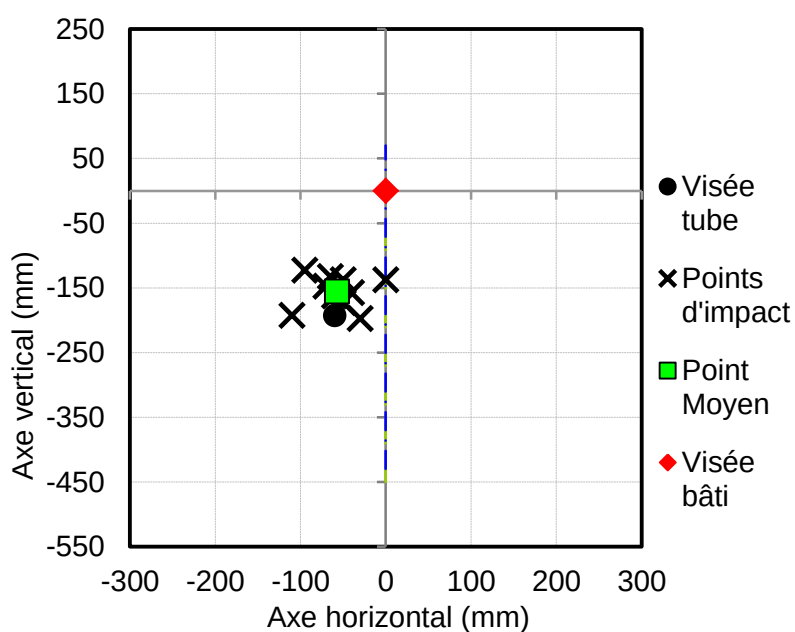


Figure IV-23 : Résultats des tirs d'OFL à 100 mètres du tube 41433 sans frein de bouche.

Numéro du tube	445	41388	41433
Justesse en x (mm)	40	20	3
Justesse en y (mm)	273	-13	37
Justesse globale (mm)	275	24	37
Dispersion en x (mrad)	0,58	0,57	0,31
Dispersion en y (mrad)	0,28	0,66	0,25
Dispersion globale (mrad)	0,46	0,61	0,29
V_0 moyenne (m/s)	1380	1372	1386
Ecart type de V_0	2,34	3,97	4,15

Tableau 11 : Récapitulatif des valeurs obtenues lors des tirs d'OFL sans frein de bouche.

IV.4.2.2. Déplacements de la bouche

Afin de comparer le comportement de la bouche des trois tubes au cours des tirs avec frein de bouche, les allures des déplacements vus depuis la tranche arrière ont été tracés (Figures IV-24 à IV-26). Ainsi, les courbes démarrent à l'origine du repère, ce qui correspond à la position de la bouche au repos, et l'autre extrémité de la courbe présente sa position au moment du largage de la munition.

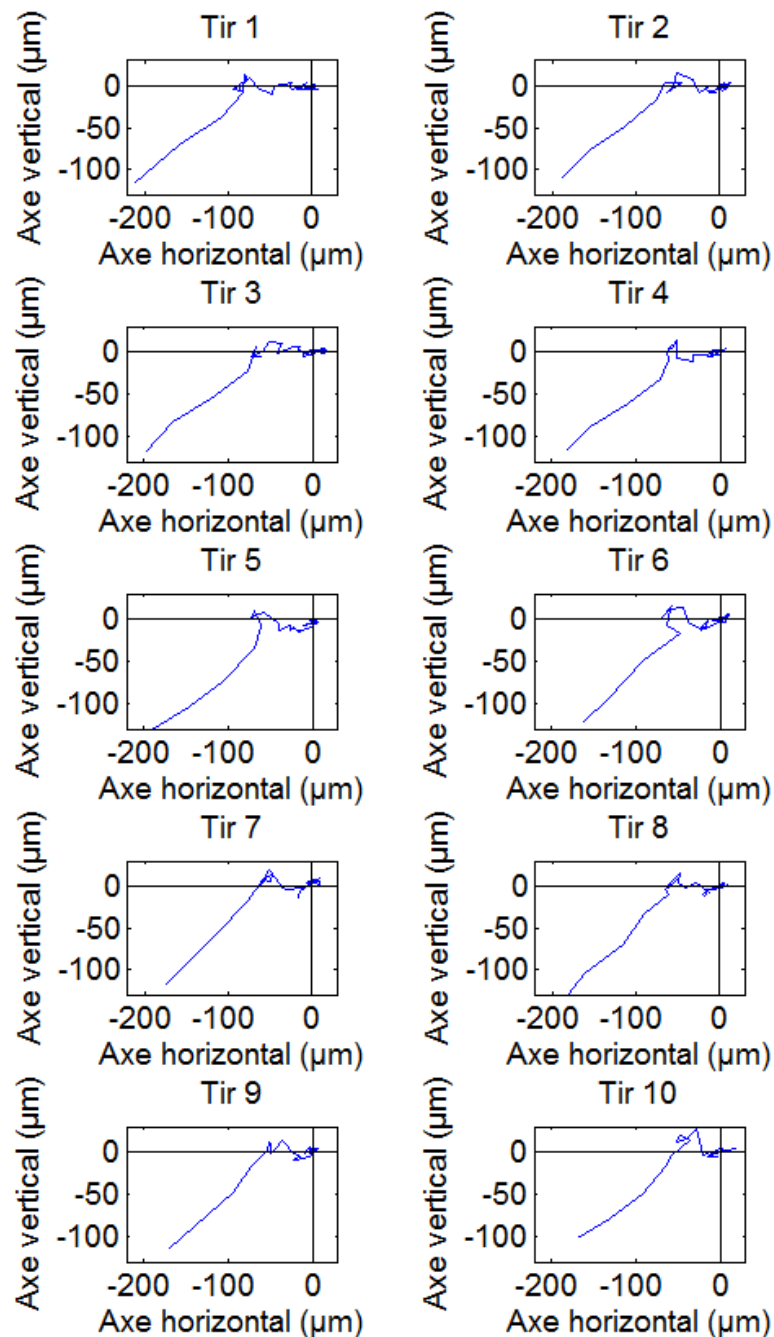


Figure IV-24 : Déplacements de la bouche du tube 445 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.

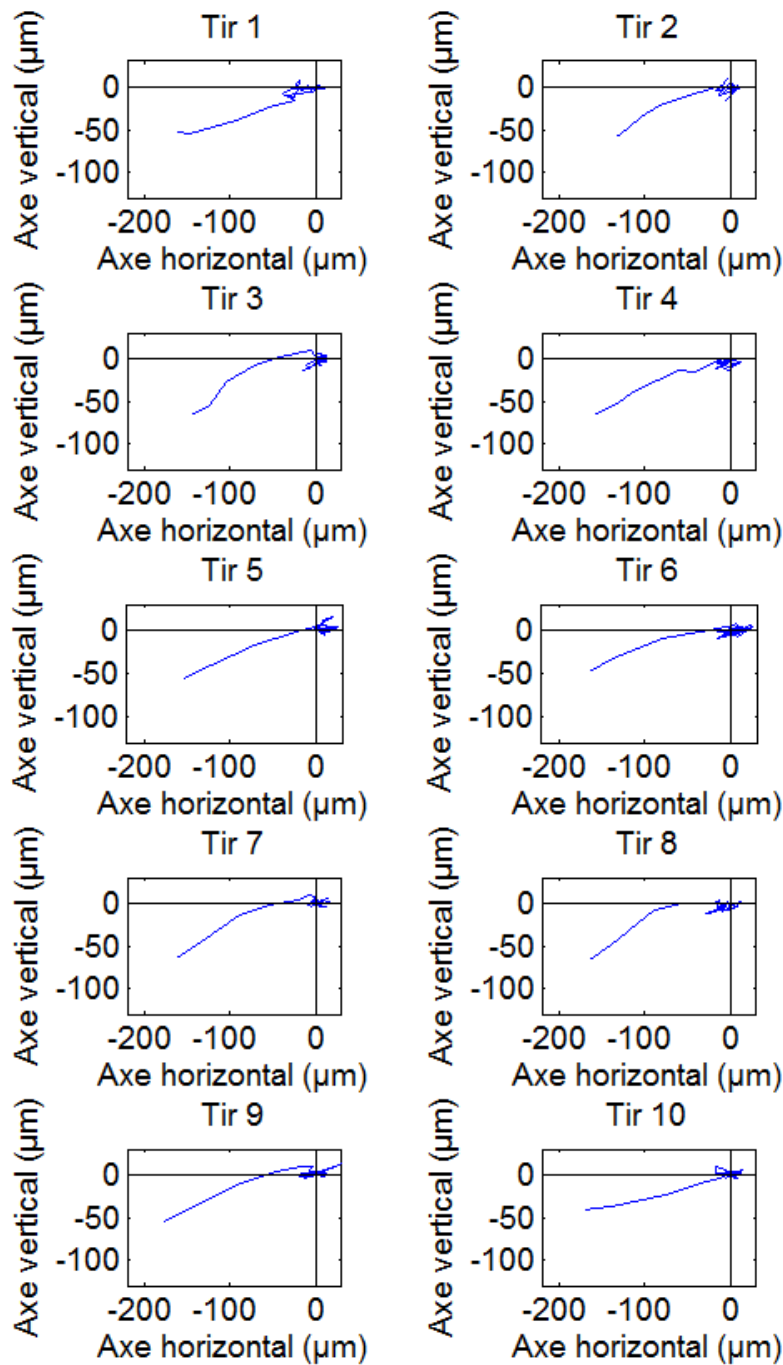


Figure IV-25 : Déplacements de la bouche du tube 41388 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.

Les déplacements sont proches entre chaque coup pour un tube donné, et sont également très proches pour chaque tube au moment du largage. En effet, la bouche du tube semble se déplacer dans la même direction, lorsque la munition quitte le tube. L'amplitude des mouvements sont également proches pour les tubes 445 et 41388. Le tube 41433 montre un point au moment du largage un peu plus proche de la position initiale du tube. Ainsi, malgré des mouvements des tubes similaires en fin de parcours de balistique intérieure, les impacts à la cible sont très différents. Il est possible que les déplacements de

la bouche ne fassent pas partie, ici, des paramètres influençant les écarts à la cible. Il est également possible que l'orientation du frein de bouche ait augmenté l'amplitude des déplacements dans un axe privilégié, masquant ainsi les variations des déplacements entre chaque tir.

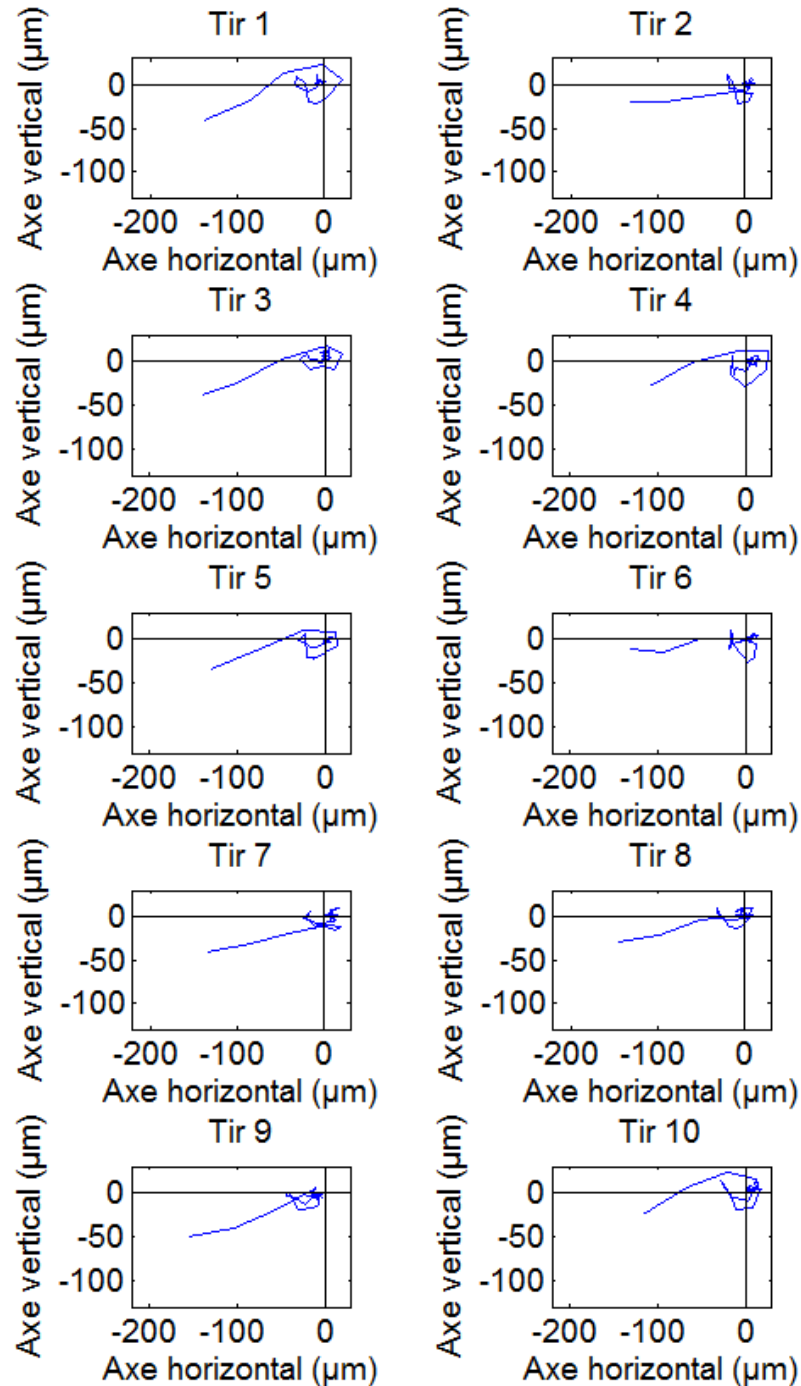


Figure IV-26 : Déplacements de la bouche du tube 41433 au cours des 10 tirs avec frein de bouche.

IV.4.3. Interprétations des résultats

Les résultats des tirs d'OFL ont montré que, comme pour les tirs d'OX, l'influence du frein de bouche est importante. En effet, les valeurs de dispersion et de justesse des trois tubes sont très différentes avec ou sans frein de bouche.

Les tirs sans frein de bouche ont permis de confirmer une des observations notées lors de l'étude statistique (paragraphe III.2.2). En effet, le tube 445 dont l'amplitude du défaut est la plus importante, montre les plus grandes valeurs de dispersion à la cible. En revanche, l'effet du nombre de pics sur la dispersion ne semble pas ressortir pour les essais à l'aide d'OFL alors que cela avait pu être décelé lors des essais à l'aide d'OX. Il est possible que l'usure plus importante du tube 41388, par rapport aux deux autres, ait perturbé l'analyse de la seconde étape.

Les mesures des déplacements de la bouche du tube, ayant eu lieu lors des tirs avec frein de bouche, ont présenté des allures très proches au moment de la sortie de la munition (même orientation), avec toutefois une amplitude un peu plus faible pour le tube 41433. Malgré cela, les résultats à la cible étaient très différents. Cela signifie que les mouvements de la bouche ne semblent pas conditionner la direction de la munition jusqu'à la cible.

Les résultats des tirs d'OFL ne donnent pas du tout les mêmes résultats que ceux d'OX. Les valeurs de dispersion restent du même ordre de grandeur. En revanche, la justesse est globalement meilleure pour les munitions de plein calibre. On peut donc en conclure que les munitions flèches sont plus sensibles aux variations de géométrie des tubes.

IV.5. Conclusions

Dans le but de confirmer les premières observations relevées au cours de l'analyse statistique concernant la rectitude (chapitre III), des essais ont été menés à l'aide de trois tubes de rectitudes différentes. Afin de faire varier au minimum les paramètres, les essais se sont déroulés en intérieur et en appareil de tir. Ce dernier permet d'isoler la part du tube dans les écarts à la cible. Par ailleurs, les essais ont été menés en deux phases, l'une pour les tirs des munitions de plein calibre et la seconde pour les tirs de munitions flèches.

Les résultats de ces essais ont montré que les résultats de justesse et de dispersion sur cible sont très différents selon le type de munition tiré (OX et OFL). Cela corrobore les observations faites lors de l'analyse statistique (listes des paramètres influents différentes pour les OX et OFL).

L'utilisation du frein de bouche a changé significativement l'emplacement du point moyen et les valeurs de dispersion. En revanche, les mesures des déplacements de la bouche n'ayant pas pu être réalisées pour les tirs sans frein de bouche, il n'est pas possible de connaître l'effet de ce dernier sur le comportement du tube. Ainsi, il est difficile de savoir si, lors des tirs avec frein de bouche, les changements à la cible constatés étaient directement dus au frein de bouche (influence de la répartition des gaz à la sortie du projectile par exemple) ou bien de son influence sur le comportement du tube (modes propres du tube).

Les résultats des tirs sans frein de bouche ont été analysés afin de déterminer l'influence de la rectitude sur la justesse et la dispersion. Il en est ressorti que l'amplitude du défaut de rectitude influence particulièrement la justesse. En effet, que ce soit lors des tirs d'OX ou d'OFL, c'est le tube ayant le défaut de rectitude le plus important qui a également montré un point moyen des impacts à 100 mètres le plus éloigné de la visée statique. Cette observation avait été également notée lors de l'étude statistique, mais uniquement pour les tirs d'OFL.

Concernant le nombre de pics des profils de rectitude des tubes, il semblerait qu'il affecte la dispersion des OX. Cela ne s'est pas avéré vrai pour les tirs des OFL. L'étude statistique, elle, avait révélé l'inverse, c'est-à-dire que le nombre de changements de pente influence peu les munitions de plein calibre mais influence significativement les munitions flèches. Il est possible que l'état d'usure des tubes, différent au moment des tirs d'OFL, ait empêché de montrer l'importance du nombre de pics sur la dispersion (tirs effectués par le tube 41388 entre l'étape 1 et 2).

En conclusion, les essais menés à l'aide de ces 3 tubes ont permis de confirmer l'influence du frein de bouche et de constater que les comportements des OX et OFL sont très différents. Les tirs réalisés ont également confirmé l'influence de l'amplitude du défaut de rectitude sur la justesse, ce qui correspond au résultat issu de l'étude statistique. Cette analyse n'ayant fait intervenir qu'un faible nombre de tubes, elle ne suffit pas à affirmer les tendances observées. La rectitude étant un paramètre dépendant des conditions de fabrication, les défauts d'amplitude sont représentatifs des ordres de grandeur relevés en sortie de production. Ainsi, réaliser une étude paramétrique à l'aide de mesures expérimentales est impossible à mettre en place. La solution est donc d'utiliser un modèle de simulation de tir d'un projectile de 25 mm. Il permettra de comprendre le rôle de la rectitude sur le comportement de la munition et donc sur les écarts à la cible.

Afin de réaliser ce modèle, il est nécessaire de vérifier que certaines données en sortie sont proches des observations expérimentales. Si ce n'est pas le cas, les conditions initiales du modèle doivent être ajustées afin que ses résultats correspondent aux mesures

effectuées lors d'essais. C'est pourquoi, il apparaît nécessaire d'instrumenter non seulement un tube de 25 mm, mais aussi des projectiles. Cependant, à l'heure actuelle, même si cela reste délicat, l'instrumentation d'une munition de plein calibre est plus aisée que celle d'une munition flèche. Un choix a donc été fait, de simuler le tir d'un OX plutôt que celui d'un OFL. Le chapitre suivant présente les essais qui ont permis le recalage du modèle numérique présenté au chapitre VII.

V. Tirs de munitions avec instrumentation embarquée

V.1. Présentation du projet

Ce chapitre présente les expérimentations ayant permis le recalage du modèle numérique de simulation de tir. Lors de ces essais, des mesures de gonflement du tube, de déplacement de sa bouche et des mesures des accélérations longitudinales et radiales de projectiles de plein calibre ont été effectuées. La mesure des accélérations du projectile repose sur la méthode d'acquisition en temps réel à l'aide d'un système optoélectronique tel que décrite au paragraphe II.4.3.2 [WEG 84]. Ce type de solution n'ayant encore jamais été mis en œuvre, elle a dû être validée par plusieurs essais de tests de fonctionnement du système optoélectronique.

Dans un premier temps, le projet de validation du système est présenté. Ensuite, les différentes étapes préliminaires aux essais ayant permis les mesures de recalage sont exposées. Enfin, les résultats des mesures effectuées lors des essais finaux sont analysés.

V.1.1. Présentation de la méthode d'acquisition en temps réel

La solution retenue pour acquérir les accélérations du projectile en temps réel repose sur une transmission des données par voie optique (solution aussi appelée optoélectronique) qui a été mise au point en partenariat avec la société ATCOM Télémétrie⁶. Pour ce faire, une source de type Laser (dont la fréquence d'émission est dans le spectre visible) est montée dans la tête du projectile (Figure V-1). Les accéléromètres retenus pour ces mesures, sont des triaxiaux résistants à des accélérations maximales de 100 000 g et dont la plage de mesure est comprise entre plus ou moins 60 000 g (Annexe 3).

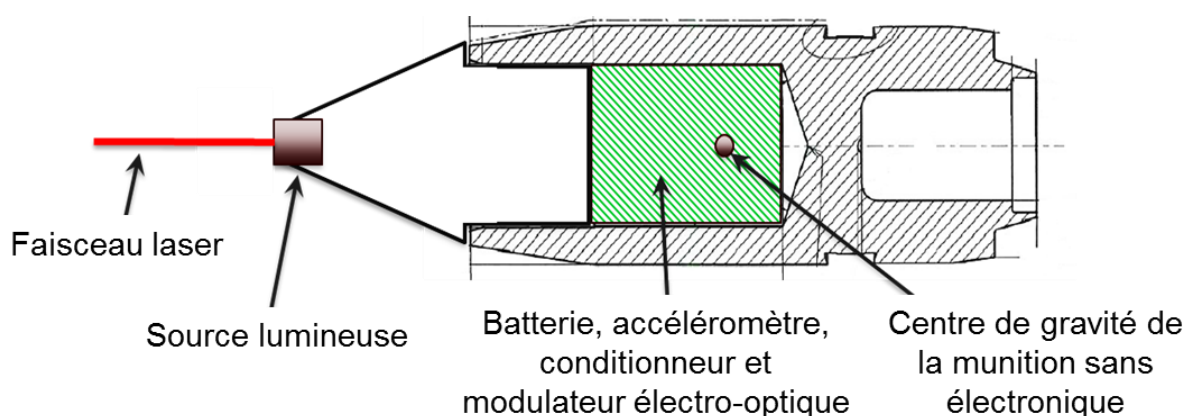


Figure V-1 : Schéma de l'instrumentation de la munition.

⁶ La société ATCOM Télémétrie est une PME dont le siège social se trouve à Chécy près d'Orléans. Elle a été fondée en 1975 et compte actuellement 15 salariés.

Le codage des informations des accéléromètres triaxiaux est réalisé par un circuit regroupant le modulateur électro-optique et le conditionneur embarqués dans le projectile. Ce codage se fait par une succession de « zéro » et de « 1 », dans un ordre qui correspond aux accélérations mesurées. De manière imagée, il est possible de se représenter la transmission et le décodage comme un signal « morse » reçu et décodé par le récepteur.

La lumière émise est recueillie en temps réel par un récepteur électro-optique placé hors du tube, qui transforme l'information en courant électrique. Après amplification et décodage, les informations sont restituées sous forme analogique. Une lentille de Fresnel intercepte le faisceau et assure ainsi l'interface optoélectronique des signaux modulés. Les essais ont lieu dans le noir afin d'éviter au maximum les sources de lumière pouvant gêner la détection du laser par la lentille. Pour que le récepteur optique ne soit pas dans l'axe de tir du projectile, le faisceau est transmis par l'intermédiaire d'un miroir. La Figure V-2 présente un schéma du dispositif.

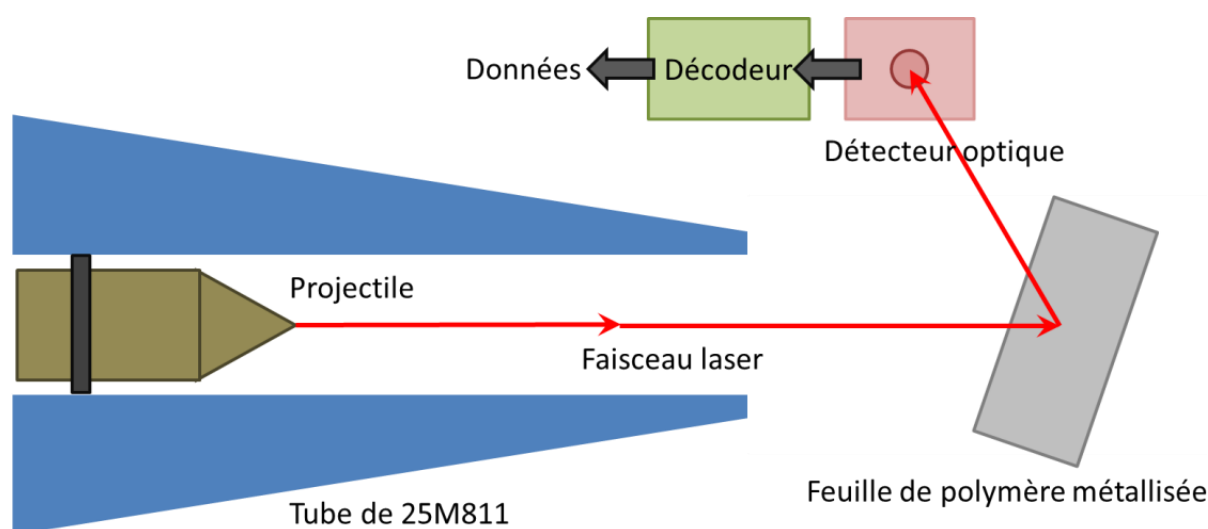


Figure V-2 : Principe de transmission optique.

V.1.2. Modifications de la géométrie des OX

Afin de répondre aux contraintes liées à l'instrumentation des munitions, certaines modifications géométriques des obus ont été nécessaires, tout en les limitant au maximum. En effet, changer de manière trop importante la géométrie des munitions peut générer d'importantes variations de répartition des masses et ainsi conduire à des comportements des munitions instrumentées différents des munitions de base.

Les premières modifications ont concerné l'usinage de l'intérieur du corps d'obus afin de disposer d'un espace suffisant pour introduire l'électronique embarquée, cela sans fragiliser

la munition. De plus, quatre nervures ont été réalisées pour bloquer en rotation l'ensemble de l'électronique noyé dans de la résine d'époxy comblant l'intégralité du volume du corps d'obus (Figure V-3). Le plan du corps d'obus est disponible en Annexe 4.

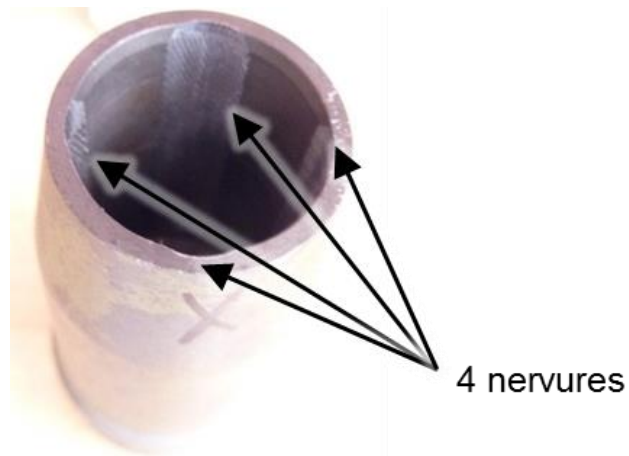


Figure V-3 : Photo des nervures usinées à l'intérieur du corps de la munition avant instrumentation.

Le laser étant le composant qui consomme le plus d'énergie, ce dernier a été placé dans la fausse fusée qui peut ainsi être vissée au corps d'obus à la dernière minute. Le plan de la fausse fusée est présenté en Annexe 5. Toujours pour éviter de décharger la batterie de la munition avant tir, un cavalier a été placé dans le corps d'obus afin de fermer le circuit électronique juste avant de visser la fausse fusée (Figure V-4).

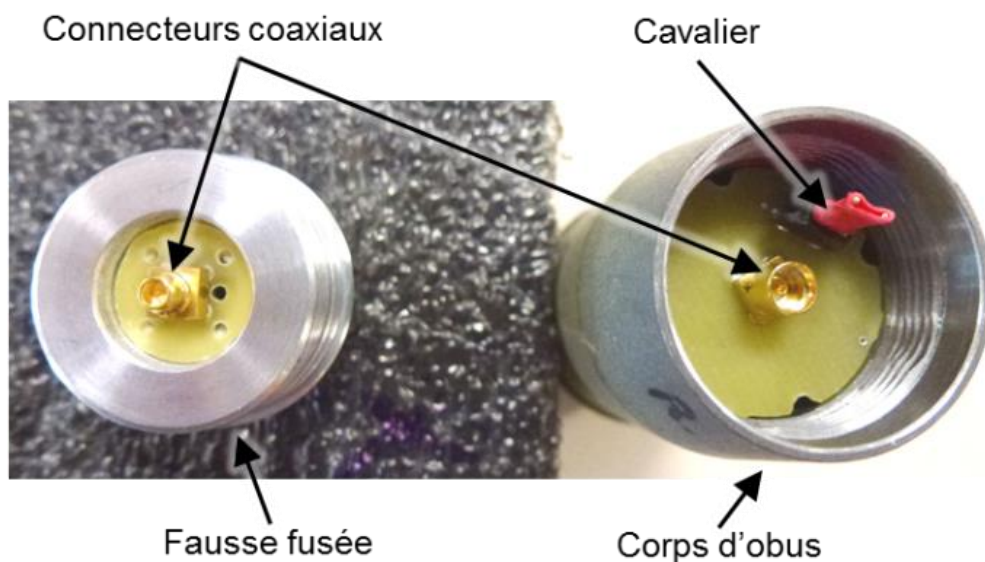


Figure V-4 : Photo de l'obus avec l'électronique intégré non résiné.

Le centre de gravité d'une munition instrumentée se situe quasiment au même emplacement que celui d'une munition de plein calibre classique. L'écart de positionnement est de l'ordre du millimètre.

La quantité de poudre utilisée est inférieure à celle utilisée pour les OXT classiques afin de ne pas dépasser une accélération maximale de 60 000 g (limite de validité des accéléromètres).

V.1.3. Etapes du projet

Avant de commencer les essais, plusieurs étapes préliminaires ont été nécessaires.

La première avait pour but de vérifier que la capacité de la batterie choisie serait suffisante pour alimenter le laser et les accéléromètres pendant toute la durée du passage de la munition dans le tube. Cette étape permettait également de vérifier la tenue aux chocs liés au tir du matériel électronique. Ainsi, deux munitions avec le système de télémétrie embarqué ont été tirées sans accéléromètre.

La seconde étape a consisté en un essai de tirs tests à l'aide de 3 munitions dont 2 instrumentées. La première, non instrumentée, avait pour vocation de vérifier le déclenchement des acquisitions. Pour les munitions instrumentées, chacune était équipée d'une voie appelée « voie test » permettant de vérifier la puissance du signal reçu par la lentille de Fresnel. Elles embarquaient également un accéléromètre uniaxe destiné à enregistrer l'accélération radiale du projectile au cours du tir et ainsi d'en connaître les ordres de grandeur.

La dernière étape a permis le tir de 12 munitions instrumentées à l'aide d'un accéléromètre triaxial. C'est lors de ces essais que le gonflement du tube en différentes sections et ses déplacements à la bouche ont été mesurés.

Toutes ces étapes ont été réalisées en appareil de tir pour les raisons citées précédemment (chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

V.1.4. Tube choisi

Le tube ayant servi aux différentes étapes du projet de tir de munitions instrumentées, est un tube ayant un profil de rectitude relativement simple à reproduire pour la simulation numérique (Figure V-5).

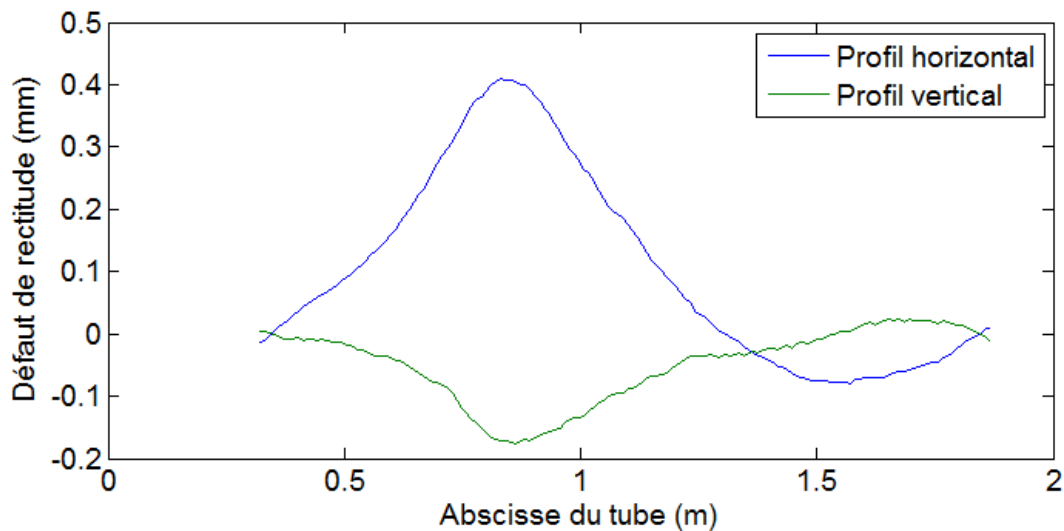


Figure V-5 : Profil de rectitude du tube choisi pour les essais de munitions instrumentées.

V.2. Déroulement des essais préliminaires

V.2.1. Etape 1

V.2.1.1. Présentation des essais

Les munitions instrumentées pour cette première étape utilisaient une pile directement reliée au laser située dans la fausse fusée. Seul le détecteur optique était nécessaire afin de vérifier le fonctionnement du faisceau laser au cours du tir. Aucun signal codé n'était envoyé.

Trois munitions ont ainsi été instrumentées (Figure V-6). La première avait pour but d'effectuer l'alignement, c'est-à-dire de définir l'emplacement du miroir (pour ces essais une feuille de polymère collée sur du carton) et ensuite la position de la lentille de Fresnel (Figure V-7). Cette munition a été encartouchée⁷ sans poudre afin de ne pas risquer de placer la munition de travers dans la chambre lors de l'alignement. Une fois le matériel correctement disposé, les deux autres munitions instrumentées ont été tirées. Lors de ces tirs, la puissance de la lumière reçue par la lentille de Fresnel a été enregistrée. De plus, la vitesse V_0 , et la pression dans la chambre ont été mesurées. Ceci a permis de s'assurer que l'accélération maximale de la munition au cours du tir n'avait pas dépassé la limite des 60 000 g pouvant être mesurés par les accéléromètres triaxiaux choisis. Enfin, une caméra rapide a été utilisée afin de déterminer l'instant où sort le projectile appelé temps de bouche. En effet, comme toutes les mesures ont été synchronisées avec le signal envoyé au

⁷ Encartouchage : fixation de la cartouche à l'arrière du projectile. Cette dernière doit être sertie de la même manière pour chaque munition afin de ne pas faire varier la force nécessaire à son desserrage au cours du tir. Dans le cas contraire, la développée de pression dans la chambre, et donc la courbe de déplacement du projectile, serait modifiés.

percuteur, le temps zéro ne correspond pas au départ du coup. Ainsi, les mesures ne sont pas seulement réalisées pendant la phase de balistique intérieure, mais également pendant les étapes qui la précède, soit l'envoi du signal de déclenchement, le relâchement du marteau, la percussion et enfin, le début de la combustion de la poudre (il faut une certaine pression dans la chambre avant que la munition puisse se détacher de sa cartouche : on parle de force de dessertissage).

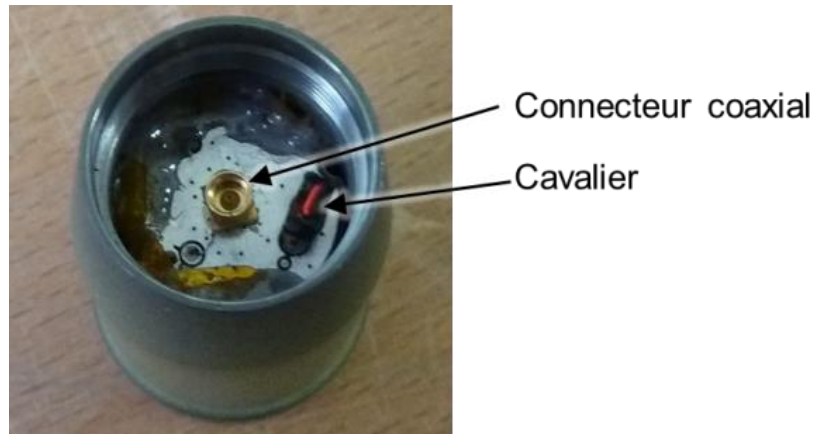


Figure V-6 : Intérieur du corps d'obus avec l'électronique embarquée résinée.

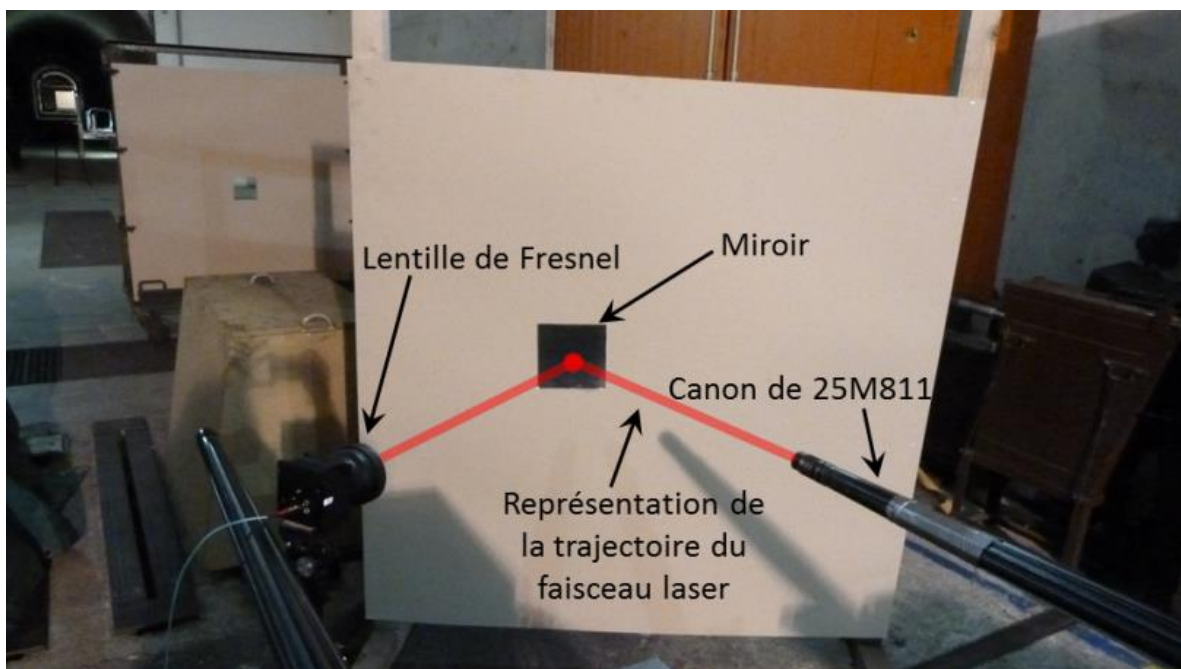


Figure V-7 : Photo du dispositif de mesure par Télémétrie.

V.2.1.2. Résultats de vitesse et pression

Les masses et les vitesses V_0 des projectiles instrumentés lors des tirs sont données dans le Tableau 12. Il en ressort que les masses des projectiles étaient très proches des masses des munitions de plein calibre classiques. Quant à la vitesse de sortie, elle est

environ plus faible de 14%, par rapport à un tir classique, en cohérence avec la quantité de poudre réduite intentionnellement.

Numéro du tir	1	2
Masse totale de l'obus instrumenté (g)	176.0	175.6
Ecart de la masse par rapport à une munition classique (%)	-3.9	-4.1
V_0 (m/s)	942	944
Ecart de vitesse en sortie de tube par rapport à une munition classique (%)	-14.4	-14.2

Tableau 12 : Masses et V_0 des projectiles obtenues lors des deux tirs.

Les courbes de pression dans la chambre pendant la phase de balistique intérieure sont présentées en Figure V-8. Les courbes se superposent parfaitement, ce qui montre bien que les conditions initiales des deux tirs étaient identiques. L'accélération longitudinale maximale atteinte par chacune des munitions instrumentées a alors pu être calculée (de l'ordre de 52 000 g). Le temps de parcours des projectiles dans le tube a été déterminé à 3.37 ms. Lors d'un tir à l'aide de munitions classiques, la pression maximale est de 328 MPa, ce qui correspond à une accélération maximale de 75 000 g et à un temps de parcours de 2.93 ms.

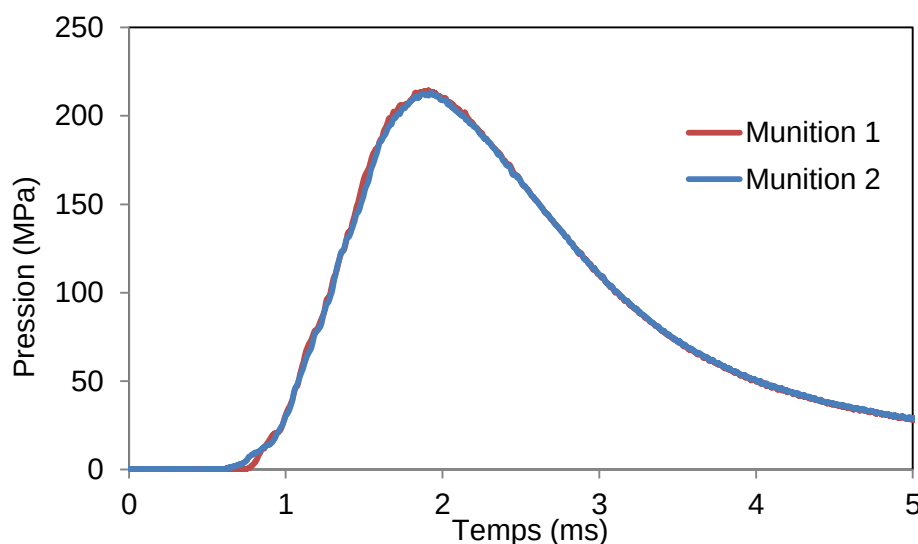


Figure V-8 : Pression chambre au cours des deux tirs.

V.2.1.3. Caméra rapide

La caméra rapide a permis de filmer le miroir au cours des tirs. Cette dernière enregistrait 3000 images par seconde. Le contraste insuffisant n'a pas permis d'observer la tache du

faisceau laser sur le miroir au cours du tir (tache faisant plus de 25 mm de diamètre à 2 m). En revanche, comme le montre la Figure V-9, il a été possible de déterminer le temps de bouche. Ainsi, la munition quitte le tube entre 4.33 et 4.67 ms après l'envoi du signal de percussion.



Figure V-9 : Images de la caméra rapide au moment de la sortie du projectile.

V.2.1.4. Signal enregistré par la lentille de Fresnel

Le projectile est sorti environ 4.5 ms après la percussion, et le signal du laser est perdu peu de temps après (Figure V-10). Cela signifie que la lentille de Fresnel a reçu le faisceau réfléchi du laser jusqu'à ce que le projectile sorte du tube et par conséquent que l'électronique embarquée a résisté aux accélérations du projectile.

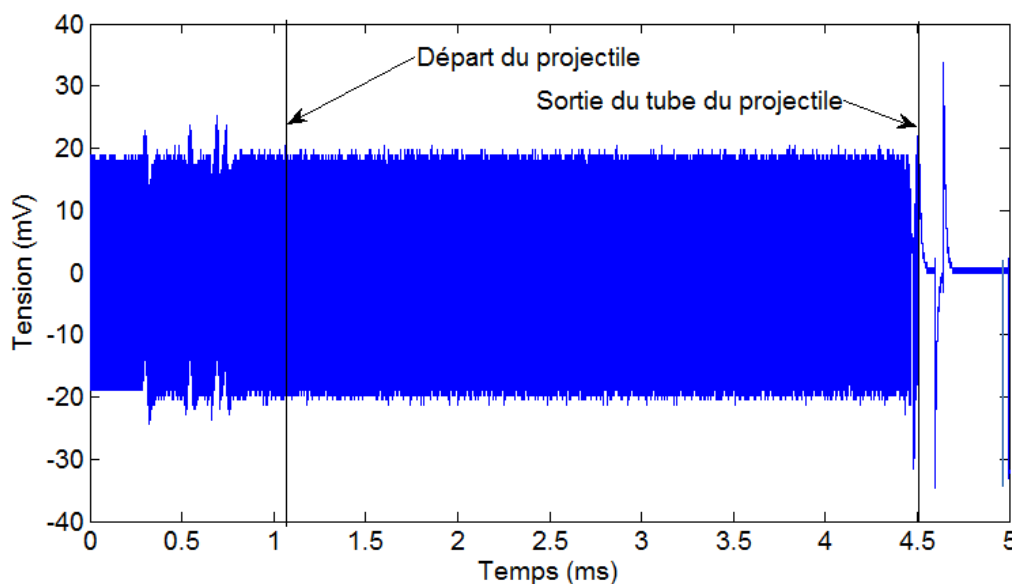


Figure V-10 : Signal reçu par la lentille de Fresnel au cours du premier tir.

Le signal perçu par la lentille de Fresnel a été perdu au moment où la munition a quitté le tube, c'est-à-dire qu'aucun signal n'a été enregistré entre le largage et la traversée du miroir. Il est possible que cela soit dû à l'augmentation des mouvements du projectile au moment de sa sortie. En effet, si le projectile prend un angle trop important, une partie du signal réfléchi

risque de ne pas arriver sur la lentille de Fresnel, se traduisant par une perte de puissance de réception suffisante pour rendre le déchiffrement des données envoyées par le laser impossible.

V.2.1.5. Cible à 100 mètres

Les munitions instrumentées tirées ont une justesse globale (distance par rapport à la visée tube) de 80 et 100 mm pour le premier tir et le second tir respectivement (Figure V-11). Les points d'impact sont proches du point moyen obtenu en tir de recette de munitions avec le même tube (les recettes de munitions sont réalisées en appareil de tir). De plus, ils se trouvent dans la même région de la cible (en haut à gauche). Cela signifie que le comportement des munitions instrumentées est très proche de celui d'une munition de plein calibre classique et que par conséquent, les modifications apportées aux munitions ont peu changé la répartition des masses et la position du centre de gravité.

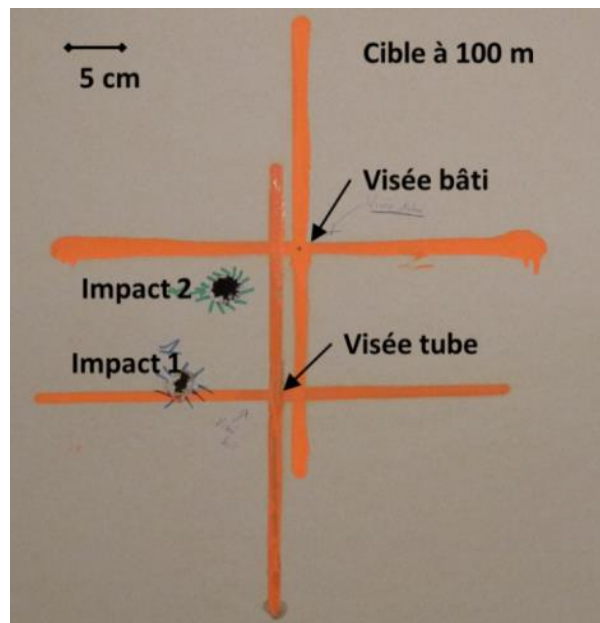


Figure V-11 : Cible montrant les impacts des deux tirs réalisés lors des essais.

V.2.1.6. Conclusions

Les résultats des essais menés lors de la première étape du projet sont bien ceux qui étaient attendus. En effet, la vitesse du projectile en sortie est inférieure à celle obtenue lors de tirs de recette en liaison avec le détarage⁸ de la munition. Lors des deux tirs, les courbes de pression dans la chambre étaient identiques, ce qui atteste de la reproductibilité des tirs pour les munitions instrumentées.

⁸ Détarage : réduction de la quantité de poudre habituellement utilisée.

Les mesures réalisées ont démontré que l'électronique embarquée supporte les conditions de tir. En revanche, il a été constaté que lorsque les mouvements du projectile étaient plus importants, notamment au moment du largage, l'angle du faisceau était tel que ce dernier sortait en partie du champ de détection de la lentille de Fresnel rendant l'intensité lumineuse trop faible pour être mesurée. Ainsi, pour l'étape 2 du projet, la feuille de papier aluminium sur support polymère a été remplacée par un miroir afin que le signal réfléchi gagne en intensité. Une lentille convergente a également été rajoutée dans la fausse fusée afin de collimater le faisceau et être ainsi moins sensible aux angles de la munition.

Une amélioration supplémentaire a été réalisée en ajoutant aux différentes voies transmises par le faisceau du laser, une quatrième voie appelée voie test. Cette dernière envoie un signal en dent de scie parfaitement connu, afin de vérifier que le déchiffrement des données réceptionnées permettait bien de retrouver le même signal que celui envoyé. Dans le cas contraire, cela aurait voulu dire, qu'à certains moments, la puissance reçue par la lentille de Fresnel était trop faible pour pouvoir retranscrire les informations envoyées par le laser.

V.2.2. Etape 2

V.2.2.1. Présentation des essais

La seconde étape du projet a consisté à tester les améliorations apportées à la munition (Figure V-12) et à la mesure des accélérations radiales de la munition (accélérations dans le plan perpendiculaire au sens de déplacement du projectile).

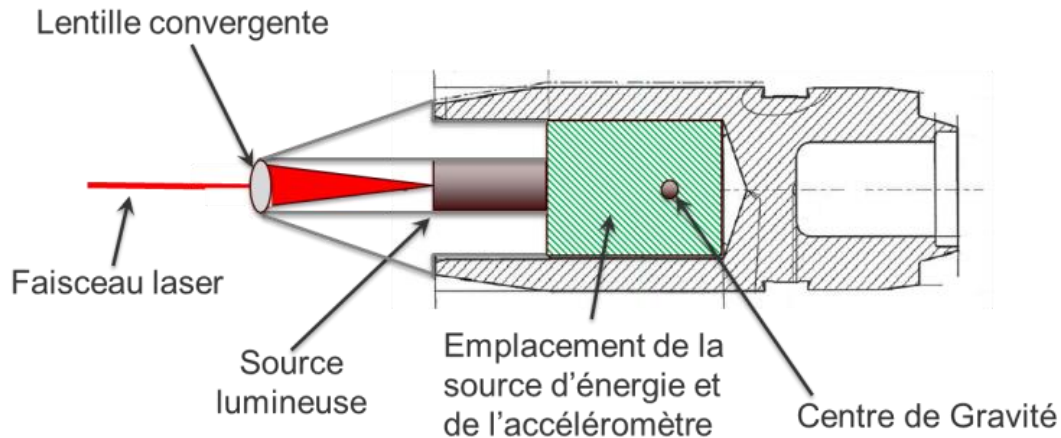


Figure V-12 : Ajout de la lentille convergente.

Lors des essais présentés ici, trois tirs ont été réalisés. Le premier concernait une munition classique avec la charge définie pour les munitions instrumentées, utilisée afin de vérifier que la pression chambre mesurée correspondait à celle attendue (pression maximale seuil afin de ne pas dépasser une accélération longitudinale de 60 000 g). Les deux tirs suivants ont été réalisés à l'aide de 2 munitions instrumentées. Elles étaient équipées d'un accéléromètre uniaxe et d'une voie test transmettant une courbe en dent de scie connue permettant de vérifier la bonne réception du signal (Figure V-13).

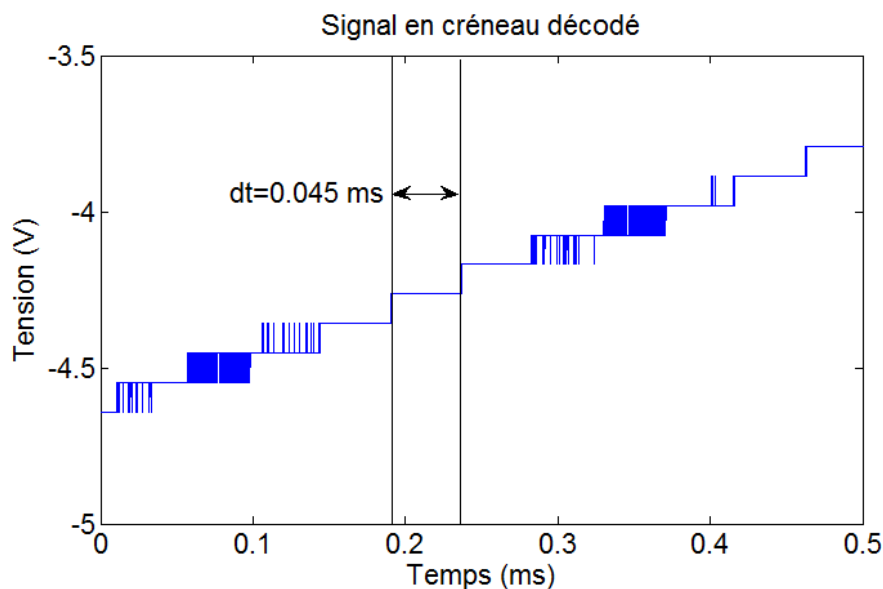


Figure V-13 : Temps d'incrémentation de la rampe du signal en créneau.

La première munition enregistrait des accélérations pouvant aller jusqu'à $\pm 15\,000\text{ g}$ grâce à un accéléromètre fourni par l'entreprise ATCOM. La seconde munition était équipée d'un accéléromètre pouvant mesurer des accélérations à $\pm 60\,000\text{ g}$ (Accéléromètre PCB).

Comme lors de l'étape 1, les mesures de pression de la chambre et de vitesse V_0 ont été réalisées. Cette fois-ci un capteur de temps de bouche a été utilisé afin de déterminer de façon plus précise le temps de bouche (Figure V-14). Ce capteur est fixé à la bouche du tube et permet de repérer le passage de la ceinture du projectile grâce à un champ magnétique.

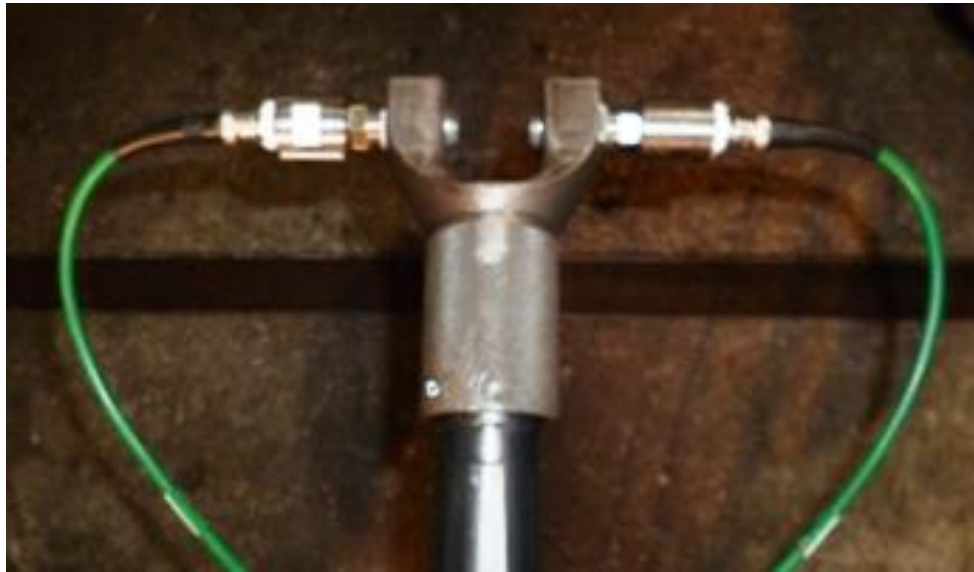


Figure V-14 : Capteur de temps de bouche.

V.2.2.2. Résultats de vitesse et pression

Ci-dessous les résultats obtenus pour les trois munitions tirées :

Numéro du tir	1	2 (uniaxe)	3 (uniaxe)
Masse totale de l'obus instrumenté (g)	179.3	179.3	180.9
Ecart de la masse par rapport à une munition classique (%)	-2.2	-2.2	-1.3
V_0 (m/s)	925	924	923
Ecart de vitesse en sortie de tube par rapport à une munition classique (%)	-15.9	-16	-16.1
Temps de bouche (ms)	3.904	4.012	4.052

Tableau 13 : Masses et V_0 des projectiles obtenues lors des trois tirs.

Les courbes de pression obtenues lors des tirs sont présentées en Figure V-15. Elles sont très proches les unes des autres, ce qui signifie que les différences de masse entre les

projectiles étaient suffisamment faibles pour ne pas modifier la développée de pression. Compte tenu des pressions observées, l'accélération longitudinale maximale subie par les munitions était de 53 000 g environ.

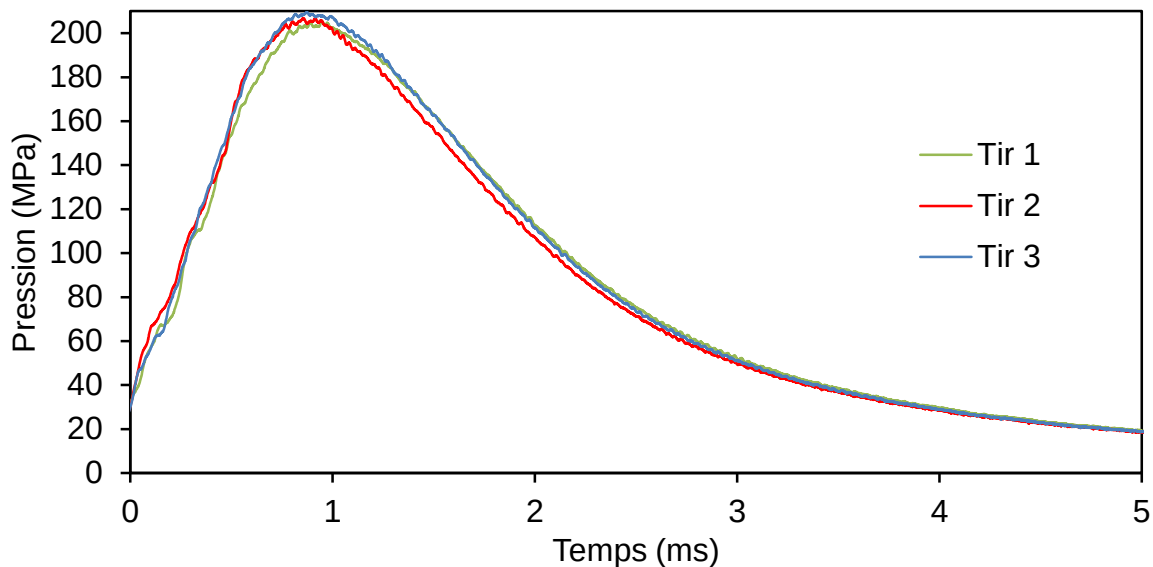


Figure V-15 : Courbes de pression chambre pour chaque tir de munition instrumentée.

V.2.2.3. Accélérations du projectile

Lors des deux tirs avec accéléromètres embarqués, le calcul du coefficient de conversion, C , est nécessaire pour comparer le signal en tension reçu en accélération mesurée par l'accéléromètre. Afin d'obtenir ce coefficient, la sensibilité de chaque accéléromètre, que l'on notera ici S , doit être connue de façon précise. Le calcul du coefficient est donné par l'équation suivante :

$$C = \frac{1}{G_a \times \frac{U_s}{U_r} \times U_a \times S} \quad (5.1)$$

où :

- G_a est le gain de l'amplificateur ;
- U_s , U_r et U_a sont respectivement la tension de sortie maximale du récepteur, la tension de référence du convertisseur et la tension d'alimentation des accéléromètres.

Le coefficient de conversion de l'accéléromètre PCB est de 9.81 g/mV, et celui de l'accéléromètre à 15 000 g est de 1.31 g/mV. Les mesures ont été effectuées avec une fréquence d'échantillonnage de 22 kHz et une bande passante de 10 kHz. Les graphiques obtenus lors des tirs 2 et 3 sont visibles en Figure V-16 et Figure V-17 respectivement.

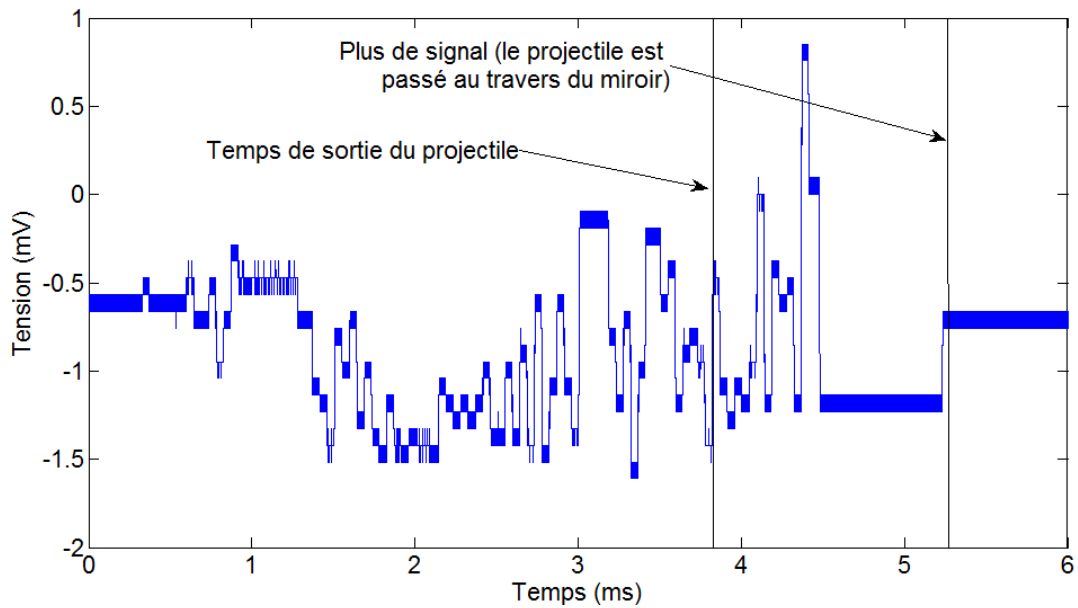


Figure V-16 : Tension brute de l'accéléromètre PCB lors du tir numéro 2.

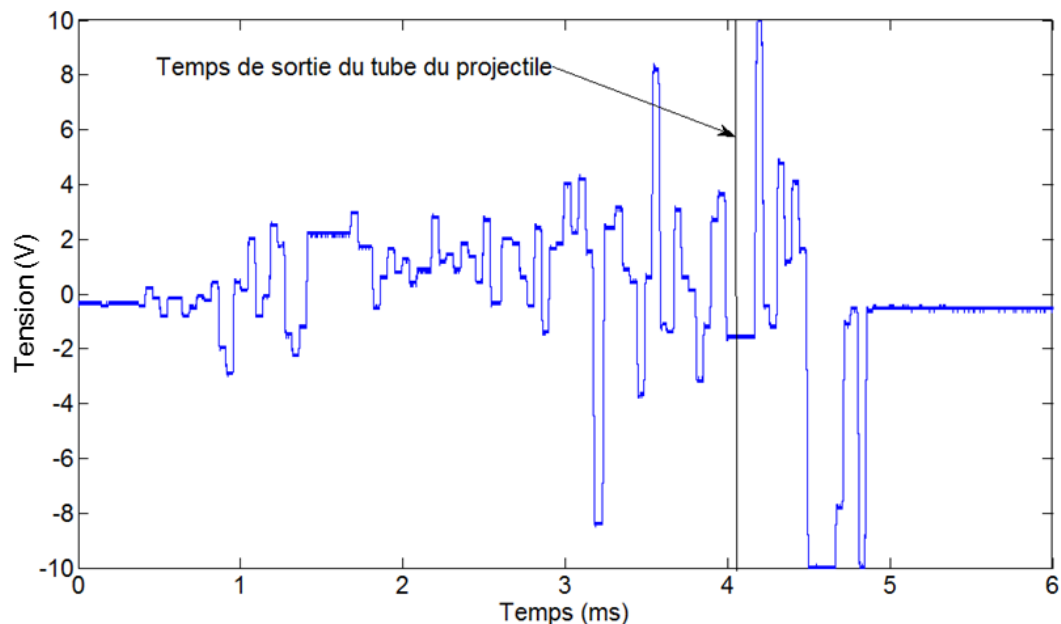


Figure V-17 : Tension brute obtenue lors du tir numéro 3.

De manière générale, l'amplitude des tensions est plus importante une fois le projectile sorti du tube. Cela peut s'expliquer par le fait que le projectile subit d'une part le fouettement de la bouche, et d'autre part l'influence des gaz propulsifs qui se déplacent plus vite que la munition.

Certaines parties des courbes obtenues présentent des paliers. Ces derniers sont dus à des périodes pendant lesquelles le signal n'a pu être décodé. En effet le faisceau du laser réfléchi par le miroir peut parfois être un peu désaxé par rapport à la lentille de Fresnel réduisant ainsi la puissance reçue et rendant la trame illisible. Une trame correspond à 28

bits, elle permet de déterminer la tension donnée par l'accéléromètre après décodage. Grâce à la voie 4, appelée voie test, il a été possible de déterminer les moments où le décodage n'a pas eu lieu afin d'éviter une mauvaise interprétation des courbes d'accélérations.

Les Figures V-18 et V-19 permettent de définir les périodes pendant lesquelles le décodage n'a pas été possible pour les tirs 2 et 3 respectivement. Ces parties ont été grisées pour faciliter la lecture de la courbe.

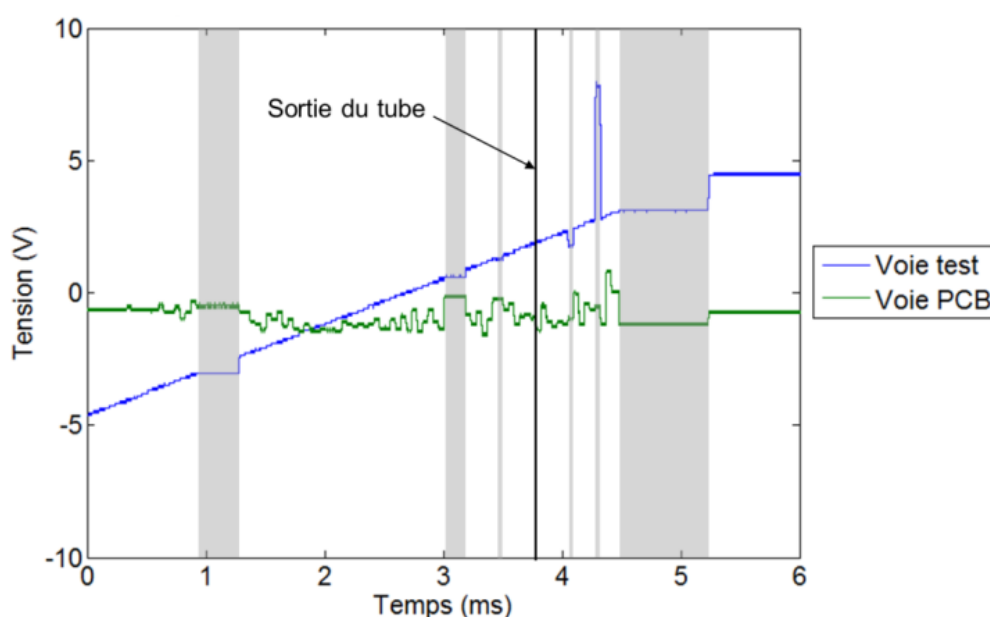


Figure V-18 : Tension de la voie de l'accéléromètre et tension de la voie test lors du tir 2.

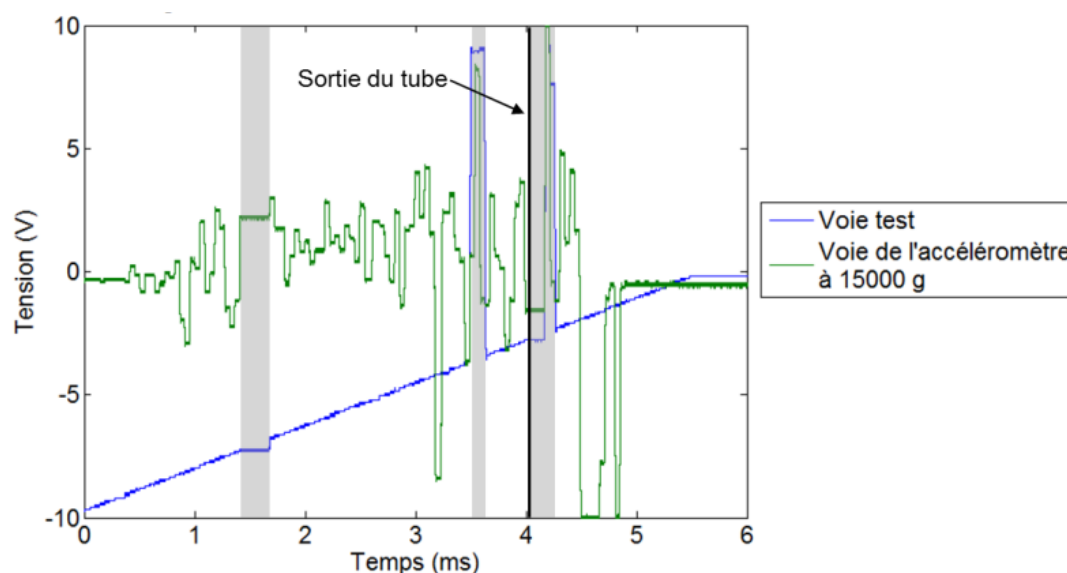


Figure V-19 : Tension de la voie de l'accéléromètre et tension de la voie test lors du tir 3.

La tension au temps initial n'est pas à zéro du fait du non recalage de l'offset. Afin d'être en mesure de comparer les courbes obtenues entre elles, le coefficient de conversion a été appliqué, les accélérations ont été remises à zéro au temps initial et un filtre passe bas de 30

kHz a été appliqué afin d'éliminer les petites oscillations dues à la précision de la mesure. Enfin, grâce à la courbe Sibil de déplacement du projectile au cours du temps, les accélérations ont pu être représentées en fonction de l'abscisse du tube et comparées à la rectitude du tube 445 (Figure V-20).

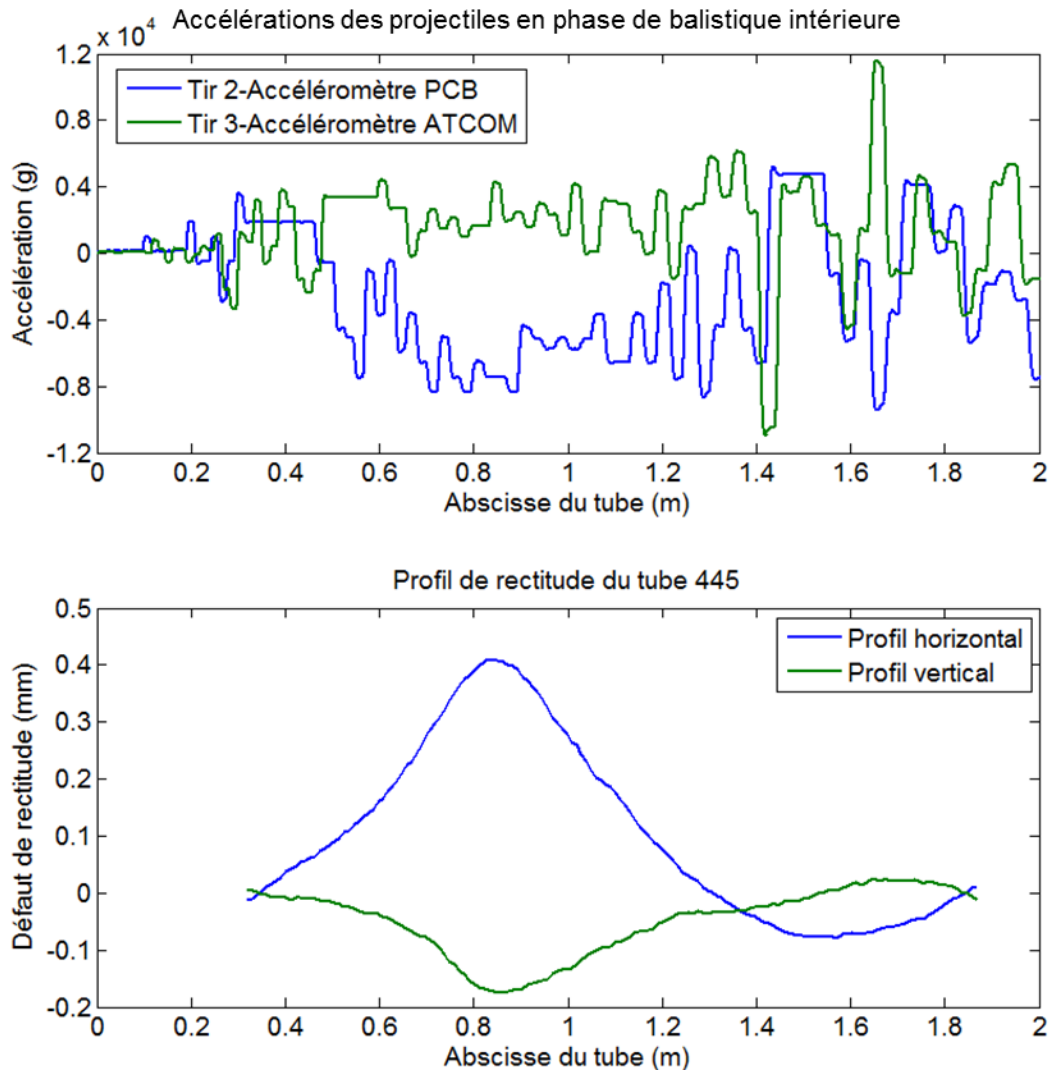


Figure V-20 : Accélérations radiales obtenues et profil de rectitude du tube utilisé.

Les courbes des accélérations présentées en Figure V-20 semblent montrer une fréquence identique. Cependant, cette fréquence se rapprochant beaucoup de celle de la bande passante, il est possible que la fréquence du ballonnement soit supérieure. Ainsi, il est difficile de conclure sur la répétabilité des accélérations radiales. L'amplitude des variations de l'accélération aux abords de la sortie du tube sont plus importantes. Il est possible que la finesse du tube en cette région engendre des mouvements du tube plus importants et que le couplage des mouvements du tube avec ceux du projectile conduise à une augmentation des amplitudes du ballonnement. Les accélérations mesurées lors des deux tirs ne présentent pas les mêmes allures. Cela peut être dû au positionnement de l'accéléromètre dans la

munition. En effet, lorsque l'origine du repère de l'accéléromètre est décalée par rapport à l'axe de rotation du projectile, l'accélération centripète s'ajoute aux mesures. Le positionnement de l'origine peut varier de 5 dixièmes de millimètre entre deux munitions instrumentées. Ainsi, compte tenu de la vitesse de rotation du projectile, cela peut conduire à des variations notables des courbes d'accélérations radiales obtenues lors des différents tirs. De plus, le positionnement à la main du projectile dans la chambre engendre des imprécisions sur l'angle de l'axe de mesure au temps zéro (variation de plus ou moins 5°).

V.2.2.4. Conclusions

Lors de ces essais, trois tirs ont été réalisés dont deux avec des munitions instrumentées. Ces derniers permettant d'obtenir l'accélération radiale du projectile. La quantité de poudre utilisée pour le tir des munitions instrumentées est adaptée puisque l'on ne dépasse pas les 60 000 g (limite des accéléromètres PCB) et les courbes de pression sont très proches pour chaque tir. Après avoir déterminé les coefficients de passage de la tension à l'accélération, les tensions enregistrées ont été converties afin de comparer l'accélération radiale du tir 2 avec celle du tir 3. La comparaison a révélé une fréquence du ballonnement semblable lors des deux tirs et constante sur toute la longueur du tube. La voie de test a permis de repérer les zones dans lesquelles le décodage des signaux transmis par le laser a été impossible. Afin de pallier ce problème, au cours des prochains essais le miroir sera placé à une distance plus proche de la bouche du tube et de la lentille de Fresnel. En effet, raccourcir ces distances diminuera la déviation du faisceau laser évitant ainsi une perte de puissance du signal reçu par la lentille.

V.3. Etape 3

V.3.1. Présentation des essais

Cette dernière phase a permis d'effectuer les mesures permettant le recalage du modèle numérique qui sera présenté dans le chapitre suivant. Avec des conditions d'essais maintenues identiques aux essais précédents, 13 tirs ont été réalisés dont le premier concernait une munition embarquant un accéléromètre uniaxe (accéléromètre PCB permettant d'enregistrer des accélérations de $\pm 60\,000\text{ g}$, orienté dans le sens radial du déplacement du projectile) et les 12 autres concernaient des munitions instrumentées à l'aide d'un accéléromètre triaxial (accéléromètres PCB de même intervalle de mesure que l'uniaxe). La Figure V-21 présente une vue tridimensionnelle de l'instrumentation embarquée dans les corps d'obus, obtenue à l'aide d'une machine de tomographie. La première munition tirée était celle équipée d'un uniaxe. Celle-ci a permis de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesure. L'axe de mesure de l'accéléromètre était positionné perpendiculairement au sens de déplacement de la munition. La fréquence d'échantillonnage des mesures d'accélérations a été augmentée à 31 kHz et la bande passante à 15 kHz.

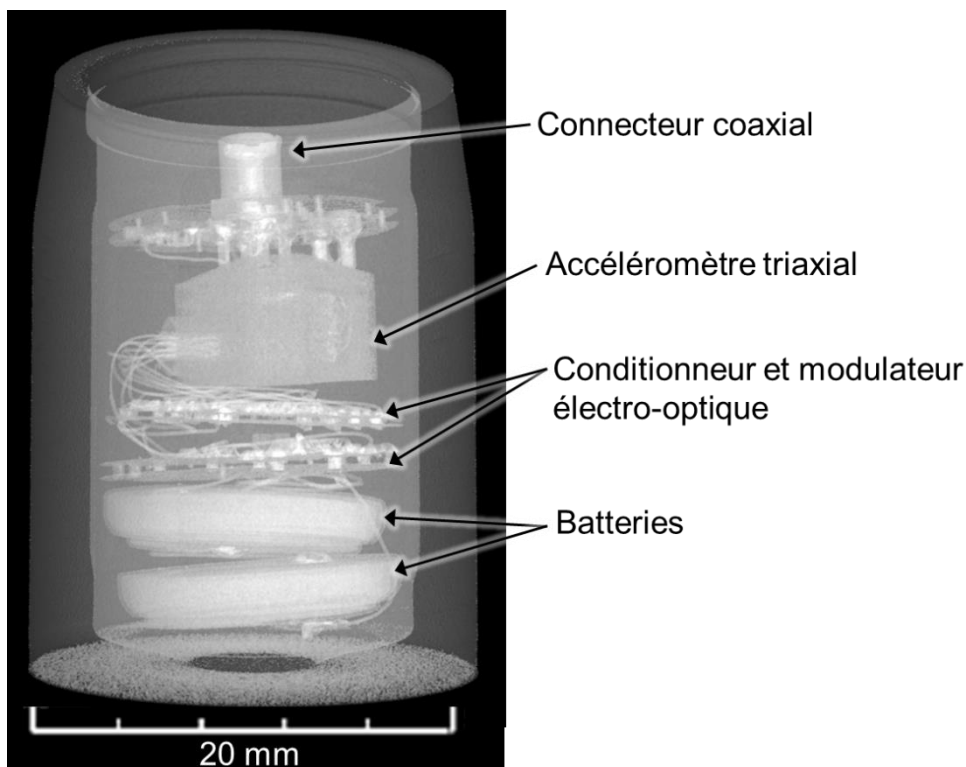


Figure V-21 : Vue 3D de l'instrumentation des corps d'obus.

Des coups de flambage ont été tirés à l'aide d'OX classiques lorsque le temps d'installation du matériel entre deux coups était trop long. Cela a permis d'avoir des

conditions initiales identiques lors des 13 tirs de munitions instrumentées (température du tube et position du bâti).

Comme lors des essais précédents, la pression chambre et la vitesse des munitions ont été mesurées pour chaque tir. Le capteur de temps de bouche n'a pas pu être utilisé ici puisque des mesures de déplacement de la bouche du tube ont été effectuées et que le dispositif impose l'emploi d'un frein de bouche spécial (paragraphe II.4.5). Cependant, le temps de sortie du projectile pourra être déterminé grâce aux jauges de déformation placées en différentes sections du tube (Figure V-22). En effet, ces jauges ayant pour but de mesurer le gonflement du tube au passage du projectile, elles permettront de retrouver l'allure de la courbe de déplacement grâce aux pics enregistrés. Afin de s'assurer que le temps de largage du projectile obtenu par l'intermédiaire des jauges de déformation est correct, un capteur de flamme de bouche a été utilisé. Comme son nom l'indique, ce capteur mesure l'intensité lumineuse en direction de la bouche du tube et permet ainsi de déterminer l'instant auquel les gaz propulsifs sortent du tube, ce qui n'est possible qu'au moment où la ceinture du projectile quitte le tube.

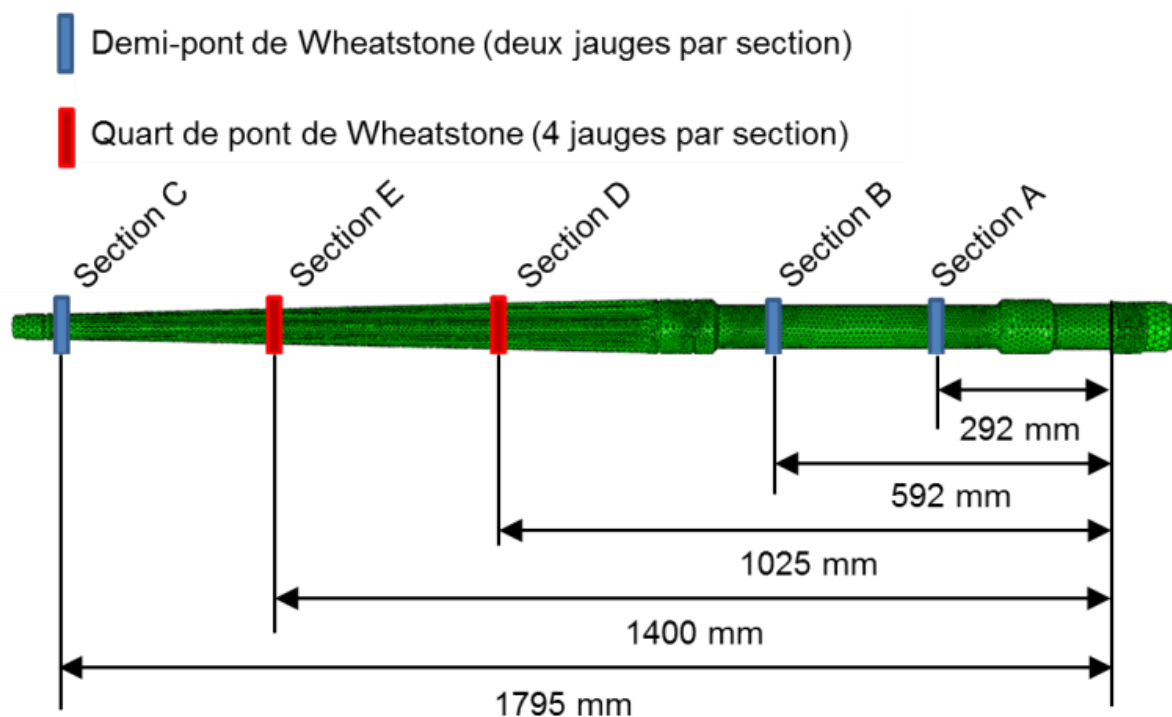


Figure V-22 : Zones d'implantation des jauges de déformations pour la mesure du gonflement du tube.

Les mesures de gonflement au niveau des sections A, B et C ont été réalisées à l'aide de demi-ponts de Wheatstone afin de ne mesurer que le gonflement et de s'affranchir des déformations dues à la flexion du tube (paragraphe II.4.4). Cela était possible car le tube en

ces sections est axisymétrique, ce qui n'est pas le cas des sections D et E. Pour ces dernières, 4 jauges ont été collées en quart de pont (Figure V-23). Du fait de la largeur des fonds de nervure, les jauges collées devaient être plus petites que celles placées aux sections A, B et C.

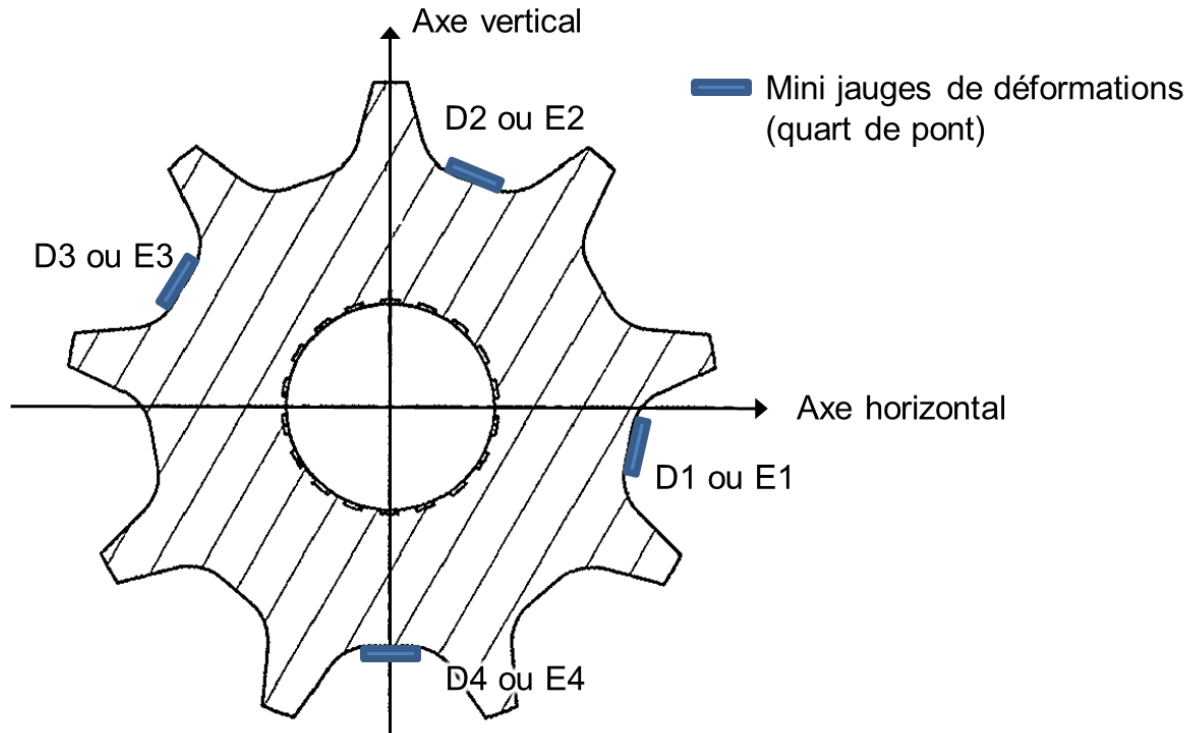


Figure V-23 : Coupe transversale du tube à la section D ou E avec l'implantation des quarts de pont (vue depuis la tranche arrière).

V.3.2. Résultats de vitesse et pression

La première munition instrumentée tirée est celle contenant un uniaxe. Les vitesses en sortie du tube ainsi que les pressions maximales à la chambre mesurées au cours des 13 tirs réalisés sont présentées dans le Tableau 14. Les vitesses et pressions enregistrées sont très proches pour chaque tir effectué. Cette observation atteste de la reproductibilité des tirs.

Les courbes de pression ont la même allure et, pour chacune, la valeur maximale de pression se produit 1.8 ms après le déclenchement du tir (Figure V-24). Le code Sibil permet de déterminer la courbe d'accélération de la munition en multipliant la pression à la chambre par $241 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ dans le cas présent (valeur Sibil valable pour une poudre, une munition et un tube donnés). Nous vérifierons que les accélérations longitudinales mesurées correspondent bien à l'accélération de la munition calculée à partir de la pression.

Numéro du tir	Masse totale de l'obus instrumenté (g)	V_0 (m/s)	Pression chambre maximale (MPa)
1 (uniaxe)	178.4	925.7	214.0
2	181.6	928.5	216.8
3	182.6	927.6	215.6
4	179.5	929.3	218.3
5	181.7	922.8	211.2
6	181.2	924.2	214.1
7	180.2	934.1	220.5
8	181.8	925.0	213.7
9	182.4	924.8	212.9
10	181.4	928.0	218.2
11	181.9	914.8	216.3
12	180.2	927.1	211.6
13	182.3	927.4	221
Moyenne (triaxes PCB)	181.4	926.1	215.9
Ecart-type (triaxes PCB)	1.0	4.6	3.3

Tableau 14 : Masses et V_0 des projectiles ainsi que les pressions maximales à la chambre obtenues lors des 13 tirs.

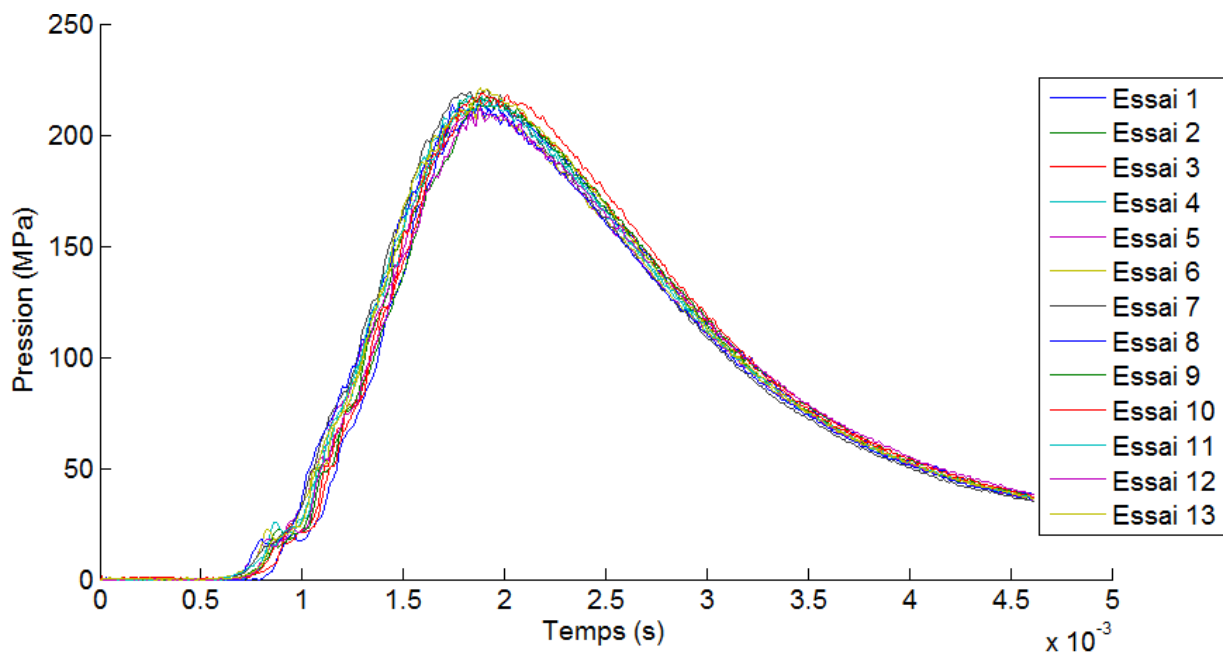


Figure V-24 : Pression dans la chambre au cours des tirs.

V.3.3. Gonflement du tube

Les courbes de gonflement du tube en chaque section instrumentée sont présentées de la Figure V-25 à la Figure V-29.

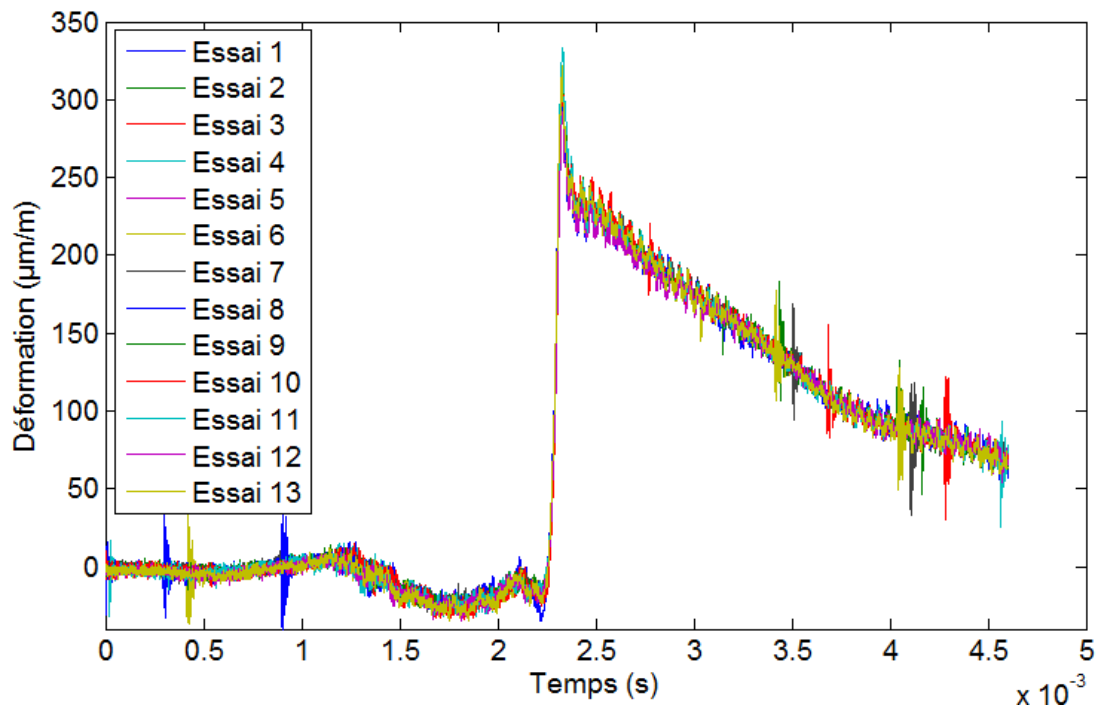


Figure V-25 : Déformation circonférentielle de la section A.

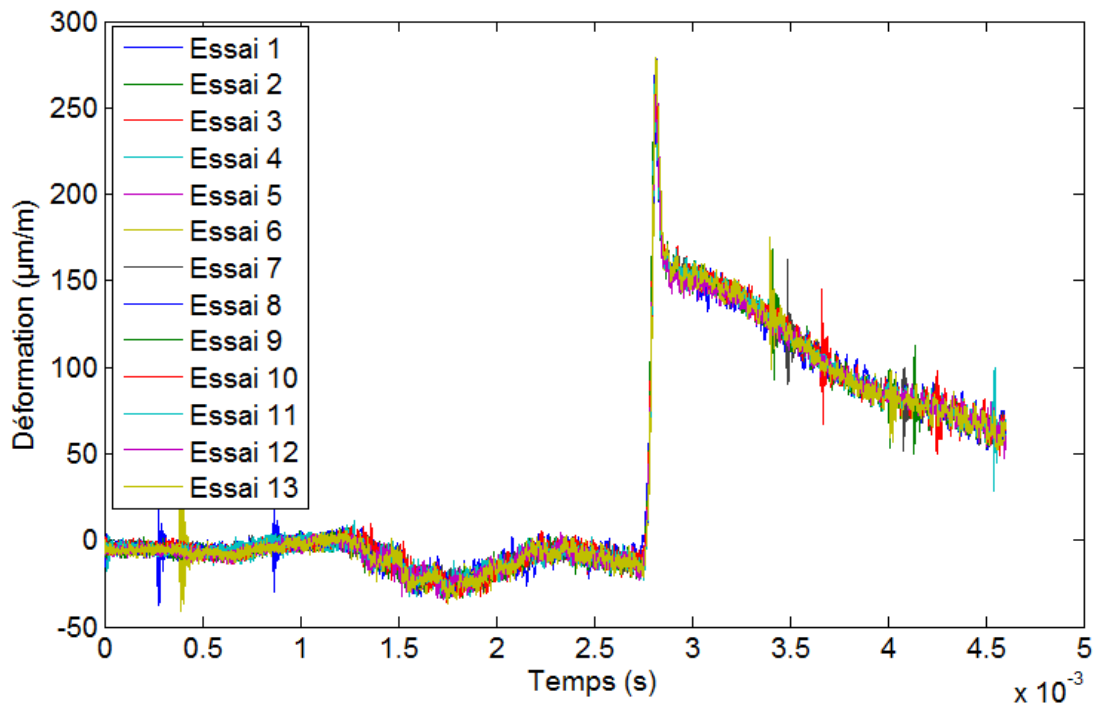


Figure V-26 : Déformation circonférentielle de la section B.

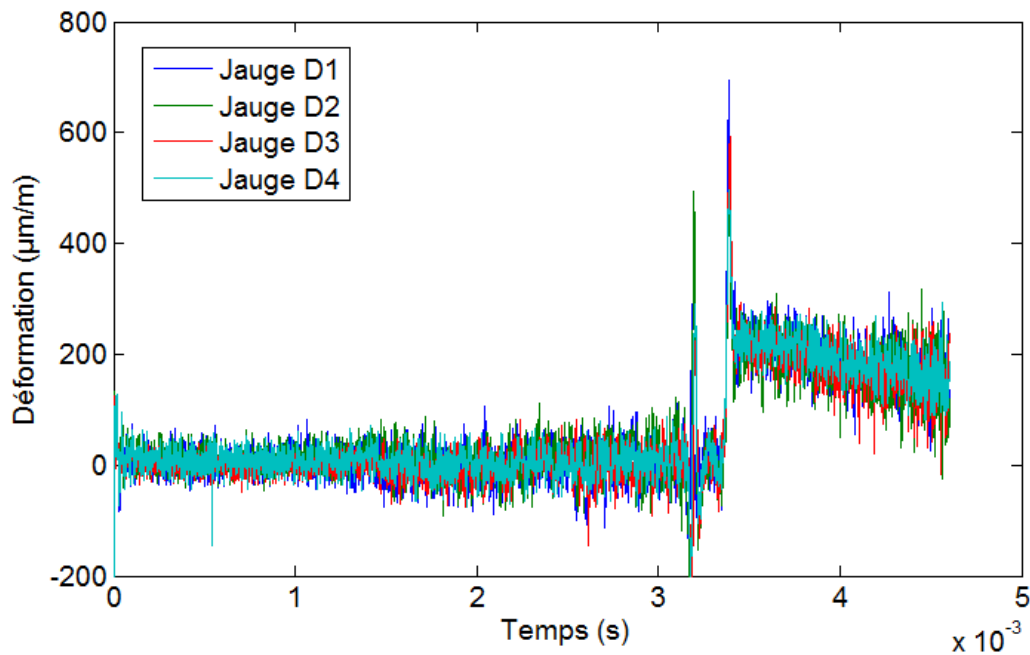


Figure V-27 : Déformations circonférentielles de la section D enregistrées par les quarts de pont lors du premier tir.

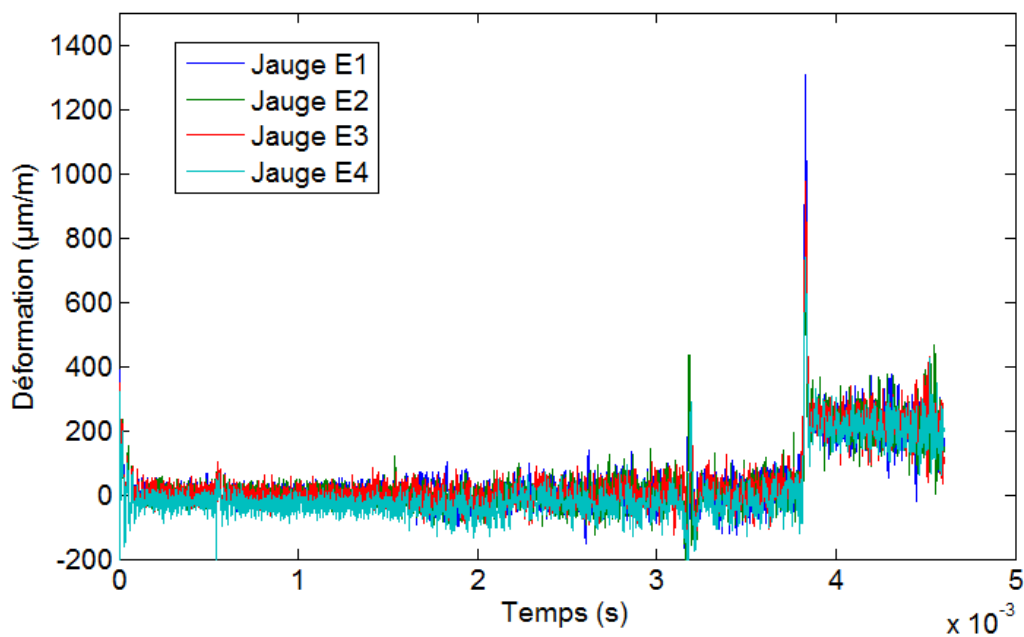


Figure V-28 : Déformations circonférentielles de la section E enregistrées par les quarts de pont lors du premier tir.

Dans le cas des sections D et E seules les courbes de déformations obtenues lors du premier tir sont présentées. Le bruit des mesures réalisées à l'aide des quarts de pont est bien plus important que pour les demi-ponts. Avant le pic lié au passage de la munition, un second pic de même amplitude et ayant lieu au même instant est observable sur les Figures V-27 et V-28. Ce dernier est sans doute dû aux mouvements de flexion du tube dont il n'est pas possible de s'affranchir en ces sections.

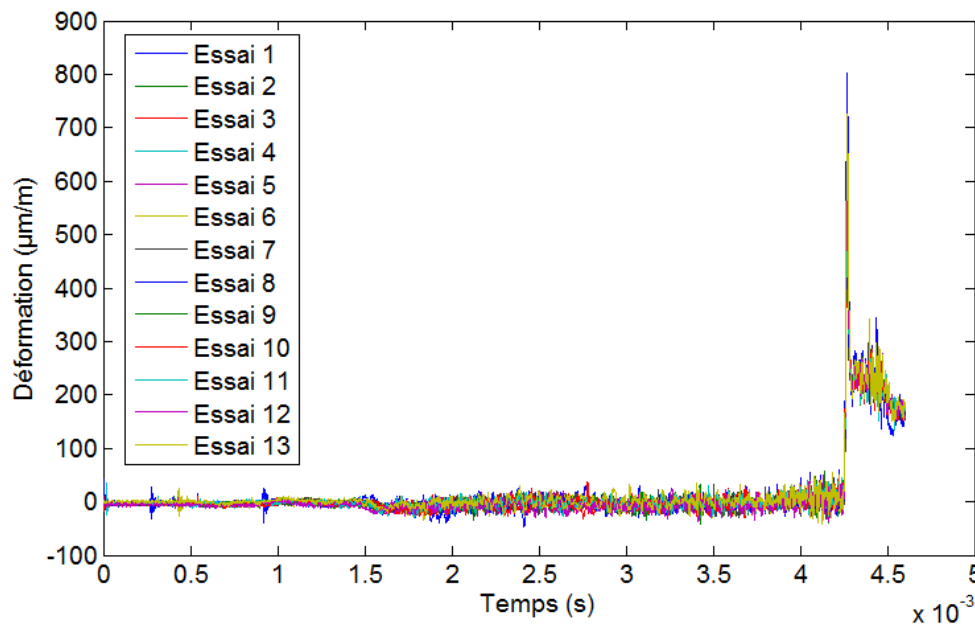


Figure V-29 : Déformation circonférentielle de la section C.

Le Tableau 15 donne la valeur moyenne des pics de gonflement obtenus lors des 13 tirs, à chaque section instrumentée. Il donne également l'écart type des pics mesurés.

		Déformation moyenne ($\mu\text{m/m}$)	Ecart-type
Section A	Demi-pont	309.3	10.2
Section B	Demi-pont	262.1	11.5
Section C	Demi-pont	593.5	101.4
Section D	D1	576.1	56.8
	D2	472.0	21.6
	D3	500.7	65.0
	D4	466.1	33.7
Section E	E1	990.3	143.5
	E2	665.8	71.7
	E3	756.8	106.2
	E4	662.8	81.5

Tableau 15 : Moyennes des pics obtenus lors des 13 coups en chaque section.

Les résultats de gonflement aux sections A et B ont un faible écart-type, ce qui signifie que la reproductibilité est bonne entre chaque tir. Pour la section C, l'écart-type est très important. Cette section étant proche de la bouche, les jauges subissent d'importantes variations de température pouvant entraîner une modification de leur réponse (présence des gaz de propulsion, conduction rapide de la chaleur due à la faible épaisseur de paroi). De plus, les variations de température ont pu changer les conditions de collage de la jauge sur le tube. Ainsi la variabilité des mesures obtenues peut venir de l'environnement dans lequel

ont évolué les jauges. Pour les sections D et E le pic varie beaucoup entre deux tirs (sauf la jauge D2), et l'écart-type est important.

Afin de déterminer la part de la déformation circonférentielle du tube due au passage de la munition, la déformation due à la pression des gaz a été calculée à partir de la formule (5.2), qui est un cas particulier de la formule de Lamé, puis soustraite à la déformation totale [SAF 11]. Cette formule est utilisée pour un cylindre infiniment long de diamètres intérieur et extérieur constants.

$$\varepsilon = \frac{2 \times P_{culot} \times D_{int}^2}{E \times (D_{ext}^2 - D_{int}^2)} \quad (5.2)$$

avec :

- ε la déformation circonférentielle du tube ;
- P_{culot} la pression des gaz à l'arrière de la ceinture de la munition ;
- D_{int} le diamètre intérieur du tube ;
- D_{ext} le diamètre extérieur du tube ;
- E le module d'Young du tube.

Une pression équivalente a pu ainsi être obtenue en utilisant la formule (5.2), en passant de la déformation ε due à la munition à la pression P_{culot} qui sera ici la pression due à la munition. Ainsi, la Figure V-30 donne les pressions de la munition sur le tube aux sections A, B et C.

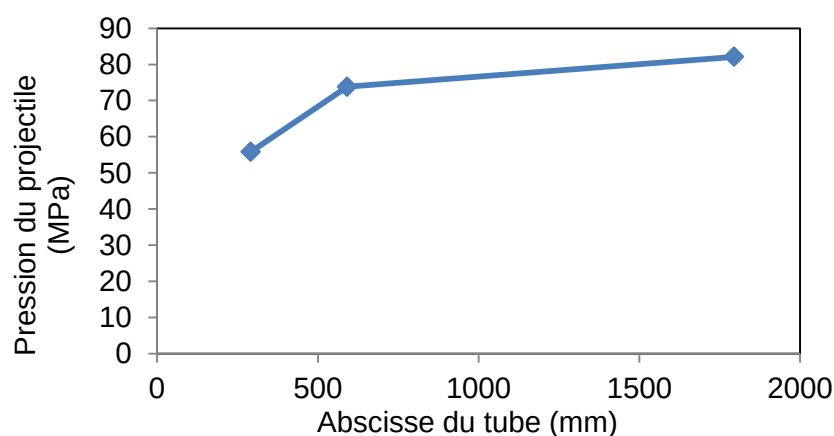


Figure V-30 : Pression de la ceinture sur le tube aux sections A, B et C.

Ainsi, les pressions équivalentes calculées montrent que la force appliquée par le projectile sur le tube peut être considérée comme constante compte tenu du nombre d'essais réalisés et de l'écart-type des mesures. La formule de Lamé étant prévue pour des sections tubulaires, ce calcul ne peut pas être fait pour les sections D et E, du fait des nervures.

Les pics de gonflement du tube obtenus permettent de retrouver le déplacement du projectile dans le tube au cours du temps. La Figure V-31 présente la courbe de déplacement du projectile en phase de balistique intérieure ainsi que le signal du capteur de flamme de bouche. Ainsi, il est possible de constater que la munition sort 4.5 ms après le signal de déclenchement du tir.

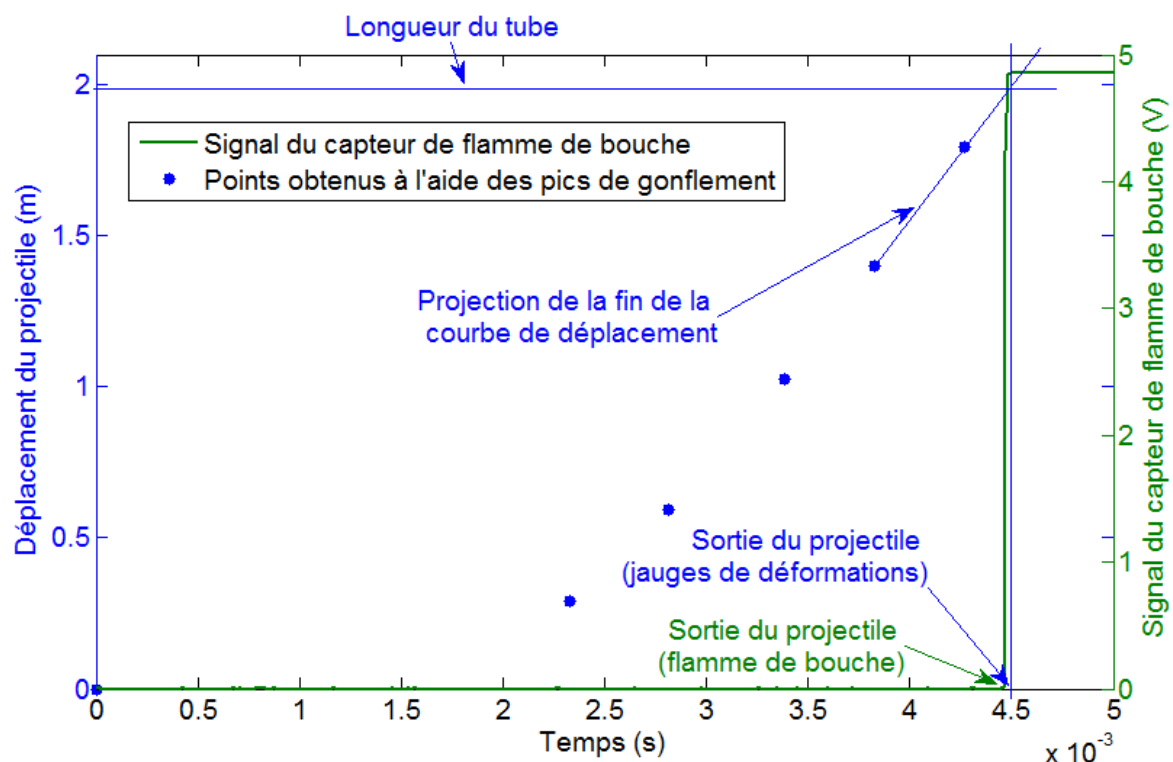


Figure V-31 : Déplacement du projectile obtenu à l'aide des pics de déformation.

V.3.4. Déplacements de la bouche du tube

Les déplacements horizontaux et verticaux de la bouche du tube en phase de balistique intérieure, au cours des 13 tirs, sont présentés en Figure V-32 et en Figure V-33 respectivement. D'après les courbes, les mouvements dans le sens vertical sont plus importants que dans le sens horizontal. Cela est probablement dû à l'effet Bourdon (paragraphe II.1.2.1). Les courbes de déplacement ont une allure similaire entre chaque tir.

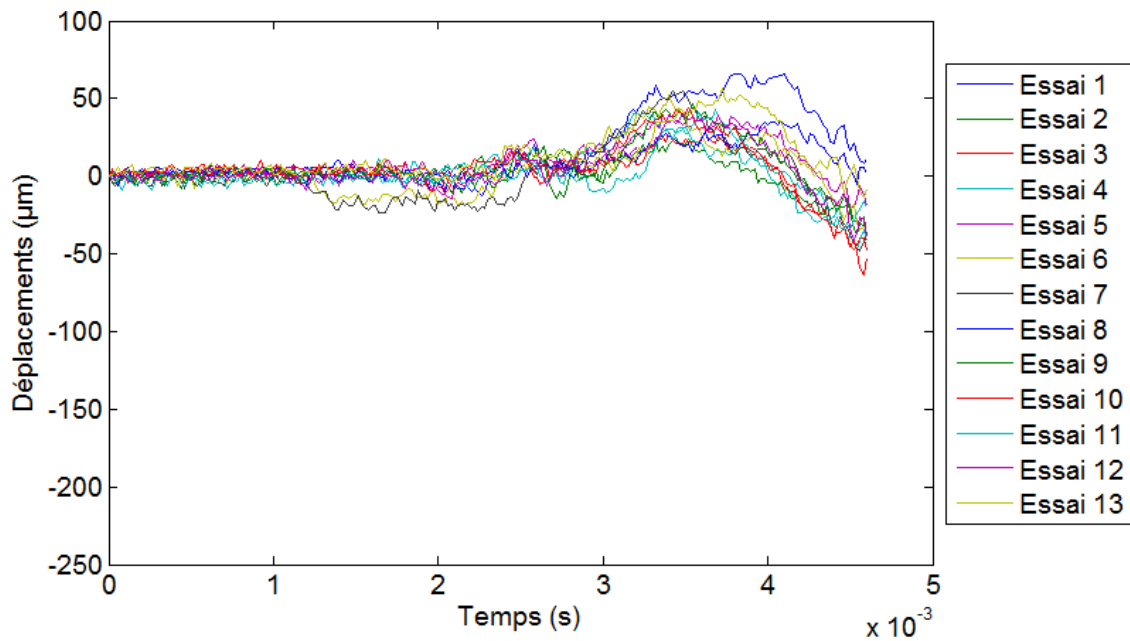


Figure V-32 : Déplacements horizontaux de la bouche du tube lors de la phase de balistique intérieure (valeurs positives vers la droite vue depuis la tranche arrière du tube).

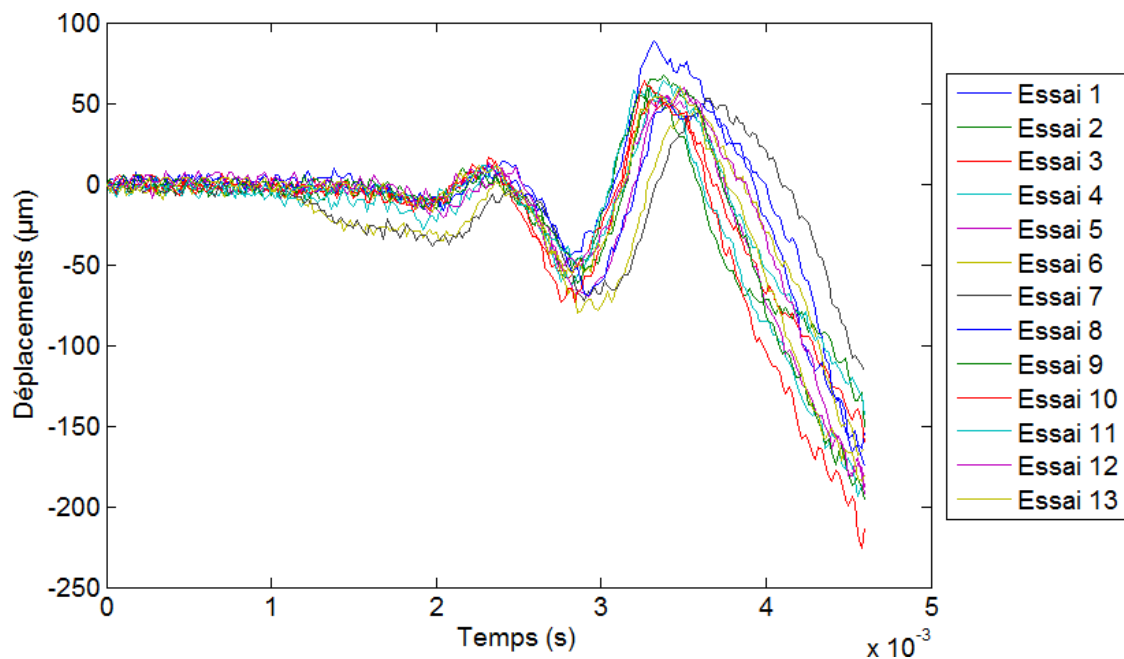


Figure V-33 : Déplacements verticaux de la bouche du tube lors de la phase de balistique intérieure (valeurs positives vers le haut).

Une autre façon de présenter ces mouvements est d'étudier le déplacement de la bouche dans le plan où il est mesuré, en se plaçant depuis la tranche arrière du tube. Les courbes obtenues sont présentées en Figure V-34 (paragraphe IV.4.2.2).

Cette représentation des déplacements met en évidence de légères différences entre chaque tir. Cependant, elle permet également de constater que la bouche du tube se

déplace selon un axe privilégié, proche de l'axe vertical, et que la munition quitte toujours le tube lorsque la bouche est plus basse que sa position initiale.

Les mesures de déplacement à la bouche du tube ont montré que les allures et amplitudes sont très proches entre chaque tir. Ainsi, il n'y a pas eu de variation dans le comportement du tube ayant pu modifier les mouvements de la munition. De plus, les mouvements ont montré un axe de déplacement privilégié, presque à la verticale. Cela peut donc être dû à l'effet Bourdon, ou bien à l'orientation des ouïes du frein de bouche qui se trouvaient exactement dans le même axe que celui des déplacements mesurés.

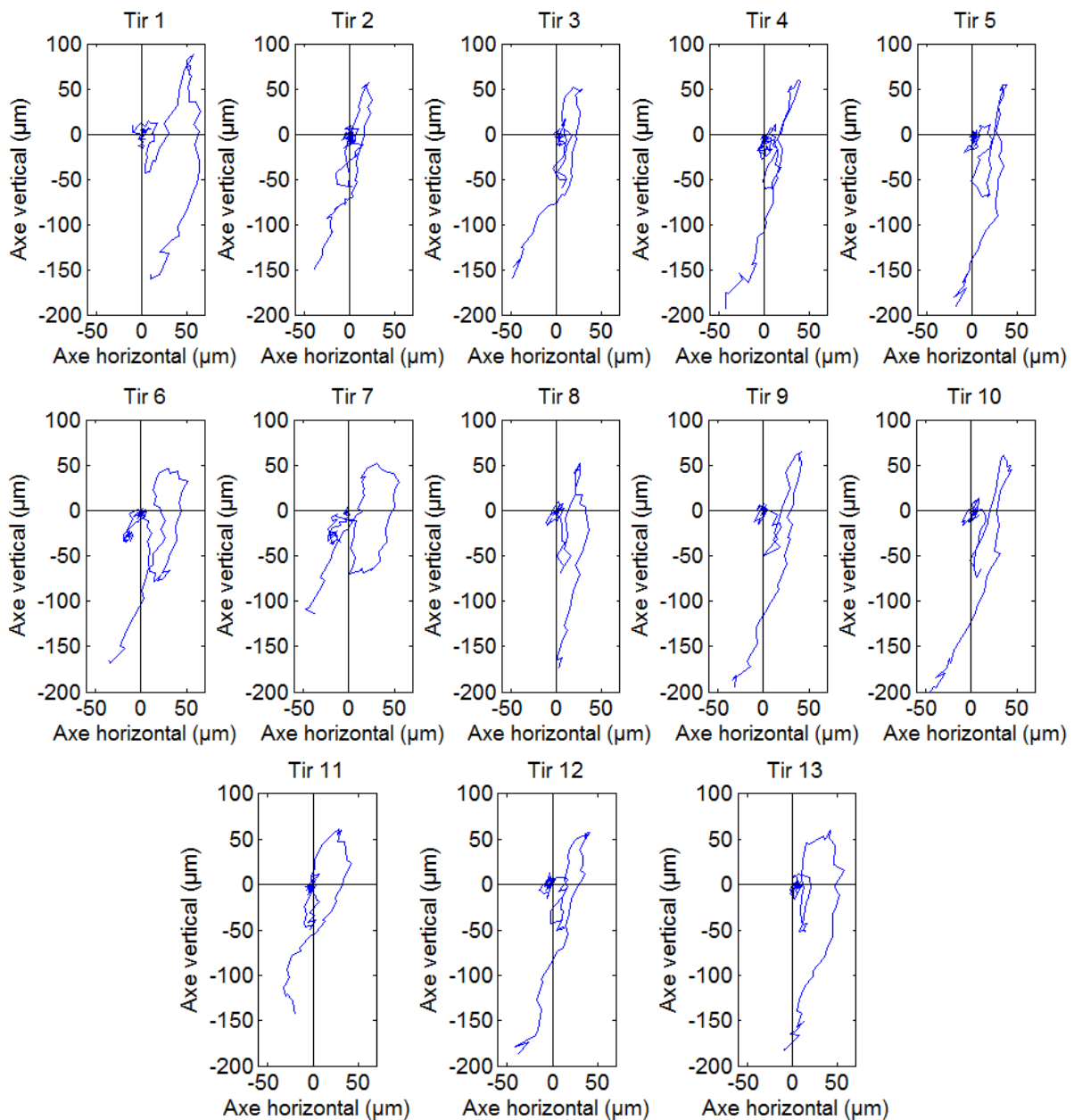


Figure V-34 : Déplacements de la bouche du tube dans le plan où ils sont mesurés.

Bien que le tube n'ait pas été maintenu par un berceau au cours de ces essais, les ordres de grandeur des déplacements de la bouche restent les mêmes que ceux constatés en arme. Il est vrai que le tube a davantage de liberté de mouvement sur sa longueur, cependant son maintien au niveau de la tranche arrière a moins de jeu que celui dans le manchon. De plus, l'appareil de tir permet de ne pas faire intervenir les effets dus au tirage de bande.

V.3.5. Accélérations des projectiles

Lors des 12 tirs réalisés à l'aide d'accéléromètres triaxiaux, seulement 3 ont donnés des résultats satisfaisants. En effet, des problèmes au niveau de la transmission du signal envoyé par le laser ont empêché le décodage sur l'intégralité du parcours de balistique intérieure. Ainsi, seuls les résultats des tirs 6, 7 et 13 sont présentés dans cette partie.

La Figure V-35 donne l'accélération longitudinale, les accélérations radiales et le signal en dent de scie de la voie test obtenus lors du tir numéro 6.

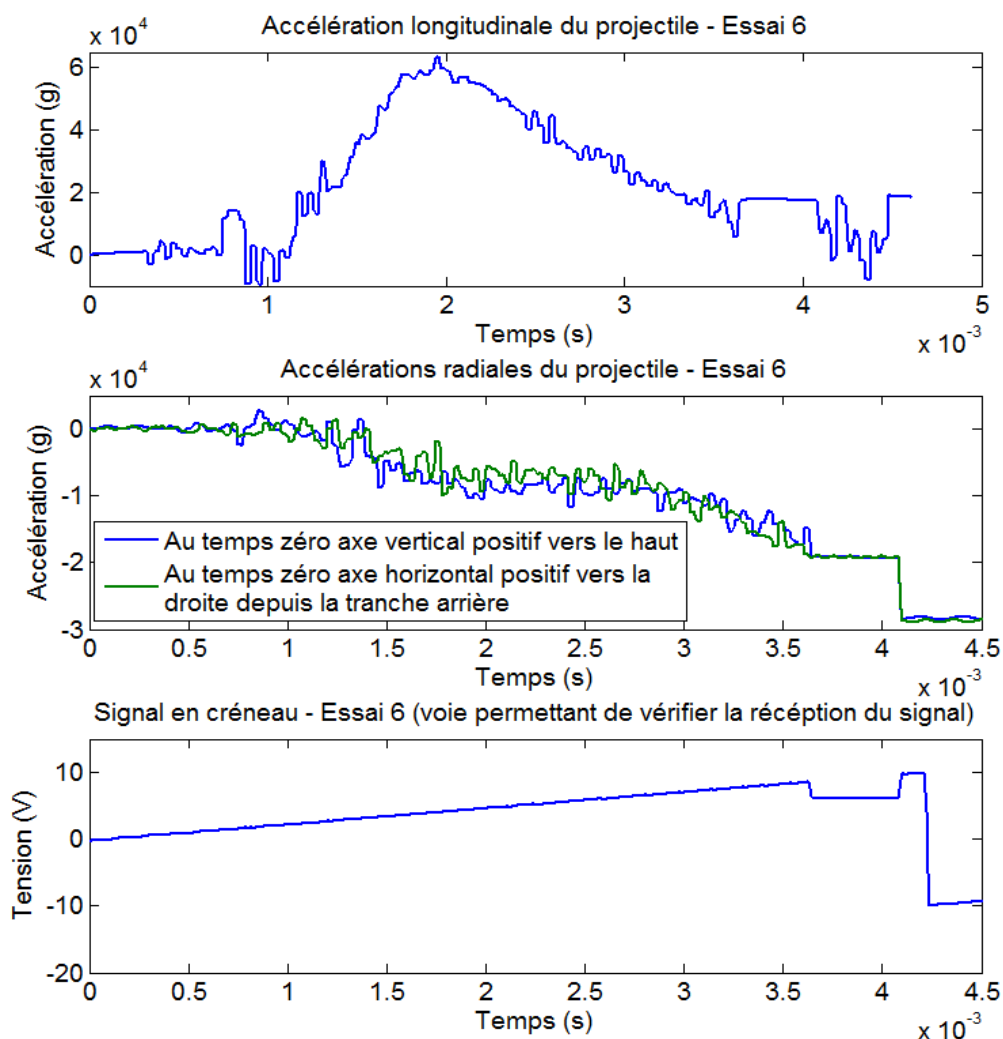


Figure V-35 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 6).

L'axe de mesure de l'accélération longitudinale est l'axe z, l'axe vertical positif vers le haut au temps zéro est l'axe x et enfin l'axe horizontal positif vers la droite (vue depuis la tranche arrière du tube) au temps zéro est l'axe y (Annexe 3).

Le signal en dent de scie présente une partie non décodée entre 3.5 et 4 ms, mais la courbe suit l'allure attendue sur tout le reste du parcours de balistique intérieure. Les accélérations dans le sens perpendiculaire au déplacement de la munition sont 3 fois moins importantes que celle dans le sens longitudinale.

Les résultats des tirs 7 et 13 sont donnés par les Figures V-36 et V-37 respectivement.

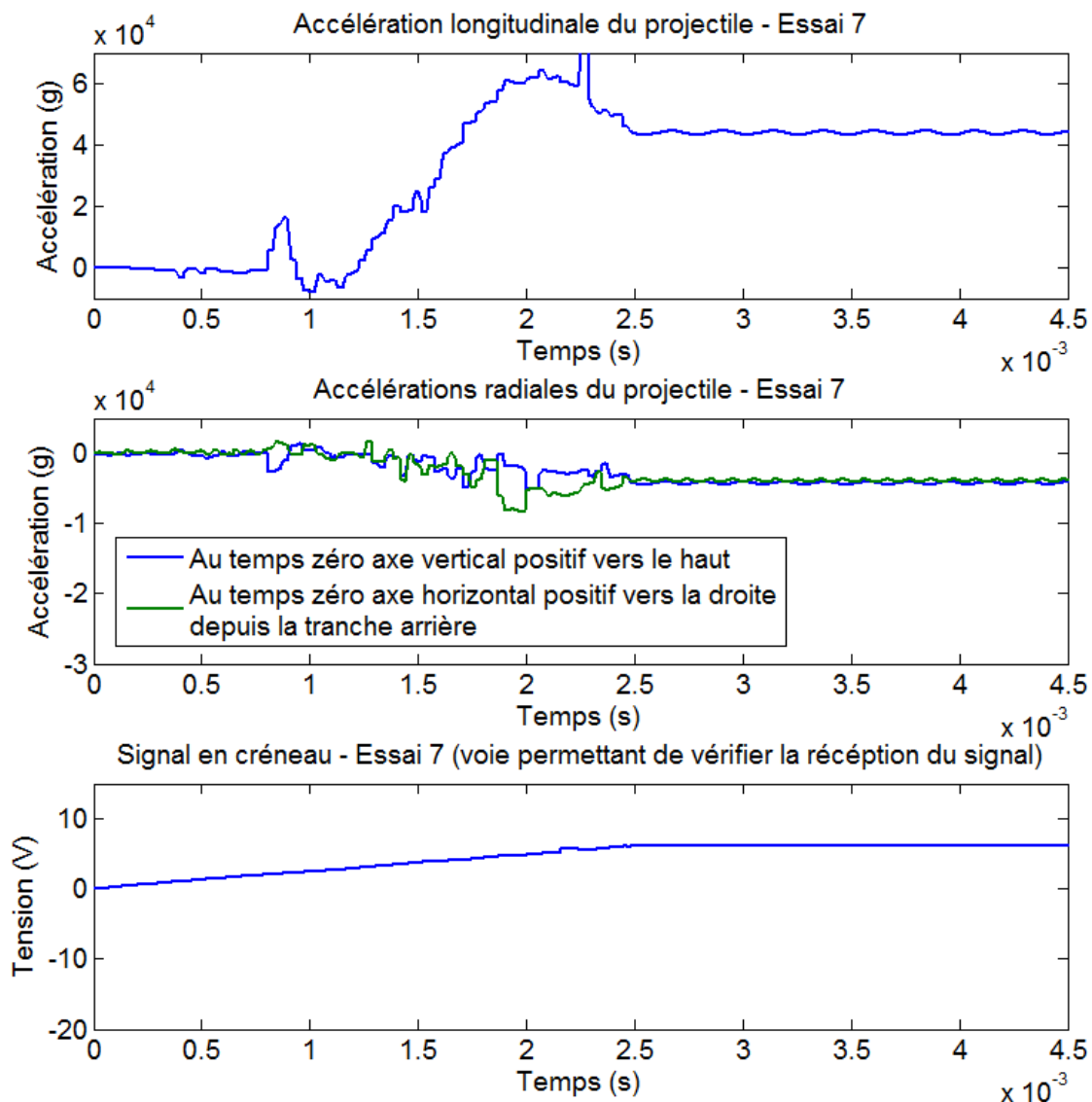


Figure V-36 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 7).

Pour le tir 7, l'accélération longitudinale maximale est légèrement plus faible que celles du tir 6 et 13 (inférieure à 60 000 g). Les accélérations radiales sont plus faibles pour les tirs 7 et 13 puisqu'elles ne dépassent pas les 15 000 g. Pour le tir 7, ces accélérations ne

dépassent pas les 10 000 g. La voie test du tir 7 permet de comprendre l'allure des courbes d'accélération après 2.5 ms. En effet, la pente du signal en dent de scie présente une cassure à 2.5 ms traduisant une perte du signal envoyé par la fausse fusée. Pour le tir 13, les données ne sont pas correctement décodées après 3.5 ms, et il est possible de repérer une perturbation peu de temps avant. Il est possible que l'amplitude des mouvements à la bouche entraîne un angle du faisceau laser trop important pour que la puissance reçue par la lentille de Fresnel soit suffisante pour décoder les informations en binaire.

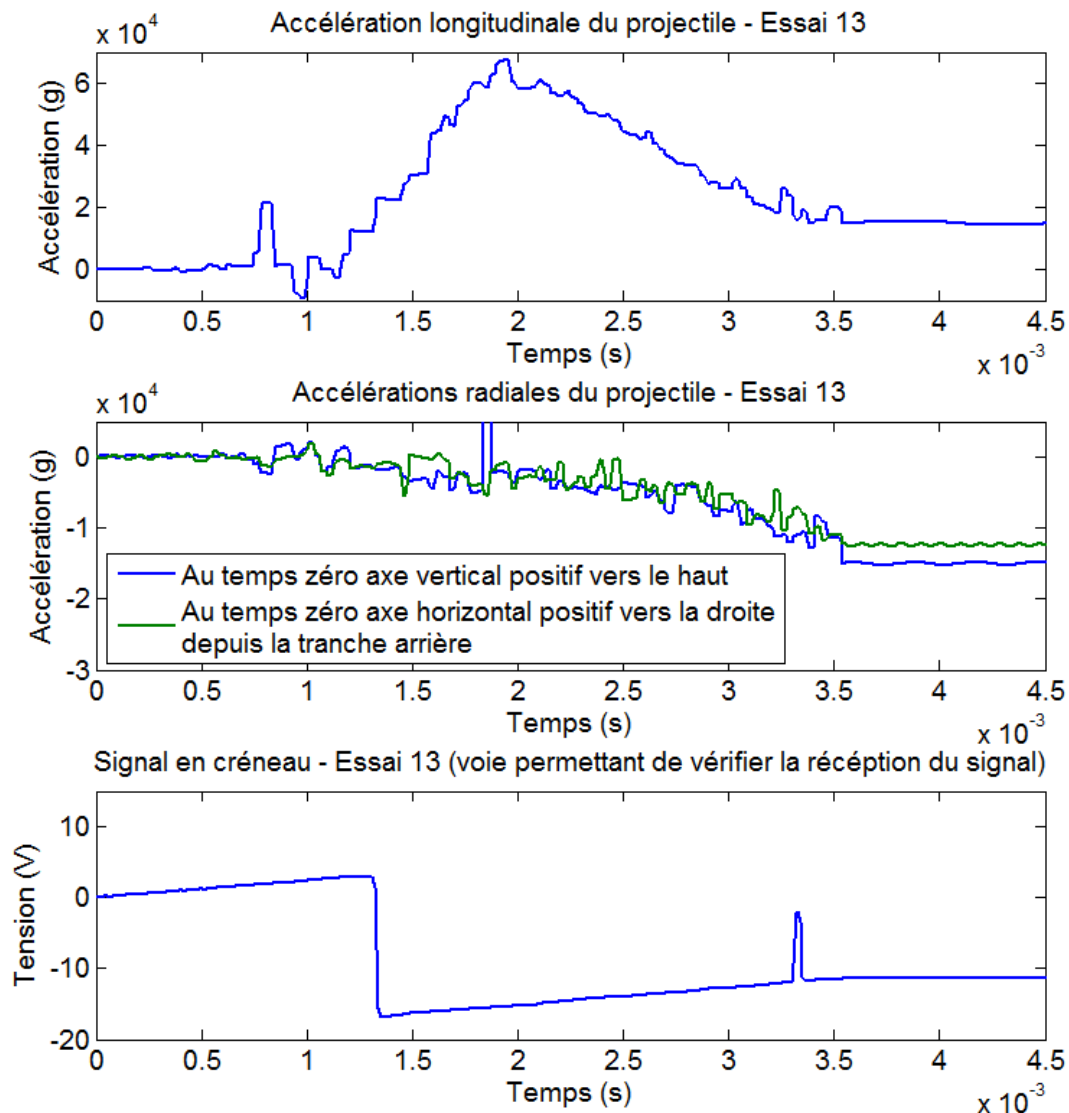


Figure V-37 : Accélérations du projectile avec le signal en créneau de la voie test (essai 13).

Les accélérations longitudinales des 3 tirs présentées sont très proches. En revanche, les accélérations dans le sens radial sont très différentes d'un tir à l'autre. Cette différence constatée peut provenir de l'orientation de l'axe de mesure. En effet, si l'accéléromètre triaxial ne se trouve pas parfaitement perpendiculaire au sens de déplacement du projectile, alors une composante de l'accélération longitudinale sera enregistrée par l'axe radial. Ainsi,

les écarts mesurés peuvent provenir de l'instrumentation elle-même (angle de positionnement de l'accéléromètre par rapport à l'axe de symétrie du corps d'obus) ou bien des composantes dues au ballonnement du projectile.

V.3.5.1. Accélérations longitudinales

Afin de vérifier la cohérence des courbes d'accélération longitudinale obtenues, la courbe du tir 6 est comparée à l'accélération calculée à partir de la courbe Sibil (Figure V-38).

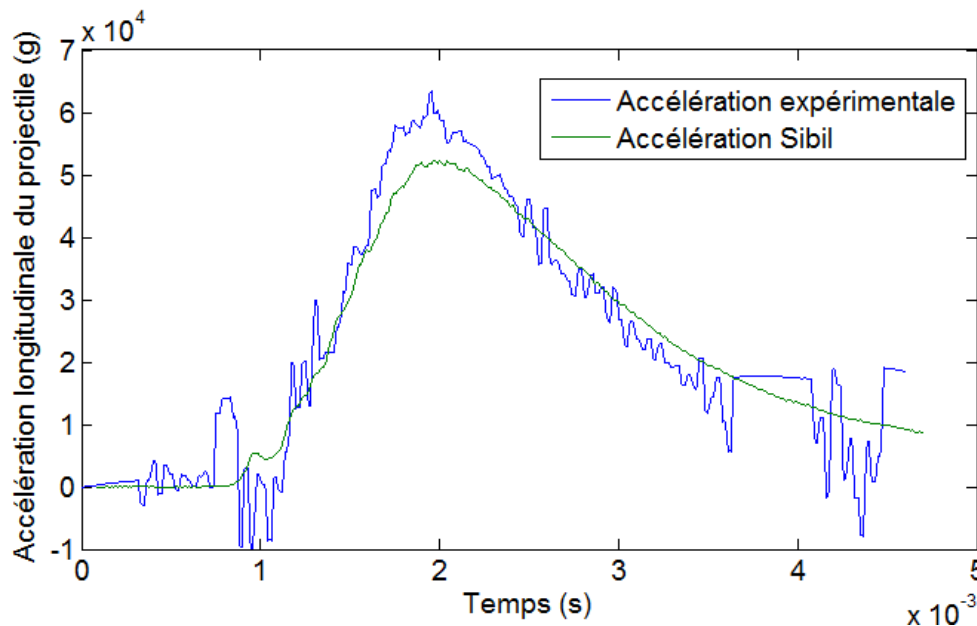


Figure V-38 : Comparaison entre l'accélération longitudinale du projectile calculée à partir de la pression et celle mesurée (tir 6).

Il est possible de constater un écart de 22% au niveau du pic d'accélération. En revanche, les courbes suivent la même allure et le maximum se trouve au même temps. La courbe d'accélération obtenue expérimentalement montre des oscillations probablement due au ballonnement de la munition. Une partie de ces oscillations peuvent également être dues à un bruit enregistré par l'accéléromètre.

L'accélération longitudinale a été intégrée une fois, puis une seconde fois afin d'obtenir la vitesse et le déplacement de la munition respectivement. Les courbes obtenues ont ainsi pu être comparées à des valeurs mesurées lors des essais. La Figure V-39 permet de comparer la vitesse de sortie de la munition mesurée par les barrières de vitesse lors du tir 6, avec celle donnée par la courbe obtenue par simple intégration de l'accélération longitudinale de ce même tir. Ainsi un écart de 9% existe entre les deux vitesses de sortie obtenues. Dans le cas du tir 13, l'erreur constatée est de 12%. Il est impossible de calculer cette erreur pour le tir 7 car il manque une partie de la courbe d'accélération (perte du signal après 2.5 ms). Il est

d'ailleurs possible que les écarts calculés pour les tirs 6 et 13 proviennent des problèmes de décodage des informations près de la sortie du tube de la munition. Il est également possible qu'un offset se crée au cours du tir à cause de déformations de la matière dans l'obus (déformation des ponts de résistance de l'accéléromètre).

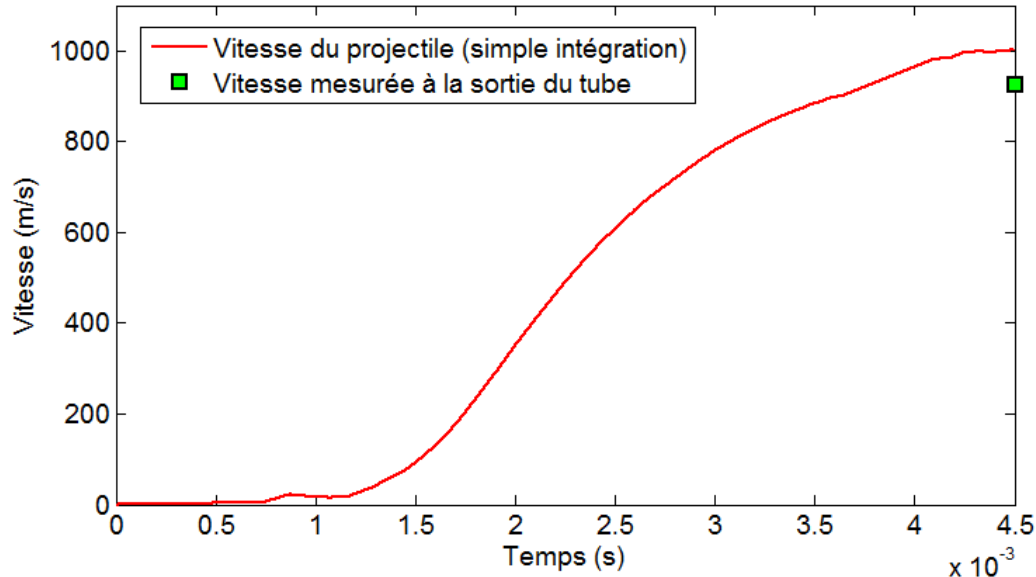


Figure V-39 : Vitesse obtenue par simple intégration de l'accélération longitudinale (tir 6).

La Figure V-40 présente la courbe de déplacement de la munition obtenue par double intégration de l'accélération longitudinale mesurée lors du tir 6, comparée à celle passant par les points définis à l'aide des pics de gonflement du tube.

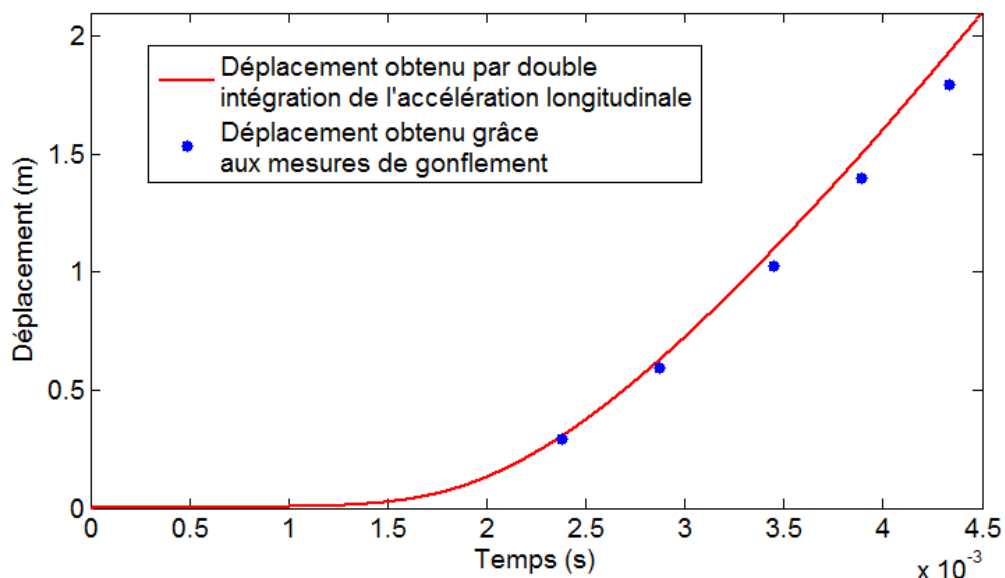


Figure V-40 : Courbe de déplacement obtenue par double intégration de l'accélération longitudinale (tir 6).

Un décalage est observable mais le graphique montre que les allures des deux courbes sont proches. Les accélérations longitudinales obtenues sont donc fiables et satisfaisantes.

V.3.5.2. Accélérations radiales

Les accélérations radiales mesurées sont très dépendantes de l'orientation de l'axe de mesure par rapport à l'axe longitudinal du projectile, mais la position de l'origine de l'axe peut également faire varier l'accélération enregistrée. En effet, si l'origine n'est pas positionnée sur l'axe de symétrie du projectile, alors la composante d'accélération due à la force centripète ne sera pas nulle. Il est donc nécessaire de connaître l'ordre de grandeur de cette composante afin de la soustraire aux accélérations radiales mesurées.

Afin de comprendre d'où peut provenir la variabilité des accélérations radiales mesurées, l'intérieur des munitions non tirées a pu être observé grâce à un appareil de tomographie. Sur les deux projectiles observés, l'un d'entre eux a montré un angle maximal de 5° entre l'axe de symétrie du corps d'obus et l'axe longitudinal (Figure V-41).

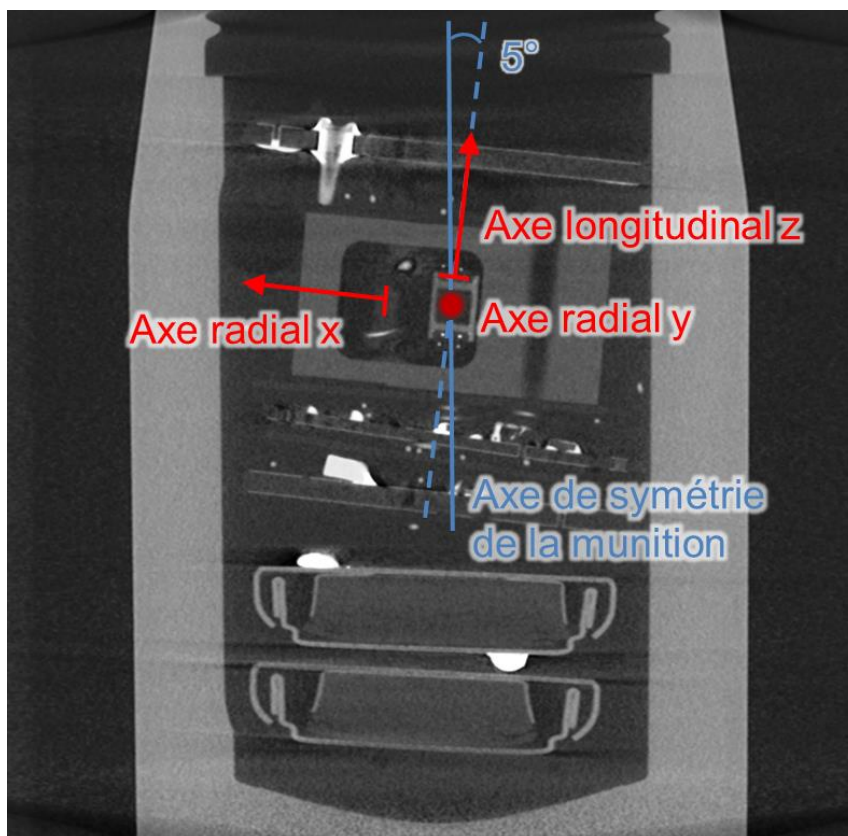


Figure V-41 : Coupe longitudinale d'une munition instrumentée passant par son axe de symétrie.

Cet angle maximal se trouve dans le plan des axes x et z, ce qui signifie que l'axe x est également orienté de 5° par rapport au plan orthogonal à l'axe de symétrie de la munition. Il

est 30 fois plus grand que l'angle maximal que peut avoir la munition par rapport à l'axe de tir en ballotant dans le tube (environ 0.15°). L'accélération mesurée par l'axe x sera donc composée d'une partie de l'accélération longitudinale. Pour un tel angle et une accélération longitudinale de 60 000 g, cela correspond à une composante de 5 230 g mesurée par l'axe x (Figure V-42). Cet angle influencera également l'accélération mesurée par l'axe longitudinal dans une moindre mesure.

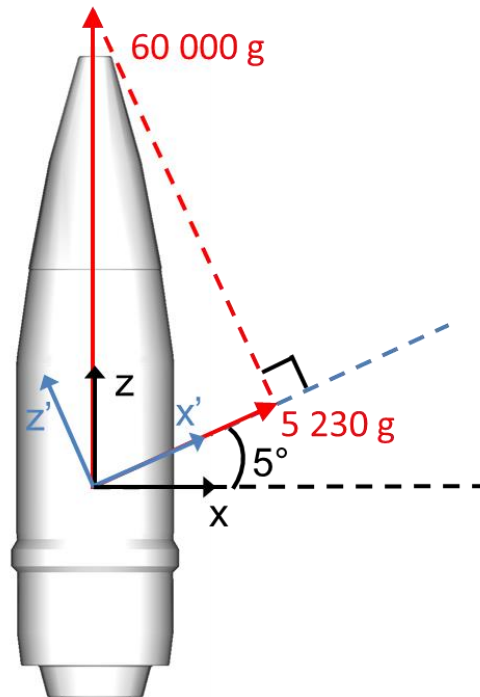


Figure V-42 : Influence d'un angle de 5° sur l'accélération mesurée par l'axe x.

La Figure V-43 permet de voir où se trouve l'origine de chacun des axes de mesure par rapport à l'axe de symétrie de la munition. Lors des deux tomographies réalisées, on constate un écart entre cet axe et l'origine de x et y proche de 4 mm. Cela signifie que les accélérations radiales seront composées de l'accélération centripète, $\vec{A}_c$, donnée par l'équation suivante :

$$\vec{A}_c = \vec{\omega}^2 \wedge \vec{r} \quad (5.3)$$

avec $\vec{\omega}$ la vitesse de rotation de la munition et $\vec{r}$ le vecteur entre l'axe de symétrie du corps d'obus et l'origine de l'axe de mesure considéré. Ici, l'accélération de Coriolis est nulle puisque l'origine de l'axe de mesure n'est pas censée se déplacer dans la munition. Il est possible que dans la réalité la matière se déforme mais l'hypothèse posée dans le présent document est que l'accéléromètre triaxial n'a pas bougé au cours du tir.

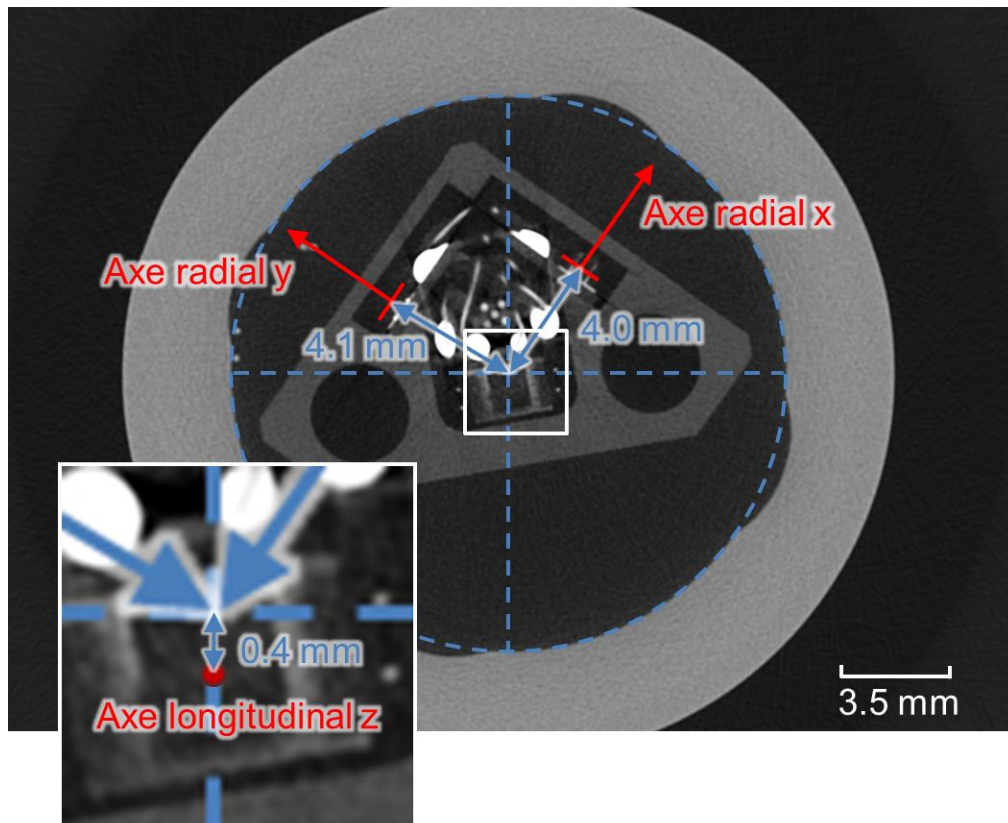


Figure V-43 : Vue en coupe transversale d'une munition instrumentée.

La Figure V-44 présente la courbe d'accélération due à la force centrifuge à 4 mm de l'axe de symétrie de la munition, soit à l'origine des axes de mesure des accélérations radiales.

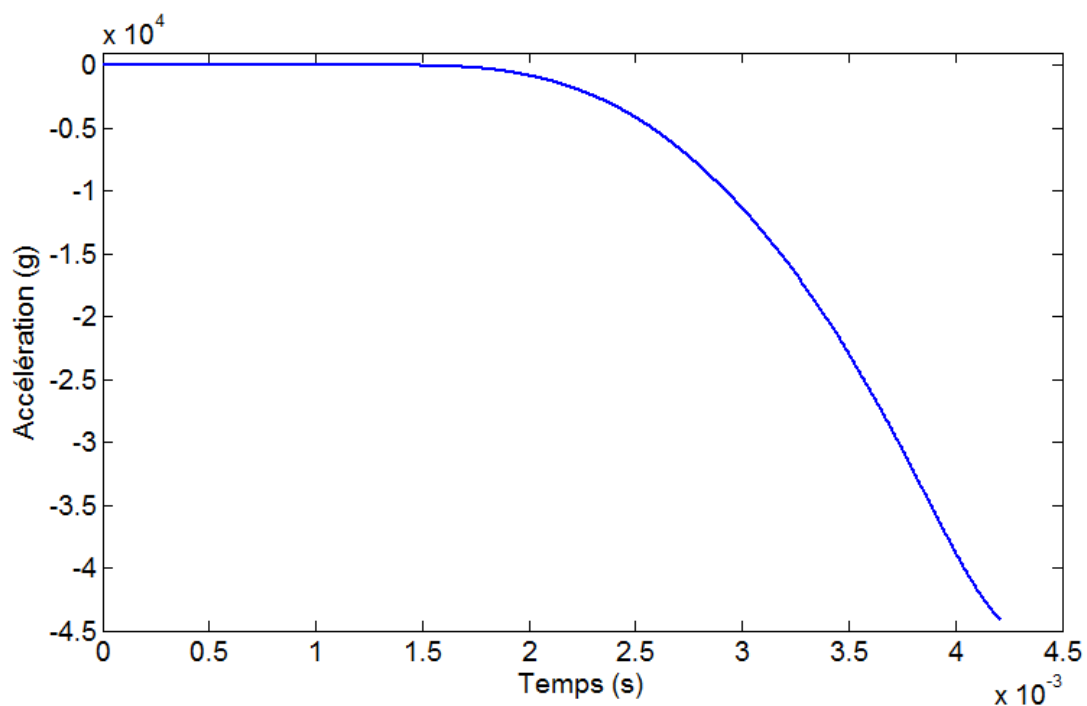


Figure V-44 : Accélération centripète à l'origine des axes x et y au cours du tir.

L'accélération centrifuge étant due à la force qui retient le point observé, elle est négative puisque sa direction est opposée au sens des axes de mesure x et y . Cette accélération explique pourquoi les accélérations radiales mesurées sont négatives et qu'elles sont plus importantes à la sortie du tube. Elle peut varier avec l'orientation de l'axe de mesure et la position de son origine.

La variabilité des accélérations radiales obtenues peut également provenir de l'orientation des axes au début du parcours de balistique intérieure. Comme la munition est positionnée à la main dans la chambre, cela signifie que l'axe x peut avoir un angle de plus ou moins 5° par rapport à l'axe vertical.

V.4. Conclusions et perspectives

Le projet d'instrumentation de munitions avait pour but l'enregistrement des accélérations de ces dernières en phase de balistique intérieure. Contrairement à l'accélération longitudinale, l'ordre de grandeur des accélérations dans le sens radial était jusque-là inconnu. Ces accélérations ont pour vocation de permettre le recalage du modèle numérique de simulation tridimensionnel présenté dans le chapitre suivant. Mesurer les accélérations d'une munition n'étant pas une instrumentation couramment utilisée et étant difficile à réaliser, un projet de développement d'une solution optoélectronique a été organisé. Trois étapes ont eu lieu, dont les deux premières avaient pour but de vérifier la validité de la solution mise en œuvre. La dernière étape a permis d'obtenir les accélérations dans les trois directions d'une partie des munitions tirées. Elle a également permis d'obtenir le gonflement du tube en plusieurs sections et de connaître les déplacements de la bouche au cours des tirs réalisés.

Grâce aux étapes préliminaires de validation de la solution, des améliorations ont pu être apportées. Ainsi, la troisième et dernière étape a pu avoir lieu. Cette dernière a montré que des améliorations supplémentaires devront être mises en place dans le futur, puisque tous les tirs n'ont pas permis d'obtenir des courbes d'accélération satisfaisantes du fait d'une mauvaise réception du signal envoyé par le laser (fausse fusée). Les clichés de tomographie ont également révélé une réelle difficulté, au moment du montage et du résinage de l'électronique, à positionner correctement les accéléromètres (axe longitudinal dans l'axe de symétrie du corps d'obus). En effet, un angle de 5° entre l'axe longitudinal et l'axe de symétrie du corps d'obus a pu être constaté lors de la tomographie d'une des munitions instrumentée. Comme cela a été démontré précédemment, un tel angle peut perturber significativement les mesures des accélérations. La tomographie peut donc être une solution afin de connaître le positionnement exact de l'accéléromètre dans les munitions avant de les

tirer et de réaliser les changements de repère nécessaires à la détermination des accélérations dans un repère global.

Concernant les mesures de gonflement, elles ont permis d'obtenir des valeurs reproductibles aux sections axisymétriques. Pour ces sections, le montage en demi-pont a permis de s'affranchir des effets dus à la flexion du tube. Cela a eu pour effet d'avoir des courbes peu bruitées, ce qui n'a pas été le cas pour les sections placées au niveau des nervures. En effet, du fait du nombre de nervures (9 nervures), il n'a pas été possible d'utiliser de demi-pont mais des quarts de pont. Ainsi, seules les mesures réalisées aux sections A, B et C pourront être utilisées afin de recalculer le modèle numérique.

Les mesures de déplacement à la bouche du tube ont montré que les allures et amplitudes sont très proches entre chaque tir. Ainsi, il n'y a pas eu de variation dans le comportement du tube ayant pu modifier les mouvements de la munition. De plus, les mouvements ont mis en évidence un axe de déplacement privilégié presque à la verticale. Cela peut donc être dû à l'effet Bourdon, ou bien à l'orientation des ouïes du frein de bouche qui se trouve exactement dans l'alignement de l'axe des déplacements mesurés.

VI. Modèle numérique de tir de 25M811

VI.1. Construction du modèle

Ce chapitre permet de présenter les étapes de réalisation et de validation du modèle dynamique de tir d'un OX de 25 mm (Figure VI-1). Le but de ce modèle est d'être le plus représentatif possible de la réalité afin de mieux comprendre le comportement du tube et de la munition en phase de balistique intérieure. Une fois validé, ce modèle permettra la réalisation d'une étude paramétrique sur les profils de rectitude des tubes.

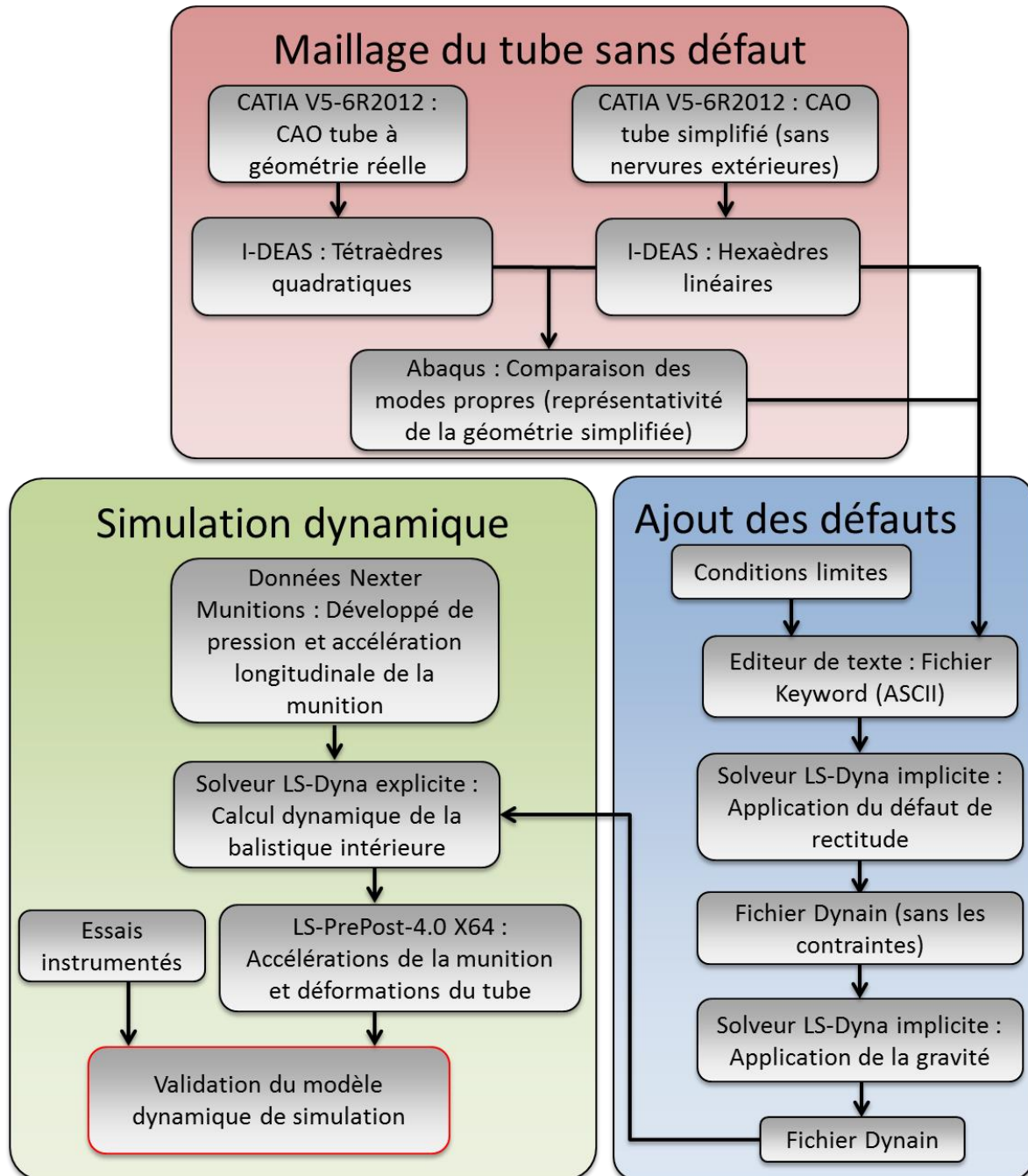


Figure VI-1 : Démarche suivie pour la réalisation du modèle dynamique de simulation de tir.

VI.1.1. Présentation des logiciels utilisés

La construction du modèle dynamique de tir a nécessité l'utilisation de deux logiciels. Le premier, NX I-DEAS 5, est un logiciel d'analyse par éléments finis et de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Il a permis de définir la géométrie, le type de matériau et la topologie du maillage des éléments de notre système. I-DEAS (Integrated Design Engineering and Analysis Software) permet ensuite d'exporter toutes ces informations dans un fichier de type keyword capable d'être lu par le logiciel LS-Dyna (version SMP d R7.1.1). Ce second logiciel permet de réaliser des calculs par éléments finis et, plus particulièrement, de résoudre des systèmes dynamiques non-linéaires. Le solveur implicite de LS-Dyna a permis dans un premier temps de calculer la déformée statique du tube due à son propre poids. Ainsi, la déformée a pu être utilisée comme donnée d'entrée pour le calcul en dynamique qui, lui, a été réalisé à l'aide du solveur explicite.

VI.1.2. Repère du modèle

Le repère utilisé par la suite, est un repère cartésien orthonormé dont l'origine se situe au centre de la section du tube, où commence le cône de forcement (Figure VI-2).

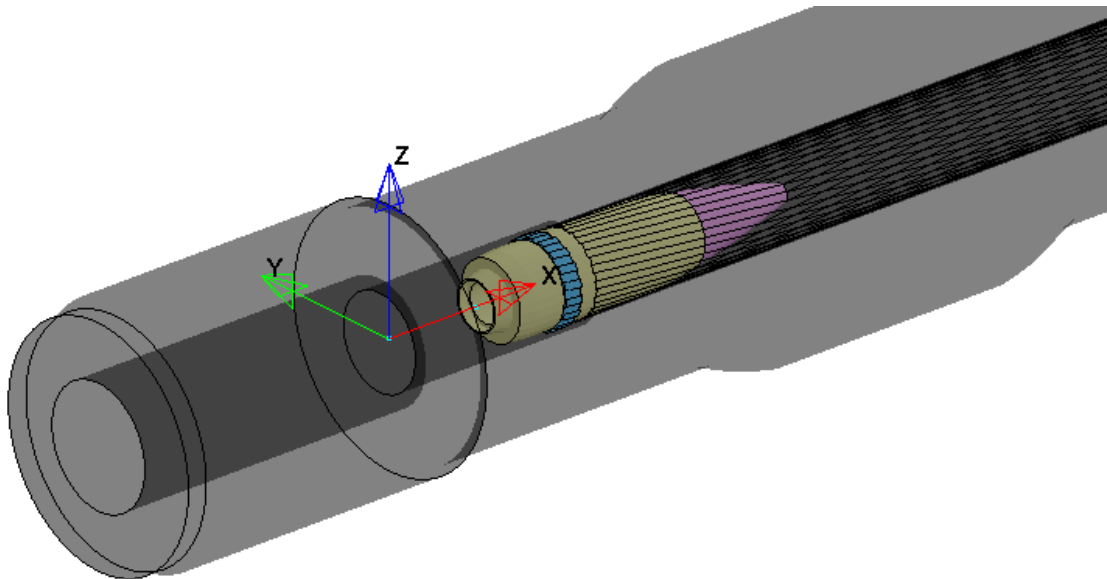


Figure VI-2 : Position du repère du modèle.

L'axe des x correspond à l'axe longitudinal du tube, valeurs positives en direction de l'avant du tube. L'axe des y est l'axe horizontal perpendiculaire à l'axe des x. L'axe des z est l'axe vertical perpendiculaire aux deux autres axes, valeurs positives vers le haut. Ainsi la gravité est appliquée selon l'axe des z, dans le sens des valeurs négatives.

VI.1.3. Maillage

VI.1.3.1. Maillage du tube

Pour la réalisation du modèle dynamique du tube de 25M811, le tube doit être constitué d'éléments solides à 8 nœuds (aussi appelé maillage réglé), soit des hexaèdres linéaires, pour que les calculs LS-Dyna puissent converger plus facilement lors de la gestion des contacts. De tels éléments limitent la présence de singularités, qui peuvent générer des problèmes numériques.

La géométrie du tube de 25 mm est complexe car, du fait du nombre impair des nervures extérieures, il n'est pas axisymétrique. Il n'est donc pas simple de le mailler en réglé sans modifications de son enveloppe extérieure. Ainsi, la géométrie du tube est simplifiée afin de gagner du temps de maillage en rendant l'extérieur du tube parfaitement cylindrique.

Afin de vérifier que la géométrie simplifiée du tube est bien représentative du vrai tube, une analyse modale a été réalisée. Pour ce faire, les modes propres du tube à géométrie réelle, maillé librement, ont été calculés puis comparés aux modes propres du tube à géométrie simplifiée, maillé en réglé.

VI.1.3.1.1. Tube à géométrie réelle

Le tube de 25M811 a été maillé de façon libre à l'aide d'éléments de type tétraèdre quadratique comme présenté sur la Figure VI-3. Les caractéristiques mécaniques utilisées sont celles de l'acier : module d'Young de 210 GPa, coefficient de Poisson de 0.29 et masse volumique de 7700 Kg/m^3 . Le tube est considéré comme un matériau ayant un comportement élasto-plastique.

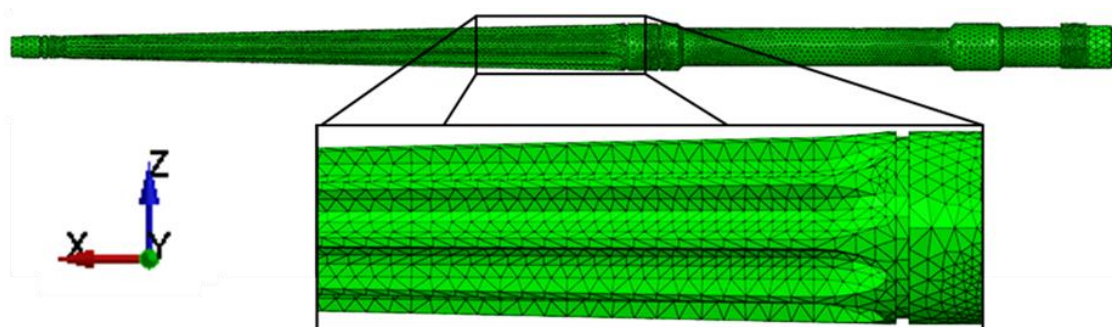


Figure VI-3 : Maillage du tube à géométrie réelle.

La tranche arrière du tube a été considérée comme encastree sur la longueur maintenue dans l'appareil de tir. Ceci a pour effet de ne permettre aucune translation ni rotation de cette partie (Figure VI-4).

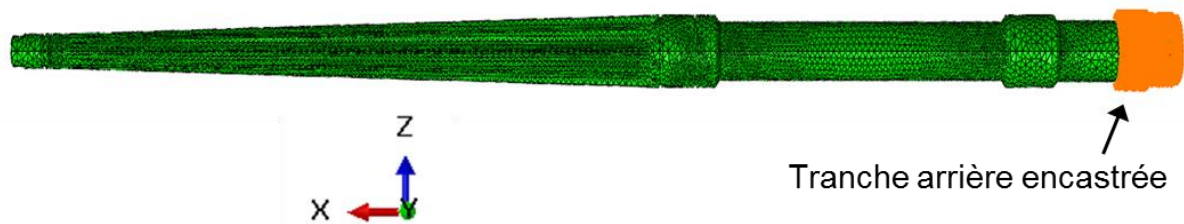


Figure VI-4 : Représentation des conditions d'appui du tube à géométrie réelle (Abaqus).

Le frein de bouche a une masse de 1.042 Kg. Afin de le modéliser, un nœud a été créé au niveau du centre de gravité du frein de bouche lorsque celui-ci est monté sur le tube, auquel nous avons appliqué sa masse. Ensuite, ce point a été relié rigidement à la partie filetée du tube.

La masse du modèle a été comparée à celle du vrai tube avec son frein de bouche (Tableau 16). Les deux masses sont identiques, ce qui signifie que le modèle est représentatif de la réalité en termes de masse.

	Masse du modèle éléments finis (Kg)	Masse réel (Kg)	Ecart (%)
Tube et frein de bouche	42.24	42.24	0

Tableau 16 : Comparaison entre la masse du modèle numérique et la masse du vrai tube.

Le Tableau 17 ci-après, présente les premiers modes propres du tube calculés à l'aide du logiciel Abaqus (version 6.12-3), et les allures du tube pour chaque mode sont visibles en Annexe 6.

Mode	Fréquence propre (Hz)	Type de mode	Plan des déformations
1a	20.8	1 ^{er} mode de flexion	Plan vertical
1b	20.8	1 ^{er} mode de flexion	Plan horizontal
2a	86.6	2 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
2b	86.6	2 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
3a	213.7	3 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
3b	213.8	3 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
4a	401.1	4 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
4b	401.2	4 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
5	591.8	1 ^{er} mode d'allongement	-

Tableau 17 : Modes propres de la modélisation du tube à géométrie réelle.

Les analyses modales ont été réalisés à l'aide d'Abaqus car c'est un logiciel standard pour les calculs implicites, LS-Dyna étant davantage utilisé pour les calculs en dynamique rapide.

VI.1.3.1.2. Tube à géométrie simplifiée

Ici, le tube de 25 mm a été maillé à l'aide d'hexaèdres à 8 nœuds comme présenté sur la Figure VI-5.

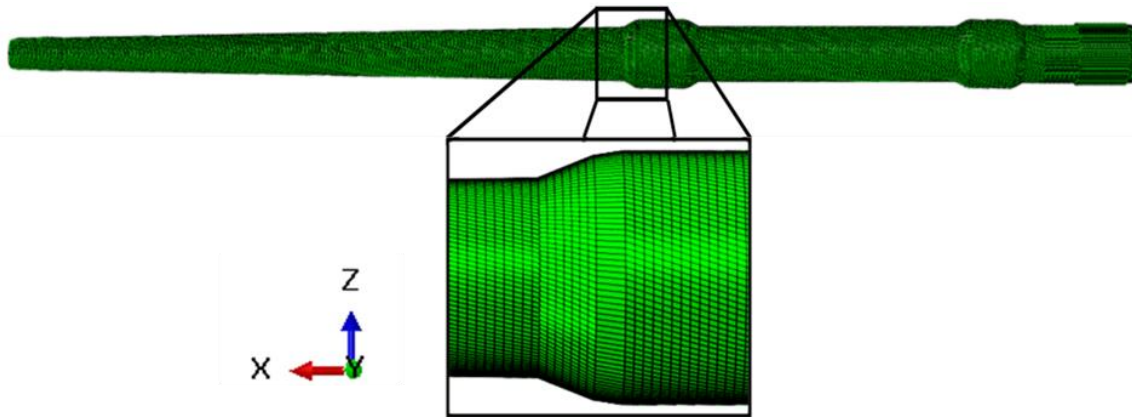


Figure VI-5 : Représentation du maillage du tube à géométrie simplifiée.

592 000 éléments ont été nécessaires afin de mailler le tube entier. Ce nombre d'éléments a été défini par la largeur des rayures du tube. En effet, pour une modélisation précise du contact entre la ceinture et le tube, la largeur de leurs sommets est représentée par quatre éléments, et par trois éléments en fond de rayure (Figure VI-6). Le pas de rayage a été modélisé constant sur toute la longueur du tube. Dans la réalité, ce pas est variable diminuant jusqu'à la bouche afin de ne pas imposer une vitesse de rotation trop grande à la munition dès sa prise de rayure. Ce pas a été choisi de telle manière que le nombre de tours effectués par la munition soit le même que dans la réalité.

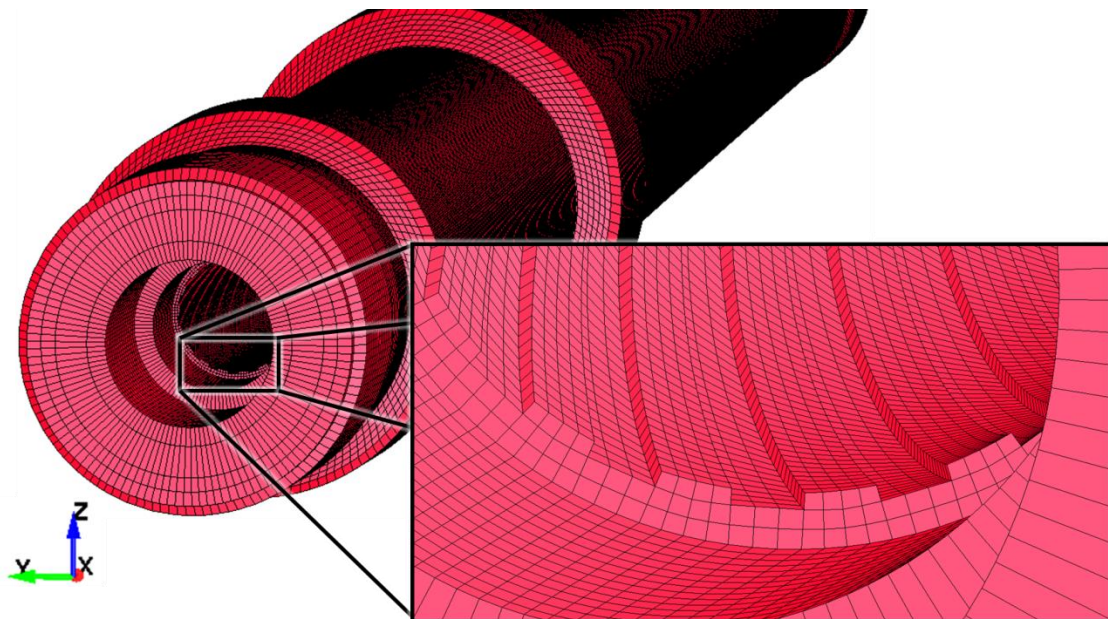


Figure VI-6 : Maillage des rayures du tube.

Afin d'avoir un comportement du tube qui soit similaire au précédent, le diamètre de la section a été choisi de façon à obtenir les mêmes moments quadratiques que ceux du tube nervuré, et ce, sur toute sa longueur.

Les caractéristiques et le comportement donnés au matériau de ce tube sont les mêmes que pour le tube à géométrie réelle. La masse volumique, quant à elle, a été modifiée. En effet, comme le volume du tube simplifié était plus petit que celui du tube nervuré, la masse volumique a été fixée à 8051 Kg/m^3 .

Les conditions de maintien du tube sont identiques à celles du tube précédent, modulo les largeurs des zones de maintien définies, qui dépend de la taille des éléments du maillage (Figure VI-7).

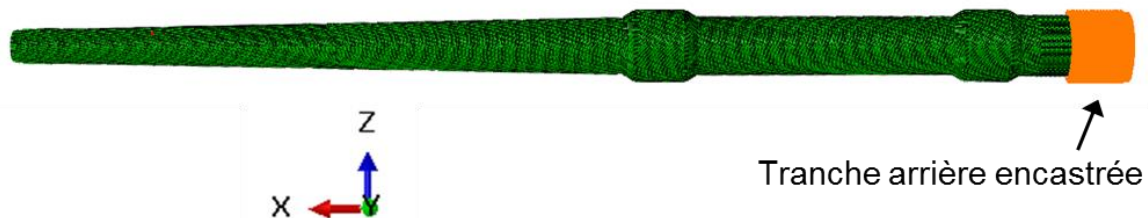


Figure VI-7 : Représentation des conditions d'appui du tube à géométrie simplifiée (Abaqus).

L'ajout du poids du frein de bouche a été modélisé de la même façon que précédemment. Grâce à la modification de la masse volumique du tube, le bilan de masse montre que le tube à géométrie simplifiée a une masse identique au tube réel (Tableau 18).

	Masse du modèle éléments finis (Kg)	Masse réel (Kg)	Ecart (%)
Tube et frein de bouche	42.24	42.24	0

Tableau 18 : Comparaison entre la masse du tube à géométrie simplifiée et la masse réelle.

Les modes propres du tube ont été calculés à partir du logiciel Abaqus. Les premiers modes sont présentés dans le Tableau 19 et l'allure du tube donnée par chaque mode est visible en Annexe 7.

Mode	Fréquence propre (Hz)	Type de mode	Plan des déformations
1a	21.3	1 ^{er} mode de flexion	Plan vertical
1b	21.3	1 ^{er} mode de flexion	Plan horizontal
2a	83.1	2 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
2b	83.1	2 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
3a	209.2	3 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
3b	209.2	3 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
4a	394.0	4 ^{ème} mode de flexion	Plan vertical
4b	394.0	4 ^{ème} mode de flexion	Plan horizontal
5	629.7	1 ^{er} mode d'allongement	-

Tableau 19 : Modes propres de la modélisation du tube à géométrie simplifiée.

VI.1.3.1.3. Comparaison des fréquences propres

Afin de vérifier la représentativité du tube ayant été modélisé à l'aide d'une géométrie simplifiée (sans nervures extérieures), les premiers modes propres de ce tube sont comparés à ceux du tube à géométrie réelle (Tableau 20).

Mode	Fréquence propre (Hz)		Erreur (%)
	Tube sans nervures	Vraie géométrie du tube	
1a	21.3	20.8	2.4
1b	21.3	20.8	2.4
2a	83.1	86.6	-4.0
2b	83.1	86.6	-4.0
3a	209.2	213.7	-2.1
3b	209.2	213.8	-2.2
4	394.0	401.1	-1.8
5a	394.0	401.2	-1.8
5b	629.7	591.8	6.4

Tableau 20 : Comparaison des premiers modes propres des deux tubes modélisés.

Cette comparaison montre que les premiers modes sont très proches les uns des autres puisque tous les écarts sont inférieurs à 6,4%. Généralement, des écarts supérieurs à 15% sont considérés comme risquant de conduire à des différences significatives dans la réponse du tube. Ainsi, la simplification géométrique réalisée sur le tube ne changera que très peu son comportement au cours de la simulation de tir et pourra donc être utilisée pour la constitution du modèle dynamique.

VI.1.3.2. Maillage de la munition

Le maillage de la munition a été réalisé en trois parties distinctes : la ceinture, le corps d'obus et la fausse fusée (Figure VI-8). Chaque partie a été maillée de la même façon que le tube, c'est-à-dire à l'aide d'éléments hexaédriques à 8 nœuds (ou hexaédriques linéaires). Le modèle compte 5 500 éléments pour le corps d'obus, 7 500 pour la fausse fusée et 12 100 éléments pour la ceinture.

Les caractéristiques de la ceinture sont celles du fer fritté, celles du corps d'obus correspondent à l'acier et enfin celles de la fausse fusée à l'aluminium. La loi de comportement plastique de la ceinture n'étant pas connue, cette dernière a été considérée comme élastique. La fausse fusée a été considérée comme élasto-plastique et le corps d'obus comme rigide. Le but de ce modèle étant d'analyser le ballonnement de la munition, donner une loi élasto-plastique au corps d'obus risquerait d'introduire du bruit dans les résultats observés. De plus, cette loi n'est pas connue à l'heure actuelle.

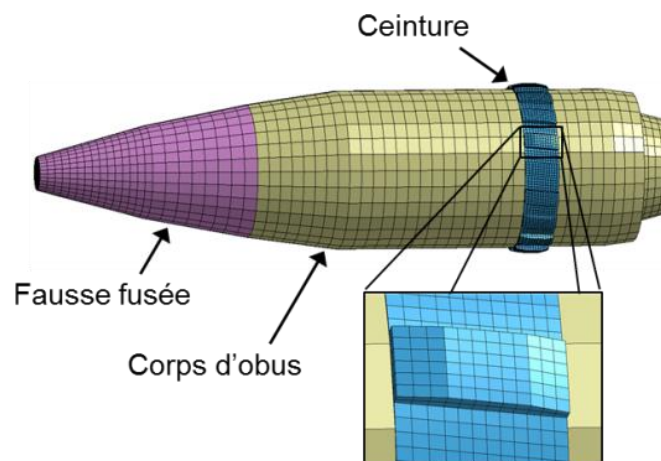


Figure VI-8 : Représentation du maillage de la munition.

La masse totale du projectile du modèle numérique est de 179.90 g contre $183 \text{ g} \pm 3 \text{ g}$ pour les munitions de série, soit un écart inférieur à 2%. Le centre de gravité de la munition modélisée se trouve à 37.57 mm du culot, soit 0.3 mm plus loin que la position moyenne du centre de gravité des projectiles classiques. Cependant, la valeur obtenue est comprise dans l'intervalle de variation de la position du centre de gravité du fait des tolérances de définition. La configuration est pénalisante vis-à-vis du ballonnement du projectile.

Comme le montre la Figure VI-8, la ceinture est prérayée afin de ne pas avoir à modéliser son emboutissage au moment de son passage dans le cône de forcement. Son diamètre extérieur est légèrement plus important que le diamètre intérieur du tube afin de modéliser le forcement de la munition sur le tube. La largeur a ainsi été ajustée afin de faire correspondre le gonflement du tube obtenu numériquement, aux valeurs expérimentales.

VI.1.3.3. Maillage du bloc de résine

Afin de modéliser le bloc d'électronique, toute la partie instrumentée est représentée dans le modèle par un bloc de résine dont les caractéristiques sont les suivantes : module d'Young de 5 GPa, coefficient de Poisson de 0.24 et masse volumique de 1300 Kg/m³ [GAL 11]. La résine a été considérée comme élastique et le bloc a été réalisé de telle manière que les nœuds du maillage se trouvent aux emplacements de l'origine des axes de mesures des accéléromètres triaxiaux. Le bloc est ainsi constitué de 600 éléments hexaédriques linéaires (Figure VI-9).

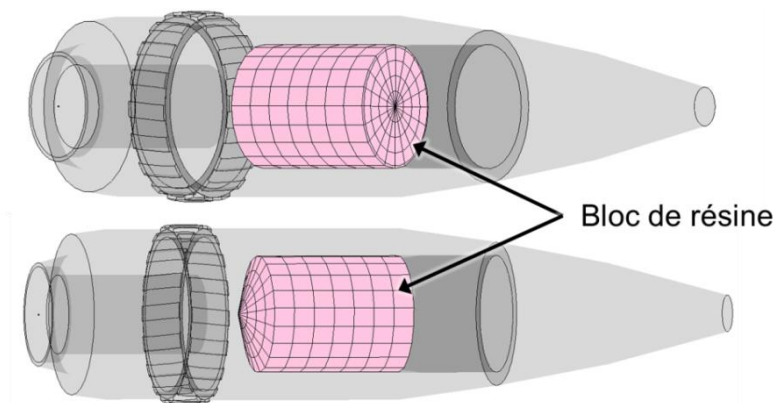


Figure VI-9 : Modélisation du bloc d'électronique par le maillage d'un bloc de résine.

VI.1.4. Modélisation du tir

Le calcul dynamique, permettant de simuler la phase de balistique intérieure, a été réalisée en explicite à l'aide du logiciel LS-Dyna, ce logiciel ayant déjà été utilisé afin de simuler cette phase pour un tube d'arme de calibre 30 mm [SAF 11]. C'est la formulation Lagrangienne qui a été choisie, car elle est adaptée au cas d'un projectile mobile dans un tube (cas des petites déformations) et permet une gestion simple du contact tube/projectile.

VI.1.4.1. Contacts

Les différents éléments constitutifs du projectile sont liés entre eux à l'aide de contacts collants (CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE). Ainsi, les nœuds des surfaces considérées ne peuvent pas se déplacer les uns par rapport aux autres. Ils se déplaceront tous d'un même bloc. En revanche, le contact entre la ceinture de la munition et le tube est réalisé à partir de la méthode des pénalités, ce qui signifie que les surfaces considérées peuvent bouger l'une par rapport à l'autre (CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE). Ce type de contact permet de faire intervenir un coefficient d'interpénétrabilité. Dans le cas présent, ce coefficient est nul afin que, par la suite, la ceinture du projectile suive bien le profil de rectitude appliqué au tube. La ceinture a été considérée comme la partie esclave et le tube comme la partie maîtresse.

Le coefficient de frottement entre la ceinture et le tube n'étant pas connu, il a été évalué à l'aide des ordres de grandeur constatés dans la bibliographie [MON 83]. Ainsi il a été fixé à 0.1, et sa valeur reste constante. Cela fait partie des hypothèses du modèle car en réalité ce coefficient varie de par la vitesse du projectile et les variations de température du tube et de la ceinture au cours du tir.

VI.1.4.2. Conditions aux limites

Le maintien du tube est le même que celui présenté en Figure VI-7, qui correspond au maintien en appareil de tir (Figure VI-10).

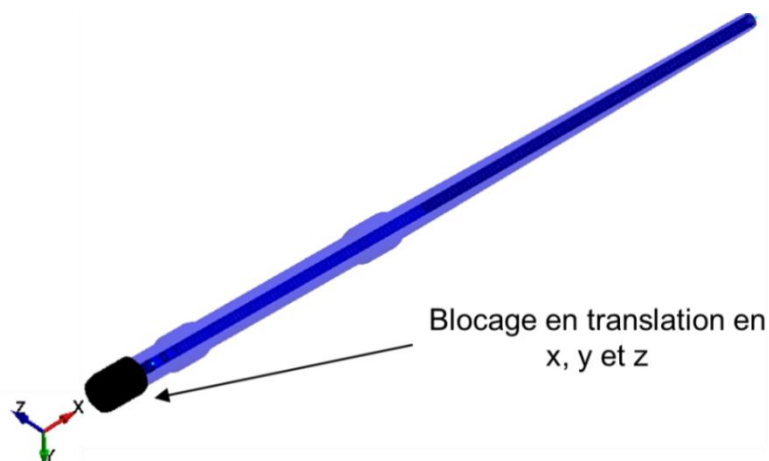


Figure VI-10 : Maintien du tube en appareil de tir (LS-Dyna).

Lors du calcul en dynamique, le tube n'a pas le temps de fléchir sous l'effet de la gravité. C'est pourquoi un calcul quasi-statique est nécessaire afin de pouvoir obtenir les contraintes dans le tube et les coordonnées des nœuds de ce dernier à l'état initial où seul son poids propre lui est appliqué (Figure VI-11). Cela nécessite l'utilisation de la méthode de calcul implicite.

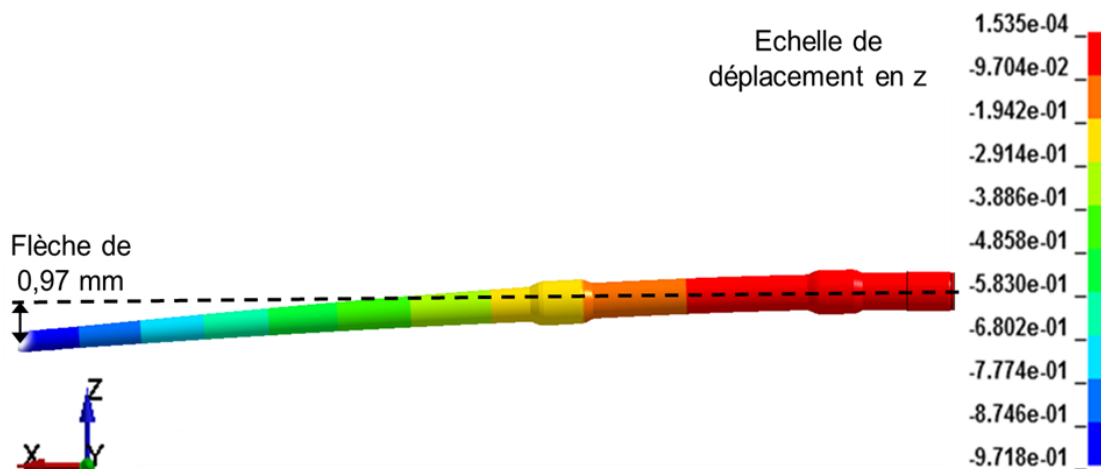


Figure VI-11 : Flèche du tube due au poids propre.

Avant l'étape de prise en compte de l'effet de la gravité, des efforts ponctuels ont été appliqués sur le tube afin de le contraindre à prendre le profil interne du tube 445. Ce calcul a également été fait en implicite. Le tube a été encastré (blocage des nœuds dans les 3 directions) au niveau des sections situées à 0, 300, 1 300 et 1 850 mm de la tranche arrière, puis, des efforts verticaux et horizontaux ont été appliqués aux sections se trouvant à 850 et 1 600 mm de la tranche arrière, de telle façon à reproduire le profil désiré à l'aide de la déformée (Figures VI-12 et VI-13). Le calcul dynamique ne tient pas compte des contraintes résiduelles induites par ces efforts.

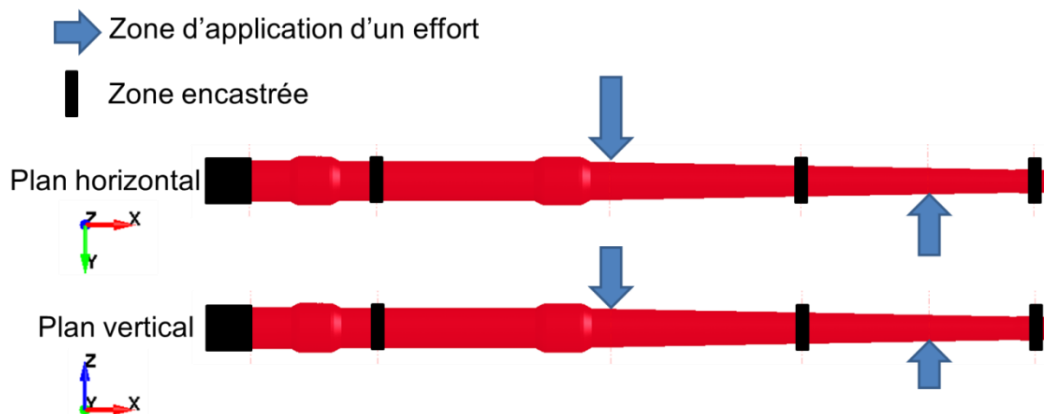


Figure VI-12 : Application des efforts permettant d'imposer un profil de rectitude.

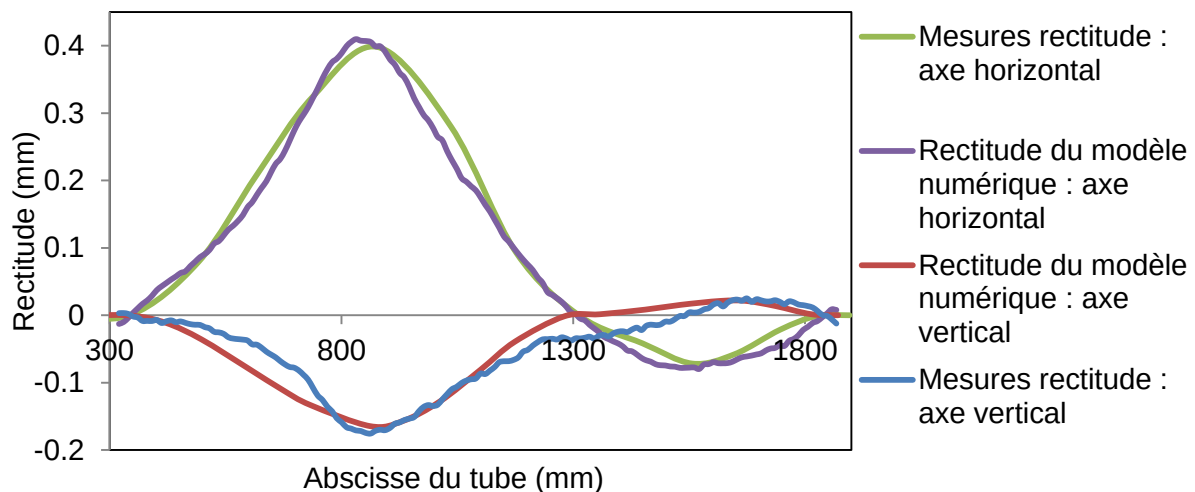


Figure VI-13 : Comparaison entre la rectitude du tube 445 et du modèle numérique.

Ainsi, ce sont les coordonnées de tous les nœuds du tube au moment de l'application des efforts qui sont introduits pour le calcul de la flèche due au poids propre. La Figure VI-13 permet de comparer le profil du tube obtenu numériquement lors de cette étape de calcul avec le profil réel du tube 445 (pour l'axe horizontal, les valeurs positives sont du côté droit vu depuis la tranche arrière et pour l'axe vertical, les valeurs positives sont vers le haut). La superposition des courbes est considérée comme très satisfaisante.

Seules les nouvelles coordonnées des nœuds du tube ont été utilisées à la suite de ce premier calcul implicite. En revanche, lors du calcul de la déformation du tube due à la gravité, les contraintes dans le matériau ont également été introduites dans le modèle dynamique.

VI.1.4.3. Pilotage de la munition

La munition a été pilotée à l'aide de la courbe d'accélération longitudinale de la munition donnée par Sibil, présentée en Figure VI-14. Pour ce faire, cette courbe a été appliquée en un nœud du corps d'obus, situé sur l'axe de symétrie de ce dernier, le plus proche possible du centre de gravité de la munition. Seul l'accélération longitudinale a été imposé afin de laisser la munition libre de se déplacer dans le plan orthogonal au déplacement longitudinal.

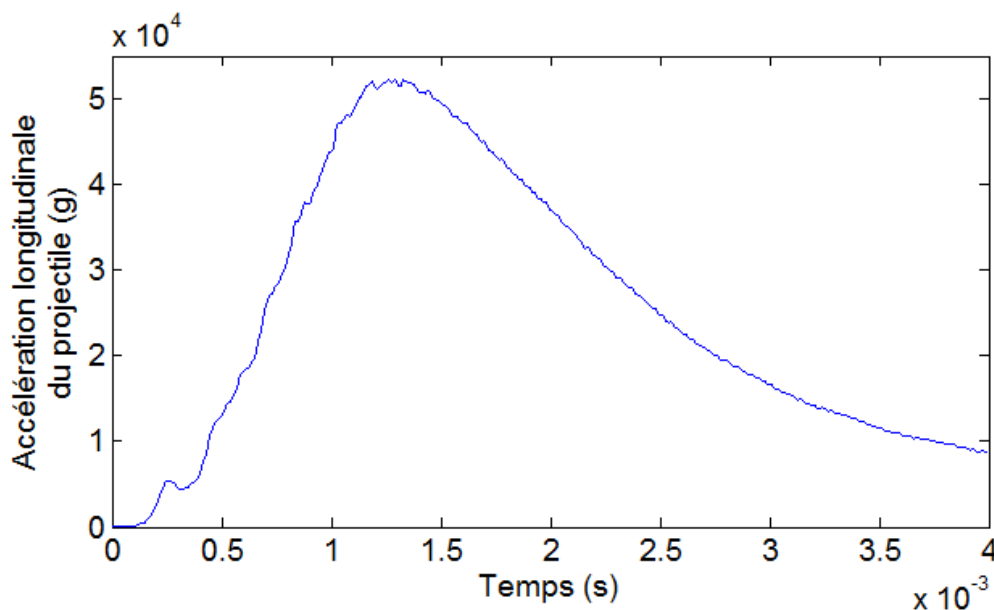


Figure VI-14 : Accélération longitudinale de la munition dans le tube au cours du temps (Sibil).

Le fait de ne contraindre qu'un nœud, et non le corps d'obus entier, permet à la munition de pouvoir pivoter librement et de ne pas empêcher le ballonnement.

VI.1.4.4. Application du frein de bouche

Afin de prendre en compte le frein de bouche lors du calcul dynamique, la masse de ce dernier a été appliquée sur un nœud situé à son centre de gravité. Ce nœud a ensuite été relié rigidement à la zone du tube où le frein de bouche est fixé, soit la zone filetée (Figure VI-15).

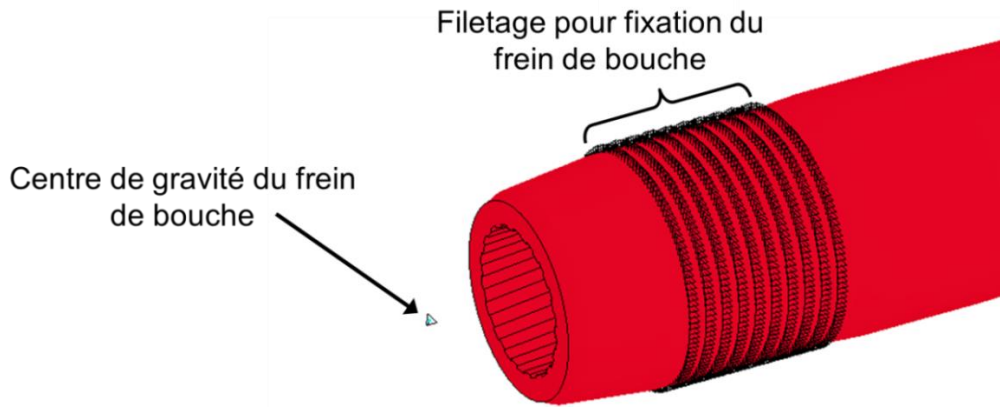


Figure VI-15 : Position du centre de gravité du frein de bouche et du filetage permettant sa fixation sur le tube.

VI.1.4.5. Application de la pression des gaz

Afin que le tube modélisé présente des déformations circonférentielles proche des valeurs obtenues au cours des essais de munitions instrumentées, la pression des gaz à l'arrière de la ceinture a été ajoutée au modèle. Pour ce faire, la surface intérieure du tube a été découpée en 30 tranches de longueur égale (61.2 mm). Puis, la courbe Sibil a été utilisée afin d'appliquer la courbe de pression vue par chaque tranche (Figure VI-16).

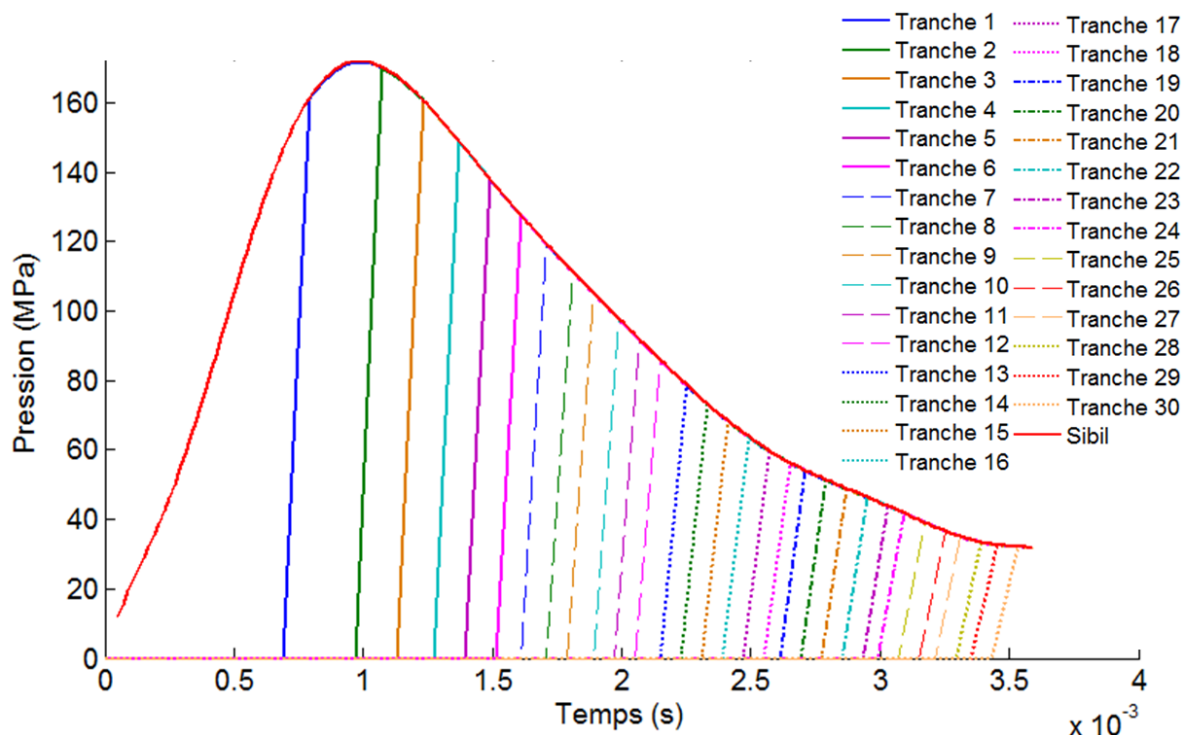


Figure VI-16 : Pressions appliquées aux tranches du tube et pression culot Sibil.

VI.2. Recalage du modèle

VI.2.1. Gonflement au passage du projectile

Les mesures de gonflement réalisées au cours des essais ont permis de vérifier que le gonflement du tube modélisé est représentatif de la réalité. Compte tenu du bruit enregistré par les quarts de pont, seules les valeurs mesurées par les demi-ponts sont comparées au modèle numérique. La Figure VI-17 permet de comparer les déformations circonférentielles obtenues expérimentalement et numériquement.

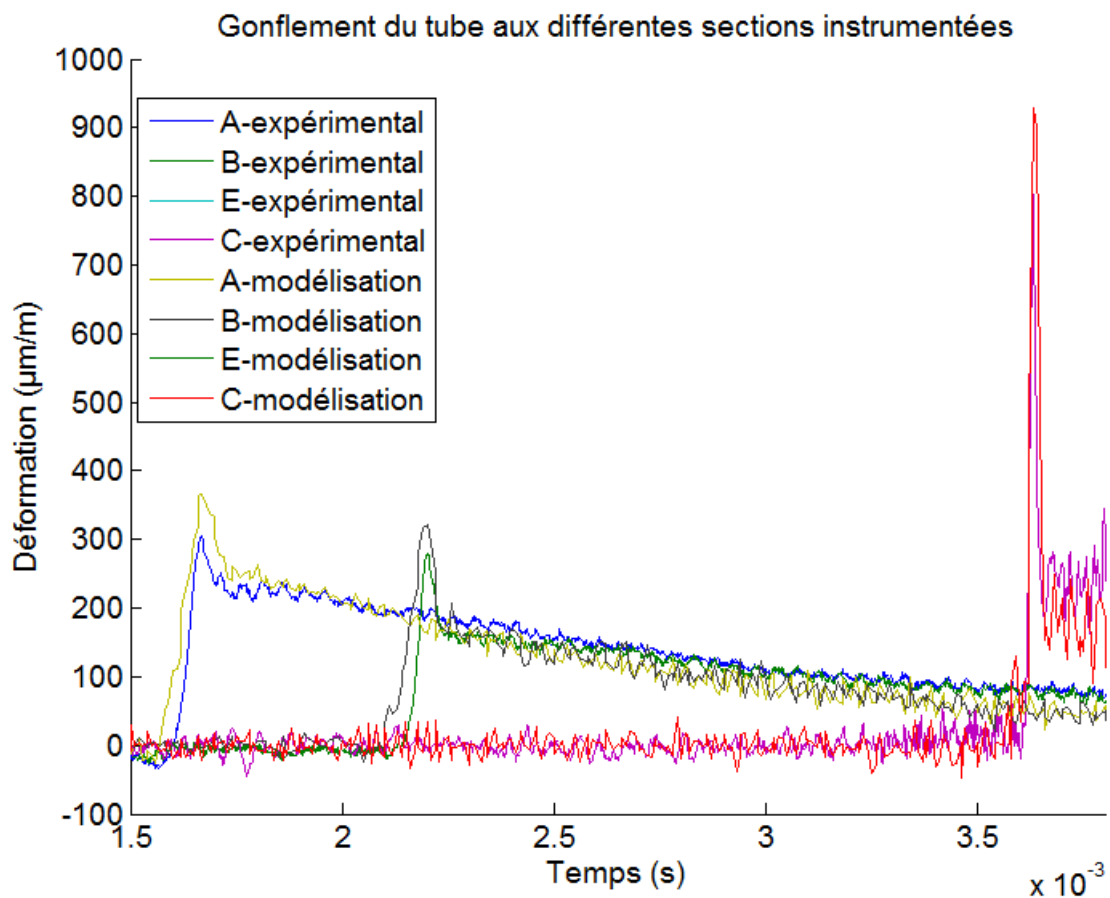


Figure VI-17 : Comparaison entre les pics de déformation expérimentaux et ceux du modèle de simulation aux sections A, B et C.

L'écart entre le pic numérique et expérimental à la section A est de 20%, de 15% à la section B et de 16% à la section C, c'est à dire à la bouche. Compte tenu de l'allure des courbes après les pics, il est possible de constater qu'à la section A la déformation due à la pression des gaz est légèrement surestimée alors qu'elle est légèrement sous-estimée à partir de la section B. Cela explique pourquoi l'écart entre l'expérimental et le numérique est plus important au niveau de la section A. Grâce à la formule de Lamé (5.2), il est possible de

déterminer les pressions équivalentes de la munition sur le tube, aux sections A, B et C, et de les comparer aux pressions équivalentes expérimentales (Figure VI-18).

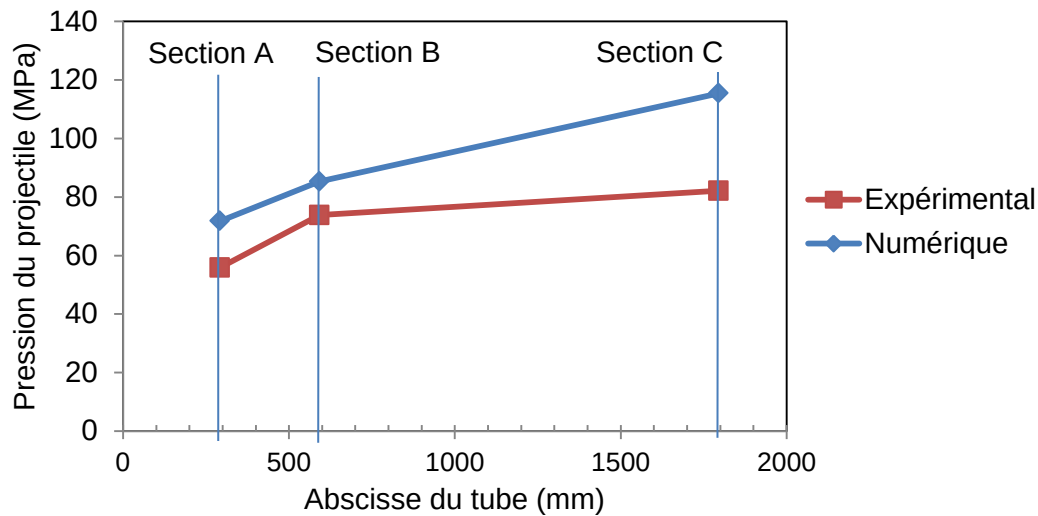


Figure VI-18 : Pression expérimentale et numérique de la munition sur le tube.

La Figure VI-18 permet de constater une surestimation de la pression de la munition sur la paroi intérieure du tube de 28% au niveau de la section A, de 15% à la section B, et de 40% à la section C. Cela peut provenir du diamètre de la ceinture modélisée qui est trop important par rapport à celui après passage dans le cône de forçement dans la réalité. Il est également possible que les hypothèses choisies sur le frottement de la ceinture dans le tube ne soit pas tout à fait représentatif des conditions expérimentales (paragraphe VI.1.4.1). De plus, aucunes notions d'usure et de dilatation thermique de cet élément n'ont été prises en compte.

Ainsi, les écarts de déformations circonférentielles constatés entre le numérique et l'expérimental sont considérés comme satisfaisants au regard de la précision des mesures et des hypothèses du modèle de simulation.

VI.2.2. Accélération du projectile

Cette partie permet la comparaison entre les accélérations du modèle de simulation et celles obtenues à l'aide des essais de munitions instrumentées. Pour effectuer cette comparaison, ce sont les accélérations des nœuds positionnés au plus près de l'origine de chacun des axes de mesures des accéléromètres embarqués qui ont été analysées. Ces nœuds se trouvent dans le bloc de résine modélisé dans le but de représenter le bloc instrumenté. Pour cette étude comparative, l'accéléromètre a été considéré comme étant parfaitement plan et l'origine de son axe de mesure longitudinal parfaitement aligné avec l'axe de symétrie du corps d'obus (Figure VI-19).

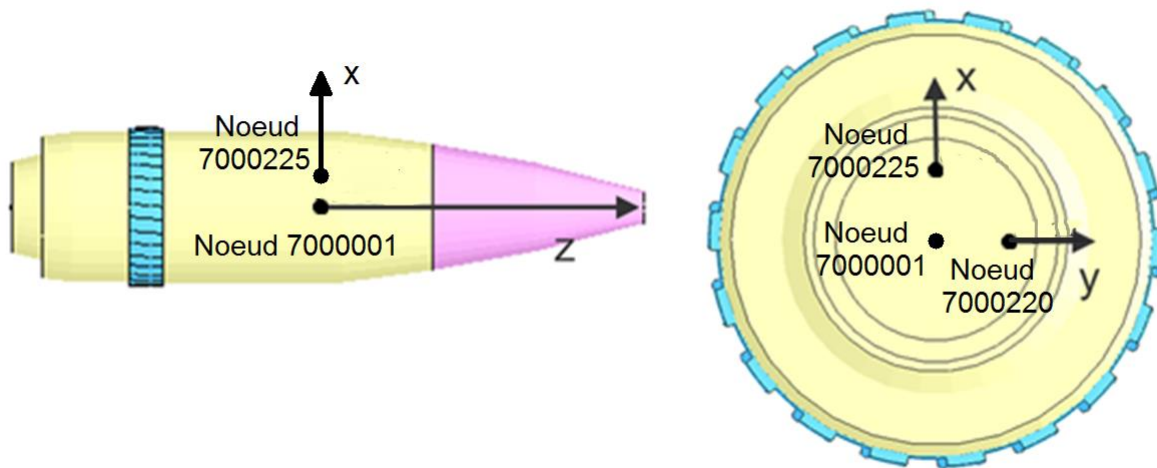


Figure VI-19 : Position des nœuds du modèle permettant la comparaison des accélérations.

VI.2.2.1. Accélération longitudinale

Afin de vérifier que le bloc de résine suit bien le profil d'accélération donné au corps d'obus, l'accélération longitudinale à l'origine de l'axe de mesure z, dans le repère global (paragraphe VI.1.2), a été comparée à la courbe Sibil (Figure VI-20).

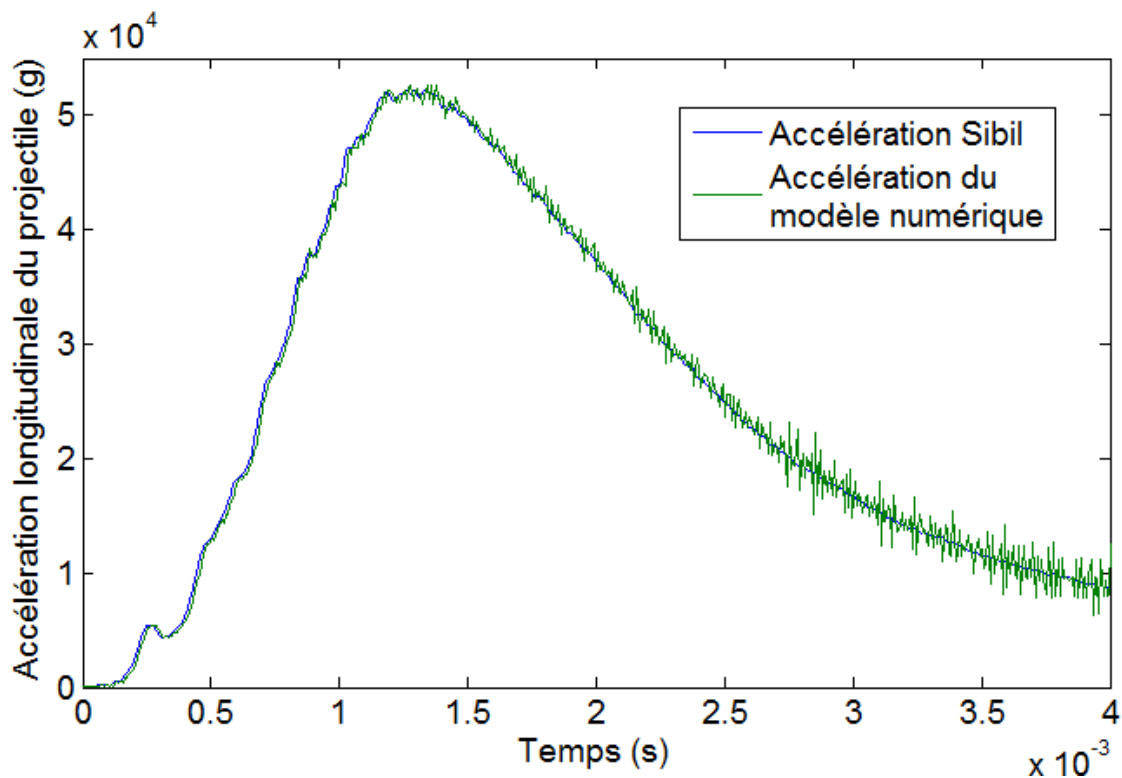


Figure VI-20 : Accélération longitudinale du modèle, comparée à l'accélération Sibil et à celle mesurée.

Les deux courbes se superposent, ce qui montre bien que la résine ne se déforme pas de manière trop importante et suit correctement le mouvement du corps d'obus.

VI.2.2.2. Accélérations radiales

Avant de pouvoir comparer les accélérations radiales expérimentales avec celles obtenues numériquement, la part d'accélération longitudinale mesurée du fait de la position non plane des accéléromètres a été déduite. Pour ce faire, une estimation de l'angle de chaque accéléromètre était nécessaire. Cela a été rendu possible grâce à l'analyse des 7 courbes d'accélération longitudinales correctement enregistrées. En effet, comme ces accélérations sont directement reliées à la pression chambre, il est possible d'utiliser le rapport entre l'accélération longitudinale maximale et la pression maximale afin de déterminer l'accéléromètre le mieux positionné. Ainsi, l'accéléromètre utilisé lors de l'essai 13 a été considéré comme celui le plus plan car le coefficient obtenu était le plus élevé, ce qui signifie que quasiment toute l'accélération longitudinale a été mesurée. Ce coefficient a ensuite été multiplié avec la pression chambre maximale obtenue à chaque essai afin de retrouver l'accélération maximale qui aurait dû être mesurée par l'axe de mesure longitudinal. La différence entre l'accélération maximale estimée et celle mesurée a ensuite permis de retrouver une approximation des angles de positionnement des accéléromètres (Tableau 21).

Numéro de l'essai	2	4	5	6	7	10	13 (essai de référence)
Pression chambre mesurée (MPa)	217	218	211	214	221	218	221
Accélération longitudinale maximale mesurée (g)	61 100	64 620	64 130	63 490	64 550	61 960	67 810
Coefficient liant la pression à l'accélération	282	296	304	297	293	284	307
Accélération longitudinale maximale estimée (g)	66 521	66 982	64 803	65 693	67 657	66 951	67 810
Différence entre accélérations mesurée et estimée (g)	5 421	2 362	673	2 203	3 107	4 991	0
Angle entre l'axe z et l'axe de symétrie du corps d'obus (°)	4,7	2	0,6	1,9	2,6	4,3	0

Tableau 21 : Valeurs ayant permis la détermination des angles de positionnement des accéléromètres embarqués.

La Figure VI-21 permet de voir l'effet de la prise en compte de l'angle de 1.9° sur l'accélération mesurée par l'axe y. A l'instant de l'accélération longitudinale maximale, la différence entre les deux courbes est proche de 2 000 g.

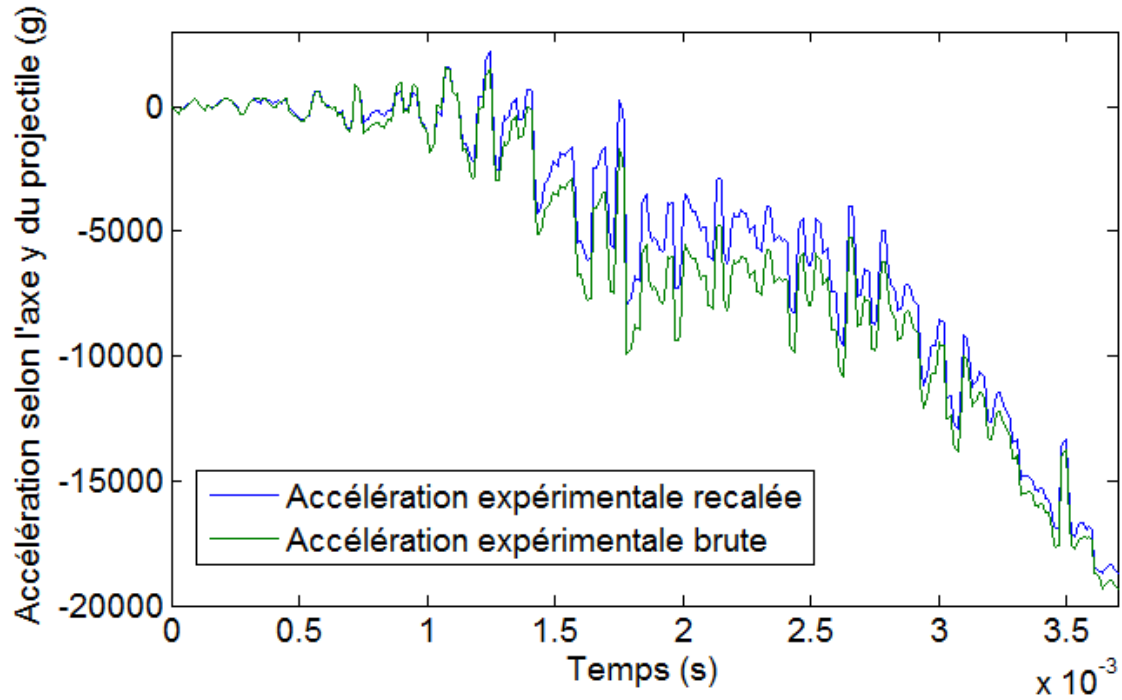


Figure VI-21 : Accélérations radiales brute et recalée selon l'axe y de mesure (Essai 6).

Concernant les accélérations radiales numériques, un changement de repère a été nécessaire afin de tenir compte de la rotation de la munition, ainsi que de son ballonnement. Soit M le point coïncidant à l'instant t avec l'origine d'un des axes de mesure des accélérations et x, y, z les coordonnées de M dans le repère global (O, X, Y, Z) . Soit $\vec{u}_i$ le vecteur unitaire d'une des directions de mesure (« i ») de l'accéléromètre. Autrement dit, la question est de savoir quelle fraction du vecteur accélération $d^2\vec{OM}/dt^2$ sera mesurée sur la direction $\vec{u}_i$.

Le vecteur $\vec{T}$ tangent à la trajectoire en M est défini à partir du vecteur vitesse $d\vec{OM}/dt$ et de la norme $v = \|d\vec{OM}/dt\|$ comme le montre l'équation (6.1).

$$\vec{T} = \frac{1}{v} \frac{d\vec{OM}}{dt} \quad (6.1)$$

La courbure locale C est l'inverse du rayon de courbure R . Elle est définie de la manière suivante :

$$C = \frac{1}{R} = \frac{1}{v^3} \left\| \frac{d\vec{OM}}{dt} \wedge \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2} \right\| \quad (6.2)$$

A partir de la courbure locale, on calcule le vecteur unitaire $\vec{N}$ dirigé vers le centre de courbure dont la formule est présentée ci-après.

$$\vec{N} = \frac{1}{vC} \frac{d\vec{T}}{dt} \quad (6.3)$$

avec :

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \frac{1}{v^2} \frac{dv}{dt} \frac{d\vec{OM}}{dt} - \frac{1}{v} \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2} \quad (6.4)$$

Ensuite, le vecteur $\vec{N}$ définit la direction de la normale principale, suivant laquelle l'accélération est donnée par la relation (6.5).

$$\vec{\Gamma}_N = \frac{v^2}{R} \vec{N} \quad (6.5)$$

Enfin, la projection de $\vec{\Gamma}_N$ sur le vecteur unitaire $\vec{u}$ est théoriquement l'accélération dans la direction $\vec{u}_i$ (équation (6.6)).

$$\vec{\Gamma}_i = \frac{v^2}{R} \vec{u}_i \cdot \vec{N} \quad (6.6)$$

Ainsi, en utilisant les coordonnées des nœuds présentés à la Figure VI-19, il a été possible de calculer les accélérations numériques dans les repères des axes x et y de mesure, dans le cas où ils seraient parfaitement orthogonaux à l'axe de symétrie du corps d'obus (Figure VI-22). Les deux courbes ont une porteuse identique. Cependant, il est possible de constater des oscillations autour cette porteuse, décalées temporellement. Elles sont le résultat du ballotement de la munition modélisée.

Les comparaisons de ces accélérations avec les mesures effectuées par l'axe x et l'axe y au cours des essais de munitions instrumentées, sont présentées en Figure VI-23 et Figure VI-24 respectivement. Le temps zéro ici, correspond au temps où le projectile commence à se déplacer dans le tube (le temps de déclenchement, de percussion et le début de la combustion de la poudre ne sont pas pris en compte).

Le premier constat est que les ordres de grandeur obtenus numériquement sont représentatifs. En revanche, la fréquence des oscillations est différente puisqu'elle est proche de 3.5 kHz pour les oscillations de la courbe numérique contre 11 kHz pour celles

expérimentales. Sur la première moitié du temps de parcours de la munition, les courbes n'ont pas exactement la même allure, mais sur la seconde elles sont très proches.

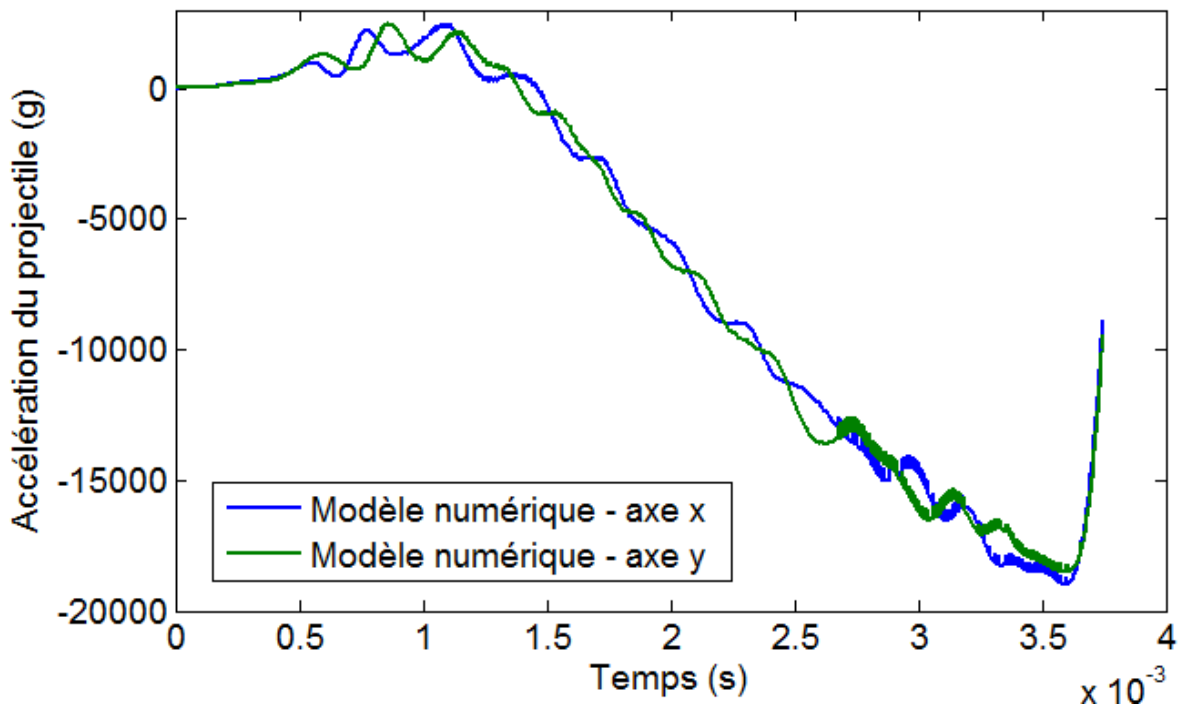


Figure VI-22 : Accélérations du modèle de simulation dans les repères des axes de mesure x et y.

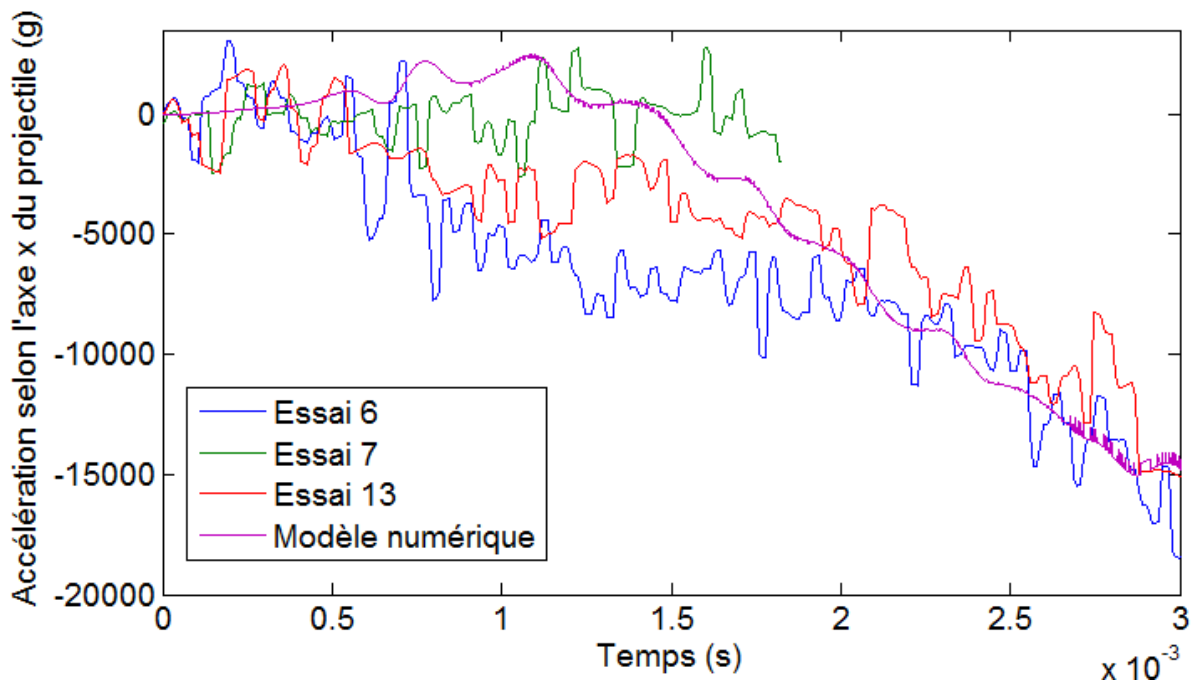


Figure VI-23 : Accélérations expérimentales et numérique dans l'axe x de mesure.

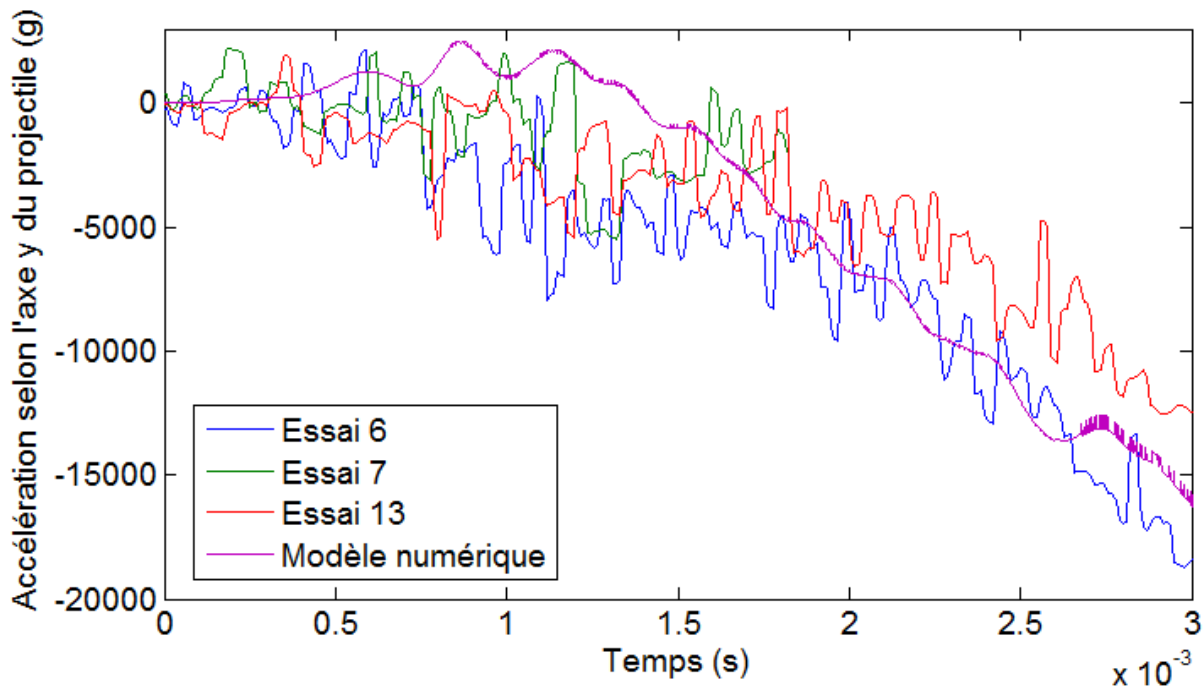


Figure VI-24 : Accélérations expérimentales et numérique dans l'axe y de mesure.

Les écarts constatés entre le numérique et l'expérimental peuvent s'expliquer par les hypothèses du modèle de simulation. En effet, compte tenu du pas constant du modèle (paragraphe VI.1.3.1.2), la munition subit une mise en rotation plus pénalisante en début de parcours. De plus, les défauts de surface locaux à l'intérieur du tube ne sont pas pris en compte car très complexes à reproduire. Or, il est possible que ces défauts impliquent des variations de trajectoire de la munition pouvant expliquer la fréquence de ballotement plus élevée expérimentalement. La courbe d'accélération utilisée en donnée d'entrée est également une approximation puisqu'elle est issue du logiciel Sibil qui la recalcule à partir de la mesure de pression dans la chambre et des autres conditions initiales des tirs. Enfin, il faut également noter que la prise de rayure a été simplifiée par le fait que l'emboutissage n'est pas pris en considération. Or, il est probable, notamment compte tenu des paramètres retenus comme influents au cours de l'analyse statistique (influence des dimensions de la chambre et du cône de forçement présentée au paragraphe III.2.2), qu'un léger angle ou désaxage de la munition au moment de l'entrée dans le cône de forçement change de façon non négligeable le comportement de cette dernière.

Malgré toutes les hypothèses du modèle de simulation, les courbes d'accélérations radiales sont, d'une part, cohérentes avec les ordres de grandeur constatés expérimentalement et jugées comme satisfaisantes au regard des allures très proches de celles des courbes de mesure, notamment sur la seconde partie du temps de passage dans le tube.

VI.3. Conclusions et perspectives

Afin de représenter un tir dans les mêmes conditions que ceux réalisés au cours des essais de munitions instrumentés, un modèle numérique tridimensionnel a été réalisé à l'aide du logiciel LS-Dyna. Pour ce modèle, le tube a été encastré en tranche arrière et la munition a été considérée comme rigide. Cette dernière a été pilotée en accélération à l'aide de la courbe Sibil. Le profil du tube 445 a été modélisé et la flèche due au poids propre également.

Les mesures de gonflement réalisées au cours des essais de munitions instrumentées se sont montrées suffisamment proches des résultats du modèle pour que ce dernier soit considéré comme représentatif de la réalité. Tout comme lors des essais, la pression équivalente, due à la munition, est relativement constante sur la longueur du tube.

Concernant l'accélération longitudinale à l'origine de l'axe de mesure z , elle suit parfaitement la courbe appliquée au corps d'obus, soit la courbe Sibil. Ainsi, le comportement de la résine ne perturbe pas l'analyse des accélérations. Pour les accélérations radiales, nous obtenons des ordres de grandeur proches de ceux constatés expérimentalement et des allures de courbe comparables. Cela signifie que, malgré les hypothèses simplificatrices du modèle, la représentativité du comportement du projectile est satisfaisante. Le modèle ainsi obtenu peut permettre de réaliser une étude paramétrique de la rectitude et ainsi, de comprendre quels sont les profils les plus pénalisants pour le parcours de la munition. En revanche, le modèle n'est pas encore suffisamment précis pour prédire les conditions de sortie de la munition pour un profil de tube donné.

La représentativité du modèle pourra être améliorée par la suite en modélisant un rayage à pas progressif suivant la courbe du tube réel (le modèle actuel présente un rayage à pas constant). Il est également possible de représenter les phénomènes ayant lieu au moment de la prise de rayure et donc, l'emboutissage de la munition. Des améliorations pourraient également être apportées sur les conditions de maintien du tube (prise en compte du recul du tube ou des différents jeux avec l'arme à l'aide de liaisons de type masse/ressort). Cela permettrait d'obtenir un modèle suffisamment représentatif afin de réaliser une étude paramétrique sur la rectitude. Cette étude fournirait les variations du comportement (ballotement) et des conditions de sortie de la munition, mettant ainsi en avant les profils les plus pénalisants pour les performances de tir.

VII. Conclusions et perspectives

VII.1. Conclusions

Le but des travaux présentés dans ce document était de déterminer les paramètres liés à géométrie de l'arme de 25M811 et son tube, qui influencent la précision de tir des munitions flèches et de plein calibre (justesse et dispersion). Des travaux antérieurs menés sur la précision de tir ont montré que les écarts à la cible sont dus à des facteurs intervenant en phase de balistique intérieure, intermédiaire ou extérieure. Les phénomènes ayant lieu en phase de balistique intérieure apportent généralement des écarts plus importants que ceux relatifs aux deux phases suivantes. Une analyse statistique menée à partir de la base de données de l'arme de 25M811 a permis de montrer que le maintien du tube, la concentricité entre l'âme et le fond de rayure à la bouche, l'alignement de l'âme du tube avec l'axe de la chambre, ou encore la rectitude et l'arcure sont des paramètres ayant une forte influence sur les résultats à la cible.

A l'aide de cette même base de données enrichie, une nouvelle analyse statistique a été menée en tenant compte cette fois de la taille des échantillons considérés. Parmi les paramètres reconnus comme influençant la justesse ou la dispersion au terme de l'analyse, on retrouve une partie des paramètres retenus lors de la première étude (maintien du tube, alignement de l'âme du tube avec l'axe de la chambre et la rectitude). D'autres paramètres ont été mis en évidence comme la concentricité des portées du frein de bouche et le positionnement du logement du doigt de manchon. Cette étude a permis également de constater que les paramètres influant sur le parcours des munitions flèches n'influencent pas le parcours des munitions de plein calibre et vice-versa. Ainsi, les comportements des deux types de munition sont très différents. L'étude de tous les paramètres jouant un rôle sur les écarts à la cible n'étant pas possible, il a été choisi d'analyser l'influence de la rectitude au travers d'essais. Ce choix a été fait car de nombreuses études, statistiques et numériques, montrent ce paramètre comme impactant le passage de la munition et donc, la précision de tir.

Afin de vérifier l'influence de la rectitude, des essais ont été menés en appareil de tir. Ils ont permis de s'affranchir des effets liés à la cinématique de l'arme et d'isoler la part du tube sur les écarts à la cible. Les résultats des tirs sans frein de bouche ont montré que, parmi les trois tubes utilisés, c'est le tube présentant le plus important défaut de rectitude en termes d'amplitude, qui a donné la moins bonne justesse, que ce soit lors des tirs de munitions flèches ou de plein calibre. Afin de pousser d'avantage l'analyse de la rectitude, un modèle de simulation tridimensionnel a été réalisé.

Dans le but de vérifier la représentativité du modèle tridimensionnel, des essais permettant de mesurer les accélérations longitudinales et radiales en phase de balistique intérieure ont été menés. Pour ce faire, le développement d'une solution d'enregistrement par voie optoélectronique et l'intégration d'un bloc d'électronique dans le corps d'obus ont été nécessaires. La courbe d'accélération longitudinale de la munition est connue grâce au logiciel Sibil. Cependant, ses accélérations dans le sens radial n'avaient jamais été mesurées. 13 munitions instrumentées ont été tirées et 3 d'entre elles ont permis d'obtenir des courbes d'accélération satisfaisantes. Au cours de ces essais, le gonflement du tube a été mesuré afin de vérifier que le modèle simule correctement la pression exercée par la munition sur le tube.

Le modèle de simulation a pu ainsi être comparé aux mesures effectuées lors des essais de tir de munitions instrumentées. Le gonflement du tube est apparu comme très satisfaisant avec des écarts entre les pics expérimentaux et numériques de l'ordre de 20%. L'accélération longitudinale vue par le nœud positionné à l'origine de l'axe de mesure z suit parfaitement la courbe donnée au corps d'obus. Quant aux accélérations radiales, les ordres de grandeur constatés numériquement sont proches de ceux mesurés.

VII.2. Perspectives

L'étude statistique menée dans le présent document s'est appuyée sur des mesures de paramètres géométriques dont les erreurs de mesure doivent être étudiées avec plus de précision. Une étude sur la fiabilité des mesures permettrait d'affiner les résultats de l'analyse statistique. De plus, certains paramètres n'ont pas pu être correctement étudiés du fait de la taille des échantillons qui était parfois insuffisante. C'est pourquoi de nouvelles campagnes de mesure pourraient être mises en œuvre afin de vérifier que les paramètres qui n'ont pas été retenus à la suite de l'étude, n'ont pas d'influence significative sur la justesse et la dispersion.

Par la suite, l'analyse du comportement des munitions au cours de la phase de balistique intérieure devra être approfondie. Pour ce faire, des essais supplémentaires pourraient être envisagés en utilisant deux accéléromètres triaxiaux intégrés dans la munition. Ainsi, tous les déplacements de la munition pourraient être connus. Le procédé d'intégration de l'électronique est difficile à améliorer d'une part parce que l'homogénéité du séchage de l'époxy est complexe à maîtriser, et d'autre part parce que l'électronique étant montée à la main la précision ne peut pas être de l'ordre du micron mais plutôt du millimètre. Ainsi, la tomographie serait la solution permettant de connaître le positionnement exact de

l'électronique dans le corps d'obus avant tir, et ainsi de pouvoir interpréter les mesures grâce aux changements de repère nécessaires.

Le modèle numérique développé pourra donc être amélioré à l'aide de mesures expérimentales supplémentaires et par la suite, utilisé afin de réaliser une étude paramétrique orientée en fonction des résultats de l'analyse statistique approfondie. Il permettra notamment l'analyse de différents profils de rectitude afin de déterminer les plus pénalisants pour la trajectoire de la munition grâce à la détermination du ballonnement et des conditions de sortie de cette dernière. Les résultats permettront de proposer des solutions à mettre en œuvre pour éviter certains profils de rectitude et pour améliorer d'autres paramètres considérés comme influents.

VIII. Références

- [AIV 78] S. AÏVAZIAN, *Etude statistique des dépendances*, 2^e Edition, page 102, 1978 ;
- [ANS 88] K. A. ANSARI et J. W. JR. BAUGH, *Dynamics of a Balloting Projectile in a Moving Gun Tube*, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, décembre 1988 ;
- [BAE 13] S. BAERT, *Rapport d'étude : travaux RDI, VBCI Canada*, Document Nexter Systems, référence FASL3 82754480 Indice A, novembre 2013 ;
- [BER 04] C. BERNER et F. RONDOT, *Soft recovery of on-board instrumented projectiles*, ISL, 21st International Symposium on Ballistics, avril 2004 ;
- [BLA 78] R. M. BLAKNEY, *Measurement of Angular Muzzle Motion of a 105 mm Tank Gun During Firing*, Falcon Research and Development Company, 2nd US Army Symposium on Gun Dynamics, pages 18 à 33, septembre 1978 ;
- [BOR 88] J. BORNSTEIN, I. CELMINS, P. PLOSTINS et E. M. SCHMIDT, *Techniques for the Measurement of Tank Cannon Jump*, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, septembre 1988 ;
- [BUN 07] M. BUNDY, J. GARNER, M. L. KREGEL et M. D. KREGEL, *A Barrel Straightness Measurement System for Medium Caliber*, Weapons and Materials Research Directorate (ARL) et Kregel Technical Services, Inc., ARL (Army Research Laboratory), Aberdeen Proving Ground, septembre 2007 ;
- [CEL 11] I. CELMINS, *Accuracy and Jump Measurements of the 5.56-mm M855 Cartridge*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, Aberdeen Proving Ground, mai 2011 ;
- [CHE 07] M. M. CHEN, *Design of Experiments Study of the Initial Extended Area Protection and Survivability (EAPS) Projectile System*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, mai 2007 ;
- [CHE 10] M. M. CHEN, *Projectile balloting attributable to gun tube curvature*, Journal Shock and Vibration, volume 17, pages 39 à 53, 2010 ;
- [COR 06] J. CORDES, S. MORRIS, R. GAST et D. CARLUCCI, *Muzzle Exit (Set Forward) Effects on Projectile Dynamics*, Armament Research, Development & Engineering Center, Picatinny Arsenal, New Jersey, avril 2006 ;

- [DAR 57] M. J.-G. DARPAS, *Efforts transversaux sur les projectiles animés d'un mouvement de rotation dans le canon*, Mémorial de l'Artillerie Française, Science et Techniques de l'Armement, Tome 31, 1er fascicule, pages 19 à 56, 1957 ;
- [ECH 11] N. ECHES, D. COSSON, Q. LAMBERT et A. LANGLET, *Modeling of the Dynamics of a 40 mm Gun and Ammunition System During Firing*, 26th International Symposium on Ballistics 2011, septembre 2011 ;
- [ECK 02] D. ECKENFELS, S. NEZIREVIC et M. SCHNEIDER, *Mesure de la vitesse d'un projectile dans le lanceur à rails « EMA3 » avec un radar Doppler*, ISL, juin 2002 ;
- [EIC 10] A. EICHHORN et G. ZETTLER, *Détection du mouvement de projectiles par interférométrie hyperfréquence*, ISL, juillet 2010 ;
- [GAL 11] P. GALEZ, *Structure et propriétés des matériaux : Polymères et composites, une courte introduction*, Mesures Physiques Annecy, IUT Annecy, 48 pages, 2011 ;
- [GAR 99] J. M. GARNER, B. J. GUIDOS, K. P. SOENCKSEN et D. W. WEBB, *Flat Fire Jump Performance of a 155-mm M198 Howitzer*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, septembre 1999 ;
- [GER 96] M. GERADIN et D. RIXEN, *Théorie des vibrations : application à la dynamique des structures*, Masson, page 279, 1996 ;
- [GRZ 12] D. M. GRZYBOWSKI, P. J. PEREGINO et B. S. DAVIS, *Development of a Telemetry-Enabled High-G Projectile Carrier*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, septembre 2012 ;
- [GUI 05] B. GUISNEUF, *Maîtrise des RTR Synthèse finale*, document CTAI, référence NT/DT/41/04/BG, avril 2005 ;
- [GUR 07] Y. GUR, I. AZULAY, D. TOUATI et M. ARAD, *Jump Error & Gun Dynamics: A Comparison Between Two Types of 120mm Smooth-Bore Tank Guns*, 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragone, Espagne, 16-20 avril 2007 ;
- [HAU 77] B. T. HAUG, *Optical Device for Determining Small Angular Motion*, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1977 ;
- [HOU 96] Y. HOU, C. TSEN et S.F. LING, *A new high-order non-uniform Timoshenko beam finite element on variable two-parameter foundations for vibration analysis*, Journal of Sound and Vibration, volume 191, pages 91 à 106, mars 1996 ;

- [LAM 08] Q. LAMBERT, A. LANGLET, J. RENARD et N. ECHES, *Dynamique en flexion de tubes parcourus à grandes vitesses*, Mécanique & Industries, Volume 9, pages 559 à 569, novembre 2008 ;
- [LAU 08] K. D. LAUGHLIN, *Characterization of the parameters that affect projectile balloting using finite element analysis*, University of Oklahoma, 145 pages, août 2008 ;
- [LEE 98] U. LEE, *Separation between the flexible structure and the moving mass sliding on it*, Journal of Sound and Vibration, volume 209, pages 867 à 877, février 1998 ;
- [LIE 14] M. LIENNARD, *Rapport d'avancement : Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse, influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur leur comportement au tir (biais, justesse, dispersion, obliquité)*, Nexter Systems, référence FASL3 82765713 Indice A, 2014 ;
- [LIE 14_02] M. LIENNARD, *Compte rendu de réunion : Réunion pour projet d'instrumentation*, Nexter Systems, mai 2014 ;
- [LOD 01] D. W. LODGE et A. M. DILKES, *Use of an Instrumented 120MM Projectile for Obtaining In-Bore Gun Dynamics Data*, Defense Evaluation and Research Agency, Surrey, England, avril 2001 ;
- [MON 83] R. S. MONTGOMERY, *Evidence for the melt-lubrication of projectile bands*, US Army Research and Development Center, Large Caliber Weapon Systems Laboratory, Benet Weapons Laboratory, septembre 1983 ;
- [MUL 06] P. C. MULLER, E. F. BUKOWSKI, G. L. KATULKA et P. PEREGINO, *Flight Test & Recovery of Gun Launched Instrumented Projectiles using High-G Board Recording Techniques*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, 13th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2006 ;
- [NEW 01] J. F. NEWILL, B. J. GUIDOS et C. D. LIVECCHIA, *Comparison Between the M256 120-MM Tank Cannon Jump Test Experiments and ARL's Gun Dynamics Simulation Codes for Prototype KE*, 10th U.S. Army Gun Dynamics Symposium Proceedings, 26 avril 2001 ;
- [NEW 02] J. F. NEWILL, J. M. GARNER et M. L. BUNDY, *Methodology for Determining Optimal Tank Cannon Barrel Centerline Shape*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, septembre 2002 ;
- [OTA 84] OTAN NON-SECRET, *NATO : Manuel des procédures d'inspection et d'essais pour munitions OTAN 25x137 mm*, Conseil de l'Atlantique Nord, 30 Novembre 1984 ;

- [OWE 11] J. S. OWENS, *Modeling & Simulation: Gun Launch Dynamics & Aeroballistic Analysis via Onboard Laser Diode*, ATK Advanced Weapons/WV, août 2011 ;
- [PES 01] A. PESTEREV, B. YANG, L. BERGMAN et C. TAN, *Response of elastic continuum carrying multiple moving oscillators*, Journal of Engineering Mechanics, volume 127, pages 260 à 265, mars 2001 ;
- [PIC 86] P. PICHOT, *Recherche bibliographique sur l'influence des interactions arme-montage sur la précision des armes de moyen calibre*, Rapport interne, EFAB (Etablissement de Fabrication d'Armement de Bourges), octobre 1986 ;
- [SAF 08] O. SAFONT, *Note de calcul : Dépouillement de tirs de l'arme de 25mm*, Nexter Systems, 2008 ;
- [SAF 11] O. SAFONT, *Méthodologie de dimensionnement de tubes en dynamique*, Mémoire de thèse avec l'Université d'Orléans et Nexter Systems, 2011 ;
- [SNE 71] G. W. SNEDECOR et W. G. COCHRAN, *Méthodes Statistiques*, traduit par H. BOELLE et E. CAMHAJI, Association de coordination technique agricole, sixième édition, pages 203 à 204, décembre 1971 ;
- [STA 98] NATO STANAG 4173, *EN-25mm x 137 Ammunition-ED 1 AMD 1*, septembre 1998 ;
- [STE 78] B. K. STEARNS et R. C. WALKER, *Measurement of Gun Barrel Motion With Optical Rackers*, Falcon Research and Development Company, 2nd US Army Symposium on Gun Dynamics, pages 1 à 17, septembre 1978 ;
- [TO 81] C. TO, *A linearly tapered beam finite element incorporating shear deformation and rotatory inertia for vibration analysis*, Journal of Sound and Vibration, volume 78, pages 475 à 484, octobre 1981 ;
- [TRA 85] TRARIEUX, *Méthode de dépouillement des tirs de précision*, EFAB, pages 3 à 6, septembre 1985 ;
- [ULB 15] Université Libre de Bruxelles, *Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson*, Statistique descriptive bivariable, [en ligne], disponible sur : http://tice.agrocampus-ouest.fr/pluginfile.php/21579/mod_resource/content/0/cours_Vermadele/ELST3_web_18jan_v2012/co/grain_3_2_3_c_Correlation_Bravais_Pearson.html, (page consultée le 24 mars 2015) ;

[WAL 74] E. H. WALKER, *Yawing and Balloting Motion of a Projectile in the Bore of a Gun with Application to Gun Tube Damage*, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, septembre 1974 ;

[WEG 84] V. WEGNER, *Système de télémessure pour la transmission de données à partir de projectiles pendant la phase d'accélération dans le tube du canon*, ISL, conférence européenne sur la télémétrie, mai 1984 ;

[WEG 87] V. WEGNER et L. KOCHER, *Mesure des accélérations à bord des projectiles lors du départ du coup*, ISL, 1987 ;

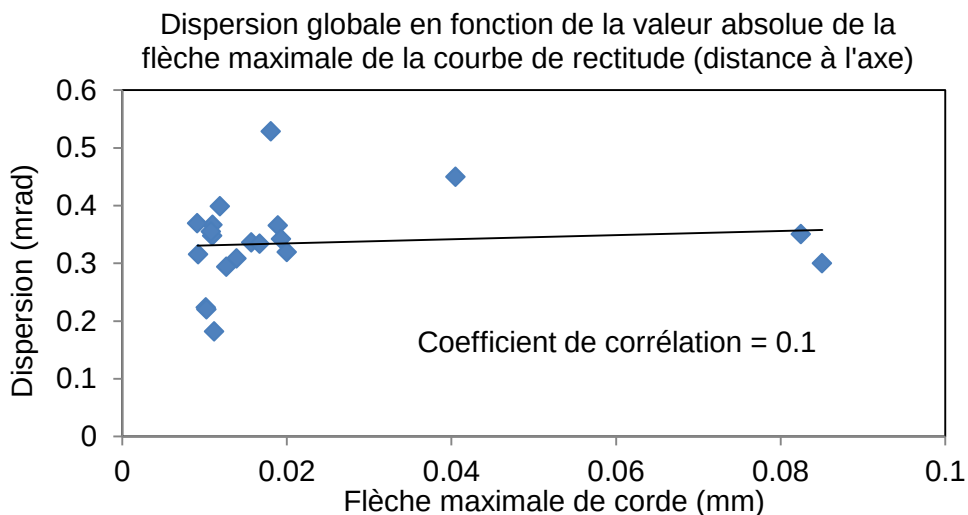
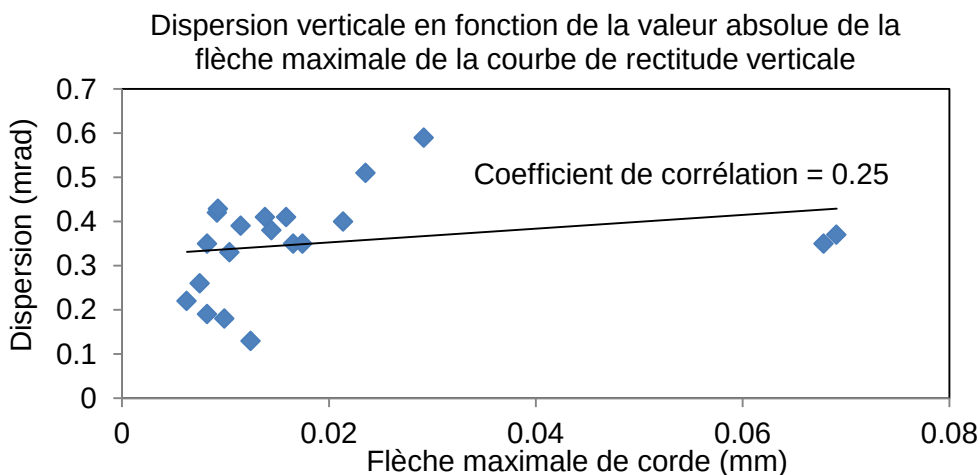
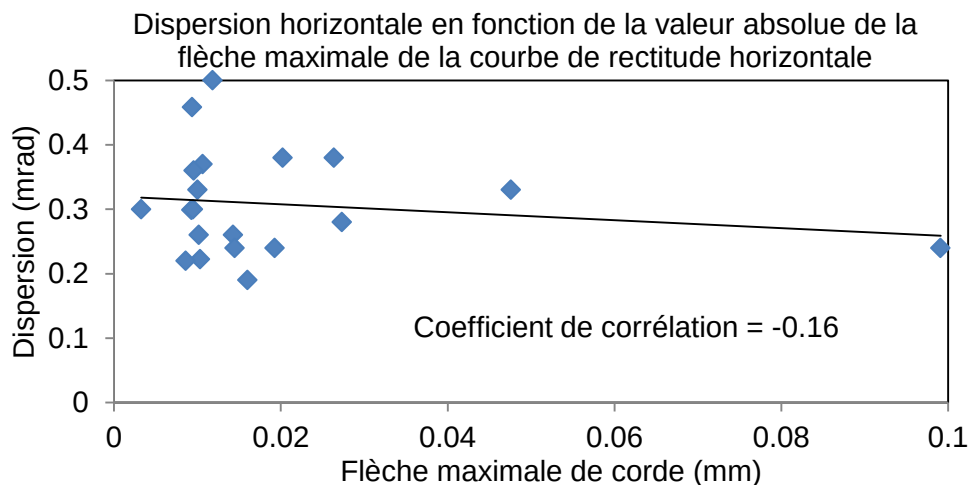
[WIL 04] M. J. WILSON, *Attitude determination with magnetometers for gun-launched munitions*, Weapons and Materials Research Directorate, ARL, Aberdeen Proving Ground, août 2004 ;

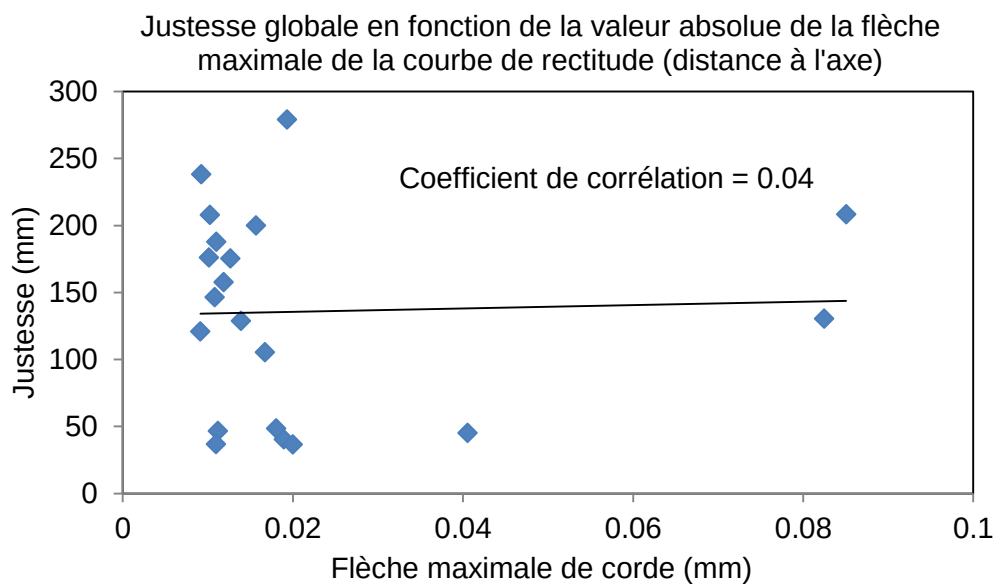
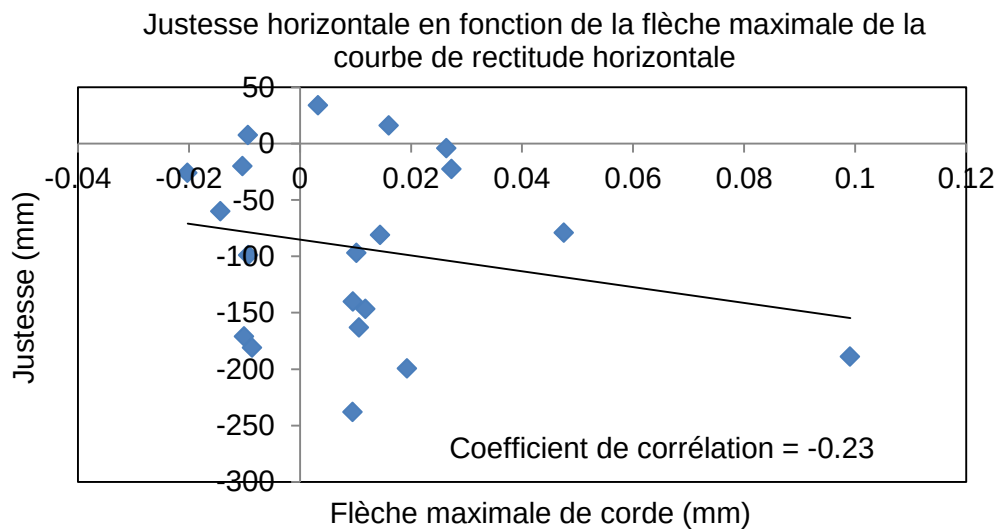
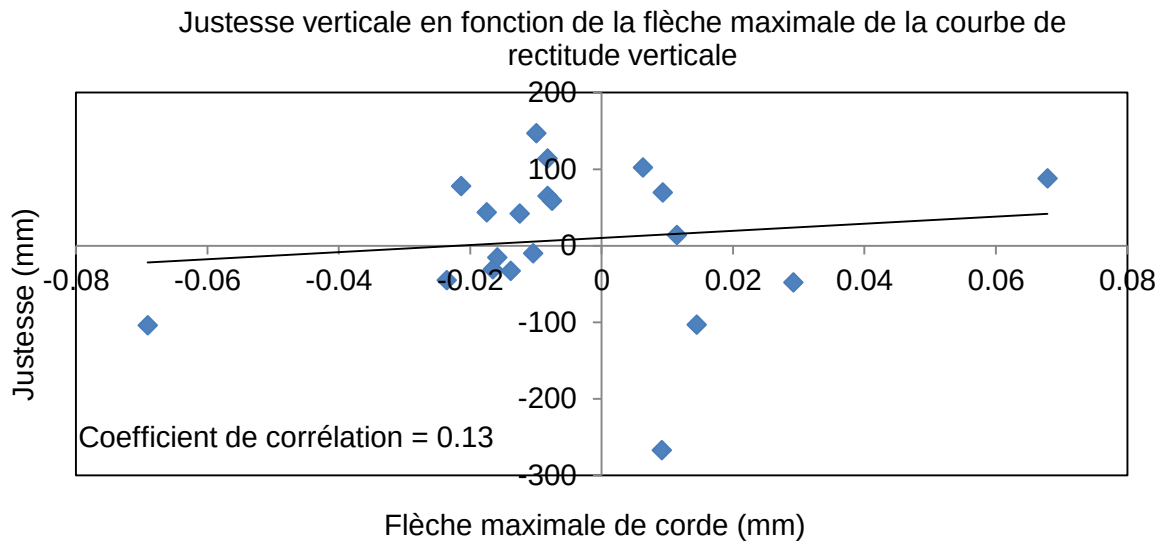
[ZU 10] J. ZU, T. MA, D. PEI, J. FAN et H. DU, *New concept dynamic test on ballistic parameters measurement*, 25th International Symposium On Ballistics, Beijing, China, mai 2010.

IX. Annexes

Annexe 1 : Graphiques comparant la flèche de corde aux résultats de tir d'OX

Chaque point des graphiques présentés ci-après correspond à un tube.

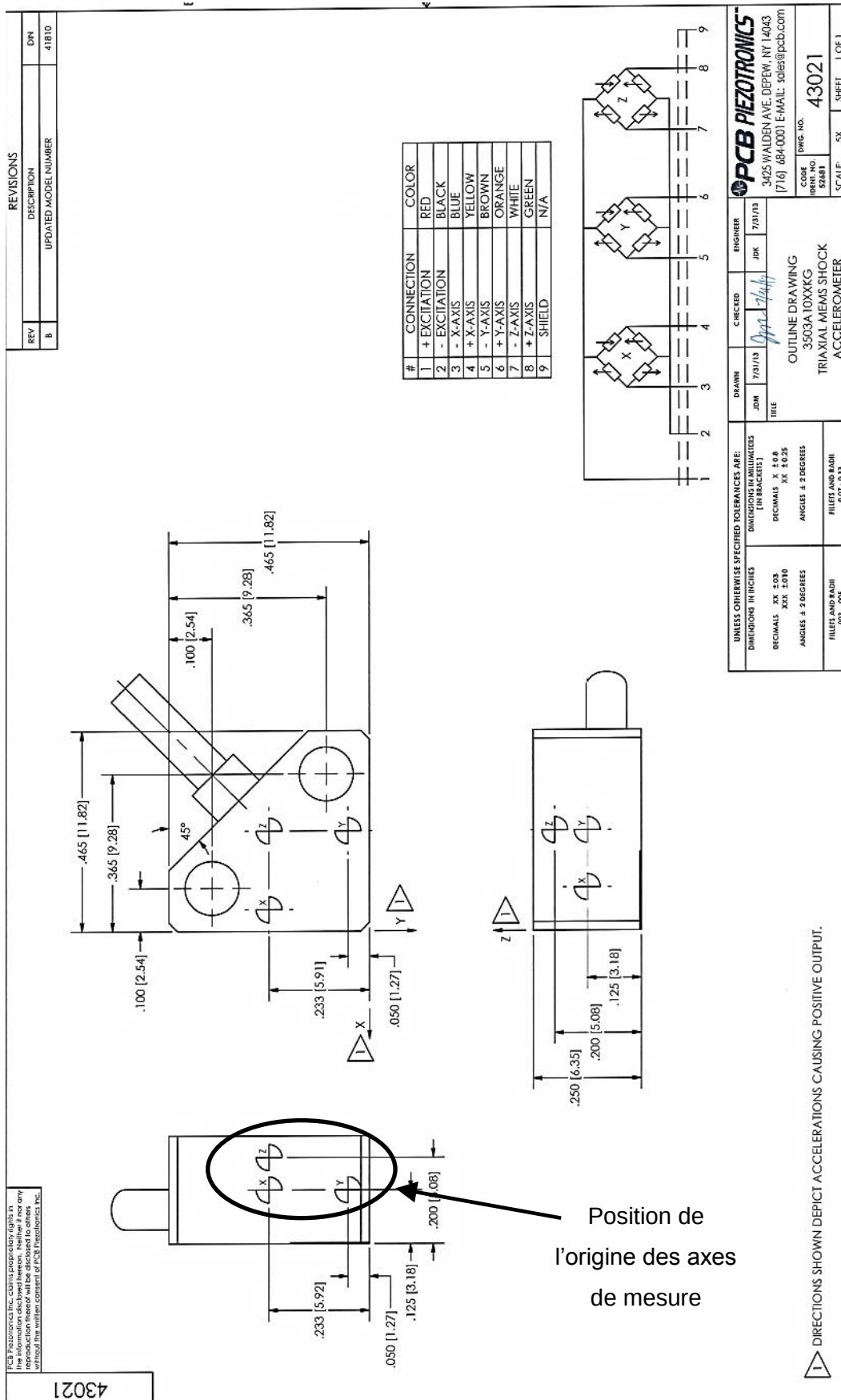




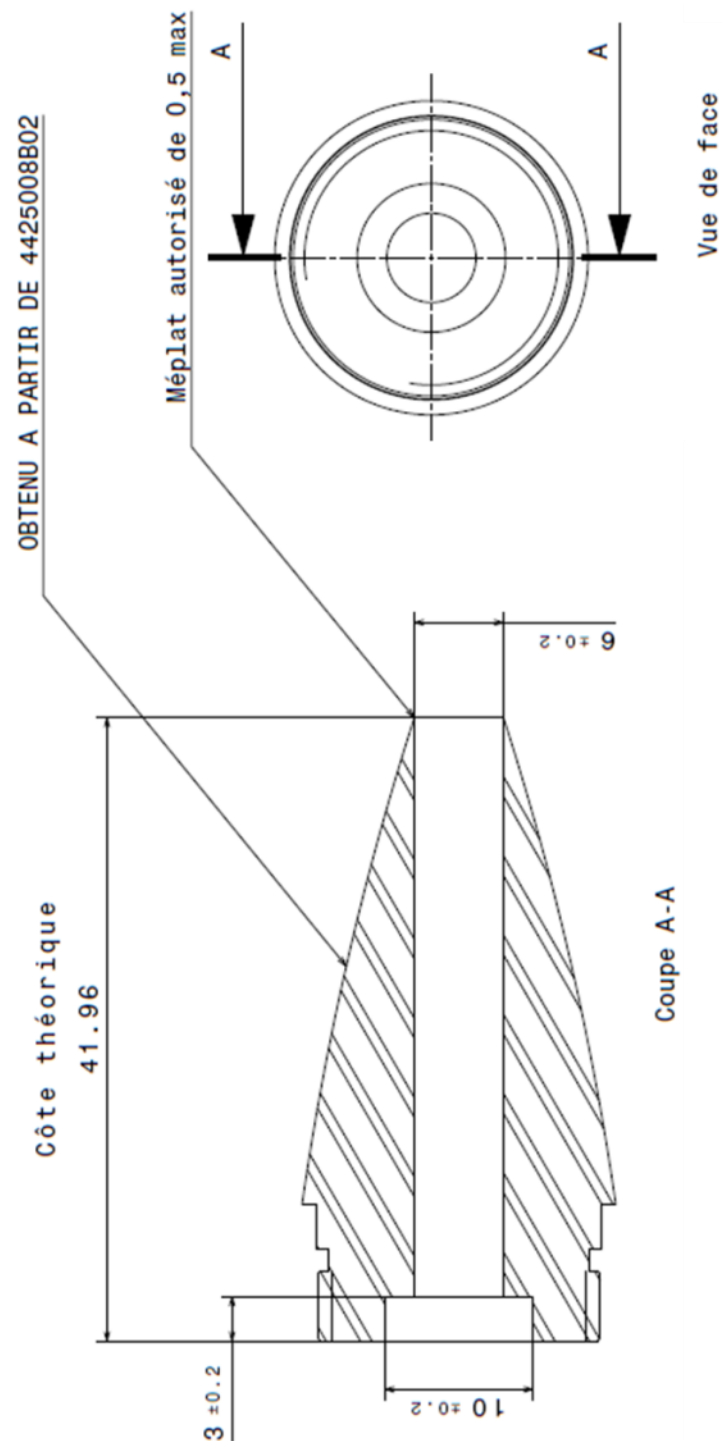
Annexe 2 : Tableau récapitulatif des différents matériels de mesure utilisés

	Mesure	Matériel	Marque	Modèle	Fréquence d'échantillonnage	Incertitude de mesure
Conditions imposées par le NATO	Vitesse de sortie de la munition	Barrières solénoïde qui mesurent le champ magnétique au passage de la munition (propriété Nexter Munitions)	-	-	500 kHz	±0,1 %
	Pression chambre	Capteur haute pression à quartz (propriété Nexter Munitions)	Kistler	6215	100 kHz	±0,7 %
Conditions particulières	Vision globale de la bouche du tube	Caméra rapide (propriété Nexter Munitions)	Photron	MC2	10 000 images/s	Mouvements parasites dus aux gaz de sortie de bouche faisant bouger le support de la caméra
	Instant de sortie du projectile	Capteur de bouche par variation du champ magnétique (propriété Nexter Munitions)	-	-	500 kHz	±5 %
	Accélérations de la munition	Accéléromètres piézo-électrique	PCB Piézotronics	3503A1060KG	20 ou 31 kHz	±15 %
	Déplacements de la bouche	Capteurs à Courant de Foucault	Kaman	26U	500 kHz	±5 %
	Gonflement du tube	Jauges de déformation	Vishay	EA-06-062AP-120W	1 MHz	±3 %
	Mesure de l'intensité lumineuse	Lentille de Fresnel (Propriété ATCOM Télémétrie)	-	-	1 MHz	Lumière ambiante pouvant gêner la perception du faisceau laser

Annexe 3 : Documentation des triaxes PCB

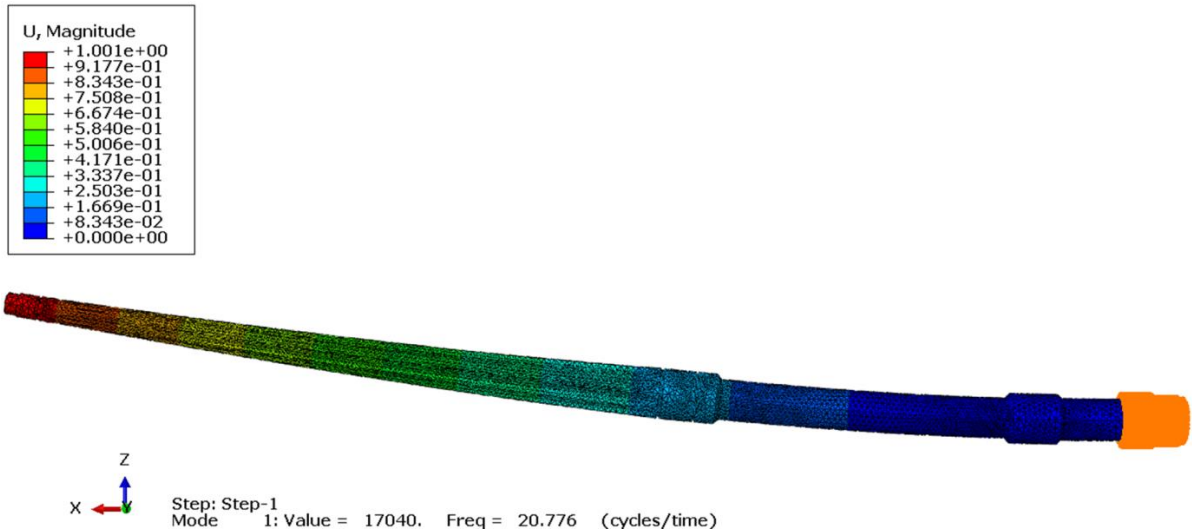


Annexe 5 : Plan de modification des fausses fusées d'OX pour instrumentation embarquée

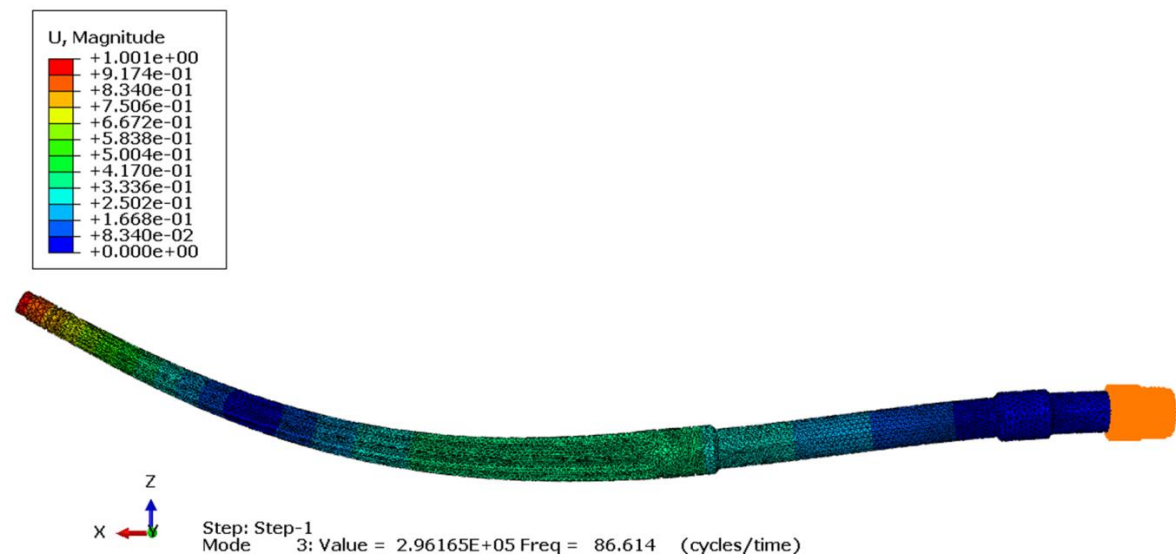


Annexe 6 : Modes propres du tube à géométrie réelle

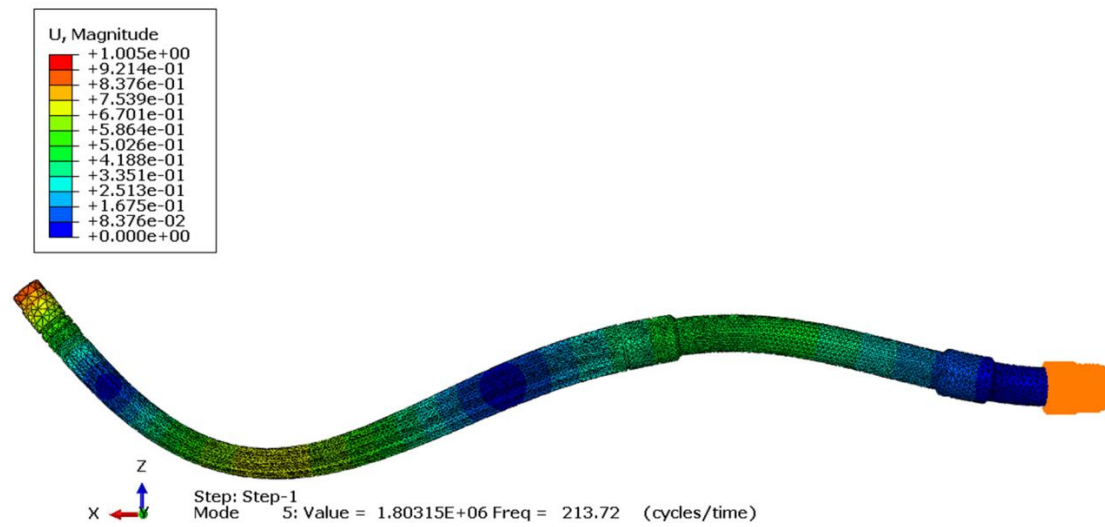
- Mode 1a :



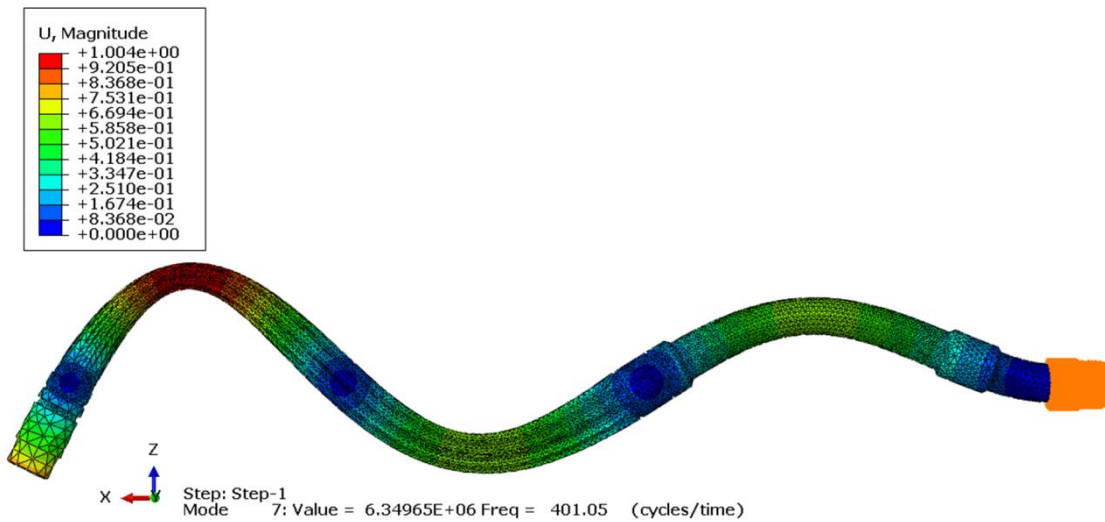
- Mode 2a :



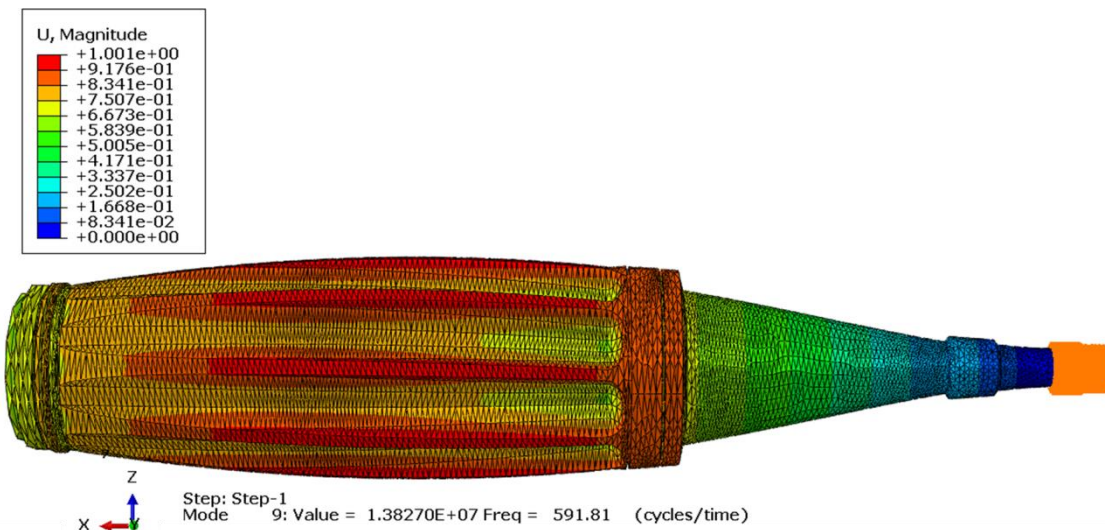
- **Mode 3a :**



- **Mode 4a :**

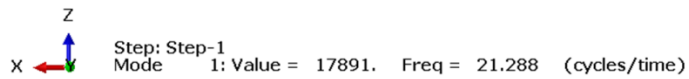
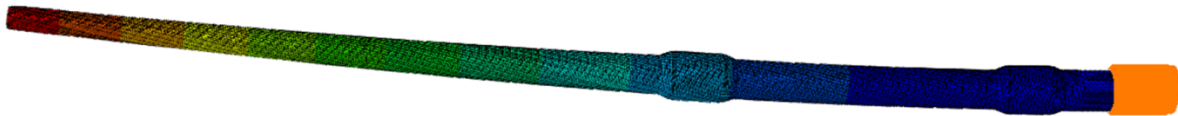
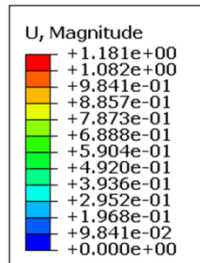


- **Mode 5 :**

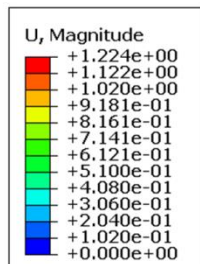


Annexe 7 : Modes propres du tube à géométrie simplifiée

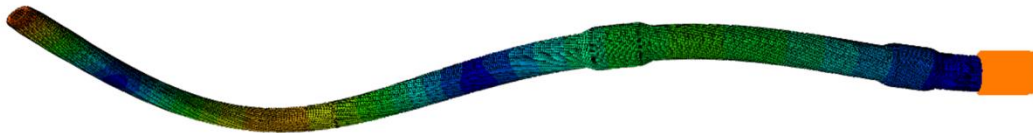
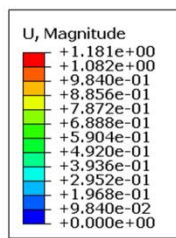
- Mode 1a :



- Mode 2a :

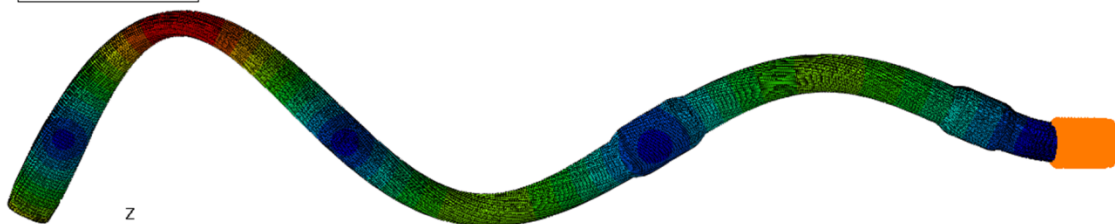
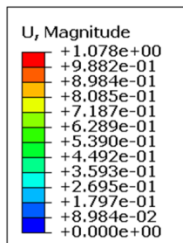


- **Mode 3a :**



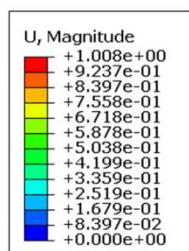
Step: Step-1
Mode 5: Value = 1.72759E+06 Freq = 209.19 (cycles/time)

- **Mode 4a :**



Step: Step-1
Mode 7: Value = 6.12904E+06 Freq = 394.02 (cycles/time)

- **Mode 5 :**



Step: Step-1
Mode 9: Value = 1.56533E+07 Freq = 629.68 (cycles/time)

Mathilda LIENNARD

Dynamique des tubes parcourus à grande vitesse, Influence de la géométrie des tubes et leur environnement sur la justesse et la dispersion

Résumé : La précision de tir d'une arme dépend de nombreux facteurs intervenant aux différentes étapes du parcours de la munition (balistique intérieure, intermédiaire et extérieure). Certains travaux ont démontré l'importance de l'influence de la phase de balistique intérieure, pendant laquelle la munition traverse le tube, sur les résultats à la cible. En effet, c'est cette phase qui détermine les conditions de sortie du tube de la munition et par conséquent son comportement au cours du vol. Les conditions d'entrée du projectile, la géométrie du tube et de l'arme, et les mouvements de ces derniers au cours du tir, sont autant de paramètres pouvant modifier l'interaction tube/projectile et ainsi entraîner un changement des vitesses angulaires et de translation de la munition au moment du largage.

Cette étude a donc pour but de mettre en exergue les paramètres géométriques de l'arme et du tube qui influencent la justesse et la dispersion. Une analyse statistique a été réalisée à partir de la base de données des résultats de tir du 25 mm. Elle a permis de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres dont la rectitude du tube. Par la suite, des essais ont été conduits en appareil de tir dans le but d'isoler la part de la géométrie du tube sur les écarts à la cible et ainsi de confirmer la contribution de la rectitude. Un modèle numérique tridimensionnel a été développé afin de faire varier ce paramètre et d'étudier son influence sur le comportement de la munition en phase de balistique intérieure. La représentativité du modèle a été vérifiée à l'aide d'accéléromètres embarqués dans la munition. Ces tirs ont nécessité le développement d'une solution innovante optoélectronique afin de transmettre les accélérations en temps réel. Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de constater que les accélérations de la munition modélisée étaient représentatives. Le modèle permet maintenant de réaliser des études paramétriques et de déterminer les profils de tube les plus pénalisants pour la précision de tir.

Mots clés : Tube d'arme, précision de tir, balistique intérieure, rectitude, modélisation numérique 3D, interaction tube/projectile.

Dynamic of tubes crossed by high speed projectiles, Influence of tube and weapon geometry on accuracy and dispersion

Summary : Gun accuracy is influenced by several factors during the stages of the ammunition course (internal, intermediate and external ballistics). According to previous studies, internal ballistics are the major contributor to deviations from target. Indeed, this phase determines projectile exit conditions and, consequently, its behavior during the flight. The projectile entry conditions, the weapon and barrel geometry and their movements during firing, can modify the interaction tube / projectile and change ammunition angular rates and its transversal velocities.

The purpose of this thesis is to determine the parameters related to barrel and gun geometry, which influence the bias and the dispersion. A statistical analysis was led thanks to the data base of the 25 mm firing results. It was found that some parameters, including barrel straightness, affect accuracy. Subsequently, tests were conducted with a firing appliance in order to isolate the barrel geometry influence on the deviations from the target and to confirm the straightness impact. A tridimensional numerical model was created in order to vary this parameter and to study its influence on the ammunition behavior during internal ballistics. The representativeness of the model was validated using accelerometers embedded in the ammunitions. The firing of these ammunitions has required the development of an optoelectronic system to transmit accelerations in real time. The comparison between experimental and numerical results has shown close amplitudes and similar shapes curves that proves the representativeness of the model. The model can be used now to lead parametric analysis and to determine the straightness shapes the most penalizing for gun accuracy.

Keywords : Gun Barrel, gun accuracy, internal ballistics, straightness, tridimensional numerical analysis, projectile/tube interaction.

