



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

Year : 2011

Etude sur la valeur indicielle des traces présentes sur les douilles

Riva Fabiano

Riva Fabiano, 2011, Etude sur la valeur indicielle des traces présentes sur les douilles

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive.
<http://serval.unil.ch>

Droits d'auteur

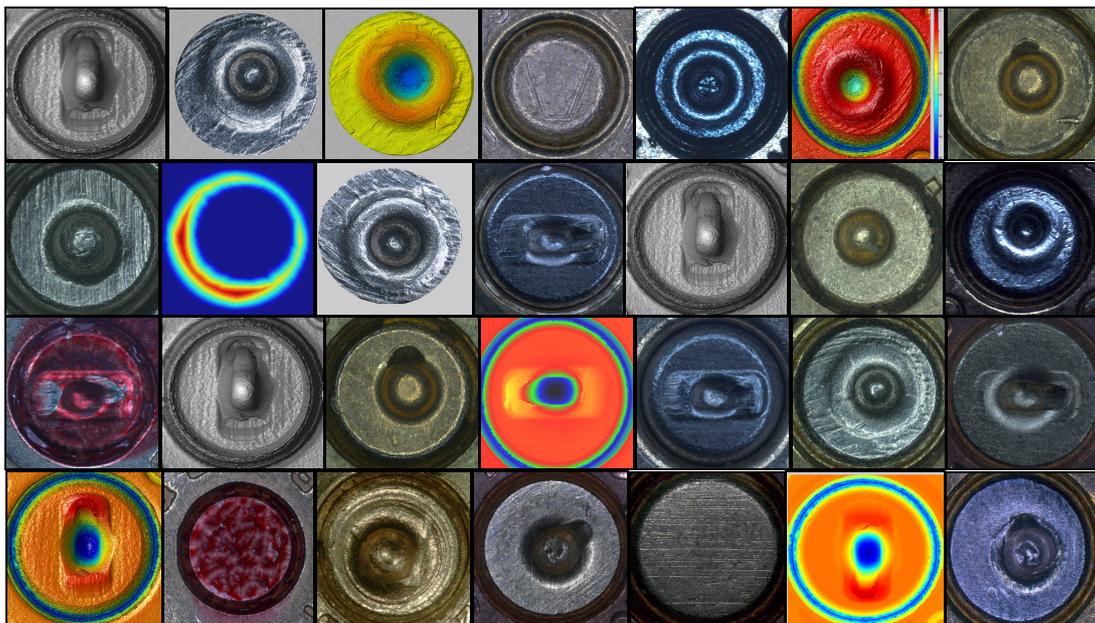
L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

Copyright

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.

Etude sur la valeur indicielle des traces présentes sur les douilles

Thèse de doctorat



Fabiano Riva

Institut de Police Scientifique
Ecole des Sciences Criminelles
Université de Lausanne

Lausanne 2011

IMPRIMATUR

A l'issue de la soutenance de thèse, le Jury autorise l'impression de la thèse de
M. Fabiano Riva, candidat au doctorat en sciences forensiques, intitulée

« Etude sur la valeur indicielle des traces présentes sur les douilles »

Le Président du Jury



Professeur Pierre Margot

Lausanne, le 18 mars 2011

*Alla mia famiglia e i miei amici...la colonna
portante di questo lavoro.*

*Ogni giorno é un ricominciare.
Ma ogni alba é una cosa meravigliosa.
Il giorno si riconosce dall'alba.*

E.R.

REMERCIEMENTS

Ce document commence, selon la tradition, par la partie la plus importante, à savoir, les remerciements ; une pensée dirigée aux personnes qui ont contribué à la création de ce travail. Un énorme merci est destiné à toutes les personnes qui m'ont aidé, soutenu et supporté avec patience.

Prof. Pierre Margot, Directeur de l'Ecole des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne président du Jury, pour sa confiance et sa simple présence pendant mon séjour à l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne (IPS).

Prof. Christophe Champod, Directeur de l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne qui a dirigé cette thèse, pour son soutien précieux et constant pendant les six ans partagés dans cette aventure. Ce travail n'aurait pas vu la lumière du jour sans sa motivation et son enthousiasme.

Prof. Franco Taroni de l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne, Prof. Charles Baur, Directeur du VRAI groupe de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Dr. Jan De Kinder, Directeur de l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de Bruxelles, Dr. Monica Bonfanti, Cheffe de la Police Cantonale Genevoise, membres du Jury, pour leur sympathie, leur aide et leur disponibilité.

Les amis du groupe Armes à Feu de IPS: Dr. Alain Gallusser, Đurđica Hazard, Matthieu Gardon, Anne-Laure Perrier et Jean-Michel Carrier.

Jean-Michel Carrier ami et collègue, pour avoir partagé avec moi des années importantes de ma carrière ainsi que pour avoir mis à disposition une grande partie de l'échantillonnage utilisé dans cette recherche.

Les amis et collègues du Nederlands Forensisch Instituut (NFI), pour m'avoir aidé pendant cette recherche ainsi que pour m'avoir guidé dans ma carrière dans le domaine des armes à feu, dans le passé et dans le futur.

Dr. Gaëtan Marti, pour m'avoir guidé dans mes choix algorithmiques en me laissant toujours une grande liberté dans mes choix.

Anne Marville et Eric Sapin, pour leur aide tout le long de mon séjour à l'IPS.

Dr. Lorenzo Lanzi, Luc Besson, Damien Dessimoz, Marcela Espinoza et Dr. Raymond Marquis, pour leur grande patience et support.

Toutes les personnes qui ont apporté leur aide dans la correction du manuscrit.

Tous mes amis, quelque soit le canton ou la région d'où ils viennent, pour leur contribution à mon bonheur pendant cette recherche.

Ma famille : Marilù, Ely, Francesco et Marie, pour des raisons simples mais d'une importance incalculable.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	14
1.1	Contexte de la recherche.....	14
1.2	Objectifs de la recherche.....	15
1.3	Plan de la recherche	16
2	FONDEMENTS DE LA RECHERCHE.....	18
2.1	Traces glissées et moulées	18
2.2	Caractéristiques de classe, de sous – classe et individuelles.....	19
2.2.1	<i>Caractéristiques individuelles et unicité</i>	<i>20</i>
2.3	Techniques de comparaison	20
2.3.1	<i>Technique traditionnelle – Le microscope comparateur.....</i>	<i>21</i>
2.3.2	<i>Technique assistée par ordinateur – Systèmes de comparaison automatique.....</i>	<i>22</i>
2.4	Du processus de comparaison à la phase interprétative	22
2.4.1	<i>La théorie de l'identification et l'échelle verbale proposées par l'AFTE.....</i>	<i>23</i>
2.4.2	<i>L'approche traditionnelle – Pattern matching.....</i>	<i>24</i>
2.4.3	<i>L'approche quantitative</i>	<i>24</i>
2.4.4	<i>Autres approches – Les courants en Europe.....</i>	<i>27</i>
2.5	Les prémisses de l'identification des armes à feu	27
2.5.1	<i>La spécificité des traces</i>	<i>27</i>
2.5.2	<i>La reproductibilité des traces.....</i>	<i>29</i>
2.5.3	<i>Restrictions.....</i>	<i>30</i>
2.6	Problématiques liées à l'identification dans le domaine des armes à feu	30
2.6.1	<i>Contexte légal.....</i>	<i>31</i>
2.6.2	<i>Manque de bases statistiques stables</i>	<i>33</i>
2.6.3	<i>Manque d'objectivité et de protocoles spécifiques.....</i>	<i>34</i>
2.6.4	<i>Considérations finales.....</i>	<i>34</i>
2.7	Cadre de la recherche.....	35
2.8	Résumé du chapitre	35
3	TRACES SUR LES DOUILLES	36
3.1	Fonctionnement d'une arme	36
3.1.1	<i>Armes avec système d'éjection.....</i>	<i>36</i>
3.1.2	<i>Armes sans système d'éjection</i>	<i>38</i>
3.2	Structure et composition d'une cartouche	38
3.2.1	<i>La douille et l'amorce</i>	<i>39</i>
3.3	Traces laissées par une arme sur une douille.....	42
3.3.1	<i>Traces antécédentes au tir.....</i>	<i>43</i>
3.3.2	<i>Traces laissées par l'arme</i>	<i>45</i>
3.3.3	<i>Les caractéristiques de classe</i>	<i>54</i>
3.3.4	<i>Traces postérieures au tir</i>	<i>54</i>
3.3.5	<i>Considérations finales.....</i>	<i>54</i>
3.4	Résumé du chapitre	55
4	FABRICATION DES PARTIES CONSTITUTIVES D'UNE ARME ET LA VALEUR INDICIELLE RÉSULTANTE	56
4.1	Fabrication des pièces constitutives d'une arme – Extrait de la littérature	56
4.1.1	<i>Généralités</i>	<i>56</i>
4.1.2	<i>La tête de culasse</i>	<i>57</i>
4.1.3	<i>Le percuteur</i>	<i>59</i>
4.1.4	<i>L'extracteur.....</i>	<i>60</i>
4.1.5	<i>La chambre à cartouche.....</i>	<i>61</i>
4.1.6	<i>L'éjecteur</i>	<i>61</i>
4.2	Fabrication du Walther P99 calibre 9 mm Parabellum	61
4.3	Assemblage des pièces.....	63
4.4	Considérations sur la valeur indicielle des traces sur les douilles	64

4.4.1	Valeur indicielle des traces	64
4.4.2	La reproductibilité des traces – Sources de variabilité.....	67
4.4.3	L'évolution des traces – Effet de stabilisation	67
4.4.4	Autres facteurs influençant le processus d'identification.....	68
4.4.5	Contremesures prises par les criminels	68
4.5	Résumé du chapitre	68
5	L'APPROCHE QUANTITATIVE	69
5.1	Description d'une comparaison	69
5.2	Systèmes de comparaison automatique	71
5.2.1	Acquisition des données	71
5.2.2	Comparaison de l'information acquise.....	71
5.3	Evaluation des techniques d'acquisition 2D et 3D	77
5.3.1	Acquisition 2D.....	77
5.3.2	Acquisition 3D.....	77
5.4	Solution retenue	79
5.5	Résumé du chapitre	79
6	ACQUISITION DES DONNÉES	80
6.1	Traces prises en considération.....	80
6.2	Performances exigées.....	80
6.3	Visualisation des images 3D	82
6.3.1	Les pseudo-couleurs.....	82
6.3.2	L'effet lumière	83
6.3.3	Visualisation dans l'espace.....	83
6.3.4	Le profil bidimensionnel.....	84
6.3.5	Le nuage de points	84
6.3.6	Les images avec texture.....	85
6.3.7	Les logiciels de gestion d'images 3D.....	85
6.4	Tests effectués.....	86
6.4.1	Techniques avec contact.....	86
6.4.2	Techniques sans contact.....	86
6.5	Choix effectuée	93
6.6	µScan®	94
6.6.1	Mesure d'un échantillon.....	94
6.6.2	Exactitude des mesures	94
6.6.3	Reproductibilité des mesures.....	96
6.6.4	Résolution latérale	97
6.6.5	Statif.....	98
6.6.6	Mesures multiples – NF Automation.....	99
6.7	Résumé du chapitre	99
7	COMPARAISON ASSISTÉE PAR ORDINATEUR.....	100
7.1	Concepts mathématiques de base.....	100
7.1.1	Images 2D.....	100
7.1.2	Topographies 3D.....	104
7.2	Comparaison de structures 3D – Principes de base.....	106
7.2.1	Descripteur de forme.....	106
7.2.2	Alignement rigide de structures 3D.....	107
7.3	Structure de l'algorithme.....	108
7.4	Traitements préliminaires	109
7.4.1	Etapes en relation avec l'acquisition des données.....	110
7.4.2	Etapes qui précèdent l'alignement	112
7.5	Traitements préliminaires – Choix retenus et discussion	127
7.5.1	Etapes en relation avec l'acquisition des données.....	127
7.5.2	Etapes qui précèdent l'alignement	128
7.6	Alignement.....	133
7.6.1	Pré-alignement.....	134
7.6.2	Alignement final	135
7.6.3	ICP – Iterative Closest Point	136
7.6.4	Alignement – Problème d'optimisation.....	140

7.6.5	<i>Qualité de l'alignement</i>	143
7.7	Pré-alignement – Choix retenu et discussion	144
7.8	Alignement – Choix retenu et discussion	145
7.9	L'influence de la pose initiale sur la qualité de l'alignement	147
7.10	Erreur métrique	148
7.10.1	<i>Distance Euclidienne</i>	148
7.10.2	<i>Distance Euclidienne Modifiée</i>	149
7.10.3	<i>Coefficient de Corrélation</i>	149
7.10.4	<i>Vecteurs normaux – Angle entre deux vecteurs</i>	149
7.11	Mise en évidence des traces	150
7.12	Interfaces graphiques – GUI	153
7.13	Comparaisons multiples	153
7.14	Rapport qualité – temps	154
7.15	Résumé du chapitre	154
8	METHODES D'ÉVALUATION DES RÉSULTATS	155
8.1	Le rapport de vraisemblance dans le domaine des armes à feu	155
8.1.1	<i>Evaluation du rapport de vraisemblance</i>	158
8.1.2	<i>Signification du rapport de vraisemblance</i>	159
8.1.3	<i>L'importance de la population potentielle</i>	159
8.2	Quantification à l'aide d'un système de comparaison automatique	161
8.3	Calcul du rapport de vraisemblance dans le cas multidimensionnel	163
8.3.1	<i>Choix des scores pertinents</i>	163
8.3.2	<i>Réduction des dimensions</i>	164
8.3.3	<i>Elimination des points aberrants</i>	166
8.3.4	<i>Modélisation non paramétrique - Kernel Density Estimation (KDE)</i>	167
8.3.5	<i>Modélisations paramétriques</i>	168
8.3.6	<i>Calcul du rapport de vraisemblance dans le cas bivarié</i>	170
8.4	Evaluation de la technique par le biais du Tippett plot	171
8.5	Choix du type de modélisation	173
8.6	Test de normalité – Le test de Mardia	174
8.7	Fusion des données	174
8.8	Résumé du chapitre	176
9	ECHANTILLONNAGE ET MARCHE À SUIVRE	177
9.1	Les populations potentielles	177
9.2	Choix de la population potentielle	177
9.2.1	<i>Population globale des armes</i>	178
9.2.2	<i>Armes ayant le même calibre</i>	178
9.2.3	<i>Armes ayant les mêmes caractéristiques de classe</i>	178
9.2.4	<i>Armes du même modèle</i>	179
9.2.5	<i>Armes construites consécutivement</i>	179
9.3	Munitions employées	180
9.4	Détails de l'échantillonnage	180
9.4.1	<i>Généralisation de l'intravariabilité</i>	183
9.4.2	<i>Diversité des échantillonnages</i>	184
9.5	Plan de travail	184
9.5.1	<i>Intravariabilité et intervariabilité totales</i>	185
9.5.2	<i>Simulation de cas forensiques</i>	186
9.5.3	<i>Influence du type de munition</i>	189
9.5.4	<i>Simulation de cas d'un point de vue opérationnel</i>	189
9.6	Résumé du chapitre	190
10	RÉSULTATS	191
10.1	Choix des métriques	191
10.2	La trace du percuteur	192
10.2.1	<i>Armes SIG Sauer</i>	192
10.2.2	<i>Armes Ceska Zbrojovka (CZ)</i>	193
10.2.3	<i>Armes de type PPK</i>	197
10.2.4	<i>Résumé des résultats relatifs à la trace du percuteur</i>	199
10.3	La trace de la tête de culasse	200

10.3.1	Armes SIG Sauer	200
10.3.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ)	202
10.3.3	Armes de type PPK.....	204
10.3.4	Résumé des résultats relatifs à la trace de la tête de culasse	207
10.4	Fusion des deux traces.....	207
10.4.1	Armes SIG Sauer	207
10.4.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ)	210
10.4.3	Armes de type PPK.....	211
10.4.4	Etude détaillée du numérateur et du dénominateur.....	213
10.4.5	Résumé des résultats relatifs à la fusion des traces.....	216
10.5	Simulation de cas forensiques.....	216
10.5.1	Armes SIG Sauer	216
10.5.2	Armes Ceska Zbrojovka.....	218
10.5.3	Armes de type PPK.....	219
10.6	Influence du type de munition.....	221
10.6.1	Armes de type SIG Sauer.....	221
10.6.2	Armes de type Ceska Zbrojovka.....	222
10.6.3	Armes de type PPK.....	222
10.7	Généralisation de l'intravariabilité	223
10.8	Simulation de cas d'un point de vue opérationnel	227
10.9	Valeurs aberrantes – Les outliers	229
10.10	Normalité des distributions.....	229
11	DISCUSSION.....	230
11.1	Saisie tridimensionnelle de surface.....	230
11.1.1	Technologie 3D	230
11.1.2	Profilomètre à détection confocale.....	231
11.2	Algorithmes de comparaison	232
11.2.1	Traitements préliminaires	232
11.2.2	Le pré-alignement.....	233
11.2.3	Alignement – ICP (Iterative Closest Point).....	233
11.2.4	Alignement – Algorithme d'optimisation.....	234
11.2.5	Correction des alignements.....	234
11.2.6	Métriques.....	235
11.2.7	Vitesse de calcul.....	235
11.3	Le rapport de vraisemblance.....	236
11.3.1	L'analyse en composantes principales (PCA).....	237
11.3.2	Modélisation des données.....	237
11.3.3	L'influence des paramètres de lissage sur les résultats.....	238
11.3.4	L'étendue des rapports de vraisemblance	238
11.4	Résultats obtenus.....	239
11.4.1	La trace du percuteur	239
11.4.2	La trace de la tête de culasse.....	239
11.4.3	La fusion des traces.....	240
11.4.4	L'effet de la munition.....	241
11.4.5	Simulation de cas forensiques	241
11.4.6	Généralisation de l'intravariabilité.....	242
11.4.7	Généralisation de l'intervariabilité.....	244
11.5	Considérations finales sur la technique de comparaison	245
11.6	Applicabilité de cette procédure	246
11.6.1	Limitations liées à la qualité des traces	246
11.6.2	Limitations liées à l'insuffisance de données à disposition.....	247
11.6.3	Applications concrètes dans l'optique d'une présentation au tribunal	247
11.7	Inscription de cette recherche dans le cadre des critiques soulevées récemment	252
11.8	Perspectives.....	253
11.8.1	Polyvalence de la technique	254
11.8.2	Soumission de la technique à des cas plus difficiles.....	254
12	CONCLUSION.....	255
13	BIBLIOGRAPHIE	257

A.	ANNEXE – SYSTEMES D’ACQUISITION.....	265
A.1	Acquisition de l’information en 2D.....	265
A.1.1	Le capteur.....	265
A.1.2	Le système optique.....	266
A.1.3	L’éclairage.....	266
A.2	Acquisition de l’information en 3D.....	268
A.2.1	Saisie tridimensionnelle de surface.....	268
A.2.2	Systèmes d’acquisition.....	269
A.2.3	Techniques avec contact.....	270
A.2.4	Techniques non contact.....	270
B.	ANNEXE – RESULTATS.....	275
B.1	La trace du percuteur.....	275
B.1.1	Armes SIG Sauer.....	275
B.1.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ).....	277
B.1.3	Armes de type PPK.....	279
B.1.4	Résumé des résultats relatifs à la trace du percuteur.....	280
B.2	La trace de la tête de culasse.....	281
B.2.1	Armes SIG Sauer.....	281
B.2.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ).....	283
B.2.3	Armes de type PPK.....	285
B.2.4	Résumé des résultats relatifs à la trace de la tête de culasse.....	286
B.3	Fusion des deux traces.....	287
B.3.1	Armes SIG Sauer.....	287
B.3.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ).....	289
B.3.3	Armes de type PPK.....	291
B.3.4	Résumé des résultats relatifs à la fusion des traces.....	292
B.4	Influence du type de munition.....	292
B.4.1	Armes SIG Sauer.....	293
B.4.2	Armes Ceska Zbrojovka.....	293
B.4.3	Armes de type PPK.....	293
B.5	Généralisation de l’intravariabilité.....	294
B.5.1	Armes Ceska Zbrojovka.....	294
B.5.2	Armes de type PPK.....	296
B.6	Simulation de cas d’un point de vue opérationnel.....	297
C.	ANNEXE – ARMES EMPLOYEES.....	299
C.1	Armes SIG Sauer.....	299
C.1.1	Intravariabilité première arme.....	299
C.1.2	Intravariabilité deuxième arme.....	299
C.1.3	Intervariabilité.....	300
C.2	Armes Ceska Zbrojovka (CZ).....	301
C.2.1	Intravariabilité première arme.....	301
C.2.2	Intravariabilité deuxième arme.....	301
C.2.3	Intervariabilité.....	301
C.3	Armes de type PPK.....	302
C.3.1	Intravariabilité première arme.....	302
C.3.2	Intravariabilité deuxième arme.....	302
C.3.3	Intervariabilité.....	303
D.	ANNEXE – CERTIFICAT DE CALIBRATION.....	304

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de la recherche

L'investigation des armes à feu est une branche faisant partie des sciences forensiques. Même s'il s'agit d'un sous-ensemble des sciences forensiques, le domaine des armes à feu reste très vaste, nécessitant des connaissances variées et étendues. Les affaires criminelles impliquant des armes à feu peuvent concerner diverses branches en même temps, parmi lesquelles les plus importantes sont la balistique, l'analyse des résidus de poudre provenant d'un tir et l'identification d'une arme à partir d'un ou plusieurs éléments de munition tirés. C'est notamment cette dernière branche qui est étudiée dans le cadre de cette recherche.

L'identification d'une arme à feu peut être définie comme le processus employé pour mettre en relation un élément de munition, tel qu'un projectile ou une douille, à l'arme qui l'a tiré, sur la base des traces transmises par l'arme à la cartouche. Ce procédé implique, non seulement la recherche de similitudes entre un élément de munition indiciaire et un d'origine connue, mais également l'évaluation de ces similitudes, si elles existent. Cette dernière étape demeure la plus importante et nécessite une expérience solide. Dans le domaine, il est admis que l'interprétation des résultats reste une étape subjective manquant de lignes directrices [AFTE, 1992 et NRC, 2009, chapitre 5, page 21].

Bien que juridiquement les expertises dans le domaine de l'identification d'armes soient généralement acceptées, les débats engendrés par les problèmes liés à l'admissibilité des témoignages dans les tribunaux nord américains se sont attaqués aux lois fondamentales de ce domaine, c'est-à-dire, à la possibilité d'identifier une arme comme source d'un élément de munition, tel qu'une douille ou un projectile tirés. Les discussions portent principalement sur l'individualité des traces laissées par les armes ainsi que sur leur caractère évolutif. L'insuffisance de recherches empiriques, nécessaire pour bâtir des fondements stables en termes statistiques, implique la remise en question de l'admissibilité des expertises au sein des tribunaux nord américains [Schwartz, 2005]. Plus récemment, la publication du *National Research Council* (NRC) a ravivé les débats. La subjectivité omniprésente dans le processus d'identification a également soulevé plusieurs critiques. Le manque d'objectivité qui entre en jeu pendant l'interprétation des résultats d'une expertise est mis en avant. En effet, les conclusions peuvent être différentes d'un expert à l'autre pour les mêmes observations effectuées [NRC, 2009, chapitre 5, page 20]. C'est majoritairement l'expérience qui influence donc les résultats. La quantité de publications qui sont venues alimenter les débats dans les dernières années témoignent l'importance et l'actualité du sujet ainsi que la nécessité de mettre en place des projets de recherche solides afin de contrer aux critiques soulevées et de rendre le processus d'identification plus objectif et plus fiable.

Dans le cadre européen et plus particulièrement en Suisse, les critiques soulevées aux Etats-Unis ne sont pas autant d'actualité et l'admissibilité des témoignages dans le cadre d'expertises en armes à feu est admise sans réserve. Malgré cela, les critiques portées à ce domaine ne sont pas complètement infondées et méritent de faire objet de discussion.

1.2 Objectifs de la recherche

En vue des critiques récemment portées au domaine de l'identification des armes à feu, ce travail de recherche vise à répondre aux principaux points soulevés par le NRC [NRC, 2009, chapitre 5, pages 20 – 21] :

- Le manque de fondements nécessaires pour évaluer la valeur statistique d'une concordance.
- L'omniprésent manque d'objectivité qui règne dans le domaine de l'identification.
- Le manque de recherches empiriques permettant de bâtir des bases suffisamment stables pour permettre de résoudre les problématiques ci-dessus.

Les objectifs de la recherche peuvent donc se résumer de la manière suivante :

- Mettre au point une technique pouvant accomplir le processus de comparaison entre des traces et quantifier les résultats d'une façon la plus objective et reproductible possible. Il s'agit d'un point fondamental de la recherche. Une procédure objective permet, non seulement la présentation des résultats d'une manière transparente, mais également de poser des bases solides pour fortifier le domaine.
- Mettre au point un modèle statistique permettant d'interpréter un résultat d'une comparaison et d'évaluer la valeur indicielle d'une trace d'un point de vue probabiliste.
- Employer l'ensemble du système pour assister et soutenir les experts en armes à feu pendant la phase de prise de décision qui clôt le processus d'identification.

Dans le cadre de cette étude, malgré le fait que toutes les traces laissées par une arme sur un élément de munition devraient être exploitées, les recherches se sont concentrées sur le cas particulier des traces laissées par une arme sur une douille, en négligeant les autres traces produites lors du tir, telles que les traces imprimées sur le projectile. Ce choix a été guidé par l'absence, jusqu'à présent, d'un modèle permettant d'évaluer numériquement les similitudes entre deux traces moulées, telles que la plupart des traces présentes sur la douille suite au tir.

Afin de rejoindre les objectifs fixés et d'inscrire cette recherche dans les critiques soulevées par le rapport du NRC, un modèle permettant de comparer les traces laissées par une arme sur une douille et d'interpréter les résultats obtenus lors de ces comparaisons doit être utilisé. Ce modèle doit baser ses fondements sur une procédure objective et la plus reproductible possible. Dans ce but, un système de comparaison assisté par ordinateur et basé sur des mesures topographiques de surface, a été développé et mis en œuvre pendant cette recherche. Un modèle statistique a été couplé au système de comparaison afin de pouvoir, par la suite, évaluer statistiquement la valeur des similitudes et des discordances présentes entre deux traces. Le modèle interprétatif employé est basé sur le concept de rapport de vraisemblance. Ce dernier représente un excellent outil à disposition d'un expert en armes à feu pour guider sa prise de décision.

1.3 Plan de la recherche

Le nombre de chapitres présents dans ce document, ainsi qu'un bref résumé de chaque chapitre sont présentés dans les paragraphes suivants :

Chapitre N°2

Nombreuses sont les procédures pour aborder les problèmes dans le domaine de l'identification des armes à feu et diverses sont les approches employées par les experts afin d'interpréter les résultats. Ce chapitre propose une vue d'ensemble sur le domaine de l'identification d'armes à feu, ainsi que sur les critiques soulevées ces dernières années.

Chapitre N°3

Les traces laissées par une arme pendant le tir d'une cartouche sont multiples et peuvent se présenter de manière différente en fonction du type d'arme employée. La façon avec laquelle une trace est imprimée sur une douille ainsi qu'un résumé des principales traces laissées par une arme sont donc présentées dans ce chapitre.

Chapitre N°4

La valeur indicielle d'une trace dépend, entre autres, de la manière avec laquelle la partie de l'arme entrant en contact avec la douille a été fabriquée. Les informations relatives au processus d'usinage employé pour la fabrication des principales pièces constitutives d'une arme sont nécessaires pendant le processus employé dans le but de lier une douille tirée à une arme suspecte.

Chapitre N°5

L'approche statistique envisagée nécessite l'emploi de valeurs numériques pour décrire les similitudes entre des traces présentes sur deux douilles. Afin de quantifier une comparaison entre deux traces, un système assisté par ordinateur et basé sur la saisie tridimensionnelle de surface a été employée.

Chapitre N°6

De nombreuses techniques permettent de mesurer la topographie d'une surface. Certaines d'entre elles se prêtent mieux que d'autres aux surfaces métalliques telles qu'une douille et aux morphologies, parfois particulières, des traces laissées par une arme. Le choix d'une technique pouvant mesurer correctement la topographie d'une trace sur une douille a été précédé par un ensemble d'essais à l'aide d'appareils spécifiques exploitant des principes souvent différents.

Chapitre N°7

Quantifier les similitudes ou les différences entre deux traces nécessite l'emploi d'une approche algorithmique pouvant tout d'abord aligner deux traces et ensuite quantifier, à l'aide d'une métrique préétablie, les ressemblances présentes entre les traces en question. L'ensemble des algorithmes utilisés ainsi que les principes mathématiques les régissant sont présentés dans ce chapitre.

Chapitre N°8

Une fois les similitudes ou les différences entre deux traces quantifiées, un modèle statistique basé sur le rapport de vraisemblance a été mis en place. Ce dernier a été conçu de manière à pouvoir intégrer simultanément les informations relatives aux différentes traces étudiées. Pour ce faire, des modèles bivariés ont été employés.

Chapitre N°9

L'ensemble des échantillons utilisés pendant cette étude ainsi que la marche à suivre employée pour extrapoler les rapports de vraisemblance sont présentés dans ce chapitre.

Chapitre N°10

Les résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons ont pu montrer le potentiel de l'approche basée sur la saisie tridimensionnelle de surface et couplée au modèle employé pour extrapoler les rapports de vraisemblance. Des solutions envisageables d'un point de vue opérationnel sont ébauchées.

Chapitre N°11 et N°12

Discussion et conclusion sur l'ensemble du travail.

2 FONDEMENTS DE LA RECHERCHE

Lorsqu'une cartouche est introduite dans une arme et qu'un tir a lieu, la douille entre en contact avec plusieurs parties de l'arme. La multitude d'interactions qui ont lieu entre l'arme et la surface de la douille entraîne la formation de plusieurs traces sur cette dernière. Ces traces, qui sont habituellement exploitées afin de mettre en relation la douille avec l'arme l'ayant tirée, sont classées en différents types et différentes caractéristiques sont utilisées pour les décrire.

Dans ce document, la nomenclature relative aux traces produites par une arme proposée par l'AFTE (*The Association of Firearm and Toolmark Examiners*) a été adoptée. Malgré le fait que la terminologie proposée par l'AFTE soit largement utilisée, certaines définitions restent discutables. Ces dernières feront l'objet de discussion dans les paragraphes qui suivent.

2.1 Traces glissées et moulées

Les traces pouvant être observées sur la surface d'une douille tirée se subdivisent, selon l'AFTE, en deux grandes catégories :

- Les traces glissées sont définies comme une variation du contour sur la surface d'un objet causée par la combinaison entre une force et un mouvement, lorsque ce dernier est approximativement parallèle à la surface marquée [AFTE, 1998]. Ces traces résultent donc de l'abrasion d'une surface par l'extrémité tranchante d'un outil¹. Elles se présentent sous la forme d'un ensemble de stries parallèles qui correspond, dans une certaine mesure, aux défauts de surface de l'outil (Figure 1 – à gauche).
- Les traces moulées sont définies comme une variation du contour sur une surface, causée par la combinaison entre une force et un mouvement, lorsque le mouvement est approximativement perpendiculaire à la surface marquée [AFTE, 1998]. Il s'agit donc des traces provoquées par la pression de la partie de l'outil qui s'enfonce au niveau du point d'appui (Figure 1 – à droite).
- Certaines traces peuvent présenter des caractéristiques résultantes d'une combinaison entre des traces glissées et des traces moulées.

¹ D'un point de vue forensique, les parties composant une arme sont considérées comme des « outils » et les traces présentes sur les douilles comme des « traces d'outil ». Les principes fondamentaux en termes de formation et comparaison des traces applicables aux traces d'outils, s'appliquent donc également aux armes à feu [Biasotti et al., 1984]. C'est donc pour cette raison, ainsi qu'à des fins de clarté, que les définitions employées dans ce chapitre font souvent référence aux traces d'outil.

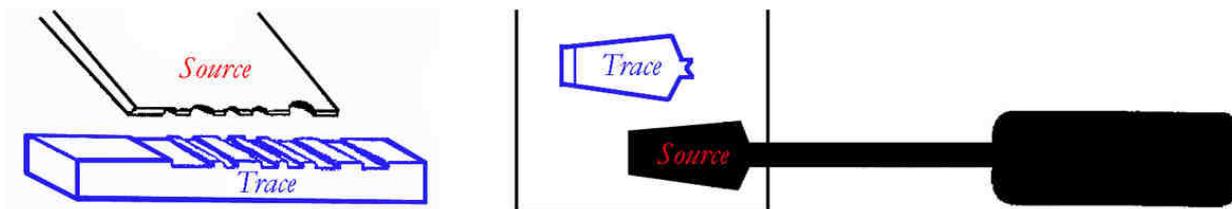


Figure 1

Illustration schématique d'une trace d'outil glissée (gauche) et moulée (droite) [Vicario et al., 1995].

2.2 Caractéristiques de classe, de sous – classe et individuelles

Les traces imprimées par une arme sur la surface d'une douille peuvent être décrites sur plusieurs niveaux, ou mieux, elles possèdent différentes caractéristiques qui sont utilisées pour effectuer une description exhaustive d'une trace. Ces dernières sont transmises par l'arme à la douille en question. Elles peuvent être des caractéristiques plutôt générales, en relation à la manière dont l'arme a été conçue, ou des caractéristiques beaucoup plus fines, représentant les irrégularités microscopiques des parties de l'arme en question. Ces caractéristiques peuvent ainsi être groupées en trois niveaux différents : les caractéristiques de classe, les caractéristiques de sous – classe et les caractéristiques individuelles [Biasotti et al., 1984].

On parle de caractéristiques de classe lorsqu'on se réfère à des caractéristiques imposées à l'arme par le fabricant, comme, par exemple, la forme de la trace du percuteur ou les positions relatives des traces d'extracteur et d'éjecteur. Il s'agit de caractéristiques généralement communes aux armes du même modèle, mais il est tout à fait possible que des armes de modèle différent aient les mêmes caractéristiques de classe.

On parle de caractéristiques de sous – classe lorsqu'il s'agit de caractéristiques qui sont propres à des armes du même type ou au lot de fabrication. Ce genre de caractéristique n'est pas intentionnel mais n'est pas non plus spécifique à une seule arme ou produit. Les caractéristiques de sous – classe viennent se former sur un lot d'armes lors du processus de fabrication. Les traces produites par des armes d'un même lot peuvent donc présenter des similitudes au niveau des caractéristiques microscopiques. L'existence de ce genre de caractéristique doit rendre l'examineur attentif aux techniques de fabrication, car des armes usinées consécutivement peuvent posséder des particularités morphologiques indistinguables ou difficilement différenciables.

Enfin, sont appelées individuelles les caractéristiques qui se produisent de manière accidentelle. Ces caractéristiques peuvent être, soit permanentes, soit évolutives. Il peut donc y avoir une évolution de ce genre de caractéristiques dans le temps, ainsi qu'en fonction de l'utilisation de l'arme. Les caractéristiques individuelles correspondent donc à des imperfections ou irrégularités sur la surface des parties constitutives de l'arme produites par le processus de fabrication et/ou par l'utilisation subséquente de l'arme en question, la corrosion ou par des dommages.

2.2.1 Caractéristiques individuelles et unicité

A ce stade, il est nécessaire de faire le point de la situation sur la terminologie adoptée dans le domaine de l'identification des armes à feu. En effet, dans la littérature, les termes « individuel » ou « unique » sont fréquemment utilisés. Ces derniers sont souvent employés lorsque l'on souhaite s'exprimer sur la nature des traces laissées par une arme. Une caractéristique individuelle, par exemple, est une caractéristique accidentelle qui établit l'unicité d'un objet. Cette terminologie est abusive ; en effet, une caractéristique dite individuelle prise de manière isolée ne peut pas être considérée comme unique. Chaque élément faisant partie des stigmates d'une arme peut être retrouvé dans celles d'autres armes et lorsque deux traces sont comparées, il faut prendre en considération la combinaison de l'ensemble de ces éléments [Gunther et al., 1935]. La spécificité d'un objet peut donc éventuellement résulter d'un ensemble de caractéristiques individuelles jugées collectivement [NRC, 2008]. Il en découle donc que malgré la présence de caractéristiques définies comme individuelles, la trace ne puisse pas être considérée comme unique.

Malgré cette limitation terminologique, le terme de « caractéristique individuelle » sera souvent employé dans cette thèse afin de faciliter l'accessibilité des résultats à des experts pratiquant selon la terminologie de l'AFTE (cf. Section 2.4.1).

2.3 Techniques de comparaison

Lorsqu'il est souhaité de déterminer si deux douilles ont été tirées par la même arme, il est nécessaire de comparer chacune des traces au niveau des différentes caractéristiques dans leur totalité. Le processus de comparaison consiste donc à rechercher des similitudes et des dissimilitudes afin de pouvoir se déterminer sur une éventuelle source commune. Etant donné que les caractéristiques des traces sont divisées en plusieurs catégories de manière hiérarchique, le processus de comparaison doit se faire selon la même logique. La compatibilité des caractéristiques de classe se vérifie en premier. Cette opération est notamment entreprise dans le but de faire un premier tri. En effet, si des douilles ne présentent pas de caractéristiques de classe compatibles, notamment au niveau de la forme de la trace du percuteur ou de la tête de culasse, cela signifie qu'elles ont forcément été tirées par des armes différentes ; des investigations ultérieures ne sont donc pas nécessaires. Par contre, si la compatibilité au niveau des caractéristiques de classe a été vérifiée, les observations se poursuivent au niveau des caractéristiques plus fines, tel que, par exemple, les stries laissées par la tête de culasse ou les défauts morphologiques causés par l'extrémité du percuteur. Pendant cette étape, il est important de pouvoir distinguer les caractéristiques de sous – classe des caractéristiques dites individuelles [Biasotti et al., 1984].

Par sa nature, la comparaison des caractéristiques plus fines, telles que les caractéristiques individuelles, nécessite des moyens permettant d'apprécier le niveau de ressemblance entre elles. À l'heure actuelle, diverses techniques peuvent être employées dans ce but ; les plus souvent employées dans le domaine de l'identification des armes à feu sont : la macroscopie de comparaison et la comparaison automatique effectuée par ordinateur. Ces deux techniques représentent deux concepts complètement différents. En effet, la macroscopie de comparaison est utilisée pour la comparaison directe entre des traces présentes sur deux échantillons. En revanche, la comparaison automatique effectuée par ordinateur est actuellement utilisée pour confronter un élément de munition tiré aux échantillons organisés dans une base de données.

2.3.1 Technique traditionnelle – Le microscope comparateur

Actuellement, l'instrument le plus utilisé dans le cadre des expertises d'identification d'armes à feu est le microscope comparateur [Bonfanti et al., 1998]. Cet outil, qui est utilisé depuis environ un siècle par les laboratoires forensiques, permet d'observer deux objets simultanément, au niveau macroscopique ou microscopique. Il s'agit d'un instrument composé de deux microscopes complets, reliés entre eux par un pont de comparaison. Dans ce dernier se trouve une structure optique composée par des lentilles et des prismes-miroirs permettant d'observer deux traces en juxtaposition ou superposition (Figure 2).



Figure 2
Microscope comparateur de dernière génération².

Lors de la comparaison de deux douilles, le microscope comparateur permet d'apprécier qualitativement les ressemblances morphologiques de deux traces. L'analyse des deux échantillons en même temps sous un éclairage approprié permet également d'apprécier la nature tridimensionnelle des traces. Les images résultantes des comparaisons peuvent enfin être enregistrées à des fins démonstratives à l'aide d'une simple caméra numérique (Figure 3).

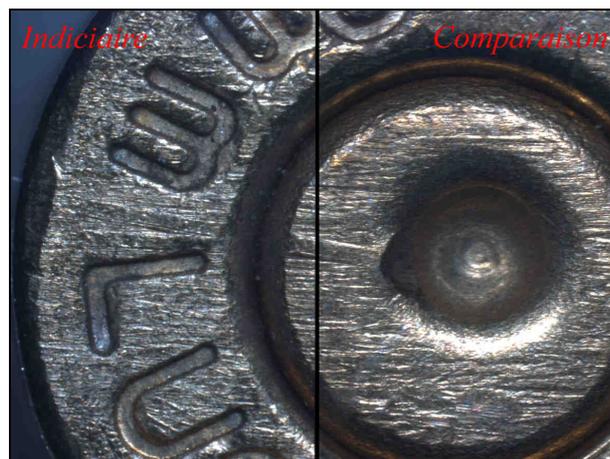


Figure 3
Comparaison de deux traces laissées par la tête de culasse de la même arme (douille indiciaire à gauche – douille de comparaison à droite).

La versatilité de ce genre d'outil permet une observation exhaustive des traces présentes sur la surface d'une douille, même dans les cas où les traces se présentent de manière particulière ou

² www.leica-microsystems.com – Dernière consultation effectuée en date du 18 mars 2010

dans des parties de la douille qui ne sont pas couramment analysées. Il n'en va pas de même pour l'autre technique de comparaison qui, par sa nature, ne permet d'accéder qu'à une partie des traces laissées par l'arme.

2.3.2 Technique assistée par ordinateur – Systèmes de comparaison automatique

L'expression «Système de comparaison automatique» est souvent employée pour les techniques qui utilisent un système d'acquisition couplé à un procédé algorithmique afin de mesurer les similitudes ou les différences entre des traces (cf. Section N°5.2). Il s'agit d'un système géré par un ordinateur qui permet l'acquisition des informations relatives aux traces sur les douilles et la comparaison de ces dernières. Les systèmes de comparaison automatique sont souvent employés par les laboratoires forensiques afin de vérifier d'éventuels liens entre les échantillons présents dans une base de données et, par exemple, une douille en relation avec une nouvelle affaire criminelle. Sauf exception, le système traduit le résultat de la comparaison entre deux douilles par une valeur numérique, souvent appelé *score*. Les combinaisons fournissant les scores les plus élevés seront proposées à un expert comme possibles candidats. L'expert doit finalement vérifier visuellement les résultats obtenus. Cette étape permet de corroborer ou de réfuter les résultats proposés par le système et donc de vérifier l'éventuelle présence de deux douilles tirées par la même arme.

A l'heure actuelle, il est difficilement imaginable d'utiliser l'une des deux techniques sans l'autre, ceci pour les raisons suivantes. Un laboratoire qui a un nombre relativement important de cas nécessite l'utilisation d'un système de comparaison automatique afin de pouvoir effectuer le tri dans sa base de données. Une telle charge de travail est difficilement réalisable à l'aide d'un microscope comparateur, car cela demanderait de grands investissements en termes de personnel et de temps. D'autre part, étant donné que les systèmes de comparaison automatique ne sont pas des outils infaillibles, les résultats obtenus doivent être systématiquement contrôlés par un expert en armes à feu. Cette vérification est, ou devrait être, effectuée à l'aide d'un microscope comparateur. En outre, une comparaison automatique n'exploite qu'un nombre limité de traces. Pour mettre en relation deux éléments de munition, l'analyse de plusieurs traces en même temps peut s'avérer nécessaire. La comparaison traditionnelle demeure donc une pratique indispensable pour apprécier les similitudes entre deux objets dans leur totalité.

2.4 Du processus de comparaison à la phase interprétative

L'expression «processus de comparaison» est employée pour définir l'ensemble des étapes effectuées par un expert qui l'amènent à localiser et à comparer les traces présentes sur deux spécimens distincts. Le processus de comparaison s'achève avec la description des similitudes et des différences observées entre deux traces. Une telle description peut s'effectuer aussi bien qualitativement que quantitativement. En revanche, le terme «interprétation» est employé pour définir la phase qui amène un expert à franchir le stade des simples observations en passant à la dernière étape, à savoir la formulation des conclusions. Dans le cas d'une comparaison entre deux douilles, la phase d'interprétation consiste dans l'évaluation et la pondération des similitudes et des dissimilarités entre deux traces afin de pouvoir s'orienter quant à une éventuelle source commune.

La façon dont les résultats sont interprétés dépendra également de la manière avec laquelle les similitudes et les dissimilitudes ont été décrites. De ce point de vue, il est possible de faire la différence entre l'approche traditionnelle, également connue sous l'expression anglaise de *pattern matching* et basée sur une appréciation qualitative des similitudes, et l'approche quantitative, qui décrit le niveau de ressemblance entre deux traces par le biais d'un ou plusieurs paramètres quantifiables. Parmi les approches pouvant être définies comme quantitatives, la plus connue se base sur le concept de CMS (*Consecutive Matching Striations*). Le choix entre ces deux approches n'est pas toujours un choix dicté par les habitudes de l'expert, mais peut également être dicté par la nature de la trace. En effet, certaines traces se prêtent mieux à une approche qu'à une autre. Ces concepts seront approfondis dans les prochains paragraphes (cf. Sections N°2.4.2 et 2.4.3).

Les approches employées pour décrire une comparaison entre deux spécimens peuvent être différentes, mais les procédures adoptées pour interpréter les résultats peuvent l'être également. En effet, dans le domaine de l'identification des armes à feu, ainsi que dans plusieurs domaines des sciences forensiques, il n'existe pas de doctrine unifiée permettant une interprétation homogène des observations effectuées sur des éléments de munition. Cette hétérogénéité ne signifie pas que des efforts n'aient pas été fournis afin de donner aux experts en armes à feu des lignes directrices permettant de se guider quant au choix des conclusions à adopter. C'est notamment le cas de la théorie de l'identification proposée par l'AFTE, qui malgré son caractère général et parfois un peu vague, reste une théorie de base acceptée par la majorité des experts.

2.4.1 La théorie de l'identification et l'échelle verbale proposées par l'AFTE

En 1989, l'AFTE proposa une théorie qui aurait dû fournir les bases pour guider les examinateurs lors de la phase de prise de décision qui suit l'étape de comparaison entre traces. Le comité a fourni également aux examinateurs une échelle de conclusions basée sur une terminologie en quatre niveaux [AFTE, 1992]. La théorie de l'identification, ainsi que l'échelle des conclusions adoptées par le comité, sont résumées dans les prochains paragraphes.

La théorie de l'identification [AFTE, 1992, page 337] est présentée ci-dessous:

- *«The theory of identification as it pertains to toolmarks enables opinions of common origin to be made when the unique surface contours of two toolmarks are in sufficient agreement».*
- *«This sufficient agreement is related to the significant duplication of random toolmarks as evidenced by the correspondence of a pattern or combination of patterns of surface contours. Significance is determined by the comparative examination of two or more sets of surface contour patterns comprised of individual peaks, ridges, and furrows. Specifically, the relative height or depth, width, curvature, and spatial relationship of the individual peaks. Ridges and furrows within one set of surface contours are defined and compared to the corresponding features in the second set of contours. Agreement is significant when it exceeds the best agreement demonstrated between two toolmarks known to have been produced by different tools and is consistent with agreement demonstrated by toolmarks known to have been produced by the same tool. The statement that sufficient agreement exists between two toolmarks means that the likelihood another tool could have made the mark can be considered a practical impossibility».*
- *«The current interpretation of individualization/identification is subjective in nature, founded on scientific principles and based on the examiner's training and experience».*

L'échelle des conclusions [AFTE, 1992, pages 337 – 338] proposée est la suivante :

- A. *Identification* (Identification) : «*Agreement of a combination of individual characteristics and all discernable class characteristics where the extent of agreement exceed that which can occur in comparison of tool marks made by different tools and is consistent with agreement demonstrated by toolmarks known to have been produced by the same tool.*»
- B. *Inconclusive* (Inconclusive) :
- «*Some agreement of individual characteristics and all classe characteristics, but insufficient for an identification.*».
 - «*Agreement of all discernible class characteristics without agreement or disagreement of individual characteristics due to and absence, insufficiency, or lack of reproducibility.*».
 - «*Agreement of all discernible class characteristics and disagreement of individual characteristics, but insufficient for an elimination.*».
- C. *Elimination* (Exclusion): «*Significant disagreement of discernable class characteristics and/or individual characteristics.*».
- D. *Unsuitable* (Inutilisable) : «*Unsuitable for comparison.*».

2.4.2 L'approche traditionnelle – *Pattern matching*

Le *pattern matching* (terme utilisé dans le cadre de comparaisons basées uniquement sur la reconnaissance de formes), consiste à utiliser une combinaison de capacités cognitives de l'expert afin de reconnaître le niveau de concordance entre traces qui, selon leur vision mentale, constitue une identification (aussi entendue comme un *match*). Selon Moran, une fois que l'expert détecte une identification potentielle, il doit s'appuyer sur la théorie de l'identification proposée par l'AFTE afin de pouvoir être guidé dans le choix de ses conclusions. Il est de la responsabilité de l'expert de faire la différence entre une identification et une non-identification [Moran, 2002]. Cette approche ne définit aucun critère précis et clair permettant de déterminer si le niveau de ressemblance est suffisant pour conclure à une source commune. C'est à l'expert d'évaluer ses observations en fonction de ses connaissances, de son expérience et de formuler ses conclusions. Ces dernières sont donc basées uniquement sur le jugement informé de l'expert. Les bases pour justifier une conclusion basée sur du *pattern matching* sont difficilement explicables aux autres personnes, ce qui explique, parfois, la difficulté de pouvoir présenter en toute transparence cette méthodologie devant un tribunal [Schwartz, 2005].

2.4.3 L'approche quantitative

Comme la théorie de l'identification l'indique (cf. Section 2.4.1), les critères utilisés pour l'identification sont guidés par l'expérience de l'opérateur. Dans les années 1950, les besoins de pallier au manque d'objectivité perçue, ainsi qu'à l'absence de bases stables en termes de quantification d'une comparaison, ont été à la source de deux importants développements. Le premier est la mise au point, par Davis en 1958, du striagraphe. Cet appareil, qui n'a jamais été commercialisé, permet de mesurer quantitativement les marques laissées par une arme sur

des projectiles et des douilles. Un développement nettement plus important a été marqué par les études menées par Alfred Biasotti, lequel a posé les fondements de l'approche aujourd'hui connue sous le nom de CMS. Le travail de Biasotti a été motivé principalement par le manque presque total à l'époque de données statistiques régissant le domaine de l'identification des armes à feu [Biasotti, 1959]. Plus récemment, d'autres tentatives de quantifier les résultats d'une comparaison entre deux traces ont été entreprises ; il y sera fait référence dans les prochains paragraphes.

CMS et Critère d'identification conservatif

Le concept de strie concordante consécutive n'est pas récent. Biasotti, en 1955, introduit le concept de CMS en expliquant que la combinaison entre la quantité (de stries) et la consécutivité offre un moyen pratique d'établir un critère objectif d'identification pour les traces glissées³ [Biasotti, 1959]. Il démontra ainsi que des critères tels que le nombre total ou le pourcentage de stries concordantes entre deux traces ne constituent pas des critères pouvant être employés efficacement à des fins d'identification. A l'heure actuelle, l'emploi des CMS reste le meilleur modèle pour définir une comparaison entre deux traces glissées. En outre, l'utilisation des CMS permet de décrire avec un langage commun ce que l'on entend par meilleur KNM (*best Known Non Match* – meilleure concordance observable entre deux traces laissées par des outils différents) [Nichols, 2004]. Même si les CMS constituent le meilleur moyen pour la description des traces glissées, ce modèle est loin d'être parfait. Il est souvent argué que l'emploi des CMS est la solution au problème lié à la subjectivité. Définir une strie reste toutefois, encore aujourd'hui, un concept dépendant de l'observateur ; il en découle que décrire une comparaison à l'aide des CMS n'est pas un processus parfaitement reproductible.

Plusieurs études et recherches menées par le passé, portant sur l'utilisation des CMS, ont poussé Biasotti et Murdock, en 1997, à éditor un critère d'identification quantitatif pour les traces d'outil glissées [Biasotti et al., 1997]. Ce critère d'identification est satisfait lorsque :

- Dans le cas des traces en trois dimensions⁴, deux groupes différents de trois stries concordantes consécutives ou un groupe de six stries concordantes consécutives sont présents dans la même position relative lors de la comparaison entre la trace indiciaire et celle de comparaison.
- Dans le cas des traces en deux dimensions, deux groupes différents de cinq stries concordantes consécutives ou un groupe de huit stries concordantes consécutives sont présents lors de la comparaison entre la trace indiciaire et celle de comparaison.
- Ces critères sont satisfaits uniquement si les stries pouvant être considérées comme des caractéristiques de sous – classe sont écartées pendant le comptage des CMS.

Dans le cas où le critère d'identification n'a pas été satisfait, l'expert peut conclure à l'aide d'une qualification de niveau inférieur comme décrit dans l'échelle des conclusions de l'AFTE [Moran, 2002].

³ A noter que le concept de strie concordante consécutive offre un moyen pour établir un critère d'identification. Mais fondamentalement, l'emploi des CMS reste un outil permettant de décrire une comparaison de manière quantitative. Cela signifie donc que lorsque le concept de CMS est évoqué, il ne doit pas forcément être associé au standard numérique proposé par Biasotti et Murdock.

⁴ Par opposition aux traces en deux dimensions, les traces en trois dimensions présentent des reliefs suffisamment importants pour suggérer la profondeur de la trace.

Jusqu'à aujourd'hui, un niveau de concordance, tel qu'il dépasse les limites numériques proposées par Biasotti et Murdock, n'a jamais été observé entre deux traces laissées par deux armes différentes⁵ [Hermsen et al., 2004 et Neel et al., 2007]. Malgré le fait que les seuils numériques ont été choisis de manière conservatrice afin de minimiser, voir mettre à zéro, la probabilité de fausse identification, il n'a pas encore été possible de vérifier que cette dernière est réellement réduite à zéro. Il n'en va pas de même pour les fausses exclusions. En effet, il est tout à fait envisageable que deux traces laissées par la même arme ne présentent pas un nombre de CMS suffisant pour satisfaire le standard numérique cité ci-dessus. Dans ce cas de figure, les deux traces ne peuvent pas être identifiées comme étant laissées par la même arme.

Malgré le fait que le concept de CMS ainsi que le critère conservatif d'identification introduit par Biasotti et Murdock mériteraient plus d'attention, cette étude n'entrera pas dans les détails sur ce sujet ; cela est dû au fait que ces concepts ne se limitent, sauf exception⁶, qu'aux traces glissées, alors qu'une grande partie des traces présentes sur les douilles se présentent sous forme moulée. Ceci implique que ce concept est plus fréquemment utilisé pour les projectiles que dans le cas des douilles.

Autres tentatives de quantification

L'approche CMS n'est pas universelle et ne peut être appliquée qu'à des traces présentant des stries, telles que les traces glissées. Pour faire face à cette lacune, d'autres essais de quantification ont vu le jour ces dernières années pour les traces moulées. Ces dernières, par leur nature, se prêtent difficilement à une quantification par décompte de caractéristiques d'intérêt, contrairement aux traces glissées. Parmi les études effectuées sur le sujet, il est possible de citer le modèle proposé par Stone en 2003 et employé dans une étude par Collins en 2005. Le premier propose un modèle permettant de décrire les traces moulées en fonction des marques laissées par l'outil. Les particularités de la trace peuvent ainsi être décrites par des formes simples telles que des points, des traits, des lignes arrondies, etc. Dans le but de calculer la probabilité d'observer une de ces caractéristiques, l'auteur divise la surface correspondante à la trace en un grillage formé par plusieurs parcelles de même taille. La probabilité de correspondance fortuite est calculée par rapport au nombre maximal de parcelles. Ce modèle présuppose que pour chaque caractéristique, leur conformation et leur orientation sont accidentelles et que chaque particularité possède la même probabilité de venir se créer sur la surface de l'outil [Stone, 2003]. La deuxième étude est simplement un prolongement de l'article de Stone. Ce dernier porte sur des traces laissées par des marteaux et introduit l'application du modèle dans le cadre des traces laissées par une arme comme, par exemple, celle du percuteur [Collins, 2005]. Même s'il faut reconnaître les efforts des auteurs, cette approche trouvera difficilement une application universelle dans le domaine des armes à feu. Trop de paramètres entrent en ligne de compte dans la description des traces prévues pour le calcul de correspondance fortuite, proposée par les auteurs. L'objectivité ainsi que la reproductibilité des résultats s'avèrent, de ce fait, compromises. En outre, l'hypothèse d'indépendance entre les différentes caractéristiques d'intérêt qui se trouve à la base du modèle reste difficilement démontrable.

⁵ A noter que cette remarque reste valable uniquement si les caractéristiques de sous – classe ont pu être éliminées pendant le comptage des CMS.

⁶ L'exception fait référence à des traces moulées laissées par une partie de l'arme présentant des défauts en surface pouvant être assimilés à des traces glissées [Hermsen et al., 2004]. C'est notamment le cas des traces laissées par la tête de culasse de certaines armes (cf. Section N°3.3.2).

2.4.4 Autres approches – Les courants en Europe

La théorie de l'identification ainsi que les conclusions proposées par l'AFTE restent les lignes directrices en vigueur principalement aux Etats-Unis. La situation dans d'autres pays, et surtout en Europe, peut s'avérer différente avec l'emploi d'autres échelles de conclusions et d'autres méthodologies pour interpréter les résultats. C'est notamment le cas des laboratoires qui emploient des approches probabilistes pendant la phase d'interprétation⁷. Contrairement à la méthodologie proposée par l'AFTE, ce genre d'approche permet de fournir des conclusions sous la forme de qualificatifs probabilistes ; les conclusions ne sont donc plus limitées principalement à trois niveaux (identification, inconclusive ou exclusion) mais recouvrent une plus grande échelle. Une interprétation basée sur le rapport de vraisemblance est un exemple de modèle probabiliste appliqué au domaine de l'identification en armes à feu. Contrairement à l'approche déterministe, ce genre d'approche permet, entre autre, de donner des conclusions relatives aux probabilités d'observer les similitudes entre deux traces en regard de deux hypothèses mutuellement exclusives. Ce modèle interprétatif ainsi que ses applications dans le domaine de l'identification sont discutées dans les chapitres qui suivent (cf. Section N°8.1).

Malgré le fait que les conclusions sous forme de probabilité sont moins fréquentes dans ce domaine, rien n'empêche qu'une description qualitative des similitudes entre deux traces ou par l'emploi des CMS (cf. Section N°2.4.3) puisse donner lieu à une interprétation de nature probabiliste. Il est donc tout à fait possible de conclure sous forme de probabilité, en faisant abstraction de la théorie de l'identification. Cet aspect sera approfondi dans les chapitres qui suivent (cf. Chapitre 8).

2.5 Les prémisses de l'identification des armes à feu

Différentes façons d'apprécier les résultats d'une comparaison existent et les manières dont les experts peuvent présenter leurs conclusions au tribunal sont variées. Quelle que soit la procédure employée par un expert pour comparer deux traces, des postulats sous-jacents permettant de se prononcer sur un éventuel lien entre une arme et un élément de munition existent. Le processus, qui permet, d'un côté, d'établir un lien d'une certaine importance entre deux douilles tirées par la même arme et de l'autre, de différencier des douilles provenant de sources différentes, se base sur deux prémisses : la spécificité des traces et leur reproductibilité.

2.5.1 La spécificité des traces

Un principe fondamental du domaine de l'identification des armes à feu stipule que chaque arme varie microscopiquement par rapport aux autres armes de telle manière qu'elle laisse, par contact, des traces considérées comme extrêmement spécifiques sur les douilles ou les projectiles [NRC, 2008]. Plusieurs études ont été effectuées pour valider cette hypothèse. La plupart d'entre elles portent sur des armes construites consécutivement. A cause des similitudes qui peuvent être présentes entre deux armes différentes faisant partie du même lot

⁷ A noter que des approches probabilistes peuvent tout simplement se limiter dans l'expression des résultats à l'aide d'une échelle verbale à plusieurs niveaux où chaque pallier correspond au degré d'association entre deux échantillons. Ce degré d'association peut donc être également exprimé par le biais de probabilités à posteriori (cf. Chapitre N°8).

de fabrication, les armes construites consécutivement représentent le meilleur moyen pour tester le postulat en question.

En 1984, Matty et Johnson ont présenté une étude sur des percuteurs de Smith&Wesson (S&W) fabriqués à l'aide d'un tour. Les résultats ont montré un remarquable transfert de caractéristiques de sous – classe, entre un percuteur et l'autre, tel qu'un rapprochement ne se basant que sur les traces des percuteurs pouvait mener à des fausses identifications. Le travail du tour produisait des cercles concentriques qui ne sont pas considérés comme spécifiques lorsqu'ils sont pris en considération singulièrement. Néanmoins, la présence de défauts et interruptions dans ces cercles peut être prise comme une caractéristique individuelle [Matty et al., 1984].

Plusieurs études ont pris en considération les traces laissées par les têtes de culasse. Matty, en 1984, après avoir effectué une étude sur deux lots de trois têtes de culasse construites consécutivement, conclut qu'aucune des six têtes de culasse n'a pu être confondue avec une autre [Matty, 1984]. Uchiyama, en 1986, effectue une étude sur des armes ayant des têtes de culasse à forme circulaire et sur des armes ayant des têtes de culasse à stries parallèles. Les résultats montrent que, dans le cas des têtes de culasse à stries parallèles, aucune similarité significative n'a été remarquée. Contrairement aux têtes de culasse à forme circulaire qui n'ont pas toujours permis d'exclure toutes les armes utilisées dans l'étude [Uchiyama, 1986]. Thompson, en 1994, a effectué une étude sur quatre têtes de culasse choisies parmi 60'000 échantillons fabriqués par Phoenix Arms. Les têtes de culasses étaient différenciables entre elles, mais les traces laissées par ces dernières sur des douilles ne permettaient pas toujours de remonter à la tête de culasse les ayant produites [Thompson, 1994]. Lardizabal en 1995, compare trois pistolets semi-automatiques Heckler&Koch (H&K) USP calibre .40 S&W, deux ayant des numéros de série consécutifs et l'autre ayant un numéro de série antérieur. Les observations effectuées sur les traces de la tête de culasse ont montré que celles produites par les armes construites consécutivement correspondaient entre elles, contrairement à la comparaison avec celles laissées par l'arme au numéro de série plus bas [Lardizabal, 1995]. Ces études mettent en évidence le besoin d'évaluer les traces de tête de culasse de manière critique, et de considérer la possibilité d'examiner d'autres types de trace moins sujets au transfert de caractéristiques de sous – classe.

La fabrication contrôlée numériquement par ordinateur (CNC) permet d'effectuer différentes opérations qui étaient auparavant effectuées par plusieurs opérateurs, en utilisant une seule machine équipée avec plusieurs outils en même temps. Une étude a été effectuée sur des têtes de culasse fabriquées par CNC. Les résultats ont montré que même si certaines caractéristiques de sous – classe sont évidentes pour l'auteur, chaque tête de culasse était suffisamment spécifique pour permettre une discrimination [Coffman, 2003].

Nichols en 2004, a effectué une recherche sur dix extracteurs du Colt 1911 construits consécutivement. Les résultats ont montré que deux zones des extracteurs comportaient d'importantes caractéristiques de sous – classe transférées sur les dix pièces. Mais la présence des caractéristiques de sous – classe n'empêchait pas de distinguer les traces laissées par les dix extracteurs [Nichols, 2004]. Des résultats similaires ont été obtenus pendant une étude effectuée par Lyons en 2009. Cet auteur a également basé ses recherches sur dix extracteurs fabriqués consécutivement par Caspian Arms utilisés dans des pistolets semi-automatiques Colt 1911A1 [Lyons, 2009].

Les résultats de ces études ont mis en évidence le fait que dans certains cas, effectuer une identification de l'arme n'est pas une tâche évidente. Par contre, même si certaines traces

montraient des similitudes, une distinction pouvait être effectuée en se basant sur les autres traces présentes sur la douille. En effet, il est peu vraisemblable que toutes les traces laissées par une arme proviennent de pièces construites consécutivement et qu'elles présentent en même temps des caractéristiques de sous – classe [NRC, 2008].

2.5.2 La reproductibilité des traces

Pour pouvoir exploiter les traces laissées par une arme à des fins d'identification, les traces en question ne doivent pas seulement être sélectives, mais également reproductibles. Les caractéristiques des traces doivent donc être transférées à une douille également après plusieurs tirs. Cela ne signifie pas que chaque caractéristique doit être reproduite de la même manière et avec la même clarté suite à chaque tir. En effet, l'interaction entre la douille et l'arme pendant le tir dépend forcément du processus de combustion ainsi que de la pression développée pendant le tir, lesquels peuvent varier d'un tir à l'autre. Ces variations influencent à leur tour la déposition des traces sur la douille [NRC, 2008]. En outre, contrairement à d'autres types de traces exploitées en sciences forensiques, les traces d'outil possèdent un caractère évolutif. Dans certains cas, l'usure peut entraîner la disparition des caractéristiques de sous – classe et, en même temps, l'apparition de caractéristiques dites individuelles. Par contre, dans d'autres cas, les caractéristiques de sous – classe peuvent persister à côté des caractéristiques individuelles [Schwartz, 2005]. Plusieurs recherches ont été menées dans le but d'étudier l'évolution morphologique des traces laissées par une arme sur une douille en fonction de la quantité de tirs effectuée.

Shem et Striupatis, en 1983, ont effectué des observations sur 501 douilles tirées consécutivement par la même arme ; les caractéristiques des traces de la tête de culasse présentes sur la première et la dernière douille tirées ont permis d'affirmer que les deux douilles ont été tirées par la même arme. Les marques d'extracteur et d'éjecteur ne figuraient pas en qualité suffisante pour effectuer des comparaisons [Shem et al, 1983]. La même année, plusieurs auteurs ont collaboré à une étude sur 5'000 douilles. Les résultats observés montrent qu'il n'y a pas eu de changement significatif entre les traces de tête de culasse. Par contre, en ce qui concerne le percuteur et l'extracteur, des faibles variations ont pu être observées. Enfin, les observations concernant l'éjecteur ont montré qu'il changeait à un rythme assez rapide [Ogihara et al., 1983]. Une étude effectuée sur les traces d'éjecteur laissées par le fusil d'assaut Galil a montré des variations dans les premiers essais. Toutefois, les caractéristiques morphologiques de l'éjecteur s'étaient stabilisées en cours d'utilisation, en permettant de conclure à une source commune après plus de 7'000 tirs effectués [Schecter et al, 1992]. L'étude de Vinci, en 2005, montre qu'après 2'500 tirs, il a été possible de constater que, même en présence de légers changements concernant la qualité des traces, les douilles ont pu être identifiées correctement. Dans la même étude, les auteurs ont pu observer que la trace du percuteur commençait à perdre ses imperfections après 70 tirs. La trainée du percuteur a pu être utilisée à des fins d'identification seulement dans les 200 derniers tirs. La taille et la profondeur de la trace de l'éjecteur ont augmenté après le 600^{ème} tir, alors que la trace d'extracteur a montré des changements à partir des 200 derniers tirs [Vinci et al., 2005]. Une étude effectuée sur des douilles tirées par un pistolet semi-automatique Glock, calibre .40 S&W, a montré que les douilles ont pu être identifiées même après 10'000 tirs [Gouwe et al., 2008]. Suite aux résultats observés, il est difficile de savoir s'il y a des traces qui sont plus stables que d'autres en termes de reproductibilité ; même si la trace qui semble être la plus stable, parmi les traces transférées sur une douille, reste celle laissée par la tête de culasse [De Kinder, 2002].

En ce qui concerne la démarche avec laquelle ces recherches ont été conduites, aucune information n'est reportée dans ce document. Cela est principalement dû au fait que les informations concernant la procédure adoptée pendant l'étude ne sont pas toujours explicites. Il n'est donc toujours pas possible de savoir si ces études ont été effectuées à l'aveugle ou pas. Ce facteur reste tout de même une information intéressante permettant de juger de la fiabilité des résultats obtenus. En effet, les résultats des études, tels que celles conduites sur des pièces fabriquées consécutivement, sont influencés par les informations préalablement à disposition des personnes ayant fait les comparaisons [Buckleton et al., 2008]. Des recherches biaisées ne peuvent évidemment pas contribuer à renforcer la validité de la méthode.

2.5.3 Restrictions

Malgré le fait que les parties constitutives d'une arme présentent souvent des différences (même si elles ont été construites consécutivement) et qu'une arme peut reproduire, de manière plus ou moins régulière, ses stigmates sur les douilles tirées, cela ne signifie pas forcément que chaque douille peut être reliée sans erreur à l'arme l'ayant tirée. Les recherches citées auparavant, telles que celles sur les têtes de culasse d'Uchiyama en 1986 et Thompson en 1994, mettent en évidence le danger réel d'effectuer des fausses associations. Ce phénomène est accentué d'une part par l'existence des caractéristiques de sous – classe et d'autre part par le fait que la sélectivité de la source n'est parfois pas suffisante pour inférer l'individualité de la trace. Des outils microscopiquement différents peuvent donc hypothétiquement transférer des traces difficilement différenciables par des examinateurs.

En outre, toutes les traces ne permettent pas forcément d'individualiser l'arme qui les a produites. En effet, il est tout à fait possible que des traces, malgré la présence de caractéristiques dites individuelles, ne soient pas en nombre ou qualité suffisante pour permettre de conclure à une éventuelle source commune. C'est typiquement le cas où les traces observées ne présentent pas une quantité suffisante de caractéristiques (stries, marques, défauts, etc.), comportent des caractéristiques insuffisamment discriminantes pour permettre l'identification ou présentent une mauvaise reproductibilité [Nichols, 2004].

2.6 Problématiques liées à l'identification dans le domaine des armes à feu

La manière avec laquelle les preuves sont admises au tribunal ainsi que la façon dont elles sont présentées dépendent fortement du système juridique en vigueur dans le pays en question. Il en découle que certains pays sont soumis à des règles plus strictes et à des critiques plus concrètes concernant l'admissibilité de la preuve dans le domaine des armes à feu que d'autres. C'est notamment le cas des Etats-Unis, où les principes de base du domaine de l'identification des armes à feu ont été remis en question ces dernières années. Dans le cadre européen et plus particulièrement en Suisse, les critiques soulevées aux Etats-Unis ne sont pas autant d'actualité et les témoignages dans le cadre d'expertises en armes à feu sont admis généralement sans réserve. Malgré cela, les critiques portées à ce domaine ne sont pas infondées et méritent d'être détaillées.

2.6.1 Contexte légal

Pendant plusieurs décennies, les témoignages des experts dans le domaine des armes à feu ont été acceptés sans réserve dans la plupart des tribunaux fédéraux aux Etats-Unis⁸. Cette tendance a évolué et s'est modifiée jusqu'à nos jours. En effet, comme pour les autres branches des sciences forensiques, le domaine des armes à feu a dû également se confronter aux questions concernant les standards sur l'admissibilité des preuves scientifiques dans la procédure pénale. Ces derniers ont été développés durant le début du 20^{ème} siècle et ont continué à évoluer jusqu'à nos jours par le biais de différents arrêts tels que *Frye vs United States*⁹, *Daubert vs Merrell Dow Pharmaceuticals*¹⁰ et *Kumho Tyre Co vs Carmichael*¹¹. Ces arrêts ont contribué à l'établissement des critères qui régissent actuellement l'admissibilité des témoignages dans les tribunaux nord américains.

Frye, Daubert et Kumho Tyre Co

Au début du 20^{ème} siècle, pendant le développement technologique, le système légal a dû s'adapter et évoluer en mettant en place des tests cohérents pour l'admissibilité de la preuve scientifique. Le premier développement important date du 1923 suite au jugement rendu par le tribunal dans le cas *Frye vs United States*. Dans ce cas, la défense voulait démontrer l'innocence de son client en admettant comme preuve les résultats d'un test de vérité basé sur la pression sanguine. Le tribunal rejeta les résultats du test car ce dernier n'était pas accepté de façon générale par la communauté scientifique [NRC, 2009, chapitre 3, page 3].

La décision du tribunal constitue ce qu'il est possible de définir comme un premier test d'admissibilité [NRC, 2008], connu par la suite comme le *Frye test* ou *general acceptance test*. Suite à cet arrêt, les témoignages des experts ont dû se conformer à ce qui est généralement accepté dans le domaine scientifique dont ils font partie. Pour qu'un témoignage d'un expert soit admis, il doit être basé sur des méthodes scientifiques généralement acceptées.

Le test de Frye a été le standard dominant en matière d'admissibilité des preuves scientifiques jusqu'en 1975, année où la *Federal Rule of Evidence* (FRE) fut promulguée afin de guider les litiges civils ou pénaux dans les cours fédérales des Etats-Unis. La première version de la règle 702 de la FRE statue que [NRC, 2009, chapitre 3, page 4] :

«In scientific, technical, or other specialized knowledge will assist the trier of fact to understand the evidence or to determine a fact in issue, a witness qualified as an expert by knowledge, skill, experience, training or education, may testify thereto in the form of an opinion or otherwise».

Il faudra attendre 1993 pour que la cour suprême des Etats-Unis propose un critère étendu relatif à l'admissibilité des témoignages au travers de l'arrêt *Daubert vs Merrell Dow Pharmaceuticals*. Dans le cas *Daubert*, la cour suprême statue que la FRE remplace définitivement le test de Frye en tant que standard pour l'admissibilité des témoignages de la part des experts [Berger, 2000]. La cour souligne que tous les témoignages scientifiques ou preuves admises doivent non seulement être pertinentes mais également fiables [NRC, 2009, chapitre 3, page 5]. Elle précise également qu'aucun témoignage considéré comme scientifique ne pourrait être admis à moins qu'il ait répondu à certains critères. Ces critères,

⁸ <http://www.crimapp.com/glynn/glynn.html> – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

⁹ *Frye vs United States*, 293 F 1013 (D.C. Cir. 1923).

¹⁰ *Daubert vs Merrell Dow Pharmaceuticals Inc.*, 113 S. Ct. 2786 (1993).

¹¹ *Kumho Tire Co. vs Carmichael*, 526 U.S. 137 (1999).

qui se réfèrent à la technique ou à la théorie employée par l'expert, requièrent qu'elle puisse être testée ou qu'elle ait été testée (1). Elle doit également avoir été publiée ou reconnue par ses pairs (2), le taux d'erreur de la technique doit être connu et l'existence et la continuité de standards doit être assurée (3). Enfin, elle doit être généralement acceptée par la communauté scientifique (4)¹².

Enfin, en 1999, dans l'arrêt *Kumho Tyre Co vs Carmichael*, la cour suprême étend l'engagement du juge en matière d'admissibilité des témoignages sans par contre contredire les points préétablis pendant l'arrêt Daubert. Selon Kumho, tous les témoignages d'experts, et pas seulement les témoignages qui reposent sur des principes scientifiques, feront l'objet d'analyse afin de s'assurer qu'ils soient fiables et pertinents [Berger, 2000]. Cela ne signifie par contre pas que les points édités par Daubert deviennent ainsi insignifiants, mais qu'ils peuvent ou pas être pertinents dans les circonstances du cas. Le choix des facteurs employés afin de se déterminer sur la fiabilité d'un témoignage sont ainsi laissés à la discrétion du tribunal [Berger, 2000]. Il n'est donc plus question d'appliquer les critères de Daubert d'une façon rigide, mais bien plutôt d'encourager une approche pragmatique basée avant tout sur le cas d'espèce. Par exemple, un juge ne devra pas se demander si l'examen d'armes à feu constitue une science établie, mais savoir si tel expert, dans tel cas, à partir de telles données et travaillant de telle façon, peut donner une information fiable qui puisse aider le décideur dans l'établissement des faits [Champod et al., 2010].

Admissibilité des témoignages dans le domaine des armes à feu

L'ère qui précède, mais également celle qui a suivie l'arrêt Daubert a été caractérisée par l'admission généralisée des témoignages des experts en identification d'armes à feu et traces d'outil. Malgré cela, le témoignage des experts en identification en termes d'armes à feu ainsi que leurs conclusions sont de plus en plus remises en cause. Les exemples suivants en sont la preuve :

- En 2004, dans le cas *United States vs Kain*¹³, l'expert a affirmé pouvoir identifier un outil en excluant tout autre outil sur la planète. La défense, de son côté, s'est attaquée à l'admissibilité du témoignage en affirmant que des bases statistiques et empiriques adéquates n'existent pas pour pouvoir justifier l'exclusion de tout autre outil sur la planète ; par conséquent, le témoignage ne devrait pas être admis car il ne remplit pas les critères d'admissibilité décrétés par l'arrêt Daubert [Schwartz, 2005].
- Plus récemment, dans le cas *United States vs Glynn*¹⁴ l'expert d'armes à feu s'est exprimé sur le lien entre l'arme de l'accusé et le projectile incriminé en concluant de manière quasi définitive (« *to a reasonable degree of ballistic certainty* »). La défense de son côté a proposé de rejeter le témoignage de l'expert sur la base du fait que le domaine des armes à feu n'est pas basé sur des méthodes suffisamment fiables pour satisfaire les critères d'admissibilité dictés par la règle 702 de la FRE. La décision de la cour s'est focalisée sur la conclusion donnée par l'expert en soulignant qu'une telle conclusion ne pouvait que tromper le jury quant à la nature de l'expertise même, étant donné qu'elle était basée sur l'expérience de l'expert et portant donc sur des conclusions à caractère subjectif. Le tribunal décida donc non seulement de faire changer les

¹² <http://www.crimapp.com/glynn/glynn.html> – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

¹³ *United States vs Kain*, Crim. No 03-573-1 (E.D. Pa. 2004).

¹⁴ *United States vs Chaz Glynn*, Defendant No06 Cr. 580 (JSR – 2008).

conclusions de l'expert¹⁵, mais également que l'identification en armes à feu ne pouvait pas être considérée comme une « science ». La décision de la cour a été principalement justifiée par le manque d'objectivité qui affecte le domaine de l'identification ainsi que les conclusions des experts. Il en découle que le domaine des armes à feu manque non seulement de rigueur scientifique mais souffre également d'une incertitude plus grande par rapport à d'autres domaines des sciences forensiques¹⁶.

Ces deux exemples, ainsi que d'autres cas récents, témoignent d'une façon évidente l'appel des tribunaux à limiter les conclusions à caractère absolu en faveur des conclusions plus modérées pouvant prendre en considération d'une manière plus concrète les taux d'erreurs liés à la technique employée [Champod et al., 2010].

2.6.2 Manque de bases statistiques stables

Selon le NRC, la validité des lois fondamentales de spécificité et de reproductibilité des traces laissées par une arme n'a pas encore été étudiée de manière totalement satisfaisante. Afin de pouvoir renforcer les bases qui régissent les prémisses fondamentales de l'identification en matière d'armes à feu, des recherches sur la spécificité et sur la reproductibilité des traces laissées par une arme devraient être effectuées. Les experts en armes à feu tendent à conclure d'une manière absolue en affirmant qu'une identification peut être effectuée en excluant toutes les autres armes au monde comme source des traces observées. Etant donné que l'identification en sciences forensiques se base sur la théorie de la probabilité, les examinateurs ne pourront jamais conclure à une identification en excluant toute autre arme présente sur terre; éventuellement ils pourraient mettre en jeu une infime probabilité de correspondance fortuite. Il est paradoxal que dans des domaines où les conclusions sont subjectives et se basent principalement sur l'expérience, les affirmations se réfèrent souvent à une certitude absolue [NRC, 2008].

En outre, la présence de similitudes entre traces laissées par des armes différentes et les différences qui peuvent être observées en comparant des traces laissées par la même arme implique forcément l'existence d'une question statistique qui doit être prise en compte afin de se déterminer quant à la source d'une trace. Il existe donc un besoin concret de déterminer la valeur statistique d'une concordance et cela compte tenu de l'évolution des traces suite à l'utilisation de l'arme, de la présence des caractéristiques de sous – classe, qui par leur nature peuvent être parfois confondues avec des caractéristiques définies comme individuelles et du fait que ces dernières, selon leur définition, sont une combinaison de marques non uniques [Schwartz, 2005].

Selon Schwartz, des bases statistiques et empiriques adéquates n'existent pas encore. Le développement de fondements plus stables ainsi que de tests de profiçience plus rigoureux sont nécessaires [Schwartz, 2005]. En outre, une grande quantité de recherches devrait encore être accomplie pour déterminer scientifiquement le degré de sélectivité des traces laissées par une arme ou pour caractériser quantitativement la probabilité de correspondance fortuite. Il n'est donc pas encore possible de spécifier le nombre de concordances nécessaire pour justifier un niveau de confiance déterminé. Il existe donc une nécessité réelle de déterminer la

¹⁵ Dans Glynn, la cour invite l'expert à changer ses conclusions. Il est suggéré de remplacer l'expression «*to a reasonable degree of ballistic certainty*» par «*at least more likely than not*».

¹⁶ <http://www.crimapp.com/glynn/glynn.html> – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

fiabilité et la reproductibilité des méthodes employées ainsi que rendre le processus d'identification plus précis et répétable [NRC, 2009, chapitre 5, page 21].

D'un autre point de vue, la problématique ne réside pas dans la nature même des traces laissées par les armes à feu, mais plutôt dans les capacités des experts à interpréter les résultats d'une comparaison. En effet, selon Bunch, la véritable question qu'il faut se poser ne concerne pas forcément la spécificité des traces laissées par une arme, étant donné qu'à certains niveaux tout objet peut être considéré comme unique, mais il s'agit plutôt de savoir si des experts en armes à feu qui ont suivi une certaine formation seront en mesure de lier des traces laissées par la même arme et de différencier des traces laissées par plusieurs armes différentes [Bunch, 2009].

2.6.3 Manque d'objectivité et de protocoles spécifiques

Connaître la quantité de similitudes pouvant être observées entre des traces laissées par des armes différentes, et la quantité de variations observables entre des traces provenant de la même arme n'est pas aisé. Les standards proposés par l'AFTE sont en accord avec le fait que les décisions en termes d'identification impliquent des jugements basés sur l'expérience et que les conclusions des experts sont hautement dépendantes de leur habileté et de leur vécu. Même si les experts en identification sont soumis à des programmes de formation et d'entraînement de plus en plus avancés, les conclusions d'un expert restent des décisions subjectives basées sur des standards inarticulés [NRC, 2009, chapitre 5, page 20]. Le manque d'objectivité peut se traduire par un manque de transparence envers les tribunaux. Des efforts plus consistants doivent être effectués dans cette direction en cherchant à rendre les protocoles d'identification plus objectifs.

A ce sujet, Bunch propose l'emploi de systèmes de comparaison gérés par ordinateurs afin de pouvoir guider, voir confirmer, les conclusions des experts en armes feu. Dans son article, l'auteur envisage également le remplacement des conclusions d'un expert par celles du système [Bunch, 2009]. Une telle solution permettrait de rendre le processus de comparaison ainsi que l'interprétation des résultats beaucoup plus objectifs et fiables. D'un point de vue juridique, des résultats obtenus par le biais d'une telle procédure seraient sûrement moins discutables.

Enfin, le comité de l'AFTE a adopté la théorie de l'identification en 1989, mais sans fournir un protocole spécifique. Il y a donc des notions faisant partie de cette théorie qui restent vagues et très générales. Par exemple, le signifié de « *exceeds the best agreement* » n'est pas une expression spécifiée ; le signifié reste donc très flou. Ce document de l'AFTE, qui reste encore aujourd'hui le seul guide disponible dans le domaine de l'identification des armes à feu, ne prend pas en considération les questions liées à la variabilité, la fiabilité, la reproductibilité ou la quantité de similitudes nécessaires pour rejoindre un niveau de confiance déterminé [NRC, 2009, chapitre 5, page 21].

2.6.4 Considérations finales

En conclusion, il est évident qu'afin de remplir les critères émergents liés à l'admissibilité de la preuve en termes d'identification d'armes à feu, il est nécessaire que ce domaine puisse évoluer. Cette évolution ne devrait pas seulement se focaliser sur la nature des traces d'un point de vue de la spécificité et de la reproductibilité. Des efforts devraient également être

faits de manière à que la composante subjective, qui intervient majoritairement dans la phase d'interprétation des résultats, puisse laisser la place à des protocoles plus objectifs et répétables. Enfin, il faut être conscient des limitations et des taux d'erreur liés aux techniques employées. Les conclusions à caractère absolu souvent employées dans ce domaine devant les tribunaux devraient laisser plus de place à des approches ayant des bases statistiques plus solides.

2.7 Cadre de la recherche

Cette recherche a donc pour but de s'inscrire dans les critiques portées au domaine de l'identification des armes à feu et en particulier au sujet relatif au manque d'objectivité et à l'absence de bases statistiques suffisamment stables. Dans ce document, il ne s'agit pas de trouver des réponses exhaustives aux problématiques évoquées, mais d'étudier les possibilités de fournir des conclusions basées sur un processus objectif et conscient des questions probabilistes qui règnent dans ce domaine.

2.8 Résumé du chapitre

Ce chapitre a exposé brièvement les fondements théoriques régissant le domaine de l'identification des armes à feu ainsi que la procédure employée par un expert afin de mettre en relation une douille indicielle avec une arme particulière. La partie centrale a été consacrée aux recherches effectuées dans le domaine afin de valider les lois fondamentales le régissant. La fin du chapitre a évoqué les problématiques concrètes qui ont touché le domaine de l'identification ces dernières années ainsi que le contexte légal lié à l'admissibilité de la preuve dans les tribunaux nord américains.

3 TRACES SUR LES DOUILLES

Chaque contact qui a lieu avant, pendant et après le tir entre une arme et une douille, engendre la formation de traces sur cette dernière. Ceci est dû principalement au fait que la plupart des parties constituant une arme sont normalement composées d'un métal plus dur que celui composant les douilles [Bonfanti, 1999]. Parmi les traces qu'il est possible de retrouver sur une douille, certaines peuvent être présentes avant que la cartouche ne soit introduite dans l'arme et certaines peuvent se créer après que le tir ait eu lieu. La quantité et le type des traces diffèrent en fonction du type d'arme utilisé et de son mécanisme de fonctionnement.

3.1 Fonctionnement d'une arme

Les mécanismes qui ont lieu lors du tir diffèrent en fonction du type d'arme. Certaines armes, comme les pistolets semi-automatiques, les pistolets mitrailleurs, les fusils d'assaut ou les carabines à répétition manuelle, comportent un système bien précis d'éjection de la douille et de réarmement d'une nouvelle cartouche. Par contre, des armes comme les revolvers ne possèdent normalement pas de système d'éjection et d'armement comparables aux armes précédemment citées.

Les paragraphes suivants passent en revue les mécanismes et les fonctionnements les plus communs. Il s'agit d'exemples généraux ; les systèmes plus particuliers ne seront pas traités [Gallusser et al., 2002].

3.1.1 Armes avec système d'éjection

Parmi les différents mécanismes des armes qui éjectent la douille entre un tir et le suivant, il est possible de faire la différence entre ceux qui effectuent l'éjection automatiquement suite au tir et ceux qui nécessitent l'intervention du tireur. Dans la première catégorie on trouve, par exemple, les armes semi-automatiques ou automatiques ; dans l'autre, les armes à répétition manuelle.

Armes semi-automatiques ou automatiques

La première opération qui a lieu pendant l'utilisation de ce genre d'armes consiste en l'introduction des cartouches à l'intérieur du chargeur qui sera à son tour introduit dans l'arme. Une fois cette opération terminée, le mouvement de charge a lieu. Ce dernier, qui arme le système de percussion, entraîne la première cartouche du chargeur et la pousse mécaniquement à l'intérieur de la chambre à cartouche (Figure 4). Une pression sur la détente libère le système de percussion ; le percuteur vient frapper l'amorce de la cartouche, qui met le feu à la charge propulsive (Figure 4). La combustion de la poudre entraîne rapidement une forte augmentation de la pression, qui pousse le projectile le long du canon jusqu'à la bouche de ce dernier. Lorsque le projectile sort, la pression diminue, permettant l'ouverture de la culasse. Le retard de recul de la culasse est assuré principalement par la masse de cette

dernière et par le système de verrouillage, qui peut varier en fonction du type et du modèle de l'arme. L'extracteur, une petite griffe latérale solidaire à la glissière mobile, saisit la douille dans la gorge et la tire vers l'arrière (Figure 4). Aux deux tiers de sa course environ, le culot de la douille vient heurter l'éjecteur, qui est une sorte de butée fixe solidaire de la carcasse (Figure 4). L'action de l'éjecteur cause l'expulsion de la douille par la fenêtre d'éjection [Gallusser et al., 2002].

Dans certains cas, c'est le percuteur ou les lèvres du chargeur qui peuvent faire office d'éjecteur. C'est notamment le cas du pistolet semi-automatique FN 1910 calibre 7.65 Browning. Certaines armes, comme par exemple le pistolet mitrailleur tchèque Skorpion, peuvent également posséder deux éjecteurs [Burrard, 1951]. Lorsque la douille est éjectée, la culasse revient en position de « repos » grâce à l'action du ressort récupérateur. Le recul de la culasse ainsi que son retour à la position de « repos », permettent le réarmement du chien, ou du système de percussion, et le chambrement d'une nouvelle cartouche. Parmi ce genre d'armes, on trouve, par exemple, les pistolets semi-automatiques ou automatiques, certaines armes automatiques comme les pistolets mitrailleurs ou les fusils d'assaut, etc.

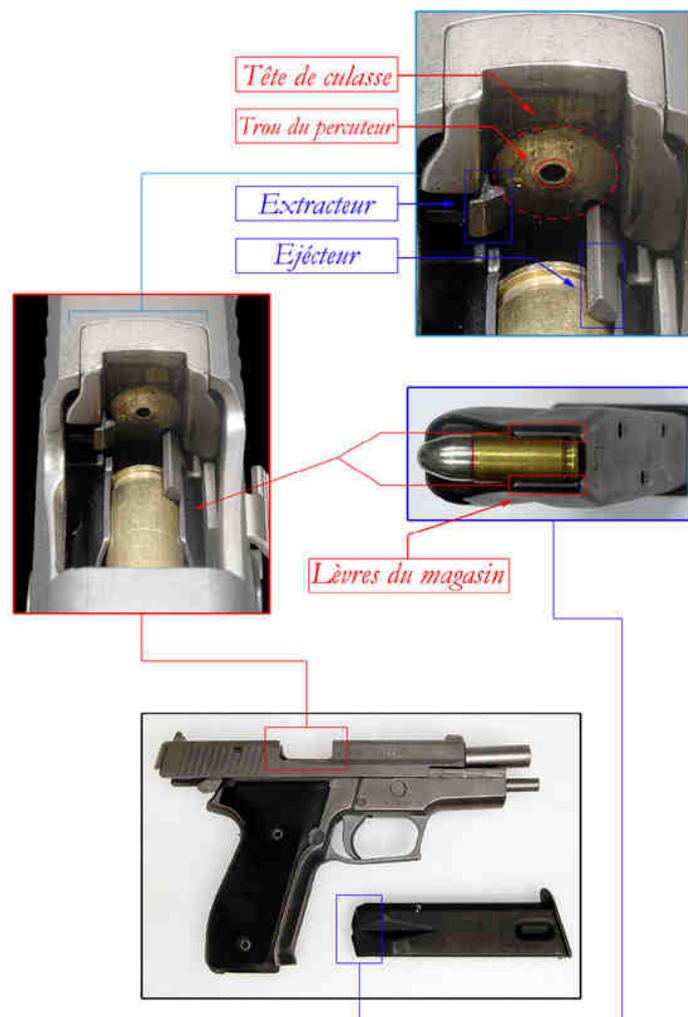


Figure 4

Schéma montrant les principales parties de l'arme qui entrent en contact avec la douille dans un pistolet semi-automatique SIG Sauer P226.

Un sous-ensemble des armes automatiques est constitué par les armes fonctionnant selon un système particulier dit à culasse ouverte (*Open Bolt*). Lorsque l'arme est prête au tir, la culasse est maintenue vers l'arrière par la gâchette et la chambre à cartouche est vide. Lorsque le tireur presse la détente, la gâchette libère la culasse, qui dans son mouvement vers l'avant, pousse une cartouche dans la chambre. La percussion a lieu dès la fermeture complète de la chambre ; en effet, dans ce genre d'armes, le percuteur est solidaire à la culasse. Le système à culasse ouverte est utilisé sur les armes automatiques et possède l'avantage d'éviter que ces dernières atteignent la température de mise à feu spontanée, connue également sous le terme anglais de *cook-off* (montée de la température du canon jusqu'un point tel que n'importe quelle cartouche non tirée dans la chambre détonne sous l'effet de la température) [Maxwell, 1977]. Plusieurs pistolets mitrailleurs (*Machine Guns*) sont équipés de ce système, c'est notamment le cas du Sten britannique et de certaines versions du UZI israélien.

Armes à répétition manuelle

Contrairement aux armes semi-automatiques et automatiques, les armes à répétition manuelle nécessitent l'action du tireur pour éjecter la douille tirée, pour chamberer une nouvelle munition et pour réarmer le système. Avec ce genre d'armes, la culasse ne s'ouvre pas lors du tir ; c'est seulement après le tir qu'il faut ouvrir manuellement la culasse pour éjecter la douille tirée. L'éjection des douilles vides et le chargement d'une nouvelle cartouche se font soit par un mouvement de culasse d'arrière en avant actionnée manuellement, soit par une poignée placée sur le côté de l'arme [Braverman, 1959]. Une fois cette opération terminée, l'arme est chargée, armée et donc prête à tirer. Parmi ce genre d'armes on trouve, par exemple, les carabines à répétition manuelle et les fusils à pompe.

3.1.2 Armes sans système d'éjection

Certains types d'armes ne possèdent pas, ou ne sont pas équipés de système d'extraction ou d'éjection des douilles tirées. C'est notamment le cas des revolvers, dans lesquels les cartouches sont introduites dans les chambres du barillet. Les douilles tirées sont extraites manuellement, uniquement après l'ouverture du barillet. Dans la plupart des revolvers, l'extraction est effectuée à l'aide d'une tige d'extraction qui pousse vers l'extérieur du barillet les douilles ou les munitions présentes dans les différentes chambres. Une autre arme qui possède plusieurs similitudes avec les revolvers est le Derringer. Ce dernier, qui peut être considéré comme un pistolet à un coup, ne comporte pas de système d'éjection des douilles tirées. Certains fusils de chasse possèdent également des crochets qui aident à l'extraction des douilles tirées, mais l'éjection des douilles ne s'effectue pas automatiquement.

3.2 Structure et composition d'une cartouche

Les traces laissées sur une douille ne dépendent pas seulement du type d'arme qui l'a tirée. D'autres facteurs peuvent avoir une grande influence dans la déposition des traces sur la surface d'une douille. Parmi ces facteurs, le type de munition demeure une variable très importante.

Généralement, une cartouche est composée par un projectile et une douille, qui contient une amorce et de la charge propulsive ou poudre (Figure 5). Lorsqu'un tir a lieu, les différents composants d'une cartouche subissent des modifications. En effet, après le tir, la poudre propulsive et l'amorce se trouvent partiellement ou complètement oxydées, alors que le

projectile et la douille, subissent des changements morphologiques dus principalement aux contacts avec les parties de l'arme et aux grandes pressions engendrées par la combustion de la charge propulsive.



Figure 5
Anatomie d'une cartouche Geco® 9x19 mm Nato¹⁷.

3.2.1 La douille et l'amorce

La terminologie adoptée dans ce document pour décrire les différentes parties de la douille est la suivante. La partie inférieure de la douille où se loge la capsule d'amorçage est appelée culot. Le terme « corps de la douille » est utilisé pour décrire la partie cylindrique (ou conique en fonction de la cartouche) supérieure. Le bourrelet et éventuellement la gorge s'interposent entre ces deux parties. L'ouverture de la douille dans laquelle vient se loger normalement le projectile est appelée le « collet de la douille ».

La douille

La douille consiste généralement en un récipient métallique de forme cylindrique contenant les trois autres éléments principaux (amorce, charge propulsive et projectile). La manière dont une douille est conçue peut varier en fonction de plusieurs facteurs ; les plus importants sont le rôle de la munition, le type d'arme, le type de projectile employé et le système d'amorçage [Wallace, 2008]. D'autres formes plus ou moins courantes, telles que la forme conique ou en col de bouteille, existent.

Plusieurs matériaux différents peuvent entrer en ligne de compte dans sa composition (Figure 6). C'est le laiton qui est le plus souvent employé dans la fabrication des douilles ; le laiton des cartouches types contient environ 70% de cuivre et 30% de zinc. L'acier est également largement employé, surtout dans les pays de l'Est et en Chine. Afin de protéger les douilles en acier contre la rouille, elles sont souvent cuivrées, laitonnées (ou recouvertes de tombac) ou laquées [Labbett, 1982]. Il est aussi possible de trouver des douilles en aluminium (par exemple certaines cartouches fabriquées par CCI), en cuivre, en laiton recouvert d'une couche de nickel ou en cupronickel (approximativement 80% de cuivre et 20% de nickel) [Wallace, 2008]. Le zinc et les matériaux plastiques ne sont utilisés qu'expérimentalement.

¹⁷ www.ruag.com – Dernière consultation effectuée en date du 18 mars 2010

Le laiton est le métal le plus approprié parce qu'il est résistant, suffisamment ductile, adapté au processus de fabrication, de poids raisonnable, facilement disponible et il ne rouille pas [Wallace, 2008]. Les coûts liés à ce métal font de la douille la partie la plus chère de la cartouche. Ainsi, il est intéressant de pouvoir la récupérer pour la réutiliser [Serino, 2001].



Figure 6

Différents types de munitions, de gauche à droite : 7.62 x 39 mm, 5.45 x 39 mm, .357 Magnum, .38 Special et deux 9 mm Parabellum.

De manière générale, la fabrication moderne d'une douille en laiton pour des armes à percussion centrale débute par le découpage d'un petit disque de laiton ayant une épaisseur adéquate. Le disque est ensuite façonné jusqu'à ce qu'il prenne la forme d'une coupole (Figure 7). Cette coupole est ensuite entraînée dans des matrices de diamètres décroissants en forçant ainsi le matériel des parois à refluer vers le haut. L'épaisseur des parois diminue ainsi jusqu'à ce que cette coupole forme un tube cylindrique fermé à la base. En fonction de la forme de la douille, différentes opérations peuvent avoir lieu. Parmi ces dernières il peut y avoir la formation de l'emplacement destiné à la capsule d'amorçage, le fraisage de la gorge et la formation des événements (orifices permettant la communication entre l'amorce et la charge propulsive). Les dernières étapes de la fabrication permettent enfin à la douille de prendre ses dimensions finales [Serino, 2001].



Figure 7

Image représentant la série des étapes nécessaires pour la fabrication d'une douille¹⁸.

Les fonctions de la douille ne se limitent pas à contenir les autres composants d'une cartouche. En effet, une des plus importantes fonctions de la douille est de pouvoir se dilater lors du tir. Ceci permet de rendre la chambre à cartouche étanche ; sans cela les gaz s'échapperaient vers l'arrière. Une fuite des gaz pourrait réduire la vitesse du projectile et éventuellement créer un dysfonctionnement de l'arme [Wallace, 2008]. Lorsqu'une douille en

¹⁸ www.OLDammo.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 avril 2010

laiton est utilisée dans une arme, la pression des gaz produite par la combustion de la charge propulsive dilate hermétiquement la douille contre les parois de la chambre. Si le laiton est trempé à la dureté requise, il se contractera et reprendra approximativement ses dimensions initiales permettant une extraction plus aisée. Par contre, si le laiton est trop tendre, la douille ne reprendra plus ses dimensions initiales causant cette fois une extraction difficile. Enfin, si le laiton est trop dur, il se fendra [Di Maio, 1991 et Heard, 2008].

La partie inférieure de la douille doit être suffisamment résistante pour supporter le stress subi lors du tir et pendant l'extraction. En revanche, la partie supérieure doit être en même temps suffisamment résistante pour retenir le projectile et suffisamment ductile pour adhérer aux parois de la chambre à cartouche. Normalement, l'épaisseur des parois de la douille diminue donc de la base au sommet de cette dernière. Parfois, la partie destinée au sertissage est recouverte intérieurement de vernis juste avant que l'insertion du projectile ait lieu. Ceci permet d'accroître l'imperméabilité de la douille au niveau de la jointure ainsi que de fournir une plus grande résistance à la pression exercée par les gaz [Wallace, 2008].

L'amorce

Le terme d'amorce désigne à la fois l'explosif primaire, sensible au choc, et la capsule métallique contenant cet explosif. L'explosif primaire permet l'allumage de la poudre se trouvant dans la douille [Gallusser et al., 2002]. Contrairement aux cartouches de grand calibre qui comportent toujours un système d'amorçage à percussion centrale, celles utilisées pour des armes de petit calibre peuvent être classées en cartouches à percussion centrale ou annulaire en fonction de la position de l'amorce [Di Maio, 1991] (Figure 8).



Figure 8

Exemple d'une cartouche à percussion centrale (gauche) et annulaire (droite)¹⁹.

Dans les cartouches à percussion centrale, l'amorce consiste en une capsule de métal relativement mou, contenant une composition d'amorçage très sensible. Cette capsule est logée à la base de la douille. Cette loge communique avec l'intérieur de la douille par un ou plusieurs événements. Une capsule d'amorçage idéale devrait pouvoir se dilater suffisamment pour éviter une fuite des gaz et être suffisamment résistante pour supporter la frappe du percuteur et la pression développée par l'explosion de l'amorce et par la combustion de la poudre. Les capsules d'amorçage sont souvent composées d'une fine bande de laiton ou de cuivre, laquelle peut être nickelée. Des alliages de cuivre ou du cupronickel, comme de l'acier recouvert de zinc, peuvent également être employés. Certaines capsules d'amorçage peuvent être recouvertes de vernis afin d'assurer leur étanchéité, c'est notamment le cas des munitions

¹⁹ www.sellier-bellot.cz – Dernière consultation effectuée en date du 18 mars 2010

fabriquées par la compagnie tchèque Sellier & Bellot (S&B) (Figure 9). Sur certaines munitions, la coloration à l'aide de vernis est employée pour faciliter l'inspection visuelle lors de la fabrication ou pour identifier le type de projectile dans la cartouche [Wallace, 2008]. La dureté et l'épaisseur de la capsule sont choisies en fonction de l'arme dans laquelle la cartouche sera utilisée [Hatcher et al., 1977]. En effet, les capsules d'amorçage pour armes utilisant la poudre noire étaient fabriquées en cuivre tendre. Par contre, les capsules utilisées actuellement dans les cartouches à poudre sans fumée sont plus dures et plus « puissantes » car la pression ainsi que la violence de la frappe du percuteur sont devenues plus importantes ; la charge primaire reste également plus difficile à allumer. Le cuivre tendre est donc employé essentiellement pour les armes qui développent de faibles pressions. Les capsules d'amorçage utilisées, par exemple, pour des munitions de fusils d'assaut diffèrent en dimensions, épaisseur et quantité d'amorce (quantité de charge primaire) par rapport à celles employées dans les revolvers et les pistolets. En effet, la frappe du percuteur ainsi que la pression développée dans des fusils d'assaut est relativement plus importante [Wallace, 2008].

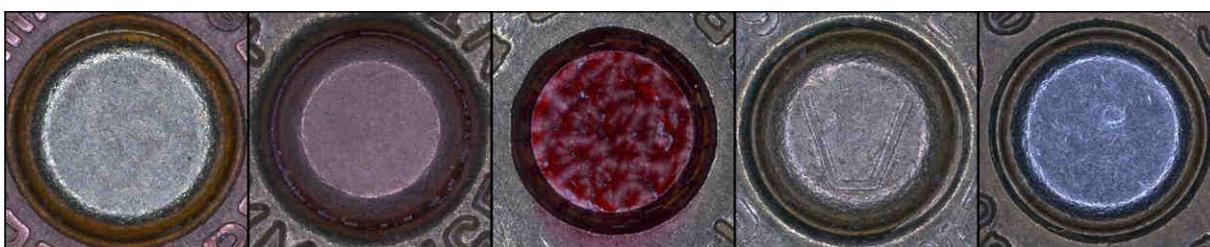


Figure 9

Capsules d'amorçage de composition différente dans des munitions 9 mm Parabellum (de gauche à droite – TPZ Kopp, Federal, S&B, Magtech et Geco Sintox®) .

Pendant le tir, lorsque le percuteur de l'arme vient frapper l'amorce, cette dernière va s'écraser sur une petite enclume, ce qui entraîne sa mise à feu ; une flamme pénètre alors à l'intérieur de la douille, provoquant l'inflammation de la charge propulsive principale [Labbett, 1982]. Ils existent deux types principaux d'amorces pour les cartouches à percussion centrale : Boxer et Berdan. Ces deux systèmes comportent des différences importantes au niveau de leur conception et donc de leur fonctionnement.

Les cartouches à percussion annulaire ne sont utilisées actuellement que pour les calibres .22, 6mm Flobert, ainsi que pour les cartouches pour pistolets d'abattage et de chantier. Dans le cas de munitions comportant ce genre de système d'amorçage, il n'y a pas à proprement parler de capsule d'amorçage, car l'explosif primaire est réparti dans le bourrelet du culot de la douille et s'enflamme lors de la compression du bourrelet contre l'épaule de la chambre à cartouche par le percuteur [Gallusser et al., 2002].

Plusieurs facteurs propres à la conception de la cartouche et qui ne sont pas liés directement avec la composition métallique de la douille ou de l'amorce influencent la qualité des traces laissées par une arme sur la douille. L'influence de ces facteurs sur la qualité des traces fera l'objet d'une discussion ultérieure (cf. Section N° 4.4.2).

3.3 Traces laissées par une arme sur une douille

Les matériaux constituant la munition sont généralement moins durs que ceux utilisés pour la fabrication des armes, par conséquent, les douilles recueillent les impressions des parties de l'arme avec lesquelles elles ont été en contact [Bonfanti, 1999]. Les prochains paragraphes

présentent les principales traces pouvant être retrouvées sur les douilles. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive ; des traces de nature très variée peuvent être observées sur une douille. Ceci est dû principalement au fait, qu'en fonction du mécanisme de l'arme, différentes interactions avec la douille peuvent avoir lieu. Il est donc difficile de décrire les traces de manière exhaustive. Les paragraphes suivants se focalisent principalement sur les traces laissées suite à un tir avec un pistolet semi-automatique ou une arme automatique. Ces exemples peuvent, en fonction du cas, être appliqués à des armes exploitant des mécanismes différents.

3.3.1 Traces antécédentes au tir

La surface d'une cartouche n'est jamais complètement lisse et polie. Une observation sous un microscope peut mettre en évidence plusieurs défauts morphologiques, surtout au niveau de la capsule d'amorçage qui est composée d'un métal relativement tendre par rapport au reste de la cartouche. Ces traces peuvent provenir de la fabrication de la douille ou suite à des chocs antécédents au tir. Les marques provoquées par des collisions antécédents au tir (ou postérieurs) sont souvent reconnaissables et peuvent être exclues comme étant laissées par l'arme. Au contraire, certaines marques produites lors de l'assemblage de la munition peuvent s'apparenter à des traces communément laissées par une arme [Tam, 2001].

En 2001, Tam divise les marques issues de la fabrication de la cartouche en trois catégories en fonction de l'influence qu'elles peuvent avoir pendant le processus de comparaison. La première catégorie présente les marques qui sont facilement identifiables et qui ne posent pas de problèmes pendant le processus de comparaison. Il s'agit notamment des logos imprimés sur les capsules d'amorçage comme c'est le cas des munitions Magtech (Figure 9 – 2^{ème} capsule d'amorçage à partir de droite). La deuxième catégorie est composée par les traces qui peuvent poser des problèmes pendant la comparaison, mais qui en même temps peuvent être pondérées avec des efforts de la part de l'expert. Sur la capsule d'amorçage, ce genre de traces peut parfois se présenter sous la forme d'un ensemble de stries (Figure 10). Ces traces, qui peuvent être confondues, par leur nature, avec des traces laissées par la tête de culasse, plongent souvent à l'intérieur de la trace du percuteur ce qui permet à l'expert de les reconnaître et de les exclure comme étant des marques laissées par l'arme (Figure 11). La troisième catégorie inclue les traces de fabrication qui peuvent être problématiques pendant la comparaison et difficiles à interpréter [Tam, 2001].

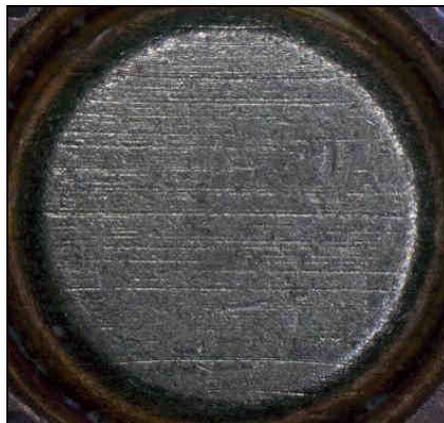


Figure 10

Traces produites lors de la fabrication de la cartouche sur une munition TPZ Kopp 9 mm Parabellum.



Figure 11

Stries laissées durant la fabrication de la cartouche se prolongeant jusqu'à l'intérieur de la trace du percuteur.

D'autres marques, telles que des traces glissées sur les bords de la capsule, peuvent être présentes sur des douilles non tirées. Ces dernières peuvent résulter des opérations qui ont lieu pendant le placement de la capsule d'amorçage dans son emplacement dans la douille. Pendant le processus de fabrication des munitions Remington, un premier poinçon vient pousser la capsule d'amorçage à l'intérieur de la douille. Un deuxième poinçon ajuste la position de la capsule jusqu'à sa position finale qui devrait être à quelques micromètres en-dessous de la surface de la douille. Une éventuelle défectuosité au niveau des poinçons pourrait ainsi créer des défauts sur la capsule d'amorçage [Yborra et al., 2004].

Parfois, les traces laissées lors de la fabrication de la cartouche sont reproduites sur un ou plusieurs lots de munitions. Il est donc important de contrôler les munitions avant d'effectuer des tirs de référence avec une arme suspecte afin de pouvoir exclure l'arme en question comme source potentielle de ces marques. Des munitions du même type peuvent également présenter des marques de fabrication complètement différentes ; lors des tirs de référence il est donc possible d'observer des différences importantes entre les douilles [Heard, 2008].

Pour classifier ce genre de marque le terme « trace parasite » sera employé dans la suite du document.

Suite au tir, la douille n'est pas forcément éliminée ; elle peut être récupérée pour être rechargée afin de pouvoir l'employer dans une nouvelle cartouche. De manière générale, lors du rechargement, la douille tirée retrouve ses dimensions initiales et la capsule d'amorçage qui a été percutée est retirée. Cette dernière est remplacée par une nouvelle capsule, une charge de poudre appropriée est introduite dans la douille avant que le sertissage du projectile ait lieu [Serino, 2001]. Ainsi, la « nouvelle » cartouche possède sur le corps et le culot de la douille les traces du tir précédent (exception faite par la capsule d'amorçage). Les différentes étapes qui ont lieu lors du rechargement peuvent également imprimer des traces sur la surface de la douille. Il est donc tout à fait possible qu'une douille tirée présente une multitude de traces laissées par des tirs antérieurs et par des rechargements successifs. Enfin, d'autres marques peuvent être présentes sur une douille avant que la cartouche soit tirée, il s'agit des traces laissées par l'introduction antérieure de la cartouche dans une arme sans qu'un tir ait eu lieu.

3.3.2 Traces laissées par l'arme

Traces laissées suite au chargement de l'arme et à l'armement du système de percussion

L'expression « charger une arme » désigne l'ensemble des opérations nécessaires pour introduire une cartouche dans la chambre à cartouche, alors que le terme « armer » est employé pour décrire l'opération effectuée pour armer le système de percussion. Une arme peut être considérée prête à tirer seulement une fois qu'elle est chargée et armée. Pour charger une arme, il est nécessaire d'introduire les cartouches dans le magasin ; ce dernier est ensuite introduit dans l'arme. Le mouvement de charge amène la première cartouche dans la chambre à cartouche à proximité du canon en passant par la rampe d'alimentation et permet également l'armement du système de percussion.

Traces des lèvres du magasin

L'introduction des cartouches dans le magasin et leur passage dans la chambre à cartouche peuvent laisser des traces, moulées ou glissées, causées par le contact avec les lèvres du magasin. Ces traces, qui peuvent être observées sur le corps et le bourrelet de la douille se présentent normalement sous la forme de stries parallèles à l'axe longitudinal de la douille (Figure 12) [Bonfanti, 1999].



Figure 12

Traces des lèvres du magasin laissées par un pistolet semi-automatique Beretta 92 S calibre 9 mm Parabellum.

Traces laissées lors du passage vers la chambre à cartouche

Le mouvement de la glissière, qui permet le passage de la cartouche vers la chambre, peut également laisser des traces sur le corps de la douille et éventuellement sur le bord du culot. Lorsque la glissière glisse vers l'arrière, la première cartouche dans le magasin peut entrer en contact avec le fond du bloc de culasse (Figure 13). Ce dernier peut laisser des traces le long du corps de la douille [Haag, 2005]. Selon Lin et al., la qualité de cette trace pourrait dépendre de la quantité des cartouches présentes dans le magasin [Lin et al., 2004]. En effet, les dernières cartouches, qui sont normalement soumises à une pression plus faible du ressort à l'intérieur du magasin, peuvent présenter des traces moins marquées et plus courtes par rapport aux autres munitions.

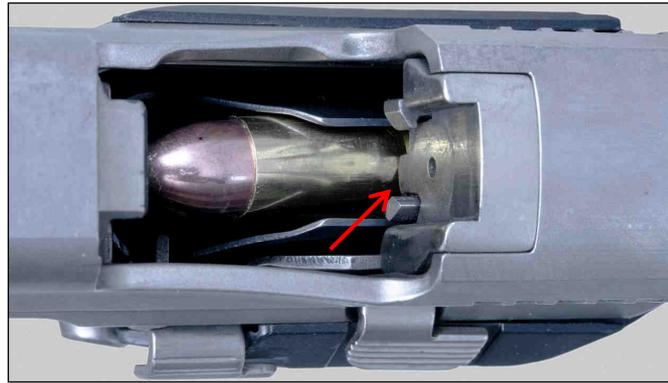


Figure 13

Contacts entre la douille et le fond du bloc de culasse lors du mouvement de charge (flèche rouge).

Une fois que la glissière arrive à bout de course, elle revient vers l'avant pour chamberer une nouvelle cartouche (Figure 14). À ce moment, une trace peut s'imprimer sur le bord du culot de la douille suite au contact avec la partie inférieure du bloc de culasse [Lin et al., 2004 et Haag, 2005]. Cette trace se présente souvent sous la forme d'un ensemble de stries délimitées par une zone en forme de demi-lune.



Figure 14

Contact entre la douille et la partie inférieure du bloc de culasse lors du passage de la cartouche dans la chambre (flèche rouge).

En fonction de l'arme, il est également possible d'observer des traces glissées laissées par la rampe d'alimentation de l'arme. Si la rampe d'alimentation de l'arme se trouve en-dessous du canon, ces traces se trouveront à 6 heures par rapport aux traces citées ci-dessus.

En fonction de la façon dont l'arme a été conçue et de la manière dont elle a été chargée lors du chargement, l'extracteur peut toucher le bord du culot avant de frotter contre le bourrelet pour enfin saisir la douille dans la gorge. Il est donc possible d'observer trois traces laissées par le contact avec l'extracteur avant que l'extraction ait lieu [Haag, 2005 et Bonfanti, 1999]. En revanche, si la façon dont l'arme a été conçue prévoit que la cartouche passe en-dessous et derrière l'extracteur pendant le chargement, la seule trace observable sera une petite entaille dans la gorge de la douille ou, pour des munitions dépourvues de gorge, sur la surface supérieure du bourrelet [Haag, 2005].

Traces diverses

Pendant l'introduction de la cartouche dans le magasin, le contact entre les différentes cartouches peut entraîner la formation des traces qui peuvent être définies comme parasites [Bonfanti, 1999].

Traces laissées suite à la percussion de la capsule d'amorçage

Lorsque le système de percussion est relâché suite à la pression sur la détente, le percuteur vient frapper l'amorce, laquelle, à son tour, initie l'allumage de la charge propulsive. Une grande pression est développée à l'intérieur de la chambre à cartouche. L'augmentation de la pression pousse la douille vers la tête de culasse et le corps de la douille se dilate pour adhérer aux parois de la chambre afin de minimiser la perte de pression [Di Maio, 1991].

Trace du percuteur

Il s'agit d'une trace moulée qui est le résultat du mouvement perpendiculaire (sauf exception) du percuteur par rapport à la capsule d'amorçage. Celui-ci vient frapper l'explosif primaire sensible au choc. Dans le cas d'une cartouche à percussion centrale, le percuteur frappera sur la capsule d'amorçage qui se trouve au centre du culot de la douille (Figure 15). Par contre, pour des munitions comportant un système d'amorçage à percussion annulaire, le percuteur frappera le bourrelet de la douille.



Figure 15

Détail d'une trace du percuteur laissée par un pistolet semi-automatique Beretta 92 FS Compact calibre 9 mm Parabellum. Le fond de la trace ainsi qu'une partie des bords présentent les stigmates laissés par l'arme.

Les traces du percuteur, qui se présentent souvent, pour des cartouches à percussion centrale, sous la forme d'un cratère, peuvent également comporter à l'intérieur, des stries concentriques, des lignes droites ou des conformations particulières de tout type [Davis, 1958]. Le diamètre de la tête du percuteur varie suivant le modèle d'arme ; en revanche, l'intensité de l'empreinte laissée peut également varier pour la même arme d'un tir à l'autre [Formaggio, 1949], surtout si la dureté des capsules d'amorçage ou des bourrelets varie entre un tir et un autre. En outre, la profondeur de la trace du percuteur n'est pas un critère à prendre en considération lors de la comparaison entre deux traces. En effet, elle peut varier largement pour un même lot de munitions [Bonfanti, 1999]. Cette caractéristique dépend de plusieurs facteurs, comme entre autre, la pression développée par la cartouche [Burrard, 1951].

Un autre aspect lié à la trace du percuteur, pouvant varier d'un tir à l'autre, est la position de cette trace par rapport à celle de la tête de culasse. Ce phénomène est accentué pour des armes qui comportent un percuteur rotatif. Souvent, ce type d'armes produit des traces du percuteur qui ne sont pas reproductibles. C'est également le cas pour des douilles tirées par des armes où la position du percuteur peut varier en fonction de l'inclinaison de l'arme [Gallusser et al., 2002].

Il est aussi possible qu'une pression trop élevée soit développée lors du tir en poussant la trace du percuteur vers l'extérieur, qui par conséquent, apparaîtra en relief. Deux cartouches de charge différente tirées par la même arme, peuvent donc, en observant la trace du percuteur, se différencier macroscopiquement [Hatcher et al., 1977]. Des phénomènes plus particuliers peuvent être liés à l'impression laissée par le percuteur. C'est notamment le cas du *flow-back*. Ce dernier a lieu lorsque l'arme possède un trou du logement du percuteur trop large permettant ainsi, lors du tir, à la capsule d'amorçage de « couler » à l'intérieur et autour du percuteur. La formation d'un cratère autour de la trace du percuteur peut aussi s'expliquer par le développement d'une pression trop élevée lors du tir [Kreiser, 1995].

Trace de la tête de culasse

Cette trace moulée provient de l'impression des caractéristiques de surface de la tête de culasse sur le culot de la douille, causée par la forte pression engendrée par le tir. Ce type de trace ne se trouve donc que lorsque la munition a été tirée. Les dessins généraux des traces de la tête de culasse se distinguent des caractéristiques imprimées lors de la fabrication de l'arme et peuvent être classés principalement en quatre catégories : lignes parallèles, à cercles concentriques, à arc ou lisse (Figure 16). Les détails de l'impression de la tête de culasse dépendent de plusieurs facteurs, dont la charge propulsive, l'acuité du dessin de la tête de culasse, le type de fabrication de la tête de culasse, la malléabilité du métal composant la douille et la pression dans la chambre à cartouche. Cette dernière varie, pour un même calibre, en fonction du poids du projectile, de la qualité et de la quantité de la charge propulsive ainsi que de la propreté du canon. Des cartouches, générant des pressions plus basses, présentent souvent des traces de la tête de culasse de qualité médiocre. La saleté et les résidus de plomb dans l'arme peuvent également réduire les détails de surface imprimés sur le culot lors du tir [Davis, 1958 et Tulleners, 2001]. Ce genre de trace s'imprime mieux sur la capsule d'amorçage, car cette dernière est normalement composée d'un métal plus malléable que le reste du culot de la douille. Toutefois, il n'est pas rare qu'elles puissent être révélées également sur d'autres parties du culot constituées d'un métal plus dur [Burrard, 1951]. Les douilles à percussion annulaire sont normalement constituées d'un métal relativement dur, tel que le laiton, et le recul engendré lors du tir est minime. Par conséquent, ces cartouches recueillent moins fréquemment les traces de la tête de culasse [Davis, 1958].



Figure 16
Traces de la tête de culasse.

À cause de l'emplacement des traces de la tête de culasse sur la surface de la douille, il faut être particulièrement attentif pendant l'observation de ces traces, car certaines munitions à percussion centrale possèdent des marques, souvent similaires à celles laissées par l'arme (cf. Section N° 3.3.1), qui ne sont pas consécutives au tir (traces parasites), mais qui résultent du processus de fabrication de la cartouche [Tam, 2001].

Trace laissée par des parties en creux de la tête de culasse

Il s'agit d'une trace qui est laissée sur le culot de la douille lors du tir. Il s'agit de marques laissées principalement par des parties de la surface de la culasse qui résultent en creux par rapport au reste de la tête de culasse. Les images ci-dessous montrent les caractéristiques morphologiques de cette trace ainsi que la partie de l'arme qui cause la déposition de cette trace (Figure 17).



Figure 17

Trace laissée par une partie de la culasse du FAss90 qui résulte en creux par rapport au reste de la tête de culasse.

Trace de la chambre à cartouche

Les traces de la chambre à cartouche peuvent être, soit des traces glissées, soit des traces moulées. Elles s'impriment essentiellement sur le corps de la douille [Bonfanti, 1999]. Ces traces sont obtenues lors du départ du coup. En effet, les gaz produits lors du tir provoquent la dilatation de la douille, ainsi, elle adhère à la chambre à cartouche et lors de ce contact, les défauts de surface de la chambre à cartouche peuvent être transférés sur le corps de la douille²⁰. La rugosité de la chambre à cartouche peut également griffer la surface extérieure d'une douille lorsqu'elle est éjectée de la chambre, mais également lorsqu'elle est chargée. Ce genre de traces peut être confondu, de part leur nature et de leur localisation, avec des traces préexistantes dues à la fabrication de cette dernière [Bonfanti, 1999]. En outre, la chambre à cartouche peut également laisser des marques dans la gorge de la douille lors du processus de chargement de la cartouche [Bonfanti, 1999].

Les traces produites par la chambre à cartouche peuvent avoir plusieurs formes. Il est possible d'observer des stries parallèles à l'axe longitudinal de la douille. Par contre, dans certains pistolets (Savage et Steyer par exemple), le canon tout comme la chambre à cartouche, tournent légèrement lorsque la douille (ou la cartouche) est retirée. Etant donné que la douille est retirée de manière linéaire par l'extracteur, cette opération donne lieu à des traces hélicoïdales le long du corps de la douille [Davis, 1958].

²⁰ www.firearmsid.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

Occasionnellement, il est possible d'observer une série de marques parallèles sur le corps d'une douille tirée par une arme rayée. De telles marques correspondent à la présence d'une chambre cannelée dans l'arme. Pendant la fabrication de l'arme, les petites cannelures parallèles sont taillées dans la chambre pour permettre à la cartouche de « flotter » sur les gaz en facilitant ainsi l'extraction. Les armes rayées Heckler & Koch (H&K) ont des chambres cannelées [Di Maio, 1991] ; c'est notamment le cas du pistolet semi-automatique H&K P7 de calibre 9 mm Parabellum (Figure 18).

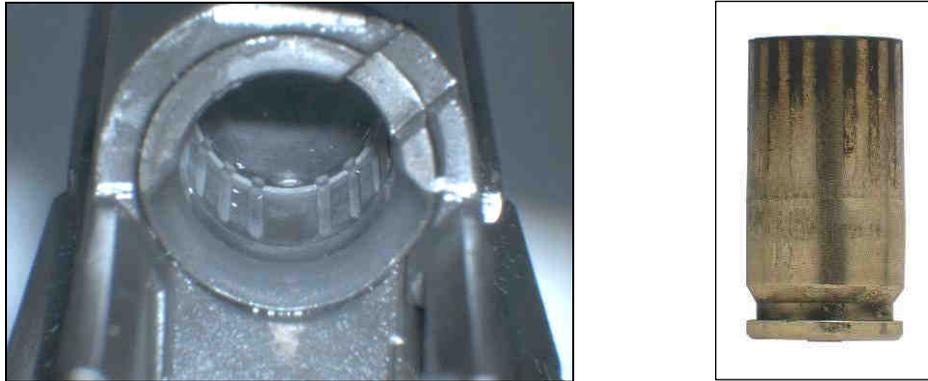


Figure 18

Chambre à cartouches cannelée du pistolet semi-automatique H&K P7 (à gauche) et traces laissées par ce genre de chambre à cartouche (à droite).

D'autres types de chambres à cartouche existent ; ces dernières peuvent également posséder des anneaux circulaires, des cannelures hélicoïdales ou encore des perforations. Ces systèmes sont normalement prévus soit pour faciliter l'extraction, comme par exemple dans le cas des cannelures hélicoïdales, soit pour retarder le processus d'extraction [Heard, 2008].

Traces laissées pendant l'éjection de la douille

Une fois que la pression dans la chambre à cartouche commence à diminuer, suite au départ du projectile, la douille reprend ses dimensions initiales et la glissière commence à reculer [Di Maio, 1991]. L'extracteur saisit la douille dans la gorge (pour une douille à gorge) et la tire vers l'arrière. Aux deux tiers de sa course environ, le culot de la douille vient heurter l'éjecteur. La douille est éjectée à travers la fenêtre d'éjection [Gallusser et al., 2002].

Trace de l'extracteur

La trace d'extracteur est, par nature, une trace glissée, située normalement dans la gorge de la douille ou sur la surface supérieure du bourrelet (Figure 19). En fonction de l'arme, les traces d'extracteur peuvent s'imprimer sur la douille simplement lors de l'éjection de la cartouche sans que le tir ait lieu ; dans ce cas de figure les traces résultantes peuvent être moins marquées par rapport aux traces laissées lors du tir [Lin et al., 2004]. La présence ou l'absence de cette trace sur le bord supérieur du bourrelet dépend également du système de verrouillage de l'arme. En effet, cette trace sera plus facilement observable sur des douilles tirées par des armes pourvues de système de verrouillage. Sur une arme qui n'est pas équipée d'un système de verrouillage de la culasse, l'extracteur n'est pas fonctionnel, puisque la douille est littéralement expulsée de la chambre à cartouche. Pour ce genre d'armes, l'extracteur est donc présent pour permettre l'extraction de la cartouche pendant le déchargement manuel de l'arme [Haag, 2005].

Lors du processus de fabrication des cartouches, la machine introduisant les capsules d'amorçage, ou d'autres machines destinées à la fabrication des douilles, peuvent laisser des traces similaires aux traces laissées par l'extracteur ; phénomènes qui impliquent une certaine prudence lors de l'observation de ces traces [Bonfanti, 1999].



Figure 19

Trace de l'extracteur sur la partie supérieure du bourrelet d'une douille tirée par un pistolet semi-automatique Glock® 21 calibre 10 mm Auto.

Trace de l'éjecteur

La trace laissée par l'éjecteur est généralement une trace moulée, imprimée sur le culot de la douille (Figure 20). Elle peut également se présenter sous la forme d'une trace glissée²¹. Les traces laissées par l'éjecteur peuvent être utilisées à des fins d'identification, ainsi que pour déterminer si la douille a bien été tirée. En fonction de l'arme, les traces d'éjecteur peuvent se reproduire seulement si la cartouche vient d'être tirée. En effet, il faut une certaine pression, et donc une certaine force pour produire ce genre de trace sur le culot d'une douille²². Une simple éjection manuelle d'une cartouche chambrée ne pourrait pas laisser des traces avec la même intensité. Il en est de même pour des armes qui possèdent un système d'éjection manuel, comme par exemple des carabines à répétitions manuelles [Haag, 2005].

Certaines armes possèdent deux éjecteurs ; dans ce cas de figure, la présence de deux traces donne des indications précieuses concernant le type d'arme employée. Dans d'autres armes, c'est le percuteur ou les lèvres du magasin qui font office d'éjecteur [Burrard, 1951]. Dans ce dernier cas, la trace d'éjecteur observée normalement ne sera donc pas présente. Le nombre de traces d'éjecteurs, mais surtout leur disposition sur la douille, sont une information importante afin de déterminer l'orientation de la douille lors d'une comparaison [NRC, 2008].

Lors de la recherche des traces d'éjecteur, il faut être attentif au fait qu'au cours du processus de fabrication de certaines cartouches, des traces ayant la même forme et le même emplacement que des traces d'éjecteur, peuvent s'imprimer sur la douille [Bonfanti, 1999]. En outre, il s'agit d'une trace qui dépend de la pression développée par la cartouche. De ce fait, les douilles faisant partie de cartouches développant une pression importante, posséderont des traces d'éjecteur bien marquées et distinctes, contrairement aux cartouches qui développent une faible pression lors du tir [Burrard, 1951].

²¹ www.firearmsid.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

²² www.firearmsid.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010



Figure 20

Trace de l'éjecteur du fusil d'assaut suisse FAss 90.

L'analyse de la trace de l'éjecteur peut être difficile car elle se retrouve souvent imprimée sur le bord du culot de la douille, zone présentant les inscriptions du fabricant de la cartouche [NRC, 2008].

Autres traces dues à l'éjection

Lorsqu'une douille est éjectée, il est parfois possible d'observer un aplatissement du collet de la douille (Figure 21 – à gauche). En effet, cette dernière peut frapper la glissière lors de l'éjection [Hatcher et al., 1977]. Pendant cette étape, il est également possible que la douille entre en contact avec la partie postérieure de la porte d'éjection [Haag, 2005]. Ce contact peut causer la formation d'une petite trace glissée sur le corps de la douille. Les images ci-dessous montrent cette trace laissée par un fusil d'assaut suisse FAss 90 de calibre 5.6 Suisse (GP 90 / Figure 21 – à droite).



Figure 21

Aplatissement du collet d'une douille tirée par le fusil d'assaut suisse FAss 90 (à gauche). Trace laissée par le contact avec la fenêtre d'éjection du FAss 90 (sur la droite).

Trainée du percuteur

L'action du percuteur ne se limite pas toujours à une simple impression sur la capsule d'amorçage, il peut être également à la source d'autres phénomènes. C'est notamment le cas de la formation de la « trainée du percuteur ». Cette dernière est une trace glissée qui est liée à la trace du percuteur. Ce type de trace glissée est causée, dans le cas des revolvers, par une frappe oblique du percuteur [Hatcher et al., 1977 et Bonfanti, 1999]. Par contre, dans le cas des pistolets semi-automatiques, la présence d'une telle trace glissée est due à l'interaction entre le percuteur et la capsule d'amorçage lors des phases préliminaires de l'éjection de la

douille (Figure 22). Une fois que la phase principale de combustion a eu lieu, le percuteur peut rester enfoncé (pendant une fraction de second) dans la capsule d'amorçage. Certains canons s'abaissent légèrement pendant que le recul force l'ouverture de la culasse (comme les pistolets Glock®). La douille, qui se trouve encore dans la chambre à cartouche, s'abaisse avec le canon, en causant ainsi une traînée de la pointe du percuteur sur la capsule d'amorçage [Lin et al., 2004]. La reproductibilité de ce genre de trace n'est pas toujours constante. Entre plusieurs tirs effectués l'un après l'autre, il est tout à fait possible de constater des différences morphologiques plus ou moins importantes au niveau de la traînée du percuteur (Figure 22).

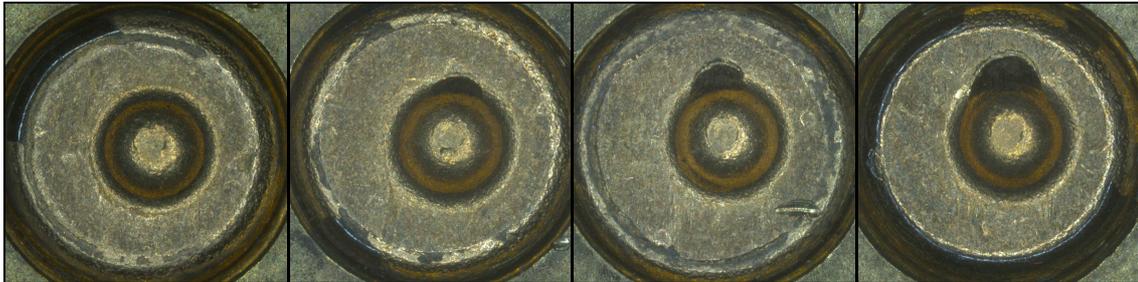


Figure 22

Trace du percuteur avec traînée sur des cartouches tirées par le même pistolet semi-automatique SIG Sauer P226 calibre 9 mm Parabellum.

Shear Marks

Le terme anglais *Shear marks* est employé pour décrire des traces glissées qui peuvent parfois être en relation avec la trace du percuteur (Figure 23). Pendant le recul, la douille est plaquée vers l'arrière, la capsule d'amorçage peut ainsi s'enfoncer dans le trou du logement du percuteur (Figure 24). Ce phénomène peut être facilité par l'utilisation d'une capsule d'amorçage tendre, d'une charge d'amorçage ayant une certaine puissance ou par le développement d'une forte pression dans la chambre [Hatcher et al., 1977].

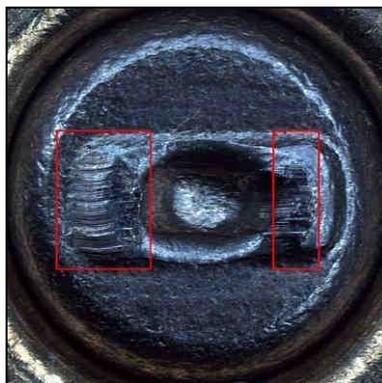


Figure 23

Shear Marks laissées par un pistolet semi-automatique Glock® 19 calibre 9 mm Parabellum.

Dès que la glissière du pistolet commence à reculer, le canon s'abaisse légèrement lors de l'ouverture de la culasse. Le mouvement du canon déplace la douille vers le bas. Lorsque ce phénomène a lieu, la partie de la capsule d'amorçage enfoncée dans le trou du logement du percuteur subit une abrasion contre les bords de ce dernier²³. Cette abrasion, qui se trouve

²³ www.firearmsid.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

aux extrémités de la trace du percuteur, se présente sous la forme d'un ensemble de stries (Figure 23).

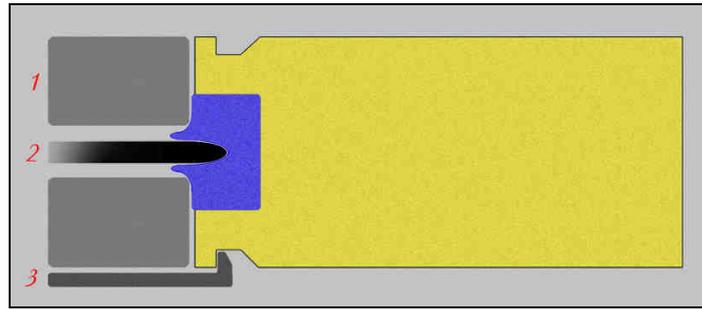


Figure 24

Schéma montrant la formation des *Shear Marks* – (1) Culasse ; (2) Percuteur ; (3) Extracteur.

Cette trace n'est pas toujours d'intensité égale; néanmoins, certaines armes laissent de telles traces de manière relativement reproductible. C'est notamment le cas des pistolets semi-automatiques Glock® et S&W Sigma. Ces derniers possèdent un grand trou du logement du percuteur dans la tête de culasse, de forme rectangulaire.

3.3.3 Les caractéristiques de classe

Dans le chapitre précédent (cf. Section N°2.2), les caractéristiques de classe, les caractéristiques de sous – classe ainsi que celles considérées comme individuelles ont été définies. Concrètement, la quantité et le type de caractéristiques de classe pouvant être observées dépend du type d'arme et de son fonctionnement. Par exemple, la présence d'une chambre à cartouches cannelée est considérée comme une caractéristique de classe. Les traces laissées par une telle partie de l'arme sur une douille peuvent donc être utilisées pour restreindre le nombre d'armes potentielles en excluant les armes ne pouvant pas imprimer de telles traces sur une douille. Les caractéristiques de classe le plus souvent exploitées sont les suivantes : le calibre nominal de l'arme, la forme du percuteur et de la tête de la culasse (Figure 16), ainsi que la position relative entre l'extracteur et l'éjecteur. En fonction du type d'arme, d'autres caractéristiques de classe peuvent être décrites et exploitées.

3.3.4 Traces postérieures au tir

Suite à l'éjection, en fonction de l'environnement, la douille peut heurter différents objets avant d'atterrir sur le sol. Chaque choc qui a lieu suite à l'éjection de l'arme peut entraîner des traces. Ces dernières, qui sont souvent facilement différenciables des traces laissées par l'arme, peuvent être considérées comme des traces « dites parasites ».

3.3.5 Considérations finales

Les types et le nombre de traces qu'il est possible d'observer sur une douille tirée peuvent varier de manière importante en fonction du type et du modèle de l'arme. En effet, il n'est pas possible de trouver des traces d'extracteur, d'éjecteur ou des lèvres du magasin dans le cas de douilles tirées par un revolver. Certaines traces peuvent être absentes et d'autres peuvent

être multiples de par les actions répétées du chargement et du déchargement de l'arme avec les mêmes munitions [Formaggio, 1949].

Lors du tir, en fonction de l'arme employée, d'autres phénomènes physiques qui n'ont pas été cités dans ce document peuvent avoir lieu. Des traces très communes peuvent se présenter sous différentes formes ou avec des caractéristiques plus inhabituelles. La littérature dans ce domaine présente plusieurs exemples qui peuvent être considérés comme particuliers ; mais le but de ce document n'est pas d'effectuer un résumé exhaustif des différents cas de figure auxquels il est possible de faire face lors de l'observation d'une douille.

3.4 Résumé du chapitre

Ce chapitre a été consacré à la présentation des principales traces qui peuvent être observées sur la surface d'une douille ainsi qu'aux parties d'une arme qui entrent en contact avec la cartouche pendant les différentes phases du tir. Les notions présentées ci-dessus sont nécessaires pour la compréhension de la suite du document.

4 FABRICATION DES PARTIES CONSTITUTIVES D'UNE ARME ET LA VALEUR INDICIELLE RÉSULTANTE

Ce chapitre est consacré aux techniques utilisées pour la fabrication des principales parties d'une arme qui entrent en contact avec la douille lors du tir. Il s'agit d'un chapitre particulièrement important dans le domaine de l'identification des armes à feu car il est impératif de connaître les fondements de la fabrication des armes lors de l'interprétation des résultats d'une comparaison, ceci, afin de pouvoir faire une distinction entre les traces propres à une arme et les caractéristiques qui, à cause du processus de fabrication, peuvent être retrouvées sur plusieurs armes différentes (caractéristiques de sous – classe). Il s'agit donc de connaissances de base qu'un expert en armes à feu devrait posséder pour pouvoir évaluer correctement les différentes caractéristiques observées.

Dans la littérature, ce sujet est de plus en plus traité mais les informations présentes sont encore relativement limitées et difficilement généralisables. Ceci est principalement dû au fait que les techniques de fabrication diffèrent souvent d'un fabricant à l'autre et sont fonction du type d'arme fabriquée et de la qualité finale de l'arme souhaitée par le fabricant. Les paragraphes suivants présentent un résumé de la littérature concernant les techniques employées pour la fabrication des pièces constitutives d'une arme à feu. Les informations se concentrent majoritairement sur les pistolets semi-automatiques. L'extrait de la littérature est également enrichi par des informations récoltées lors de deux visites effectuées respectivement chez les fabricants Sphinx (Suisse) et Carl Walther (Allemagne).

Ce chapitre permet non seulement de compléter les concepts présentés jusqu'ici, mais également de fournir les informations nécessaires pour que le lecteur puisse comprendre avec une vision plus élargie les problématiques auxquelles il est possible de faire face dans ce domaine.

4.1 Fabrication des pièces constitutives d'une arme – Extrait de la littérature

4.1.1 Généralités

En ce qui concerne les matériaux utilisés dans la fabrication des parties composant une arme, l'acier est le métal le plus utilisé. L'acier peut être présent sous différentes formes selon la dureté que l'on souhaite atteindre. D'autres matériaux peuvent être employés pour certaines extensions, comme le bronze qui a déjà été utilisé pour la fabrication des percuteurs ou les alliages en aluminium pour la fabrication de la carcasse de l'arme. Enfin, l'acier inoxydable est utilisé pour la fabrication des cylindres des gaz. Plusieurs composants subissent un traitement thermique dans le but de renforcer le métal ou pour diminuer l'effet de l'usure [Hatcher et al., 1977]. D'autres matériaux peuvent entrer en ligne de compte. Par exemple, les carcasses de plusieurs pistolets semi-automatiques modernes sont fabriquées en polymère. C'est

notamment le cas des pistolets Glock® [Gallusser et al., 2002]. Le titane peut également être employé.

Pendant la fabrication des parties de l'arme, plusieurs traitements ont lieu en fonction de la pièce fabriquée. Des actions de coupage, fraisage, perçage peuvent avoir lieu, suivies par des traitements de finition et de polissage. Certaines parties de l'arme, malgré leur construction en série par des procédés techniques spéciaux, peuvent être finies manuellement en utilisant une lime, une toile d'émeri ou du papier de verre [Formaggio, 1949 et Lambert, 1989].

Les machines utilisées pour la fabrication d'armes emploient des technologies de plus en plus modernes. A l'heure actuelle, la plupart des fabricants utilisent des machines guidées par des ordinateurs (CNC). Ces opérations effectuées en séquence permettent de fabriquer plusieurs pièces l'une après l'autre. Ce type de production permet également de vérifier pendant la fabrication de la pièce que les standards de qualité sont respectés. Une pièce qui dépasse les limites physiques préalablement fixées est automatiquement écartée [Coffman, 2003].

En fonction des capacités de l'usine ou des technologies à disposition, un fabricant peut décider d'importer certaines pièces. C'est souvent le cas de pièces telles que le percuteur ou le magasin. Mais il peut s'agir également de pièces plus importantes, telles que le canon. Pendant le processus de fabrication, les pièces importées sont assemblées aux pièces fabriquées sur place.

4.1.2 La tête de culasse

La culasse, qui est souvent une partie intégrante de la glissière, est d'abord coupée [Burrard, 1951], ensuite, fraisée, limée et enfin polie. La tête de culasse peut être fraisée ou tournée sur un tour de précision [Rowe, 1988]. Les opérations de fraisage qui interviennent la plupart du temps dans la fabrication des culasses font tourner une fraise pour enlever le métal. Ils existent deux types principaux de fraisage [Lopez et al., 2000]:

- *Face milling*: fraisage qui engendre la formation de cercles concentriques sur la surface traitée.
- *Peripheral milling*: fraisage qui est à l'origine de la formation de stries parallèles sur la surface traitée.

D'autres types de fraisage peuvent être employés pour la fabrication de ce genre de pièce (Figure 25).

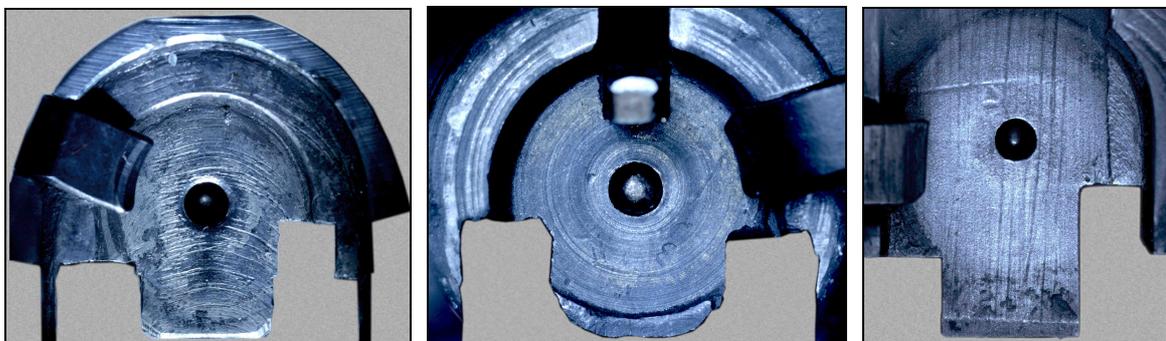


Figure 25

Trois types de tête de culasse appartenant respectivement aux pistolets Beretta 92 S (gauche), Walther P08 (centre) et Colt Delta Gold Cup (droite).

C'est notamment le cas du fraisage qui emploie un outil cylindrique tournant sur lui-même. En utilisant sa partie supérieure et/ou sa partie latérale, l'outil en question permet de fraiser la tête de culasse. De cette opération résulte la formation de plusieurs arches sur la surface en question. Les pistolets semi-automatiques fabriqués par Beretta et ses clones fabriqués par Taurus présentent souvent un dessin de la tête de culasse caractérisé par un ensemble d'arches (Figure 25 et Figure 26) [Kennington, 1995].



Figure 26

Type d'outil utilisé pour fraiser les têtes de culasse (à gauche). Le dessin résultant de l'utilisation de ce type d'outil est un ensemble d'arches (à droite).

Les outils utilisés dans le fraisage sont fabriqués de manière à ce qu'ils arrivent à résister à l'abrasion. Ils sont donc souvent composés d'acier de haute qualité, parfois durci avec des matériaux plus durs, tels que le carbure de tungstène ou de chrome [Lopez et al., 2000].

Suite au fraisage, la tête de culasse peut subir plusieurs étapes de finition. Elle peut être également finie manuellement par un travail vertical de limaille [Rowe, 1988]. D'autres types de travaux de finition peuvent être effectués, comme par exemple le coupage des bords du trou du logement du percuteur, du polissage, du sablage, du brunissage, etc. [Coody, 2003 et Kennington, 1995]. Les travaux de finition peuvent à la fois atténuer le dessin grossier laissé par les étapes de fraisage et ajouter des caractéristiques plus fines à la surface traitée.

D'autres techniques existent pour la fabrication de la tête de culasse, certaines moins communes que d'autres. Par exemple, la tête de culasse du pistolet semi-automatique Sphinx 3000 est fabriquée par un type de coupage utilisant des techniques d'électroérosion. Ce genre de coupage donne des surfaces très lisses. Différentes étapes de finition sont ensuite effectuées sur la pièce²⁴. Une autre technique employée moins fréquemment dans la fabrication de la culasse comporte l'utilisation d'un moule. C'est notamment le cas de la fabrication des pistolets BBM .315 Auto produits par le fabricant italien Bruni (Figure 27 – à gauche). Selon les informations fournies par le NFI (*Nederlands Forensisch Instituut*)²⁵, il s'agit d'un pistolet d'alarme 8 mm (8 mm Knal) qui a été converti pour pouvoir tirer du 6.35 mm Browning. Le bloc de culasse ainsi que l'entérite de la glissière sont fabriqués par moulage en utilisant du Zamack (alliage de Zn, Al et d'autres éléments en trace). Après le moulage, seuls de petits travaux de finition sont effectués. Il est donc possible d'imaginer que lors de la fabrication, les caractéristiques du moule peuvent donc être transférées à plusieurs armes (Figure 27 – à droite).

²⁴ Communication personnelle – Fabrique d'armes Sphinx, 2005.

²⁵ Recherche présentée par Rob Hermsen du NFI à l'ENFSI Meeting 2007 à Prague.

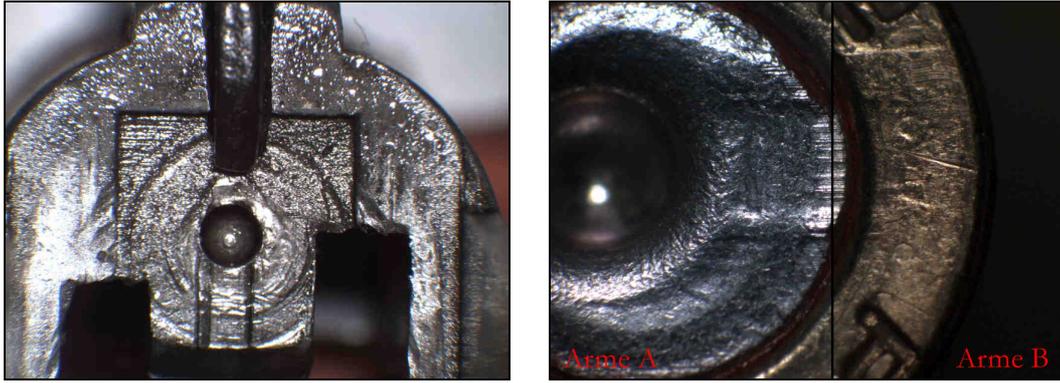


Figure 27

Image d'une tête de culasse (à gauche) et d'une comparaison des traces de la tête de culasse sur des douilles tirées par deux BBM .315 Auto (à droite)²⁵.

4.1.3 Le percuteur

Le percuteur peut être fabriqué sur un tour ou aplati manuellement par limage [Rowe, 1988] avant d'être soumis à des étapes de dessablage et de durcissement [Matty et al., 1984]. La fabrication du percuteur utilisant un tour s'effectue de la manière suivante : une tige en acier tourne sur elle même et entre en contact avec un outil qui permet de donner la forme à la pointe du percuteur (Figure 28).

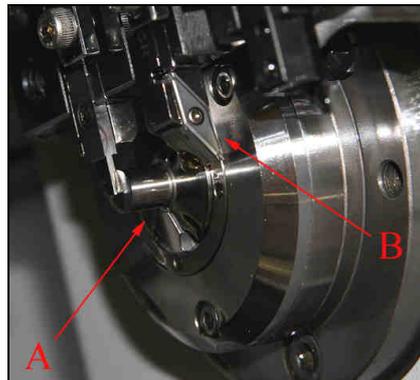


Figure 28

Fabrication du percuteur. Une tige d'acier (A) est coupée par contact avec la lame (B).

Ces opérations peuvent causer la formation des cercles concentriques sur la pointe du percuteur. Une partie de ces marques peuvent se trouver partiellement ou complètement effacées par les travaux de finition. Ces derniers peuvent également inclure des étapes de polissage et brunissage par traitement de surface. Les percuteurs peuvent aussi être durcis par des procédés à chaud²⁶. Les figures suivantes montrent des images représentant des mesures tridimensionnelles de deux percuteurs fraisés. Le premier, n'ayant subi aucune étape de finition, présente plusieurs traces concentrique provenant du fraisage (Figure 29 – à gauche). Suite à des étapes de polissage et de brunissage, les traces visibles sur le deuxième percuteur sont atténuées par rapport au premier (Figure 29 – à droite).

²⁶ Communication personnelle – Fabrique Fredec AG, 2007.

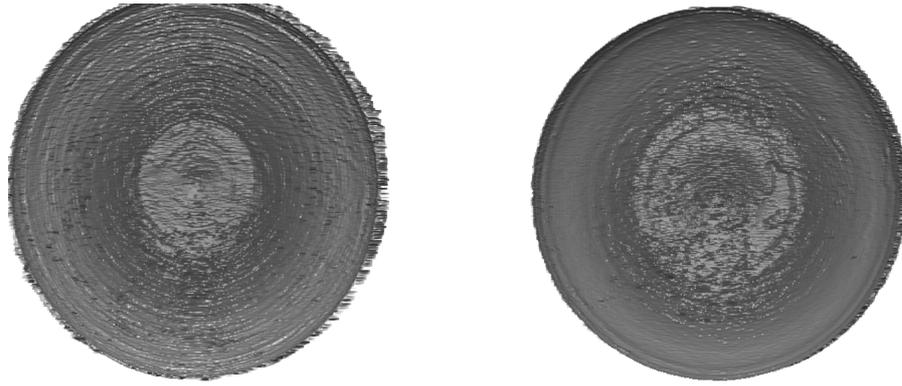


Figure 29

Pointe du percuteur suite au fraisage (à gauche) et suite au polissage et au brunissage (à droite).

Selon Hatcher, aucun effort spécial n'est effectué afin d'enlever les traces d'outil laissées sur le percuteur après la fabrication de ce dernier, car elles n'interfèrent pas lors du contact avec l'amorce [Hatcher et al., 1977]. Les percuteurs peuvent, par contre, subir différents traitements de finition en fonction de l'arme dans laquelle ils seront introduits [Burrard, 1951].

4.1.4 L'extracteur

Les seules informations concernant la fabrication des extracteurs collectées dans la littérature proviennent d'un article de Nichols en 2004 et d'un article de Lyons en 2009. Les deux articles se réfèrent à la fabrication de l'extracteur utilisé par le pistolet semi-automatique Colt 1911. Lors de la fabrication des extracteurs, des barres de métal subissent deux entailles à l'aide d'une fraise horizontale [Nichols, 2004]. Pendant ces opérations, le crochet de l'extracteur est usiné. La plupart des caractéristiques présentes sur l'extracteur sont créées suite à cette première étape. D'autres traces peuvent être retrouvées sur les pièces suite à leur stockage (qui regroupe les extracteurs en lots de 500 pièces). Une coupure est effectuée par la suite en utilisant une fraise verticale. Les bavures résultantes de cette opération sont enlevées manuellement en utilisant des lames (Figure 30). Les outils employés pour fraiser l'extracteur doivent être remplacés après environ 1000 – 1500 pièces. Les étapes de fraisage sont suivies par plusieurs processus de finition, tels que des traitements thermiques, du polissage (*glass blasting*) ainsi qu'une déposition d'oxyde noir pour protéger les pièces [Lyons, 2009].



Figure 30

L'extracteur peut être retouché manuellement après fraisage.

Suite au fraisage, les extracteurs peuvent également être polis et finis à la main à l'aide d'une lime. Ces étapes peuvent être aussi suivies par un brunissage de la pièce²⁷.

4.1.5 La chambre à cartouche

La chambre à cartouche peut être fabriquée en utilisant la technique du martelage. Il s'agit d'une technique couramment utilisée pour la fabrication des canons [Montet, 1986].

4.1.6 L'éjecteur

Comme beaucoup d'autres pièces, les éjecteurs peuvent être fabriqués par fraisage puis polissage (Figure 31). D'autres traitements de surface peuvent également être effectués.



Figure 31

Introduction d'un lot d'éjecteurs dans un bac permettant le polissage de petites pièces métalliques.

4.2 Fabrication du Walther P99 calibre 9 mm Parabellum

La fabrique d'armes Carl Walther située à Ulm a pu être visitée en décembre 2007. Nombreuses informations intéressantes concernant la fabrication de la tête de culasse, l'importation des pièces ainsi que leur assemblage ont pu être recueillies. Ces informations, qui se réfèrent à la fabrication du pistolet semi-automatique P99 calibre 9 mm Parabellum, sont résumées dans les paragraphes suivants.

L'usine fabrique différentes pièces pour les armes en utilisant principalement le processus basé sur le CNC. En ce qui concerne le métal employé pour la fabrication des pièces principales d'une arme, l'acier est largement employé. L'acier utilisé dans la fabrique Walther est mélangé à des petites quantités d'autres composants tels que le molybdène afin d'accroître la qualité de l'acier.

La culasse du P99 est fabriquée par fraisage. L'étape plus importante d'un point de vue forensique consiste dans le coupage de la tête de culasse (Figure 32).

²⁷ Communication personnelle – Fabrique d'armes Sphinx, 2005.

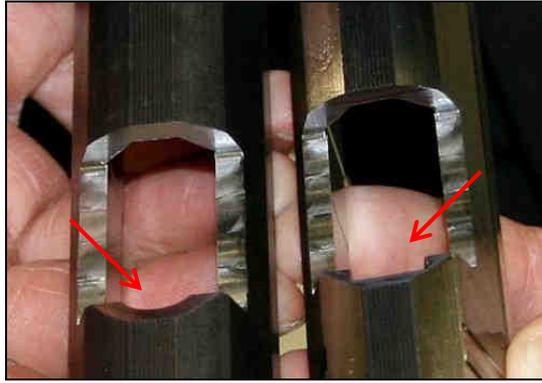


Figure 32

Tête de culasse d'un P99 avant (à gauche) et après le coupage (à droite).

Le coupage est effectué à l'aide d'un long outil dentelé qui est constitué d'une barre ayant une série de dents métalliques de taille croissante (Figure 33). Cette barre passe à l'intérieur de la fenêtre d'éjection en coupant progressivement la forme rectangulaire de la tête de culasse. Lorsque la barre est complètement passée à travers la fenêtre d'éjection, la tête de culasse possède une forme rectangulaire d'une profondeur bien définie (Figure 32 – à droite). Le travail de coupage ainsi que le frottement entre l'outil et la culasse laissent des stries perpendiculaires sur la surface de la tête de culasse (Figure 33 – à droite). Il s'agit d'une procédure similaire à celle employée par Smith & Wesson dans la fabrication des culasses du S&W 40 VE Sigma [Rivera, 2007].

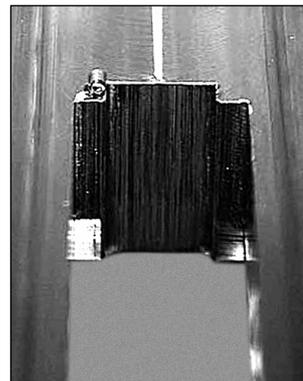


Figure 33

Coupage de la tête de culasse à l'aide d'un long outil dentelé (à gauche) et stries engendrées par cette opération (à droite).

Les étapes qui suivent sont principalement des étapes de finition et de traitement de surface. Les traitements de finition comportent le sablage, le polissage et des traitements chimiques de surface. Suite à ces traitements, la surface de l'arme apparaît plus foncée et les défauts présents sur la tête de culasse se retrouvent atténués ou complètement effacés.

En ce qui concerne la chambre à cartouche, suite au rayage du canon par olivage, les bords du canon et de la chambre sont ensuite limés (arrondis). Une fois que les différents traitements chimiques et physiques ont été appliqués à la pièce, cette dernière, composée par le canon, la chambre à cartouche et la rampe d'alimentation, est placée dans un bac à ultrasons pendant 5 minutes. Ensuite, la rampe d'alimentation est polie avec du papier de verre (Figure 34).



Figure 34
Polissage de la rampe d'alimentation.

D'autres pièces moins importantes en termes de taille, telles que les percuteurs ou les extracteurs, ne sont pas fabriquées par Carl Walther, mais elles sont usinées ailleurs, importées et assemblées aux autres pièces. Des travaux de finition de ces pièces peuvent également avoir lieu avant l'assemblage.

4.3 Assemblage des pièces

Les parties d'armes construites de manière consécutive, présentent souvent plusieurs similitudes au niveau morphologique. Dans le cas hypothétique où toutes les pièces d'une arme sont construites et assemblées de manière consécutive, il est possible de s'imaginer que deux armes, construites l'une après l'autre, ne puissent transférer sur une douille que des traces difficilement différenciables. Dans une telle situation, malgré que l'on prenne en considération l'ensemble des traces présentes sur deux douilles, il pourrait être parfois difficile d'identifier correctement les armes les ayant tirées. Il est donc nécessaire de déterminer dans quelle mesure deux armes possédant un numéro de série successif, puissent être composées par des pièces construites consécutivement. Malheureusement, peu d'informations concernant l'assemblage des pièces sont disponibles dans la littérature.

Selon les informations à disposition, les fabricants ne font aucun effort pour assurer la consécutive des pièces pendant l'assemblage (Figure 35). Il est donc évident que des numéros de série en séquence ne signifient pas forcément que les pièces de l'arme en question ont été construites de manière consécutive. Des exceptions peuvent tout même être observées. C'est notamment le cas des pistolets semi-automatiques H&K USP où les numéros de série consécutifs indiquent que les glissières ont été construites consécutivement [NRC, 2008].

En revanche, aucune relation n'existe entre l'ordre de fabrication et d'assemblage pour des pièces moins importantes en termes de taille, telles que les percuteurs, les extracteurs, etc. (Figure 35). Les pièces peuvent être mélangées plusieurs fois pendant les différentes étapes de la fabrication de l'arme. A titre d'exemple, les pièces peuvent être polies toutes en même

temps dans un même bac (Figure 31). De plus, l'assemblage de certaines pièces importées n'est pas non plus soumis à une réglementation.



Figure 35

Mélange avant l'assemblage de canons (à gauche) et de perceurs (à droite).

Etant donné la grande quantité d'armes qui peut être produite dans une fabrique et les mélanges des pièces qui peuvent avoir lieu pendant la fabrication, il est statistiquement très improbable de trouver une arme qui comporte toutes ou une grande partie des pièces construites consécutivement.

4.4 Considérations sur la valeur indicielle des traces sur les douilles

La valeur indicielle d'une trace dépend fortement du processus employé pour fabriquer la pièce de l'arme ayant laissé la trace en question. En effet, la présence de caractéristiques de sous – classe ainsi que d'une partie des caractéristiques individuelles dépend du processus de fabrication employé. Certaines traces peuvent s'avérer plus sélectives que d'autres à cause de la présence de caractéristiques dites individuelles. Dans d'autres cas, leur valeur peut diminuer à cause d'une mauvaise reproductibilité, de la présence de caractéristiques de sous – classe ou d'autres facteurs externes influençant la déposition de la trace.

4.4.1 Valeur indicielle des traces

Dans les paragraphes suivants, la valeur indicielle des traces pouvant être observées sur une douille est prise en considération, tout comme les paramètres pouvant l'influencer. Il s'agit ici de facteurs généraux ; la valeur indicielle d'une trace dépend de plusieurs facteurs et doit donc être évaluée cas par cas.

Trace de la tête de culasse

D'après la littérature, il s'agit d'une des traces les plus caractéristiques parmi les traces laissées par une arme sur la surface d'une douille lors du tir. Toutefois, elles n'ont pas toujours des particularités qui permettent à elles seules d'être un élément certain d'individualité [Formaggio, 1949].

Même s'il s'agit d'une trace ayant normalement une valeur indicielle considérable, la trace de la tête de culasse peut être particulièrement sensible aux caractéristiques de sous – classe (Figure 36). Ceci est dû principalement aux techniques d'usinage des têtes de culasse et au

processus qui a lieu lors de l'impression de ce type de trace sur une douille. En effet, contrairement au cas des projectiles, qui eux voyagent dans le canon lors du tir en ajoutant plusieurs variables à la formation des traces, l'impression des traces sur les douilles manque de dynamisme. C'est pour ces raisons que certaines traces sur les douilles sont particulièrement sensibles au transfert des caractéristiques de sous – classe [Nichols, 2004].

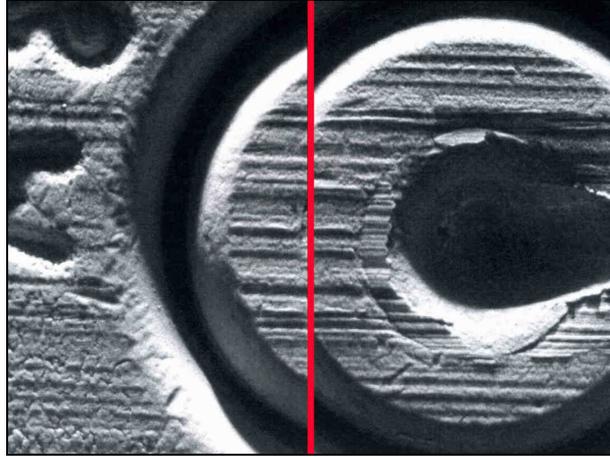


Figure 36

Exemple de caractéristiques de sous – classe. Concordances entre des douilles tirées par armes différentes ayant un numéro sériel proche [Rivera, 2007].

Trace du percuteur

En général, les traces moulées, telles que les traces du percuteur, ne suffisent pas à elles seules pour aboutir à une identification. En effet, il est souvent possible d'observer des percuteurs qui ne transfèrent pas un niveau de détail suffisant pour permettre de se prononcer sur une éventuelle source commune [Tulleners, 2001]. Néanmoins, il est possible de trouver des traces du percuteur qui présentent des caractéristiques suffisantes pour lier une douille à l'arme l'ayant tirée [Gallusser et al., 2002].

Comme dit précédemment, la trace du percuteur peut présenter à l'intérieur des stries concentriques (Figure 37). Ces dernières ne peuvent pas toujours être utilisées pour une identification car elles peuvent présenter des caractéristiques de sous – classe [Matty et al., 1984]. Dans ce genre de cas, il faut se référer à d'autres types de caractéristiques, telles que des interruptions dans les cercles ou autres défauts [Nichols, 2004]. Une grande attention doit donc être employée afin de différencier les traces considérées comme individuelles des caractéristiques moins discriminantes.

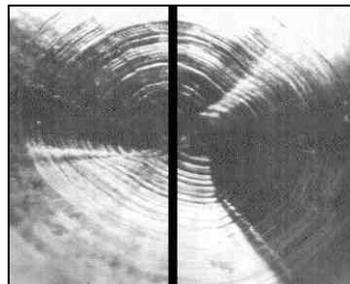


Figure 37

Comparaison des traces laissées par deux percuteurs construits consécutivement [Matty et al., 1984].

La grande quantité de facteur qui entre en ligne de compte lors de l'impression de cette trace peut affecter de manière importante la reproductibilité de la trace du percuteur. Il est donc parfois possible d'observer des traces morphologiquement différentes laissées par la même arme.

En ce qui concerne les *Shear Marks*, elles possèdent une valeur considérable dans l'identification d'une arme [Hatcher et al., 1977]. Ceci est principalement dû aux techniques de fabrication et de finition du trou du logement du percuteur. Ces dernières résultent souvent dans la formation d'irrégularités au niveau des contours du trou où le percuteur est logé. En outre, la reproductibilité de ce type de trace semble être très stable indépendamment du nombre de tirs effectués [Gouve et al., 2008].

En ce qui concerne les douilles à percussion annulaire, la marque du percuteur est la trace la plus exploitable à des fins d'identification. Les traces d'extracteur, d'éjecteur et de la tête de culasse sont moins utilisées [Di Maio, 1991].

Trace de l'éjecteur

Lorsque la trace d'éjecteur se présente sous la forme de trace moulée, elle ne peut que rarement être exploitée à des fins d'identification, car elle est souvent très peu marquée et ne présente pas de caractéristiques très probantes [Gallusser et al., 2002]. En outre, la reproductibilité des traces d'éjecteur n'est pas toujours constante. Il est donc possible d'observer des différences entre deux douilles tirées par la même arme. Ceci peut être dû à une différence de pression lors du contact.

Trace de l'extracteur

L'extracteur ne laisse pas toujours des traces permettant le rapprochement entre une douille et l'arme l'ayant tirée. Il s'agit notamment du cas où la cartouche est simplement chamberée manuellement et extraite sans que le départ du coup ait lieu²⁸. En effet, la trace laissée lors de l'extraction d'une douille après un tir peut être marquée d'une manière plus prononcée qu'une trace d'extraction consécutive à une manipulation de l'arme [Burrard, 1951].

Trace des lèvres du magasin

Ces traces peuvent éventuellement être utilisées à des fins d'identification, mais il faut garder à l'esprit que le magasin est une pièce interchangeable. Par conséquent, l'identification concernera le magasin et non pas l'arme elle-même. Il faut également tenir compte que, lors du remplissage du magasin, des mouvements aléatoires ont lieu. Ceci a pour conséquence un manque de reproductibilité entre les traces. De plus, des cartouches peuvent être introduites plusieurs fois dans le magasin avant d'être tirées, ce qui implique la présence de plusieurs traces des lèvres du magasin sur la même douille [Davis, 1958].

Trace de la chambre à cartouche

Les traces laissées par les parois internes de la chambre à cartouches peuvent parfois être peu constantes et souvent peu caractéristiques [Formaggio, 1949]. Néanmoins, lorsque ce genre de traces se reproduit de manière constante, leur valeur peut être considérable. Enfin, les traces laissées par une chambre à cartouche cannelée peuvent être provoquées par différents

²⁸ www.firearmsid.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

types d'armes et, le cas échéant, peuvent permettre une identification de l'arme [Bonfanti, 1999].

4.4.2 La reproductibilité des traces – Sources de variabilité

Une multitude de facteurs entre en ligne de compte lors d'un tir. Par conséquent, il est tout à fait normal d'observer des variations entre un tir et le prochain. Ces variations entraînent automatiquement des différences au niveau des détails des traces transférées sur la douille. Les détails des traces laissées par la tête de culasse sont influencés par la pression développée pendant le tir. Pour un même calibre, cette pression dépend de facteurs tels que le poids du projectile, la charge et le type de poudre, le type de rayage du canon, etc. D'autres facteurs importants, tels que le type de fabrication et d'entretien de l'arme, influencent la déposition de cette trace sur la douille. Une basse pression ainsi que des saletés accumulées dans l'arme peuvent également réduire les détails de la trace.

Un autre facteur qui influence de manière très importante la déposition des traces est le type de cartouche employée. La dureté de la capsule d'amorçage peut être un facteur primordial. Entre des tirs effectués avec des cartouches différentes, les traces peuvent se présenter de manière si différente qu'il n'est plus possible de les mettre en relation. Même si la dureté de la capsule demeure un facteur important, la déposition des traces ne dépend pas uniquement d'elle, mais également de la manière avec laquelle la capsule est installée dans la douille [Tulleners, 2001].



Figure 38

Reproductibilité des traces laissées par un pistolet semi-automatique Glock® calibre 9 mm Parabellum en fonction de la munition employée (de gauche à droite – Geco Sintox®, TPZ Kopp, Remington et S&B).

Certaines caractéristiques des traces peuvent évoluer dans le temps. Par exemple, les détails et la configuration de la tête de culasse peuvent se trouver réduits ou oblitérés par des dépôts provenant des tirs effectués précédemment. Ce phénomène se répercute directement sur la qualité des traces imprimées sur la capsule d'amorçage. Le dépôt pouvant se créer sur la tête de culasse peut être constitué par les résidus de poudre, de la saleté ou de l'accumulation du plomb [NRC, 2008]. Enfin, tout simplement, certaines armes reproduisent de manière constante les traces alors que d'autres présentent des variations plus ou moins importantes en fonction de la munition utilisée.

4.4.3 L'évolution des traces – Effet de stabilisation

Le *Settle-In effect* est défini comme le phénomène qui a lieu pendant les premiers tirs effectués par une arme sortie de la fabrique. Pendant ces tirs, les traces transférées sur les éléments de

munitions peuvent changer considérablement, ce qui empêche parfois de lier les différentes douilles ou projectiles entre eux. Après quelques tirs, la déposition des traces se stabilise et les changements deviennent moins importants, ce qui rend l'identification d'une arme possible [NRC, 2008]. Dans une étude menée par Thompson en 1996, il a été observé que les traces laissées par contact avec la tête de culasse pouvaient beaucoup évoluer pendant les premiers tirs. Ce phénomène est principalement dû à l'effacement de la peinture présente sur la tête de culasse [Thompson, 1996]. Une fois les changements stabilisés, des modifications morphologiques peuvent encore avoir lieu suite à l'utilisation de l'arme. Ces variations peuvent être plus ou moins accentuées et dépendent de plusieurs facteurs, telles que, par exemple, les conditions et l'entretien auxquels l'arme est sujette. A noter que l'utilisation d'une arme ne se limite pas uniquement aux tirs, mais également à la manutention, aux manipulations, aux démontages, ainsi qu'à tous les phénomènes qui peuvent éventuellement altérer, même de manière infime, la morphologie d'une arme [Bonfanti et al., 1999].

4.4.4 Autres facteurs influençant le processus d'identification

Les douilles retrouvées sur les scènes de crime peuvent être exposées aux éléments naturels et subir des altérations. En outre, selon l'entretien des armes, les abrasions ainsi que la corrosion des parties internes d'une arme peuvent modifier les stigmates laissés lors du tir. La corrosion peut être due soit à un mauvais entretien de l'arme, soit à l'utilisation de munitions ayant des amorces corrosives. Des tirs de comparaison effectués avec une arme qui a subi une corrosion importante peuvent altérer de manière permanente la « signature » de l'arme. Cette altération peut être telle qu'une mise en relation avec des douilles tirées précédemment ne puisse plus être effectuée. Il est évident que le problème de la corrosion n'est pas seulement lié aux parties intérieures de l'arme mais également aux éléments de munitions collectés [NRC, 2008].

4.4.5 Contremesures prises par les criminels

Certaines parties d'une arme peuvent être remplacées. A titre d'exemple, le bloc de culasse d'un pistolet semi-automatique SIG Sauer 9 mm Parabellum peut être remplacé dans sa totalité. Une telle modification laisse uniquement l'éjecteur comme pièce originale. D'autres contremesures peuvent être entreprises par les criminels dans le but d'effacer la « signature » d'une arme. Certaines parties de l'arme peuvent subir des modifications. Ces modifications peuvent effacer une partie ou la totalité des stigmates de l'arme mais peuvent également créer des nouvelles caractéristiques individuelles [NRC, 2008].

4.5 Résumé du chapitre

Ce chapitre a mis en avant un humble résumé concernant les méthodes de fabrication d'une arme. Les informations présentées sont souvent limitées au cas restreint du pistolet semi-automatique. Cela n'empêche pas que ces informations puissent être appliquées dans d'autres cas de figure. Le résumé de la littérature a été enrichi par des informations concernant la fabrication du pistolet semi-automatique Walther P99 de calibre 9 mm Parabellum. La fin de ce chapitre a été consacrée à des appréciations concernant la valeur indicielle des traces laissées par une arme sur une douille.

5 L'APPROCHE QUANTITATIVE

Afin de remplir les objectifs fixés pour cette recherche, la mise en place d'une procédure permettant de décrire systématiquement une comparaison doit être établie. Cette étape peut sembler relativement simple et peu importante, mais il s'agit d'une problématique qui, jusqu'à nos jours, n'a pas encore trouvé de solution simple et universelle.

5.1 Description d'une comparaison

Les traces présentes sur deux douilles sont comparées afin de pouvoir mettre en évidence aussi bien leurs similitudes que leurs différences. Les observations effectuées sont souvent claires pour la personne qui a mis deux traces en relation. Cette clarté vient souvent à manquer lorsqu'il est nécessaire de transmettre les résultats obtenus à une ou plusieurs personnes ou d'expliquer ce qui a été observé. Il n'y a pas de lignes directrices préétablies pour la description des observations effectuées. Cette dernière peut tout aussi bien se faire au moyen d'une simple appréciation qualitative qu'à l'aide de chiffres symbolisant le niveau de ressemblance entre deux traces.

L'approche qualitative consiste donc dans une appréciation qualitative et personnelle des ressemblances et des différences présentes entre deux traces. Cette approche semble être relativement simple, mais cette simplicité est contrebalancée par plusieurs inconvénients. En effet, même avec l'établissement de critères employés pour décrire une comparaison, cette procédure reste toujours peu objective. En outre, la situation actuelle fait transparaître un manque de langage commun pouvant être employé pour décrire les résultats d'une comparaison à une autre personne ou à un laboratoire. Il découle de ce manque de langage commun l'impossibilité de pouvoir transmettre des résultats de manière transparente et universellement compréhensibles. Mais il est clair, que par sa nature, une appréciation qualitative se prête bien à la description des observations effectuées à l'aide du macroscopie comparateur. En effet, il est relativement simple de décrire l'image ci-dessous (Figure 39). L'aspect général des traces présente diverses similitudes. Plusieurs concordances peuvent être également observées au niveau des cercles concentriques laissés par la tête de culasse ainsi qu'au niveau du bord de la trace du percuteur. Enfin, les traces du percuteur se présentent sous une forme relativement lisse, sans caractéristique particulière. Malgré que cette description reste plutôt compréhensible, cela ne signifie pas forcément qu'une tierce personne la décrive de la même manière ou qu'elle y attribue la même signification.



Figure 39

Image d'une comparaison entre deux douilles tirées par la même arme.

En revanche, l'approche quantitative permet d'exprimer avec des valeurs numériques les résultats d'une comparaison. L'utilisation de chiffres pour décrire une comparaison, dans un contexte bien défini, permet une compréhension plus aisée par rapport à une description qualitative. Malgré cela, décrire des similitudes ou des dissimilitudes au moyen d'un chiffre n'est pas forcément synonyme d'objectivité. En fonction de la procédure de comparaison adoptée, le processus peut rester subjectif, la reproductibilité peut donc être compromise. Enfin, une approche quantitative permettrait des analyses statistiques qui seraient plus difficilement envisageables avec une approche qualitative. Typiquement, l'approche quantitative est employée par des systèmes de comparaison automatique qui décrivent chaque comparaison par un ou plusieurs *scores*. Exception faite de l'approche basée sur les CMS, l'emploi du microscope comparateur se prête moins bien à la quantification des similitudes entre deux traces, surtout si elles se présentent sous la forme de traces moulées. Néanmoins, plusieurs modèles ont déjà été proposés dans ce but.

Malgré le fait que, le microscope comparateur demeure d'utilisation facile et d'emploi fréquent dans les laboratoires forensiques, l'approche quantitative est plus appropriée dans l'optique d'une recherche de ce type ; l'emploi d'un système assisté par un ordinateur est donc un choix plus adapté à ce genre d'approche. Dans le cadre de cette recherche, la solution retenue a été l'emploi d'une approche quantitative basée sur un système de comparaison automatique. Ce choix est soutenu par les arguments suivants :

- Une approche quantitative a été privilégiée pour des raisons liées tout d'abord à la facilité avec laquelle les résultats peuvent être exploités statistiquement. Ensuite, ce choix est défendu, d'une part, par la transparence des résultats obtenus et d'autre part, par l'absence de moyens qualitatifs, permettant de décrire une comparaison de manière claire et universelle.
- Le système assisté par ordinateur a été choisi pour permettre de bâtir des bases solides sur lesquelles développer le reste de la recherche. Un tel système permet facilement de quantifier une comparaison. Ce n'est pas le cas pour les techniques de comparaison traditionnelle. En effet, quelle que soit la nature des traces, les modèles prévus pour quantifier les résultats proposés dans la littérature ne remplissent pas les conditions nécessaires, en termes d'objectivité et reproductibilité, afin qu'elles puissent être prises en considération pour cette recherche.
- Un des aspects le plus importants lié à l'emploi d'un système assisté par ordinateur réside dans le fait qu'une comparaison automatique est un processus totalement

reproductible, sans aucune (ou très minime) intervention externe de la part de l'opérateur. Un tel niveau de reproductibilité peut être difficilement atteint par l'emploi du microscope comparateur.

- Un dernier aspect à prendre en considération concerne la capacité de gérer des quantités de données importantes. Un système de comparaison automatique permet, à priori, de gérer et de comparer entre elles une grande quantité de traces en un temps relativement limité par rapport à celui nécessaire pour effectuer la même charge de travail à l'aide des techniques de comparaison traditionnelles.

5.2 Systèmes de comparaison automatique

La structure d'un système de comparaison automatique est composée principalement de deux parties. Une permettant l'acquisition de données relatives aux traces présentes sur une douille et l'autre la comparaison de ces données dans le but d'exprimer numériquement les similitudes entre deux traces.

5.2.1 Acquisition des données

L'information contenue dans une trace peut être visualisée et analysée de différentes manières, en fonction du système d'acquisition qui a été choisi. Il est possible de regrouper ces derniers en deux grandes classes : les techniques représentant l'information sur deux dimensions, au moyen d'une image, et celles représentant l'information en trois dimensions. Une partie de ces techniques a été résumée et leur fonctionnement est décrit en annexe (cf. Annexe A).

5.2.2 Comparaison de l'information acquise

Quelle que soit la technique d'acquisition employée et le type de données en résultant, la comparaison entre deux traces s'effectue selon des principes similaires à ceux exploités par les systèmes de comparaison automatique déjà existants. Les informations concernant les systèmes de comparaison automatique ne se limitent pas uniquement aux systèmes commercialement disponibles, mais également aux recherches effectuées sur ce sujet. Parmi ces recherches, certaines ont abouti à des produits concrets qui sont actuellement utilisés dans les laboratoires balistiques. D'autres restent des recherches exploratoires.

Systèmes de comparaison automatique en 2D

Systèmes balistiques commercialement disponibles

Il existe actuellement plusieurs systèmes de comparaison automatique disponibles sur le marché, qui exploitent les résultats d'une acquisition de données en deux dimensions. Il est possible de citer des systèmes du type BrassTRAX[®] développé par Forensic Technologies[®], le système Arsenal ABIS de Papillon Systems, les systèmes Bis Poisc et Evofinder[®], etc. Le principe de base d'une comparaison automatique reste, sans exception, similaire pour les différents systèmes développés jusqu'à aujourd'hui. Généralement, l'image de la trace est prise dans des conditions standardisées. Etant donné que le résultat de l'acquisition est une image digitale et qu'elle peut être représentée comme une matrice numérique ; cette dernière peut

donc subir des traitements mathématiques pour mettre en évidence les caractéristiques propres aux traces laissées par l'arme. Une fois cette étape terminée, une « signature » de l'image est extraite et comparée aux autres signatures présentes dans une base de données, à l'aide d'un algorithme (dont les spécificités sont propriétaires) et d'une fonction de corrélation. Le système fournit alors les résultats sous la forme d'une liste composée par les candidats qui présentent les corrélations les plus élevés. Généralement, les systèmes de comparaison automatiques exploitent les traces du percuteur, de la tête de culasse et accessoirement la trace laissée par l'éjecteur.

L'ancien système de comparaison automatique développé par Forensic Technologies[®], IBIS[®] représente l'intégration de deux systèmes séparés : Bulletproof[™] pour les projectiles et Brasscatcher[™] pour les douilles. La procédure d'acquisition pour la partie du système destinée à la comparaison des douilles débute avec la déposition de la douille sur un statif. L'orientation de cette dernière est dictée par la direction des traces de tête de culasse, la position de l'éjecteur et éventuellement la direction de la trainée du percuteur. Une orientation préliminaire est donc nécessaire. Une fois l'objet introduit dans le système d'acquisition, l'opérateur doit délimiter, à l'aide de simples formes géométriques, les régions d'intérêt telles que la capsule d'amorçage et la trace du percuteur (Figure 40). Cette opération est suivie par la capture des images. Plusieurs images sont acquises : une image sous éclairage annulaire diffus, une image sous éclairage direct (pour mettre en évidence la trace de la tête de culasse mais qui ne sera pas utilisée à des fins de corrélation) et enfin une image de détail de la trace du percuteur sous éclairage annulaire. Il est également possible de définir une région pour l'acquisition d'images de la trace de l'éjecteur sous un éclairage direct. Cette pratique n'est pas effectuée en routine en raison des difficultés liées à l'acquisition des images de ce type de trace [NRC, 2008].

Durant l'étape de comparaison, deux versions d'une « signature » sont créées à partir des images acquises, une contenant un haut niveau de détail, mais qui nécessite beaucoup temps de calcul, et l'autre, moins détaillée mais plus efficiente en termes de calcul [NRC, 2008]. L'algorithme qui effectue l'extraction de la « signature » et la comparaison de cette dernière avec d'autres « signatures » procède de la manière suivante. Le processus de corrélation consiste en la rotation de l'image acquise jusqu'à l'obtention de l'angle de rotation qui correspond à l'indice de corrélation maximal. L'ordinateur reconnaît le contour des formes grâce aux techniques de reconnaissance des formes connues dans le domaine. Pendant le processus de comparaison, les contours des traces de tête de culasse et du percuteur sont analysés. L'algorithme de corrélation prend en considération la largeur, la longueur, la profondeur et d'autres caractéristiques géométriques pour calculer une valeur numérique de corrélation entre deux traces [Baldur, 1997]. Une fois que le système a comparé les traces indiciaires avec celles présentes dans la base de données, il dresse une liste présentant dans les premiers rangs les candidats qui possèdent l'indice de corrélation le plus élevé. Ceci est effectué pour chaque trace de manière indépendante. Aucune fusion de scores n'est proposée [NRC, 2008].

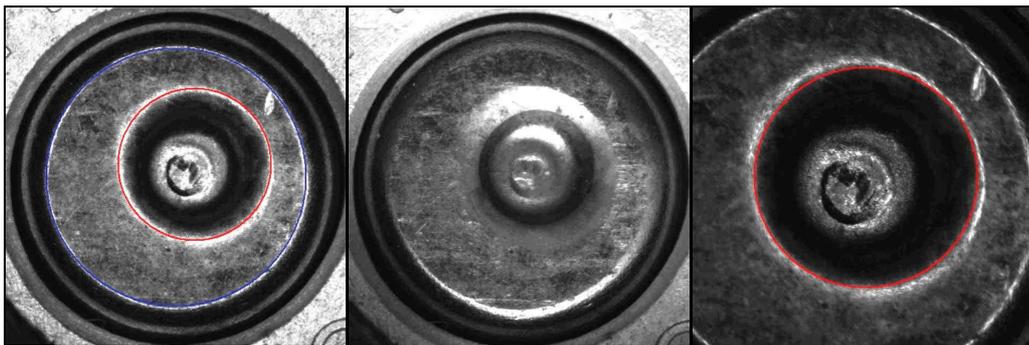


Figure 40

Sélection des traces avec le système IBIS® (à gauche), image sous une lumière directe (au centre) et détail du percuteur sous une lumière annulaire [NRC, 2008].

Même si les concepts de base peuvent être similaires, les systèmes cités ci-dessus peuvent différer entre eux dans la conception du système d'acquisition de données, dans l'ensemble d'algorithmes utilisés pour extrapoler la corrélation entre les traces ou encore dans la procédure nécessaire pour l'acquisition. C'est notamment le cas des systèmes, tels que le plus récent système de Forensic Technologies® BrassTRAX® et le système russe Evofinder®, qui présentent une différence flagrante en termes d'acquisition. Les images sont acquises sous des conditions différentes et présentent donc un niveau des détails différent (Figure 40 et Figure 41).



Figure 41

Image d'une douille acquise à l'aide du système Evofinder®²⁹.

La qualité des images du système russe est assurée par un système breveté par la compagnie appelé *frame-fragment*²⁹. Ce système d'acquisition exploite quatre LED (*Light-Emitting Diode*) issues de quatre directions différentes pour l'acquisition de l'information relative à la trace du percuteur et deux LED positionnées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre pour la trace de la tête de culasse.

Autres systèmes de comparaison automatique

Plusieurs informations relatives aux systèmes d'acquisition et aux algorithmes permettant une comparaison automatique d'images des traces sur une douille sont décrites dans la littérature.

²⁹ www.biscondor.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

Le laboratoire forensique hollandais (NFI) a notamment développé et testé différentes techniques d'acquisition et de comparaison. En ce qui concerne l'acquisition des images, un éclairage direct est utilisé pour les traces de la tête de culasse, alors qu'une lumière annulaire est employée pour mettre en évidence les traces du percuteur [Geradts et al., 2001b]. Dans cette étude, les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus en utilisant une approche multirésolution par *Wavelets* (ondelettes). L'approche multirésolution fournit une structure hiérarchique pour interpréter les informations présentes dans une image. À des résolutions différentes, les détails d'une image caractérisent normalement différentes structures physiques de l'objet observé. A basse résolution, ces détails correspondent à la structure la plus générale qui fournit le contexte de l'image. Cette procédure permet donc d'analyser l'image en partant du niveau de détail le plus bas jusqu'au niveau le plus élevé [Mallat, 1989]. Une fois l'image divisée, il faut choisir le niveau comportant les détails les plus appropriés pour effectuer une comparaison. Dans le travail de Geradts et al., la décomposition par *Wavelets* est effectuée à l'aide d'une version d'ondelettes connues sous le nom de « à trous ». Pour avoir plus d'informations concernant cet algorithme se référer au travail de Starck et al. [Starck et al., 1998]. Les images résultantes d'une telle approche peuvent être observées ci-dessous (Figure 42) :

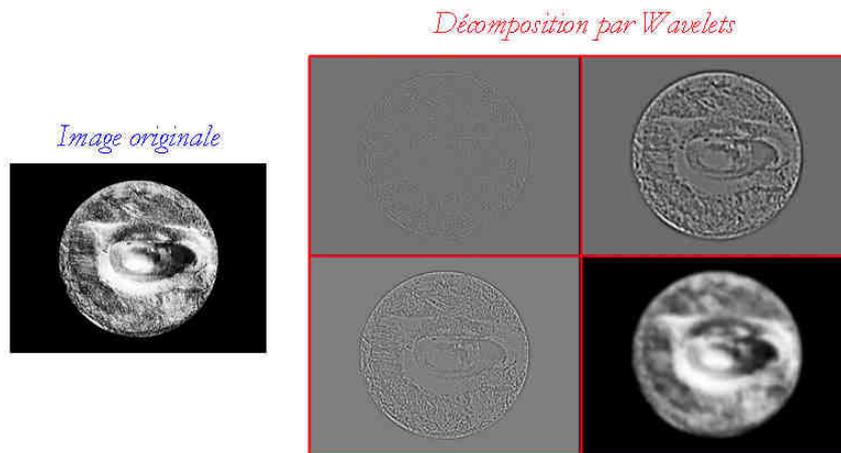


Figure 42

Schéma illustrant la décomposition par Wavelets. L'image originale peut être observée sur la gauche. Les images à droite illustrent les différents niveaux de détail extrapolés à partir de l'image originale suite à la décomposition par Wavelets [Geradts et al., 2001b].

L'étude effectuée par le NFI propose également différentes techniques de comparaison des données. Cette recherche montre que la méthode donnant les meilleurs résultats est celle utilisant une transformation *log – polar*. Cette dernière permet d'effectuer l'alignement de deux images en s'affranchissant des effets de la rotation et de la translation [Geradts et al., 2001b].

En Australie, un système de comparaison automatique des traces sur les douilles, appelé *Fireball*, a été développé. Ce système, qui exploite un éclairage annulaire pour acquérir les images, utilise le détecteur des contours de *Canny* pour mettre en évidence les bords du culot de la douille ainsi que la trace du percuteur (cf. Section N° 7.4.2). Afin de normaliser les acquisitions et donner une orientation aux traces, le système exploite le vecteur entre le centre du culot de la douille et le centre de la trace du percuteur [Li, 2003].

Systèmes de comparaison automatique en 3D

Systèmes balistiques commercialement disponibles

Contrairement au cas des systèmes en 2D, il n'existe actuellement aucun système de comparaison automatique en trois dimensions des traces sur les douilles commercialement disponible et distribué au sein des laboratoires de balistique. Ces dernières années, sur les bases du système IBIS[®], Forensic Technologies[®] a développé, IBIS – TRAX 3D constitué par les plateformes BulletTRAX-3D pour les projectiles et BrassTRAX-3D pour les douilles. BrassTRAX-3D exploite des images en deux dimensions pour la comparaison des traces sur les douilles, mais permet également de visualiser ces dernières en trois dimensions. La topographie des traces est reconstruite à l'aide d'un système appelé DFF (*Depth From Focus*). Ce principe exploite les limitations en termes de profondeur de champ d'un système optique pour extrapoler l'information concernant la hauteur en fonction de la mise au point sur un objet. Néanmoins, les informations topographiques ne sont pas utilisées lors de la corrélation entre traces.

Même si aucun système basé sur la saisie tridimensionnelle de surface n'est encore commercialement disponible, les développements technologiques ne se font pas attendre et de plus en plus de compagnies s'y intéressent. Le nouveau système, appelé Alias, qui est en train d'être mis au point par la compagnie Pyramidal Technologies LTD en est la preuve.

Autres systèmes de comparaison automatique

Les développements technologiques ne se limitent pas aux applications purement commerciales. Ces dernières années ont été également marquées par plusieurs projets qui se sont intéressés à la saisie tridimensionnelle de surfaces telles que celles des traces laissées par une arme. C'est notamment le cas de Intelligent Automatic Inc[®] qui a développé des techniques permettant la comparaison automatique des traces d'outil glissées et moulées. Dans les deux cas, le système effectue l'extraction d'une « signature » qui est ensuite comparée à celles présentes dans une base de données. L'extraction et la comparaison des signatures s'effectuent de la manière suivante [Bachrach et al., 2006 et Bachrach, 2010] :

- Traces glissées : la première phase de l'extraction de la « signature » consiste au prétraitement des données tridimensionnelles afin d'éliminer les points ayant des valeurs aberrantes ou inconsistantes. Ensuite, les traces sont « normalisées » par un processus qui permet d'identifier le plan dans l'espace où elles sont situées et d'effectuer une transformation afin de projeter la structure tridimensionnelle sur un plan de référence. Une fois les traces normalisées, la « signature » de la trace est créée par des étapes qui permettent de réduire l'ensemble de l'information (3D) en un seul profil bidimensionnel. Dans le but de donner d'avantage de poids aux caractéristiques plus fines des traces et d'atténuer les caractéristiques plus générales, les « signatures » sont enfin filtrées à l'aide d'un filtre Gaussien passe-bande. Cette phase permet d'extraire le profil de la trace (sous forme de vecteur) qui est filtré en donnant comme résultat ce qu'il est possible de définir comme la « signature » de la trace. La comparaison des « signatures » a lieu en effectuant une translation entre les deux profils jusqu'à arriver à un indice de corrélation (ou une autre distance métrique) maximale. Ce dernier correspond à la valeur représentant les similitudes entre deux traces selon la métrique choisie.

- Traces moulées : dans le cas des traces moulées, la « signature » se présente sous forme de matrice en deux dimensions, contrairement aux traces glissées, qui étaient représentées en utilisant un profil en une seule dimension. L'extraction de la « signature » comporte un processus de normalisation et un filtrage des données. La comparaison des traces moulées en utilisant des structures stockées dans une matrice bidimensionnelle consiste dans des translations et des rotations dans le but d'aligner les traces. Cet alignement est effectué en calculant le coefficient de corrélation pour un certain nombre d'angles de rotation. Pour chaque angle, la transformation optimale entre les deux « signatures » est calculée en utilisant une approche se basant sur le domaine fréquentiel.

D'autres systèmes basés sur la saisie tridimensionnelle de surface ont été développés. En 2007, le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) a publié un rapport concernant le développement et la faisabilité opérationnelle d'un système de comparaison automatique exploitant les mesures tridimensionnelles de traces sur les douilles. L'acquisition des données tridimensionnelles a été assurée par un microscope confocal. La comparaison des traces a été effectuée par alignement entre les deux traces, suivi d'un calcul de similarité à l'aide d'une métrique basée sur la corrélation croisée. Avant que l'alignement ait lieu, les mesures ont été prétraitées et les traces séparées manuellement [Vorbuger et al., 2007].

À l'Institut de recherche des technologies de l'espace en Turquie, un système de comparaison automatique en 3D nommé Balistika a été conçu. Ce système exploite la stéréophotométrie dans le but d'extrapoler la topographie des traces présentes sur le culot de la douille et sur la surface des projectiles [Sakarya et al., 2008]. Le nouveau système Balistika 2010 sera bientôt disponible sur le marché.

L'université de Parme, en collaboration avec la section de balistique des Carabinieri en Italie, ont effectué un travail exploratoire sur l'acquisition 3D et l'analyse de ces données dans le cadre de l'identification des armes à feu à partir des traces laissées sur les douilles. Ils ont exploité un système de mesure tridimensionnelle équipé avec un détecteur basé sur l'holographie conoscopique laser. Ils proposent également des techniques de visualisation des traces, de traitement des données tridimensionnelles et des quantifications des comparaisons entre traces basées sur la corrélation entre les deux structures tridimensionnelles [Senin et al., 2006].

Dans la littérature, ils existent également quelques informations relatives aux algorithmes permettant une comparaison automatique en trois dimensions des traces sur les éléments de munitions. Vicario et al. en 1995 ainsi que Banno et al. en 2004 proposent l'utilisation d'un algorithme qui permet l'alignement de deux nuages des points. En d'autres termes, l'algorithme permet d'aligner deux surfaces en trois dimensions. Cet algorithme, appelé ICP (*Iterative Closest Point*), travaille de manière itérative afin de minimiser la distance entre deux topographies. Une fois les deux surfaces alignées, l'algorithme calcule la distance métrique qui sépare les deux nuages afin de quantifier les différences morphologiques. Cette dernière n'est qu'un exemple d'algorithme qui permet de comparer des topographies. En effet, il existe plusieurs techniques d'alignement des données et de calcul métrique de distance entre deux nuages des points 3D. A noter que la technique citée ci-dessus permet la comparaison des deux topographies en prenant en considération tous les points composant les surfaces. D'autres techniques se limitent à la comparaison de caractéristiques géométriques ou topographiques plus générales. Ce genre de technique est utilisé la plupart du temps pour analyser la similarité entre deux structures tridimensionnelles, dans le but, par exemple, de

trouver des structures similaires à l'intérieur d'un ensemble de structures tridimensionnelles [Tangelder et al., 2004].

5.3 Evaluation des techniques d'acquisition 2D et 3D

Chaque technique d'acquisition possède des avantages et des inconvénients, certains liés à l'acquisition des données elle-même, d'autres liés à la procédure de comparaison qui suit l'acquisition. Les points positifs et négatifs doivent être évalués afin de choisir la technique d'acquisition la plus adaptée pour la poursuite de la recherche.

5.3.1 Acquisition 2D

Avantages

Le plus grand avantage de l'emploi des techniques en deux dimensions réside dans la facilité d'emploi. L'application de ce genre de techniques ne nécessite pas, en fonction des exigences, la mise en place d'appareillages spécifiques ou particulièrement coûteux. De plus, le temps nécessaire pour acquérir des images en 2D reste relativement faible. Enfin, un éclairage approprié augmente de manière significative la visualisation des caractéristiques d'intérêt. Les propriétés de l'éclairage permettent également parfois de supprimer des informations non désirées, en donnant ainsi des résultats plus significatifs [Heizmann, 2002].

Désavantages

La facilité d'emploi de cette technique est contrebalancée par les difficultés à standardiser les résultats. En effet, standardiser la position de l'échantillon par rapport à l'éclairage et au trajet optique reste une tâche difficile à accomplir. Une mauvaise standardisation pourrait donner lieu à des différences inexistantes entre échantillons, ou réciproquement, pourrait minimiser des différences existantes entre deux échantillons. Or, en fonction de la trace observée, des éclairages différents doivent souvent être employés afin de mettre en évidence correctement les diverses caractéristiques. En effet, l'éclairage employé pour mettre en évidence des détails plus fins des traces de la tête de culasse ne sera pas forcément le même que celui nécessaire pour les traces du percuteur. Enfin, l'acquisition en deux dimensions ne permet pas d'obtenir des informations concernant la profondeur d'une caractéristique, telle qu'une strie ou un défaut à l'intérieur de la trace du percuteur. Il s'agit là d'un critère non utilisé alors qu'il pourrait être exploité à des fins de discrimination.

5.3.2 Acquisition 3D

Avantages

Les techniques d'acquisition basées sur la saisie tridimensionnelle de surface sont souvent indépendantes des conditions d'observation [Vicario et al, 1995 et Geradts et al., 2001a]. Cet aspect est d'une importance primordiale, car il permet d'assurer une standardisation et une reproductibilité remarquables. Un autre aspect très important réside dans la capacité de recueillir des informations sur la profondeur des traces. Lors de l'observation des traces sur les douilles par le biais d'un microscope, la lumière est exploitée afin de pouvoir mettre en évidence la nature tridimensionnelle des traces. Mais en fonction de l'éclairage utilisé,

certaines caractéristiques peuvent être mises en évidence de manière très prononcée et d'autres peuvent perdre d'importance sur l'image. Les images suivantes montrent un exemple où les mesures tridimensionnelles permettent d'avoir accès à un niveau d'information supérieur par rapport aux images en deux dimensions (Figure 43). En effet, les images en trois dimensions permettent d'apprécier la forme globale du cratère laissé par le percuteur, alors que les images en deux dimensions ne font transparaître aucune information particulière sur la forme globale des traces.

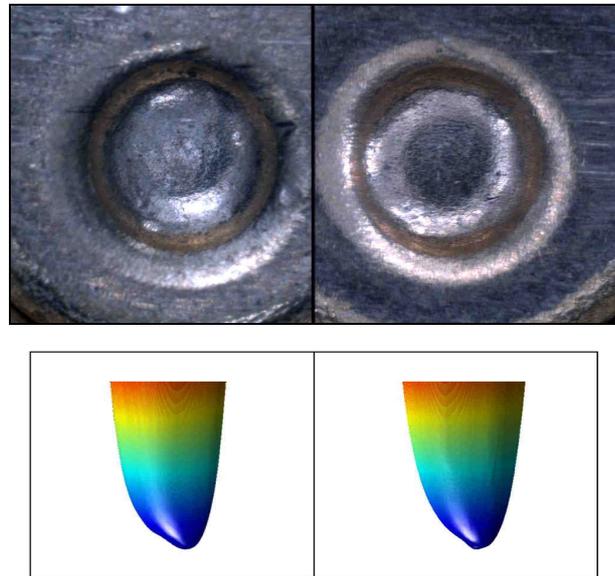


Figure 43

Images 2D d'une comparaison de deux traces du percuteur (en haut) et images 3D d'une comparaison de la forme globale des mêmes traces du percuteur (en bas).

En termes de comparaison, l'information concernant la hauteur sera forcément prise en considération car c'est une information intrinsèque à la structure elle-même. La discrimination devrait donc s'en trouver augmentée. Enfin, le genre d'acquisition reste toujours le même quelle que se soit la trace à analyser ; un seul type d'appareillage est donc suffisant pour la mesure de toutes les traces.

Désavantages

L'emploi d'une telle technique reste onéreux aussi bien d'un point de vue économique qu'en termes de temps. En effet, il s'agit d'appareillages très techniques, exploitant des technologies relativement récentes et coûteuses. En outre, selon la technique, le temps employé par certains appareils pour effectuer la mesure 3D peut se révéler important par rapport au temps d'acquisition nécessaire pour effectuer une image 2D de la même surface. Il ne s'agit pas d'un critère prépondérant, mais auquel il faut prêter une certaine attention, surtout si le temps d'acquisition nécessaire devient problématique. Un dernier critère à prendre en considération concerne la quantité de données utilisée pour décrire une surface en trois dimensions. Si les données sont sous forme d'une matrice $N \times M$, la quantité de données ne va pas être très différente de celle d'une image en deux dimensions. Mais certaines opérations sur les données pourraient nécessiter l'utilisation d'une forme $(N \times M) \times 3$. Sous cette forme, chaque colonne de la matrice représente les coordonnées d'un point dans l'espace cartésien. L'emploi de cette forme comporte une multiplication de la quantité des données d'un facteur trois, ce qui se traduit par un important ralentissement des opérations algorithmiques nécessaires pour effectuer le traitement des données.

5.4 Solution retenue

Il faut définir quelle est, entre l'acquisition en deux dimensions et celle en trois dimensions, celle qui permet de mieux répondre aux exigences préétablies pour la présente recherche. Afin de bâtir des bases stables pour la suite du travail, un des facteurs prépondérants est la reproductibilité. Même si à ce stade, ce facteur peut sembler de moindre importance, le choix d'une ou plusieurs techniques qui ne sont pas entièrement reproductibles peut avoir pour conséquence l'apparition de nombreuses complications. De ce fait, il est clair qu'actuellement, seule l'acquisition des données en trois dimensions peut assurer un degré de reproductibilité permettant l'accomplissement d'une recherche de ce type.

Suite aux observations effectuées dans ce chapitre, la poursuite du travail ainsi que la quantification des comparaisons des traces, se basera sur l'acquisition des données en trois dimensions.

5.5 Résumé du chapitre

Tout au long de ce chapitre, la problématique liée à la description ainsi qu'à la quantification d'une comparaison entre deux traces a été évoquée et discutée. Il en résulte que seulement une approche quantitative basée sur une approche de comparaison automatique puisse satisfaire les besoins liés à cette recherche. La panoplie des différents systèmes de comparaison automatique commercialement disponible ainsi que les systèmes restés au niveau de prototype ou de recherche expérimentale ont été présentés. La technologie sur laquelle ces systèmes basent leur structure évolue. Ainsi, ces dernières années, la saisie tridimensionnelle de surface et l'extrapolation d'images des traces sur les douilles en 3D sont de plus en plus souvent employées dans ce domaine. Dans le cadre de cette recherche, la saisie tridimensionnelle de surface a été ainsi choisie afin d'assurer une bonne reproductibilité dans la phase d'acquisition de l'information relative aux traces sur les douilles.

6 ACQUISITION DES DONNÉES

Avant d'étudier la qualité et les performances d'une technique d'acquisition, il est nécessaire de définir quelles sont les caractéristiques des traces à analyser. Pour ce faire il faut d'abord déterminer quelles sont les traces qui feront l'objet de cette étude.

6.1 Traces prises en considération

Plusieurs traces se présentent sur la surface d'une douille. Certaines sont des traces glissées, mais la plupart des traces font partie de la classe des traces moulées. Les traces les plus souvent exploitées à des fins d'identification sont la trace du percuteur et celle laissée par la tête de culasse. Non seulement ces traces possèdent une valeur importante en termes de capacité discriminative, mais elles sont également intéressantes d'un point de vue de l'acquisition des données. En effet, la mesure de certaines traces peut ne pas être aussi aisée qu'on le souhaite. Contrairement aux traces laissées par l'extracteur ou les lèvres du magasin, qui se trouvent respectivement dans la gorge et sur le corps de la douille, les traces du percuteur et de la tête de culasse sont imprimées sur la capsule d'amorçage. Il s'agit d'une surface relativement petite, d'accès facile et qui peut facilement être placée à l'horizontale. Il en résulte qu'effectuer des mesures sur la capsule d'amorçage ne nécessite la fixation préalable que de trois paramètres, à savoir, la plage de mesure dans les deux axes (X et Y) ainsi que la plage de mesure verticale (Z). Le processus devient plus complexe pour l'acquisition des traces sur le corps de la douille car, de par leur nature, elles présentent une variable additionnelle : la rotation de la douille sur la totalité des axes cartésiens. L'analyse des traces sur le corps d'une douille ou dans la gorge de cette dernière rend plus difficile la standardisation du processus d'acquisition des données, phénomène qui peut facilement affecter la reproductibilité des résultats. L'accès facile à ces traces explique la solution retenue pour la plupart des systèmes de comparaison automatiques, lesquels exploitent seulement les traces du percuteur, de la tête de culasse et éventuellement de l'éjecteur pour effectuer une recherche dans une base de données [Tulleners, 2001]. A la lumière des points soulevés ci-dessus, les analyses se focalisent plutôt sur les traces présentes sur le culot d'une douille, et plus particulièrement sur la trace du percuteur et celle de la tête de culasse.

6.2 Performances exigées

Le choix de la technique d'acquisition des traces doit être effectuée en tenant compte des critères liés, d'une part, à la morphologie des surfaces à analyser et, d'autre part, aux contraintes pratiques consécutives à l'utilisation d'un tel dispositif. Il est donc non seulement nécessaire que la qualité des mesures soit satisfaisante, mais également que la technique remplisse certaines conditions. Les paramètres les plus importants, liés à la topographie spécifique des traces à analyser, sont les suivants :

- Le facteur le plus important à prendre en considération concerne tout simplement la qualité des mesures ou plutôt la capacité des techniques tridimensionnelles à reproduire la surface d'un objet. Il est inutile d'évaluer une technique en termes de résolution ou de profondeur de champ si cette dernière ne peut pas reproduire le plus

fidèlement possible la topographique d'un objet. Il est évident que, en fonction du principe exploité pour encoder la structure tridimensionnelle, certaines traces ou certaines caractéristiques resteront plus difficile à reproduire pour une technique que pour une autre. Cela pourrait notamment être le cas des pentes de la trace du percuteur, qui par leur morphologie, empêchent souvent une mesure correcte. Le système d'acquisition devrait donc s'affranchir de la morphologie de l'objet et être indépendant de l'inclinaison de la surface à mesurer [Bonfanti, 2002]. La technique de saisie tridimensionnelle doit également être capable d'effectuer les mesures indépendamment des caractéristiques physiques, telle que les propriétés de réflexion, et chimiques du support, telle que la composition du matériel. Dans le cas particulier des douilles, une différence de composition de la capsule d'amorçage ne devrait donc pas influencer la qualité des mesures.

- En vue d'applications opérationnelles, un système de saisie tridimensionnelle devrait, dans les limites du possible, ne pas endommager les traces présentes sur la douille [Bonfanti, 2002].
- Contrairement à une image en deux dimensions, la saisie tridimensionnelle de surface comporte non seulement une résolution latérale (dans les axes X et Y), mais également une résolution verticale (dans l'axe Z). Afin de pouvoir décrire la surface d'un objet sans pertes d'informations importantes, une résolution suffisante dans les trois axes est nécessaire. La littérature conseille l'utilisation d'une résolution se situant aux alentours du micromètre [Vicario et al., 1995]. Une résolution inférieure à un micromètre devrait être évitée en raison du rapport signal/bruit de fond, de la création d'artéfacts, de l'ampleur des données et du temps de saisie [Bonfanti, 2002].
- La technique employée doit permettre d'atteindre une certaine profondeur, notamment celle de la trace du percuteur. La profondeur maximale que ce genre de trace peut atteindre dépend de paramètres tels que l'arme employée et la structure de la capsule d'amorçage. Pour une munition 9 mm Parabellum (Geco[®], Geco Sintox[®], munition suisse fabriquée à Thun, Winchester, Remington et Sellier&Bellot), tirée par un pistolet semi-automatique SIG P226, l'épaisseur d'une capsule d'amorçage, en tenant compte de la position de l'enclume par rapport à la paroi qui vient frapper, est largement inférieure à 1 mm (en moyenne 0.65 mm). Dans le cas où d'autres types de calibre devraient faire l'objet de mesures, il est possible de s'attendre à des traces du percuteur plus profondes. Bonfanti, dans son travail de thèse [Bonfanti, 2002], conseille une plage de mesure dans l'axe vertical d'environ 2,5 mm.
- Sauf exception, la plus grande surface d'intérêt qui pourra faire l'objet de mesures est représentée par la capsule d'amorçage, laquelle, pour un calibre 9 mm Parabellum, correspond à un cercle de diamètre d'environ 4.5 mm [Gallusser et al., 2002]. Le système d'acquisition doit donc arriver à couvrir au minimum, une zone d'une telle dimension. Dans le cas où l'analyse d'autres calibres plus importants, tels que les calibres utilisés pour la chasse, est souhaitée, le système devrait arriver à couvrir des surfaces plus importantes. Malgré le fait que certaines techniques ne permettent pas des mesures d'une telle ampleur, les systèmes d'aujourd'hui sont souvent équipés d'une technologie permettant de regrouper plusieurs mesures adjacentes (*stitching*).
- La technique d'acquisition doit être la plus indépendante possible des conditions externes et elle doit assurer un degré de reproductibilité remarquable. Elle doit donc être indépendante des conditions d'observation. Ceci pourrait effectivement être le

cas de techniques qui extrapolent les mesures tridimensionnelles à partir d'images effectuées en stéréoscopie ; images qui sont donc soumises aux règles et aux difficultés liées aux conditions d'observation et d'illumination.

Quelle que soit la technique utilisée, il faut également prendre en considération les contraintes pratiques liées à l'utilisation de ladite technique. En effet, le choix de la technique dépend du coût en termes de temps mais également du prix de l'appareil par rapport à ses performances. Il y a encore plusieurs facteurs qui peuvent entrer en ligne de compte lors du choix de l'appareillage destiné aux mesures tridimensionnelles, mais il s'agit d'aspects moins importants qui ne sont pas considérés comme prioritaires.

6.3 Visualisation des images 3D

Les données tridimensionnelles, mesurées par le biais d'une certaine technique d'acquisition, peuvent être représentées de manière variée et parfois peu familière au lecteur. En effet, les images résultantes d'une acquisition tridimensionnelle peuvent ressembler à des images prises par une caméra, mais la différence est qu'elles sont normalement dépourvues de texture. Les logiciels utilisés pour visualiser les surfaces en 3D exploitent donc des caractéristiques topographiques afin de faciliter la lecture et l'interprétation de ces images. Les paragraphes qui suivent montrent les principales techniques de visualisation utilisées dans le cadre de ce travail. Le but de cette section n'est pas d'effectuer un résumé exhaustif de ces techniques, mais simplement de familiariser le lecteur avec ce type d'image qui sera couramment employé par la suite.

6.3.1 Les pseudo-couleurs

Une surface en trois dimensions peut simplement être représentée par une matrice $N \times M$ (normalement $N=M$) où chaque élément représente la hauteur aux coordonnées X et Y . Dans une image codifiée en pseudo-couleurs, les différentes hauteurs sont simplement représentées avec une échelle de couleurs, ces dernières pouvant être de différents types en fonction de la manière avec laquelle l'on souhaite représenter les résultats. Les images suivantes montrent la même capsule d'amorçage d'une douille percutée, en utilisant différentes échelles de couleurs (Figure 44). L'échelle à droite des images montre la correspondance entre la hauteur en micromètres et la couleur.

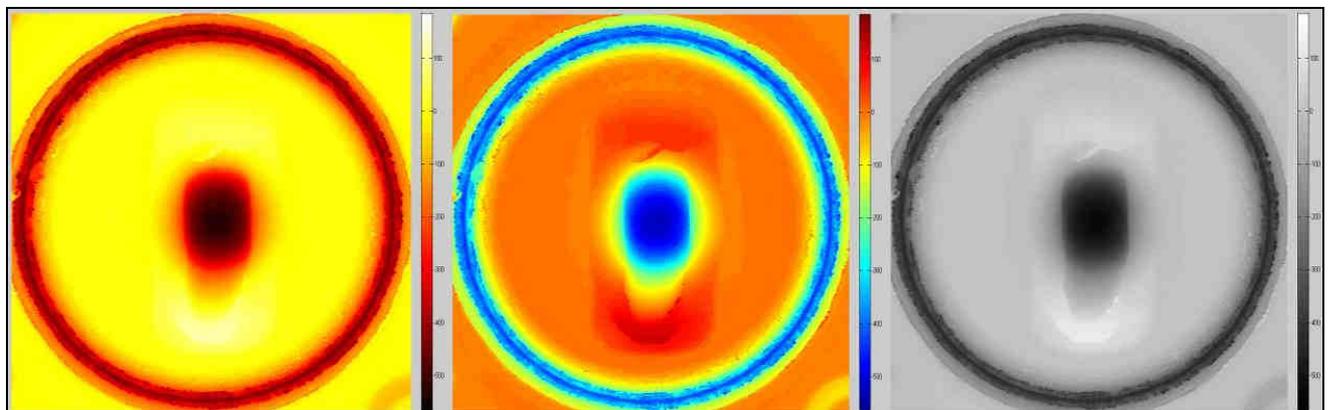


Figure 44

La même image d'une surface 3D sous différentes échelles de pseudo-couleurs.

En fonction du cas, certaines échelles semblent être plus appropriées pour mettre en évidence certaines caractéristiques morphologiques ou détails que d'autres.

6.3.2 L'effet lumière

Une image en 3D peut également être représentée sous un éclairage particulier. L'illumination d'une surface est une technique qui permet d'ajouter du réalisme à la scène graphique. Ceci est effectué en simulant, sur une surface, les parties claires et foncées résultantes d'une source de lumière dirigée vers la surface en question. Les images ci-dessous montrent le gain en termes de détails qu'il est possible d'observer en exploitant les propriétés morphologiques des surfaces (Figure 45).

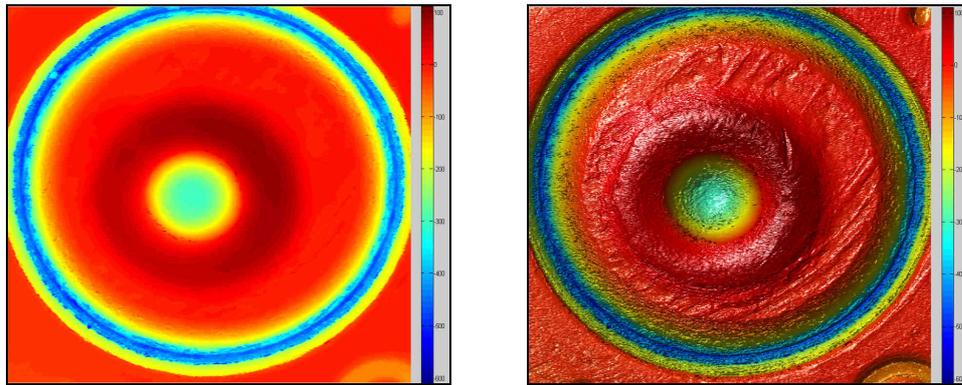


Figure 45

Images d'une même capsule d'amorçage percutée montrant des différences suite à l'ajout, sur l'image de droite, d'une source de lumière virtuelle.

6.3.3 Visualisation dans l'espace

Les images ci-dessus portent intrinsèquement l'information concernant la hauteur et donc l'épaisseur des structures, il est donc possible d'observer ces images d'un autre point de vue dans l'espace que la verticale (Figure 46).

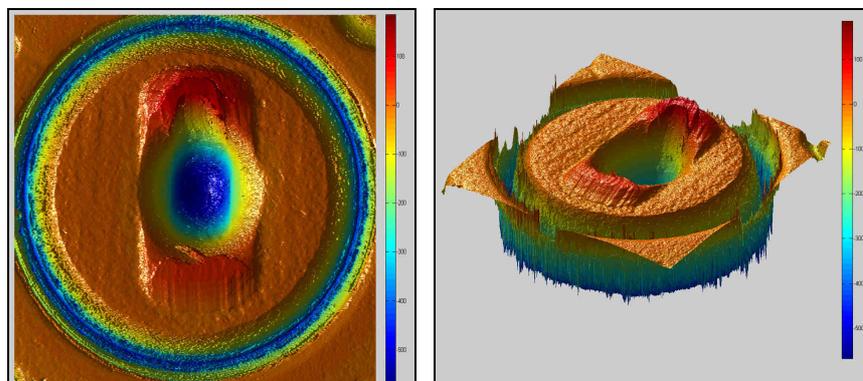


Figure 46

Images montrant la même topographie en 3D depuis la verticale (à gauche) et depuis un autre point dans l'espace (à droite).

Ceci permet d'apprécier d'avantage la morphologie et la profondeur des images. C'est exactement comme si on observait un objet depuis différents points de vue ; la seule différence réside dans le fait qu'aucune information concernant la texture n'est présente. Les couleurs représentent toujours l'information relative à la hauteur.

6.3.4 Le profil bidimensionnel

Dans certains cas, en fonction des informations que l'on souhaite étudier, les images 3D comme présentées jusqu'ici, peuvent être analysée le long d'une simple ligne (Figure 47 – à droite – ligne bleue). Ceci permet d'apprécier la morphologie de la trace sur un segment donné. L'image observée sera donc un graphique bidimensionnel (Figure 47 – à gauche). Ce type de visualisation est très utile dans un cadre plutôt analytique et permet d'effectuer des mesures à des endroits précis.

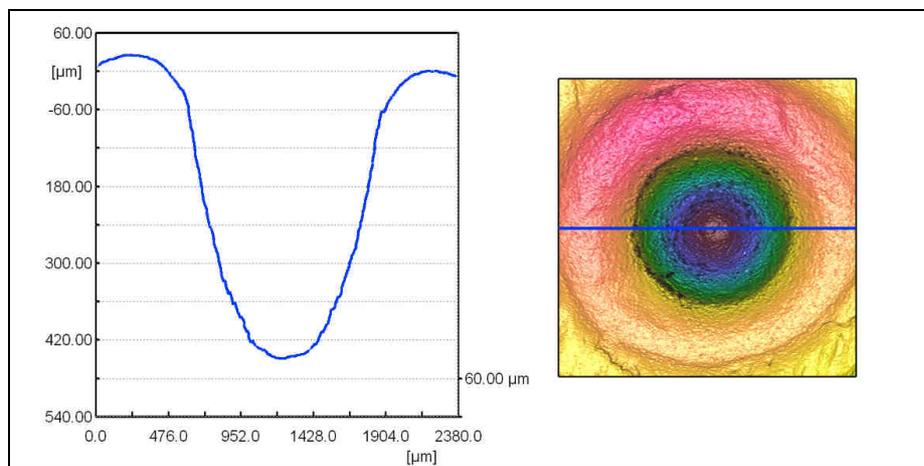


Figure 47

Profil bidimensionnel (à gauche) d'une trace du percuteur (à droite). La ligne bleue qui traverse horizontalement la trace du percuteur dans l'image de droite représente le segment le long lequel le profil est analysé.

Dans le cadre de l'observation des traces sur une douille, ce type de visualisation couplé à des outils de mesure peut être utilisé pour mesurer, par exemple, la profondeur de la trace du percuteur.

6.3.5 Le nuage de points

Chaque point d'une image tridimensionnelle peut être décrit également par ses coordonnées dans l'espace X, Y et Z. Les deux premières coordonnées correspondent à la position de notre point projetée dans le plan horizontal. Z correspond à la hauteur de ce point. Si tous les points sont représentés dans l'espace, ils formeront un nuage de points représentant une structure tridimensionnelle. Dans cette situation, ni la texture, ni les effets de l'éclairage ne sont applicables à l'image. La seule structure observable reste l'ensemble des points dans l'espace (Figure 48).

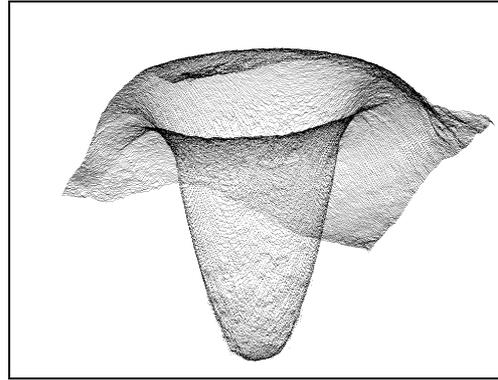


Figure 48
Nuage de points représentant une trace du percuteur.

6.3.6 Les images avec texture

Certains système de saisie topographique de surface permettent l'acquisition de deux types d'informations en même temps : l'image 2D et la structure 3D. Il suffit de combiner les deux informations pour créer des images ayant la texture de l'image 2D observable sur une structure tridimensionnelle. Ce genre de visualisation est très efficace d'un point de vue esthétique et démonstratif ; mais, en fonction du type d'image, la texture prend le dessus sur la topographie en 3D. Il en résulte qu'il est possible d'apprécier la tridimensionnalité d'un objet uniquement dans sa globalité sans pouvoir observer les détails plus fins. Ce genre de « fusion » peut également être effectué, en utilisant des logiciels le permettant, en combinant une topographie tridimensionnelle avec une photographie prise à l'aide d'un système de capture traditionnel qui n'est pas forcément en relation avec le système d'acquisition tridimensionnel. L'image suivante en est l'exemple (Figure 49).



Figure 49
Images d'une capsule d'amorçage montrant la fusion entre la texture et la structure 3D.

6.3.7 Les logiciels de gestion d'images 3D

Actuellement, plusieurs logiciels peuvent être employés pour la visualisation et l'analyse d'images en 3D. Ceux-ci permettent normalement d'effectuer des mesures sur les topographies, des calculs statistiques ou des traitements mathématiques afin de mieux mettre

en évidence certaines caractéristiques. Les différents appareils de mesure sont normalement équipés de leur propre logiciel ce qui en résulte des images différentes pour chaque système.

6.4 Tests effectués

Plusieurs techniques peuvent extrapoler ou mesurer la topographie d'un objet, tel qu'une douille. Un résumé de ces techniques peut être consulté en annexe (cf. Annexe A.2). Certaines d'entre elles ont été testées et les résultats de ces tests, ainsi qu'une discussion des résultats obtenus, sont présentés dans les paragraphes suivants.

6.4.1 Techniques avec contact

Les instruments à pointe de lecture

Cette technique, qui reproduit le profil d'une surface le long d'une ligne, utilise le signal obtenu par le contact entre une pointe et la surface à mesurer pour reproduire l'état de cette dernière. L'appareil testé est un profilomètre Alpha-Step IQ qui effectue une pression infime sur l'échantillon (10 μg), permettant l'extrapolation des mesures sans pour autant l'altérer. Ce profilomètre, dont la pointe peut travailler dans l'axe Z jusqu'à une profondeur d'un maximum de 2 mm, possède une excellente résolution. Néanmoins, cet appareil n'est pas adapté pour réaliser des mesures sur des traces telles que celles du percuteur car cette technique n'arrive pas à couvrir des zones suffisamment étendues. Par conséquent, cet appareil a été testé sur des traces glissées, pouvant être analysées en deux dimensions (mesures dans le plan XZ). Ces essais ont donné de très bons résultats sur les impressions de champ des projectiles. La courbure de ces derniers ne pose pas de problèmes particuliers et des filtres disponibles dans le logiciel de gestion des données permettent une excellente visualisation du profil de la trace. Néanmoins, l'utilisation de ce genre d'appareil comporte plus d'inconvénients que d'avantages lors de l'application aux traces sur les douilles.

6.4.2 Techniques sans contact

Les instruments à détection focale

Microscope confocale

La microscopie confocale, qui est largement exploitée dans ce domaine, a été testée et évaluée. Un microscope Zeiss LSM 310 a été utilisé pour la caractérisation des surfaces et l'analyse des rugosités. Cette technique a montré des résultats relativement satisfaisants sur les traces dont la pente n'est pas trop prononcée (Figure 50). Le seul inconvénient rencontré lors des mesures concerne le fait que le microscope, employé pour cet essai, n'arrive pas à prendre les mesures dans des zones ayant des caractéristiques morphologiques complètement différentes. En effet, les conditions de lumière dans la trace du percuteur ne sont pas les mêmes que celles présentes lors de l'observation de la trace de la tête de culasse. De ce fait l'acquisition de la trace du percuteur simultanément à celle de la tête de culasse implique la présence d'une grande quantité de bruit de fond. Une autre limitation mise en évidence, concerne la difficulté de la microscopie confocale lors des mesures sur des surfaces ayant une pente importante. En effet, en analysant des échantillons ayant des traces du percuteur plus profondes et avec des pentes assez importantes, la microscopie confocale n'a pas permis,

dans le cas présent, d'effectuer les mesures sur les bords de la trace, contrairement à la zone au fond de la trace qui a pu être enregistrée correctement.

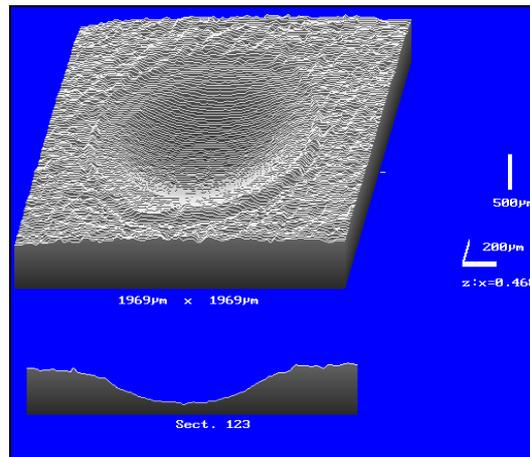


Figure 50

Mesures effectuées avec un microscope confocal Zeiss LSM 310 sur une trace du percuteur d'une douille tirée par un pistolet SIGP 226.

Profilomètre à détection confocale

Le profilomètre laser testé provient du même fabricant que l'appareil de saisie topographique utilisé dans le système automatique BulletTrax 3D[®] pour les mesures sur les projectiles. Le profilomètre μScan[®], fabriqué par Nanofocus AG, utilise des détecteurs ponctuels avec des plans de mesure très précis pour l'extrapolation des profils et des topographies de surfaces. L'échantillon est déplacé par le plan de mesure pendant que le détecteur transmet les données relatives à la hauteur à l'unité de contrôle de mesure. Pour améliorer la précision latérale, les détecteurs sont synchronisés avec le plan de mouvement. Cet appareil est également équipé d'un système qui permet d'éviter les erreurs de mesure causées par l'accélération et la décélération du plan de mesure.

Le profilomètre est muni de différents types de détecteurs en fonction de la surface à mesurer. Le détecteur qui a été utilisé pour effectuer les essais est le « confocal point CF4 »³⁰. Les performances de ce type d'appareil sont : une résolution latérale au niveau du micromètre et une résolution sur l'axe Z au niveau du dixième de micromètre. La taille du spot laser est de 1 μm. Etant donné qu'il s'agit d'un profilomètre, la plage de mesure en X et Y est suffisamment grande ; par contre, l'utilisation d'un détecteur confocal limite la plage de mesure verticale à 1 millimètre. Pour évaluer cet appareil, des tests préliminaires ont été effectués. Les essais sur des traces n'ayant pas de caractéristiques particulières ont montré des résultats excellents. L'image ci-dessous (Figure 51) montre la bonne qualité des mesures sur la tête de culasse. Une image en deux dimensions de la même cartouche se trouve à côté, dans le but de permettre une comparaison entre la structure réelle de l'échantillon et la mesure effectuée sur ce dernier.

³⁰ www.nanofocus.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

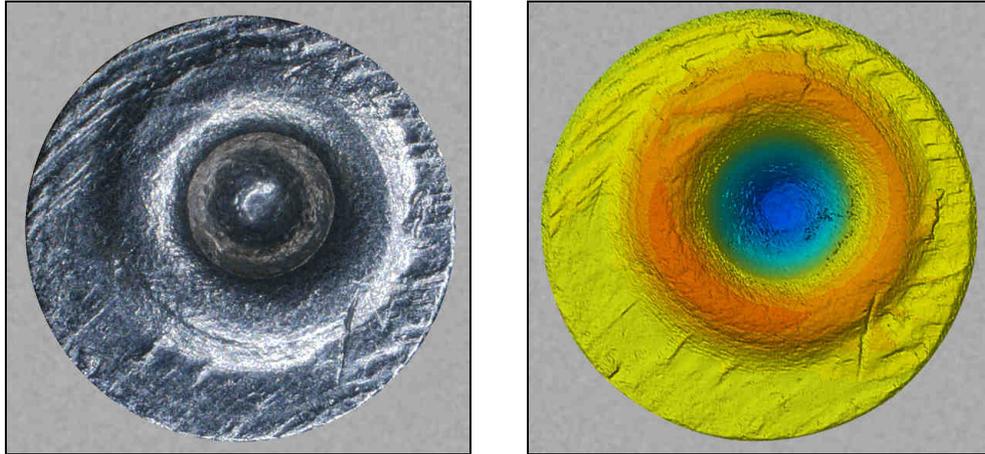


Figure 51

Comparaison 2D – 3D d'une trace du percuteur laissée par un pistolet Beretta 92 S calibre 9 mm Parabellum.

Suite aux excellents résultats obtenus, d'autres tests ont été effectués sur des traces présentant des pentes et des profondeurs importantes, notamment les traces du percuteur laissées par un pistolet 9 mm Parabellum fabriqué par Glock®. Les traces du percuteur laissées par les pistolets Glock®, connues pour avoir une pente presque verticale, n'ont pas posé de problèmes particuliers (Figure 52).

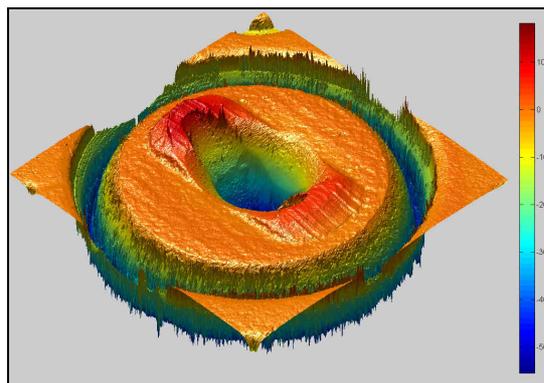


Figure 52

Mesures effectuées avec le profilomètre μ Scan® sur une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Glock®.

Profilomètre laser UBM

Le profilomètre laser UBM extrapole la topographie d'un objet en exploitant les informations provenant d'un faisceau laser réfléchi par l'échantillon. L'emploi de l'appareil testé a montré plusieurs défauts. D'un point de vue théorique cet appareil couvre les exigences nécessaires pour une recherche de ce type ; en effet, il permet d'effectuer des mesures à une résolution latérale de l'ordre du micromètre et une résolution verticale pouvant aller jusqu'au dixième de micromètre. La plage de mesure verticale est limitée à un millimètre, hauteur qui devrait être suffisante pour l'analyse de la plupart des traces. Néanmoins, les résultats ont montré plusieurs limitations. Premièrement, ce genre d'appareillage nécessite beaucoup de temps pour effectuer la mesure ; en effet, le laser doit balayer la zone d'intérêt ligne par ligne en effectuant des déplacements d'un micromètre entre une ligne et l'autre. Pour mesurer la surface comportant la trace du percuteur, correspondant plus ou moins à une zone de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$, le profilomètre laser UBM a besoin d'environ trois heures. Par contre, la limitation

affectant de manière plus prononcée l'application de cet appareillage à une cette recherche est l'impossibilité d'acquérir une mesure à certains endroits de l'échantillon. Cette impossibilité est due surtout au fait que, dans les parois de la trace du percuteur, où les valeurs maximales de la pente sont atteintes, le laser est complètement diffusé par l'échantillon, empêchant de ce fait au faisceau de revenir au détecteur. La mesure résultante est donc fausse.

Les instruments interférométriques

L'interférométrie est une technique qui se base sur les phénomènes d'interaction des faisceaux de lumière. Les essais ont été effectués avec un profilomètre optique NT 1100; il s'agit d'un interféromètre de type Michelson qui exploite les interférences de lumière blanche. Cet interféromètre possède une gamme verticale de mesure qui peut aller au maximum jusqu'à 1 millimètre. La résolution verticale peut atteindre des valeurs limitées par la gamme des longueurs d'onde du visible, mais qui sont largement suffisantes pour analyser les échantillons d'intérêt. La résolution latérale est inférieure au dixième de micromètre. La zone qui peut être analysée avec une seule mesure est assez limitée et dépend du grossissement de l'objectif utilisé. Mais il est aussi possible de choisir une zone d'intérêt plus grande. Dans une telle situation, l'appareil effectuera plusieurs mesures et fera ensuite une fusion de ces dernières pour donner comme résultat le profil de la zone présélectionnée (mode *stitching*). Lors des essais effectués, il a été constaté que l'utilisation d'un faible grossissement, afin d'avoir une zone de scannage plus grande, peut être à la source d'erreurs de mesure (Figure 53). Les résultats montrent que l'appareil n'arrive pas à effectuer les mesures dans les zones de la trace du percuteur où la pente augmente considérablement. Ceci pourrait également être dû à la grande pente et à la rugosité du matériel. De meilleurs résultats pourraient être théoriquement atteints à l'aide d'objectifs à plus faible grossissement.

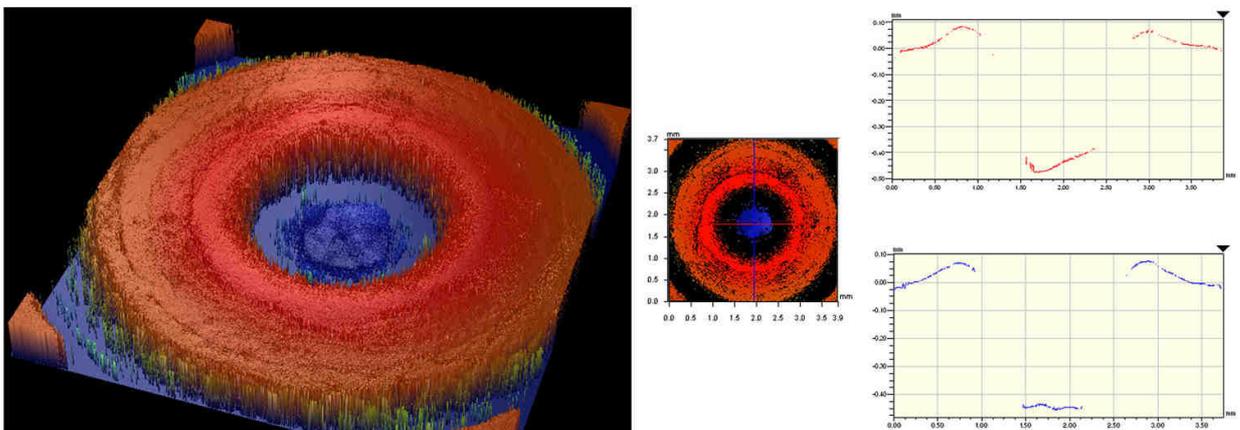


Figure 53

Mesures effectuées avec l'interféromètre NT 1100 sur une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Beretta 92 FS Compact.

Les instruments exploitant d'autres principes optiques

Holographie digitale

Pour tester cette technique un appareil développé, entre autres, par l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) a été utilisé. Les essais effectués n'ont pas donné de résultats exploitables. En effet, cette technique n'a pas permis de réaliser des mesures sur les surfaces à analyser ; ceci est probablement dû à la grande rugosité des matériaux composants

le sujet à observer. Il est donc évident que cette technique, dans le cas particulier, ne peut pas être employée pour les mesures des traces sur les douilles.

Aberrations chromatiques de la lumière blanche

Deux types d'appareils exploitant le principe d'aberrations chromatiques de la lumière blanche ont pu être testés. Il s'agit de deux profilomètres, le premier est le modèle Altisurf[®] 500 d'Altimet et le deuxième, le système de mesure Micromesure 2.

Le profilomètre Altisurf[®] 500, muni d'un capteur à aberrations chromatiques avec source lumineuse halogène, peut atteindre une résolution verticale de l'ordre du nanomètre et une résolution latérale de l'ordre du micromètre. La plage de mesure verticale dépend du capteur utilisé, mais elle se situe entre 0.8 et 3 mm. Les résultats sont excellents pour les mesures effectuées sur une trace du percuteur laissée par un Beretta 92 FS compact calibre 9 mm Parabellum. L'image ci-dessous montre la bonne qualité des mesures à l'intérieur de la trace du percuteur (Figure 54).

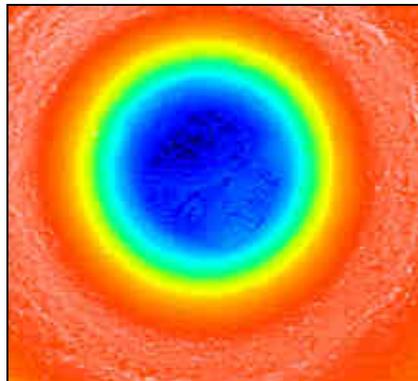


Figure 54

Mesures effectuées avec le profilomètre Altisurf[®] 500 sur une trace du percuteur laissée par un Beretta 92 FS Compact.

Par contre, des essais effectués sur des traces laissées par un pistolet Glock[®] montrent la difficulté de cette technique lorsque la pente des parois des traces est relativement importante. En effet, dans les images ci-dessous, les zones n'ayant pas pu être mesurées sont bien mises en évidence (Figure 55 – parties blanches).

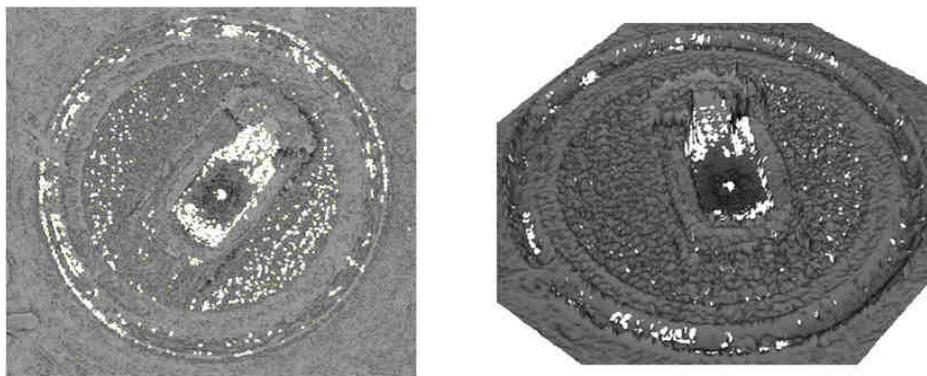


Figure 55

Mesures effectuées avec le profilomètre Altisurf[®] 500 sur une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Glock[®].

En outre, les mesures effectuées montrent la présence d'artéfacts se présentant sous la forme de pics très aigus qui ne devraient pas exister dans la réalité (Figure 55 – à droite). La cause de la formation de ces artéfacts est très probablement une erreur de lecture due à la présence d'impuretés ou une mauvaise mesure effectuée par le capteur due à des limitations optiques. Des essais ultérieurs ont montré que les résultats ne dépendent pas des propriétés réfléchissantes de la capsule d'amorçage.

Le profilomètre Micromesure 2 peut atteindre une résolution verticale de 100 nm et une résolution latérale de l'ordre du micromètre. La plage de mesure verticale est plus que suffisante (3 mm) pour couvrir la profondeur des traces telle qu'une trace du percuteur. Etant donné que le détecteur est un capteur ponctuel, la surface de l'échantillon est mesurée en utilisant un système de translation XY motorisé. Le principe de mesure du capteur est celui de la microscopie confocale à champ étendu grâce au codage spectral de ce champ³¹. Les résultats montrent les difficultés rencontrées par l'appareil pendant les mesures effectuées sur les parois de la trace du percuteur (Figure 56). Par contre, les mesures au fond de cette dernière sont de bonne qualité. Les résultats ne changent pas en effectuant des mesures sur des capsules d'amorçage composées de métaux différents. L'incapacité de réaliser des mesures dans certaines zones de l'échantillon est donc causée par la pente trop importante de la structure et non par des paramètres liés à la qualité de la réflexion de lumière de la part de l'échantillon.

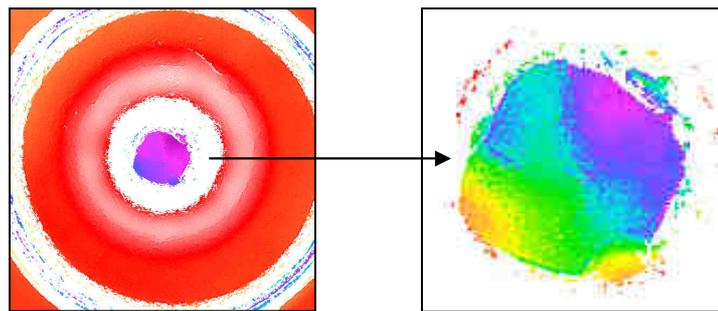


Figure 56

Mesures effectuées avec le profilomètre Micromesure 2 sur une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Beretta 92 FS Compact.

Les microscopes à balayage non optique

Les microscopiques électroniques à balayage

Des images ont été effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Figure 57). La plage de mesure est fonction du grossissement de l'objectif utilisé. Les essais ont été réalisés à l'aide de l'objectif avec le grossissement le plus faible, à savoir 25x. Cet objectif permet à peine de couvrir la zone de la capsule d'amorçage. L'image résultant ne peut pas être classifiée comme une information en trois dimensions à proprement parler car il manque des données quantitatives. Les résultats obtenus peuvent être quantifiés en utilisant des logiciels et une technique d'acquisition d'images en stéréographie. Cette technique peut nécessiter du temps [Bonfanti, 2002].

³¹ www.stilsa.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

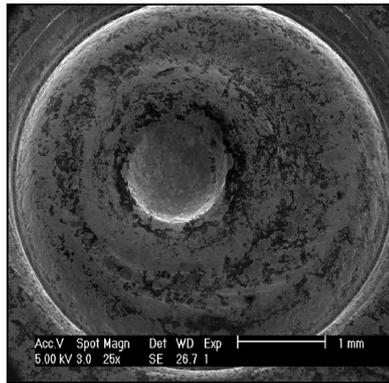


Figure 57

Image d'une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Beretta 92 S effectuée avec un microscope électronique.

L'image suivante montre l'extrapolation de la topographie de la trace du percuteur suite à l'emploi d'un logiciel qui extrapole la structure tridimensionnelle à partir de deux images acquises en stéréo (Figure 58).

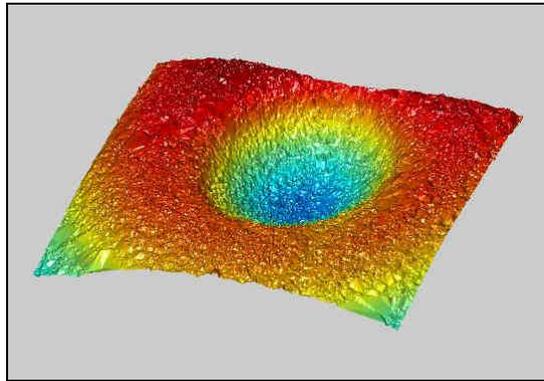


Figure 58

Reconstruction 3D de la trace du percuteur.

Les résultats montrent clairement la présence de bruit de fond et également de zones plates qui pourraient être le résultat d'une interpolation effectuée pendant l'extrapolation de la topographie. Ces résultats ne représentent pas correctement la surface des traces observées.

Les microscopes à balayage à sonde – Le microscope à force atomique (AFM)

Le microscope à force atomique EasyScan E-AFM a été employé dans le cadre de ces tests. Les essais ont été effectués uniquement sur des traces glissées telles que des stries présentes dans les impressions de champ d'un projectile tiré. Ceci est dû au fait que les performances de cet appareil ne couvrent pas les exigences requises pour les mesures des traces sur les douilles. En effet, la plage de mesure est d'environ 80 μm de côté et la capacité de travailler le long de l'axe Z est très limitée. Même si la qualité des mesures est remarquable et des applications pourraient être utiles dans d'autres domaines, il est évident que cette technique ne pourra pas être utilisée dans le cadre de cette recherche.

Techniques exploitant des conditions d'éclairage traditionnelles

Infinite Focus

Cette technique combine une petite profondeur de champ d'un système optique avec un scanner vertical afin de fournir une combinaison topographique et des images en couleurs à partir des variations de la mise au point. Des algorithmes traduisent par la suite ces informations pour reconstruire la topographie tridimensionnelle de l'objet. Cette technique peut atteindre facilement une résolution, dans les trois dimensions, de l'ordre du micromètre. Dans le cadre des tests effectués sur les douilles, un éclairage annulaire a été utilisé. Le *Infinite Focus* reproduit bien la structure générale, mais certains détails sur les traces sur les douilles ne sont pas reproduits fidèlement (Figure 59). Cette technique a l'avantage de pouvoir coupler la structure tridimensionnelle avec la texture en 2D, permettant la visualisation d'images d'excellente qualité à des fins démonstratives.

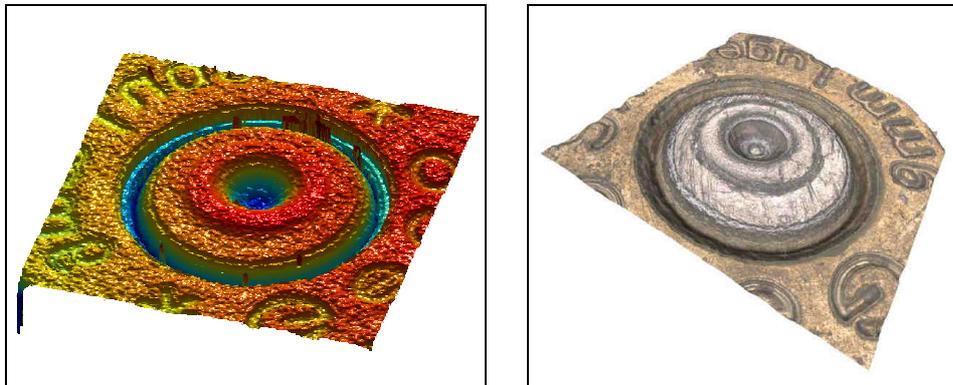


Figure 59

Image d'une capsule d'amorçage d'une douille tirée par un pistolet Beretta 92 S : reconstruction 3D (à gauche) et avec texture (à droite).

6.5 Choix effectuée

Les résultats des différents essais ont montré, de manière générale, que les techniques utilisant des principes optiques sont les plus adaptées pour effectuer des mesures sur ce genre de surface et d'échantillon, non seulement à cause du fait qu'il s'agit de techniques complètement non destructives, mais également pour la versatilité démontrée sur des supports tels que les surfaces métalliques des douilles. Parmi les systèmes pris en considération, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les profilomètres de Nanofocus AG et d'Altimet : μ Scan[®] et Altisurf[®] 500. Pour les deux systèmes, le temps nécessaire pour effectuer une mesure peut devenir relativement important en fonction de la résolution employée. Malgré son importance dans un cadre opérationnel, ce facteur n'a pas été capital dans le choix du système. En effet, les paramètres capitaux restent la qualité des mesures ainsi que leur reproductibilité. Les mêmes échantillons ont fait l'objet de mesures avec les deux appareils ; la comparaison directe des mesures montre que l'Altisurf[®] 500, au contraire du μ Scan[®], n'arrive pas à effectuer des mesures sur des traces ayant une pente importante. La qualité remarquable des mesures, les performances en termes de résolution et profondeur de champ, ainsi que la capacité de la station de mesure fabriquée par Nanofocus AG à effectuer des mesures topographiques sur des échantillons, tels que les douilles, a permis de focaliser les tests sur ce système de saisie tridimensionnelle de surface plutôt que sur les autres.

6.6 μ Scan[®]

La station de mesure μ Scan[®], équipée du détecteur confocal CF4, a été soumise à une série de tests plus détaillés afin d'étudier de manière plus approfondie la capacité de mesure de cet appareil dans le cas particulier des traces de la tête de culasse et du percuteur. Les performances de la station de mesure sont les mêmes que celles du système utilisé pendant les tests préliminaires, c'est-à-dire, résolution latérale de 1 μ m et verticale au niveau du dixième de micromètre. La plage de mesure sur le plan horizontal peut aller jusqu'à 10 x 15 cm, alors que la plage verticale est limitée à 1 mm.

6.6.1 Mesure d'un échantillon

La procédure pour effectuer une mesure débute avec l'installation de l'échantillon sur la table de mesure. Ensuite, à l'aide d'une caméra, il est possible de positionner le détecteur muni d'un faisceau laser sur l'échantillon (Figure 60). Une fois le laser centré sur l'objet, il est nécessaire de choisir la plage de mesure ainsi que la résolution latérale souhaitée. L'étape qui précède la mesure elle-même permet de déplacer le détecteur le long de l'axe vertical afin de vérifier que la plage de mesure de 1 mm couvre l'épaisseur de l'échantillon. Cette étape permet également de vérifier que la réflexion du laser sur l'échantillon soit suffisante pour que la mesure puisse avoir lieu. Une fois la mesure commencée, la table, sur laquelle l'échantillon est fixé, bouge sous le détecteur (Figure 60). À chaque intervalle dicté par la résolution préalablement choisie, le détecteur enregistre les informations spatiales relatives à la hauteur du point où le laser est réfléchi.

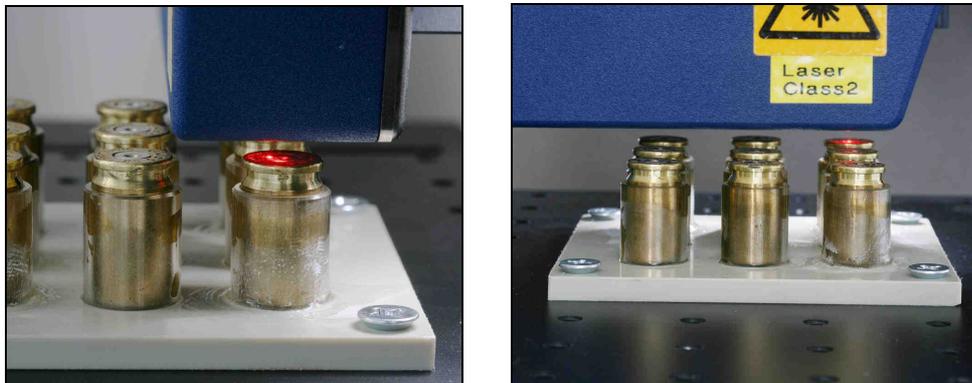


Figure 60

Images montrant le laser sur une douille pendant l'acquisition des données.

Ce processus a lieu jusqu'à ce que la plage de mesure sélectionnée préalablement ait été complètement scannée. L'appareil reporte comme résultat une matrice NxM, où chaque point possède une valeur correspondant à sa hauteur, qui peut être visualisée et analysée à l'aide du logiciel intégré dans le système de mesure. Le logiciel en question permet également plusieurs traitements mathématiques ainsi que l'exportation des données sous différents formats.

6.6.2 Exactitude des mesures

Une mesure peut être considérée comme exacte lorsqu'elle représente fidèlement l'objet mesuré. La présence d'artéfacts, ainsi que de valeurs métriques peu réelles, sont indice d'une

mauvaise qualité des mesures. Afin de juger de l'exactitude et donc de la qualité des mesures, deux aspects peuvent être pris en considération. Le premier est simplement lié à l'aspect visuel des mesures. La reconstruction tridimensionnelle effectuée doit correspondre morphologiquement à l'objet qui a été mesuré. Il est relativement facile de se rendre compte si des mesures ne correspondent pas morphologiquement à la surface mesurée. En effet, dans la plupart des cas, la présence d'artéfacts ou de formes inexistantes peut être rapidement détectée (Figure 61).

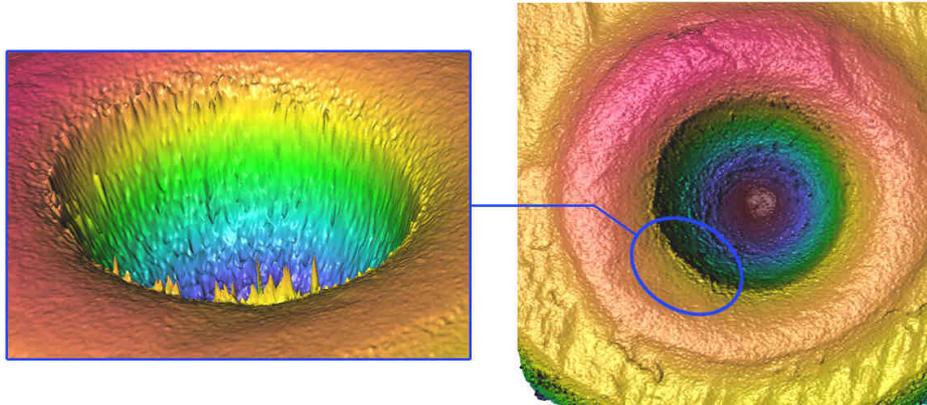


Figure 61
Image 3D représentant la présence d'artéfacts.

Certains types d'artéfacts peuvent être détectés, éliminés et interpolés avec les valeurs voisines. Ceci est rendu possible par le fait que le système d'acquisition enregistre également, pour chaque point mesuré, la valeur de réflexion du laser, c'est-à-dire, le pourcentage de lumière réfléchié par la surface (Figure 62). Il peut arriver que la quantité de lumière réfléchié ne soit pas suffisante et que par conséquent la mesure résultante soit fautive. Dans d'autres cas, l'artéfact peut être bien visible et avoir en même temps des valeurs de réflexions tout à fait normales.

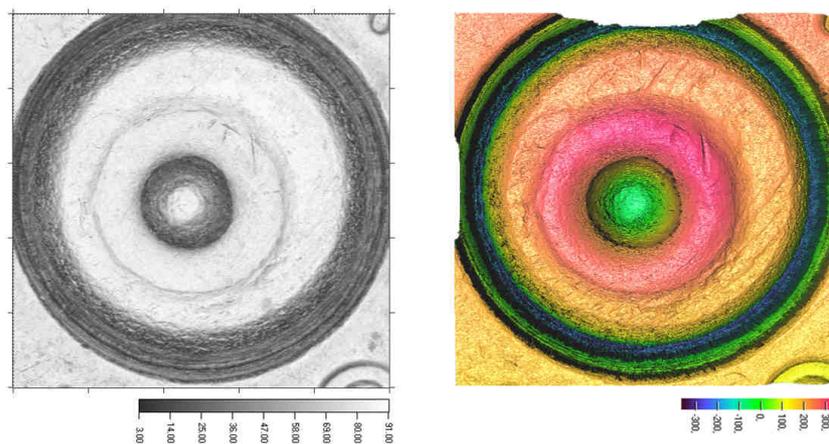


Figure 62
Images représentant les valeurs de réflexion du laser sur une capsule d'amorçage (à gauche) et structure 3D correspondante (à droite). Dans l'image de gauche, plus les pixels sont clairs et plus la quantité de lumière réfléchié au détecteur est importante.

Le deuxième aspect lié à l'exactitude des mesures concerne la valeur attribuée par la machine à chaque point. En d'autres termes, il est nécessaire de savoir si le système d'acquisition mesure correctement les différences de hauteur entre les points. Le meilleur moyen pour savoir si les mesures sont correctes est l'emploi de standards. Généralement, ce type d'appareil est soumis à calibration, en utilisant des standards spécifiques, à la livraison (le certificat de calibration peut être consulté en annexe – cf. Annexe D).

Dans un autre cas de figure, des points, voir des zones, sur la surface de la douille peuvent présenter des valeurs complètement erronées ne réfléchissant pas la vraie morphologie du sujet. Il s'agit de points qui n'ont pas pu être mesurés à cause du fait qu'ils se trouvaient au-delà de la plage de mesure verticale, qui est limitée à 1 mm. Dans ce cas, les mesures se présentent sous la forme de zones complètement lisses et parallèles au plan horizontal.

6.6.3 Reproductibilité des mesures

La reproductibilité peut être définie comme la capacité d'un système ou d'une technique à reproduire les mêmes mesures sur un même sujet. Pour tester la reproductibilité du profilomètre en question, plusieurs mesures de la même douille ont été effectuées et ceci en utilisant des résolutions allant de 2 μm à 4 μm . Etant donné que les mesures sont effectuées exactement sur la même zone, dans le but d'apprécier les différences entre deux mesures effectuées avec la même résolution, les valeurs relatives aux points d'une mesure sont soustraites aux points correspondants dans l'autre mesure. La matrice NxM résultante ne met en évidence que les différences entre les deux mesures (Figure 63 – à droite). Plus les valeurs de cette matrice sont proches de zéro, plus les deux mesures sont proches l'une de l'autre. Il n'y a pas de moyens pour quantifier et tester la reproductibilité des mesures ; ces résultats pourront quand même donner une idée du niveau de reproductibilité de l'appareil. Les images ci-dessous montrent les résultats obtenus (Figure 63).

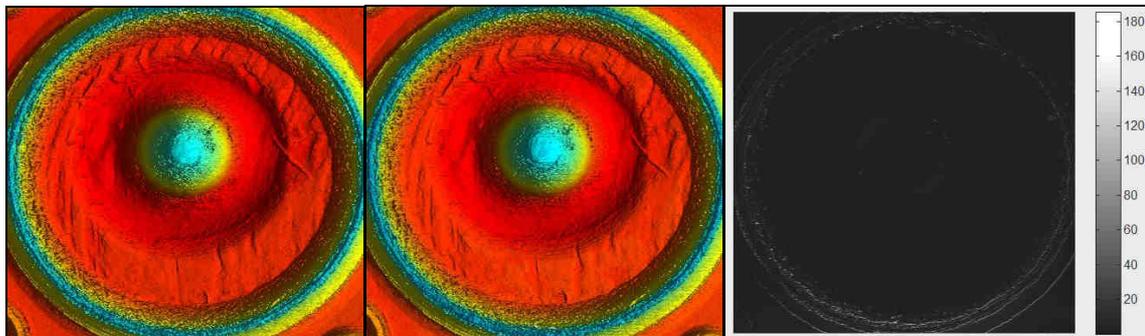


Figure 63

Mesures 3D de la même douille prises à une résolution de 2 μm (à gauche) et différence de ces deux images (à droite).

Les résultats montrent qu'à une résolution de 2 μm , la moyenne ainsi que la médiane de la différence absolue des deux mesures pour tous les points sont respectivement d'environ 3.5 et 2.4 μm . Pour les mesures effectuées à 4 μm , ces valeurs sont respectivement d'environ 1.0 et 0.5 μm . La source de cette différence se concentre majoritairement dans les zones qui présentent des pentes importantes ou des conditions de réflexion difficile, telles que les bords de la capsule d'amorçage et de la trace du percuteur (Figure 63). Les différences plus importantes entre les mesures se situent au niveau des bords de la capsule d'amorçage. Cette

partie de la douille n'entre pas en contact avec l'arme pendant le tir, elle n'est donc pas de grand intérêt dans le cadre de cette recherche.

Il est évident que si les mêmes essais avaient été effectués en remplaçant à chaque mesure le même échantillon sous le laser et en redéfinissant, à chaque fois, la plage de mesure, il y aurait des différences relativement plus importantes pour les mesures effectuées sur le même échantillon. Ceci est principalement dû au fait que lorsque l'échantillon est placé sous le détecteur, il est difficile qu'il soit exactement dans la même position que lors de la mesure précédente. Il est donc possible que l'inclinaison de la surface par rapport au laser soit modifiée, engendrant de cette façon de légères différences. Ces dernières n'ont pas pu être quantifiées car pour le faire, il aurait fallu aligner, l'une sur l'autre, les diverses mesures effectuées afin de calculer la différence de hauteur pour chaque point. La phase d'alignement comporte également des incertitudes sur les résultats étant donné que l'alignement sera difficilement parfait. La quantification des différences entre deux images 3D alignées représenterait ainsi la somme des incertitudes liées à l'acquisition et à l'alignement.

6.6.4 Résolution latérale

La résolution latérale peut être définie comme la distance mesurée entre deux points proches l'un de l'autre. Ceci signifie que, plus la résolution est bonne et plus la distance entre ces deux points sera petite. Une meilleure résolution comporte également, pour une même plage de mesure, une augmentation des points employés pour la décrire. Etant donné que le profilomètre effectue un scan de la surface en deux dimensions (X et Y), cela signifie qu'il est possible d'effectuer des mesures en employant des résolutions différentes pour chaque axe. L'image résultante sera une matrice $N \times M$ où N est différent de M. En d'autres termes, l'image résultante n'est pas carrée mais plutôt rectangulaire.

Les recherches effectuées jusqu'à aujourd'hui dans le domaine conseillent l'emploi d'une résolution latérale aux alentours du micromètre. Malgré ces indications, deux facteurs importants doivent être pris en considération lors du choix de la résolution à employer. Le premier est la perte d'informations en fonction de la résolution. En effet, plus la résolution est mauvaise (c'est à dire une grande distance entre les points), plus les différentes caractéristiques des traces seront décrites par une quantité plus petite de points. Ceci se traduit par la perte de certains détails. La résolution employée pour l'étude doit donc être suffisante pour pouvoir décrire correctement la plupart des défauts morphologiques caractérisant une trace. D'autre part, une résolution trop poussée favorise la formation d'un bruit de fond par rapport au signal mesuré [Bonfanti, 2002]. Un autre facteur capital dans le choix de la résolution est la quantité des données résultante. Plus la résolution est élevée et plus la quantité de points doit être importante pour décrire la même plage de mesure. A titre d'exemple, pour une capsule d'amorçage d'une cartouche de calibre 9 mm Parabellum, de taille 4.5 x 4.5 mm, les mesures à 2 et 6 μm produisent des images composées respectivement par 5'062'500 et 562'500 points chacune. L'utilisation d'une résolution plus poussée se traduit non seulement dans des images beaucoup plus lourdes en termes de données mais également au niveau du temps d'acquisition qui est nettement plus important. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre ces facteurs ; pour ce faire, la première étape consiste dans l'observation des traces mesurées avec différentes résolutions afin de pouvoir étudier la perte des détails.

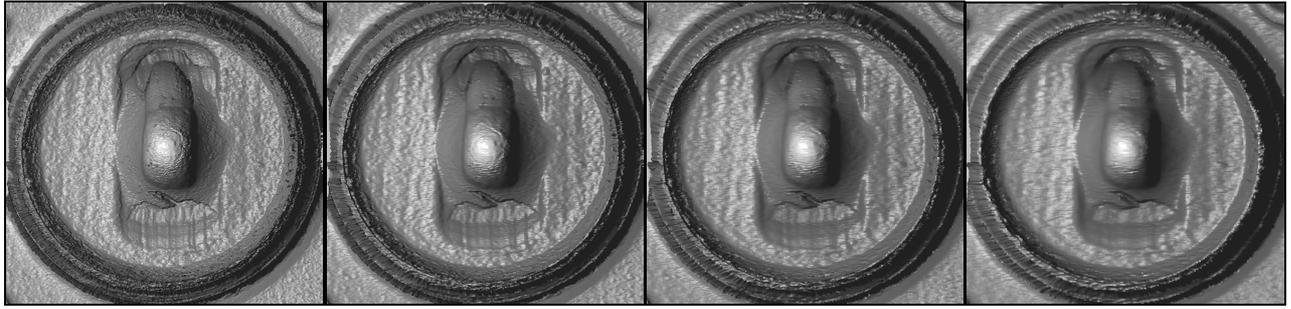


Figure 64

Mesures 3D d'une douille tirée par un pistolet Glock® à des résolutions de 2, 4, 6 et 8 μm (de gauche à droite).

Les images ci-dessus montrent la perte de détails en fonction de la diminution de la résolution (Figure 64). Les mesures effectuées avec une résolution supérieure à 4 μm présentent des pertes de détails relativement importantes. Il est possible d'observer ce phénomène principalement sur les traces glissées laissées par le pistolet Glock® (*Shear Marks*) qui sont caractérisées par des détails relativement fins.

En ce qui concerne le temps d'acquisition, pour des résolutions de 2 et 4 μm , le système nécessite respectivement environ 140 et 40 min pour couvrir une plage de mesure correspondante à une capsule d'amorçage d'une cartouche de calibre 9 mm Parabellum. La quantité de données reste importante pour les deux résolutions ; à noter qu'elle est quand même quatre fois plus grande pour la mesure à 2 μm par rapport à celle de 4 μm .

Suite à ces observations, un compromis a été effectué entre tous les facteurs cités ci-dessus et une résolution de 3 μm a été adoptée pour la suite du travail.

6.6.5 Statif

Afin d'optimiser la standardisation des mesures et dans le but de positionner les échantillons de manière à ce que la surface du culot de la douille soit la plus perpendiculaire possible au faisceau laser, un statif a été conçu (Figure 65). Ce statif est composé par une base carrée sur laquelle un cylindre creux en plastique est positionné verticalement. Le cylindre, qui présente un diamètre interne légèrement supérieur à celui d'une douille de calibre 9 mm Parabellum, possède une vis sur le côté qui permet de réduire le diamètre disponible et donc d'employer le statif également pour des calibres inférieurs en diamètre.

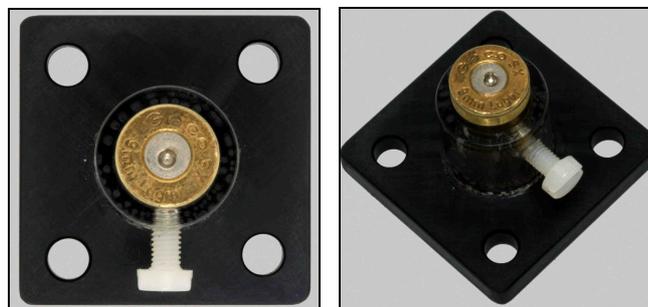


Figure 65

Statif pour une douille.

6.6.6 Mesures multiples – NF Automation

La station de mesure $\mu\text{Scan}^{\text{®}}$ peut également être équipée avec un logiciel, appelé NF Automation, qui permet d'effectuer plusieurs mesures à la suite sans devoir, après chaque mesure, introduire les coordonnées du nouvel échantillon. Ce logiciel est très pratique car il permet de lancer une dizaine des mesures à la suite sans interruptions et sans intervention d'un opérateur. Etant donné le temps nécessaire pour effectuer une mesure, il est envisageable de lancer la séquence pendant toute une nuit. L'utilisation de ce logiciel nécessite donc la conception d'un autre type de statif permettant de fixer plusieurs douilles en même temps. Le statif conçu dans ce but comporte neuf emplacement (Figure 66). La quantité d'échantillons pouvant être mesurés à la fois à l'aide de ce logiciel dépend seulement de la plage de mesure du système qui est limitée à une surface de 10 x 15 cm.



Figure 66
Statif permettant la fixation de plusieurs douilles en même temps.

6.7 Résumé du chapitre

Le début du chapitre s'est concentré sur les performances minimales requises pour qu'une technique particulière de saisie tridimensionnelle de surface puisse être utilisée dans le cadre de cette recherche. Cette partie a été suivie par une présentation de diverses façons employées dans ce document afin de visualiser des images 3D. Les essais effectués dans le cadre de cette recherche au moyen de différentes techniques de saisie tridimensionnelle de surface ont ensuite été exposés. Les meilleurs résultats sur une surface telle qu'une douille ont été obtenus à l'aide du profilomètre laser à détection confocale $\mu\text{Scan}^{\text{®}}$. Ce dernier sera employé pour la suite de la recherche.

7 COMPARAISON ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

Le développement d'une comparaison assistée par ordinateur se base sur la mise en relation de plusieurs algorithmes afin de pouvoir calculer une mesure de proximité à partir des mesures tridimensionnelles représentant les traces du percuteur et de la tête de culasse. Plusieurs algorithmes distincts ont été développés dans le but de pouvoir comparer deux structures tridimensionnelles. L'implémentation des algorithmes a été effectuée à l'aide du logiciel Matlab[®] 7.5. L'ordinateur utilisé pour le développement et pour les comparaisons est un PC équipé d'un processeur Intel Core 2 Duo 2.4GHz³².

L'ensemble des algorithmes employés dans cette étude a été implémenté, soit sur la base de concepts mathématiques préexistants, soit selon des exigences particulières venues se manifester pendant le développement. Afin de permettre au lecteur une lecture fluide du texte, dans les prochains paragraphes une introduction des termes techniques de base ainsi que des concepts souvent employés par la suite est proposée.

7.1 Concepts mathématiques de base

7.1.1 Images 2D

Tresholding, seuillage ou binarisation

Le *tresholding* ou seuillage est une transformation permettant de sélectionner des pixels dans une image ayant une valeur supérieure à un certain seuil et de rejeter ceux possédant une valeur inférieure. Le résultat d'une opération de seuillage est généralement une image binaire (où les pixels possèdent des valeurs binaires qui peuvent varier entre 0 (couleur noir) et 1 (couleur blanc)) dans laquelle les pixels blancs représentent les points de l'image originelle ayant une valeur supérieure au seuil [Russ, 1995].

Masque, image binaire et NaN's

Dans le cadre de ce travail, la notion de « masque » est souvent employée. Un masque a été défini comme une image binaire composée par des pixels de valeur zéro et par une forme d'intérêt décrite par des pixels de valeur un. Le masque M est souvent appliqué sur une image de même taille I ; le résultat est donc une image It représentant les données de I coupées selon la forme établie par M . Chaque pixel du masque est multiplié par le pixel correspondant dans I . Si le point du masque possède une valeur égale à un, alors le pixel de l'image originelle sera transmis à l'image résultante It . Par contre, si la valeur du pixel du masque est équivalente à zéro, les données relatives aux pixels en questions ne sont pas transmises à It .

Pour des raisons liées à la visualisation des images 3D ainsi qu'à des raisons algorithmiques, la valeur zéro des pixels du masque est souvent remplacée par des NaN. Les NaN, connus

³² La totalité des algorithmes utilisés dans le cadre de ce travail peuvent être demandés auprès de l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne (<http://www.unil.ch/esc>).

également sous la définition anglaise de *Not a Number*, peuvent prendre place d'un pixel dans une image. Suite à leur application, le pixel en question n'aura plus une valeur définie.

Filtrage dans le domaine spatial

Le filtrage d'une image dans le domaine spatial est effectué par l'application d'un *kernel* sur l'image originelle, appelé également matrice de convolution. Le *kernel* est une matrice définie par une certaine taille $N \times M$ (où normalement $N = M$) dans laquelle chaque élément représente un coefficient. L'application du *kernel* consiste dans le passage de la matrice de convolution sur chaque point de l'image originelle. Pour chacun, la valeur des pixels d'intérêt ou adjacents sont multipliés par les coefficients du *kernel*. La somme des multiplications est divisée par la somme des coefficients du *kernel*. La valeur résultante remplacera la valeur du pixel central.

La taille de la matrice de convolution ainsi que les valeurs des coefficients influencent largement l'effet de la convolution sur l'image originelle. En fonction des valeurs des coefficients, la convolution permet de lisser une image, d'en augmenter le contraste ou encore d'en calculer les dérivées. Les matrices de convolution, qui sont normalement de petite taille (3x3, 5x5, 7x7, etc.), peuvent également être appliquées en séquence sur l'image [Russ, 1995]. Trois types de *kernel* ont été principalement utilisés dans ce travail :

- Le filtre moyen: matrice composée uniquement de 1. L'application par convolution de cette matrice permet de lisser de manière grossière une image.
- Le filtre gaussien: les coefficients sont calculés à partir d'une courbe de Gauss. Le lissage opéré par ce type de filtre est de meilleure qualité que celui résultant d'un filtre moyen. Ceci est principalement dû au fait que les voisins les plus proches au pixel central influencent majoritairement le résultat de la convolution par rapport aux pixels plus éloignés. Ce type de filtre est très pratique pour la suppression du bruit de fond.
- Les filtres de Sobel (ensemble de filtres): contrairement au filtre gaussien, les matrices sont ici asymétriques permettant le calcul des dérivées de l'image dans différentes directions. Par conséquent, il est possible, en combinant les résultats obtenus suite à l'application des filtres de Sobel, d'extrapoler la direction du gradient à chaque pixel de l'image [Russ, 1995].

Le domaine fréquentiel – Le domaine de Fourier

Plusieurs types de transformations peuvent être appliqués sur une image, et une des plus connues reste la transformation de Fourier. Cette notoriété est principalement due au temps très limité nécessaire pour effectuer cette opération mathématique. Cette transformation est effectuée par un algorithme connu sous le nom de *Fast Fourier Transform* (FFT) et peut-être résumée théoriquement de la manière suivante [Russ, 1995]:

- Soit $f(x)$ une fonction où x est une variable réelle représentant le temps ou l'espace le long d'une direction dans une image.
- Le théorème de Fourier édicte qu'il est possible de former toute fonction unidimensionnelle $f(x)$ comme la somme d'une série de sinus et cosinus de fréquence croissante.

- La transformation de Fourier $F(u)$ de la fonction $f(x)$ est décrite comme la quantité de chaque fréquence devant être mise ensemble pour former $f(x)$.
- Une des plus importantes caractéristiques est la réversibilité de cette transformation. En effet, à partir du domaine fréquentiel, il est possible de revenir au domaine spatial, à savoir au type d'image traditionnel.

Le résultat suite à l'application de la transformée de Fourier est une image dans le domaine fréquentiel (Figure 67 – à droite). Les basses fréquences représentent les formes plus globales de l'image et les hautes fréquences les caractéristiques plus fines, y compris le bruit de fond. Pour des raisons pratiques, les hautes fréquences viennent se transposer vers le centre de l'image, transformant symétriquement les quadrants de l'image [Russ, 1995]. Les images ci-dessous montrent une image originale et la transformation de Fourier correspondante.



Figure 67

Image de Lena³³ (à gauche) et la transformée de Fourier correspondante (à droite).

Filtrage dans le domaine fréquentiel

Le passage au domaine fréquentiel permet d'accéder à des informations difficilement accessibles dans le domaine spatial. Par exemple, le filtrage dans le domaine de Fourier permet de couper, voir d'atténuer, certaines fréquences. L'application d'un filtre peut être vue comme étant une sorte de « fenêtre » laissant passer certaines fréquences tout en bloquant des autres. Si les hautes fréquences sont coupées et les basses sont persistantes à l'application du filtre, le filtre est appelé « passe-bas ». Dans le cas contraire, le filtre prendra le nom de filtre « passe-haut ». De même, si l'intérêt se concentre sur une partie de fréquences adjacentes, un filtre « passe-bande » peut être employé. Les images ci-dessous montrent respectivement les résultats de l'utilisation d'un filtre « passe-haut » et d'un filtre « passe-bas » sur la même image (Figure 68).

³³ <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~sastry/ee20/images/lena.gif> – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

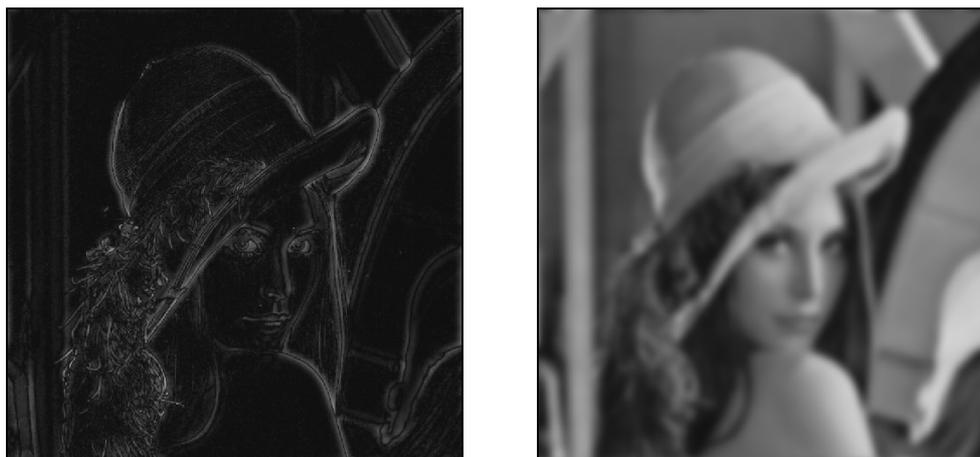


Figure 68

Images de Lena après application d'un filtre « passe-haut » (à gauche) et « passe-bas » (à droite).

Certaines opérations qui ont lieu dans le domaine fréquentiel peuvent également être effectuées dans le domaine spatial mais avec un coût computationnel nettement supérieur.

Interpolation des données

En mathématique, le processus d'interpolation permet de créer des nouvelles valeurs à partir des valeurs discrètes à disposition. Cette définition se réfère à des fonctions en une dimension aussi bien qu'à des images bidimensionnelles ou tridimensionnelles. Dans le cas des images en deux dimensions, l'interpolation est souvent employée lorsqu'une image a subi une transformation, comme une rotation par exemple, ou lorsque des changements de résolutions sont effectués (rééchantillonnage). Dans le cas de la rotation en particulier, les pixels se trouvent souvent à des coordonnées cartésiennes n'ayant pas de valeurs discrètes. Afin de visualiser les images ou d'effectuer des opérations mathématiques ultérieures, l'interpolation des données relatives aux pixels sur des coordonnées ayant des valeurs discrètes est nécessaire.

Différents types d'interpolation existent. Les plus connus sont l'interpolation au plus proche voisin, qui se base sur la valeur du point le plus proche, l'interpolation bilinéaire, qui pondère la valeur du nouveau point en fonction des quatre points les plus proches et l'interpolation bicubique, qui prend en considération les seize points les plus proches en les pondérant en fonction de la distance. Cette dernière permet souvent d'obtenir des images de meilleure qualité par rapport aux résultats obtenus avec les deux autres méthodes d'interpolation³⁴.

Coordonnées cartésiennes, coordonnées polaires et coordonnées sphériques

Les coordonnées cartésiennes représentent la manière la plus naturelle de définir un système de coordonnées. Les coordonnées cartésiennes dans le plan sont définies par un point d'origine O et par deux vecteurs non colinéaires. Les axes de ce système de mesure sont communément appelés l'axe des abscisses (X) et l'axe des ordonnées (Y). Dans le cas du système de coordonnées dans l'espace, l'espace est décrit par une origine O et par trois vecteurs non coplanaires. L'axe Z est connu sous le nom de hauteur.

³⁴ <http://ftp2.bmtmicro.com/dlc/Resampling.pdf> – Dernière consultation effectuée en date du 10 septembre 2010

Un point P dans le plan décrit par ses coordonnées cartésiennes x et y peut être également être décrit à l'aide des coordonnées polaires r et θ où r correspond à la longueur du segment mettant en relation l'origine O au point P et θ représente l'angle « theta » entre l'axe des abscisses et le segment en question (Figure 69).

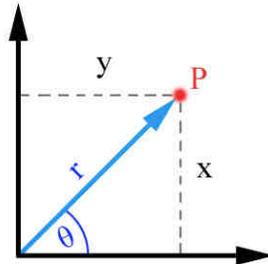


Figure 69

Schéma représentant un système de coordonnées polaires.

Les coordonnées sphériques sont une généralisation dans l'espace des coordonnées polaires (Figure 70). Un point P dans l'espace peut également être décrit par les coordonnées sphériques r , θ et φ . Où φ représente l'angle « phi » entre le segment reliant l'origine O au point P et sa projection sur le plan XY.

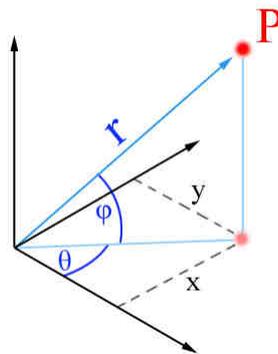


Figure 70

Schéma représentant un système de coordonnées sphériques.

7.1.2 Topographies 3D

Translation dans l'espace

Etant donné un ensemble de points dans l'espace décrit par les coordonnées X , Y , Z , une translation dans l'espace peut être appliquée à l'ensemble des points en incrémentant leur valeurs par les composantes d'un vecteur 3×1 . Chaque élément du vecteur de translation représente le déplacement le long d'un des trois axes du plan cartésien.

Rotation dans l'espace

Etant un ensemble de points dans l'espace décrits par les coordonnées X_0 , Y_0 , Z_0 , une rotation dans l'espace peut être impartie à ces points par simple multiplication avec une matrice de rotation. La matrice de rotation est une matrice 3×3 qui permet la transformation

des points vers les nouvelles coordonnées X_1, Y_1, Z_1 sans qu'aucune déformation n'ait lieu. Il existe plusieurs façons d'appliquer une rotation à un ensemble de points dans l'espace, néanmoins, dans le cadre de ce travail, seuls les angles d'Euler et les quaternions ont été employés :

- Angles d'Euler

La représentation la plus naturelle de la rotation est définie par ses angles d'Euler qui généralise les coordonnées sphériques. Une matrice de rotation \mathbf{R} peut toujours être décrite comme le produit de trois rotations successives (α, β, γ) autour d'axes orthogonaux :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \quad [a]$$

L'opération inverse pour l'extraction d'angles à partir de la matrice de rotation est réalisée par l'identification des coefficients de la matrice avec leur expression analytique [Marti, 2007].

- Quaternions

Une rotation dans l'espace 3D peut être également représentée par un quaternion unitaire. Un quaternion \mathbf{q} est un nombre complexe composé de 4 éléments de l'espace réel et trois composants imaginaires pouvant être décrits par la combinaison linéaire suivante : $\mathbf{q} = \mathbf{a} + \mathbf{b}i + \mathbf{c}j + \mathbf{d}k$ où i, j et k sont des coordonnées complexes régies par la relation suivante : $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ [Marti, 2007 et Jost, 2002]. La multiplication entre deux quaternions n'est pas un produit commutatif (il ne s'agit pas d'une opération symétrique), le produit entre le quaternion \mathbf{q} et \mathbf{p} ne donne donc pas le même résultat que le produit entre \mathbf{p} et \mathbf{q} . Néanmoins, il est possible d'associer une matrice orthogonale \mathbf{Q} à un quaternion \mathbf{q} . De cette façon le produit entre deux quaternions peut être exprimé par le produit entre deux matrices. Si

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \mathbf{a} & -\mathbf{b} & -\mathbf{c} & -\mathbf{d} \\ \mathbf{b} & \mathbf{a} & -\mathbf{d} & \mathbf{c} \\ \mathbf{c} & \mathbf{d} & \mathbf{a} & -\mathbf{b} \\ \mathbf{d} & -\mathbf{c} & \mathbf{b} & \mathbf{a} \end{pmatrix} \quad \bar{\mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} \mathbf{a} & -\mathbf{b} & -\mathbf{c} & -\mathbf{d} \\ \mathbf{b} & \mathbf{a} & \mathbf{d} & -\mathbf{c} \\ \mathbf{c} & -\mathbf{d} & \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{d} & \mathbf{c} & -\mathbf{b} & \mathbf{a} \end{pmatrix} \quad [b]$$

alors le produit entre deux quaternions peut être exprimé de la façon suivante :

$$\mathbf{qp} = \mathbf{Qp} \neq \mathbf{pq} = \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{p} \quad [c]$$

Ces propriétés sont utilisées pour extraire la matrice de rotation \mathbf{R} qui est définie de la manière suivante :

$$\bar{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad [d]$$

Les images suivantes montrent une rotation dans l'espace d'une trace du percuteur effectuée par application d'une rotation représentée à l'aide d'un quaternion (Figure 71).

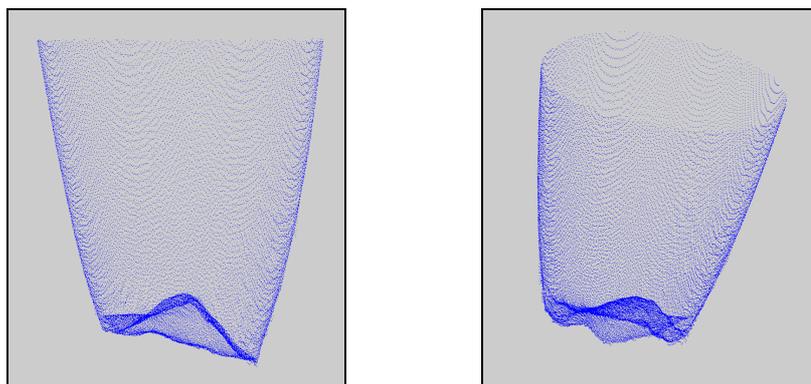


Figure 71

Rotation d'une trace du percuteur sous la forme d'un nuage de points. Pose initiale (à gauche) et après rotation (à droite). L'extrapolation de la matrice de rotation a été effectuée au moyen d'un quaternion.

Recalage rigide

Le recalage, connu également sous la terminologie anglaise de *registration*, est le processus d'estimation d'une transformation optimale entre deux jeux de données. Le recalage est dit rigide si la transformation géométrique est affine [Marti, 2007], autrement dit, si la transformation est composée principalement de rotations et translations, sans qu'aucune déformation élastique n'ait lieu.

7.2 Comparaison de structures 3D – Principes de base

Une structure tridimensionnelle peut être décrite par plusieurs caractéristiques, certaines plus générales, d'autres plus fines. Les caractéristiques utilisées pour décrire une mesure 3D sont nombreuses mais toutes ne peuvent être utilisées pour comparer les stigmates laissées par une arme sur la surface de la douille. Comparer deux formes tridimensionnelles signifie déterminer la similarité entre les deux structures. Pour ce faire, plusieurs techniques existent. Ces techniques de comparaison diffèrent principalement dans la ou les caractéristiques qui font l'objet de la comparaison. Le choix concernant la technique de comparaison dépendra donc du genre de caractéristique que l'on souhaite comparer.

7.2.1 Descripteur de forme

Certaines techniques se limitent à la comparaison des caractéristiques géométriques ou topographiques globales. Ces techniques impliquent la description d'un modèle 3D à l'aide d'un « descripteur de forme » (*Shape Descriptor*) qui est une abstraction structurée d'un modèle tridimensionnel capturant l'information essentielle correspondante à la forme. Ce genre de descripteur est souvent utilisé pour effectuer un tri dans une base de données contenant plusieurs modèles 3D. La comparaison s'effectue en comparant les *Shape Descriptors* de tous les modèles. A titre d'exemple, une structure tridimensionnelle peut être décrite à l'aide de la distribution des distances entre des points pris au hasard dans la surface [Tangelder et al., 2004]. Cette technique, même si elle résulte robuste et facilement utilisable dans le cadre d'un tri dans une base de données, reste peu sensible par rapport aux détails.

Si la technique employée nécessite un alignement en amont de la comparaison des caractéristiques globales, plusieurs méthodologies peuvent être employées : une recherche d'alignement exhaustive, qui implique la comparaison pour toute translation et rotation possibles, un alignement par normalisation de la translation et de la rotation ou l'utilisation de descripteurs invariants à la rotation et à la translation. Dans ce dernier cas, les *Shape Descriptors* ne sont pas influencés par la position du modèle dans l'espace ; la forme du modèle sera donc décrite toujours de la même manière quelle que soit la position du modèle. C'est notamment le cas des harmoniques sphériques proposées par Kazhdan et al. (Figure 72). Ces derniers proposent un descripteur invariant à la rotation se basant sur la contribution des harmoniques sphériques utilisées pour décrire l'image [Kazhdan et al., 2003].

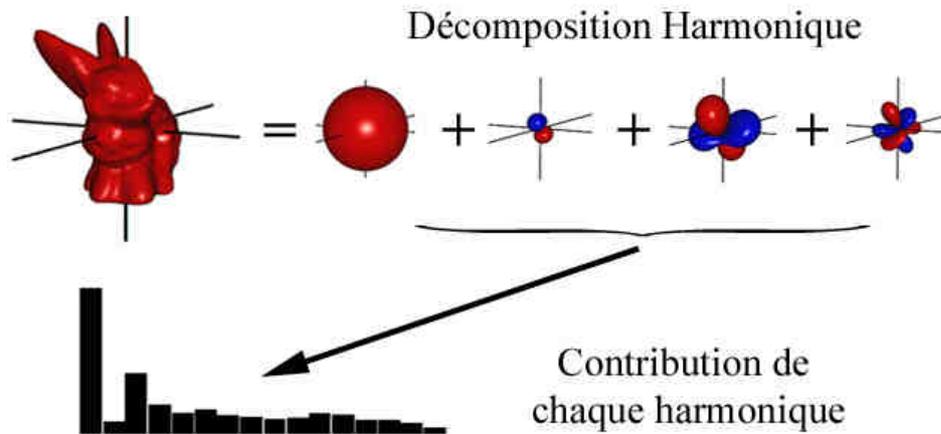


Figure 72

Description d'une forme 3D en utilisant la fréquence des harmoniques sphériques [Kazhdan et al., 2003].

D'autres techniques analogues existent, mais, même si elles peuvent être efficaces dans le cadre d'une comparaison globale entre modèles 3D, elles sont difficilement applicables à la comparaison de structures tridimensionnelles des traces sur les douilles. Ceci est principalement dû au fait que ces dernières sont des surfaces qui possèdent des caractéristiques globales souvent similaires même si elles ont été laissées par des armes différentes. La différenciation de deux douilles tirées par des armes différentes et l'assimilation de deux douilles tirées par la même arme se basent notamment sur les détails de traces.

7.2.2 Alignement rigide de structures 3D

La comparaison des traces sur les douilles doit porter sur les détails les plus fins des traces. Apprécier les stigmates laissés par l'arme sur une douille est une étape strictement liée au type de trace étudiée. Par exemple, la comparaison de traces glissées s'effectue forcément de façon différente à la comparaison des traces moulées. Ceci est principalement dû aux différences liées à la formation de ces traces. Superposer deux traces pour les comparer peut avoir du sens pour des traces moulées mais pas pour des traces glissées, qui se prêtent, quant à elles, mieux à une comparaison par juxtaposition (Figure 73).

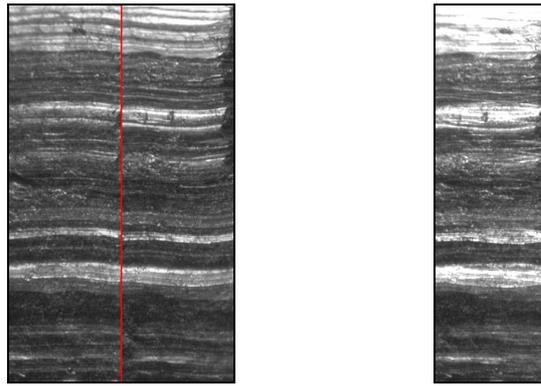


Figure 73

Juxtaposition de deux *Shear Marks* laissées par la même arme (à gauche) et superposition (à droite).

Etant donné que les traces du percuteur et de la tête de culasse sont des traces moulées, les techniques de comparaison seront adaptées à ce genre de trace. Afin de comparer les détails des traces moulées, l'approche choisie se base sur l'appréciation des similitudes entre deux traces suite à un alignement dans l'espace de ces dernières.

L'alignement dans l'espace (ou recalage rigide) a déjà été employé plusieurs fois dans le cadre des comparaisons de structures tridimensionnelles des traces laissées par une arme [Vicario et al., 1995 ; Banno et al., 2004 ; Vorburger et al., 2007]. Dans les travaux publiés par Vicario en 1995 et par Banno en 2004, l'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*) a été employé pour aligner les mesures tridimensionnelles des traces laissées par une arme sur les projectiles ou les douilles. Une recherche exhaustive publiée récemment par le NIST (*National Institute of Standards and Technology*) a été effectuée sur la comparaison automatique des traces 3D sur les douilles. Ce document montre de manière détaillée la procédure de comparaison par alignement ainsi que les résultats obtenus [Vorburger et al., 2007].

7.3 Structure de l'algorithme

Malgré le fait que les phases d'alignement de deux structures tridimensionnelles représentent le cœur de l'algorithme, elles ne pourraient aboutir à des résultats exploitables sans que d'autres traitements et d'autres algorithmes soient employés. En effet, avant que deux traces puissent être alignées, plusieurs traitements préliminaires sont nécessaires. En outre, une fois que deux traces ont pu être alignées, il faut employer une ou plusieurs métriques pour quantifier le niveau de ressemblance entre les deux traces en question.

Dans les prochains paragraphes, la totalité des algorithmes développés, ainsi que le choix des algorithmes plus performants sera présentée. Le schéma ci-dessous illustre la structure générale de cette section (Figure 74).

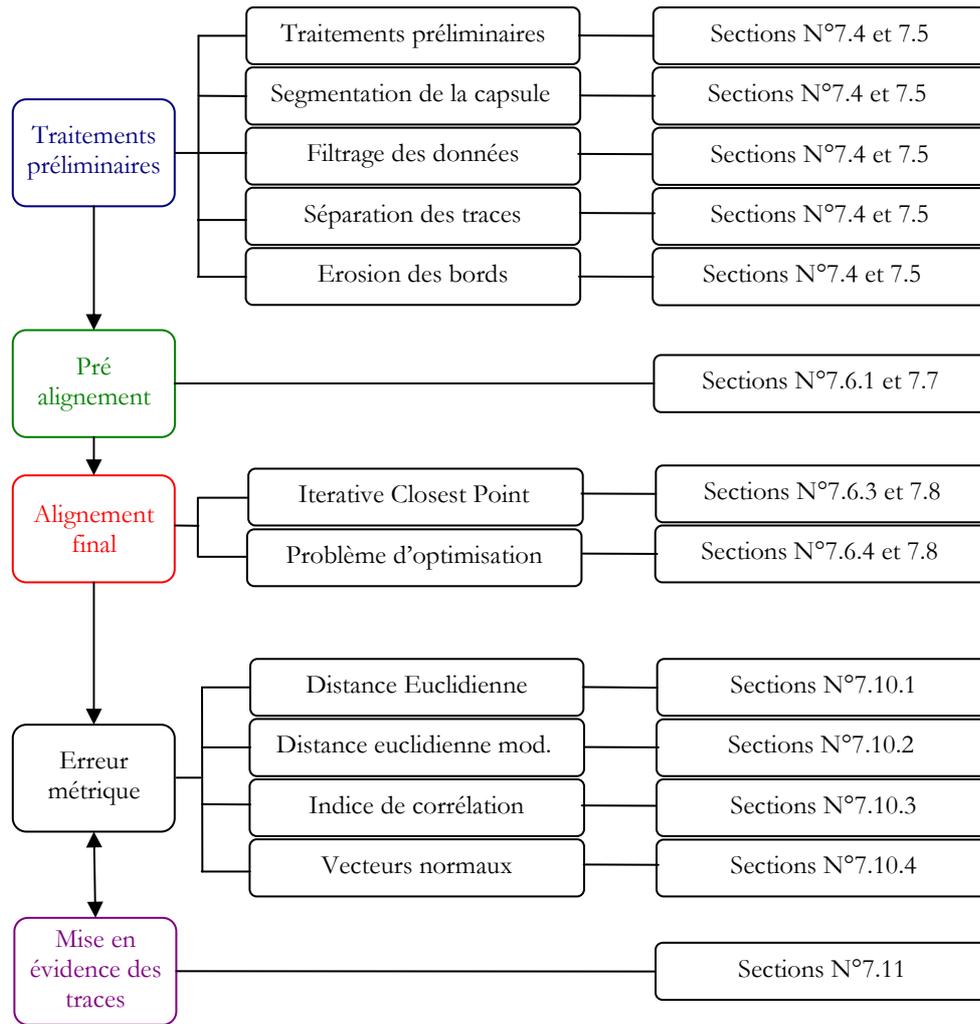


Figure 74

Schéma représentant la structure complète des algorithmes développés dans le cadre de cette recherche. La colonne de droite permet de mettre en relation le type d'algorithme avec la section correspondante.

7.4 Traitements préliminaires

L'alignement automatique n'a que peu de sens si les mesures tridimensionnelles ne subissent pas au préalable des traitements les préparant à l'alignement. Plusieurs traitements préliminaires doivent donc être appliqués afin de mettre en évidence les caractéristiques plus fines des traces au détriment des informations plus générales et de toutes morphologies étrangères à une arme.

Le schéma ci-dessous introduit les différents essais effectués en termes algorithmiques pour toute étape antécédente aux phases d'alignement (cf. Sections N°7.4.1 et 7.4.2) ainsi que les choix retenus pour la suite du travail (cf. Sections N°7.5.1 et 7.5.2).

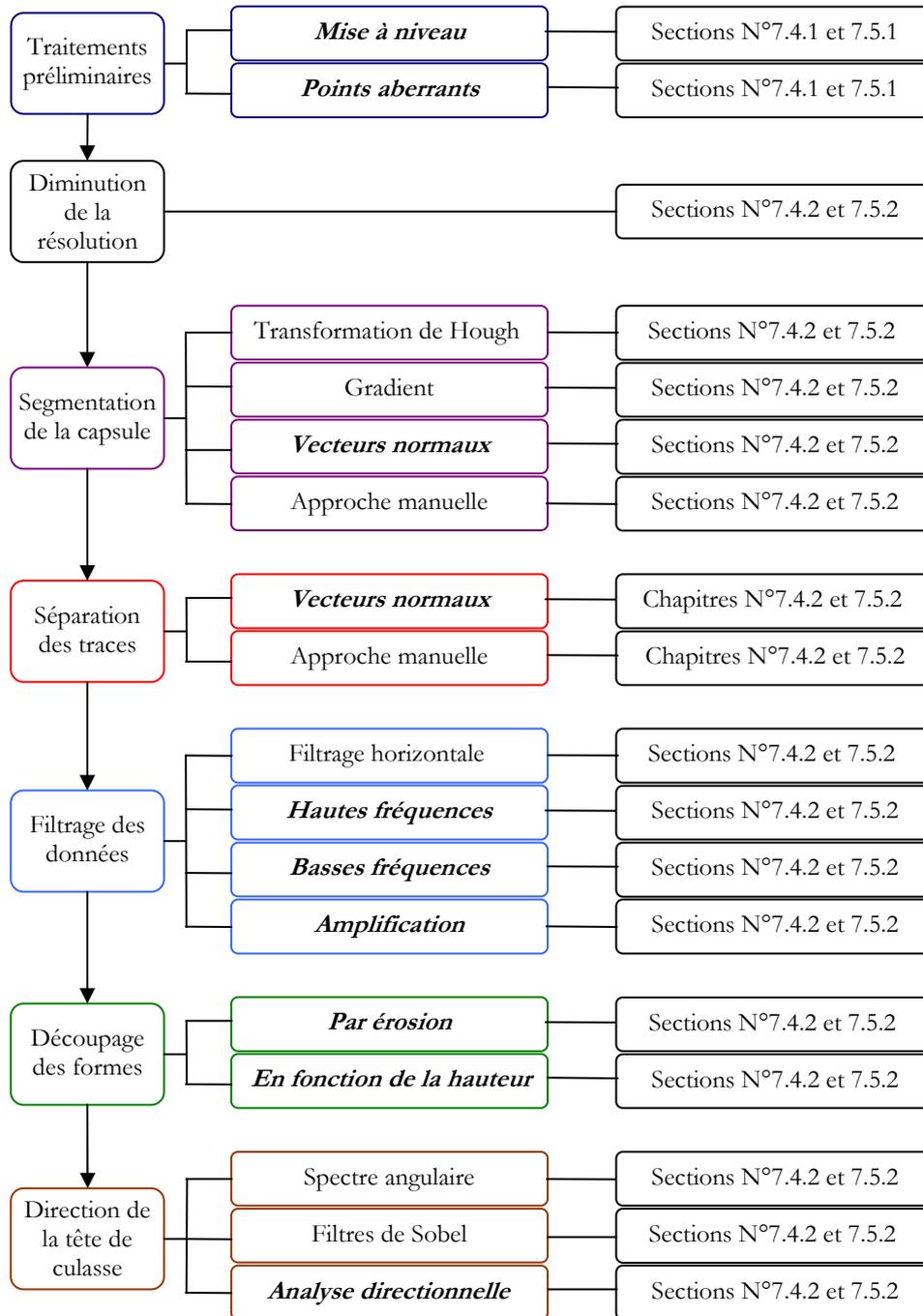


Figure 75

Schéma représentant l'ensemble des étapes qui précèdent l'alignement automatique des structures tridimensionnelles. Pour certaines étapes, plusieurs solutions ont été proposées et évaluées. Le choix retenu est mis en évidence par du texte en gras et en italique. Le schéma propose également la section où il est possible de consulter les données techniques concernant la partie de l'algorithme spécifiée ainsi que la section concernant le choix retenu (si disponible).

7.4.1 Etapes en relation avec l'acquisition des données

Suite à l'acquisition des données, les mesures se présentent sous la forme d'une matrice 1600 x 1600 points – résultat d'une acquisition sur une plage de mesure de 4.8 x 4.8 mm avec une résolution de 3 µm dans les deux axes. Des traitements préliminaires sont effectués à l'aide du

logiciel μ Scan de Nanofocus[®], également utilisé pour prendre les mesures. Ces traitements consistent en deux étapes. La première est une étape de nivelage. Les douilles ne sont pas toujours placées parfaitement perpendiculairement par rapport au plan horizontal. Par conséquent, la mesure sur la capsule d'amorçage peut être légèrement inclinée (Figure 76). Afin de normaliser les mesures et pour des raisons liées à des traitements mathématiques ultérieurs, le plan sur lequel la capsule d'amorçage est située doit subir une transformation dans l'espace pour se replacer à l'horizontal. Cette opération n'est pas effectuée de manière complètement automatique par le logiciel car la fonction de nivelage nécessite la définition des zones faisant partie du plan représentant la capsule d'amorçage par un opérateur. Il est donc nécessaire de déterminer, à l'aide d'un ensemble de formes rectangulaires, la surface représentant la capsule. Cette transformation est suivie d'une interpolation des points afin de recréer une image en deux dimensions comme le montre l'image ci-dessous (Figure 76 – à droite). Ces dernières explicitent la différence entre une mesure non nivelée et une mesure ayant subi l'opération de nivelage. Il est possible d'observer que dans l'image de droite, contrairement à l'image de gauche, toute la surface se trouve sur le même plan (même couleur – rouge).

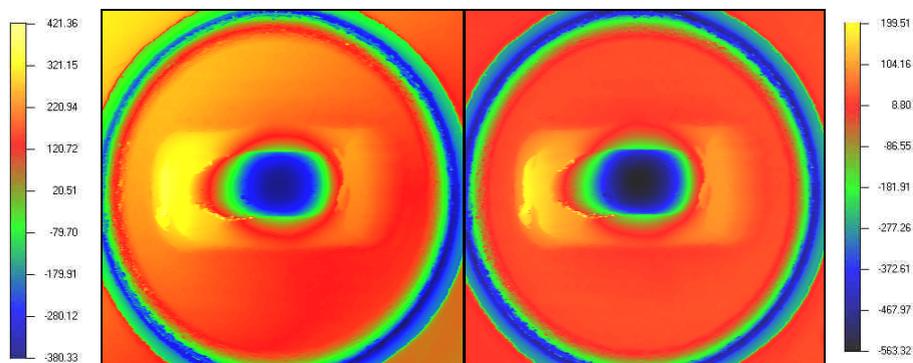


Figure 76
Mesure tridimensionnelle d'une capsule d'amorçage avant nivelage (à gauche) et après nivelage (à droite).

La deuxième étape implique la recherche et l'élimination de points qui présentent un taux de réflexion du laser inférieur à un certain seuil. Pendant la mesure, le laser est réfléchi partiellement vers le détecteur ; si le pourcentage de lumière revenant au détecteur est particulièrement limité, la mesure n'est pas prise en considération et la valeur est recalculée par interpolation en utilisant les valeurs des points à proximité. L'image ci-dessous montre, par le biais de points de couleur noir, les zones sur une capsule d'amorçage qui présentent une valeur de réflexion inférieur à 15% (Figure 77). Ces zones se concentrent majoritairement dans les bords de la capsule d'amorçage ainsi que sur les bords de la trace du percuteur.

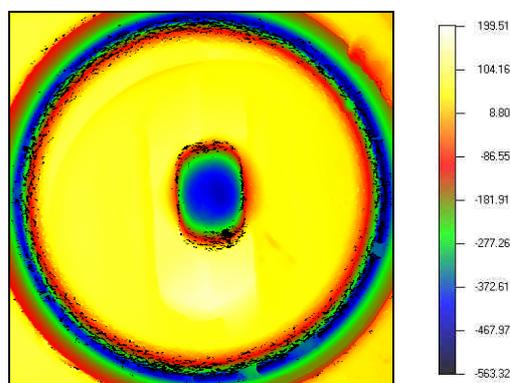


Figure 77
Mesure tridimensionnelle d'une capsule d'amorçage où les points noirs correspondent à des points ayant un taux de réflexion du laser inférieur à 15%.

La dernière étape effectuée à l'aide du logiciel de Nanofocus[®] consiste en une simple exportation des données sous format texte (.txt) pour permettre, par la suite, l'importation des mesures dans le logiciel Matlab[®].

7.4.2 Etapes qui précèdent l'alignement

Suite aux l'étapes préliminaires effectuées à l'aide du logiciel μ Scan, plusieurs traitements sont réalisés sur les mesures tridimensionnelles en utilisant Matlab[®]. Les différentes étapes entreprises sont présentées ci-dessous.

Diminution de la résolution

Le premier traitement subi par la structure tridimensionnelle est une diminution de la résolution. Cette étape permet de palier à la quantité importante de données représentant une capsule d'amorçage (2'560'000 points) qui, laissée telle quelle, ne permet pas les traitements mathématiques envisagés sans une ressource informatique démesurée. Les changements de résolution s'effectuent en créant un nouveau grillage dans le plan XY et en interpolant les mesures sur ce nouveau grillage. L'interpolation est effectuée selon le point le plus proche.

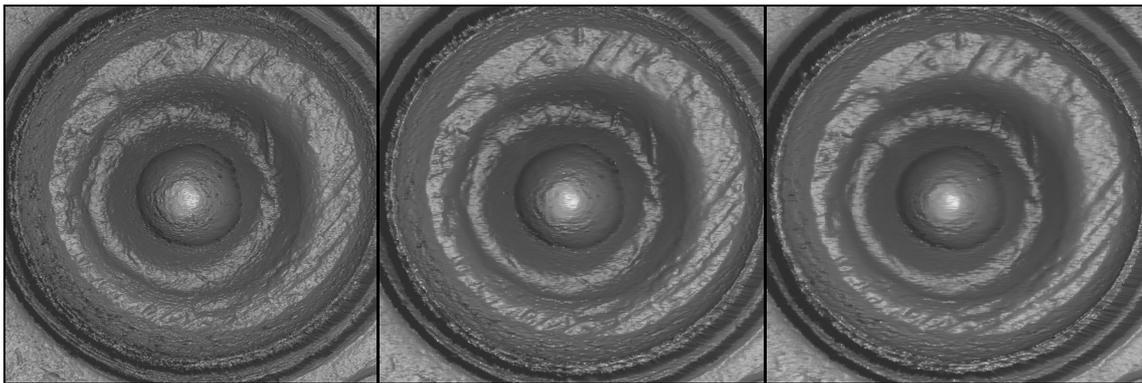


Figure 78

Effet d'une diminution de résolution d'un facteur 1,2 et 3 (de gauche à droite).

Même si elle entraîne une perte d'information (Figure 78), cette étape est inévitable dans le développement de ce système de comparaison. Le choix de la résolution à adopter, et donc de la taille des images, doit être effectué avant la mise en place de l'ensemble des algorithmes. Cela est dû au fait que les résultats de certaines opérations, appliquées par la suite, sont fonction de la taille initiale des images.

Segmentation de la capsule d'amorçage

Afin de minimiser l'influence des parties de la capsule d'amorçage qui ne sont pas représentatives d'un contact avec l'arme, il est nécessaire d'éliminer toute partie de la capsule ne présentant pas d'informations pertinentes. Cette étape consiste donc dans le coupage des bords de la capsule d'amorçage. Il s'agit de la partie qui délimite la capsule et qui, par sa profondeur, n'entre pas en contact avec l'arme. Différentes approches ont été employées pour effectuer le coupage de la capsule et se basent soit sur les techniques utilisées dans le domaine du traitement d'images, soit sur la nature tridimensionnelles des données à disposition.

Détection des cercles – Transformation de Hough

La capsule d’amorçage pouvant être représentée relativement bien par un cercle, il a été testé une technique de détection de cercles. Une d’entre elles, souvent employée dans ce but en *Computer Vision* est la transformée de Hough. Cette dernière permet de décrire les points d’un cercle (X et Y) dans l’espace cartésien en fonction du centre du cercle (X_0 et Y_0), du rayon (R) et de l’angle (θ) par rapport au centre [Russ, 1995]:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + R * \cos(\theta) \\ Y &= Y_0 + R * \sin(\theta) \end{aligned} \quad [e]$$

Pour chaque point du cercle, il est possible de déterminer l’angle θ en utilisant les filtres de Sobel (cf. Section N°7.1). Deux filtres placés perpendiculaires l’un par rapport à l’autre sont appliqués par convolution sur l’image. Les composantes verticales et horizontales résultantes de l’application distincte des deux filtres sont employées pour extrapoler l’angle correspondant à chaque point appartenant au cercle. Par conséquent, en faisant abstraction du rayon du cercle, il est alors possible de codifier le cercle uniquement selon deux paramètres : les coordonnées X_0 et Y_0 qui décrivent le centre du cercle. C’est effectivement l’information recherchée.

En pratique, la procédure est la suivante : à partir de l’image de la capsule d’amorçage en niveau de gris, une détection des contours est effectuée à l’aide du détecteur de Canny – algorithme permettant la détection des bords des objets dans une image en niveau de gris à partir des informations relatives au gradient de l’image en question [Russ, 1995]. Le résultat de cet algorithme se présente sous la forme d’une image binaire (blanc et noir) où chaque pixel blanc correspond aux contours détectés (Figure 79 – à droite).

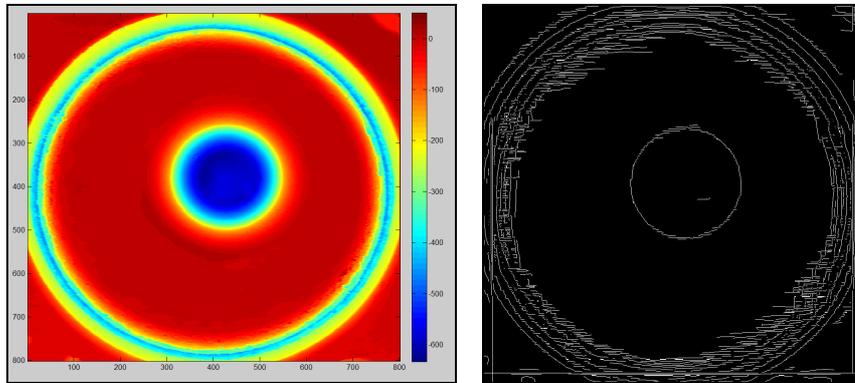


Figure 79

Image représentant une capsule d’amorçage sans traitement (à gauche) et image binaire correspondante suite à la détection des contours au moyen du détecteur de Canny (à droite).

Pour chaque pixel blanc, l’angle par rapport à la tangente est calculé au moyen des filtres de Sobel, à l’aide de la relation suivante :

$$Angle = \arctan(S_y / S_x) \quad [f]$$

où S_y et S_x sont les résultats de l’application des deux filtres directionnels de Sobel dans les deux dimensions (verticale et horizontale). Pour chaque point, une droite passant par le point en question et ayant une inclinaison définie par le résultat de l’application des filtres est tracée

dans un espace préalablement défini, appelé accumulateur (Figure 80). Si le point fait partie d'un cercle, la droite correspondante passera par le centre du cercle. Cette opération est répétée pour chaque pixel de l'image binaire ; chaque droite résultante contribuera au « remplissage » de l'accumulateur. Une fois que tous les points ont permis de tracer une droite, les coordonnées de la valeur maximale dans l'accumulateur correspondront au centre du cercle d'intérêt. Lors de l'observation de l'accumulateur, il est parfois possible de voir un maximum local à côté du maximum absolu. Sa présence est causée par la détection du cercle relatif aux bords de la trace du percuteur. Ce phénomène peut éventuellement avoir lieu lorsque la trace du percuteur ne se trouve pas au centre de la capsule d'amorçage.

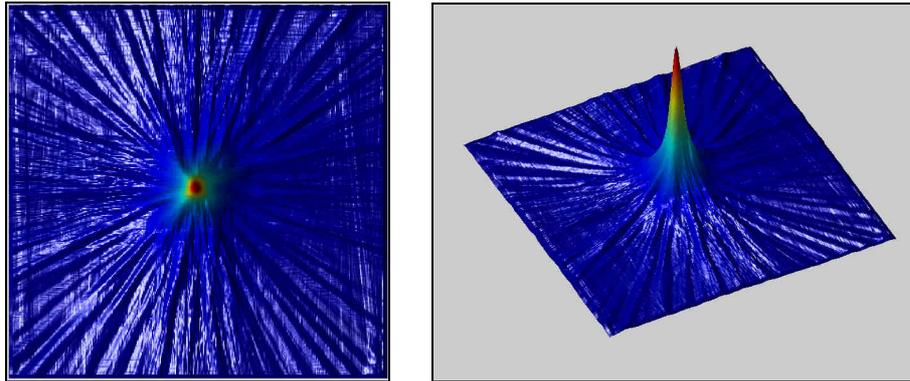


Figure 80
Images représentant l'accumulateur.

Une fois le centre du cercle connu, il suffit de choisir son rayon pour effectuer le découpage de la capsule d'amorçage (Figure 81). Il est donc possible de découper la capsule d'amorçage autour du centre avec n'importe quel rayon.

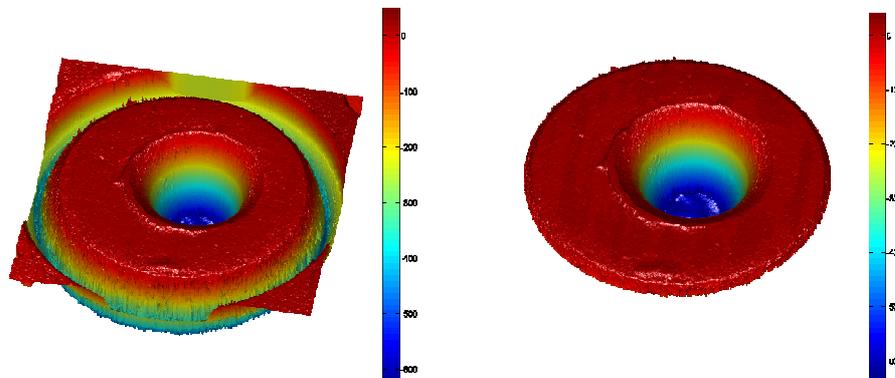


Figure 81
Découpage de la capsule à partir du centre détecté en utilisant la transformée de Hough.

Détection des bords de la capsule à l'aide du gradient

Les bords de la capsule d'amorçage sont caractérisés par des pentes relativement importantes. C'est donc dans ces zones que le gradient de l'image sera maximal car les variations en hauteur le seront également. La valeur du gradient est calculée pour les deux dimensions (**Grad_X** et **Grad_Y**). Les valeurs résultantes sont fusionnées, pour donner une image représentant les variations du gradient (Figure 82 – à gauche), à l'aide de la relation suivante :

[g]

$$\text{Gradient}(x, y) = \sqrt{\text{Grad}_X(x, y)^2 + \text{Grad}_Y(x, y)^2}$$

où x et y représentent les coordonnées des pixels dans l'image. Il est ensuite possible de définir une valeur limite du gradient (*Threshold*) qui représente la valeur des bords de la capsule. Le résultat se présente sous la forme d'une image binaire qui représente les informations concernant la zone délimitée par la capsule d'amorçage (Figure 82 – à droite). Ces informations peuvent être utilisées pour inscrire dans cette zone un cercle de taille connue. Cela permet donc de couper la capsule d'amorçage au moyen d'un cercle de dimensions préétablies.

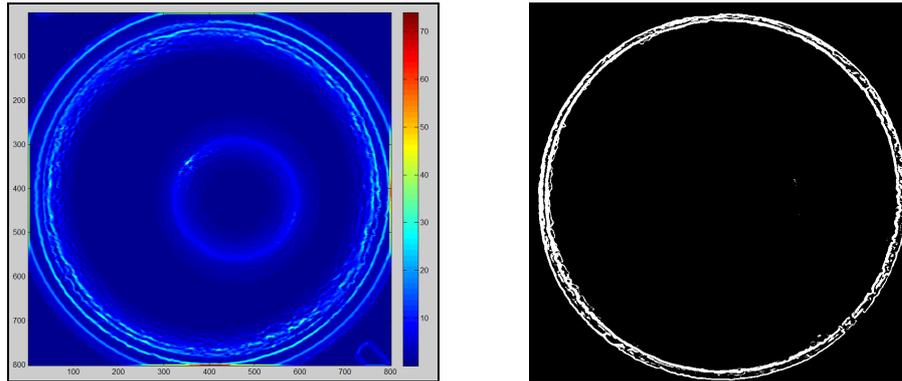


Figure 82
Gradient de la capsule d'amorçage (à gauche) et détection des bords à partir du gradient (à droite).

Vecteurs normaux

Cette approche exploite une caractéristique propre à la topographie tridimensionnelle des mesures effectuées, à savoir les vecteurs normaux à la surface. Pour chaque point mesuré, le vecteur normal à la surface peut être calculé à partir de la surface décrite par ledit point et ses voisins respectifs (Figure 83). L'image ci-dessous montre les vecteurs normaux (en rouge) à une surface représentant des stries présentes sur une capsule d'amorçage.

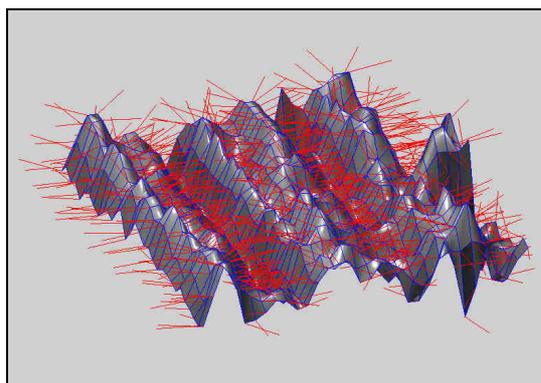


Figure 83
Image représentant, par le biais de traits rouges, les vecteurs normaux à la surface.

Etant donné que les mesures 3D des douilles ont été nivelées par rapport à la capsule d'amorçage, il est possible de considérer cette dernière comme une surface située dans le plan horizontal et que tous les points ayant une pente plus grande qu'un certain seuil peuvent être considérés comme faisant partie du reste de la douille. Plus la pente d'une surface augmente

et plus les vecteurs normaux s'écartent de la position verticale pour se rapprocher d'une position horizontale. Il est donc possible de segmenter la capsule d'amorçage dans les endroits où la pente augmente de manière importante (Figure 84).

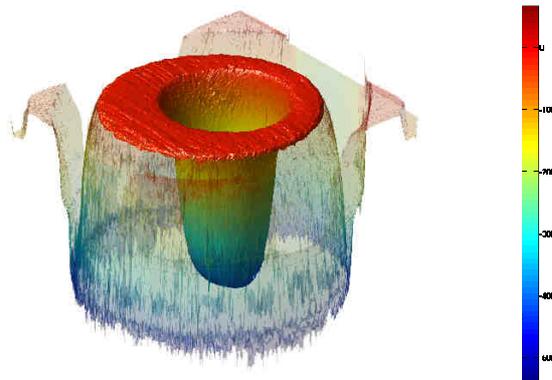


Figure 84

Segmentation de la capsule d'amorçage en utilisant les vecteurs normaux. La partie de l'image se présentant en semi-transparence correspond à des zones ne faisant pas partie de la capsule d'amorçage. Elles sont donc éliminées.

Le fait que la trace du percuteur soit caractérisée par des pentes similaires à celles des bords de la capsule peut poser des problèmes. En effet, la trace du percuteur sera détectée en même temps que la capsule. Afin d'éviter cet inconvénient, la détection est effectuée sur la périphérie de l'image en évitant de cette façon le centre de la capsule où la trace du percuteur se trouve normalement.

Approche manuelle

Il s'agit d'une étape qui nécessite la présence d'un opérateur. Ce dernier doit délimiter manuellement la capsule d'amorçage. Il peut y avoir principalement deux types d'approches manuelles. La première consiste simplement à déplacer un cercle de taille variable sur l'image à couper. Le découpage aura lieu au-delà des limites fixées par le cercle en question. L'autre approche permet de dessiner un cercle à partir de trois points que l'opérateur doit fixer sur l'image. Une fois les points fixés, il est possible de changer la taille du cercle pour l'ajuster à la capsule d'amorçage.

Séparation des traces

Les traces d'intérêt présentes sur la capsule d'amorçage sont celle du percuteur et celle laissée par la tête de culasse. Il s'agit de deux traces qui viennent s'imprimer sur la douille dans des circonstances et suite à des mécanismes complètement différents. Pendant le tir, la trace du percuteur vient se créer en même temps que l'explosion de l'amorce. Sa morphologie peut éventuellement se modifier par la suite, lors de la combustion de la poudre et de l'éjection de la douille. Par contre, la trace laissée par la tête de culasse est imprimée suite à la grande pression développée par la combustion de la poudre qui pousse la douille vers la partie postérieure de la chambre. Il est donc nécessaire de séparer les deux traces pour pouvoir les comparer avec d'autres traces. En effet, il n'est souvent pas possible de les comparer simultanément car l'alignement de la trace de la tête de culasse peut se traduire facilement par un désalignement de la trace du percuteur et vice-versa. Ce phénomène est principalement dû au fait que la trace du percuteur peut posséder une profondeur variable et sa position sur la capsule d'amorçage peut varier pour des tirs effectués avec une même arme (Figure 85).

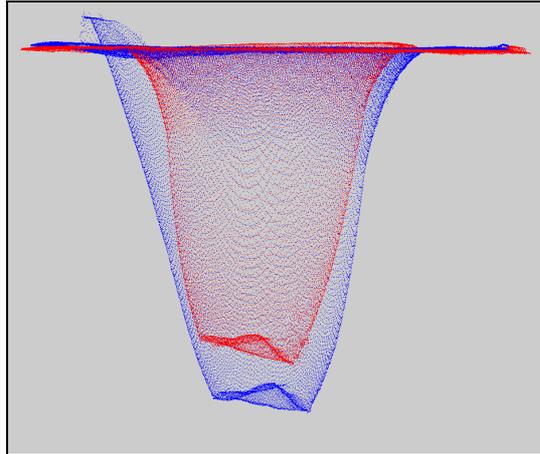


Figure 85

Deux nuages de points (rouge et bleue) montrant l'alignement d'une capsule d'amorçage en entier. A noter l'impossibilité d'aligner simultanément la trace de la tête de culasse et celle du percuteur.

Pour effectuer la séparation des traces, certaines techniques utilisées pour la segmentation de la capsule d'amorçage ont été employées.

Approche automatique

Une approche automatique basée sur les vecteurs normaux à la surface a été testée. Comme dans le cas précédent, le découpage entre les deux traces a lieu lorsque la pente devient plus importante qu'un certain seuil préalablement choisi (Figure 86).

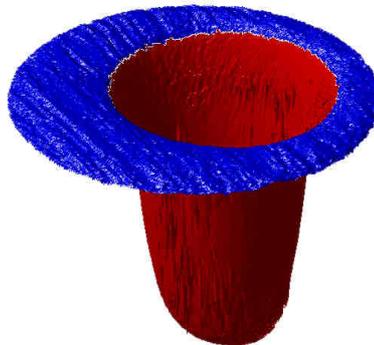


Figure 86

Séparation de la trace du percuteur et de celle laissée par la tête de culasse, représentées respectivement en rouge et en bleue dans l'image, en exploitant les vecteurs normaux à la surface.

Approche manuelle

La séparation des traces peut également se faire suite à une sélection manuelle de la trace du percuteur. Il est possible de sélectionner la trace du percuteur à l'aide d'un cercle de taille variable, comme dans le cas de la segmentation de la capsule d'amorçage, ou de sélectionner la trace en dessinant un polygone l'entourant. Ce procédé, même s'il est relativement peu reproductible, trouve son intérêt pour la séparation des traces du percuteur ayant des formes particulières (Figure 87).

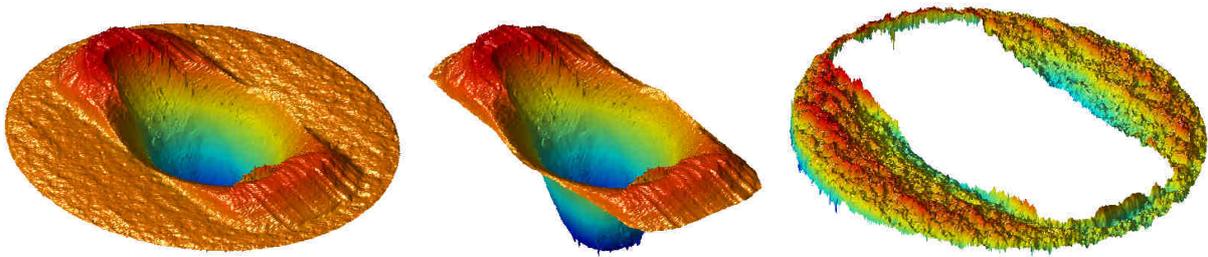


Figure 87

Séparation manuelle des traces du percuteur et de la tête de culasse dans le cas particulier où la trace du percuteur possède une forme rectangulaire.

Filtrage des données

Suite à la séparation des traces, l'image tridimensionnelle de la capsule d'amorçage est représentée par deux images en 3D : l'une représentant la trace laissée par la tête de culasse et l'autre représentant celle du percuteur. Malgré le fait qu'il s'agisse de deux traces ayant des caractéristiques différentes, les traitements algorithmiques qui suivent sont analogues pour les deux traces.

Les topographies des traces en l'état actuel possèdent encore du bruit de fond, dû à l'acquisition des données au moyen du profilomètre laser. De plus, la forme globale de ces traces est encore prédominante ; les caractéristiques les plus fines peuvent donc être sous-représentées pendant la comparaison. Les données doivent donc être filtrées afin, d'éliminer le bruit de fond d'une part et de supprimer la forme globale des traces d'autre part en renforçant ainsi le signal d'intérêt. L'approche adoptée, inspiré par la procédure proposée dans le rapport du NIST [Vorburger et al., 2007], permet d'effacer la forme prédominante des topographies et en parallèle d'atténuer le bruit de fond, afin de mettre en évidence les stigmates laissés par l'arme. Cette étape est caractérisée par l'application de plusieurs filtres en séquence. Le premier filtre appliqué est un filtre unidimensionnel utilisé pour atténuer le bruit du scanner causé par le balayage du laser, puis, deux autres filtres sont appliqués pour atténuer la forme globale de la trace ainsi que le bruit de fond. La nature des filtres ainsi que les principes employés dans cette étape sont décrits dans les paragraphes suivants.

Lissage horizontale

Le premier filtre qui est appliqué aux images est une matrice de convolution de dimensions $N \times 1$. Il s'agit d'un filtre moyen ayant des coefficients égaux dont la somme est égale à 1. Le but de l'application de ce vecteur est de contrer le bruit laissé par le scanner qui a opéré perpendiculairement par rapport à la direction du filtre. Les images ci-dessous montrent l'effet de ce filtre sur des stries faisant partie de la trace de la tête de culasse (Figure 88)

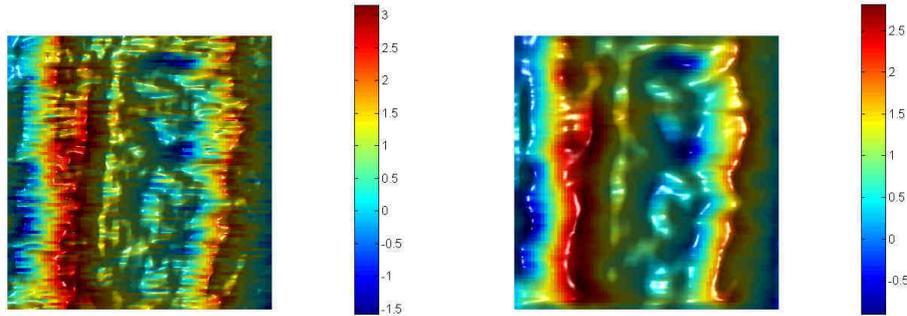


Figure 88

Filtrage vertical avec un filtre moyen de taille 5x1. Image avant filtrage (à gauche) et suite à l'application du filtre (à droite).

Atténuation des hautes fréquences

Pour atténuer le bruit de fond, un filtrage dans le domaine spatial a été testé. Le but de cette étape est d'atténuer les fréquences estimées comme trop hautes. Il s'agit donc d'éliminer le bruit de fond propre à l'image. Pour ce faire, une convolution est effectuée à l'aide d'un filtre gaussien de taille NxN. La forme de la courbe gaussienne est décrite, non seulement par la taille du filtre, mais également par la valeur de « σ ». Cette variable influence la largeur de la cloche de Gauss. Plus sa valeur est grande et plus les coefficients du *kernel* résulteront importants aux extrémités. La valeur numérique restituée par le *kernel* sera donc majoritairement influencée par les voisins plus éloignés. Le filtre gaussien est un filtre « passe-bas » qui permet de lisser les hautes fréquences (Figure 89).

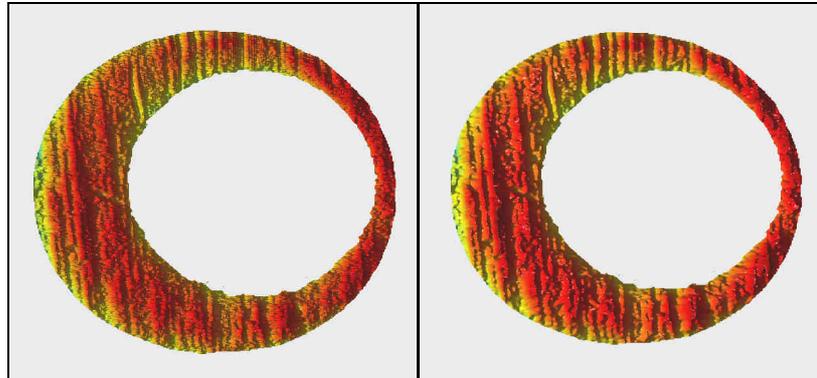


Figure 89

Filtrage gaussien « passe-bas » d'une trace de tête de culasse ($N = 5 \times 5 / \sigma = 2,5$). Image avant l'application du filtre (à gauche) et suite à son application (à droite).

Atténuation des basses fréquences

Les images ci-dessus montrent, à l'aide des couleurs, que les stries laissées par la tête de culasse sur la capsule d'amorçage sont mises en évidence simplement grâce à l'effet d'ombre employé par le logiciel (Figure 89). En absence de cet effet visuel, les couleurs ne suffiraient pas pour différencier les traces laissées par l'arme du reste de la capsule d'amorçage. Ce phénomène est principalement dû au fait que la forme globale de la trace, étant imposante, rend difficile l'observation des petites stries. Il ne s'agit pas seulement d'un problème de visualisation, mais également d'un problème qui interviendra lors de l'alignement des traces. Les algorithmes habituellement employés pour effectuer le recalage entre deux images

cherchent à minimiser la distance métrique entre les traces. Il en résulterait que l'alignement se ferait selon la forme globale de la trace et non en fonction des stigmates laissés par l'arme. Il est donc nécessaire de supprimer ou d'atténuer la forme globale pour donner plus d'importance aux caractéristiques plus fines des traces.

Pour ce faire, l'image est ultérieurement filtrée dans le domaine fréquentiel à l'aide d'un filtre « passe-haut ». Le filtre employé est un filtre gaussien ; sa taille correspond à la taille de l'image à filtrer et la valeur de σ est dictée par les longueurs d'onde λ qui sont souhaitées être coupées (*Fréquence* $\propto 1/\lambda$). La relation entre les longueurs d'onde qui doivent être coupées et σ est la suivante :

$$\sigma = \lambda_{MAX}/\lambda \quad [h]$$

où λ_{MAX} représente la taille de l'image et λ la longueur d'onde en micromètres. Etant donné que, par convention, la limite à laquelle les fréquences viennent coupées doit correspondre à 0.5 de la valeur du filtre gaussien, la valeur de σ doit être ajustée en conséquence [Zubal et al., 1997]. Les images suivantes montrent les résultats du découpage des fréquences pour les traces de la tête de culasse et du percuteur (Figure 90 et Figure 91).

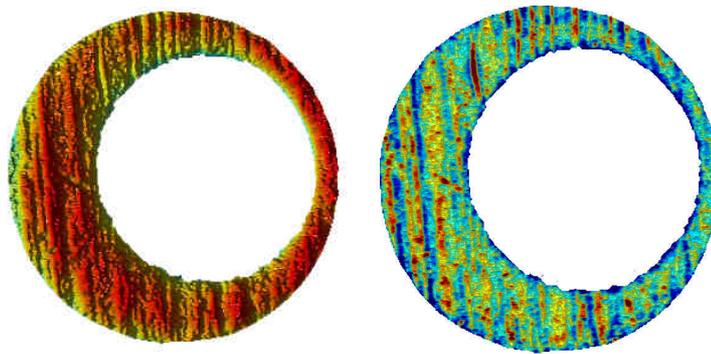


Figure 90
Filtrage des basses fréquences pour la trace de la tête de culasse. Image originale (à gauche) et image suite au coupage des fréquences (à droite).

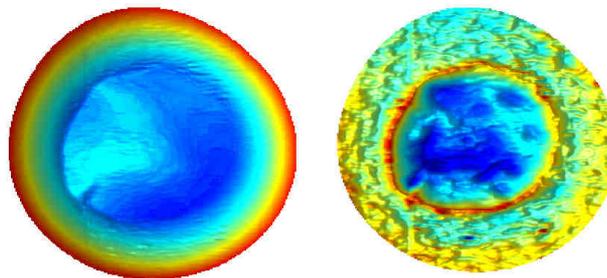


Figure 91
Filtrage des basses fréquences pour la trace du percuteur. Image originale (à gauche) et image suite au coupage des fréquences (à droite).

Amplification des fréquences sélectionnées

Afin de pouvoir donner plus de poids à des traces présentant des imperfections morphologiques telles que des stries ou des défauts laissés par l'arme, par rapport à des traces

relativement lisses et peu caractéristiques, des tests pour amplifier certaines fréquences ont été effectués. Le terme « amplification des fréquences », adopté *ad hoc* pour décrire le concept, peut être défini comme l'amplification de la distance entre le point le plus bas et le point le plus haut d'une topographie. En d'autres termes, cette étape permet d'appliquer à l'image une échelle amplifiée (Figure 92).

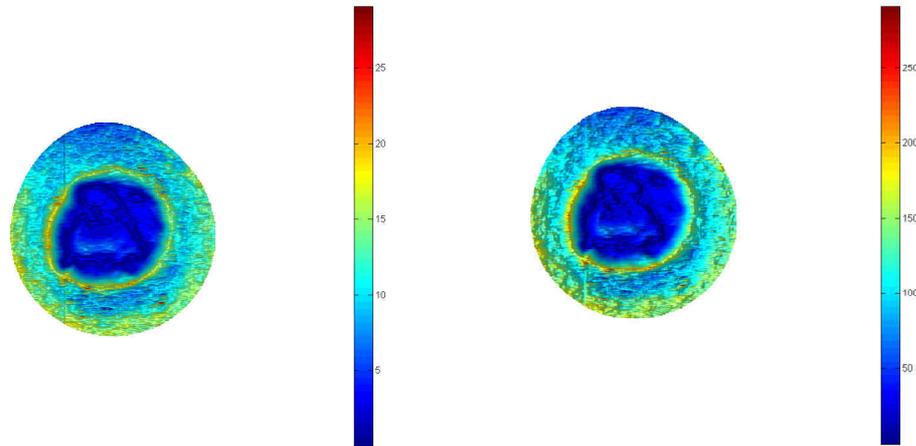


Figure 92

Amplification de l'échelle dans le cas d'une trace du percuteur. L'échelle de gauche s'étend de 0 à 30 alors que celle de droite atteint la valeur maximale de 300.

Cette « amplification » implique que, si une zone de la capsule d'amorçage caractérisée par des stries bien marquées est comparée à une autre capsule d'amorçage plutôt lisse, l'erreur métrique s'en trouvera augmenté. Cette augmentation devrait théoriquement être moins importante pour la comparaison entre des douilles tirées par la même arme, ce qui aurait également pour conséquence une amélioration de la discrimination de la technique.

Découpage des formes

Même après avoir filtré les données, il est parfois nécessaire de supprimer de l'information présente sur les bords des traces. Ceci est dû principalement au fait que, pendant le découpage de la capsule d'amorçage ainsi que lors de la séparation entre la trace de la tête de culasse et celle du percuteur, il peut y avoir des parties de la structure tridimensionnelle qui ne sont pas correctement séparées ou éliminées. Ces dernières sont donc peu intéressantes d'un point de vue de la comparaison. C'est notamment le cas de certaines conformations, tel que la trainée du percuteur qui, même si la majorité est éliminée pendant les traitements préliminaires, des résidus peuvent persister sur les bords de la trace de la tête de culasse suite à la séparation de la trace du percuteur.

En ce qui concerne la trace laissée par la tête de culasse, deux périmètres peuvent être décrits : celui qui donne vers l'extérieur de la trace, délimitant la capsule d'amorçage, et celui qui donne vers l'intérieur séparant la trace de celle du percuteur. Afin de supprimer les données présentes sur les bords, une érosion de l'image binaire représentant la trace a été employée. Le masque représentant la trace se présente sous la forme d'une image en fond noir (pixel de valeur 0) dont l'ensemble des pixels blancs (pixel de valeur 1) représente la zone délimitant la trace en question. Le grand avantage d'employer des masques pour décrire les zones faisant partie d'une trace plutôt que d'une autre réside dans le fait qu'il est possible de garder l'image originale de la capsule d'amorçage et l'image filtrée dans leur entier (Figure 93).

La multiplication de chaque pixel du masque avec le pixel correspondant dans l'image originale donne comme résultat l'image de la trace délimitée par le masque (Figure 93).

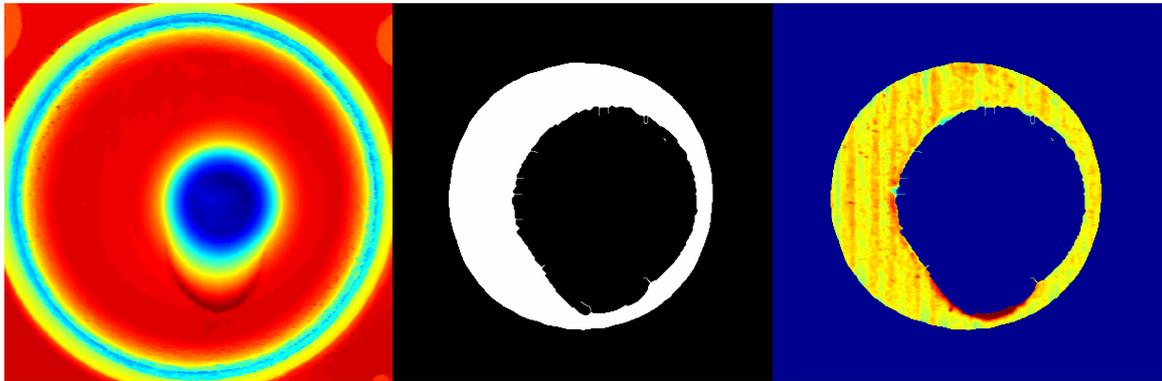


Figure 93

Image originale représentant la capsule d'amorçage (à gauche), masque relatif à la trace de la tête de culasse (au centre) et trace de la tête de culasse résultante de l'application du masque sur l'image originelle (à droite).

L'action d'érosion consiste simplement en l'enlèvement d'un nombre, préalablement déterminé, de couches de pixels blancs aux bords du masque (Figure 94). L'épaisseur de la trace s'en trouvera en conséquence diminuée.

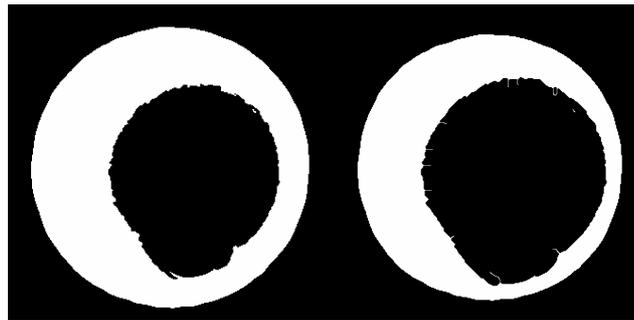
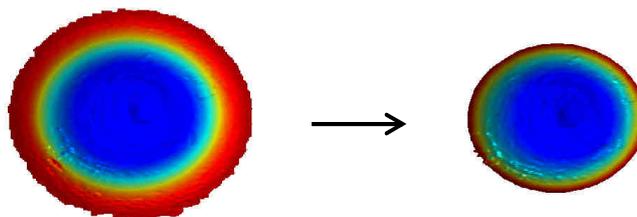


Figure 94

Masque d'origine (à gauche) et masque après érosion d'une dizaine de pixels (à droite).

Dans le cas particulier de la trace du percuteur, le découpage n'est pas effectué par érosion des bords de la trace, mais plutôt en fonction de sa profondeur. Le découpage des traces s'effectue donc à partir d'une certaine hauteur par rapport à leur fond (Figure 95). Afin d'éviter que certains artéfacts puissent influencer négativement le calcul de la hauteur représentant le fond de la trace, un lissage ultérieur, plutôt grossier, est effectué. Ce dernier n'est effectué que dans le cadre du découpage de la trace et n'est donc pas appliqué de manière permanente pour la suite des traitements.



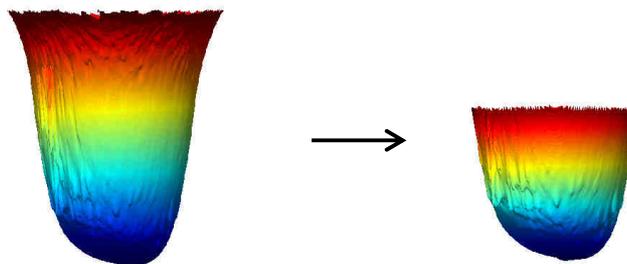


Figure 95

En haut la trace est observée verticalement et en bas latéralement. Trace du percuteur non découpée (gauche) et découpée à environ 250 μm du fond de la trace (à droite).

Direction de la tête de culasse

Déterminer la direction des stries sur une trace laissée par la tête de culasse d'une arme possède plusieurs buts. Avant que la topographie 3D puisse être alignée de manière définitive, il est souvent nécessaire d'effectuer un alignement brut des traces pour éviter que les algorithmes appliqués par la suite puissent échouer dans l'alignement, c'est-à-dire converger vers un minimum local. Le fait de déterminer l'orientation d'une trace, telle que celle de la tête de culasse, permet donc de fixer un paramètre important pour effectuer l'alignement brut. D'autre part, comme ce sera possible de l'observer par la suite, déterminer l'orientation des stries devient essentiel si une détection des stigmates laissés par l'arme est souhaitée.

Dans la littérature, plusieurs techniques pour déterminer la direction dominante dans une image sont proposées. Ces techniques ont déjà été employées dans des domaines variés, parmi lesquels il y a également une étude sur les traces laissées par une arme sur les douilles. Senin et al. dans leur article proposent plusieurs techniques pour analyser les traces sur les douilles à l'aide de mesures topographiques de surface [Senin et al., 2006]. Dans leur travail, une technique pour déterminer la direction dominante des stries laissées par la tête de culasse est proposée ; cette dernière consiste en les étapes suivantes :

- La direction est extrapolée sur une image correspondante à une sélection de la capsule d'amorçage présentant un ensemble de stries.
- L'autocorrélation de l'image est calculée.
- Le spectre angulaire de l'image résultante indique la direction dominante.

Cette technique, ainsi que deux autres ont été testées dans le cadre de ce travail. Tous les essais ont montré que pour déterminer l'orientation dominante, il est nécessaire de se limiter uniquement à des parties de la capsule d'amorçage pouvant présenter des stries ; les bords de la trace de la tête de culasse sont à éviter car leur orientation est dictée par la morphologie des bords. Pour cette raison, un algorithme utilisé pour découper les parties d'intérêt de la capsule d'amorçage a été développé. Ce dernier extrait de la trace les plus grands rectangles qui peuvent s'inscrire à l'intérieur. Il cherche le point du masque de la trace qui se trouve au centre de la zone la plus grande pouvant s'inscrire dans le masque. Ces points sont marqués en rouge dans l'image ci-dessous (Figure 96 – à gauche). Une fois que le plus grand rectangle a été détecté, l'algorithme extrait les coordonnées de cette zone et effectue à nouveau l'opération. Il opère de manière itérative jusqu'à ce que les rectangles les plus grands aient été coupés (Figure 96 – à droite).

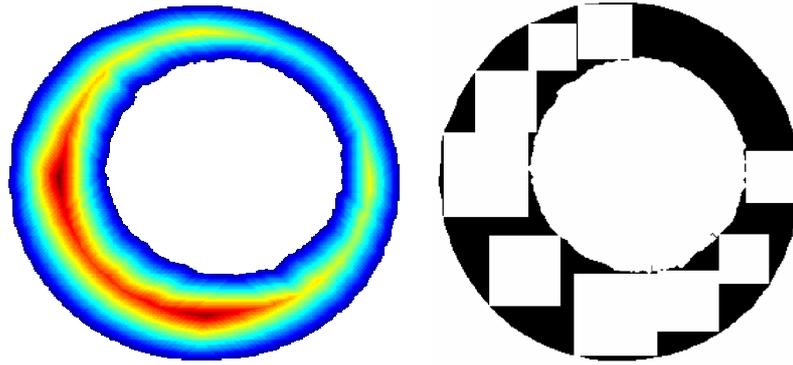


Figure 96

Dans l'image de gauche, le rouge correspond aux points qui représentent le centre des rectangles les plus grands pouvant s'inscrire dans le masque de la trace. A droite, l'image représente le masque coupé.

Une fois que tous les rectangles les plus importants en termes de taille ont été coupés, ils sont utilisés pour évaluer l'orientation dominante.

Direction dominante – Spectre angulaire

Dans des images montrant des stries de la tête de culasse, le bruit de fond ainsi que les imperfections liées aux stries peuvent souvent cacher l'orientation dominante. Afin d'améliorer les performances de l'algorithme, l'information utilisée pour déterminer l'orientation dominante est sélectionnée en fonction de la valeur du gradient. En effet, les stries sont normalement caractérisées par des valeurs de gradient relativement importantes par rapport à d'autres parties de la capsule d'amorçage qui ne présentent pas de stries. De cette façon plus d'importance pourra être apportée aux stries.

La procédure proposée par Senin et al. en 2006 nécessite le calcul de l'autocorrélation de l'image; cette étape est effectuée afin de pouvoir mettre d'avantage en évidence l'orientation dominante de l'image. La transformée de Fourier est ensuite appliquée. Pour calculer le spectre angulaire, il est enfin nécessaire d'utiliser les coordonnées polaires à la place des coordonnées cartésiennes. Le spectre angulaire est calculé à partir de la somme de chaque colonne de l'image (Figure 97 – à droite). La valeur maximale du spectre angulaire correspondra à la direction dominante de l'image [Senin et al., 2006] (Figure 98).

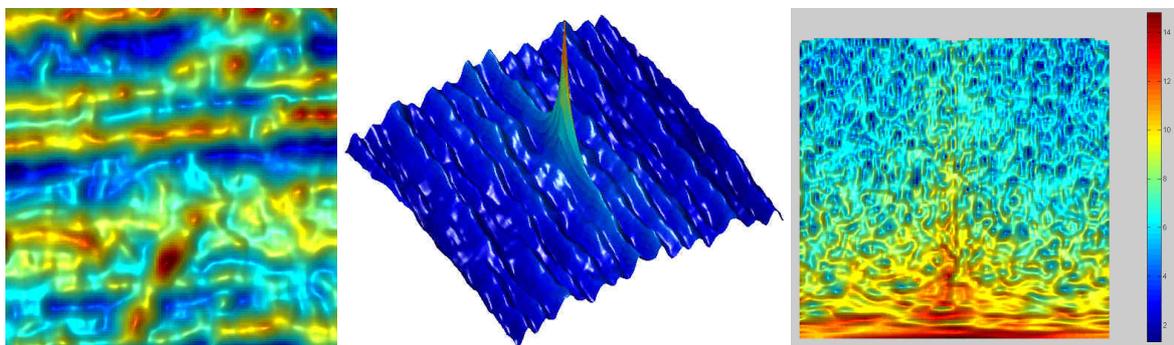


Figure 97

Image des stries (à gauche), autocorrélation de l'image précédente (au centre) et transformée de Fourier de l'autocorrélation, représentée en coordonnée polaires (à droite).

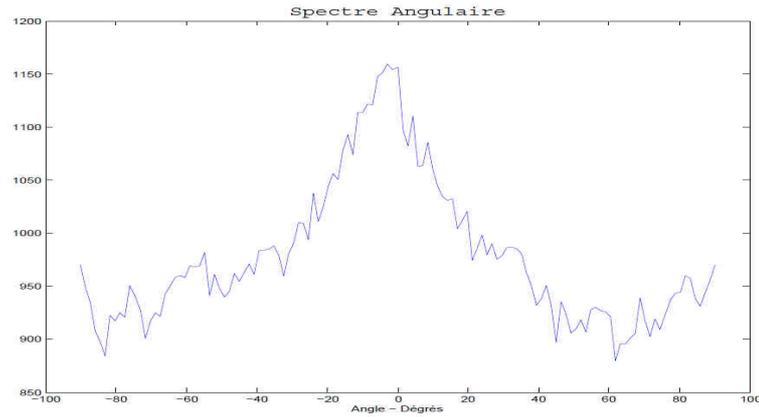


Figure 98
Spectre angulaire ayant son maxima absolu à environ 2°.

Direction dominante – Utilisation des filtres de Sobel

L'application des filtres de Sobel permet d'extrapoler la direction du gradient pour chaque pixel de l'image. Il est donc possible, en analysant les données relatives au gradient, d'identifier une éventuelle orientation dominante. Afin de pouvoir pondérer la participation de chaque pixel, les valeurs relatives à la magnitude (et non pas à la direction) du gradient ont été employés (Figure 99). D'autre part, dans le but d'éviter que des parties de l'image sans orientation définie, mais ayant une magnitude du gradient importante, influencent de manière délétère les résultats, une analyse du voisinage est effectuée pour chaque pixel. Cette analyse permet d'écarter les points n'ayant pas suffisamment de pixels voisins avec une valeur directionnelle similaire au pixel en question.

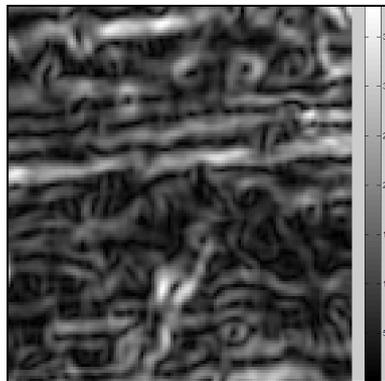


Figure 99
Représentation de la magnitude du gradient de l'image présentée dans la Figure 97 à gauche.

Le résultat de cet algorithme est rendu sous la forme d'un histogramme montrant la répartition pondérée des différentes directions dans l'image. La valeur la plus représentée est considérée comme l'orientation dominante (Figure 100).

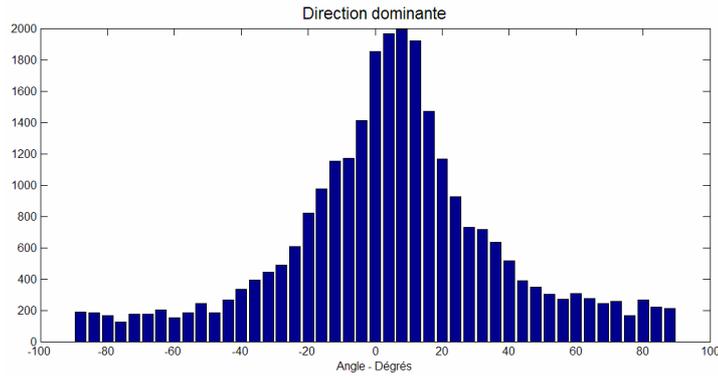


Figure 100

Histogramme montrant la distribution des différentes directions. La direction dominante est d'environ 7°.

Direction dominante – Analyse directionnelle

La dernière technique testée exploite les différences des pixels le long de droites parallèles ayant une direction bien définie. Cet algorithme emploie plusieurs masques, de même taille que l'image à analyser, caractérisées par un fond noir (valeur du pixel = 0) et des lignes parallèles blanches (valeur du pixel = 1). Les masques diffèrent entre eux selon l'angle des droites par rapport à l'horizontale (Figure 101). Chaque masque est ensuite multiplié à l'image originale.

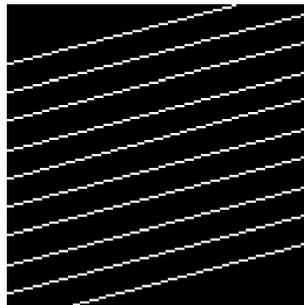


Figure 101

Masque noir présentant un ensemble de lignes parallèles blanches.

Les pixels de l'image originale qui se superposent aux lignes parallèles sont analysés statistiquement pour vérifier qu'ils appartiennent à une strie plutôt qu'à une autre partie de la capsule d'amorçage. En effet, la valeur des pixels le long d'une ligne sont relativement similaires si cette dernière se trouve placée à l'intérieur d'une strie, plutôt que si elle est placée perpendiculairement par rapport aux stries. L'orientation dominante est définie par la direction qui présente la plus petite différence entre les pixels, sur une même série de droites. La direction dominante évaluée, suite à l'utilisation de cet algorithme sur l'image de gauche de la Figure 97, est d'environ 7° par rapport à l'horizontale. Plusieurs paramètres peuvent être modifiés lors de l'utilisation de cet algorithme, notamment la quantité de lignes et leur fréquence.

Les trois algorithmes proposés ci-dessus fournissent comme résultat au moins deux valeurs : la direction dominante et la magnitude de cette direction. Cette dernière indique la puissance avec laquelle l'orientation dominante s'impose sur les autres directions.

7.5 Traitements préliminaires – Choix retenus et discussion

Pour chaque étape citée dans les paragraphes précédents, plusieurs solutions ont été proposées et différents paramètres ont été testés. L'ensemble des tests préliminaires a été effectué sur des mesures effectuées sur des douilles tirées par six SIG Sauer calibre 9 mm Parabellum. Les modèles des armes employées sont les suivants : deux SIG Sauer P220, deux P226, un P225 et un P228. Les résultats obtenus pour chaque algorithme développé ont été comparés et les solutions plus appropriées ont été choisies pour la suite de l'étude.

7.5.1 Etapes en relation avec l'acquisition des données

Nivelage de la capsule d'amorçage

Dans le cadre de cette étude, le nivelage de la capsule d'amorçage a été effectué manuellement. Cette solution a été choisie afin d'être sûr que la qualité de la transformation résultante de cette étape soit correcte, car la réussite d'autres algorithmes, appliqués par la suite, dépend effectivement de la qualité du nivelage. Il est clair que si une grande quantité de douilles doivent être analysées, cette étape peut prendre beaucoup de temps.

Notons qu'il est tout à fait envisageable de pouvoir automatiser cette étape sans faire intervenir un opérateur. Ceci pourrait hypothétiquement être effectué en détectant les axes principaux de la topographie à l'aide de la PCA (*Principal Component Analysis*). La mise à plat de la capsule d'amorçage pourrait se faire ensuite, en appliquant la rotation dans l'espace dictée par la PCA et en interpolant les données pour obtenir à nouveau une image de taille NxM.

Détection des points ayant des valeurs de réflexion limités

Il a pu facilement être constaté que les zones présentant le plus souvent des valeurs de réflexion limitées sont celles caractérisées par des pentes importantes ou des conditions de lumière difficiles telles que les bords de la trace du percuteur ou de la capsule d'amorçage. La valeur limite, au-delà de laquelle les valeurs de réflexion sont considérées comme insuffisantes et les points sont interpolés, a été déterminée suite à des essais et à des discussions avec les développeurs du système de mesure. Dans le cadre de cette recherche, la limite au-dessous de laquelle le point est interpolé a été fixée à 10%. Actuellement, la détection ainsi que l'interpolation des points ayant des petites valeurs de réflexion s'effectue manuellement à l'aide du logiciel μ Scan. Cette étape pourrait théoriquement se faire de manière automatique. Ceci serait éventuellement possible grâce à l'exportation des données relatives à la réflexion du laser.

En fonction de la taille de la zone à interpoler, des artefacts plus ou moins importants peuvent être créés pendant l'interpolation des données. L'interpolation des points des bords de la capsule d'amorçage ne pose normalement aucun problème, car cette partie de l'amorce est éliminée par la suite. Il en va de même pour la partie supérieure de la trace du percuteur. En fonction de la morphologie de la trace du percuteur, la partie supérieure, où les pentes sont plus importantes, n'est pas exploitée pour la comparaison.

Il est également possible que des artefacts se présentent sur d'autres parties de la capsule d'amorçage et qui ne sont pas détectés car, pour des raisons inconnues, ils possèdent des valeurs de réflexion du laser suffisamment grandes. Ces artefacts sont normalement atténués suite aux opérations de filtrage qui sont appliquées par la suite, mais il n'y a, pour le moment,

aucune étape permettant leur détection et leur élimination de manière automatique. Même si les recherches n'ont pas été plus loin dans le cadre de la détection des artefacts, il serait envisageable de développer des critères pour les isoler. Ceci pourrait être éventuellement effectué en exploitant leurs caractéristiques telles que les valeurs du gradient qui sont souvent beaucoup plus élevés que la moyenne.

Des points n'ayant pas pu être mesurés et qui n'ont donc aucune valeur de réflexion peuvent également être observés. L'erreur de mesure est normalement due à la profondeur de champ limitée à 1 mm. Si une partie de la douille se trouve au delà de la plage de mesure verticale, aucune valeur ne peut être enregistrée et les résultats des mesures se présentent sous la forme d'une surface complètement lisse (Figure 102). En fonction de l'ampleur de la zone n'ayant pas pu être mesurée, l'interpolation des données est déconseillée, pas seulement en raison de la quantité de temps nécessaires pour interpoler une telle quantité de données, mais également pour la création importante d'artefacts. La mesure doit donc être refaite.

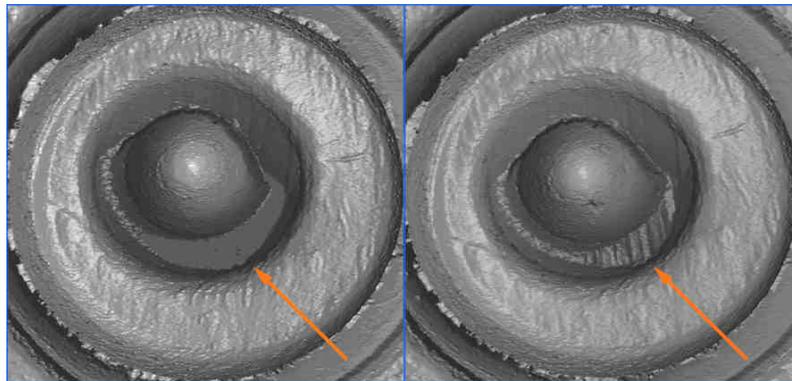


Figure 102

Mesure effectuée sur une capsule d'amorçage allant au-delà de la profondeur de champ limite (à gauche). La même mesure effectuée à l'intérieur de limites dictées par la profondeur de champ (à droite).

7.5.2 Etapes qui précèdent l'alignement

Toutes les étapes précédant l'alignement sont gérées par une interface graphique. Cette dernière permet de vérifier les résultats et, dans le cas échéant, de corriger les éventuelles erreurs.

Diminution de la résolution

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer le meilleur rapport entre la quantité des données et la perte d'information suite à la diminution de la résolution. Le choix s'est porté sur un facteur de diminution de résolution de 2. Les points sont donc diminués d'un facteur 2 pour chaque dimension (X et Y). Il en résulte que la capsule d'amorçage est décrite par 800 x 800 points, ce qui se traduit par une résolution latérale de 6 μm .

Segmentation de la capsule d'amorçage

Détection des cercles – Transformation de Hough

Les résultats de cette technique sont satisfaisants. Un des problèmes liés à son utilisation réside dans le fait qu'il faut connaître à l'avance la taille de la capsule d'amorçage afin

d'imposer un rayon pour le cercle la délimitant. En outre, parfois, la capsule d'amorçage n'est pas parfaitement ronde, ou encore le centre calculé par la transformation de Hough n'est pas complètement centré ; il en résulte donc un mauvais découpage des bords. Dans ces cas, il sera possible d'observer des « résidus » non symétriques qui font parti du cercle calculé, mais qui proviennent de la partie de la capsule qui s'enfonce dans la douille, partie qui n'entre pas en contact avec l'arme.

Détection des bords à l'aide du gradient

Comme pour la transformée de Hough, cet algorithme nécessite une connaissance à priori de la taille du cercle utilisé pour couper la capsule d'amorçage. En outre, l'utilisation d'un cercle pour couper la capsule n'est pas forcément la solution la plus efficace, car la capsule d'amorçage peut présenter des irrégularités aux bords. La segmentation ne s'effectuera donc pas toujours correctement.

Vecteurs normaux

Les résultats obtenus en exploitant les vecteurs normaux sont plus que satisfaisants. Ceci est principalement dû au fait que les bords sont coupés de manière précise. Il n'y a donc pas de zone, faisant partie de la pente, qui ne sont pas éliminées pendant la segmentation, comme cela peut être le cas pour les deux autres techniques testées.

Approche manuelle

Il s'agit d'une procédure similaire à celles employées dans certains systèmes de comparaison automatique, tel que le système Brasstrax[®] de Forensic Technologies. Le grand inconvénient de cette approche réside dans le fait qu'elle nécessite une intervention extérieure. Ceci implique un grand travail en fonction des données à comparer et une reproductibilité du découpage plus précaire par rapport à une approche complètement automatisé. En revanche, le découpage effectué manuellement permet de découper la capsule d'amorçage correctement dans des cas particuliers où les autres techniques pourraient échouer.

Choix retenu

Il est clair qu'une approche complètement automatisée est préférée par rapport à une segmentation manuelle. Parmi les techniques testées, celle qui donne les meilleurs résultats en termes de segmentation de la capsule s'avère être l'approche exploitant les vecteurs normaux. Cette technique sera donc employée pour le reste de l'étude. Plusieurs essais ont permis de déterminer les paramètres nécessaires pour l'application de cet algorithme. La segmentation a lieu notamment lorsque l'angle décrit entre le plan horizontal et les vecteurs normaux à la surface est inférieur à 80° environ.

D'un point de vue plutôt opérationnel, tel qu'un tri dans une base de données, ce genre d'approche peut facilement coexister avec une approche manuelle dans les cas particuliers où la segmentation automatique pourrait s'avérer difficile.

Séparation des traces

Vecteurs normaux

Cette technique a montré sa grande efficacité même lorsque la trace du percuteur présentait une trainée du percuteur. Par contre, des résultats moins satisfaisants ont été observés lorsque cette approche a été appliquée à des traces plus particulières, telles que les traces du percuteur laissées par un Glock® ou les traces présentant la forme des bords du trou du logement du percuteur en relief. Dans ce genre de cas, les paramètres concernant la limite après laquelle le coupage avait lieu ont dû être modifiés en raison de la présence des *Shear Marks* ou de l'irrégularité des bords de la trace du percuteur. Ces particularités ont pour conséquence une mauvaise séparation des deux traces, montrant une partie des bords faisant partie de la trace du percuteur et l'autre partie de la trace de la tête de culasse.

Une des problématiques liée à la séparation entre la trace du percuteur et celle laissée par la tête de culasse est la présence d'autres traces liées à celle du percuteur. En effet, il est nécessaire de décider si une trace fera partie de la tête de culasse, du percuteur ou si elle sera écartée pour la comparaison. C'est notamment le cas de la trainée du percuteur ou des *Shear Marks*. La morphologie de ces types de traces ne sont pas toujours reproductibles et représentent des traces glissées. Dans ce cas, une comparaison par alignement n'est pas forcément la meilleure solution. Il est donc nécessaire de découper ces traces et de les exclure pendant l'alignement et la comparaison, car les résultats pourraient s'en trouver faussés (Figure 103). L'alignement des traces pourrait également être influencé par la présence de ces marques. En effet, dans le cas où les traces de la trainée du percuteur sont assimilées à la trace de la tête de culasse, l'alignement des traces de trainée peut résulter en un désalignement des stries laissées par la tête de culasse. Dans ce cas, la comparaison des traces de la tête de culasse ne réfléchirait pas les similitudes attendues, mais plutôt les différences entre les trainées du percuteur.

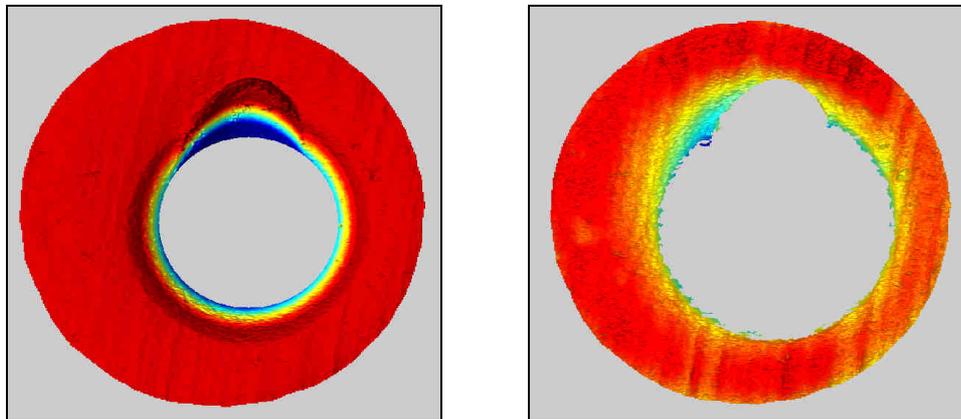


Figure 103

Images de la même trace avec (à gauche) et sans trainée du percuteur (à droite).

Approche manuelle

L'approche manuelle possède le grand avantage de pouvoir séparer la trace du percuteur de celle de la tête de culasse en excluant les parties des traces qui ne sont pas souhaitées pour la comparaison. L'inconvénient est que, comme pour la segmentation de la capsule, l'approche manuelle nécessite l'intervention d'une personne.

Choix retenu

Les mêmes considérations effectuées dans le cadre de la segmentation de la capsule d'amorçage peuvent être effectuées pour le choix de la technique à employer pour séparer les traces. L'approche automatique basée sur les vecteurs normaux sera donc utilisée pour la suite du travail. Plusieurs essais ont permis de déterminer les paramètres nécessaires pour l'application de cet algorithme. La séparation des traces a lieu notamment lorsque l'angle décrit entre le plan horizontal et les vecteurs normaux à la surface est inférieur à 30% de l'angle maximal observé sur la surface.

Filtrage des données

Lissage horizontal

Ce genre de filtrage trouve son utilité dans l'évaluation de la direction de la trace de la tête de culasse. En effet, les techniques employées dans ce but sont particulièrement sensibles à la présence du bruit laissé par le scanner pendant la mesure. Par contre, en ce qui concerne les images destinées à l'alignement, ce type de filtrage n'a pas été appliqué en routine. La raison réside dans fait que le bruit de fond est également atténué par des étapes de filtrages ultérieurs ; il s'agit donc d'éviter une suppression trop importante des hautes fréquences.

Atténuation des hautes fréquences

Afin d'éviter une perte de détail trop importante, la largeur du filtre gaussien « passe-bas » ainsi que la valeur de σ sont relativement petits. Les résultats plus adaptés ont été obtenus suite à l'application d'un filtre de taille 3 x 3, ayant une valeur de $\sigma = 1,5$. Le même filtre est utilisé pour la trace du percuteur que pour celle de la tête de culasse.

Atténuation des basses fréquences

Le découpage des formes globales nécessite l'évaluation d'un paramètre lié à la quantité de longueurs d'onde (ou fréquences) à filtrer. Suite à différents tests effectués, il a été décidé que les fréquences coupées devaient être différentes pour la trace du percuteur par rapport à celle de la tête de culasse. Les valeurs des seuils ont été fixées empiriquement à 250 μm et 340 μm pour la trace du percuteur et celle de la tête de culasse respectivement.

Amplification des fréquences

L'amplification des fréquences n'a pas fait l'objet d'études étendues. La valeur a été fixée de manière empirique à 10. Des tests plus systématiques devraient être effectués pour optimiser ce paramètre et vérifier son influence sur les résultats.

Découpage des formes

En ce qui concerne la tête de culasse, deux paramètres ont été fixés pour le découpage des bords : le premier relatif au découpage des bords à l'intérieur de la trace et le deuxième relatif aux bords de la trace qui donnent vers l'extérieur de la capsule. Les bords intérieurs subissent une érosion correspondante à 12 pixels alors que les bords extérieurs viennent amincis de 13 pixels. Pour ce qui est de la trace du percuteur, elle est coupée normalement à une hauteur de 250 μm à partir du fond de la trace. Dans des cas isolés où le percuteur possède une forme particulière, cette valeur peut être modifiée.

Direction de la tête de culasse

Spectre angulaire

La technique exploitant la fonction d'autocorrélation ainsi que la transformée de Fourier pour déterminer l'orientation dominante est très rapide. Malheureusement, le bruit de fond présent dans l'image ainsi que la présence d'autres formes qui peuvent être présentes en même temps que les stries sur la capsule d'amorçage, influencent d'une manière importante les résultats de cette technique.

Filtres de Sobel

L'approche utilisant les filtres de Sobel possède les mêmes inconvénients que le spectre angulaire. En outre, cette approche nécessite une prise de décision concernant le seuil utilisé pour découper les parties de l'image ayant un gradient considéré comme faible. Etant donné qu'il est difficile de trouver un seuil pouvant s'adapter pour tous les types d'image et de trace, il est tout à fait possible que l'évaluation de l'orientation dominante s'en trouve faussée.

Analyse directionnelle

Parmi les trois méthodes, l'analyse directionnelle semble être non seulement la plus simple en termes de conception, mais également la plus robuste. De plus, les valeurs concernant la magnitude et la cohérence de l'évaluation de la direction fournies par cette technique sont plus fiables par rapport aux autres techniques. Ces données permettent de déterminer si, sur la totalité des rectangles coupés sur la trace, une direction dominante est réellement présente ou pas.

Choix retenu

Suite aux observations effectuées pendant les essais, la technique nommée « analyse directionnelle » sera employée pour la suite du travail. Etant donné, que pour chaque trace de la tête de culasse plusieurs rectangles d'une taille relativement importante peuvent être inscrits, l'analyse de l'orientation dominante est effectuée plusieurs fois pour chaque trace. Le nombre maximal de rectangles inscrits dans la trace a été fixé à cinq. Pour chaque rectangle, trois valeurs étaient rendus suite à l'emploi de l'analyse directionnelle : la direction dominante, la magnitude de cette direction et la taille du rectangle analysé. La magnitude ainsi que la taille du rectangle ont été utilisés pour pondérer la « dominance » de l'orientation calculée. Plus la taille du rectangle est grande et plus il faut donner d'importance à la direction dominante correspondante. Ces informations sont ensuite utilisées afin de prendre une décision concernant, tout d'abord l'existence d'une orientation dominante, et ensuite sur la direction elle-même. La prise de décision pourrait être effectuée de manière statistique en prenant en compte les valeurs correspondantes aux cinq rectangles. Mais, dans le cadre de ce travail, le choix s'est porté sur l'emploi d'un réseau de neurones.

Le réseau de neurones nécessite des données initiales relatives à la direction dominante d'images préalablement connues. Ces informations sont utilisées pour l'apprentissage du réseau. Une fois entraîné, le réseau de neurones fournit deux résultats pour une nouvelle image: une valeur binaire concernant l'existence d'une éventuelle direction dominante dans la trace et une valeur en degrés relative à la direction dominante. Le grand avantage du réseau de neurones réside dans le fait qu'il est possible de mettre à jour les valeurs subjacentes à la prise de décision de manière automatique à chaque fois que des nouvelles analyses sont

effectuées. Dans le cadre de cette étude, les recherches ne se sont pas concentrées sur les détails du réseau de neurones. Il est donc envisageable d'approfondir les recherches dans cette direction afin d'améliorer les performances et l'utilisation des réseaux en question.

Etant donné toutes les variables entrant en ligne de compte lors de la détermination de l'orientation dominante, des erreurs d'évaluation peuvent avoir lieu. Ces erreurs peuvent être facilement détectées et corrigées lors de la vérification des résultats qui précède l'alignement des traces.

7.6 Alignement

Deux traces 3D doivent être alignées avant d'être comparées. L'alignement est donc le cœur même de l'étape de comparaison. Les algorithmes qui permettent d'aligner les topographies 3D nécessitent normalement un pré-alignement. Le pré-alignement est un alignement brut qui permet de rapprocher les deux topographies. Les algorithmes utilisés pour effectuer le recalage entre deux images 3D convergent souvent vers un minimum local sans pouvoir atteindre le minimum absolu. Ils nécessitent donc une estimation de l'alignement pour converger correctement et aligner les deux images [Jost, 2002].

Le schéma ci-dessous illustre les différents essais effectués en termes algorithmiques pour toute étape concernant l'alignement des traces du percuteur et des traces de la tête de culasse, abrégée TdC (cf. Section N°7.6), ainsi que les choix retenus pour la suite du travail (cf. Sections N°7.7 et 7.8).

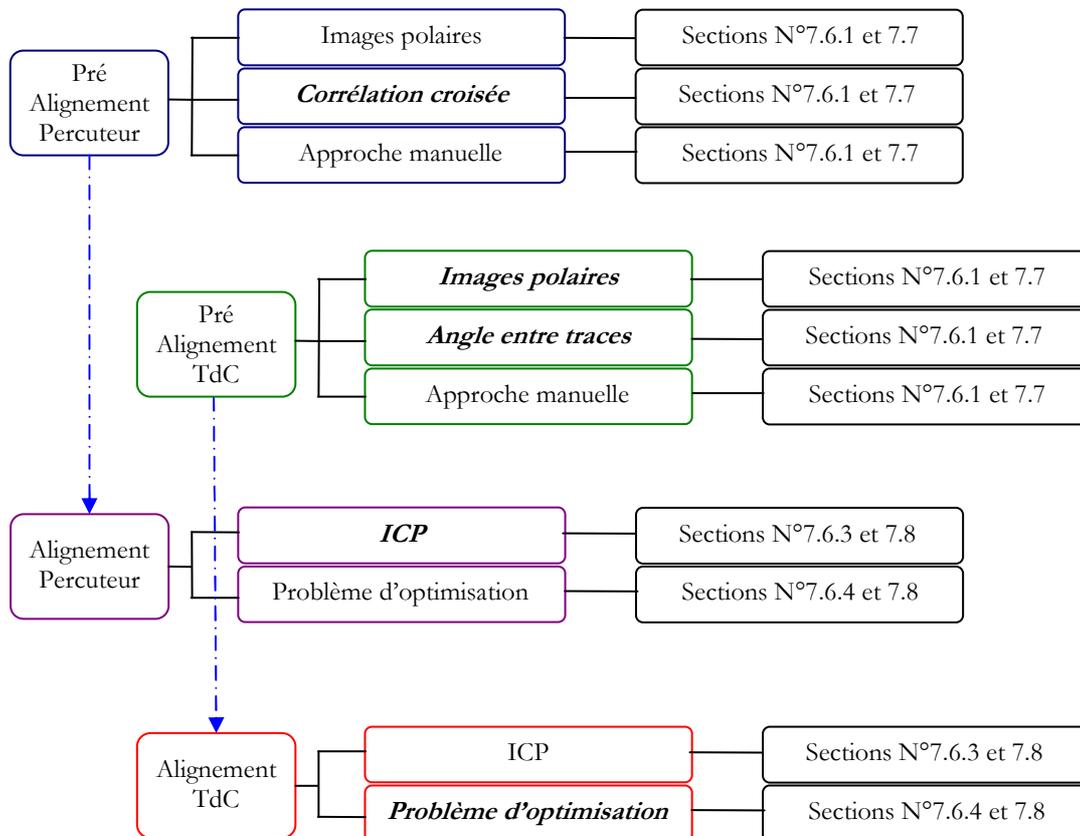


Figure 104

Schéma représentant l'ensemble des étapes d'alignement automatique des structures tridimensionnelles. Pour chaque étape, plusieurs solutions ont été proposées et évaluées. Le choix retenu est mis en évidence par du texte

en gras et en italique. Le schéma propose également la section où il est possible de consulter les données techniques concernant la partie de l'algorithme spécifiée ainsi que la section concernant le choix retenu.

7.6.1 Pré-alignement

L'alignement brut peut être effectué de différentes manières. Dans la littérature plusieurs solutions ont été proposées pour des images en 3D. Parmi-elles, il est possible de citer des pré-alignements exploitant les propriétés de la PCA, qui permet de détecter les principaux axes de la structure 3D [Tangelder et al., 2004], ou des techniques exploitant les *spin images* [Johnson et al., 1997]. Des pré-alignements manuels peuvent également être envisagés.

Les images résultantes des étapes de filtrage manquent souvent de relief. Les techniques citées ci-dessous peuvent donc faillir dans l'évaluation de l'alignement. Des techniques plus appropriées peuvent être trouvées dans le domaine du traitement d'images. Elles peuvent différer en fonction de la trace analysée. En effet, la trace du percuteur et celle de la tête de culasse possèdent des caractéristiques différentes qui peuvent être exploitées pour les aligner avec d'autres traces.

Trace du percuteur

Images polaires

Une approche retenue pour les images des traces du percuteur consiste dans le passage aux coordonnées polaires. Une fois que les deux images sont mises en coordonnées polaires, elles subissent des translations le long de l'axe représentant l'angle. À chaque translation, un coefficient de corrélation est calculé (cf. Section N°7.10.3). La translation qui possède la valeur de corrélation la plus proche de 1 correspondra à la rotation nécessaire pour aligner les images. Les images ci-dessous montrent un exemple pour deux traces (A et B) laissées par le même percuteur (Figure 105).

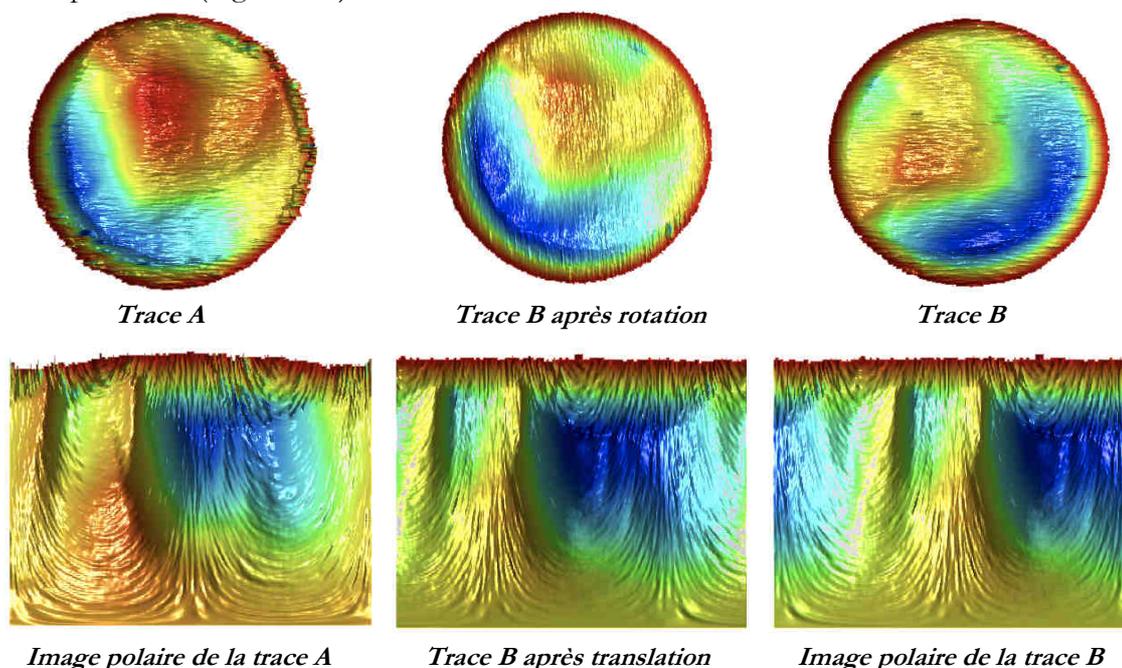


Figure 105

Images en coordonnées cartésiennes représentant deux traces du percuteur laissées par la même arme (gauche et droite – en haut) ainsi que la trace B suite à la rotation (au centre – en haut). Images en coordonnées polaires des

traces A et B (gauche et droite – en bas) ainsi que l'image polaire de la trace B suite à translation (au centre – en bas).

Corrélation croisée

La corrélation croisée ou *cross correlation*, représente une façon de calculer le niveau de similitude entre deux images. Cette opération peut être très coûteuse si elle est effectuée dans le domaine spatial. C'est pour cette raison qu'elle est souvent implémentée dans le domaine fréquentiel [Russ, 1995]. Dans le domaine fréquentiel, l'opération se résume de la manière suivante :

$$C(u,v) = F(u,v)G^*(u,v) \quad [i]$$

où F représente une première image dans le domaine fréquentiel et G^* le conjugué complexe de l'autre image. Le maximum absolu de l'image résultante de cette opération indique la translation dans le plan nécessaire pour pouvoir obtenir la valeur de corrélation maximale. Afin de trouver simultanément la translation et la rotation nécessaires pour aligner les deux traces, l'image d'une trace est itérativement tournée. A chaque itération, la corrélation croisée est calculée. Une fois que l'image a effectué un tour complet, la valeur de corrélation maximale indique la rotation et la translation optimales.

Trace de la tête de culasse

Images polaires

Comme dans le cas des traces du percuteur, les images polaires peuvent être exploitées pour aligner les traces de la tête de culasse.

Angle entre traces

La rotation nécessaire pour aligner deux traces de la tête de culasse peut être simplement extrapolée par la différence d'angle entre les directions dominantes des deux traces. La translation est ensuite extrapolée en calculant le centre de masse de la trace ou celui du trou laissé par l'absence de la trace du percuteur.

Approche manuelle

Des interfaces graphiques ont été mises en place afin de pouvoir pré-aligner soit des nuages de points dans l'espace, soit des images dans le plan. L'alignement manuel consiste en un ensemble de translations et de rotations imposées par un opérateur afin de rapprocher le plus possible deux structures tridimensionnelles. Dans le but de vérifier la qualité de l'alignement, il est possible de superposer les nuages des points ou de visualiser les images en 2D par juxtaposition.

7.6.2 Alignement final

Dans le cadre de cette recherche, deux algorithmes ont été testés pour effectuer l'alignement fin automatique de deux structures tridimensionnelles. Le premier, déjà employé dans le cadre d'autres recherches dans le domaine des armes à feu, telles que celles effectuées par Banno et al. et Vicario et al., [Banno et al., 2004 et Vicario et al., 1995], mais aussi souvent employé

avec succès dans le domaine médical [Marti, 2007], est connu sous le nom d'ICP (*Iterative Closest Point*). L'autre algorithme testé a été inspiré, en partie, par le travail de Nestares et Heeger sur le recalage d'images médicales [Nestares et al., 2000] et par la recherche menée par le NIST concernant la comparaison automatique en 3D des traces sur les douilles [Vorburger et al., 2007]. L'algorithme effectue un recalage rigide d'images ; le recalage est dicté par la minimisation de l'erreur métrique. Il s'agit d'une minimisation par optimisation.

7.6.3 ICP – Iterative Closest Point

L'algorithme ICP a été développé selon les informations fournies par les travaux de Jost en 2002 [Jost, 2002] et de Rusinkiewicz et Levoy en 2001 [Rusinkiewicz et al., 2001]. L'ICP, cherche à minimiser itérativement la distance métrique entre les points les plus proches de deux jeux de données. Suite à sa découverte en 1992 par Besl et McKay, différentes versions ont été proposées dans la littérature [Besl et al., 1992]. Son fonctionnement ainsi que les versions employées dans ce travail sont résumés dans les paragraphes suivants.

Soient P et Q deux ensembles de points dans l'espace. Chaque point appartenant aux deux ensembles est décrit respectivement par ses coordonnées P_x, P_y, P_z et Q_x, Q_y et Q_z . Afin d'aligner les ensembles des points, l'algorithme ICP calcule la matrice de rotation et la translation dans les trois axes nécessaires pour minimiser la distance métrique entre le modèle P et la référence Q . Pour ce faire, cet algorithme opère de la manière suivante :

- a. Choix des points : des points pour chaque jeu de données sont sélectionnés. Le critère employé pour choisir les sous-ensembles de points peut différer entre les différentes variantes de l'algorithme.
- b. Mise en correspondance entre points : les points de Q les plus proches aux points sélectionnés de P sont mis en correspondance. La notion de proximité peut changer selon le critère employé.
- c. Pondération et rejet : les couples de points peuvent être pondérés afin de pouvoir donner plus d'importance à des points plus proches que d'autres. Les couples de points ayant des distances trop importantes sont rejetés afin que la minimisation de l'erreur métrique ne soit pas influencée par des *outliers*. Encore une fois la notion de distance change en fonction du critère employé.
- d. Choix d'une erreur métrique : une métrique entre les deux jeux de données est choisie.
- e. Minimisation de l'erreur : recherche d'une transformation qui minimise la distance entre les ensembles des points selon la métrique choisie préalablement.
- f. Processus itératif : les étapes allant de « a » à « e » sont répétées jusqu'à ce qu'un critère préétabli permette d'arrêter le processus.

Toutes les variantes de l'ICP qui ont été implémentées dans cette recherche possèdent la même structure de base et opèrent selon le schéma de multirésolution (*coarse to fine*) proposé dans la thèse de Jost [Jost, 2002]. Elles ont été choisies parmi celles proposées par Rusinkiewicz et Levoy [Rusinkiewicz et al., 2001].

Choix des points

Le choix des points est effectué principalement dans le but de diminuer la complexité du calcul et donc le temps employé pour le faire. D'autre part, le critère utilisé pour choisir les points peut mettre en évidence des stigmates laissés par l'arme plutôt que le reste de la

capsule ou des parties moins intéressantes du point de vue des comparaisons (Figure 106). De cette façon, la minimisation de l'erreur métrique sera guidée en fonction de certaines caractéristiques plutôt que d'autres. Parmi les différents critères utilisés pour sélectionner les points, il est possible de citer le choix aléatoire de points, la sélection uniforme ou le choix effectué de manière à ce que les vecteurs normaux aux points soient distribués de la manière la plus uniforme possible. Ces deux dernières variantes ont été testées pendant ce travail (Figure 106).

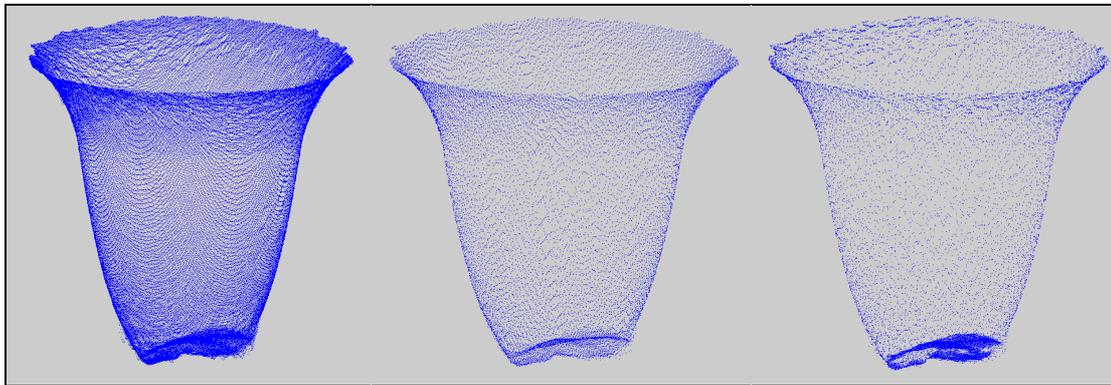


Figure 106

Trace du percuteur non filtré à résolution maximale (à gauche), choix des points uniforme (au centre) et échantillonnage par vecteurs normaux (à droite). A noter que l'image de droite présente un nombre de points plus important sur le fond de la trace que sur ses bords.

Toutes ces variantes peuvent mettre en œuvre une sélection de points uniquement sur un set de données ou sur les deux simultanément.

Mise en correspondance

Dans le but de mettre en correspondance les points de Q avec les points les plus proches de P , le critère utilisé a été la distance Euclidienne (cf. Section N° 7.10.1). Etant donné que cette étape peut prendre beaucoup de temps en fonction de la quantité des points, l'emploi d'un k - D tree a été choisit pour diminuer le temps de calcul. Pour ce faire, le k - D tree généralise la bissection en une dimension à plusieurs dimensions (dans ce cas à trois dimensions). Pour avoir plus d'informations concernant le k - D tree, se référer au travail de Jost [Jost, 2002]. Les codes, utilisés pour calculer le k - D tree, ont été obtenus dans la rubrique d'échange de dossiers mise à disposition par Mathworks³⁵.

Pondération et rejet

Dans le but d'éviter que la rotation et la translation calculées pour minimiser la distance métrique soient influencées d'une manière trop importante par des couples de points trop distants, il est possible de pondérer ou de rejeter ces couples³⁶. En ce qui concerne la pondération, il est possible d'attribuer des « poids » en fonction de la distance séparant les différents couples de points. Les poids assignés peuvent, par exemple, dépendre de la distance entre les deux points par rapport à la distance maximale entre tous les couples.

³⁵ www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

³⁶ L'expression « couple de points » se réfère au couple formé par un point dans une structure tridimensionnelle et le point le plus proche dans l'autre structure.

Une autre façon d'éviter l'influence des *outliers* est de rejeter complètement les couples qui possèdent des distances plus élevées qu'un certain seuil. Le seuil peut être fixe ou être adapté et dépendre de la moyenne ou de l'écart-type des différentes distances. Masuda et al. en 1996 proposent de fixer le seuil à une valeur de $2.5 \cdot \sigma$ où σ correspond à l'écart type de toutes les distances [Masuda et al., 1996]. D'autres critères de distance peuvent être employés. Par exemple, dans cette étude, le seuil a également été mis à une valeur de $2.5 \cdot \sigma$, mais ici σ correspond à l'écart type des différences entre les angles inscrits entre les vecteurs normaux des points en question.

Choix d'une erreur métrique

Le choix de l'erreur métrique influence directement le procédé employé pour minimiser la distance entre les points. L'erreur métrique peut être définie de différentes manières selon le critère choisit. Les distances métriques prises en considération dans le cadre de cette recherche sont la distance point-to-point et la distance point-to-plane (Figure 107). La première est simplement définie comme la distance Euclidienne entre le point P_i et le point le plus proche Q_i dans l'autre ensemble de points Q . La distance point-to-plane est définie comme la distance entre le point P_i et l'intersection avec le plan décrit par le point Q_i et son vecteur normal n_{qi} .

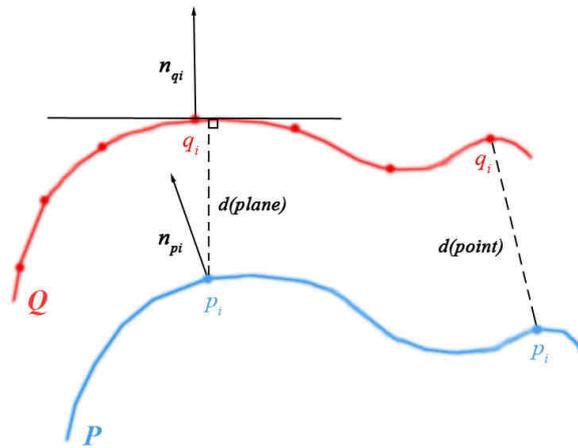


Figure 107

Schéma représentant la différence entre la distance point-to-plane (à gauche) et point-to-point (à droite).

Minimisation de l'erreur métrique

Si la métrique se base sur la distance point-to-point, cette étape consiste à trouver une approche qui minimise l'erreur moyenne au carré entre les deux ensembles des points. La fonction à minimiser se présente donc sous la forme suivante :

$$e(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \left\| (\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}) - \mathbf{q}_i \right\|^2 \quad [j]$$

où \mathbf{R} est la matrice de rotation, \mathbf{t} représente la translation, \mathbf{q}_i le point de Q le plus proche à \mathbf{p}_i et \mathbf{n}_i le vecteur normal à la surface. Pour résoudre ce problème, des formulations closes ont été proposées dans la littérature. Parmi ces dernières, il y a des approches qui exploitent la décomposition en valeurs singulières, l'emploi d'un quaternion ou d'un dual quaternion. Les performances de ces approches sont similaires en termes de stabilité et de précision. L'emploi d'un quaternion a été choisi. Pour plus d'informations se référer au travail de Jost [Jost, 2002].

En revanche si la métrique se base sur la distance point-to-plane, la fonction à minimiser se présente sous la forme suivante :

$$e(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \left\| (\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{n}_i \right\|^2 \quad [\text{k}]$$

Dans ce cas de figure, ce problème ne peut pas être résolu par des formulations closes. Il peut être résolu avec un système non linéaire (par exemple, Levenberg-Marquardt) ou en rendant ce problème linéaire en assumant que les rotations qui auront lieu seront caractérisées par de petits angles [Rusinkiewics et al, 2001]. Dans ce cas de figure, la transformation peut être trouvée grâce à la relation suivante :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad [\text{l}]$$

où \mathbf{X} comporte toutes les informations concernant la rotation \mathbf{R} et la translation \mathbf{t} . Alors que \mathbf{A} et \mathbf{b} se présentent sous la forme suivante :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{p}_1 \times \mathbf{n}_1 & \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{p}_2 \times \mathbf{n}_2 & \mathbf{n}_2 \\ \dots & \dots \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} -(\mathbf{p}_1 - \mathbf{q}_1) \cdot \mathbf{n}_1 \\ -(\mathbf{p}_2 - \mathbf{q}_2) \cdot \mathbf{n}_2 \\ \dots \end{pmatrix} \quad [\text{m}]$$

La minimisation de la distance point-to-plane permet une convergence plus rapide vers le minimum et nécessite un nombre inférieur d'itérations par rapport à la distance point-to-point.

Critère employé pour arrêter le processus itératif

L'ICP répète ces étapes de manière itérative afin d'affiner de plus en plus la transformation alignant les deux structures 3D. Un critère pour arrêter le processus itératif doit être mis en place une fois que l'alignement est jugé de qualité suffisante. Les critères qui peuvent être employés dans ce but sont nombreux. Il est possible de citer les suivants :

- Les itérations s'arrêtent lorsque l'erreur \mathbf{E} est inférieure à un seuil τ préalablement déterminé.
- Un terme est mis au processus lorsque la différence entre les erreurs à des itérations qui se suivent (\mathbf{E}_k et \mathbf{E}_{k-1}) est inférieure à un certain seuil τ : $\mathbf{E}_{k-1} - \mathbf{E}_k < \tau$.
- Un terme est mis au processus lorsque la différence entre les angles de rotation \mathbf{R} ou les translations \mathbf{t} à des itérations qui se suivent est inférieure à un certain seuil τ : $\mathbf{R}_{k-1} - \mathbf{R}_k < \tau$ et/ou $\mathbf{t}_{k-1} - \mathbf{t}_k < \tau$.

Schéma multirésolution

L'approche multirésolution choisie implique que les premières itérations sont effectuées au niveau de résolution le plus bas. Ensuite, chaque fois que le critère pour arrêter les itérations est rempli, la résolution est augmentée et l'ICP continue à opérer sur des données à plus haute résolution. Ce processus s'achève lorsque le niveau de résolution maximale est atteint. Le niveau le plus bas de résolution ne doit pas présenter de nuages de points inférieurs à 100

points. Le schéma suivant représente le processus suivi par l'algorithme ICP ayant une structure allant du niveau de résolution le plus bas jusqu'au plus élevé (Figure 108).

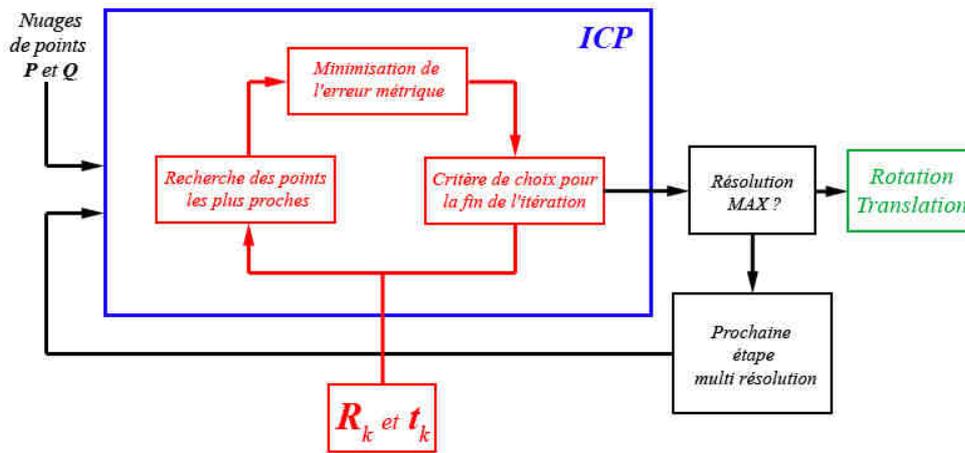


Figure 108

Schéma représentant la structure multirésolution et le mode de fonctionnement de l'algorithme ICP.

7.6.4 Alignement – Problème d'optimisation

En mathématique, un problème d'optimisation est défini comme le problème qui s'intéresse à la meilleure solution d'une fonction parmi toutes les solutions disponibles. Contrairement à l'ICP, la minimisation vue comme un problème d'optimisation, utilisée dans cette étude, opère sur des images en 2D et non sur des nuages de points. Dans le cadre du recalage d'images, il est possible de décrire l'erreur métrique entre deux images en fonction de la transformation qui est appliquée à l'image à recaler. Cette fonction est une fonction ayant N dimensions où N correspond au nombre de degrés de liberté de la transformation. Dans le cas en question (le recalage rigide d'une image), la fonction représentant l'erreur métrique est une fonction en trois dimensions où les variables sont la rotation dans le plan horizontale (R), la translation sur l'axe des abscisses (t_x) et la translation sur l'axe des ordonnées (t_y). Cette fonction est appelée fonction objective [Pluim et al., 2003].

Le bassin de convergence peut être défini comme l'ensemble des valeurs pouvant être assumés par la fonction objective en fonction des variables qui la décrivent. De ce point de vue, trouver l'alignement entre deux images signifie trouver la valeur optimale de la fonction objective, soit la valeur minimale du bassin de convergence. L'image ci-dessous montre le bassin de convergence de deux traces laissées par la même tête de culasse. L'image est en deux dimensions parce que, dans ce cas particulier, destiné à des fins démonstratifs, la fonction possède seulement deux variables : la rotation et la translation sur un seul des deux axes (Figure 109). La zone bleue foncée représente l'optimum de la fonction, à savoir l'erreur métrique minimale résultant de l'alignement entre les deux traces.

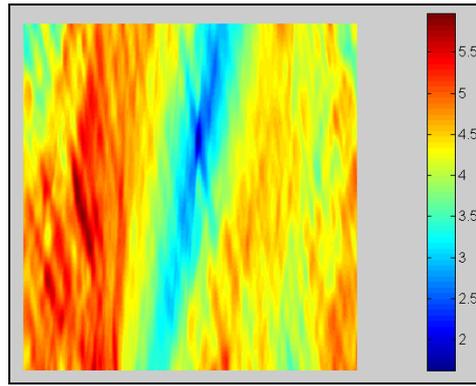


Figure 109

Bassin de convergence lors du recalage de deux traces d'une tête de culasse. Les couleurs représentent l'évolution de l'erreur métrique en fonction de la rotation et de la translation sur un des deux axes.

Aborder le problème du recalage par optimisation équivaut donc à trouver le minimum absolu de la fonction objective. Afin d'assurer la convergence vers ce minimum, il serait possible d'effectuer une recherche exhaustive. Etant donnée qu'une telle recherche peut être très longue, un algorithme pouvant converger automatiquement doit être employé. Ce genre d'algorithme opère de la manière suivante [Venkataraman, 2009] :

- Pour converger avec succès vers l'optimum de la fonction, l'algorithme nécessite une estimation grossière de l'alignement. Une valeur initiale de R_ϕ , t_{x0} et t_{y0} doit donc être fournie. Il s'agit du point de départ exploité par l'algorithme.
- L'algorithme doit ensuite trouver ce qui peut être défini comme une direction de descente, à savoir une direction qui permet de se diriger vers le minimum du bassin de convergence. Une distance de descente doit également être préétablie afin que l'algorithme puisse savoir de quelle manière doit descendre vers le minimum.
- Le point de départ est mis à jour avec le nouveau point trouvé par l'algorithme.
- Ces étapes sont effectuées de manière itérative jusqu'à convergence.

Plusieurs algorithmes basés sur ce principe existent. Ils diffèrent principalement dans la manière avec laquelle ils trouvent la direction de descente. Parmi les plus connus il y a la méthode de Powell qui se base sur une recherche directe, la descente de plus forte pente (*steepest descent*) qui exploite le gradient de la fonction objective pour trouver la direction de convergence ou la méthode des « Simplex » qui utilise des figures géométriques pour s'orienter dans le bassin de convergence. D'autres algorithmes, tels que la méthode de Newton ou la méthode de Levenberg-Marquardt, peuvent également être employés en fonction du genre de problème qui est censé être résolu [Venkataraman, 2009].

Dans le cadre de cette étude, la méthode des « Simplex » a été employée. Cet algorithme exploite une forme géométrique, nommée « Simplex », ayant un nombre de vertex équivalent à $N + 1$ où N est le nombre de dimensions (le simplex sera donc un triangle pour le cas bidimensionnel). La valeur de la fonction objective pour les trois vertex du simplex est calculée à la position de départ proposée à l'algorithme. Un vertex ayant une valeur médiocre sera remplacé par un nouveau vertex qui est créé par symétrie par rapport aux deux points restants (Figure 110). En fonction de la manière avec laquelle la valeur du nouveau vertex évolue, le triangle peut subir des expansions ou des contractions afin de se diriger vers une solution plus appropriée. De cette manière, l'algorithme se dirige itérativement vers

l'optimum de la fonction. Cette méthode, même si elle n'est pas la plus rapide, est particulièrement robuste lorsqu'elle est utilisée pour des fonctions objectives discontinues [Machowski et al., 2004].

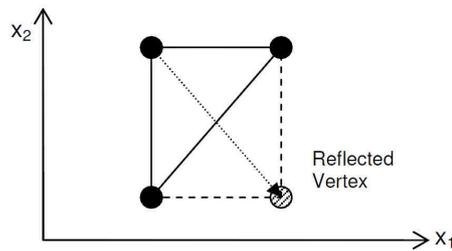


Figure 110
Représentation d'un simplexe à trois vertex [Machowski et al., 2004].

A chaque itération, pour calculer la nouvelle valeur de la fonction objective correspondant à la nouvelle estimation effectuée par l'algorithme, l'image à recaler doit subir la rotation et la translation correspondante. Ceci implique qu'une interpolation des données ait lieu. Une interpolation « bicubique » a été choisie. Un paramètre très important pour assurer que la convergence correspond avec l'alignement souhaité est le choix de l'erreur métrique qui décrit la fonction objective. Dans le cadre de ce travail, la fonction objective a été inspirée par celle employée par Nestares et Heeger [Nestares et al., 2000]. Cette dernière permet de baser l'alignement sur des caractéristiques plus fines entre les images en atténuant l'influence de différences plus importantes.

Une technique qui minimise statistiquement l'erreur métrique peut être définie comme robuste, si elle est conçue de telle manière qu'elle minimise l'influence des points aberrants : les *outliers*. Une classe des estimateurs robustes, appelée « M-estimators », minimise la somme des erreurs résiduelles r_i entre deux images qui, en fonction de la transformation, n'augmentent pas à l'infini (contrairement à une métrique au carré), mais qui saturent pour des erreurs d'une certaine importance. De cette manière, les grandes différences entre deux images, qui peuvent être définies comme des *outliers*, n'ont qu'une influence limitée dans le calcul de la solution finale. Les fonctions ci-dessous montrent, à gauche, la courbe correspondant aux erreurs au carré, alors que l'image de droite montre un choix particulier d'une fonction représentant les erreurs résiduelles. Dans l'image de gauche le point r_1 correspond à une petite erreur résiduelle alors que le point r_2 , qui correspond à une grande erreur résiduelle possède une erreur carré très important et aura donc une grande influence dans l'estimation de la transformation (Figure 111).

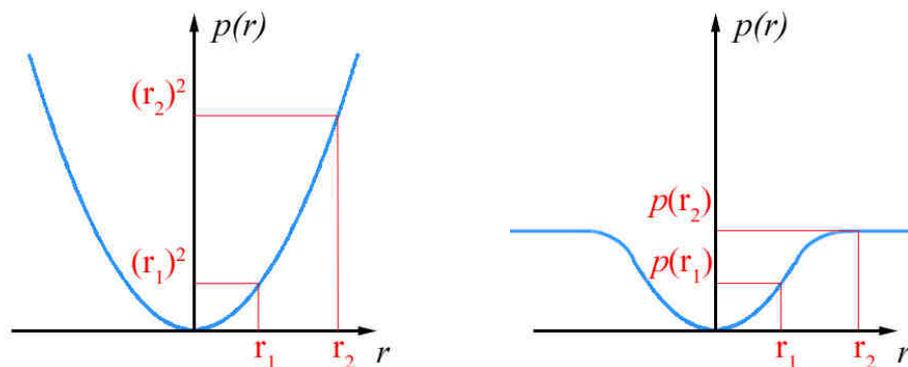


Figure 111
Fonction carrée (à gauche) et l'estimateur atténuant l'influence des grandes erreurs résiduelles (à droite).

Au contraire, le même point \mathbf{r}_2 dans la fonction de droite aura une influence limitée car la fonction sature pour les grandes valeurs des erreurs résiduelles. Par contre, un problème lié à l'emploi de cet estimateur réside dans le fait que la fonction résultante n'est pas convexe ; il n'y a donc pas de garantie qu'il y ait lieu une convergence jusqu'au minimum absolu [Nestares et al., 2000].

La nature de la fonction objective influence également la convergence vers le minimum. La fonction objective n'est pas une fonction complètement lisse, mais elle contient plusieurs minima locaux. Les minima locaux représentent souvent des correspondances locales, mais parfois ils peuvent également résulter de l'implémentation de l'algorithme. C'est notamment le cas de minima locaux créés par interpolation des données [Pluim et al., 2003]. Afin de minimiser la probabilité de tomber dans un minimum local, qui résulterait en un mauvais alignement, la solution proposée dans le travail de Nestares et Heeger a été utilisée [Nestares et al., 2000]. Cette dernière implique une approche multirésolution. La représentation d'une image à plusieurs niveaux de résolution s'effectue par la création d'une variante d'une pyramide gaussienne. Cette dernière est le résultat d'une application récursive d'un filtre « passe-bas » et d'une opération de rééchantillonnage à un niveau de résolution inférieur [Russ, 1995]. Les paramètres de la transformation sont donc tout d'abord évalués au niveau de résolution le plus bas où les déplacements pour recaler l'image sont plus petits. Une fois la convergence effectuée, le passage au niveau de résolution plus élevé a lieu et ceci jusqu'au niveau de résolution maximal où les détails sont mieux définis [Nestares et al., 2000]. Le schéma suivant résume les étapes qui entrent en jeu pour assurer l'alignement (Figure 112) :

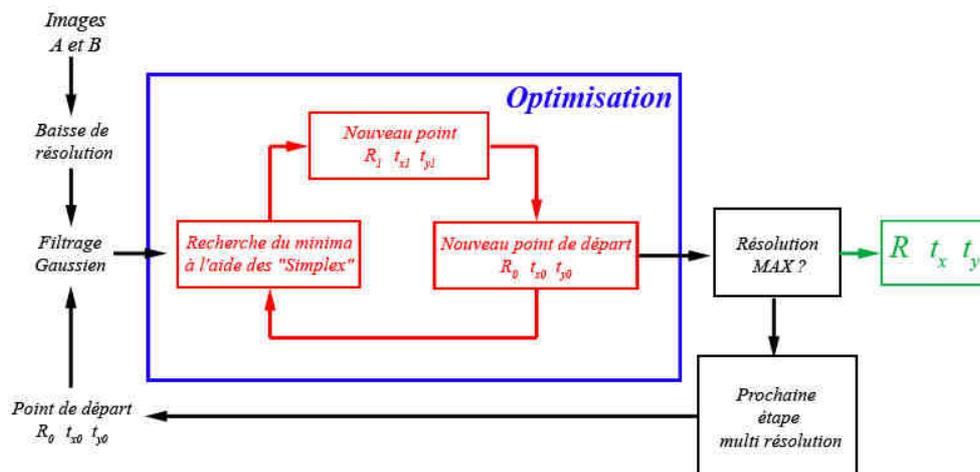


Figure 112

Schéma représentant la structure et le mode de fonctionnement de l'algorithme d'optimisation.

7.6.5 Qualité de l'alignement

Quel que soit le type d'alignement, une méthode permettant de vérifier la qualité de l'alignement doit être employée. En fonction du type de trace et donc du type d'alignement, différents types de techniques pour visualiser les résultats ont été implémentés.

Pour les traces alignées suite à application de l'ICP, le résultat de l'alignement se présente sous la forme de nuages des points décrits par les trois coordonnées dans l'espace. La qualité de l'alignement peut donc être jugée en observant les deux nuages des points superposés (Figure 113). Cette technique de visualisation est mieux adaptée pour les traces du percuteur, surtout lorsqu'elles possèdent une morphologie marquée et peu plate.

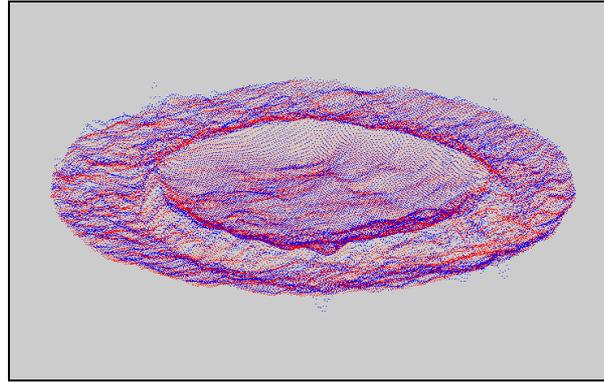


Figure 113

Superposition de deux traces du percuteur sous la forme de nuage de points respectivement en bleu et en rouge.

Par contre, si les traces sont relativement plates et sans reliefs, il est difficile d'apprécier la qualité de l'alignement. C'est notamment le cas des traces de la tête de culasse et d'une partie des traces du percuteur analysées. Pour apprécier au mieux l'alignement entre deux traces de la tête de culasse, des images en deux dimensions doivent être utilisées. La même technique de juxtaposition, utilisée pour visualiser les traces sur un microscope comparateur, a été employée (Figure 114). La ligne séparant les deux traces peut être bougée pour vérifier l'alignement sur la totalité de la trace. De plus, le contraste peut être modifié pour mettre en évidence des parties de la trace plutôt que d'autre.

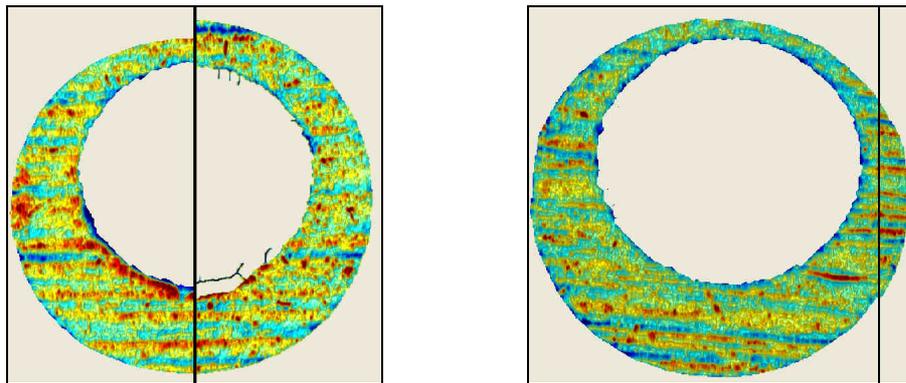


Figure 114

Juxtaposition de deux images de la tête de culasse. La ligne verticale noire est le séparateur entre les deux images.

Ce type de visualisation ne pose pas de problèmes pour des traces alignées à l'aide de l'algorithme d'optimisation, car le résultat est fourni sous forme de deux images en deux dimensions. Ce n'est pas le cas pour l'ICP. Les nuages 3D résultants de l'application de cet algorithme doivent être projetés sur le plan XY et une interpolation des points doit avoir lieu pour qu'ils puissent être représentés sous forme d'image en 2D.

7.7 Pré-alignement – Choix retenu et discussion

Trace du percuteur

Pour le pré-alignement de la trace du percuteur deux approches avaient été retenus : l'emploi des images polaires et la corrélation croisée. Même si ces deux approches ont souvent donné des résultats similaires et nécessitent une quantité de temps de calcul comparables, la

procédure d'alignement brut exploitant la corrélation croisée a été choisie pour la suite de l'étude. L'avantage de cette technique, par rapport à l'utilisation des images polaires, réside dans le fait qu'elle est moins sensible à la présence de différences au niveau des contours de la trace. En effet, les traces du percuteur, même si elles sont coupées à la même hauteur, peuvent présenter des contours de forme différente. Ce phénomène est accentué pour des traces présentant une traînée du percuteur.

Une autre technique qui n'a pas pu être testée de manière approfondie est la transformée de Fourier-Mellin, qui permet d'obtenir des images invariantes à la rotation, translation et homothétie. Cette approche a déjà été employée dans le domaine des armes à feu par Senin et al. [Senin et al., 2006].

Trace de la tête de culasse

Pour le pré-alignement des traces laissées par la tête de culasse, le critère utilisé pour les aligner dépend du type et de la qualité des traces présentes. Si une des deux traces ne présente pas de stries et donc ne possède pas une direction dominante, alors l'alignement est effectué en exploitant des images polaires. Si par contre, les deux traces possèdent une direction dominante bien définie, alors une trace subira une rotation en degrés correspondante à la différence entre les deux directions dominantes dans la trace.

Approche manuelle

Aligner deux traces manuellement, que ce soit une transformation dans l'espace ou dans le plan, nécessite du temps. De plus, la qualité de l'alignement n'est pas toujours facile à assurer. En effet, le type de visualisation adopté peut rendre difficile l'alignement des caractéristiques désirées. C'est notamment le cas de la superposition des nuages des points où les reliefs liés aux détails des traces sont difficilement distinguables du reste de la trace. Etant donné, que la quantité des comparaisons à effectuer dans le cadre de cette recherche est relativement élevée, et que le temps nécessaire pour aligner deux traces peut s'avérer important, l'approche manuelle n'a été prise en considération pour la suite du travail que pour des cas particuliers. En effet, l'alignement manuel peut être employé dans les cas où le pré-alignement est tellement mauvais qu'aucune convergence ne peut avoir lieu entre les traces.

7.8 Alignement – Choix retenu et discussion

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer le meilleur algorithme pour aligner les traces. Les différentes variantes des algorithmes ainsi que les différentes variables ont été testées. Les résultats ont montré que les deux types de traces, ayant des caractéristiques différentes, sont également plus prédisposés à l'alignement effectué par un algorithme plutôt que par l'autre. Les paragraphes suivants résument les problèmes rencontrés et les solutions adoptées.

Trace de la tête de culasse

Le découpage des fréquences diminue drastiquement les reliefs de la trace de la tête de culasse. L'application de l'algorithme ICP sous toutes ses variantes a permis de constater que l'alignement n'avait pas lieu correctement. Ces résultats pourraient être expliqués par le fait que, étant donné le manque de relief, l'algorithme tombe facilement dans un minimum local. La minimisation de l'erreur métrique a lieu sans que les petites caractéristiques, telles que les

stries de la tête de culasse, puissent prendre suffisamment d'importance. Il en résulte donc que c'est la forme globale de la trace qui dirige l'alignement plutôt que les stigmates laissés par l'arme. Malgré que l'ICP ait montré des capacités d'alignement remarquables sur structures 3D ayant des formes plus développées et moins aplaties, il ne sera pas utilisé pour l'alignement des traces de la tête de culasse.

En ce qui concerne l'algorithme d'optimisation, sa structure permet, contrairement à l'ICP, de s'affranchir plus facilement des minima locaux et de donner d'avantage de poids aux caractéristiques plus fines. L'alignement s'effectue donc correctement dans la plupart des cas (Figure 115) et les grandes différences concernant les contours de la trace ou la présence de formes ayant un relief important, telle que la trainée du percuteur, n'influencent pas assez l'alignement pour forcer la convergence vers un autre minimum.

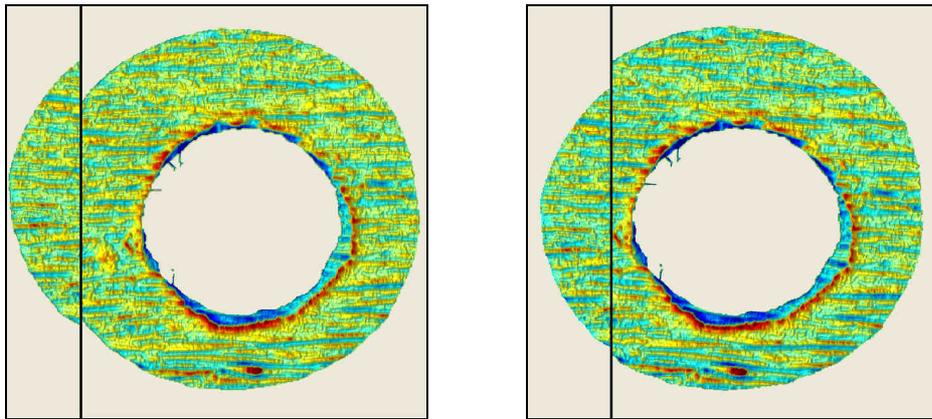


Figure 115

Deux traces avant (à gauche) et après (à droite) l'alignement par optimisation.

Pendant les différents essais effectués, il a été constaté que le choix de la fonction objective demeure un paramètre essentiel pour la réussite de l'algorithme. L'algorithme développé utilise une fonction qui permet de minimiser les erreurs résiduelles trop importantes (Figure 111). Un seuil doit être choisit pour décider quelles valeurs seront amplifiées au carré et lesquelles auront un poids constant dans la fonction. Dans le cadre de cette recherche, ce seuil a été choisit empiriquement à une valeur correspondant à la moyenne de la différence de l'ensemble des pixels composants les traces. Ce choix possède l'avantage d'évoluer à chaque itération; les poids sont donc redistribués à chaque nouvelle transformation. Malgré les bons résultats obtenus, des recherches pourraient encore être effectuées pour assurer l'applicabilité et la polyvalence de ce seuil dans des situations plus variées.

Concernant l'emploi de la pyramide gaussienne, elle permet souvent d'éviter la convergence vers un minimum local. Il a été constaté que la première étape, effectuée au niveau de résolution le plus bas, reste cruciale pour l'alignement. En effet, il est difficile que les étapes de résolution suivantes produisent des rotations et des translations suffisamment importantes pour diverger de la solution calculée pendant la première étape. Les étapes suivantes permettent plutôt d'affiner l'alignement à des niveaux de détails plus fins. C'est pour cette raison que la première étape est effectuée trois fois avec des valeurs de translation modifiées par rapport aux valeurs estimées pendant le pré-alignement. Cette procédure permet d'avantage d'éviter de converger vers un minimum local.

Pour la suite du travail, l'algorithme d'optimisation sera donc employé pour l'alignement des traces de la tête de culasse.

Trace du perceur

Les tests préliminaires effectués sur la trace du perceur ont montré des résultats similaires pour les deux techniques d'alignement. L'ICP a montré des résultats légèrement meilleurs pour des traces du perceur laissées pour des pistolets SIG Sauer avec un temps nécessaire pour effectuer les calculs inférieur à celui demandé par l'autre algorithme. La version de l'ICP qui a été choisie pour le reste de la recherche est la suivante :

- Approche multirésolution avec choix des points de façon à ce que les vecteurs normaux aux points soient distribués de la manière la plus uniforme possible.
- Rejet des couples de points ayant une distance trop grande ou ayant une différence importante au niveau de la direction des vecteurs normaux.
- Minimisation de la distance point-to-plan.
- Critère pour arrêter les itérations basées sur la différence d'erreur métrique par rapport aux valeurs des itérations précédentes.

Une fois les nuages des points alignés, une projection dans le plan XY est effectuée afin de pouvoir visualiser les résultats (Figure 116).

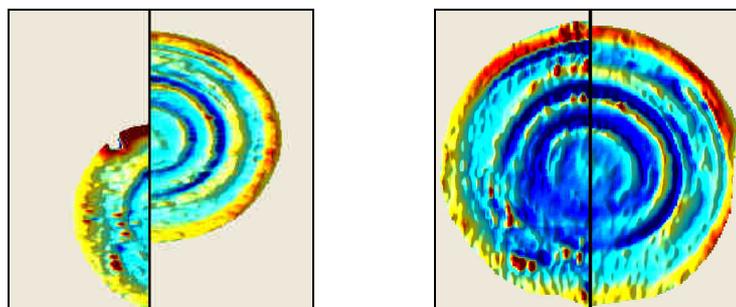


Figure 116
Deux traces du perceur avant (à gauche) et après (à droite) l'alignement par ICP.

7.9 L'influence de la pose initiale sur la qualité de l'alignement

Quelle que soit le type de trace ou l'algorithme employé pour la superposition des images, il est possible d'analyser la qualité de l'alignement en fonction de la pose initiale entre les deux traces. Le graphique ci-dessous montre la qualité de l'alignement, représenté par une valeur appelée « Erreur » en fonction de l'angle entre les deux traces avant l'alignement. Plus l'erreur est petite et plus l'alignement sera correct (**Figure 117**).

Ce genre de graphique n'est pas seulement relaté au type d'algorithme, mais également à la qualité des traces qui doivent être alignées. En effet, des traces ayant des caractéristiques bien définies ont plus de chance d'éviter des minima locaux et de converger vers un bon alignement même avec des angles de pose initiaux relativement éloignés. Les résultats peuvent être différents avec des traces montrant peu de caractéristiques et des reliefs peu marqués.

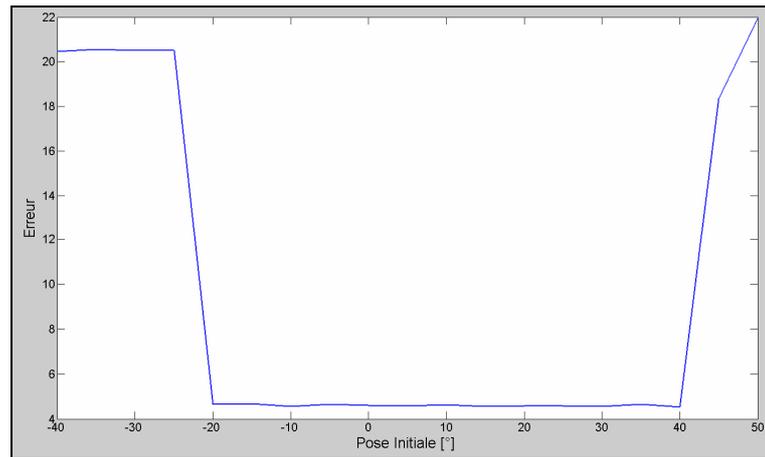


Figure 117

Graphique démontrant l'erreur de pose entre deux traces en fonction de l'angle les séparant avant l'alignement.

7.10 Erreur métrique

L'erreur métrique peut être définie comme un chiffre qui représente la quantité de différences (ou de similitudes) entre deux traces en fonction d'une caractéristique utilisée pour les décrire. A titre d'exemple, il est possible de décrire une trace de percuteur par la profondeur de la trace ou par le volume du cratère la caractérisant. Il est donc possible de connaître la différence de profondeur ou de volume des traces en calculant la différence entre ces deux métriques. Bien que cette méthodologie est assez extravagante d'un point de vue purement forensique, l'exemple montre bien la variété de caractéristiques qui peuvent être employées pour décrire des traces et de quelle manière il est possible de quantifier leurs différences. Le terme « erreur métrique » est souvent employé dans le domaine du recalage d'images. En effet, il représente l'erreur suite à l'alignement entre deux images considérées comme représentant un même objet. Dans le cadre de ce travail, l'erreur métrique représente tout type de métrique quantifiant les similitudes ou les différences entre les traces.

Les caractéristiques employées pour extrapoler la métrique auront un impact très important sur le niveau de discrimination. Certaines métriques seront donc plus adaptées que d'autres pour discriminer deux échantillons différents. Les distances métriques sont calculées suite à l'alignement des deux traces. Elles peuvent être extrapolées à partir des deux images en deux dimensions ou des nuages des points en trois dimensions.

7.10.1 Distance Euclidienne

La distance Euclidienne est une métrique utilisée pour quantifier la distance séparant deux points P et Q dans l'espace. Etant donné que chaque point peut être décrit par ses trois coordonnées cartésiennes (px, py, pz) et (qx, qy, qz) , la distance Euclidienne D peut être décrite par la formule suivante [Besl et al., 1992] :

$$D = \sqrt{(px - qx)^2 + (py - qy)^2 + (pz - qz)^2} \quad [n]$$

Dans le cadre de la comparaison entre deux traces en 3D, chaque point dans une topographie doit avoir un correspondant dans l'autre. Pour chaque point dans une topographie, la distance

Euclidienne est calculée par rapport au point le plus proche dans l'autre topographie. Il en résulte donc un ensemble de distances Euclidiennes. Afin de pouvoir condenser l'ensemble de ces distances en une seule valeur, il est possible d'employer la moyenne ou la médiane sur la totalité des données. Avant de choisir les points les plus proches entre les deux traces, les deux traces sont découpées de manière à ce que les bords résultants correspondent à la zone de superposition des deux traces suite à leur projection sur le plan XY.

7.10.2 Distance Euclidienne Modifiée

Il s'agit d'une distance métrique basée sur la distance Euclidienne. La seule différence consiste dans le fait que, les valeurs des distances Euclidiennes inférieures à la médiane des toutes les distances, sont substituées par leur valeur au carré. Cette modification a été développée dans le but de donner plus d'importance aux petites distances. En effet, si deux points sont alignés correctement, leur distance sera petite et leur distance au carré le sera aussi. Par contre, si deux points ne sont pas alignés correctement, la distance au carré possèdera une valeur non négligeable.

7.10.3 Coefficient de Corrélation

Contrairement à la distance Euclidienne, qui est calculée à partir d'un nuage de points, le coefficient de corrélation nécessite deux images de même taille. C'est pour cette raison, qu'une fois alignées, les traces du percuteur en 3D viennent se projeter dans le plan XY afin de reproduire des images en deux dimensions. Le coefficient de corrélation C est défini par la formule suivante :

$$C = \frac{\sum_M \sum_N (A_{MN} - \bar{A})(B_{MN} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_M \sum_N (A_{MN} - \bar{A})^2\right)\left(\sum_M \sum_N (B_{MN} - \bar{B})^2\right)}} \quad [o]$$

Où A et B sont des images de taille NxM et \bar{A} et \bar{B} représentent les valeurs moyennes respectives. Etant donné que les traces représentent seulement une partie de l'image NxM, le coefficient de corrélation est calculé sur la totalité des points correspondants aux traces qui se superposent sur les deux images.

7.10.4 Vecteurs normaux – Angle entre deux vecteurs

Une autre métrique qui exploite les images des traces suite à l'alignement, se base sur la différence entre les vecteurs normaux. Les vecteurs normaux à la surface peuvent être calculés pour chaque pixel d'une image à partir des informations concernant les pixels voisins. Trois types de métriques peuvent être extrapolés en se basant sur la différence entre vecteurs normaux dans une image et les vecteurs correspondants dans l'autre :

- Une métrique peut être calculée en extrapolant la valeur médiane des angles entre vecteurs normaux. Ce type d'angle correspond à l'angle entre les deux vecteurs dans le plan décrit par ces derniers.

- Un vecteur normal peut être décrit également par ses angles φ et θ (cf. Section N°7.1 Concepts mathématiques de base). La médiane de la différence de ces valeurs dans les deux images donne lieu à deux autres métriques. A noter que la première se base sur l'élévation du vecteur (φ) et la deuxième sur l'azimut (θ).

La valeur médiane de la totalité des distances est souvent employée à la place de la somme ou de la moyenne. Cela est dû au fait que la médiane est plus robuste que la moyenne ou la somme des données face à la présence de valeurs extrêmes. Ensuite, la somme des données dépend fortement de la quantité des valeurs à disposition; cette quantité est liée à la forme de la trace et au taux de superposition de cette dernière avec l'autre trace. Il ne s'agit donc pas d'un critère qui peut être employé comme métrique.

7.11 Mise en évidence des traces

Dans le chapitre N°3, consacré aux traces laissées par une arme sur une douille, il a été possible de voir, que souvent, les traces laissées par le percuteur et la tête de culasse présentent des stries ou des imperfections en surface. Ces imperfections rendent le lien entre la douille et l'arme de plus en plus fort en fonction de la complexité de ces défauts. Il existe donc un intérêt particulier pour la mise en évidence de ces traces, ceci dans le but de pouvoir pondérer l'erreur métrique en fonction de la partie de la trace et, par conséquent, de pouvoir augmenter la distance, en termes numériques, entre les comparaisons de douilles tirées par la même arme et des armes différentes. A titre d'exemple, il serait possible d'assigner une double distance Euclidienne pour les points faisant partie d'une strie sur une trace laissée par la tête de culasse. Si la comparaison avait lieu entre deux douilles tirées par la même arme, les distances entre les deux stries alignées se trouveraient augmentées d'une manière limitée car les distances de départ sont relativement petites. Dans le cas contraire, où les douilles proviennent de sources différentes, l'augmentation serait plus conséquente car les distances de départ seraient plus importantes. Ce processus aurait donc comme résultat d'améliorer la discrimination.

Plusieurs tentatives ont été effectuées dans le but de détecter les stigmates laissées par une arme de manière automatique ou semi-automatique. Ces techniques n'ont pas été introduites dans le processus de comparaison car les essais effectués n'ont pas été exhaustifs et les résultats obtenus n'ont pas été assez satisfaisants. Des recherches devraient encore être menées dans ce sens. Les différentes techniques qui ont été testées sont toutefois présentées, selon la trace analysée, dans les paragraphes suivants.

Tête de culasse

Minima et maxima locaux

Les stries présentes sur une trace laissée par la tête de culasse présentent des parties en creux et d'autres en relief. Ces dernières peuvent être considérées comme des minima et des maxima locaux pour une direction donnée. La détection des stries est théoriquement possible en sélectionnant les maxima et/ou les minima dans l'image, dans une direction préalablement définie. Le choix de la direction est dicté par la direction dominante des stries laissées par la tête de culasse. Des paramètres pour définir correctement les minima ainsi que les maxima doivent être préalablement choisis. Ensuite, les maxima ou les minima sont détectés le long de la direction perpendiculaire à celle dictée par les stries de la tête de culasse (Figure 118).

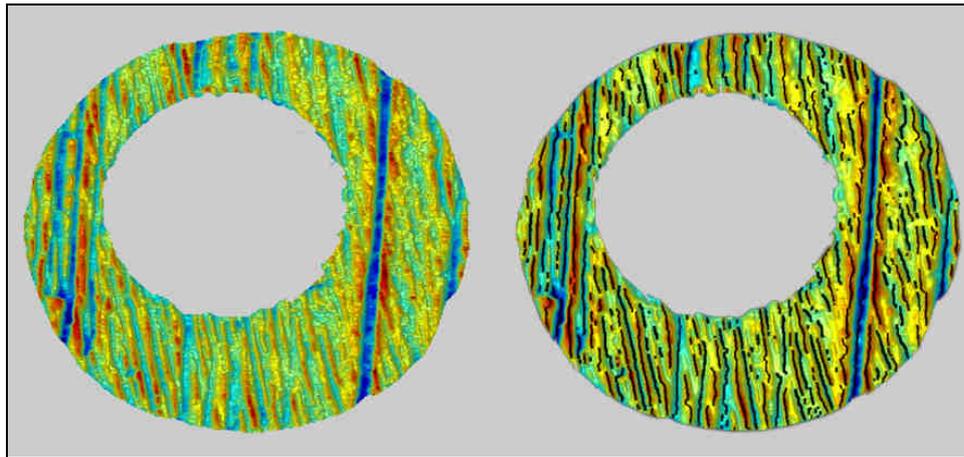


Figure 118

L'image de gauche une trace de la tête de culasse. L'image de droite représente la même image sur laquelle les minima et maxima locaux ont été détectés et mises en évidence par le biais de zones noires.

Il est évident que cet algorithme ne permet pas de différencier les minima et le maxima locaux liés à la trace ou ceux faisant partie du bruit de fond.

Réflexion spéculaire

Une technique exploitant les propriétés des vecteurs normaux a été également testée. Cette technique utilise une source de lumière virtuelle dirigée vers la mesure 3D. L'image résultante dépendra de la quantité de lumière qui est réfléchi de manière spéculaire perpendiculairement à la surface observée. Ensuite, il est possible de définir un seuil au-dessus duquel la valeur de réflexion est retenue et au-dessous duquel la réflexion est rejetée. Si la lumière provient perpendiculairement par rapport à la direction des stries, la plupart de la réflexion spéculaire proviendra des stigmates laissés par les stries de la tête de culasse (Figure 119). Dans le but d'enlever le bruit de fond résultant de cette opération, il est possible de d'éliminer toute partie, sélectionnées suite à ce procédé, ayant une taille considérée comme trop petite.

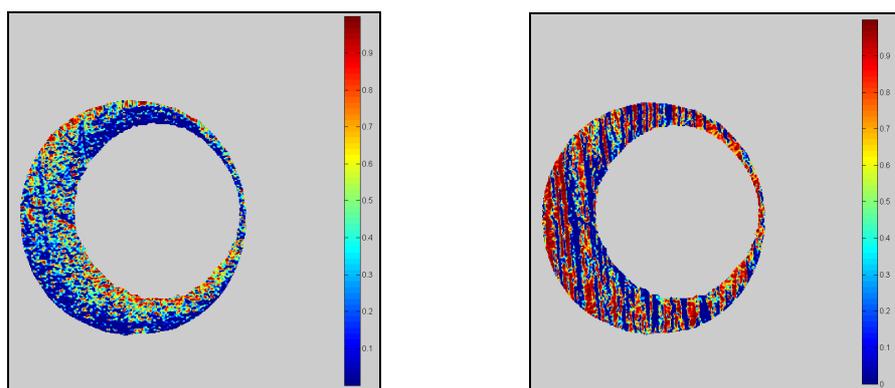


Figure 119

Réflexion spéculaire avec une lumière incidente parallèle aux stries (à gauche) et perpendiculaire aux stries (à droite). Les couleurs représentent la quantité de lumière réfléchi perpendiculairement par la trace.

Cette opération est effectuée généralement avec succès lorsque la source de lumière ainsi que le seuil sont gérés par un opérateur. Même s'il n'a pas été étudié en détail, l'approche automatique, se basant sur la connaissance préalable de la direction de la trace, n'a pas donné

les mêmes résultats que l'approche semi-automatique citée ci-dessus, lequel permet de gérer la source de lumière ainsi que l'ensemble des paramètres nécessaires. Ceci est principalement dû au fait que, certaines variables entrant en jeu pendant la sélection des stigmates sont difficilement généralisables et ne peuvent être gérés que par un contrôle visuel des résultats.

Sélection semi-automatique

Une interface graphique a également été développée pour permettre à l'utilisateur de sélectionner manuellement, à l'aide de segments, les stries composantes la trace de la tête de culasse. Suite à la sélection, un algorithme cherche à mettre en évidence les bords des stries en prenant des valeurs du gradient similaires aux valeurs décrits par les segments (Figure 120). De cette façon, la sélection d'une strie ne se limite pas à une simple ligne. Ainsi, les contours des stries peuvent également être pris en considération.

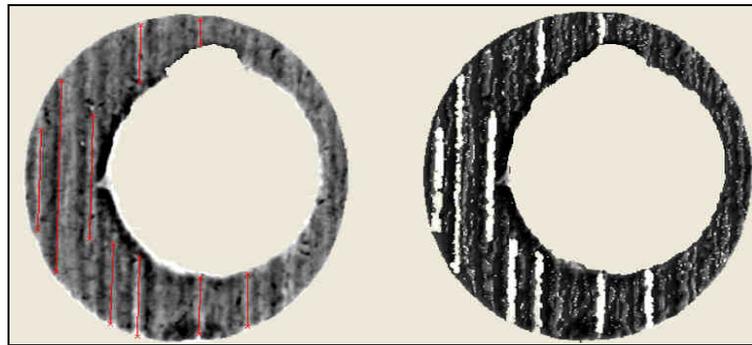


Figure 120

Sélection des stries (segments rouges - à gauche) et calcul des bords des stries (parties blanches - à droite).

Cette technique, possède le grand avantage de pouvoir considérer les stigmates laissés par l'arme en écartant le bruit de fond de la cartouche et les traces parasites, ce qui est plus difficile à faire avec un système complètement automatisé. En revanche, cette approche semi-automatique prend beaucoup de temps et reste une procédure fortement dépendante de l'utilisateur.

Percuteur

Minima et maxima locaux

Comme pour la trace de la tête de culasse, les minima et maxima locaux peuvent être employés pour détecter les stigmates laissés par le percuteur (Figure 121). La seule différence réside dans le fait que pour la trace du percuteur les extrêmes sont détectés dans les deux directions (X et Y).

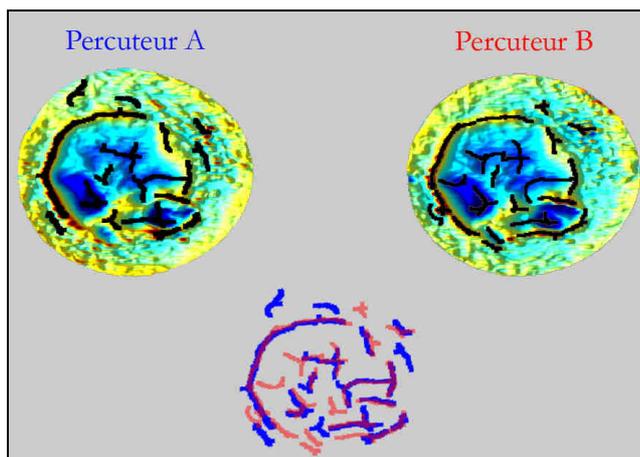


Figure 121

Comparaison des minima et maxima locaux pour deux traces du percuteur. La partie supérieure de l'image montre deux traces laissées par le même percuteur. Les minima et maxima locaux sont mis en évidence par le biais des points noirs. En bas, les extrêmes détectés sont comparés par superposition (couleur bleu pour la trace A et rouge pour la B).

Cette approche marche relativement bien avec des traces ayant des reliefs marqués. L'application sur des traces caractérisées par des formes relativement plates ne donne pas des résultats satisfaisant, et met plutôt en évidence le bruit de fond.

Sélection semi-automatique

Une approche semi-automatique a également été mise en place pour la trace du percuteur. Il s'agit de sélectionner un point dans la trace ; en fonction de certains paramètres choisis préalablement, tous les points adjacents ayant des valeurs de vecteurs normaux, de gradient ou de hauteur similaires sont sélectionnés. Pour certaines traces, et grâce au type de visualisation, il n'est pas évident de différencier les stigmates laissés par l'arme du reste de la trace.

7.12 Interfaces graphiques – GUI

Afin de pouvoir développer dans son entièreté le système de comparaison assistée par ordinateur, il a fallu mettre en place un ensemble d'interfaces graphiques, connues également sous le terme anglais de *Graphical User Interface*, abrégé GUI. Les GUI ont permis de tester différents paramètres et de choisir les plus adaptés pour la recherche en question. Tous les algorithmes ont pu, de cette façon, être essayés. Leurs faiblesses ainsi que leurs forces ont pu être mises en évidence. Ce genre de travail aurait été beaucoup plus contraignant sans l'utilisation des interfaces graphiques. C'est notamment le cas de l'ensemble des traitements préliminaires où l'emploi d'une GUI a permis de visualiser les résultats de chaque étape et, si cela s'avérait nécessaire, changer les paramètres respectifs.

7.13 Comparaisons multiples

Une fois les algorithmes choisis et assemblés, des interfaces graphiques ont été développées dans le but de lancer plusieurs comparaisons l'une après l'autre. Deux types d'interfaces ont été mis en place : la première permettant d'effectuer et de vérifier les prétraitements sur un

ensemble de mesures et la deuxième permettant de comparer les mesures entre elles. Cette dernière permet également, en passant d'une comparaison à l'autre, de vérifier les résultats numériques ainsi que visuels des différents alignements. Pour comparer ensemble plusieurs mesures, préalablement traitées, trois types d'interface graphique ont été développés :

- La comparaison d'une mesure, préalablement sélectionnée, avec un ensemble d'autres mesures.
- La comparaison d'un ensemble de mesures entre elles. Cette modalité permet d'effectuer des comparaisons selon toutes les combinaisons possibles dans le groupe. Pour un ensemble de N mesures, $((N - 1) * N) / 2$ comparaisons sont effectués.
- La comparaison d'un ensemble de N mesures avec un ensemble de M mesures. Chaque mesure d'un groupe est comparée à toutes les mesures de l'autre groupe, pour une totalité de $N * M$ comparaisons.

7.14 Rapport qualité – temps

Deux aspects importants doivent être pris en considération pendant la mise en place d'un système de comparaison de ce genre : la qualité des résultats d'une comparaison et le temps employé pour l'effectuer. Ces deux aspects sont souvent liés l'un à l'autre de manière proportionnelle, c'est à dire qu'un certain niveau de qualité nécessite également une certaine quantité de temps. Dans le cadre de cette recherche, contrairement à des développements à des fins commerciales, le temps n'est pas un facteur fondamental influençant de manière déterminante la structure et l'efficacité des algorithmes employés pour la comparaison. En effet, le but principal est de vérifier le potentiel de discrimination d'une technique de comparaison, sans pour autant la limiter à cause du temps investi, ce qui permet donc d'être plus efficace.

La phase qui regroupe toutes les étapes de prétraitement des données est relativement rapide ; contrairement à celle dédiée à la comparaison de la trace de la tête de culasse et de celle du percuteur qui prend plus de temps. A l'aide de l'ordinateur ayant les performances citées au début du chapitre, cette dernière phase nécessite entre une et deux minutes pour être accomplie.

7.15 Résumé du chapitre

Ce chapitre présente de manière systématique la totalité des procédés algorithmiques employés dans le cadre de ce travail. Les images obtenues à l'aide du profilomètre laser subissent tout d'abord un ensemble de traitements destiné à mettre en évidence les caractéristiques laissées par une arme sur une capsule d'amorçage lors du tir. Une fois ces caractéristiques isolées, un deuxième ensemble d'algorithmes a été proposé pour aligner les traces du percuteur ainsi que celles laissées par la tête de culasse. La trace du percuteur sera ainsi alignée à l'aide de l'algorithme ICP alors que celle de la tête de culasse sera alignée à l'aide d'un algorithme basé sur le principe d'optimisation. Enfin, des traitements mathématiques pouvant isoler les stigmates laissées par une arme ont été proposés.

8 METHODES D'ÉVALUATION DES RÉSULTATS

La présence de similitudes entre traces laissées par des armes différentes et de dissimilarités qui peuvent être observées en comparant des traces laissées par la même arme implique forcément l'existence d'une question statistique qui doit être affrontée afin de se guider quant à la source d'une trace [Schwartz, 2005]. En outre, il n'y a aucune base rationnelle ou scientifique permettant de formuler des conclusions à caractère absolu, telle qu'une identification, quelle que soit la branche des sciences de l'identification, comme par exemple les traces digitales, les armes à feu et les documents. Les conclusions d'identité reposent sur une hypothèse fondamentale, à savoir, que les traces laissées par deux armes différentes ne sont pas similaires au point d'entraîner un expert compétent à conclure à une source commune. Mais une hypothèse de ce genre ne peut pas être prouvée de manière absolue car la seule façon d'y arriver serait d'analyser toutes les combinaisons possibles de traces entre elles et de prouver que le taux d'erreur est inexistant ; tâche tout simplement irréalisable [Bunch, 2000]. Par conséquent, la question doit être abordée d'un point de vue probabiliste. Ainsi, afin d'interpréter les résultats d'une comparaison en tenant compte, en même temps, de la reproductibilité et de la rareté des traces laissées par une arme, un modèle interprétatif basé sur le rapport de vraisemblance sera employé dans le cadre de ce travail.

8.1 Le rapport de vraisemblance dans le domaine des armes à feu

Le rapport de vraisemblance, connu également sous le terme anglais de *Likelihood Ratio* (LR), est un outil de choix pour s'exprimer sur le poids d'un certain niveau de concordance entre deux traces. L'emploi du LR afin d'interpréter les résultats n'est pas une nouveauté et ses applications dans le domaine des sciences forensiques sont nombreuses. Malgré tout, ses applications dans le domaine de l'identification des armes à feu restent encore aujourd'hui peu exploitées. Formellement, le rapport de vraisemblance se présente de la façon suivante :

$$LR = \frac{Pr(E/H_p, I)}{Pr(E/H_d, I)} \quad [p]$$

Où H et E sont deux événements distincts et I représente les informations circonstancielles à disposition. D'un point de vue judiciaire, E peut être considéré comme l'indice (par exemple le résultat d'une comparaison entre une douille indiciaire et une douille de référence), et H comme une hypothèse donnée. Dans le cas présent les abréviations H_p et H_d représentent le jeu d'hypothèses admit ici, à savoir les hypothèses privilégiées respectivement par l'accusation et par la défense. Ces dernières peuvent, par exemple, être exprimées de la manière suivante :

- H_p : La douille indiciaire a été tirée par l'arme suspecte.
- H_d : La douille indiciaire n'a pas été tirée par l'arme suspecte mais par une autre arme³⁷.

³⁷ Sous réserve que l'expression « une autre arme » soit bien définie depuis le début. Cette expression implique forcément qu'une population potentielle d'armes ait été choisie préalablement. Cet aspect sera approfondi par la suite.

$\Pr(\mathbf{E} | H_p, \mathbf{I})$ est donc la probabilité que l'événement \mathbf{E} ait lieu en sachant que l'hypothèse H_p soit satisfaite et que les informations \mathbf{I} sont à disposition.

En ce qui concerne son application dans le domaine de l'identification des armes à feu, l'exemple suivant peut être pertinent. Admettons qu'une douille est retrouvée sur les lieux d'un crime où a eu un homicide. Pendant l'enquête, un pistolet semi-automatique CZ modèle 75 est séquestré chez un suspect. La douille indiciaire ainsi que l'arme sont transférées à un laboratoire spécialisé en armes à feu. Les experts de ce laboratoire procèdent à la réalisation de tirs de comparaison à l'aide de l'arme séquestrée en utilisant la même munition que celle employée lors du crime. La comparaison au niveau des caractéristiques de classe, à savoir la forme du percuteur et de la tête de culasse, etc. ne montre aucune différence entre la douille indiciaire et celles de comparaison (cf. Section N°3.3.3). Les observations effectuées sous le microscope comparateur mettent en évidence plusieurs concordances au niveau des *Shear Marks* et quelques similitudes au niveau des cercles concentriques présents à l'intérieur de la trace du percuteur. A cause de l'état de la douille, les autres traces ne peuvent pas être exploitées et dans ce cas elles ne peuvent pas être utilisées pendant le processus d'identification. Le raisonnement qui permet, dans ce cas, d'évaluer le rapport de vraisemblance est le suivant :

Soit \mathbf{E} le fait d'observer les concordances ainsi que les discordances entre la douille indiciaire et les douilles de comparaison. Il est possible de diviser l'événement \mathbf{E} en trois sous-événements \mathbf{E}_c , \mathbf{E}_s et \mathbf{E}_i . Ces trois sous-événements représentent l'observation des similitudes respectivement au niveau des caractéristiques de classe, de sous – classe et individuelles. Parce qu'il est parfois difficile de différencier correctement les caractéristiques individuelles des caractéristiques de sous – classe, aucune distinction n'est faite entre les deux ; le terme \mathbf{E}_{si} est donc employé à la place des termes \mathbf{E}_s et \mathbf{E}_i . Cette simplification est également adoptée car il serait difficile d'estimer séparément les paramètres relatifs aux deux types de caractéristiques.

Le jeu d'hypothèses peut être défini de la même façon qu'en début de paragraphe. Soit donc H_p l'hypothèse selon laquelle l'arme suspecte a tiré la douille indiciaire et H_d l'hypothèse alternative, à savoir l'hypothèse selon laquelle une arme, faisant partie de la population potentielle préalablement choisie et donc autre que celle séquestrée chez un suspect, a tiré la douille indiciaire. Il s'agit de l'hypothèse privilégiée par la défense.

Selon la formule ci-dessus ([p]), le LR fournit le rapport entre la probabilité d'observer les concordances entre la douille indiciaire et une douille de comparaison en sachant que la même arme a tiré les deux douilles ($\Pr(\mathbf{E} | H_p, \mathbf{I})$) et la probabilité d'observer ces concordances si les deux douilles ont été tirées par deux armes différentes ($\Pr(\mathbf{E} | H_d, \mathbf{I})$). À présent, l'élément \mathbf{E} considère à la fois le niveau de ressemblance entre la douille indiciaire et celle de comparaison dans sa totalité, à savoir au niveau des caractéristiques de classe, sous – classe et individuelles. Parce que l'événement \mathbf{E} peut être considéré comme la fusion des événements \mathbf{E}_c et \mathbf{E}_{si} , la formule ci-dessus évolue de la manière suivante :

$$LR = \frac{\Pr(\mathbf{E} | H_p, \mathbf{I})}{\Pr(\mathbf{E} | H_d, \mathbf{I})} = \frac{\overbrace{\Pr(\mathbf{E}_c | H_p, \mathbf{I})}^1}{\underbrace{\Pr(\mathbf{E}_c | H_d, \mathbf{I})}_2} \times \frac{\overbrace{\Pr(\mathbf{E}_{si} | H_p, \mathbf{E}_c, \mathbf{I})}^3}{\underbrace{\Pr(\mathbf{E}_{si} | H_d, \mathbf{E}_c, \mathbf{I})}_4} \quad [q]$$

- Le terme N°1 représente la probabilité d'observer une concordance au niveau des caractéristiques de classe sur la douille indiciaire et celle de comparaison en sachant

qu'elles ont été tirées par la même arme. Cette probabilité est normalement égale à 1 ou très proche de 1, car les caractéristiques de classe sont, sauf exception³⁸, reproduites fidèlement par la même arme.

- Le terme **N°2** estime la fréquence relative des caractéristiques de classe présentes sur la douille indicielle dans la population d'armes potentielles. Il est évident que ce terme est dépendant de la population choisie (cf. Section N° 9.2). Cette dernière est à son tour en relation avec la manière dont l'hypothèse H_d a été formulée.
- Le terme **N°3** peut être simplifié par le terme $\Pr(E_{si} | H_p, I)$ car l'hypothèse H_p implique les informations concernant la compatibilité des caractéristiques de classe. Cette simplification peut être effectuée grâce au fait que E_{si} est conditionnellement indépendant de $E_c | H_p$. Ce terme représente la probabilité d'observer ce genre de concordance entre les traces présentes sur la douille indicielle et celles sur la douille de comparaison, en sachant qu'elles ont été tirées par la même arme. Ce terme dépendra principalement de deux facteurs : le niveau de correspondance entre la douille indicielle et celle de comparaison ainsi que la reproductibilité des traces laissées par l'arme. La définition d'intravariabilité d'une arme peut donc être introduite ici. L'intravariabilité est une notion qui désigne la variation sur les traces que peut posséder une arme donnée. En effet, lorsque différents tirs sont effectués avec la même arme, il est possible d'observer des variances morphologiques d'une trace à l'autre. Ces variations peuvent être causées par plusieurs facteurs, comme, par exemple, les différences intervenant dans le processus de tir (pression, température, etc.), le temps écoulé entre un tir et l'autre, l'entretien de l'arme, la munition utilisée, la présence de dépôts de matière à l'intérieur de l'arme, etc. L'importance de ces variations peut se trouver plus prononcée pour un type d'arme que pour d'autres. Le terme **N°3** représente donc numériquement la reproductibilité des traces laissées par une arme donnée d'un tir à l'autre.
- Enfin, le terme **N°4** représente la probabilité d'observer une concordance entre la douille indicielle et celle de comparaison en sachant que la douille en question a été tirée par une autre arme provenant de la population d'intérêt. Il s'agit donc d'un terme représentant la probabilité de correspondance fortuite, qui dépend de la rareté des caractéristiques morphologiques des traces indiciaires dans la population potentielle. Ce paramètre implique l'introduction de la notion d'intervariabilité, qui désigne les résultats des observations effectuées entre des traces laissées par des armes distinctes. Il s'agit donc d'une distribution qui représente les différences et les similitudes qui peuvent être observées lors de la comparaison de douilles tirées par des armes différentes. En se référant aux concordances observées entre la douille indicielle et celles de comparaison au niveau des cercles concentriques dans la trace du percuteur, ce terme correspond à la probabilité de retrouver les cercles en question sur une autre arme faisant partie d'une population potentielle préalablement définie. La probabilité de correspondance fortuite dépend également du type de trace. Elle sera plus élevée pour les cercles dans la trace du percuteur, que pour les stries présentes sur des *Shear Marks* ; dans cet exemple, les stigmates présents dans la trace du percuteur, résultent être des caractéristiques moins rares. À noter également que le terme **N°4** est conditionnel par rapport à E_c , ce qui induit que la probabilité de correspondance fortuite doit être évaluée en accord avec les caractéristiques de classe. Il est donc impossible de l'évaluer en se basant sur des comparaisons entre douilles laissées par des armes n'ayant pas les mêmes caractéristiques de classe.

³⁸ Il pourrait être éventuellement le cas lorsqu'une munition sous-calibrée est employée.

8.1.1 Evaluation du rapport de vraisemblance

Une des critiques qui peut être apportée à l'approche basée sur le rapport de vraisemblance réside dans la difficulté d'assigner les probabilités nécessaires pour calculer le LR. Champod et al. en 2003 expliquent que, même si cette approche est probabiliste, elle n'est pas forcément gage d'objectivité et n'implique pas que son utilisation requière forcément une grande quantité de données pour pouvoir assigner des probabilités. Les probabilités employées dans cette approche peuvent donc être évalués subjectivement ou se baser sur des données quantitatives [Champod et al., 2003]. Il est donc envisageable qu'un expert évalue subjectivement les probabilités des différents paramètres de la formule développée ci-dessus ([q]) pour apprécier un rapport de vraisemblance et pouvoir ainsi s'exprimer sur la contribution d'une comparaison dans le cadre des hypothèses en examen.

Pour pouvoir calculer le LR à partir de données numériques, il faut évaluer les quatre termes de la formule [q]. Pour obtenir la valeur des deux premiers termes, il est possible d'estimer la fréquence des caractéristiques de classe à l'intérieur d'une base de données. La pertinence de la base de données dépendra de la population potentielle déterminée par le jeu des hypothèses en question. Par contre, en ce qui concerne les deux autres termes de l'équation [q], la quantification comporte un processus plus élaboré. Cela est dû au fait qu'avec les techniques de comparaison utilisées couramment, telles que la macroscopie de comparaison, il n'est pas possible de quantifier aisément les différences et les concordances entre deux traces. Pour pouvoir quantifier les termes N°3 et 4, il est nécessaire de définir une métrique pour décrire quantitativement les résultats d'une comparaison.

Bunch, en 2000, propose d'utiliser comme métrique le nombre maximal de CMS observé pendant une comparaison. Le nombre maximal de CMS observé pour des comparaisons entre munitions tirées par la même arme (KM – *Known match*) et par des armes différentes (KNM – *Known non match*) ont été collectés. Les probabilités d'observer un certain nombre de CMS sous les différentes hypothèses ont pu être évaluées en modélisant les données par deux lois de Poisson [Bunch, 2000].

Une procédure similaire a été proposée par Champod et al. en 2003. Cette dernière se base également sur le nombre maximal de CMS observé pendant une comparaison. Les difficultés, d'extrapoler la probabilité d'observer, pour un KNM, un nombre de CMS jamais observé auparavant, ont été résolues en diminuant d'un facteur 10 la probabilité pour chaque CMS additionnelle [Champod et al., 2003].

Une autre méthodologie pour évaluer le LR a été proposée par Buckleton et al. en 2005. Ce modèle, même s'il est discutable dans son fond puisqu'il se base sur une hypothèse d'indépendance entre les différents groupes de CMS, permet de calculer le LR à partir de tous les groupes de CMS observés pendant une comparaison, en ne se limitant pas au nombre maximal [Buckleton et al., 2005].

Neel et al., en 2007, ont recueilli une grande quantité de données relatifs au KM et KNM exprimés par le biais des CMS. Les données ont ensuite été modélisés par une loi exponentielle. Les probabilités d'observer un certain nombre de CMS sous les différentes hypothèses ont pu ainsi être évaluées [Neel et al., 2007].

Ainsi, tous les modèles proposés dans la littérature utilisent les CMS comme moyen pour quantifier une comparaison. Jusqu'à aujourd'hui aucun modèle pour calculer un rapport de vraisemblance n'a été proposé pour la comparaison des traces moulées.

8.1.2 Signification du rapport de vraisemblance

Les valeurs du LR peuvent, théoriquement, varier d'un minimum de zéro jusqu'à l'infini. Les valeurs inférieures à 1 signifient que les observations effectuées pendant la comparaison soutiennent l'hypothèse de la défense, alors que des valeurs supérieures à 1 soutiennent l'hypothèse alternative. L'indice reste neutre par rapport aux deux hypothèses si le LR est égal à 1. A titre d'exemple, un LR de 1000 signifie qu'il est 1000 fois plus probable d'observer un tel niveau de concordances (E) entre les douilles en question si elles ont été tirées par la même arme (H_p) plutôt que par deux armes différentes faisant partie de la population potentielle prise en considération (H_d).

Communiquer les résultats d'une comparaison sous forme numérique n'est pas toujours une solution de choix, surtout si le destinataire est un tribunal ou les membres du jury. En effet, ce n'est pas évident pour tout le monde de comprendre la signification d'un tel chiffre. Afin de pouvoir exprimer le résultat d'une comparaison d'une manière autre que numérique, des échelles de correspondances verbales ont été développées. Ces dernières permettent d'exprimer qualitativement une étendue numérique du rapport de vraisemblance. À chaque niveau de l'échelle verbale correspond un intervalle de valeurs numériques du LR. Par exemple, une échelle proposée à l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne est la suivante :

LR	
$> 10^6$	Extremely strong evidence to support H_p
10^5 to 10^6	Very strong evidence to support H_p
10^3 to 10^5	Strong evidence to support H_p
10^2 to 10^3	Moderate evidence to support H_p
>1 to 10^2	Limited evidence to support H_p
1	Inconclusive, the findings does not help to progress towards H_p or H_d
<1 to 10^{-3}	Evidence to support H_d
10^{-3} to 10^{-6}	Very strong evidence to support H_d
0	Exclusion

Figure 122

Echelle verbale proposée à l'Institut de Police Scientifique de l'Université de Lausanne. H_p représente l'hypothèse proposée par l'accusation alors que H_d celle de la défense.

8.1.3 L'importance de la population potentielle

La population potentielle utilisée pour évaluer le rapport de vraisemblance dépend strictement du jeu d'hypothèses. Le choix des hypothèses variera selon le contexte du cas et des informations circonstancielle à disposition. Par exemple, d'un point de vue théorique, si

aucune information circonstancielle n'est à disposition, la population potentielle pourrait être la population d'armes existantes dans un pays. D'autre part, il peut s'agir d'une affaire où, par ses circonstances, la population potentielle résulte limitée. Il pourrait s'agir notamment d'un accident de tir impliquant un nombre limité d'armes. Dans ce cas, la population est restreinte aux armes en question. Le choix des hypothèses ainsi que celui de la population potentielle influencent considérablement le rapport de vraisemblance. En effet, dans les exemples cités ci-dessous, la fréquence des caractéristiques de classe ainsi que la probabilité de correspondance fortuite dans les populations potentielles respectives peuvent être complètement changées.

Ici, dans le but de mieux comprendre l'influence de la population potentielle sur le rapport de vraisemblance, deux situations distinctes sont analysées par rapport aux différents paramètres employés pour obtenir un LR :

- Dans la première situation, une douille de calibre 9 mm Parabellum est retrouvée sur les lieux d'un meurtre. Une semaine plus tard, un suspect de nationalité suisse en possession d'une arme de calibre 9 mm Parabellum est arrêté dans la région par la police. Aucune information circonstancielle supplémentaire n'est disponible. La douille indiciaire correspond au niveau des caractéristiques de classe ainsi que des caractéristiques plus fines aux douilles tirées par l'arme du suspect. Dans ce cas de figure, la population potentielle peut être représentée par les armes des citoyens suisses. N'ayant pas à disposition une base de données qui collecte les caractéristiques de classe de telles armes (armes présentes en suisse), il est décidé d'utiliser une base de données répertoriant les caractéristiques de classe des armes pouvant tirer ce genre de munition impliquées dans des affaires criminelles. Le terme N°1 de l'équation [q] correspondra donc à 1 étant donné que le calibre ainsi que les caractéristiques de classe correspondent entre la douille indiciaire et celles de comparaison. Le terme N°2 correspondra à la fréquence des caractéristiques de classe dans la base de données en question. Le terme N°3 dépend principalement du niveau de correspondance entre la douille indiciaire et celle de comparaison ainsi que de la reproductibilité des traces laissées par l'arme suspecte. Enfin, le terme N°4 doit prendre en considération la probabilité de correspondance fortuite par rapport à des armes ayant les mêmes caractéristiques de classe, mais qui ne sont pas forcément fabriquées par le même fabricant ou qui ne sont pas du même modèle.
- Dans la deuxième situation, un accident de tir a lieu à l'intérieur d'une brigade de police pendant une session d'entraînement. Un instructeur est blessé par un projectile. Dix policiers ayant un pistolet SIG Sauer P228 calibre 9 mm Parabellum étaient présents lors des faits. Il s'agit donc de déterminer lequel des pistolets a tiré le projectile indiciaire. Dans ce cas de figure, le rapport entre les premiers deux termes de l'équation [q] équivaut à 1 car toutes les armes de la population potentielle possèdent les mêmes caractéristiques de classe. Le terme N°3 est obtenu de la même façon que dans l'exemple précédent. Enfin, la probabilité de correspondance fortuite relative au terme N°4, doit être appréciée en prenant en considération un nombre restreint d'armes de même modèle et probablement ayant des numéros de série relativement proches.

Les principales différences entre les deux exemples résident dans les termes N°2 et N°4. Dans le premier cas, le terme N°2 apportera des informations relatives à la rareté du type d'arme dans la population potentielle. Si l'arme est relativement rare, le LR relatif aux caractéristiques de classe peut prendre des valeurs d'une certaine importance, alors que dans le deuxième cas, les informations relatives aux caractéristiques de classe n'apportent aucun support à une ou l'autre hypothèse en jeu, car toutes les armes possèdent les mêmes

caractéristiques de classe. En ce qui concerne le terme N°4, dans le premier exemple la probabilité de correspondance fortuite sera théoriquement moins élevée que dans le deuxième cas, lequel prend en considération des armes qui par leur nature peuvent présenter entre elles un taux de similitudes plus important. Si l'on considère un même niveau de similitude entre la pièce indicielle et celles de comparaison et une même reproductibilité des traces de la part de l'arme suspecte, le rapport de vraisemblance du premier exemple pourrait être théoriquement plus élevé que celui du deuxième cas³⁹.

8.2 Quantification à l'aide d'un système de comparaison automatique

Dans le cadre de cette recherche, l'intention est d'assigner des rapports de vraisemblance à partir des résultats fournis par un système de comparaison automatique. A des fins de clarté, admettons que le système de comparaison automatique en question fournisse, pour décrire la comparaison entre deux traces, un seul score basé sur une erreur métrique déterminée. Ce score exprime numériquement la ressemblance entre les deux traces. Plus le score est petit, plus les traces possèdent des similitudes.

Les deux premiers termes de l'équation [q] peuvent être obtenus à l'aide d'une base de données comme cité dans la section N°8.1. Quantifier cette première partie de l'équation peut sembler relativement facile, mais il faut rester attentif au fait que le rapport entre ces deux termes dépend fortement de la population potentielle choisie car c'est cette dernière qui déterminera la fréquence des caractéristiques de classe. Un autre facteur parfois négligé est la pertinence de la base de données employée. Une fois la population potentielle définie, il faut également une base de données qui puisse la représenter correctement. Par exemple, en fonction du contexte, les bases de données d'un pays particulier ne pourront que difficilement être employées dans un autre pays où le « marché » des armes ou le type de crimes peut résulter différent.

La deuxième partie du rapport de vraisemblance peut apparaître comme particulièrement abstraite. Pour la quantifier, il est nécessaire de produire des données provenant respectivement de comparaisons entre douilles tirées par la même arme et entre douilles tirées par des armes différentes. Il s'agit donc d'informer des distributions de données représentant respectivement l'intravariabilité de l'arme ainsi que l'intervariabilité par rapport à une population potentielle préétablie. Admettons qu'une douille soit retrouvée sur les lieux d'un crime et qu'une arme soit séquestrée quelques jours plus tard. La procédure pour quantifier les termes N°3 et 4 de l'équation [q] nécessite principalement quatre étapes :

- A. L'obtention de valeurs relatives à l'intravariabilité de l'arme suspecte.
- B. L'obtention de valeurs relatives à l'intervariabilité par rapport à la population potentielle.
- C. La modélisation des distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité par des fonctions de probabilité.

³⁹ Dans une optique plus large, le rapport de vraisemblance peut éventuellement être combiné à des probabilités à priori relatives aux hypothèses en jeu afin de pouvoir calculer les probabilités à posteriori, à savoir, l'évolution des probabilités à priori suite à l'apport de la trace *E* représenté par le rapport de vraisemblance. Dans l'exemple ci-dessus, le rapport de vraisemblance du premier cas sera plus élevé que le deuxième, mais les probabilités à priori seront nettement moins élevées.

- D. Calcul des densités sous chaque hypothèse basé sur la valeur numérique résultant de la comparaison effective entre la douille indiciaire et celle de comparaison.
- A. L'intravariabilité de l'arme suspecte est estimée en comparant, avec le système automatique en question, les traces laissées sur plusieurs douilles tirées par cette arme. Les résultats de chaque comparaison donneront lieu à une distribution de données. La concentration des données autour d'une moyenne signifie que les traces laissées par la même arme ne diffèrent pas beaucoup l'une de l'autre. A contrario, si la distribution des valeurs des comparaisons obtenues est moins concentrée, cela signifie que les traces laissées par la même arme diffèrent entre elles, de manière plus ou moins prononcée.
- B. Pour l'intervariabilité, il faut prendre en considération les spécificités de la population potentielle. L'estimation de l'intervariabilité est effectuée en comparant des traces laissées par des armes différentes de ladite population. La distribution des valeurs issues des comparaisons représente donc l'intervariabilité et sera probablement plus étalée si des armes de fabricants et modèles différents sont prises en considération, par rapport à une distribution résultant d'un jeu d'armes du même modèle.
- C. Une fois que les données relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité ont été collectées, il faut modéliser les distributions des données par des fonctions de probabilité. Jusqu'à maintenant, les termes N°3 et N°4 de l'équation [q] représentaient des probabilités. Si les distributions obtenues sont modélisées statistiquement en utilisant des valeurs continues à la place des valeurs discrètes, des densités de probabilités sont alors employées pour estimer numériquement le rapport de vraisemblance. L'image ci-dessous montre les distributions relatives à l'intravariabilité (Figure 123 – bleu) et l'intervariabilité (Figure 123 – rouge). En utilisant les densités de probabilité, le rapport entre le terme N°3 et N°4 de l'équation [q] devient :

$$LR_{E_{si}/E_c} = p(d|H_p, I) / p(d|H_d, E_c, I) \quad [r]$$

Où d représente la distance mesurée par le système entre les deux traces. Il s'agit d'une valeur, pouvant également être appelé *score*, qui représente numériquement le niveau de ressemblance entre les traces.

- D. La comparaison entre la douille indiciaire et une douille de comparaison est décrite par un *score*. Admettons que dans le cas présent le *score* soit de 1,31. Afin d'estimer le rapport entre les densités de probabilités, qui équivaut au LR_{E_{si}/E_c} , il faut donc exploiter les points des deux distributions ayant une abscisse égale au *score* obtenu par la comparaison de la douille indiciaire et celle de comparaison, à savoir 1,31. Dans l'image ci-dessous, la flèche noire représente la densité de probabilité sous H_p (intravariabilité en bleu) et la flèche verte représente la densité de probabilité sous H_d (intervariabilité en rouge). Le rapport entre ces deux densités (Figure 123) correspond au rapport des probabilités d'observer ce *score*, en sachant que les deux douilles (indiciaire et comparaison) ont été tirées respectivement par la même arme ou par des armes différentes.

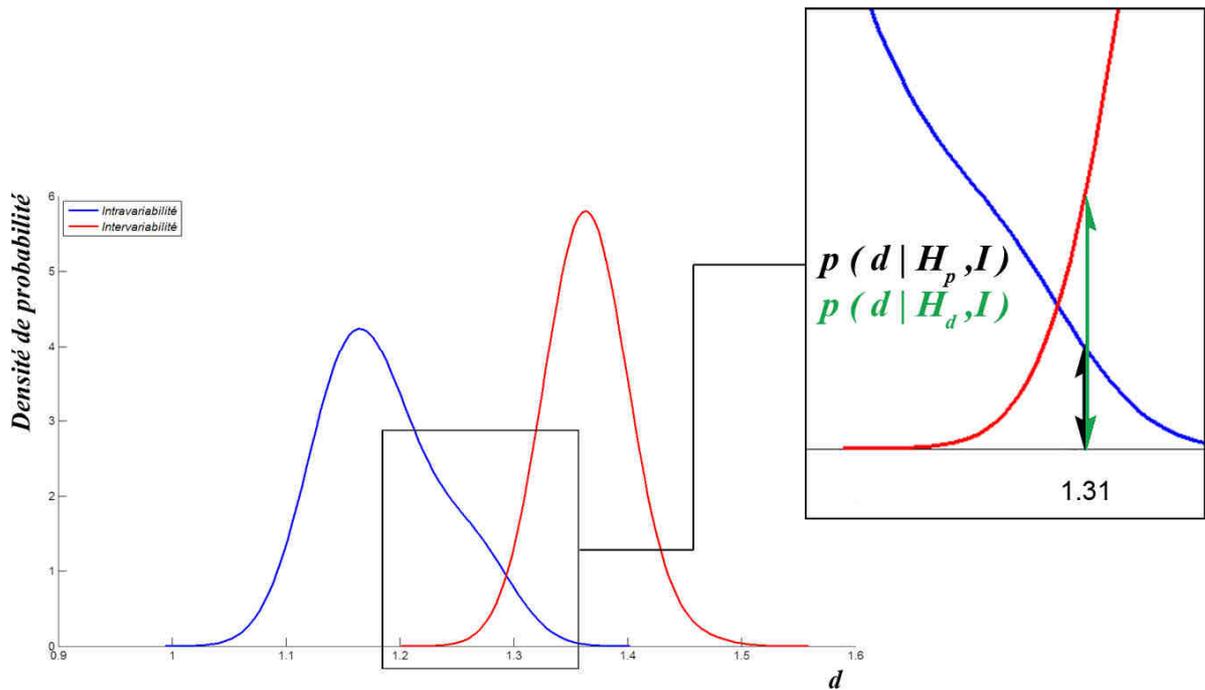


Figure 123

Graphique illustrant l'obtention du LR. La courbe bleue correspond à la modélisation de la distribution relative à l'intravariabilité et la courbe rouge à celle de l'intervariabilité. Le cadre noir représente simplement un agrandissement de la zone où les courbes se superposent et l'illustration des deux densités au point 1.31.

8.3 Calcul du rapport de vraisemblance dans le cas multidimensionnel

Dans le cas présent, si l'on considère toutes les métriques présentées dans la section N°7.9, chaque comparaison peut être décrite par six valeurs numériques⁴⁰. Il y a donc six valeurs pour la comparaison de la trace du percuteur et six autres pour celle de la trace de la tête de culasse. Il pourrait être envisageable de calculer des LR pour chaque *score*, mais cela signifierait que chaque trace soit décrite par six rapports de vraisemblance pouvant difficilement être combinés entre eux. Des procédures pour réduire les six variables en question ont été mises en place et sont décrites dans les paragraphes suivants.

8.3.1 Choix des scores pertinents

Les métriques employées ont été tout d'abord analysées du point de vue discriminatoire. Pour ce faire, le coefficient de discrimination a été employé. Le coefficient de discrimination **CD** est décrit de la manière suivante [Alexander et al., 2004] :

$$CD = \text{abs} |(\mu_A - \mu_B) / (\sigma_A + \sigma_B)| \quad [s]$$

⁴⁰ Les six métriques testées dans le cadre de ce travail sont les suivantes: distance Euclidienne, distance Euclidienne modifiée, indice de corrélation et trois autres métriques exploitant les vecteurs normaux à la surface. Des informations supplémentaires peuvent être trouvées à la section N°7.9.

où μ_A et μ_B sont respectivement les moyennes des distributions relatives à l'intravariabilité et l'intervariabilité et σ_A et σ_B représentent les écart-types des distributions en question. Plus la valeur de CD est élevée et plus la discrimination entre les deux distributions est jugée bonne.

Cette étape permet d'identifier les métriques peu discriminantes, à savoir celles qui présentent des valeurs de CD moins élevées, et qui n'ont par conséquent, que peu d'incidence sur la sélectivité de la méthode. Ces métriques seront donc écartées et ne seront plus utilisées pour la suite du travail.

8.3.2 Réduction des dimensions

Suite à l'élimination des *scores* les moins discriminants, une comparaison entre deux traces peut être décrite par un nombre plus restreint de valeurs numériques. Afin de pouvoir diminuer ultérieurement le nombre de dimensions, en affectant le moins possible la discrimination, la PCA (*Principal Component Analysis*) a été employée. La PCA, ou analyse en composante principale (ACP), possède plusieurs buts : détecter les axes principaux du set de données (composants principaux), rendre orthogonaux les composants des vecteurs de manière à ce qu'ils ne soient plus corrélés entre eux, trier dans un ordre décroissant les composantes principales de manière à ce que les premières soient celles ayant une plus grande variation dans les données et enfin éliminer les composantes qui contribuent le moins à la variabilité dans l'ensemble des données. De cette façon, il est possible de classer les axes principaux en fonction de leur variabilité. L'exemple suivant (Figure 124) montre une distribution de données (points noirs) en deux dimensions et permet une meilleure compréhension du concept. Les deux flèches (rouge et bleue) représentent les axes principaux du nuage de points détectés par la PCA. Les deux courbes représentent la distribution des données le long des axes respectifs.

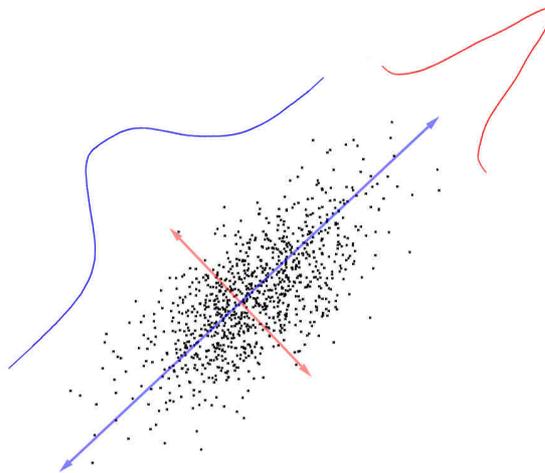


Figure 124

Analyse en composantes principales. Les courbes bleu et rouge représentent la distribution des points le long des axes principaux représentés respectivement par la flèche bleue et celle rouge.

Dans cet exemple, il est évident que l'axe permettant la meilleure discrimination entre les points est celui montrant une plus grande variance, à savoir l'axe bleu. Etant donné que la PCA permet d'orthogonaliser les composantes principales, le résultat se présente sous la forme d'un ensemble de points où les axes principaux sont parallèles aux deux axes cartésiens. Il est donc possible, en choisissant la composante principale ayant la variabilité la

plus prononcée et en écartant les autres axes, de réduire le nombre de dimensions. Dans cet exemple, il en résulte une distribution de points sur une seule dimension. La distribution de ces points sur l'axe retenu peut être observée dans l'image ci-dessous (Figure 125) en même temps sous la forme d'histogramme et d'une estimation non paramétrique de la densité de probabilité (*Kernel Density Estimation*, abrégé KDE).

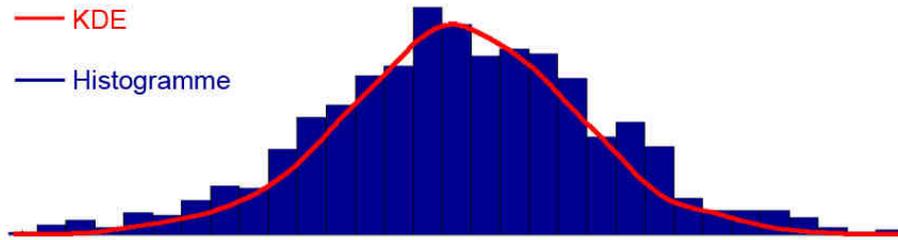


Figure 125

La fréquence des points a été visualisée sous la forme d'histogramme. La courbe rouge représente le KDE modélisant la densité de probabilité.

La PCA est employée, dans cet exemple, pour sélectionner l'axe principal le plus discriminant et pour écarter celui ayant la plus petite variabilité. Il en résulte donc un passage de points décrits par deux coordonnées à des données unidimensionnelles. Il est évident que l'application de la PCA peut avoir comme effet une diminution du pouvoir discriminatoire. Cette opération est quand même nécessaire afin de diminuer le nombre de dimensions qui, en grand nombre, empêche la gestion des résultats. Dans le cadre de ce travail, la PCA est appliquée à la totalité des points à disposition, c'est-à-dire aux points relatifs à la distribution de l'intravariabilité et à ceux faisant partie de l'intervariabilité en même temps. Les variables les moins discriminantes, à savoir celles qui présentent une variabilité moins prononcée, sont éliminées jusqu'à ce qu'il ne reste que les deux présentant une variabilité maximale. La suite de l'interprétation des résultats s'effectuera donc dans un espace bidimensionnel. Dans ce cas, le but principal reste la réduction du nombre de variables en minimisant la perte de discrimination sans par contre chercher à maximiser la distance entre les deux groupes, à savoir l'intravariabilité et l'intervariabilité. En effet, l'application de la PCA, contrairement à d'autres techniques telle que la LDA (*Linear Discriminant Analysis*), ne nécessite aucune information concernant l'appartenance des points à un groupe plutôt qu'à un autre. Les images suivantes montrent la réduction d'une variable pour trois *scores* décrivant les comparaisons des traces de la tête de culasse (Figure 126 et Figure 127).

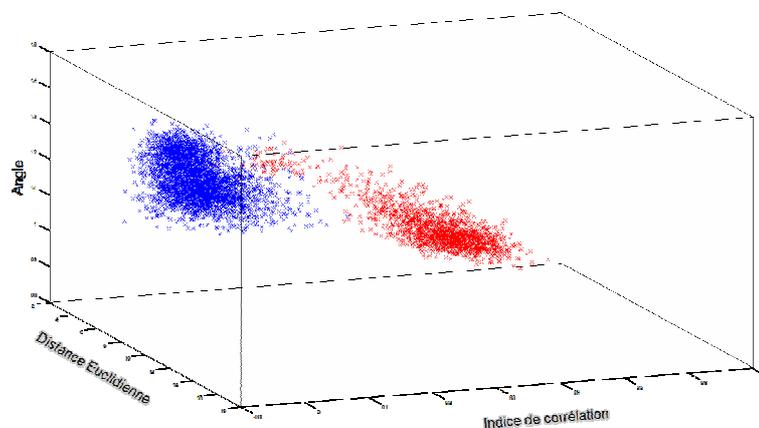


Figure 126

Visualisation des scores de l'intravariabilité (rouge) et de l'intervariabilité (bleu) en trois dimensions, avant que la PCA soit appliquée. Les trois scores représentent les trois dimensions : indice de corrélation, distance Euclidienne et angle entre vecteurs normaux.

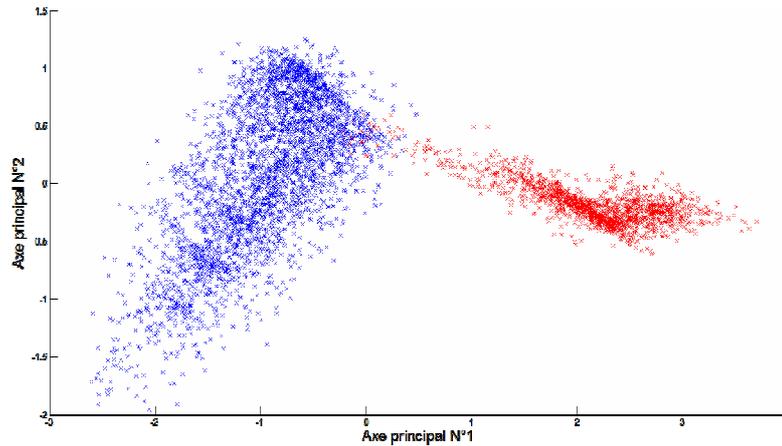


Figure 127
Les mêmes résultats en deux dimensions après application de la PCA.

8.3.3 Elimination des points aberrants

Pendant la comparaison entre deux traces, il est possible que l'alignement ne se fasse pas correctement ou que, pour des raisons non maîtrisées, les deux traces divergent au lieu de converger (cf. Section N°7.6.2). Le résultat d'une telle comparaison peut se présenter soit sous la forme d'un NaN (*Not a Number*) soit sous la forme de valeur aberrante n'ayant rien à voir avec les autres données collectées. En présence des NaN's, il suffit de les détecter et de les éliminer. Il en va de même en présence de valeurs aberrantes. Pour détecter ces dernières, les propriétés de la distance de Mahalanobis au carré ont été employées. La distance de Mahalanobis D_{M_i} qui se base sur la matrice de covariance, est décrite par la formule suivante :

$$D_{M_i} = (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}) \quad [t]$$

Où \mathbf{x}_i est un point faisant partie de la distribution en question, $\boldsymbol{\mu}$ est la moyenne de la totalité des points et \mathbf{C} la matrice de covariance. Pour une distribution normale bivariée, les valeurs correspondant aux distances de Mahalanobis suivent approximativement une loi chi-carré χ_p^2 avec p degrés de liberté, où p représente également le nombre de dimensions. Des points aberrants possèdent typiquement des distances de Mahalanobis élevées ; une comparaison avec la distribution chi-carré peut donc être effectuée pour les détecter. Pour fixer le seuil au-dessus duquel un point est considéré comme aberrant, un quantile (par exemple le quantile à 99%) de la distribution chi-carré est considéré [Filzmoser, 2005]. Au-dessus de cette valeur, les points sont rejetés. Ces points ne seront pas complètement éliminés ; ils se verront écartés pour la modélisation des données, mais seront employés plus tard, dans le processus d'évaluation (cf. Section N°8.4).

Suite à la réduction des scores et à la détection des points aberrants, il est nécessaire de modéliser les données à disposition afin de pouvoir extrapoler les densités de probabilités employées dans la quantification du rapport de vraisemblance. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été employées, elles sont décrites ci-après.

8.3.4 Modélisation non paramétrique - Kernel Density Estimation (KDE)

Le *Kernel Density Estimation*, connu également sous l'abréviation KDE, est une procédure non paramétrique permettant d'estimer la densité de probabilité d'une variable. L'utilisation du KDE permet ainsi d'extrapoler les données relatives à la densité de probabilité même lorsqu'aucune observation dans la population d'intérêt n'existe. L'image suivante montre de quelle manière une densité de probabilité bidimensionnelle peut être calculée à partir d'un ensemble de points décrits par deux variables (Figure 128).

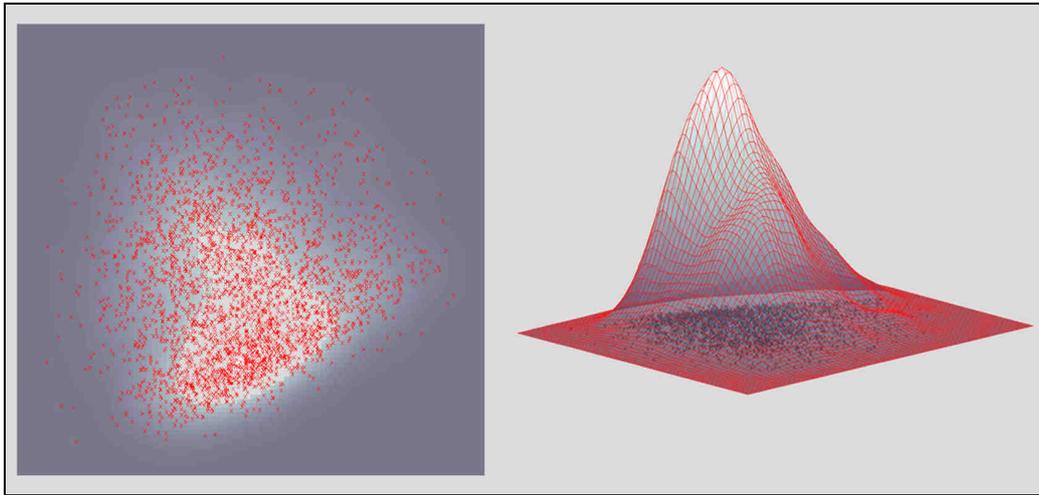


Figure 128

Distribution des points (en rouge) en deux dimensions avec la fonction de densité de probabilité en échelle de niveau de gris (à gauche) et la même distribution, représentée en trois dimensions, sous un autre point de vue (à droite).

Pour calculer le KDE d'une distribution bivariée, deux paramètres doivent être choisis. Le premier, connu sous la terminologie anglaise de *window width*, détermine l'importance du lissage qui sera appliqué au jeu de données. Le deuxième concerne les limites spatiales et la résolution sur lesquelles évaluer la densité de probabilité [Martinez et al., 2002]. Les images ci-dessous montrent l'influence du premier paramètre sur l'évaluation du KDE pour un même jeu de données et la même résolution du maillage (Figure 129).

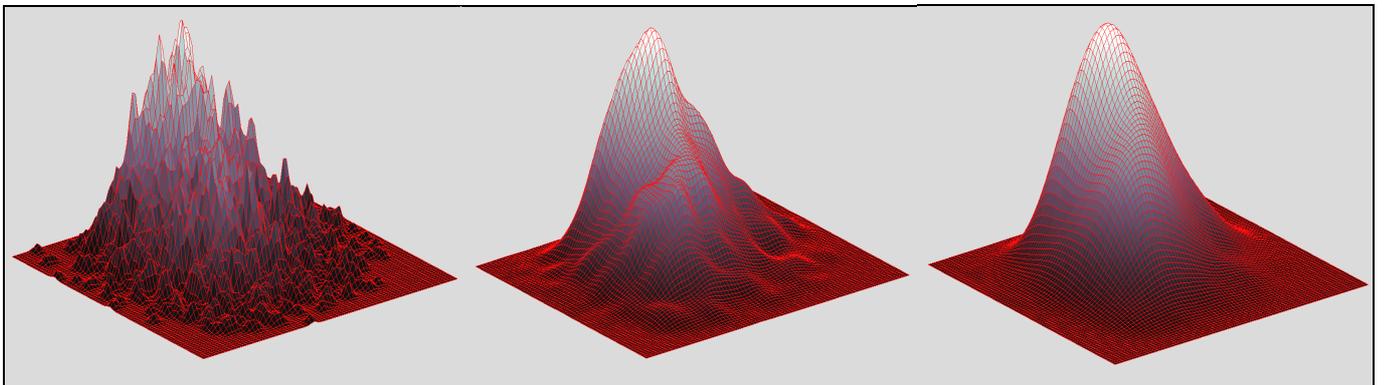


Figure 129

Images représentant trois KDE calculés avec différentes valeurs du *window width*, à savoir, de gauche à droite, de 3, 5 et 8.

La valeur du paramètre du lissage est estimée par une relation mathématique qui prend en considération simultanément la taille des données et la variance de ces dernières [Martinez et al., 2002]. La résolution du maillage utilisé pour calculer le KDE a été évaluée empiriquement à 100 x 100 points. Cette résolution permet de décrire la surface avec un nombre suffisant de points et, en même temps, de limiter le temps de calcul nécessaire pour obtenir le KDE.

8.3.5 Modélisations paramétriques

Le KDE est l'exemple typique d'une modélisation non paramétrique. Par opposition aux procédures non paramétriques, une modélisation paramétrique assume que les données en question proviennent d'une distribution statistique bien précise et permettent de faire des inférences sur les paramètres d'une telle distribution. Les modélisations paramétriques prises en considération dans ce travail sont la distribution normale et la distribution de Weibull.

Modéliser les données par des distributions paramétriques trouve son intérêt lorsque les observations à disposition sont limitées. S'il est connu préalablement qu'une loi paramétrique puisse modéliser correctement ce genre de données, il n'est plus nécessaire d'effectuer un grand nombre d'expérimentations pour obtenir une fonction de densité de probabilité représentative. Cette procédure reste particulièrement attrayante d'un point de vue plutôt opérationnel où la collecte de données n'est pas toujours aisée ou elle est soumise à des contraintes au niveau du temps à disposition.

Loi Normale Bivariée

La loi normale bivariée est une fonction qui est décrite par cinq variables, à savoir les moyennes (μ_1 et μ_2) et les écarts-types (σ_1 et σ_2) le long des deux dimensions ainsi que le coefficient de corrélation entre les deux variables (ρ). Si le coefficient de corrélation est égal à zéro, les variables ne sont pas corrélées ; elles sont donc indépendantes et les axes principaux de la distribution sont donc parallèles aux axes cartésiens. La fonction de densité de probabilité est décrite par la formule suivante [Balakrishnan et al., 2009] :

$$P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[\frac{-A}{2(1-\rho^2)}\right] \quad [u]$$

Où \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 représentent les coordonnées spatiales du point où la fonction de densité de probabilité est calculée et A représente un terme décrit par la formule suivante :

$$A = \frac{(\mathbf{x}_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{(\mathbf{x}_1 - \mu_1)(\mathbf{x}_2 - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(\mathbf{x}_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} \quad [v]$$

Une distribution peut donc être modélisée par une loi normale bivariée de la manière suivante (Figure 130).

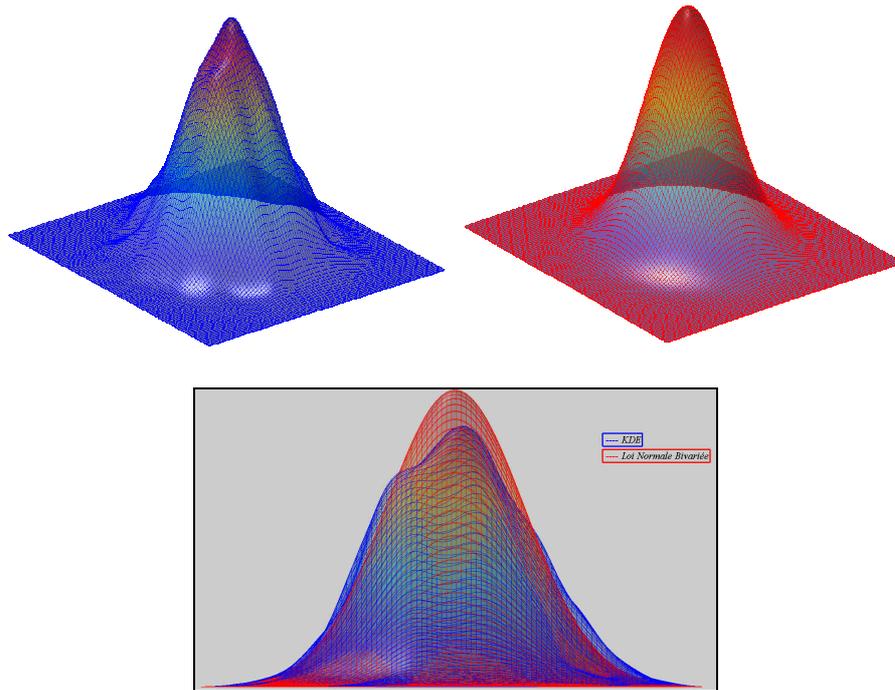


Figure 130

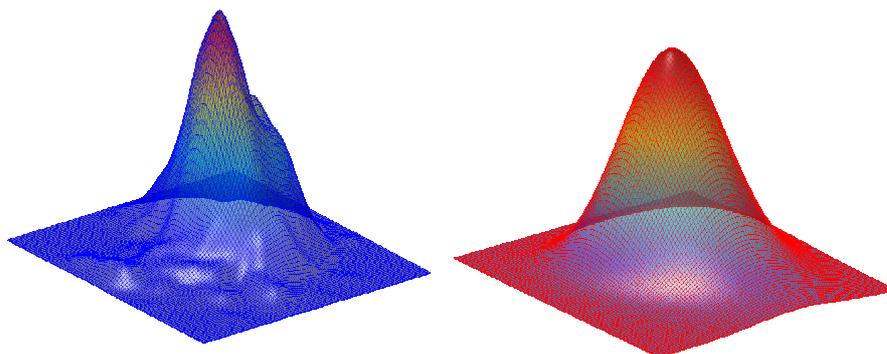
Représentation des distributions de données modélisées par KDE (bleu) et par une loi normale bivariée (rouge). Les images montrent les modélisations de manière distincte (en haut) et par superposition (en bas).

Weibull Bivariée

Une catégorie potentielle de distributions bivariées est représentée par l'ensemble des distributions Weibull bivariées (Figure 131). Il s'agit d'un ensemble de fonctions continues qui peut emprunter les caractéristiques d'autres types de distribution en fonction de certains facteurs de forme. Etant donné la complexité des principes mathématiques à la base de la distribution Weibull bivariée, la formule suivante, relative à la fonction de densité de probabilité, se réfère uniquement au cas unidimensionnel [Kundu et al., 2009] :

$$f(x, \alpha, \theta) = \alpha \theta x^{\alpha-1} e^{-\theta x^\alpha} \quad [w]$$

Où α et θ sont deux paramètres plus grands que zéro qui représentent respectivement le facteur de forme et d'échelle de la fonction. Dans le cas particulier d'une distribution bivariée, cinq paramètres doivent être évalués, à savoir les facteurs de forme et d'échelle pour les deux dimensions, ainsi que la corrélation entre les deux variables.



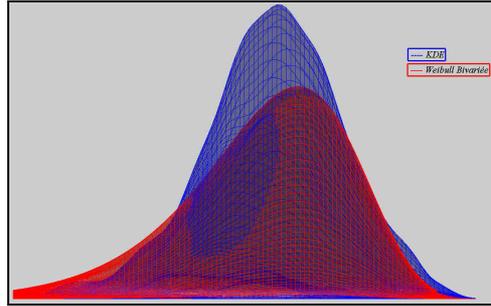


Figure 131

Représentation des distributions de données modélisées par KDE (bleu) et par une loi de Weibull (rouge). Les images montrent les modélisations de manière distincte (en haut) et par superposition (en bas).

Les codes utilisés pour modéliser la distribution de Weibull bivariée ont été obtenus dans la rubrique d'échange de dossiers mise à disposition par Mathworks⁴¹.

Autres distributions

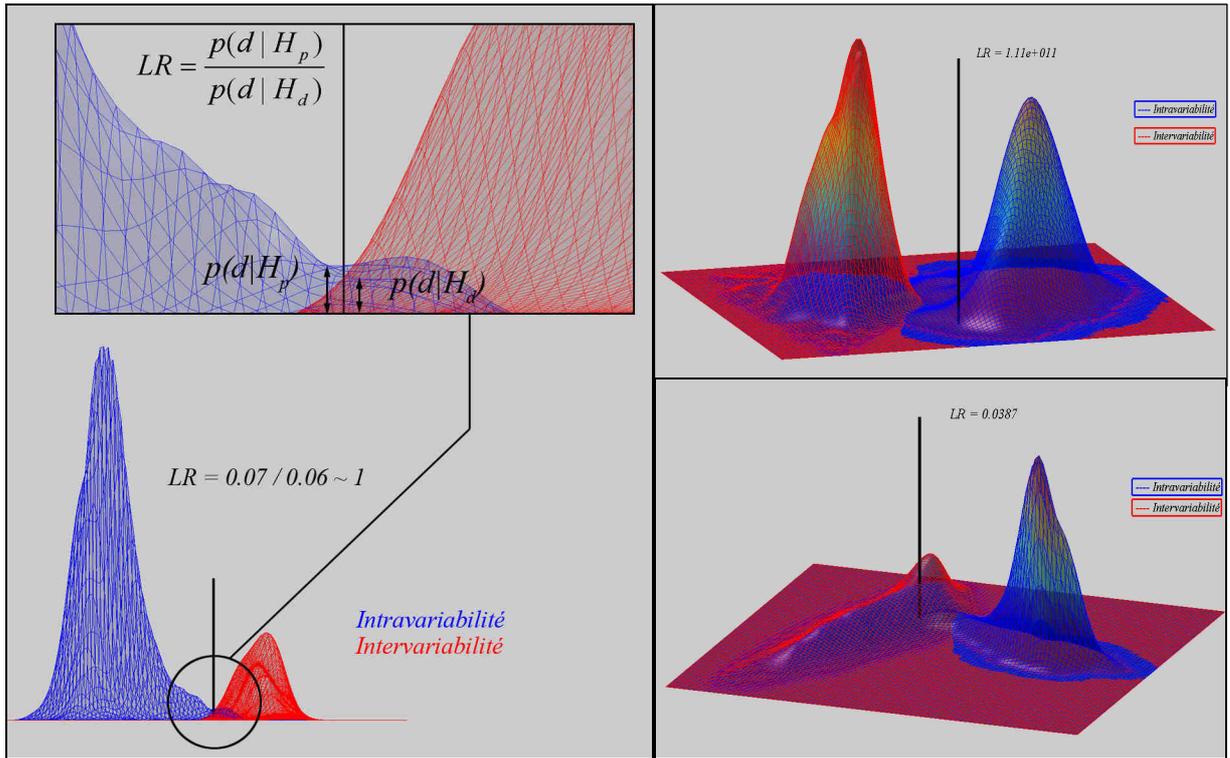
D'autres distributions bivariées qui n'ont pas été prises en considération dans le cadre de ce travail pourraient éventuellement être employées pour modéliser certaines distributions de points. La discussion concernant ce sujet peut être trouvée à la section N°11.3.2.

8.3.6 Calcul du rapport de vraisemblance dans le cas bivarié

Le calcul du rapport de vraisemblance dans le cas bivarié est soumis aux mêmes principes que dans le cas unidimensionnel. Quel que soit le type de modélisation, il s'agit de calculer le rapport des densités de probabilité pour les distributions relatives à l'intravariabilité et l'intervariabilité aux coordonnées spatiales (X et Y) correspondant aux *scores* dictés par la comparaison d'intérêt. Admettons que les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité aient été modélisées par le moyen d'un KDE. Une nouvelle comparaison est effectuée ; elle est décrite par un certain nombre⁴² de *scores* concernant les similitudes relatives au percuteur et autant de *scores* pour la tête de culasse. Avant de réduire le nombre de variables, il faut prendre en considération la transformation calculée par la PCA lorsqu'elle a été appliquée aux distributions de l'intravariabilité et l'intervariabilité. En effet, l'application de la PCA, avant que la modélisation des données ait lieu, implique non seulement une réduction du nombre de variables, mais également une transformation dans l'espace. La transformation calculée par la PCA devra donc être appliquée telle quelle aux *scores* résultant de la nouvelle comparaison avant d'effectuer la réduction des dimensions. Les deux *scores* qui résultent de cette opération peuvent être employés pour obtenir le rapport de vraisemblance à ces coordonnées spécifiques (Figure 132).

⁴¹ www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange – Dernière consultation effectuée en date du 22 avril 2010

⁴² Il s'agit des *scores* qui ont été jugés comme les plus discriminants selon les critères dictés par le coefficient de discrimination (cf. Section N°8.3.1).


Figure 132

Trois exemples d'obtention des rapports de vraisemblance. Les courbes bleues représentent les distributions de l'intravariabilité et celles rouges celles de l'intervariabilité. Le segment noir représente les coordonnées où le rapport de vraisemblance est calculé. La valeur du LR est indiquée à côté du segment.

Le même processus peut être effectué en appliquant aux données une modélisation paramétrique.

8.4 Evaluation de la technique par le biais du Tippett plot

Les performances du modèle mis en place peuvent être étudiées en observant les distributions des valeurs des rapports de vraisemblance résultant de cas simulés respectivement sous l'hypothèse de l'accusation (H_p) et celle de la défense (H_d). Pour ce faire, des comparaisons entre douilles de source connue sont effectuées. Des scores sont donc calculés à partir de comparaisons entre douilles provenant de la même source ainsi que pour des sources différentes ; les scores sont ensuite employés pour calculer les rapports de vraisemblance respectifs. Les distributions qui en résultent sont analysées au moyen d'un outil spécifique, appelé Tippett plot, qui présente graphiquement un moins la distribution cumulative pour les rapports de vraisemblance calculés sous H_p et ceux calculés sous H_d respectivement [Dessimoz et al., 2008]. Les Tippett plots se présentent sous forme de graphique ayant sur l'axe des abscisses les valeurs croissantes des rapports de vraisemblance (en échelle logarithmique) et sur l'axe des ordonnées la probabilité que le résultat d'une comparaison excède une valeur donnée de rapport de vraisemblance (Figure 133). Chaque représentation graphique présente deux courbes, la première rend compte de l'évolution des rapports de vraisemblance estimés lorsque la comparaison est effectuée entre deux douilles tirées par la même arme, alors que la seconde rend compte de la distribution des rapports de vraisemblance estimés lorsque l'on compare des douilles tirées par des armes différentes [Meuwly, 2001]. L'emploi des Tippett plots fournit une vue d'ensemble sur l'étendue des valeurs des rapports de vraisemblance. Ce mode de visualisation permet également d'étudier

le taux d'erreur forensique, à savoir le pourcentage des LR inférieurs à 1 lorsque H_p est vérifiée et le pourcentage des LR plus grands que 1 lorsque H_d est vérifiée. Les taux d'erreur forensique, connus également sous le terme anglais de *rate of misleading evidence*, sont définis de la manière suivante :

RMED: taux d'erreur en faveur de la défense. Il s'agit de la proportion des LR < 1 sur la totalité des LR évalués sous la proposition de l'accusation (H_p).

RMEP: taux d'erreur en faveur de l'accusation. Il s'agit de la proportion des LR > 1 sur la totalité des LR évalués sous la proposition de la défense (H_d).

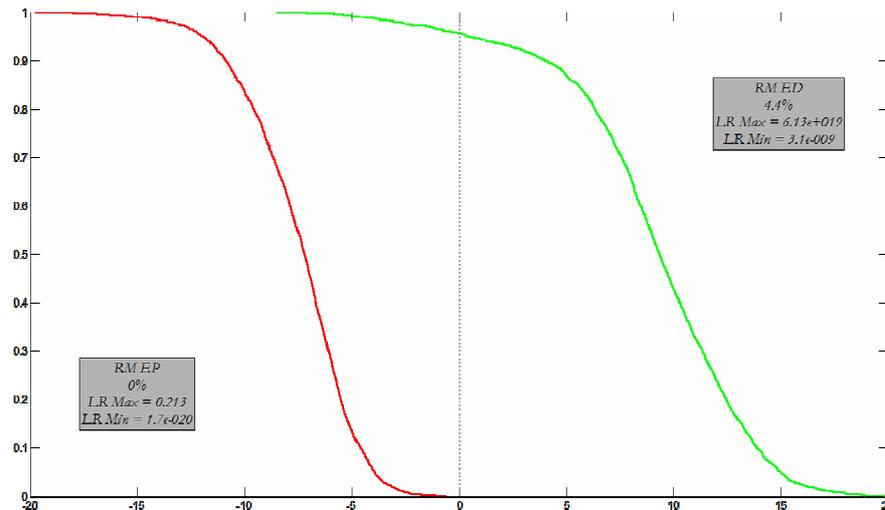


Figure 133

Exemple de Tippet plot. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses. Les courbes représentent l'évolution des LR respectivement lorsque H_d (rouge) et H_p (vert) sont vérifiées – RMED = 4.4% et RMEP = 0%.

Considérant que, dans un cas spécifique, le rapport de vraisemblance est une mesure de la contribution d'un indice à l'identité d'une source, le Tippet plot et les taux d'erreurs associés peuvent être considérés comme une mesure globale de l'efficacité du système de comparaison employé [Dessimoz et al., 2008]. Pour calculer la totalité des rapports de vraisemblance nécessaires pour établir le Tippet plot, la totalité des données employées pour construire les courbes relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité respectivement est utilisée. La procédure employée implique la réinsertion des points qui ont été préalablement considérés comme des valeurs aberrantes (cf. Section N°8.3.3). Ces valeurs, qui n'avaient pas été prises en compte pour la modélisation des données, sont donc récupérées pour calculer la totalité des rapports de vraisemblance nécessaire pour élaborer le Tippet plot. Le fait que ces valeurs aient été considérées comme aberrantes justifie leur rejet pendant la modélisation des données ; néanmoins, ces données représentent une partie des résultats. Elles doivent donc être prises en considération pendant la phase d'évaluation de la technique.

En revanche, aucune information particulière concernant le numérateur et le dénominateur ne peut être extrapolée à partir des Tippet plot. Malgré cela, il est quand même nécessaire d'étudier le comportement de certains points qui possèdent un numérateur et un dénominateur extrêmement petits. Il s'agit de comparaisons qui donneront lieu à un LR supérieur ou inférieur à 1, mais qui ont une position écartée par rapport à la moyenne des autres points. Dans ces cas particuliers, il sera possible d'observer des valeurs de densité de

probabilité extrêmement limitées au même temps sous H_p que sous H_d . Cela signifie donc qu'en réalité, malgré que le LR se penche vers une hypothèse plutôt que l'autre, les résultats ne privilégient pas forcément une hypothèse particulière. Ceci est simplement dû au fait que ces points se trouvent dans des zones des deux courbes régies par des valeurs extrêmes. La présence de ces points sera donc investiguée et prise en considération dans la suite du travail (cf. Section N°10.4.4).

8.5 Choix du type de modélisation

Les deux types de modélisation paramétriques, à savoir la loi normale et la distribution de Weibull, ont été testés afin d'évaluer laquelle pouvait être employée avec succès dans le cas présent. Les Tippett plots ont été employés comme balance afin de comparer les performances et les défauts des deux modélisations. D'un point de vue purement visuel, en prenant comme référence le KDE, il a été constaté que les deux distributions ne parviennent pas toujours à modéliser les données de manière complètement satisfaisante. Toutefois, les données sous-jacentes se prêtent mieux à une modélisation normale qu'à une distribution de Weibull (Figure 134).

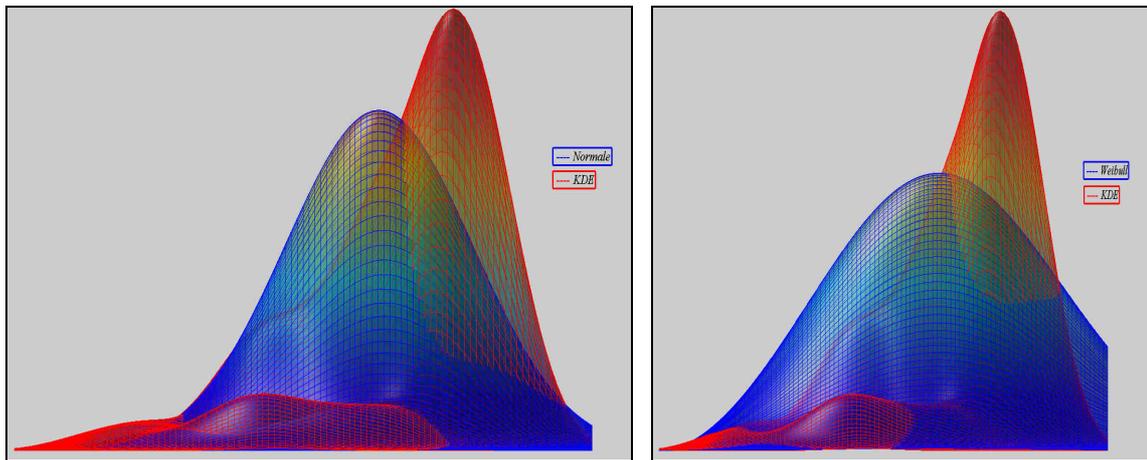


Figure 134

Le même KDE (rouge) modélisé par une loi normale (gauche) et par une distribution de Weibull (à droite).

L'analyse des Tippett plots corrobore la supériorité de la loi normale par rapport à la distribution de Weibull dans le cas en question (Figure 135). En effet, pour les mêmes distributions de données, la modélisation par une loi de Weibull résulte généralement en des taux d'erreur forensique plus élevés que ceux générés à l'aide d'une loi normale. En outre, le domaine de variation des rapports de vraisemblance, suite à la modélisation par une loi de Weibull, se révèle souvent trop important. Une telle ampleur s'avère difficile à justifier (cf. Section N° 11.3.3).

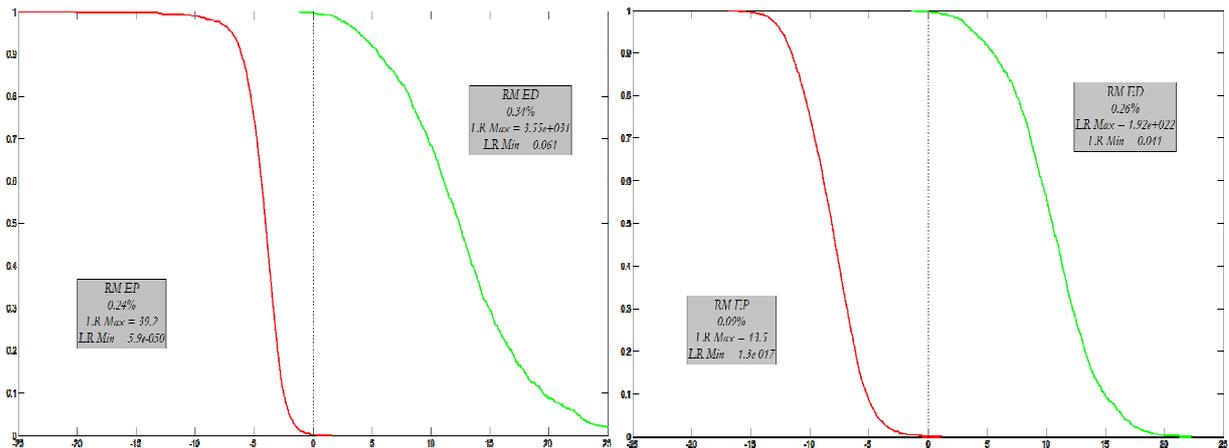


Figure 135

Tippet plots pour les mêmes distributions modélisées selon une loi de Weibull (à gauche – RMED = 0.34% et RMEP = 0.24%) et une loi normale (à droite – RMED = 0.26% et RMEP = 0.09%). L’axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l’axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d’observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l’axe des abscisses.

Suite à ces observations, les résultats seront modélisés à la fois à l’aide du KDE et d’une distribution normale bivariée. Le raison qui justifie le maintien de la modélisation non paramétrique réside dans le fait que les distributions de points peuvent se présenter sous des formes moins concentrées autour d’une moyenne. Travailler avec des modélisations non paramétriques, telles que le KDE, permet tout d’abord de se rendre compte de la qualité de la modélisation paramétrique et ensuite d’en étudier les conséquences sur l’évolution des Tippet plot.

8.6 Test de normalité – Le test de Mardia

Même si dans certains cas, il est évident que la distribution ne suit pas une loi normale, un test pour vérifier sa normalité est effectué chaque fois que des données sont modélisées de cette façon. Le test employé est un test de normalité multivariée connu sous le nom de test de Mardia. Le test de Mardia se base sur deux paramètres statistiques : le « skewness » et le « kurtosis ». Pour de grands échantillonnages, le premier paramètre doit suivre une loi chi-carré, alors que le second doit suivre une loi normale. L’emploi de quantiles permet donc de tester l’hypothèse de normalité bivariée [Mardia, 1970]. Dans le cadre de ce travail, le seuil pour rejeter l’hypothèse de normalité a été fixé à 0,05. L’acceptation du test est, entre autre, liée à la quantité des données à disposition. Des distributions composées par un faible nombre d’échantillons passent plus facilement le test qu’un ensemble de données de taille beaucoup plus importante.

8.7 Fusion des données

Des procédures permettant la fusion des données afin de pouvoir décrire les comparaisons relatives à la trace du percuteur et à celle de la tête culasse par un seul rapport de vraisemblance ont été mises en place. Ces deux méthodes sont décrites ci-dessous :

- La première prend en considération le fait que les traces du percuteur et celles laissées par la tête de culasse sont considérées comme deux événements indépendants. Cette

hypothèse est confortée, d'une part, par le processus de fabrication des deux pièces qui ne possèdent aucun point commun et, d'un autre part, par le fait que l'impression des deux traces n'est pas liée et qu'elle a lieu non seulement à deux moments différents pendant le tir, mais également selon deux processus complètement différents. De ce point de vue, il serait théoriquement justifié de multiplier les rapports de vraisemblance relatifs à la trace du percuteur et à celle de la tête de culasse afin de pouvoir extrapoler un seul LR pour l'ensemble des traces.

- La deuxième procédure exploite les capacités de la PCA afin de choisir les deux métriques montrant plus de variabilité parmi celles décrivant une comparaison des traces du percuteur et de la tête de culasse. La procédure est la même que celle employée dans la section N°8.3.2. La seule différence réside dans le nombre de dimensions initiales qui est deux fois plus grand étant donné que deux traces sont prises en considération simultanément.

Les résultats obtenus en employant ces deux procédures ont été comparés. Celle exploitant les principes de la PCA fournit de meilleurs résultats au niveau des taux d'erreur forensique. En effet, le taux de RMEP est parfois inférieur. En outre, les rapports de vraisemblance sont relativement plus modérés, alors que la technique multipliant les rapports de vraisemblance fournit souvent des valeurs très élevées, difficilement justifiables d'un point de vue statistique. Les résultats obtenus sous la forme de Tippett plot sont présentes ci-dessous (Figure 136 et Figure 137).

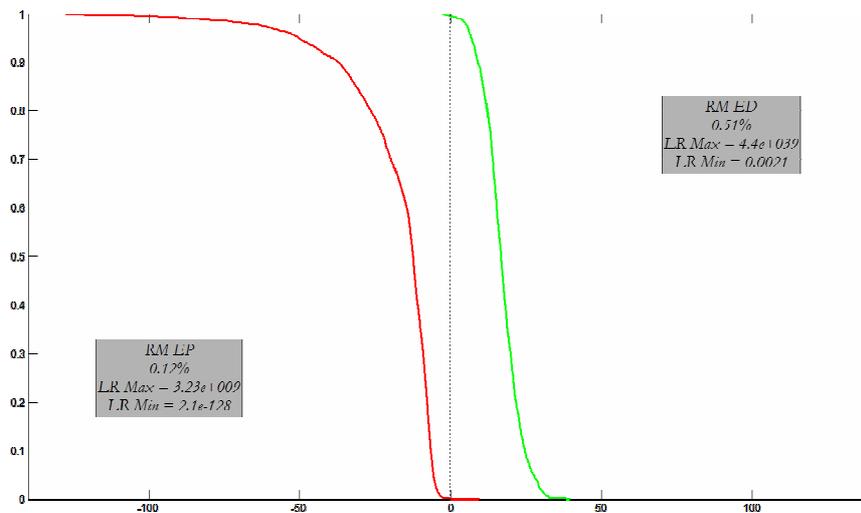


Figure 136

Tippett plot pour la multiplication des rapports de vraisemblance du percuteur et de la tête de culasse (RMED = 0.51%, RMEP = 0.12%, LR min = 2.1×10^{128} et LR max = 4.4×10^{39}). L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

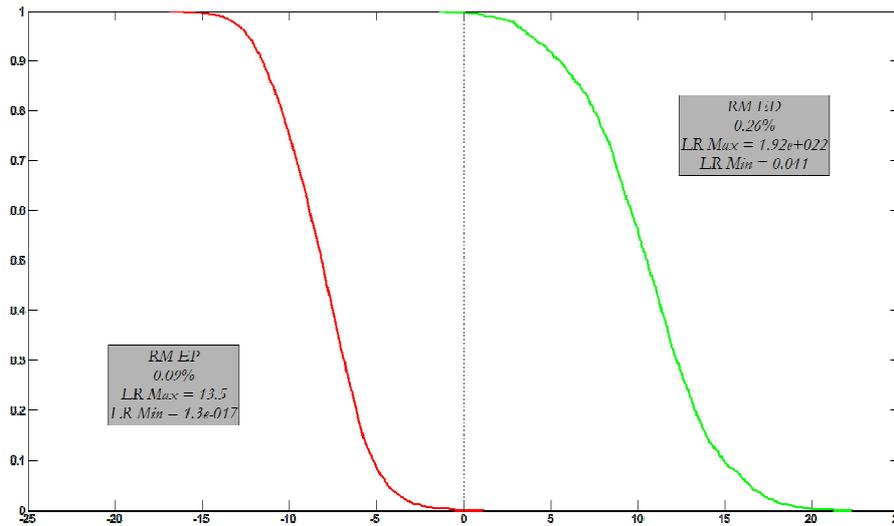


Figure 137

Tippet plot pour la fusion des traces au moyen de la PCA (RMED = 0.26%, RMEP = 0.09%, LR min = 1.3×10^{-17} et LR max = 1.92×10^{22}). L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Suite à ces observations, la fusion des *scores* des deux traces sera assurée, pour la suite du travail, par la méthode exploitant la PCA.

8.8 Résumé du chapitre

Ce chapitre se consacre au modèle interprétatif employé dans le cadre de cette recherche. Ce modèle a été conçu afin de calculer des rapports de vraisemblance à partir des données provenant du système de comparaison automatique décrit dans le chapitre précédent (cf. Chapitre 7). Pour ce faire, le nombre de *scores* fournis par le système est tout d'abord réduit en se basant sur le coefficient de discrimination. Le nombre de dimensions résultant est ultérieurement diminué au moyen de la PCA jusqu'à ce que chaque comparaison soit décrite par seulement deux valeurs. La procédure basée sur la PCA, permet en même temps de prendre en charge les données provenant des comparaisons de la trace du percuteur et de la tête de culasse de manière distincte ou de les fusionner pour calculer un seul LR. Afin d'extrapoler les densités de probabilité nécessaires pour calculer les rapports de vraisemblance, des fonctions continues non paramétriques, comme le KDE, ou paramétriques, telles que la loi normale bivariée, ont été employées. Enfin, une fois que le modèle pouvant calculer des LR a été mis en place, ses performances peuvent être évaluées par le moyen des Tippet plots.

9 ECHANTILLONNAGE ET MARCHE À SUIVRE

Dans le chapitre précédent, la notion de population potentielle a été introduite. Dans le cadre de l'évaluation d'une comparaison par le moyen du rapport de vraisemblance, la probabilité de correspondance fortuite⁴³ est un terme capital. Ce terme est strictement lié à la population potentielle à laquelle le cas en question se réfère.

9.1 Les populations potentielles

La probabilité de correspondance fortuite est hautement corrélée à la population potentielle en question. En effet, si la population d'intérêt est composée d'armes ayant seulement en commun le calibre nominal, la probabilité d'observer deux armes différentes qui impriment des traces si semblables qu'elles ne peuvent pas être différenciées est infime. Cette probabilité pourrait devenir nettement plus importante si le *pool* d'armes choisies était composé par des pistolets construits consécutivement dans une même fabrique. En fonction du cas, plusieurs populations d'armes différentes peuvent être envisagées. L'image ci-dessous illustre de manière hiérarchique certains cas de figure (Figure 138) :

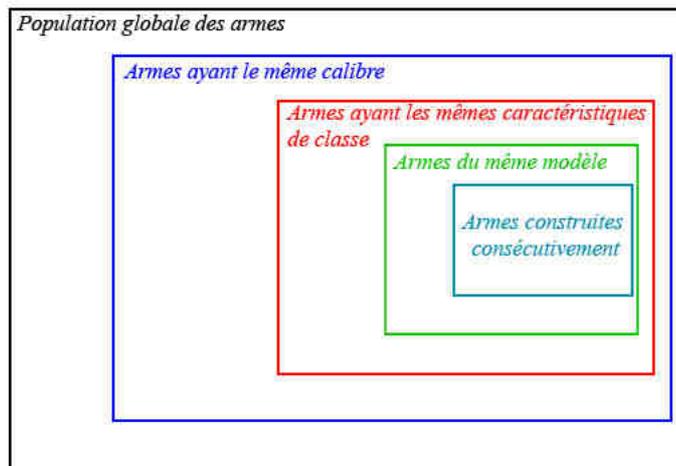


Figure 138

Schéma représentant hiérarchiquement différentes populations potentielles.

9.2 Choix de la population potentielle

Dans le cadre de cette recherche le choix de la population potentielle a été effectué principalement en fonction des contraintes liées à la disponibilité des armes. En effet, l'accès à des échantillonnages spécifiques ou de grande taille qui remplissent l'ensemble des besoins

⁴³ Dans le cas présent, l'expression « probabilité de correspondance fortuite » utilisée pour décrire le dénominateur du rapport de vraisemblance est inappropriée, car il ne s'agit pas d'une probabilité mais d'une densité de probabilité. Ce terme sera cependant occasionnellement employé dans ce chapitre afin d'en faciliter la lecture.

d'une telle recherche n'est pas évident. Dans le cas présent, trois échantillonnages ont été sélectionnés. Pour chaque échantillonnage pris de manière distincte, les armes présentent les mêmes caractéristiques de classe et font partie de plusieurs modèles similaires fabriqués, sauf exceptions, par le même fabricant.

Le choix de l'échantillonnage entraîne des répercussions non seulement d'un point de vue interprétatif, mais également d'un point de vue de mise en place du travail de recherche. Dans les prochains paragraphes, les contraintes pratiques liées aux différents types d'échantillonnage illustrés dans le schéma ci-dessus (Figure 138), ainsi que les conséquences découlant des différents choix seront discutés.

9.2.1 Population globale des armes

Ce type d'échantillonnage comprend une grande diversité d'armes. Dans ce type de population il peut y avoir des armes de différents calibres, de caractéristiques de classe différentes, mais également des armes de même modèle ou modèles similaires. Travailler sur un tel type d'échantillonnage est tout simplement irréaliste. La quantité d'armes différentes à inclure dans l'échantillonnage est énorme. En outre, les résultats seraient difficilement utilisables pour des cas spécifiques qui impliquent un nombre restreint d'armes ou des modèles particuliers. En effet, les données ne seraient pas représentatives des populations potentielles des cas en question.

9.2.2 Armes ayant le même calibre

L'emploi d'armes ayant le même calibre mais ne présentant pas les mêmes caractéristiques de classe n'est pas non plus un choix judicieux du point de vue de cette recherche. La raison est liée au modèle employé pour l'interprétation des résultats :

$$LR_{global} = LR_{Ec} \times LR_{Esi/Ec} \quad [x]$$

Le deuxième élément de cette formule ($LR_{Esi/Ec}$) met en évidence que le rapport des probabilités d'observer le résultat d'une comparaison entre deux douilles sachant que ces dernières ne possèdent pas les mêmes caractéristiques de classe n'a pas à être estimé. En effet, si la même arme a laissé les traces, les caractéristiques de classe devraient être les mêmes. En revanche, si l'arme est différente, il est inutile de connaître la probabilité de correspondance fortuite au niveau des caractéristiques de sous – classe et individuelles, si les caractéristiques de classe ne correspondent pas⁴⁴.

9.2.3 Armes ayant les mêmes caractéristiques de classe

Travailler sur un tel échantillonnage se justifie après examen de la formule ci-dessus [x]. En outre, le fait d'employer des armes ayant toutes les mêmes caractéristiques de classe implique que la première partie de la formule, à savoir le rapport de vraisemblance basé sur les caractéristiques de classe (LR_{Ec}), est égal à 1, car la fréquence des caractéristiques de classe

⁴⁴ Le même raisonnement peut être appliqué au cas de la section N°9.2.1 où des armes ayant des caractéristiques de classe différentes sont prises en considération.

dans la population en question est égale à 1⁴⁵. L'extrapolation du rapport de vraisemblance se base donc uniquement sur les caractéristiques de sous – classe et individuelles.

Malgré cela, évaluer la probabilité de correspondance fortuite pour une telle population potentielle implique parfois la comparaison entre traces morphologiquement très différentes. En effet, les traces laissées par des armes ayant les mêmes caractéristiques de classe ne possèdent pas forcément des similitudes au niveau des caractéristiques plus fines. En fonction du cas et de la manière avec laquelle la population potentielle a été sélectionnée, la probabilité de correspondance fortuite pourrait se trouver sous-évaluée. Cette population potentielle ne se prête donc pas forcément bien lorsque le nombre et les modèles d'armes impliqués dans une affaire sont relativement limités. En revanche, elle devient plus adaptée lorsque peu d'informations circonstanciées sont disponibles et donc lorsque la population potentielle reste sensiblement plus étendue. C'est notamment le cas du premier exemple de la section N°8.1.3.

9.2.4 Armes du même modèle

Il s'agit ici notamment du deuxième exemple de la section N°8.1.3 où les circonstances du cas permettent de restreindre la population potentielle à un *pool* d'armes de même modèle et donc ayant les mêmes caractéristiques de classe. Évaluer la probabilité de correspondance fortuite dans cette population potentielle signifie comparer des traces laissées par des armes de même modèle et donc fabriquées de la même façon. Il est donc probable que la probabilité de correspondance fortuite dans ce cas soit plus élevée que dans le cas précédent (cf. Section N°9.2.3). Un inconvénient de ce type de population potentielle est la généralisation des résultats. En effet, il est peu vraisemblable que les résultats obtenus pour un modèle et un fabriquant donné puissent être utilisés pour obtenir un LR dans un cas où une arme de n'importe quel autre modèle a été employée. Cette incompatibilité réside surtout dans la manière dont les armes sont fabriquées. Les différences morphologiques entre deux armes peuvent donc varier largement en fonction du modèle de l'arme. Dans un tel cas de figure, il faudrait vérifier l'applicabilité des données à disposition.

9.2.5 Armes construites consécutivement

Si l'on considère un des principes sur lequel le processus d'identification des armes est basé, à savoir, la sélectivité extrême des traces laissées par une arme, la population la plus adaptée pour tester de manière rigoureuse ce principe reste celle qui emploie un lot d'armes ayant des pièces construites consécutivement. En effet, ce type d'armes devrait, en fonction du mode de fabrication, posséder plusieurs similitudes morphologiques. Une étude sur une telle population permettrait de corroborer ou non ce principe.

D'un point de vue plus opérationnel, l'analyse d'armes dont une partie des constituants a été fabriquée consécutivement reste un cas de figure un peu particulier et assez isolé, car il n'est pas fréquent d'être confronté à un tel cas. De ce point de vue, l'emploi d'armes de même

⁴⁵ Dans ce cas de figure, il est sous-entendu qu'une population potentielle d'armes ayant les mêmes caractéristiques de classe est utilisée à la fois pour extrapoler le LR relatif aux caractéristiques de classe ainsi que pour celui relatif aux caractéristiques plus fines. Le LR_{Ec} peut être supérieur à 1 dans le cas où des populations potentielles différentes sont employées pour calculer les deux parties du LR. C'est notamment le cas où une population potentielle d'armes ayant des caractéristiques de classe différentes est utilisée pour calculer le LR_{Ec} et une autre population potentielle d'armes ayant les mêmes caractéristiques de classe est employée pour calculer le $LR_{Esi|Ec}$.

modèle ou d'armes similaires ayant les mêmes caractéristiques de classe semble être plus approprié. La même problématique concernant la généralisation des résultats discutée dans la section précédente (cf. Section N°9.2.4) peut être évoquée dans ce cas de figure.

En outre, un aspect ultérieur à prendre en considération est l'accès à ce type d'armes. En effet, l'accès à des armes ayant été fabriquées consécutivement n'est pas une chose aisée. Il s'agit d'échantillons qui doivent être fabriqués spécifiquement pour le cas en question. Il faut donc trouver des fabricants disposés à le faire. De plus, la quantité de pièces nécessaires à la constitution d'un échantillonnage suffisamment étendu peut avoir pour conséquence des prix particulièrement élevés.

9.3 Munitions employées

Plusieurs facteurs influencent la déposition d'une trace sur la surface d'une douille. Parmi eux, on trouve les caractéristiques liées à la nature de la cartouche, comme par exemple la pression développée, le poids du projectile et la dureté des matériaux composant la douille et la capsule d'amorçage. Ces paramètres sont à considérer lors du choix des munitions employées. Un autre paramètre, qui doit être pris en considération, concerne l'influence que peuvent avoir les inscriptions sur le culot de la douille et sur la capsule d'amorçage sur la déposition et l'analyse des traces. Sur de nombreuses munitions, des marques consécutives à la fabrication de la cartouche existent, surtout sur la capsule d'amorçage. Ces marques peuvent gêner l'analyse des traces laissées par l'arme. En effet, par leur nature, ces traces peuvent ressembler à des traces laissées par la tête de culasse [Tam, 2001 et Davis, 1958]. Enfin, il faudra vérifier que la composition de la munition ou les propriétés physiques des matériaux la composant n'interfèrent pas avec l'acquisition des données.

Selon ces critères, les munitions utilisées pour l'établissement de l'échantillonnage possèdent des capsules d'amorçage ne présentant ni logo ou inscription ni du vernis sur leur surface. En outre, les munitions sont équipées avec des capsules d'amorçage nickelées. Ce type de capsule d'amorçage présente les avantages de non seulement recueillir normalement bien les défauts transférés par l'arme, mais aussi de ne pas présenter de problèmes lors de l'acquisition des données.

9.4 Détails de l'échantillonnage

Trois types d'échantillonnages différents ont été employés pour cette recherche :

A. Le premier, qui est aussi le plus important en terme de taille, est composé des échantillons collectés par Jean-Michel Carrier, doctorant à l'IPS, dans le cadre de son travail de thèse. L'échantillonnage qui a été mis en place comporte des douilles provenant de 8 munitions différentes tirées par des pistolets semi-automatiques SIG Sauer 9 mm Parabellum appartenant à la police cantonale du canton de Vaud et à la police communale de Lausanne. Parmi ces armes, il y a des SIG P226, SIG P228 et SIG Pro. Il ne s'agit pas d'armes neuves provenant directement de la fabrique, mais d'armes en dotation aux aspirants de police qui sont, a priori, utilisées et entretenues régulièrement. Les détails concernant cet échantillonnage sont décrits ci-dessous :

- Les échantillons qui constituent l'intervariabilité sont composés de 84 douilles. Chaque douille est tirée par une arme différente, à savoir 79 armes provenant de

la police ainsi que deux SIG P220, deux SIG P226 et un SIG P228 supplémentaires. La munition employée pour les tirs est la munition Geco Sintox[®].

- En ce qui concerne la mise en place de l'intravariabilité, deux armes ont été employées. Pour chaque arme, 60 cartouches Geco Sintox[®] ont été tirées. En outre, afin d'étudier l'influence de la munition sur les résultats, 7 munitions différentes, en plus de la munition Geco Sintox[®], ont été tirées avec ces deux armes. Les munitions employées sont les suivantes : Geco[®], Fiocchi, Winchester, Magtech, UMC Remington, Sellier&Bellot et la munition 9 mm Para suisse fabriquée à Thun⁴⁶.
- De manière à simuler des cas d'un point de vue opérationnel⁴⁷, deux armes supplémentaires ont été employées pour tirer 60 cartouches Geco Sintox[®].

L'échantillonnage est schématisé dans la figure ci-dessous (Figure 139) :

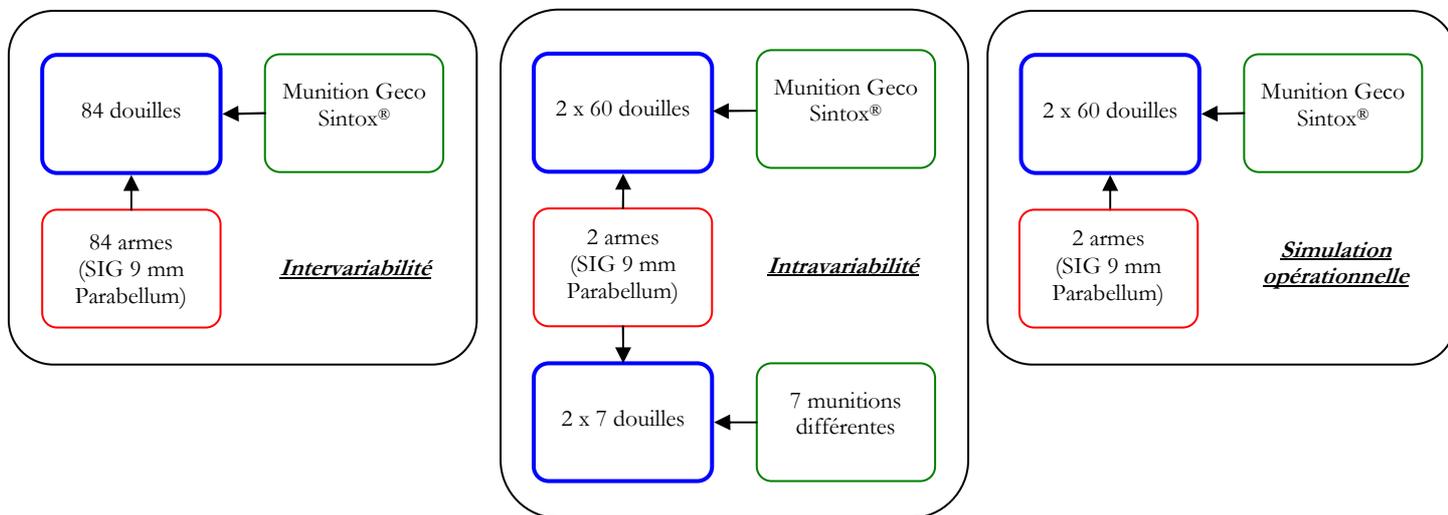


Figure 139

Schéma résumant l'échantillonnage A pour les armes SIG Sauer.

Les résultats relatifs à cet échantillonnage peuvent être consultés aux sections N°10.2.1, 10.3.1, 10.4.1, 10.5.1, 10.6.1, 10.7 et 10.8.

B. Le deuxième échantillonnage est composé de pistolets semi-automatiques Ceska Zbrojovka (CZ) modèles 75 et 85 (et variantes) de calibre 9 mm Parabellum. Les armes en question proviennent de la collection du NFI (*Nederlands Forensisch Instituut*). Il s'agit, dans la plupart des cas, d'armes séquestrées. Aucune information concernant l'entretien et l'histoire de l'arme ne sont disponibles. Les armes ne sont pas utilisées régulièrement au sein du laboratoire Hollandais. Les détails concernant cet échantillonnage sont décrits ci-dessous.

⁴⁶ Pour plus de détails concernant cet échantillonnage se référer à la section N°9.5.3.

⁴⁷ Pour plus de détails concernant cet échantillonnage se référer à la section N°9.5.4.

- Les échantillons qui constituent l'intervariabilité sont composés de 10 douilles. Chaque douille est tirée par une arme différente, à savoir 10 armes CZ modèles 75 et 85. La munition employée pour les tirs est la munition Dynamit Nobel.
- En ce qui concerne la mise en place de l'intravariabilité, deux armes de modèles 75 et 75 Auto ont été employées. Pour chaque arme, 20 cartouches Dynamit Nobel ont été tirées. Afin d'étudier l'influence de la munition sur les résultats, 6 munitions différentes, en plus de la munition Dynamit Nobel, ont été tirées avec ces deux armes. Les munitions employées sont les suivantes : Sellier & Bellot, Magtech, Fiocchi, Geco Sintox[®], Hirtenberger et Winchester.

L'échantillonnage est schématisé dans la figure ci-dessous (Figure 140) :

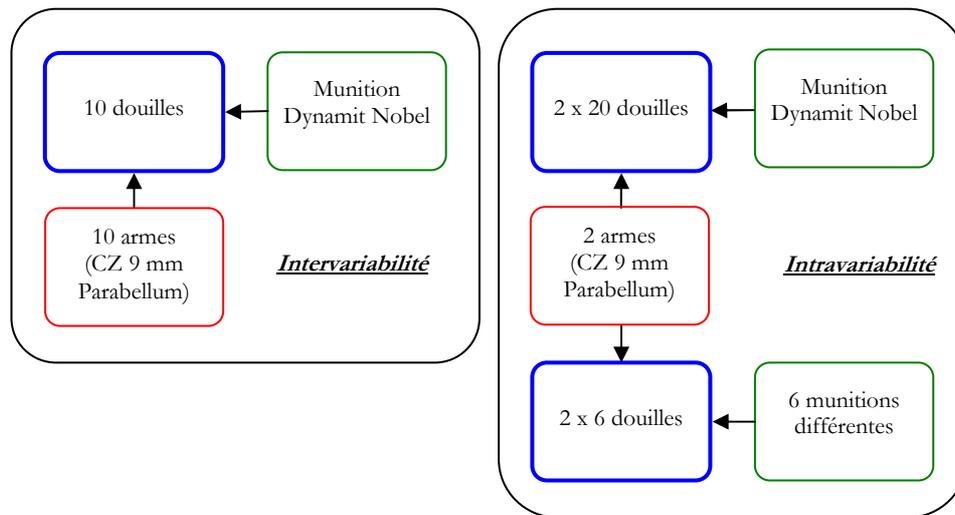


Figure 140

Schéma résumant l'échantillonnage B pour les armes CZ.

Les résultats relatifs à cet échantillonnage peuvent être consultés aux sections N°10.2.2, 10.3.2, 10.4.2, 10.5.2 et 10.6.2

C. Le troisième échantillonnage est composé par des pistolets semi-automatiques Walther, modèles PPK ou PP, et de pistolets Manurhin modèle PP de calibre 7.65 mm Browning⁴⁸. Les armes proviennent également dans ce cas de la collection du NFI. Les détails concernant la totalité de l'échantillonnage sont décrits ci-dessous :

- Les échantillons qui constituent l'intervariabilité sont composés de 8 douilles. Chaque douille est tirée par une arme différente, à savoir 8 armes Walther et Manurhin modèles PPK ou PP. La munition employée pour les tirs est la munition PMC.
- En ce qui concerne la mise en place de l'intravariabilité, un pistolet Walther PPK et un pistolet Manurhin PP ont été employés. Pour chaque arme, 20 cartouches PMC ont été tirées. En outre, afin d'étudier l'influence de la munition sur les résultats, 6 munitions différentes, en plus de la munition PMC, ont été tirées avec

⁴⁸ Pour des questions de clarté, dans le reste du document, lorsqu'il sera faite référence à cet échantillonnage, l'expression « armes de type PPK » sera employée.

ces deux armes. Les munitions employées sont les suivantes : Magtech, Fiocchi, Geco[®], Hirtenberger, Winchester et Norma.

L'échantillonnage est schématisé dans la figure ci-dessous (Figure 140) :

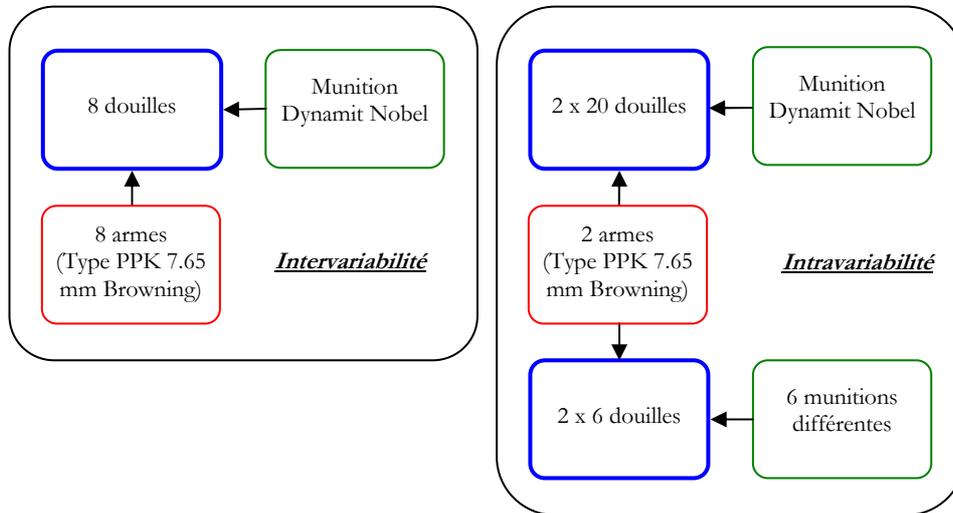


Figure 141

Schéma résumant l'échantillonnage C pour les armes de type PPK.

Les résultats relatifs à cet échantillonnage peuvent être consultés aux sections N°10.2.3, 10.3.3, 10.4.3, 10.5.3 et 10.6.3

Dans le cas des deux derniers échantillonnages (B et C), en raison du faible nombre d'armes à disposition, aucune arme n'a été sélectionnée pour simuler des cas d'un point de vue opérationnel.

9.4.1 Généralisation de l'intravariabilité

Pour chaque type d'échantillonnage (A, B et C), deux armes ont été sélectionnées avec lesquelles plusieurs cartouches de la même munition ont été tirées (60 pour les armes SIG et 20 pour les armes CZ et de type PPK). Les douilles résultantes sont employées afin de construire les distributions relatives à l'intravariabilité. Donc, pour chaque type d'échantillonnages, deux intravariabilités sont mises en place. Ceci a été réalisé de manière à, par la suite, comparer les deux distributions et observer s'il est éventuellement possible de généraliser l'intravariabilité d'une arme par le biais des données d'une autre arme dans les autres échantillonnages.

Cette information a un intérêt particulier d'un point de vue plutôt opérationnel où, généraliser l'intravariabilité signifierait pouvoir utiliser les données à disposition et ainsi ne pas devoir rebâtir l'ensemble des données, nécessaire pour modéliser la distribution, à partir de l'arme soumise en expertise.

9.4.2 Diversité des échantillonnages

La raison pour laquelle trois échantillonnages différents ont été collectés pour cette recherche, réside dans leur diversité du point de vue de la morphologie des traces (Figure 142). En effet, même si l'échantillonnage composé d'armes SIG Sauer est le plus important en terme de taille, les traces du percuteur laissées par ces armes sont souvent relativement lisses. Le fait d'employer des échantillonnages, tels que ceux composés par les armes CZ, Walther et Manurhin, permet de vérifier dans un premier temps le fonctionnement des algorithmes utilisés sur des traces ayant plus de relief, et dans un deuxième temps de voir de quelle manière la force indicielle évolue ou non si des traces laissées par des armes fabriquées par des procédés différents sont prises en considération.

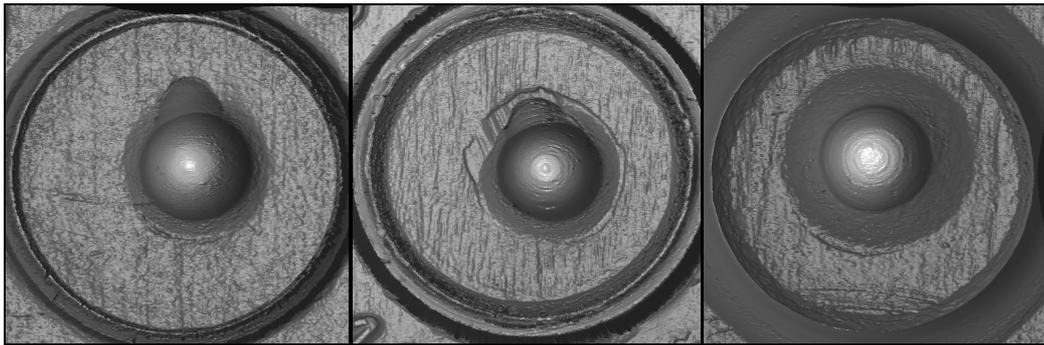


Figure 142

Image d'une structure tridimensionnelle de trois douilles tirées respectivement par un pistolet semi-automatique SIS Sauer, CZ et Walther.

9.5 Plan de travail

Les prochains paragraphes ont pour but d'expliquer la procédure adoptée pour la suite du travail ainsi que la manière dont les résultats seront présentés. Plusieurs procédures ont été mises en place pour construire les distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité, ainsi que pour calculer les Tippett plots. Les différences entre ces procédures résident dans la méthodologie utilisée pour calculer le LR, aussi bien que dans la quantité et le type de données employés pour le faire. En outre, des procédures ont été également mises en place, d'une part pour investiguer l'influence de la munition employée sur les résultats, et d'autre part pour tester d'éventuelles applications opérationnelles. Le travail effectué peut donc se résumer dans les quatre points suivants :

- Mise en place d'une intravariabilité et d'une intervariabilité définies comme « totales ». Cette définition implique que toutes les douilles tirées par la même arme sont employées et comparées entre elles pour construire la distribution relative à l'intravariabilité. Il en va de même pour les douilles tirées par des armes différentes lors de la construction de l'intervariabilité. Chaque comparaison donne ainsi lieu à un LR sous H_p ou H_d ⁴⁹. Ces derniers sont ensuite utilisés pour construire le Tippett plot (cf. Section N°9.5.1).

⁴⁹ L'expression « sous H_d » est utilisée, par exemple, pour définir une comparaison entre deux douilles d'origine connue, à savoir, dans ce cas, deux douilles tirées par la même arme.

- Une deuxième procédure, basée sur les échantillonnages à disposition, a été employée pour extrapoler les Tippett plots. Selon cette dernière, plusieurs simulations sont effectuées en utilisant les douilles à disposition. Dans ce cas, chaque douille faisant partie de l'intravariabilité est à son tour prise en considération comme une douille indiciaire. La particularité de ces simulations réside dans le fait que, contrairement au cas précédent (« intervariabilité totale »), la distribution de l'intervariabilité est bâtie en fonction de la douille indiciaire. Plus d'indications concernant cette procédure peuvent être consultées à la section N°9.5.2.
- Pour chaque arme employée pour construire la distribution de l'intravariabilité, des tirs ont également été effectués avec plusieurs munitions différentes. Ces douilles sont comparées entre elles. Les rapports de vraisemblance obtenus sont comparés aux LR obtenus lorsqu'une même munition est employée (cf. Section N°9.5.3).
- Des simulations sont également effectuées afin d'observer les résultats lorsqu'on s'éloigne légèrement du cadre de la recherche. Dans le reste du document ce genre de simulation est appelé « simulation d'un cas du point de vue opérationnel » (cf. Section N°9.5.4).

9.5.1 Intravariabilité et intervariabilité totales

La façon la plus simple de construire les distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité consiste à la comparaison de tous les échantillons entre eux. De cette manière, la distribution de l'intravariabilité prendra en considération les différences morphologiques entre traces laissées par la même arme dans sa totalité (sous réserve que le nombre des douilles soit suffisamment grand). De la même façon, lorsque toutes les douilles tirées par des armes différentes sont comparées entre elles, la probabilité de correspondance fortuite peut être évaluée pour la totalité de la population potentielle prise en considération.

Les douilles tirées par la même arme sont comparées entre elles selon toutes les combinaisons possibles. Il en va de même pour l'ensemble des douilles tirées par des armes différentes. Pour un groupe composé de x douilles, $(x^2 - x)/2$ comparaisons ainsi que $(x^2 - x)/2$ données sont donc disponibles (Figure 143). Cela implique que chaque échantillon est comparé avec les autres sans que la comparaison inverse ait lieu. En d'autres termes, si une douille A_i est comparée à une douille A_j (où A_i et A_j sont, par exemple, deux douilles tirées par la même arme), la comparaison inverse, à savoir celle entre A_j et A_i , n'aura pas lieu. L'emploi de cette procédure ne signifie pas forcément que comparer deux douilles dans les deux directions possibles donne des résultats identiques. Il en résulte donc que pour M douilles tirées par la même arme, il y aura $(M^2 - M)/2$ données représentant la distribution de l'intravariabilité. De la même façon, pour N douilles tirées par N armes différentes, il y aura $(N^2 - N)/2$ données représentant la distribution de l'intervariabilité (Figure 143). La totalité des résultats sera ensuite modélisée afin de pouvoir extrapoler les densités de probabilités nécessaires pour le calcul des LR.

Les Tippett plots sont construits en calculant les LR pour toutes les valeurs des comparaisons disponibles (Figure 143). Selon cette logique, les courbes du Tippett plot sont construites respectivement par $(M^2 - M)/2$ rapports de vraisemblance sous H_p et $(N^2 - N)/2$ rapports de vraisemblance sous H_d .

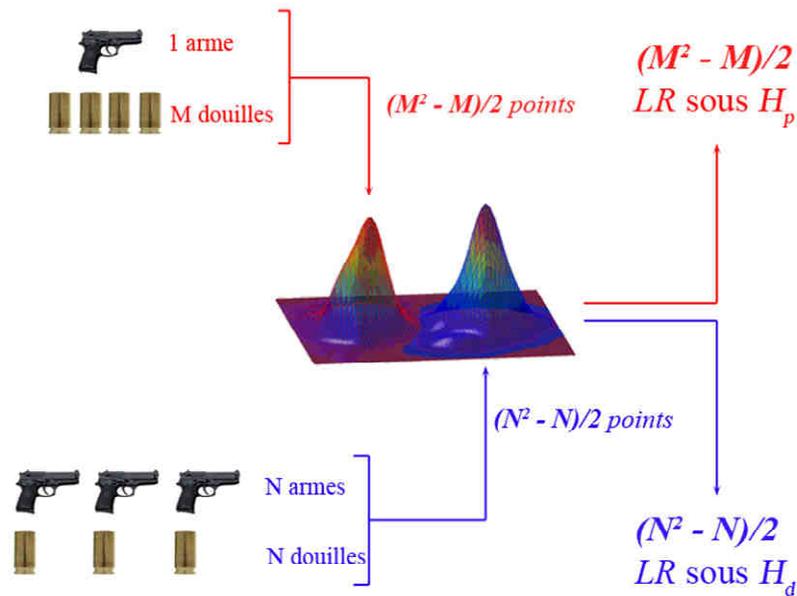


Figure 143

Processus employé pour construire les Tippett plots. Les données utilisées pour construire les distributions de l'intravariabilité (rouge) et l'intervariabilité (bleu) sont également employées pour l'obtention des LR destinés à l'établissement des Tippett plot.

La construction des deux distributions ainsi que du Tippett plot peut être effectuée aussi bien pour chaque douille dans son ensemble que pour les traces de la tête de culasse et celles du percuteur considérées séparément. Ceci permet de vérifier la contribution de chaque trace et pas seulement la combinaison des deux. Les résultats relatifs à cette procédure peuvent être consultés aux sections N°10.2, 10.3 et 10.4

Cette procédure permet d'apprécier l'efficacité générale de la méthode. L'observation des Tippett plots permettra d'apprécier la capacité de la technique à différencier des douilles tirées par des armes différentes et de mettre en relation les douilles connues pour être tirées par la même arme.

9.5.2 Simulation de cas forensiques

Une autre façon de concevoir la mise en place des Tippett plots consiste à la simulation de cas avec les données à disposition. Selon cette procédure, chaque douille faisant partie de l'intravariabilité est considérée, à son tour, comme une douille indiciaire. Admettons que A_1, A_2, \dots, A_M soient M douilles tirées par l'arme suspecte A et que B, C, D, \dots soient N douilles tirées toutes par des armes différentes, mais présentant les mêmes caractéristiques de classe que l'arme A . Les rapports de vraisemblance destinés à construire le Tippett plot sont calculés pour chaque hypothèse (H_p et H_d) de la manière suivante :

Sous H_p , chaque comparaison a lieu entre une douille indiciaire A_i tirée par A et une douille de comparaison A_c tirée par la même arme. La distribution de l'intravariabilité est remodelée⁵⁰ à chaque fois en comparant entre elles un nombre limité de douilles de comparaison faisant partie des M douilles tirées par A . Dans le cas présent, ce nombre a été empiriquement fixé à

⁵⁰ Toute modélisation qui a lieu dans le cadre des simulations de cas forensiques sera effectuée uniquement au moyen de la loi normale bivariée.

7. L'intérêt de limiter les douilles de comparaison à un sous-ensemble de 7 douilles réside dans le fait que dans des cas réels, le nombre de douilles pouvant être collecté pour bâtir l'intravariabilité reste limité à cause des contraintes liées au temps à disposition. Une intravariabilité créée à partir de 7 douilles semble être un bon compromis entre le temps employé et la quantité de données à disposition.

Parmi ces 7 douilles il y a 6 douilles sélectionnées par un processus randomisé ainsi que la douille indiciaire A_i , qui sous H_p est considérée comme tirée par l'arme A . Il en résulte une distribution de l'intravariabilité formée par 21 données, à savoir les 21 résultats des comparaisons qui ont lieu entre les 7 douilles en question ($[(7^2 - 7) / 2 = 21]$ – Figure 144).

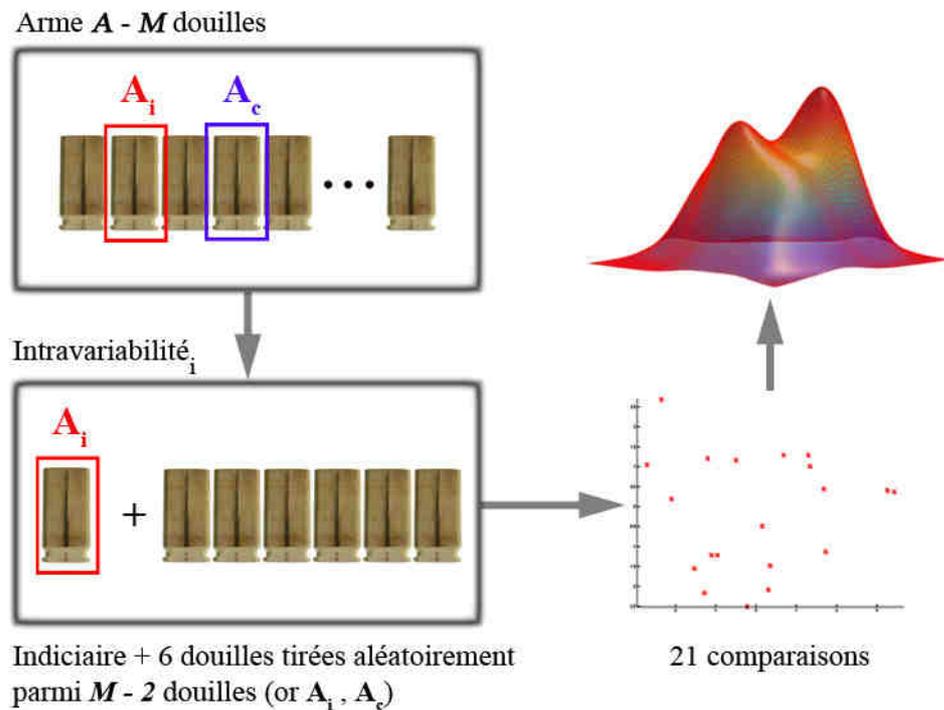


Figure 144

Processus employé pour modéliser la distribution relative à l'intravariabilité. 6 douilles prises au hasard dans les M douilles tirées par l'arme A ainsi que la douille indiciaire A_i sont comparées entre elles. Les résultats des comparaisons sont utilisés pour modéliser la distribution relative à l'intravariabilité.

La distribution de l'intervariabilité quant à elle, pour chaque comparaison entre A_i et A_c , est modélisée en utilisant les valeurs résultantes des comparaisons entre la douille indiciaire A_i et un ensemble de douilles composé par les N douilles tirées par les N armes différentes ainsi que par A_c . En effet, pendant la modélisation de l'intervariabilité, A_c est considérée comme une douille tirée par une arme autre que l'arme A . La distribution de l'intervariabilité est donc modélisée à partir de $N + 1$ données (Figure 145).

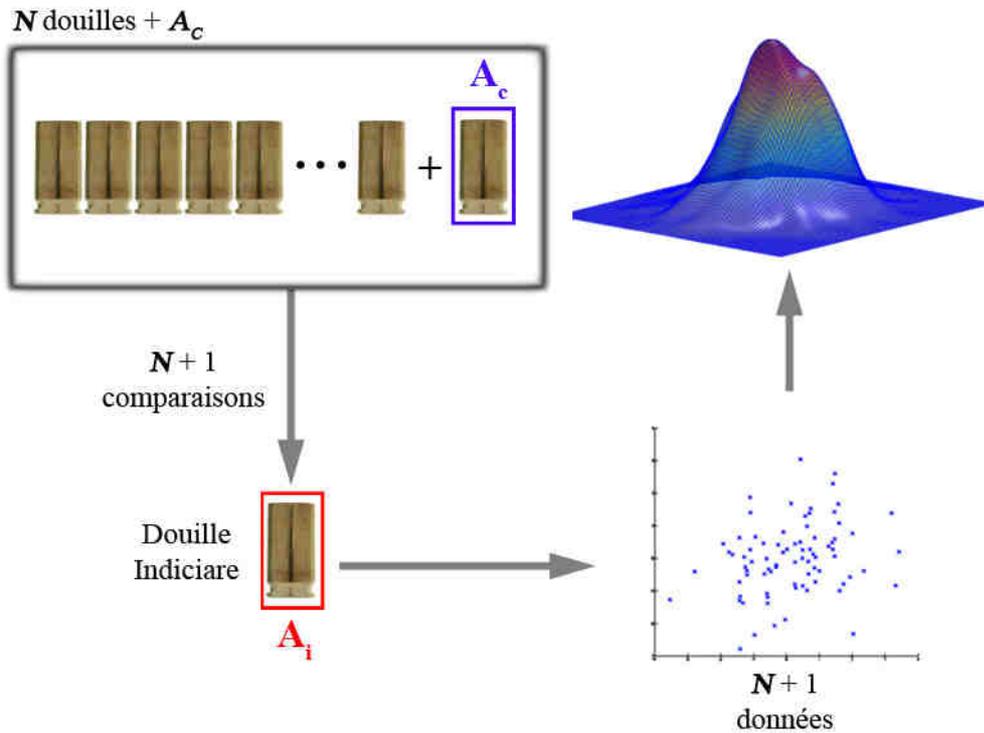


Figure 145

Processus employé pour modéliser la distribution relative à l'intervariabilité. L'ensemble des N douilles tirées par des armes différentes enrichi par la présence de A_c est comparé à la douille indiciaire A_i . Les résultats des comparaisons sont utilisés pour modéliser la distribution relative à l'intervariabilité.

Cette procédure résulte donc dans le calcul de $(M^2 - M)/2$ rapports de vraisemblance sous H_p à savoir un pour chaque comparaison entre A_i et A_c . Cette valeur correspond donc à la totalité des combinaisons possibles entre les M douilles de comparaison tirées par l'arme A .

Sous H_d la méthodologie est similaire. La seule différence réside dans le fait que la comparaison a lieu entre une douille A_c tirée par l'arme A et une douille de comparaison tirée par une des N armes différentes. Là aussi, le résultat est un ensemble de rapports de vraisemblance sous H_d pour une totalité de $N*M$ rapports de vraisemblance, à savoir la totalité des combinaisons entre les M douilles tirées par l'arme A et les N douilles tirées par des armes différentes.

Les LR collectés selon cette procédure ($(M^2 - M)/2$ sous H_p et $N*M$ sous H_d) sont ensuite employés pour construire le Tippett plot. Les résultats relatifs à cette procédure peuvent être consultés à la section N°10.5.

Plusieurs aspects importants différencient cette procédure de la méthodologie adoptée dans la section précédente (cf. Section N°9.5.1). En effet, afin d'obtenir un seul rapport de vraisemblance lorsque H_p est vérifiée (lorsque la douille indiciaire et celle de comparaison proviennent de la même arme), le numérateur est calculé compte tenu du fait que la douille indiciaire est considérée comme étant tirée par l'arme suspecte (A). C'est pour cette raison que la distribution de l'intravariabilité est construite en comparant entre elles les douilles provenant du groupe constitué des 6 douilles de comparaison et de la douille indiciaire. En revanche, sous H_d , à savoir lorsque A_i et A_c ont été tirées par des armes différentes, le dénominateur est calculé en sachant qu'également l'arme suspecte (A) est considérée comme étant une arme faisant partie de la population potentielle.

Un autre aspect intéressant de cette procédure réside dans le fait que dans le but de calculer les LR destinés à établir le Tippett plot, l'intervariabilité est bâtie en prenant en considération uniquement des comparaisons entre la douille indiciaire et les douilles tirées par les N armes de la population potentielle. Contrairement à la méthodologie de la section N°9.5.1, cette procédure permet d'évaluer la probabilité d'observer des similitudes entre la douille indiciaire et n'importe quelle autre douille des N douilles faisant partie de la population potentielle. Il en résulte donc que la probabilité de correspondance fortuite est basée sur la spécificité des traces présentes sur la douille indiciaire et pas uniquement sur les traces laissées par les armes composant la population potentielle.

9.5.3 Influence du type de munition

Afin d'étudier l'influence du type de munition sur l'évolution des rapports de vraisemblance, pour chaque arme utilisée pour créer la distribution de l'intravariabilité, des tirs ont également été effectués en utilisant des munitions différentes (cf. Section N°9.4). Pour calculer les rapports de vraisemblance les distributions relatives à l'intravariabilité et l'intervariabilité mises en place dans la section N°9.5.1 sont employées (intravariabilité et intervariabilité « totales »). Un rapport de vraisemblance est donc calculé à partir du résultat obtenu suite à la comparaison entre deux douilles tirées par la même arme, mais provenant de munitions différentes, et ceci pour chaque type de munition employé. Une fois que toutes les munitions différentes ont été comparées entre elles, la quantité de LR inférieurs à 1 est prise en considération.

A titre d'exemple, pour l'échantillonnage des armes SIG Sauer (Echantillonnage A), les distributions relatives à l'intravariabilité et l'intervariabilité ont été modélisées à partir des comparaisons effectuées entre des douilles provenant de munitions Geco Sintox®. Sept autres munitions ont été tirées avec les deux mêmes armes utilisées pour bâtir l'intravariabilité. En prenant également en considération la munition Geco Sintox®, il y a huit douilles tirées par la même arme provenant de munitions différentes qui peuvent être comparées entre elles afin de calculer 28 rapports de vraisemblance $((8^2 - 8)/2)$.

Le but de cette procédure est d'étudier le rapport de vraisemblance lorsque la comparaison s'effectue entre deux douilles tirées par la même arme mais provenant de deux munitions différentes. Cette procédure permettra également de se rendre compte si les données générées dans cette recherche pourront être généralisées à d'autres cas de figure, notamment lorsque des munitions autres que celles employées ici sont utilisées. Les résultats relatifs à cette procédure peuvent être consultés à la section N°10.6.

9.5.4 Simulation de cas d'un point de vue opérationnel

Les procédures citées ci-dessus ont été appliquées pour les trois échantillonnages, à savoir les armes SIG Sauer, Ceska Zbrojovka et type PPK. Dans le cas particulier des pistolets de type SIG Sauer, deux nouvelles armes supplémentaires ont été utilisées pour effectuer plusieurs tirs avec de la munition Geco Sintox®. Ces deux armes ont fait l'objet de la mise en place d'une simulation dans un cadre plus opérationnel. Selon cette procédure, les deux armes sont considérées comme des armes impliquées dans une affaire criminelle. Pour chaque arme, seulement huit douilles ont été scannées et comparées entre elles. Parmi ces huit douilles, une est considérée comme une douille indiciaire retrouvée sur les lieux et les sept autres comme les douilles de comparaison tirées par l'arme suspecte. Les comparaisons entre les sept

douilles de comparaison permettent de construire la distribution relative à l'intravariabilité. Les données collectées selon la procédure décrite dans la section N°9.5.1 représentent la distribution relative à l'intervariabilité. La douille indiciaire est ainsi comparée aux sept douilles de comparaison. Sept rapports de vraisemblance sont donc calculés et étudiés du point de vue des taux d'erreurs forensiques. Les résultats relatifs à cette procédure peuvent être consultés à la section N°10.8.

9.6 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, les différents échantillonnages employés dans le cadre de cette recherche ont été présentés. Il s'agit de trois échantillonnages distincts composés respectivement par des armes SIG Sauer, des pistolets CZ et de type PPK. La suite du chapitre décrit les différentes procédures employées pour calculer des rapports de vraisemblance avec les données à disposition.

10 RÉSULTATS

Plusieurs métriques ont été prises en considération dans les chapitres précédents (cf. Section N°7.9). Seulement certaines seront appliquées pour le reste de la recherche. Ce chapitre présente donc d'abord les choix préliminaires concernant l'emploi des différentes métriques. Ensuite, les résultats sont exposés séparément pour chaque type de trace. C'est-à-dire que les résultats sont présentés tout d'abord pour la trace du percuteur, ensuite pour celle de la tête de culasse et enfin pour la fusion des deux traces et cela pour les trois échantillonnages d'armes. Cette manière de présenter les résultats permet d'étudier la contribution d'une trace particulière par rapport à la valeur indicielle considérée dans son ensemble. En outre, cela permet également de voir si la contribution de certaines traces change en fonction du type d'armes. Les résultats concernant l'influence de la munition sur la valeur des rapports de vraisemblance, ceux relatifs à la simulation de cas forensiques, ainsi que ceux concernant la simulation d'un point de vue plutôt opérationnel sont également présentés.

Pour chaque échantillonnage, deux armes ont été employées pour construire les distributions de l'intravariabilité. Pour faciliter la lecture, sauf en présence de cas particuliers, les résultats relatifs à une seule arme sont présentés dans ce chapitre. Le reste des résultats, relatifs à la deuxième arme, peuvent être consultés en annexe (cf. Annexe B).

Les termes employés dans ce chapitre ainsi que les concepts et les moyens utilisés pour visualiser les résultats ont été introduits précédemment et peuvent être consultés aux chapitres N°8 et 9. D'une manière plus détaillée, les résultats présentés dans les sections N°10.2, 10.3 et 10.4 ont été obtenus selon la procédure décrite dans la section N°9.5.1. En revanche, les résultats des simulations de cas forensiques (cf. Section N°9.5.2) sont décrits dans la section N°10.5. Enfin, les tests relatifs à l'influence de la munition (cf. Section N°9.5.3) ainsi que les simulations d'un point de vue opérationnel (cf. Section N°9.5.4) sont présentés respectivement aux sections N°10.6 et 10.8.

10.1 Choix des métriques

Les six métriques prises en considération dans la section N°7.9, à savoir la distance Euclidienne, la distance Euclidienne modifiée, l'indice de corrélation et trois autres métriques exploitant les vecteurs normaux à la surface, sont tout d'abord comparées à l'aide du coefficient de discrimination (cf. Section N°8.3.1).

Les tests préliminaires, effectués sur une partie de l'échantillonnage, ont montré que les métriques ayant les meilleurs coefficients de discrimination sont l'angle entre vecteurs normaux, le coefficient de corrélation et la distance Euclidienne au carré. Les autres métriques sont caractérisées par une superposition importante des deux distributions (intravariabilité et intervariabilité) et donc par des valeurs de **CD** proches de zéro. Par conséquent, suite à ces résultats, seules trois métriques seront utilisées pour le reste du travail. Comme préconisé dans la section N°8.3.2, le nombre de dimensions sera ultérieurement réduit, par le biais de la PCA, afin de pouvoir utiliser les données dans un espace bidimensionnel. Les résultats de cette opération sont présentés, en fonction de l'arme employée et de la trace étudiée, dans les paragraphes qui suivent.

10.2 La trace du percuteur

10.2.1 Armes SIG Sauer

L'image ci-dessous montre la distribution des métriques relatives à la trace du percuteur suite à la réduction du nombre de dimensions au moyen de la PCA (Figure 146).

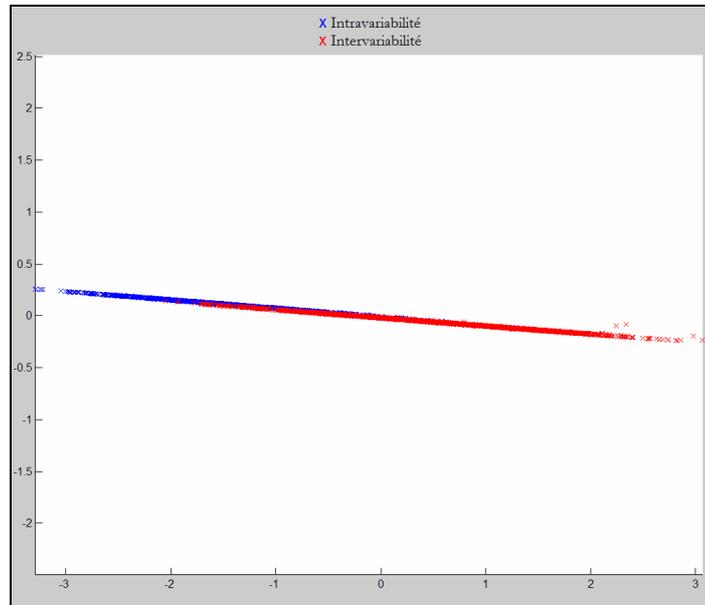


Figure 146

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace du percuteur. La totalité des points aberrants est de 41, dont 23 pour l'intravariabilité ($n=1539$) et 18 pour l'intervariabilité ($n=3315$)⁵¹.

L'image montre que les deux distributions se superposent d'une manière relativement importante. En outre, la forme des nuages de points, très étroite, indique que les deux variables sont corrélées pour la distribution de l'intravariabilité ainsi que pour l'intervariabilité. Dans ce cas particulier, il y a une variable qui est beaucoup plus discriminante que l'autre ; une diminution ultérieure des dimensions n'affecterait pas la discrimination.

Le Tippett plot montre des taux d'erreur forensique relativement importants (Figure 147). Le RMED est plus élevé que sa contrepartie, le RMEP. Ce phénomène peut être partiellement expliqué par la variabilité propre de l'arme, mais surtout par la présence de *scores* qui résultent d'alignements n'ayant pas aboutit complètement. En effet, le manque de relief dans une trace ne facilite pas son alignement. Le RMEP, ainsi que l'étendue des valeurs des LR sous H_d (en rouge), montrent qu'il n'y a pas de différences morphologiques évidentes entre les traces du percuteur laissées par l'ensemble des armes prises en considération. Il s'agit d'un résultat plutôt attendu car, sauf exception, les traces laissées par ce genre de pistolet sont relativement lisses et ne comportent pas souvent de défauts morphologiques particuliers (cf. Annexe C.1).

⁵¹ Chaque fois que la PCA est appliquée à un jeu de données, les valeurs considérées comme aberrantes ne sont pas prises en considération pendant la phase de modélisation (KDE ou loi normale bivariée). Pour chaque graphe de ce type, le nombre de données exclues est présenté.

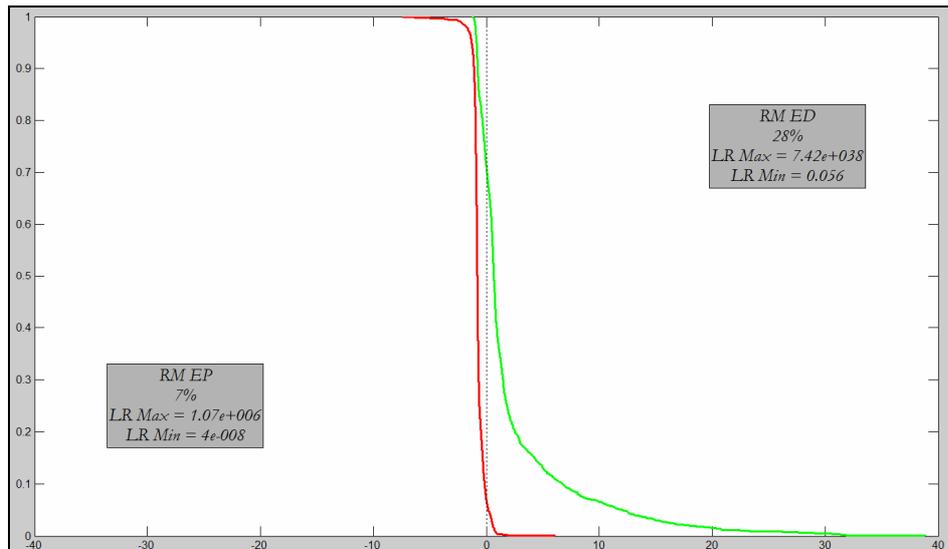


Figure 147

Tippet plot pour les traces du percuteur d'armes de type SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les résultats montrent que les RMEP et RMED ne sont pas particulièrement influencés par les valeurs aberrantes car seulement respectivement 2,5% et 0,9% de la distribution sont représentés par des *outliers*⁵². Ceci signifie que les taux d'erreur forensique ne s'expliquent pas par la présence des valeurs aberrantes mais plutôt par l'incapacité du système de comparaison à différencier les traces laissées par des armes différentes.

Le remplacement du KDE, utilisé plus haut (Figure 147), par une loi normale bivariée est peu adapté à des données ayant un niveau de corrélation si élevé. C'est pourquoi, dans ce cas particulier, les résultats obtenus à l'aide de la loi normale bivariée ne sont pas présentés.

10.2.2 Armes Ceska Zbrojovka (CZ)

Les distributions des données relatives à l'intravariabilité (Figure 148 – bleu) et à l'intervariabilité (Figure 148 – rouge) se présentent sous la forme de deux nuages superposés. Malgré que l'intravariabilité soit plutôt concentrée à droite, elle possède également beaucoup de valeurs à gauche. En revanche, les points faisant partie de l'intervariabilité se concentrent principalement en deux zones.

⁵² Tous les Tippet plots présents dans ce document ont été calculés en prenant en considération les *outliers* qui ont été écartés pour la modélisation des courbes (cf. Section N°8.3.3). Les valeurs des RMED et RMEP ont également été calculées suite à l'exclusion des *outliers*. Ces valeurs sont exposées dans un résumé à la fin de chaque section, mais sans qu'aucun Tippet plot soit présenté.

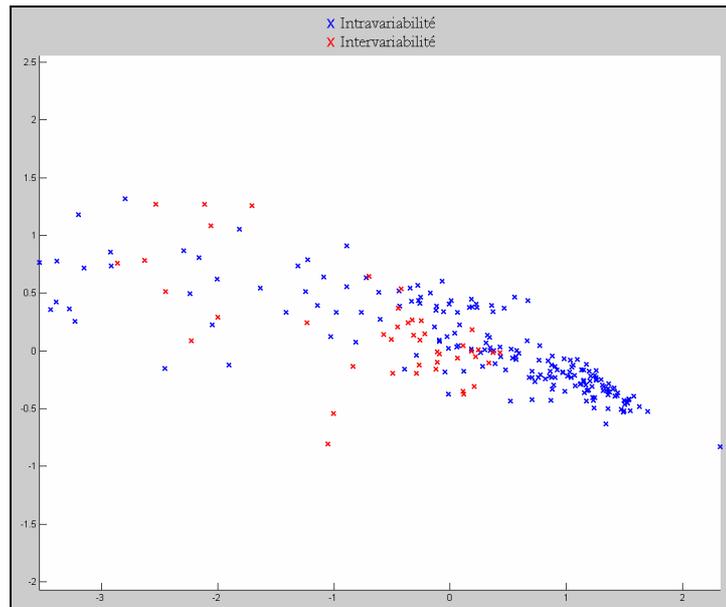


Figure 148

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace du percuteur. La totalité des points aberrants est de 3, dont 2 pour l'intravariabilité (n=190) et 1 pour l'intervariabilité (n=45).

L'observation du KDE permet de se rendre compte du niveau de recouvrement des deux distributions. De plus, il permet d'illustrer la forme bimodale peu prononcée de l'intervariabilité. Pour cette distribution, les données ne sont donc pas concentrées sur une moyenne unique, mais plutôt autour de deux noyaux (Figure 149).

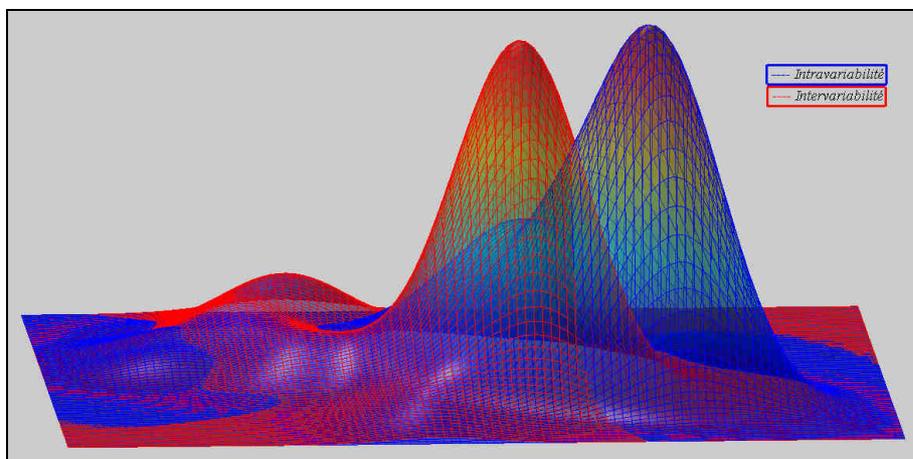


Figure 149

KDE des valeurs de proximité obtenues à partir des traces du percuteur laissées par les armes CZ.

Les traces du percuteur laissées par les armes CZ, employées dans cette étude, sont caractérisées par plusieurs cercles concentriques ou d'autres marques particulières. Il s'agit de formes ayant un certain relief par rapport à la plupart des traces du percuteur laissées par les SIG Sauer (cf. Annexe C.1). En outre, les armes employées ne proviennent pas d'un même lot de fabrication et elles ont probablement été utilisées et entretenues de façons différentes ; les différences morphologiques entre les traces sont donc évidentes. Dès lors ces différences étaient attendues, mais l'analyse des résultats n'a pas fourni des différences aussi prononcées que celles présumées.

La superposition des deux distributions montre un RMED de 32% alors que le RMEP reste relativement faible, à savoir 2.2%. Le taux d'erreur forensique sous H_d est si élevé à cause du fait que beaucoup de points faisant partie de l'intravariabilité se trouvent dans la zone de superposition des deux courbes où la densité de probabilité sous H_d est maximale. Ce phénomène explique également le faible RMEP. En outre, il est intéressant de souligner que l'étendu des rapports de vraisemblance reste plutôt limitée quelle que soit l'hypothèse en jeu.

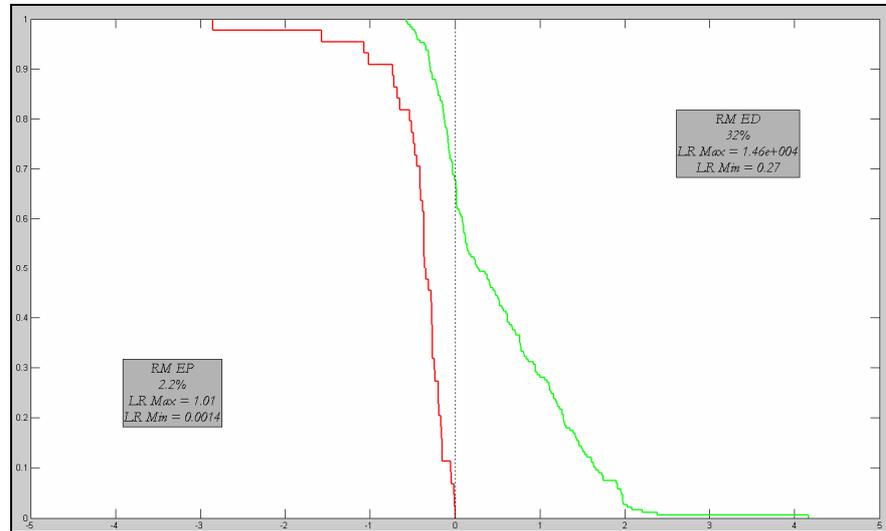


Figure 150

Tippett plot pour les traces du percuteur d'armes de type CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

La grande étendue de l'intravariabilité pourrait s'expliquer par la mauvaise reproductibilité des traces. Les images ci-dessous montrent les différences morphologiques entre deux traces présentant une grande erreur métrique, malgré qu'elles aient été laissées par la même arme et qu'elles aient abouti à un alignement correct (Figure 151).

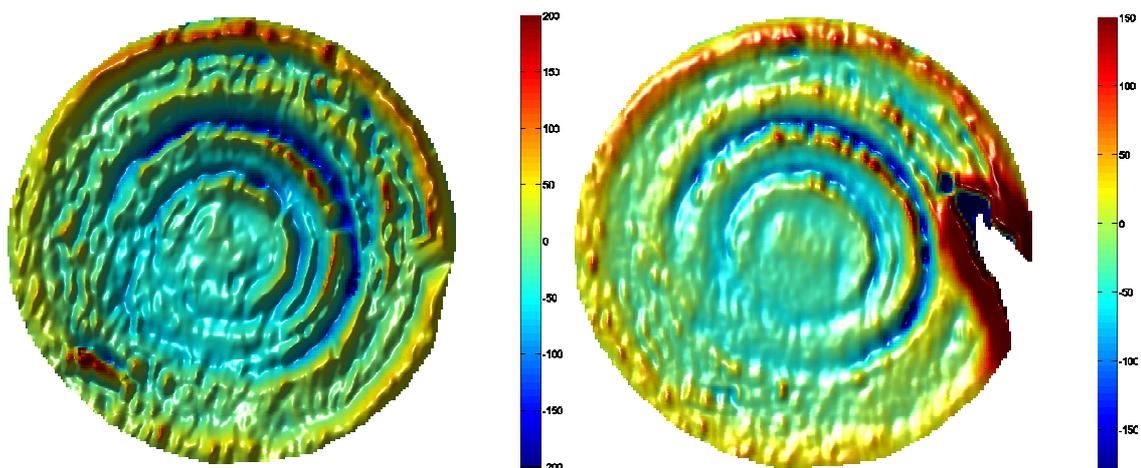


Figure 151

Différences morphologiques de deux traces du percuteur laissées par la même arme CZ.

Malgré que les différences morphologiques entre les traces laissées par la même arme soient plus ou moins marquées, elles ne permettent pas à elles seules d'expliquer le taux de

recouvrement. Etant donné l'évidente variabilité des traces laissées par des armes différentes, le manque de discrimination doit forcément provenir de la technique de comparaison employée. Une explication à ce phénomène peut être trouvée dans l'application de l'algorithme ICP. Pour assurer l'alignement, ce dernier effectue des transformations dans l'espace et pas seulement dans le plan XY. Lorsque les différences morphologiques entre deux traces sont relativement importantes, l'algorithme cherche à minimiser les distances en faisant pivoter une trace sur l'autre. Ce procédé implique que lorsque le nuage de points est projeté sur le plan XY pour le calcul des métriques, l'image résultante présente des valeurs de pixels complètement insensées (Figure 152). Le problème est d'avantage amplifié par le processus d'interpolation. Les images ci-dessous montrent une trace avant que l'alignement ait eu lieu (Figure 152 – à gauche), ainsi que le résultat de l'alignement (Figure 152 – à droite).

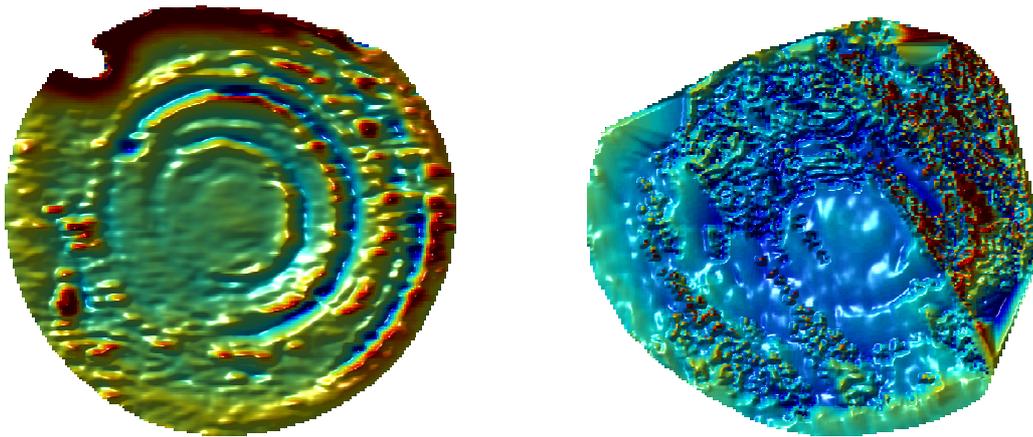


Figure 152

L'image de gauche représente une trace du percuteur avant que l'alignement ait eu lieu. L'image de droite représente la même trace suite à l'alignement et à la projection sur le plan XY.

Ces éléments permettent d'expliquer les grandes différences observées au sein de l'intravariabilité aussi bien que la légère bimodalité de la distribution relative à l'intervariabilité. Les deux modes pourraient donc représenter respectivement les traces qui n'ont pas pivoté et celles qui ont subi une rotation importante sur les axes XZ ou YZ.

La modélisation par une loi normale n'est pas un bon choix dans ce cas, car une distribution bimodale ne peut être que difficilement représentée par une loi normale bivariée (Figure 153). L'emploi d'une telle modélisation se traduit par un recouvrement bien plus important et par conséquence, par des taux d'erreur forensique plus élevés, à savoir un RMEP de 40% par rapport au 2.2% de la modélisation non paramétrique (Figure 154). En outre, les valeurs des LR sous H_d (en rouge), ainsi que sous H_p (en vert), sont nettement plus basses.

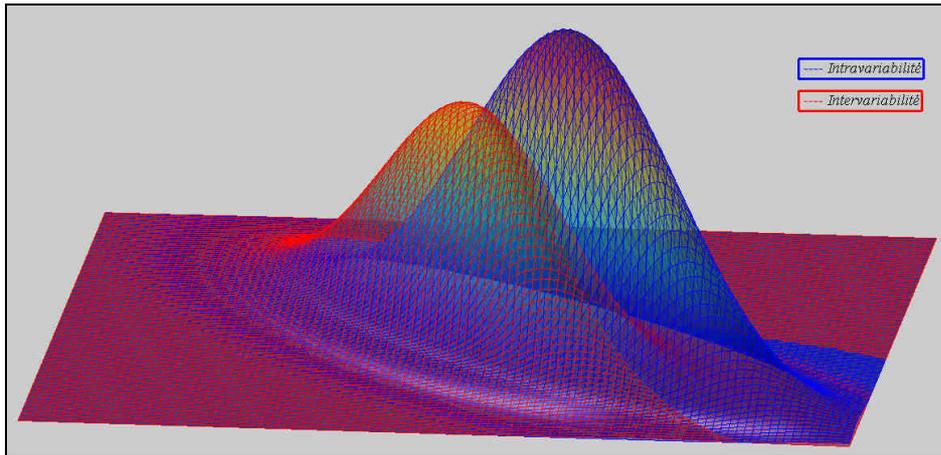


Figure 153
Modélisation au moyen de la loi normale bivariable.

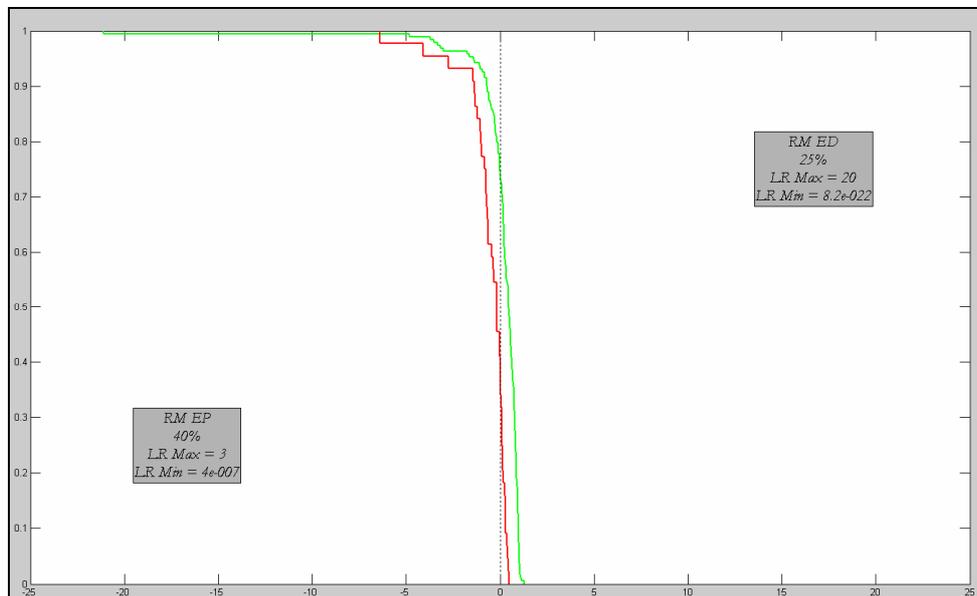


Figure 154
Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariable. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

L'observation de l'influence des *outliers* sur les résultats montrent que les RMEP et RMED ne changent pas significativement si les *outliers* sont pris en considération ou s'ils sont écartés.

En ce qui concerne l'autre arme CZ employée dans cette étude, les taux de RMED et RMEP pour la trace du percuteur sont nettement inférieurs par rapport à ceux observés ci-dessus (cf. Annexe B.1.2).

10.2.3 Armes de type PPK

L'image ci-dessous illustre une distribution relative à l'intravariabilité (Figure 155 – bleu) plutôt concentrée, par rapport à celle de l'intervariabilité (Figure 155 – rouge) qui, même si elle est composée d'un nombre inférieur de comparaisons, est plus éparpillée. Contrairement

à l'intervariabilité, l'intravariabilité présente un niveau de corrélation plus important entre les deux variables.

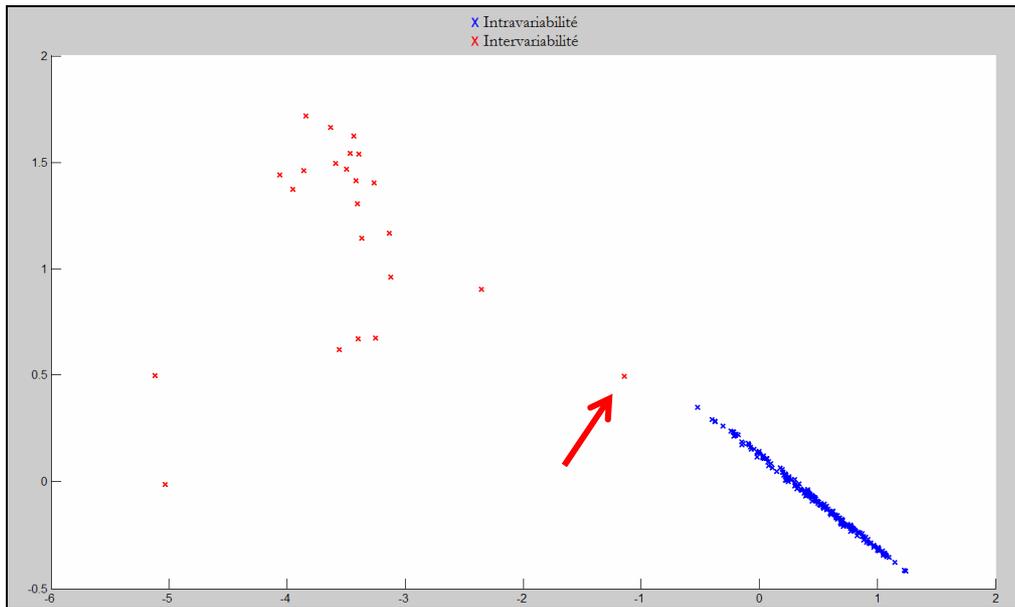


Figure 155

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace du percuteur. La totalité des points aberrants est de 8, dont 6 pour l'intravariabilité (n=190) et 2 pour l'intervariabilité (n=24).

La bonne reproductibilité des traces du percuteur au sein de cette arme, ainsi que les grandes différences entre les traces laissées par les autres armes de type PPK expliquent la bonne séparation entre les deux distributions (cf. Annexe C.3). Une seule comparaison faisant partie de l'intervariabilité (Figure 155 – flèche rouge) est relativement proche de celles de l'intravariabilité. Les deux traces qui montrent une telle erreur métrique sont clairement différentes, mais présentent une forme globale relativement similaire (Figure 156). L'alignement de ces deux traces a donné un indice de corrélation élevé. Néanmoins, les métriques basées sur la distance Euclidienne et sur les vecteurs normaux permettent de différencier cette comparaison de celles faisant partie de l'intravariabilité.

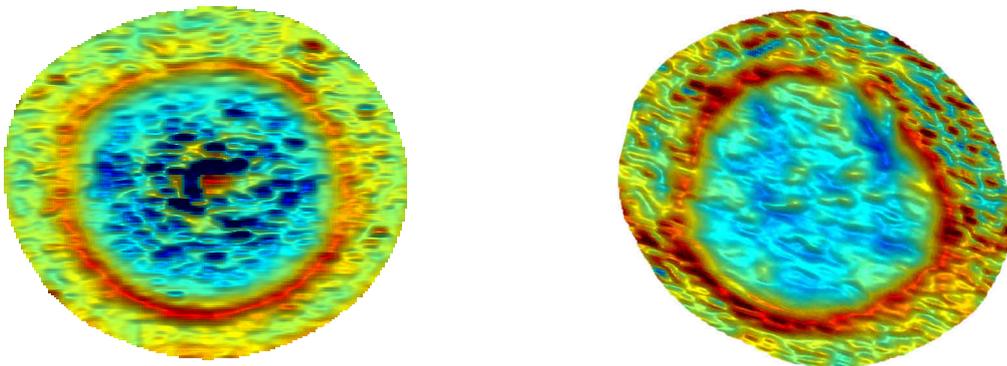


Figure 156

Deux traces du percuteur laissées par deux armes différentes de type PPK.

Ces observations sont illustrées par l'excellente séparation des courbes des Tippet plots (Figure 157 et Figure 158).

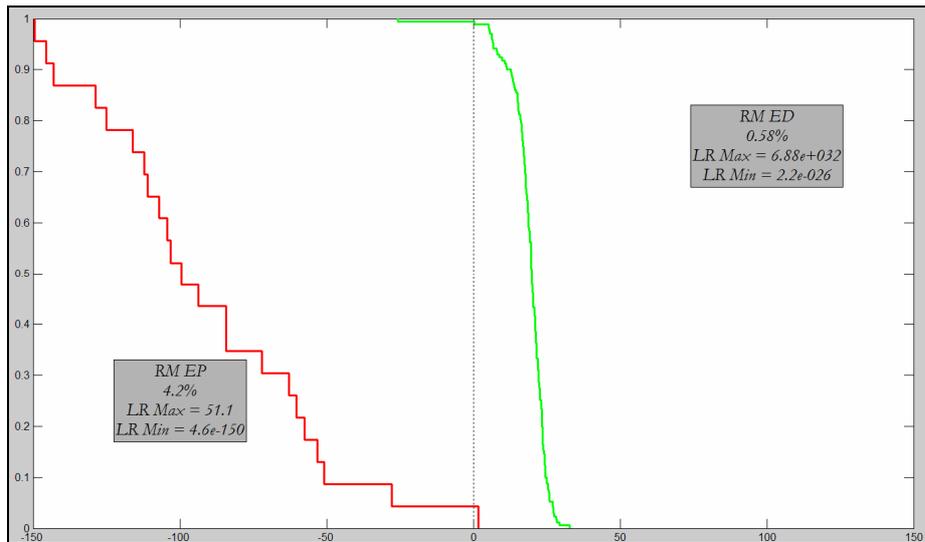


Figure 157

Tippett plot pour les traces du percuteur d'armes de type PPK. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Il convient de relever que, dans ce cas, les RMEP et RMED sont représentés par les données considérées auparavant comme des *outliers*.

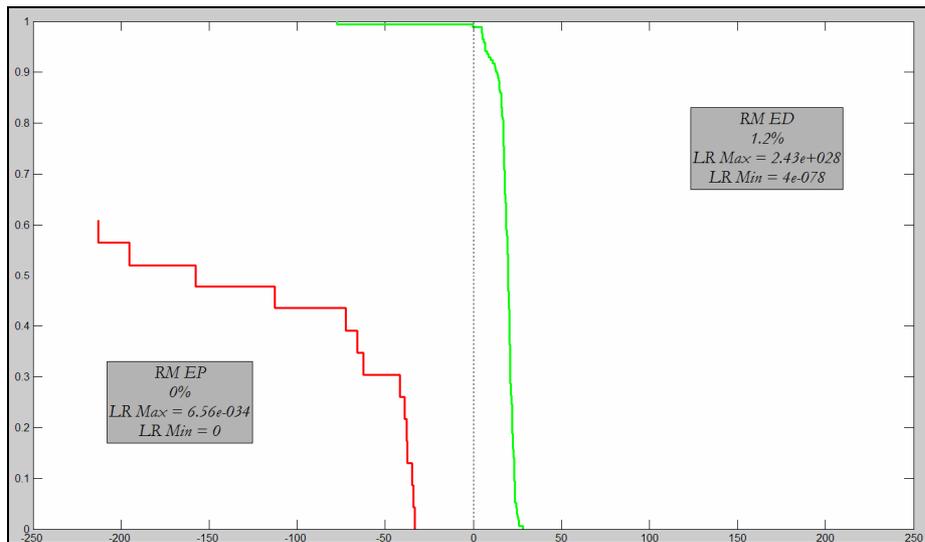


Figure 158

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

10.2.4 Résumé des résultats relatifs à la trace du percuteur

Les RMEP et RMED relatifs à la trace du percuteur pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant.

	SIG Sauer	Ceska Zbrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	7 % (6 sur 232)	2.2 % (0 sur 1)	4.2 % (1 sur 1)
RMED (KDE)	28 % (4 sur 438)	32 % (1 sur 61)	0.58 % (1 sur 1)
RMEP (loi normale)	-	40 % (0 sur 18)	0 % (0 sur 0)
RMED (loi normale)	-	25 % (1 sur 48)	1.2 % (2 sur 2)

Tableau 1

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la trace du percuteur pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèse représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

L'analyse du Tableau 1 ne permet pas de tirer des tendances précises. Les seules constatations possibles concernent les RMEP et les RMED relativement élevés pour les armes SIG Sauer et CZ, contrairement à ceux de type PPK. Pour les pistolets SIG Sauer, les résultats sont plus facilement explicables par les différences morphologiques plutôt limitées présentes entre les traces du percuteur laissées par ce genre d'arme. En revanche, dans le cas des armes CZ les taux d'erreur forensique si élevés trouvent leur source dans les limites du système de comparaison automatique.

10.3 La trace de la tête de culasse

10.3.1 Armes SIG Sauer

Les distributions pour la trace de la tête de culasse se présentent de la manière suivante (Figure 159) :

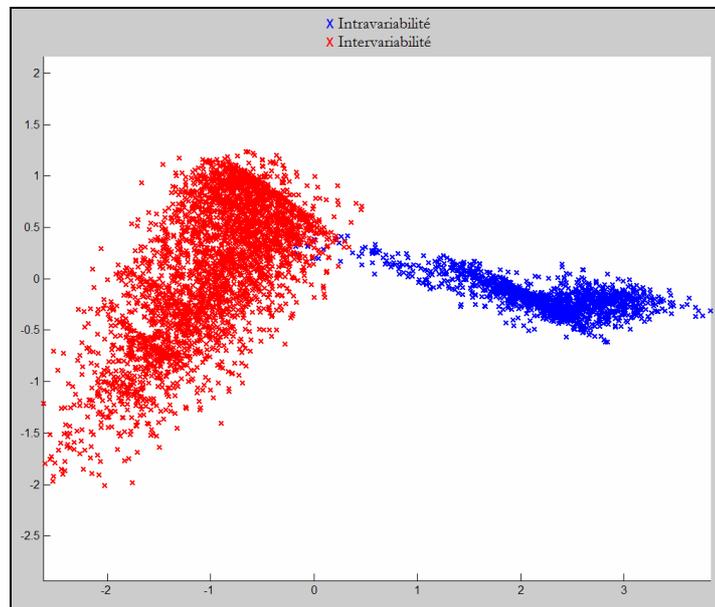


Figure 159

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 114, dont 63 pour l'intravariabilité (n=1539) et 51 pour l'intervariabilité (n=3315).

Contrairement à la distribution de l'intervariabilité qui présente une variation relativement importante pour les deux variables, l'intravariabilité se présente sous une forme relativement concentrée, et ceci plutôt pour une variable que pour l'autre. Les deux distributions sont distinctes, à l'exception d'une petite zone de recouvrement. L'observation des traces, laissées par les têtes de culasse des armes SIG Sauer, montre la présence de plusieurs différences plus ou moins prononcées en fonction du cas. Certaines traces possèdent des stries bien marquées, alors que d'autres sont caractérisées par des stries peu visibles, voire par l'absence de stries (cf. Annexe C.1). La variabilité au sein de cet échantillonnage est bien présente, même si, parfois, des difficultés pourraient être rencontrées lors de comparaisons entre des traces présentant très peu de stries et peu de relief. La forme plutôt concentrée de l'intravariabilité s'explique par les faibles variations existant entre les différentes traces laissées par cette arme (cf. Annexe C.1.1). Les Tippett plots illustrent bien les observations effectuées concernant les distributions des données (Figure 160 et Figure 161).

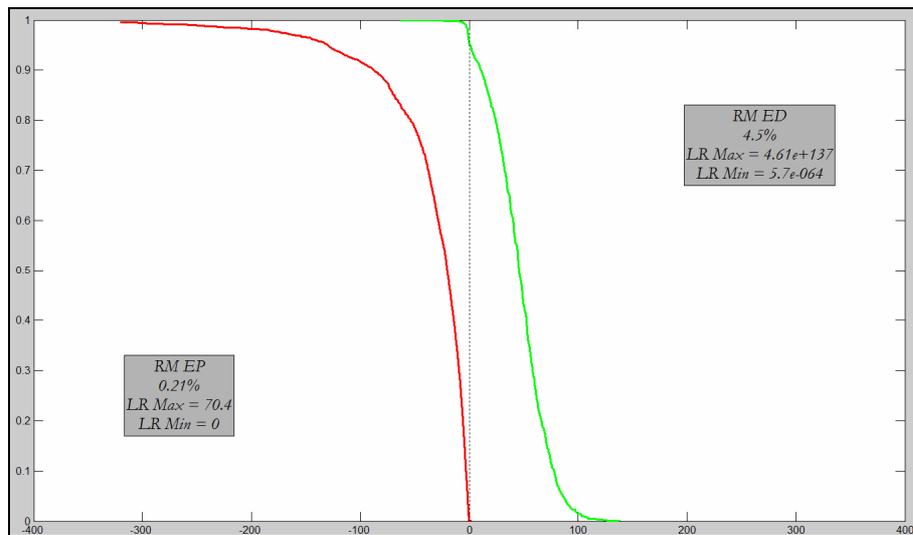


Figure 160

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse d'armes de type SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

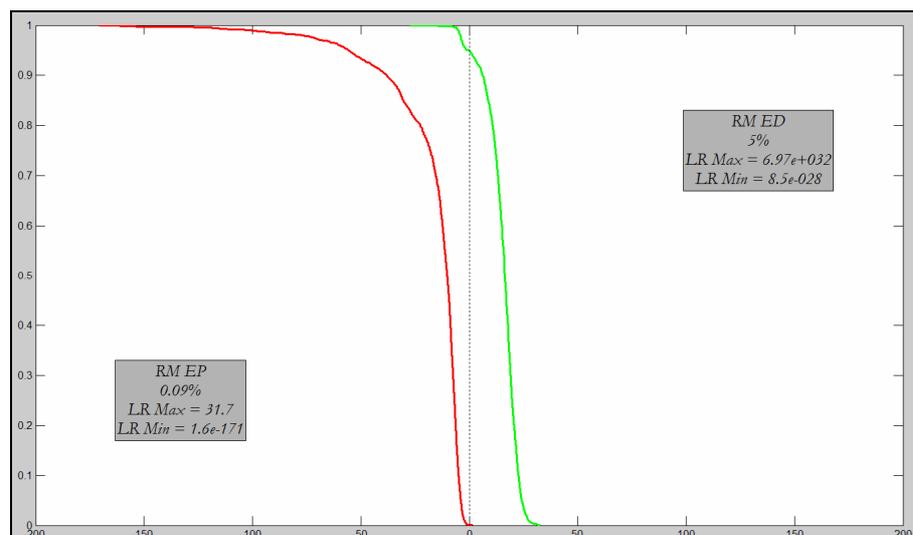


Figure 161

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les conséquences de la réinsertion des *outliers* ont été étudiées en prenant en compte les taux d'erreur forensique. Les résultats ont montré que le RMED est plus influencé par la présence des *outliers* que sa contrepartie.

Dans le cas des données modélisées par la loi normale, le taux de RMEP est relativement bas, à savoir 0.09 %. Cette valeur est facilement explicable par le faible taux de recouvrement entre les deux distributions des données (Figure 159). D'autre part, le RMED équivaut à 5% ; cette valeur provient soit d'une mauvaise reproductibilité lors de certains tirs, soit d'un mauvais alignement entre les deux traces. La deuxième hypothèse est la plus plausible. Concernant l'ampleur des rapports de vraisemblance, il est possible d'observer qu'ils diminuent nettement suite à l'application d'une loi normale bivariée par rapport aux résultats obtenus au moyen de la modélisation non paramétrique.

10.3.2 Armes Ceska Zebrojovka (CZ)

Les données relatives aux traces des têtes de culasse des armes CZ montrent une excellente séparation entre les deux distributions (Figure 162).

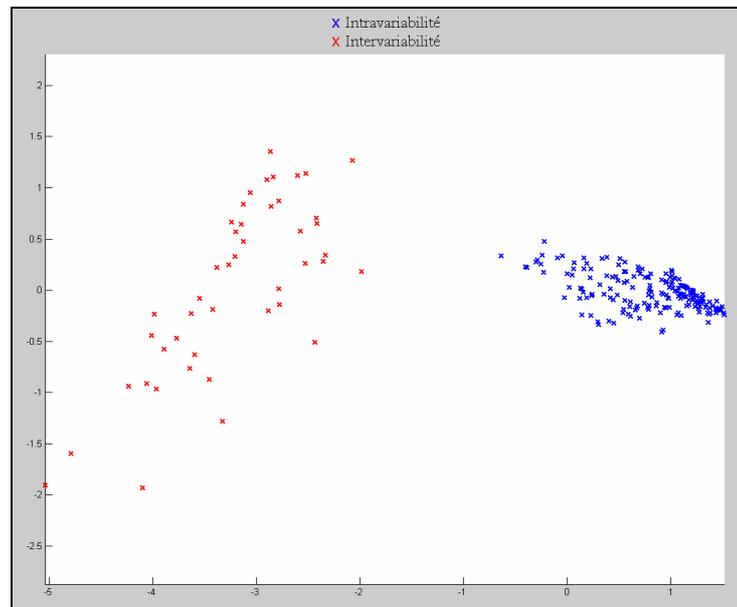


Figure 162

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 5, dont 5 pour l'intravariabilité (n=190) et 0 pour l'intervariabilité (n=45).

Les différences morphologiques évidentes existant entre les traces laissées par les différentes armes CZ sont clairement visibles sur les images de la Figure 248 (cf. Annexe C.2). En effet, les traces laissées par les têtes de culasse en question sont facilement différenciables et présentent des stries bien marquées. La seule problématique qui aurait pu éventuellement influencer les résultats en rapprochant les deux distributions aurait pu être l'influence des bords de la trace du percuteur. Ce rapprochement n'a pas eu lieu suite au coupage des bords de la trace du percuteur, qui a été effectué correctement en éliminant toute partie pouvant influencer négativement l'alignement. Les résultats peuvent être observés dans les deux Tippett plots ci-dessous (Figure 163 et Figure 164).

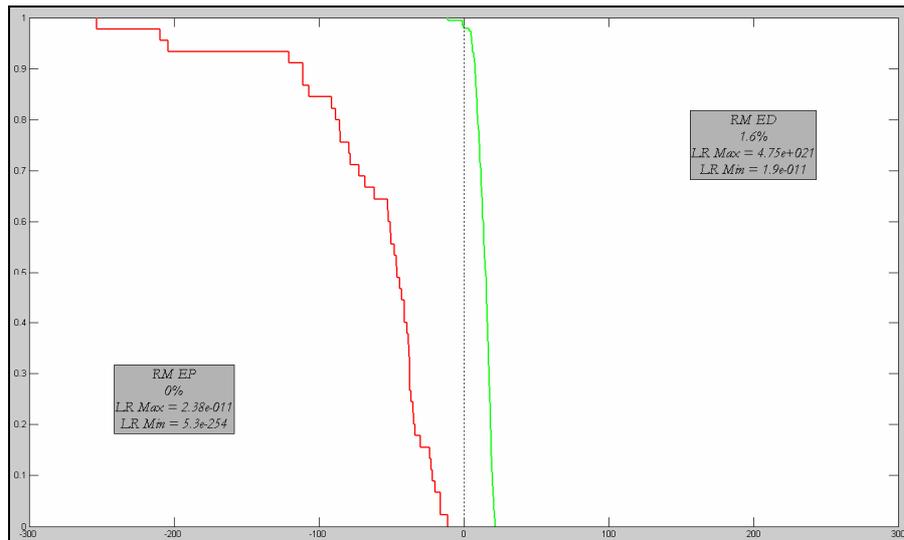


Figure 163

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse d'armes de type CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

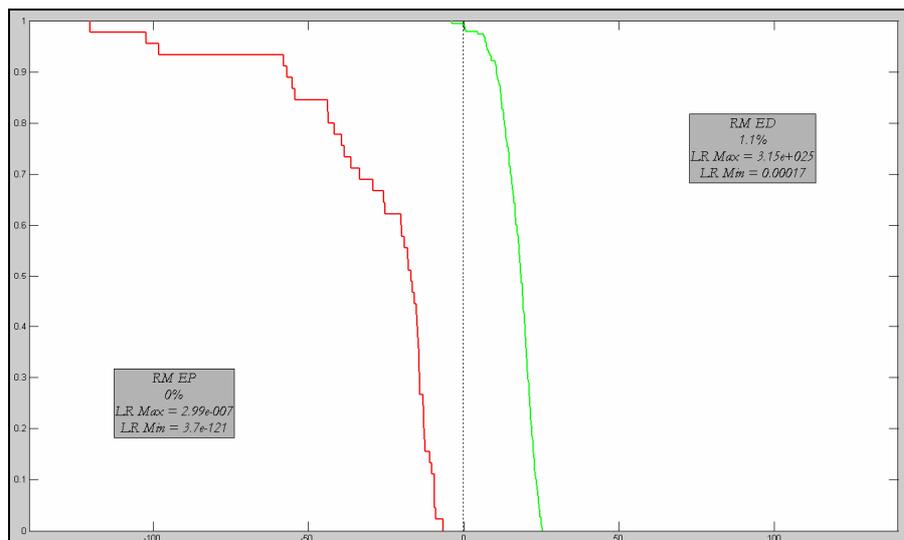


Figure 164

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Etant donné la distance importante séparant les deux distributions, il serait étonnant d'observer des rapports de vraisemblance évalués sous H_p (en vert) inférieurs à 1 (RMED = 1.6%). Ces derniers ont été calculés à partir de valeurs considérées comme aberrantes pendant la modélisation des données (*outliers*) mais qui ont été réintroduites pendant le calcul des rapports de vraisemblance. Encore une fois, la source de ces valeurs pourrait être un alignement inachevé entre les traces.

10.3.3 Armes de type PPK

Comme pour les armes de type SIG Sauer, l'intravariabilité se présente sous la forme d'une distribution plutôt étroite. Les données sont relativement concentrées sur la droite, mais il y a plusieurs points qui se dispersent vers la gauche (Figure 165 – bleu). La distribution relative à l'intervariabilité se situe plutôt sur la gauche et présente une variabilité plus importante sur les deux axes (Figure 165 – rouge).

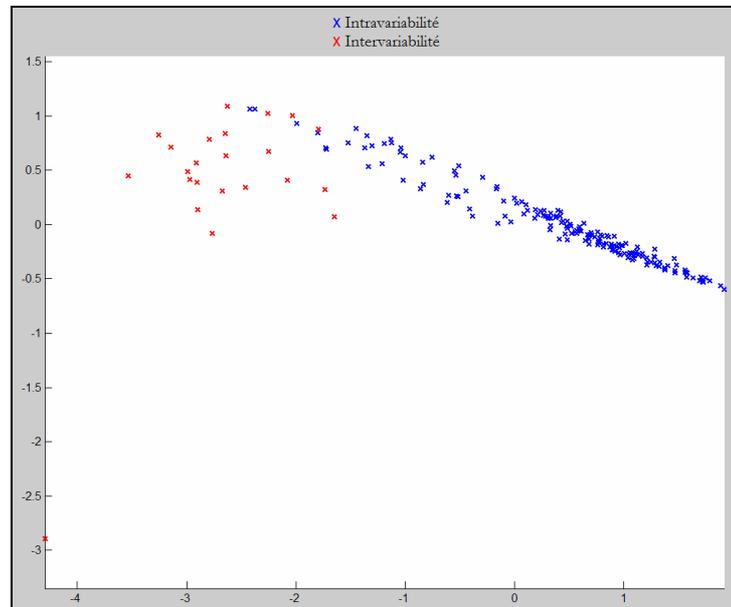


Figure 165

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 3, dont 2 pour l'intravariabilité (n=190) et 1 pour l'intervariabilité (n=24).

Les variations au sein de l'intervariabilité étaient tout à fait attendues. En effet, les têtes de culasse de ces armes sont très variées et il n'y a pas beaucoup de similitudes entre elles (cf. Annexe C.3.3). En revanche, les données de l'intravariabilité présentent une variabilité particulièrement grande. Cette variation est due principalement à deux facteurs :

Le premier concerne la variabilité de l'arme elle-même (cf. Annexe C.3.1). En effet, les traces laissées par la culasse de cette arme varient au niveau de la netteté et des détails transmis à la capsule d'amorçage. Contrairement à la trace du percuteur, qui est relativement constante, la trace de la tête de culasse ne s'imprime pas toujours avec la même intensité. Ceci se traduit par des erreurs métriques plus grandes par rapport à celles attendues pour une comparaison entre deux traces ayant été laissées avec la même intensité.

Le second facteur concerne l'influence de la qualité des traces sur l'alignement. En effet, les différences morphologiques entre traces laissées par la même arme peuvent également entraver l'alignement des stigmates en causant ainsi une augmentation de l'erreur métrique. Les images ci-dessous montrent les taux de RMED résultant de ce recouvrement (Figure 166 et Figure 167). Malgré la variabilité liée aux comparaisons entre les douilles tirées par la même arme, le taux de RMEP reste toujours à 0%, quelle que soit le type de modélisation.

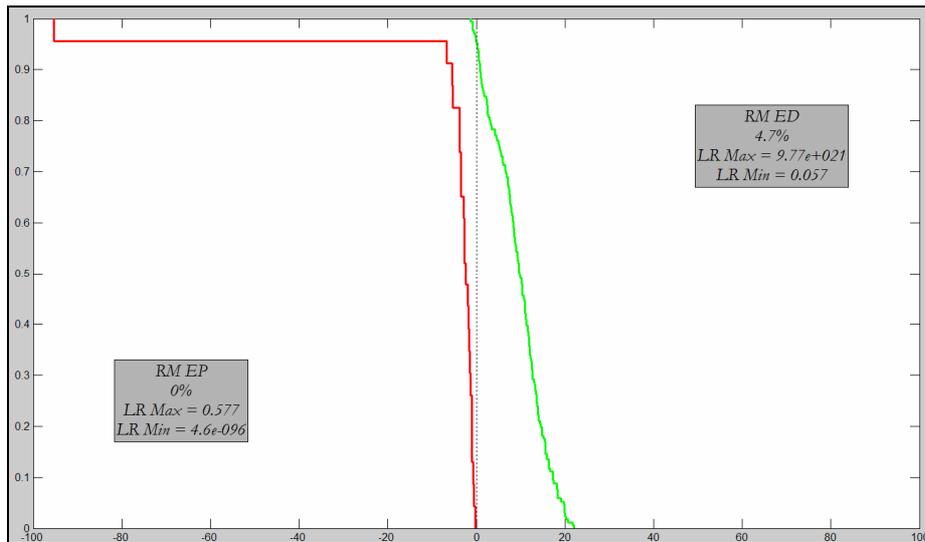


Figure 166

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse d’armes de type PPK. L’axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (log₁₀) alors que l’axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d’observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l’axe des abscisses.

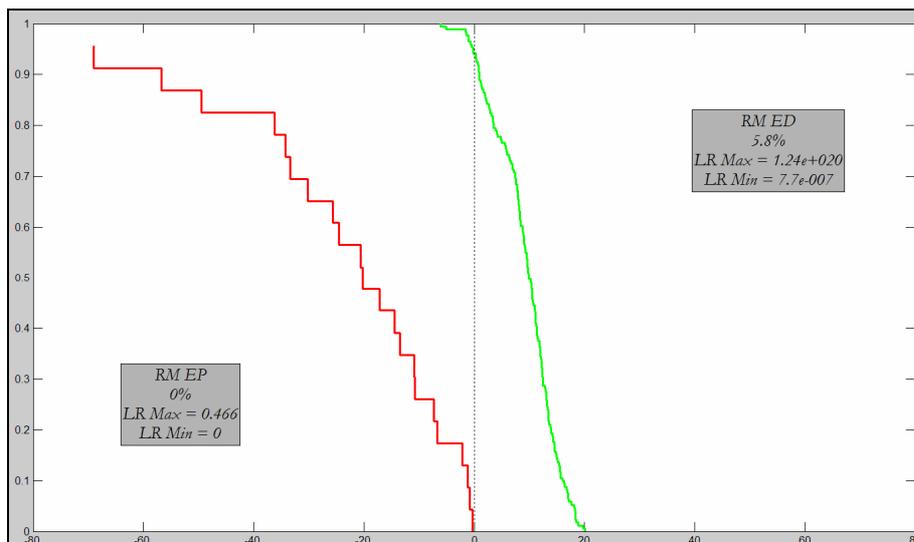


Figure 167

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L’axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (log₁₀) alors que l’axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d’observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l’axe des abscisses.

La réinsertion des *outliers* pendant le calcul des rapports de vraisemblance provoque une légère augmentation du RMED. Si les *outliers* ne seraient pas considérés, le RMED des images ci-dessus (Figure 166 et Figure 167) serait donc légèrement inférieur.

Les observations effectuées ci-dessus se trouvent accentuées pour la deuxième arme de type PPK. Les résultats montrent un taux de RMEP nettement plus grand par rapport aux résultats ci-dessus (Figure 166 et Figure 167), à savoir de 13%. Ce phénomène est principalement dû à la distribution des données de l’intravariabilité qui se superpose aux valeurs de l’intervariabilité (Figure 168).

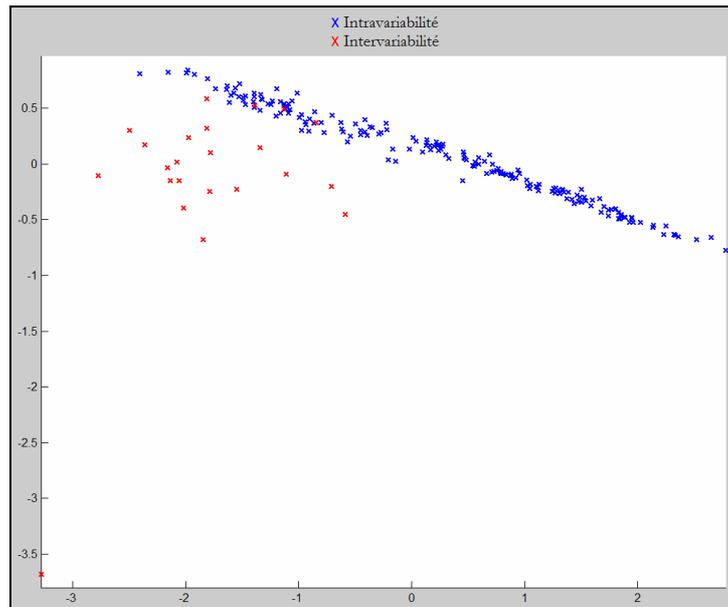


Figure 168

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace de la tête de culasse de la deuxième arme de type PPK.

La dispersion de l'intravariabilité est principalement causée par des mauvais alignements (Figure 169 – à droite). Ces mauvais alignements, qui n'aboutissent pas à une complète superposition, se traduisent par des erreurs métriques relativement élevées, semblables à celles caractérisant la comparaison entre des traces laissées par des armes différentes. La qualité de l'alignement peut être également influencée par les bords de la trace du percuteur qui, pour ce genre d'armes, sont souvent relativement épais et se présentent en relief. Ces bords, qui prennent la forme du trou du logement du percuteur, ne sont pas toujours coupés correctement lors des traitements préliminaires des données (Figure 169 – à gauche).

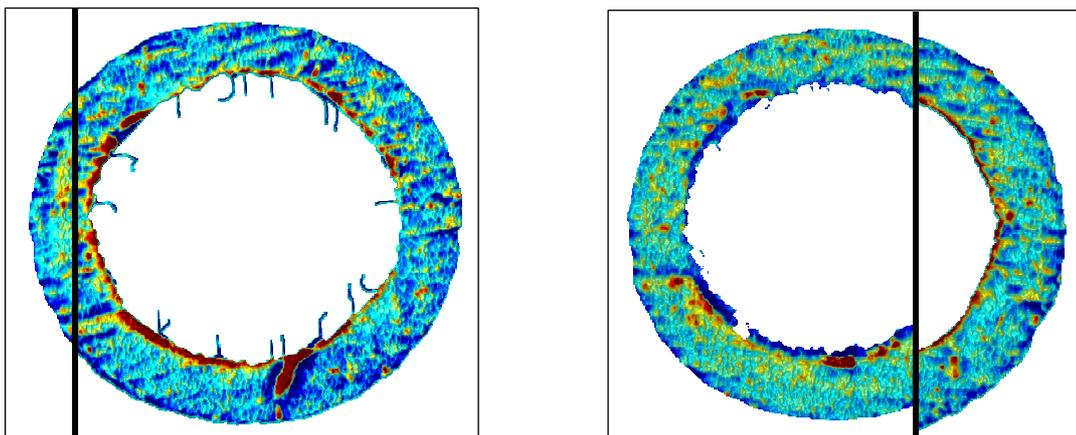


Figure 169

Exemple d'un alignement relativement réussi mais où le *score* est particulièrement mauvais (à gauche). Exemple d'un mauvais alignement se traduisant par des erreurs métriques élevées (à droite)

Les mauvais alignements, ainsi qu'une partie des mauvais *scores*, peuvent également être causés tout simplement par les différences morphologiques présentes entre les traces laissées par la même arme. Il s'agit de la variabilité propre à l'arme (Figure 170).

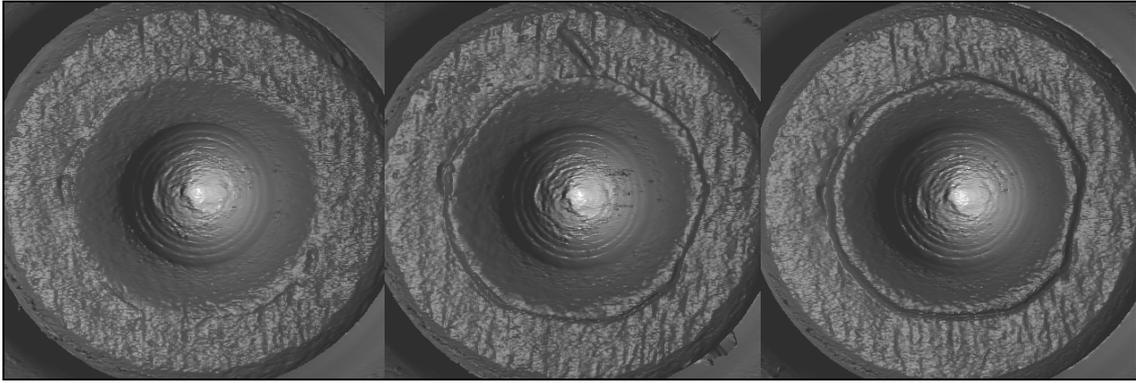


Figure 170

Différence des traces laissées par la même arme de type PPK. La reproductibilité des traces du percuteur résulte meilleure par rapport à celle des traces de la tête de culasse.

10.3.4 Résumé des résultats relatifs à la trace de la tête de culasse

Les RMEP et RMED relatifs à la trace de la tête de culasse pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant :

	SIG Sauer	Ceska Zbrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	0.2 % (2 sur 7)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (KDE)	4.5 % (58 sur 70)	1.6 % (3 sur 3)	4.7 % (2 sur 8)
RMEP (loi normale)	0.1 % (3 sur 3)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (loi normale)	5.0 % (59 sur 77)	1.1 % (2 sur 2)	5.8 % (2 sur 10)

Tableau 2

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la trace de la tête de culasse pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèse représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

Les résultats montrent des RMEP et RMED nettement inférieurs aux valeurs obtenues pour la trace du percuteur (cf. Section N°10.2.4). En outre, le RMEP est non seulement moins élevé que sa contrepartie, mais il est également moins influencé par la réinsertion des *outliers* que le RMED.

10.4 Fusion des deux traces

L'application de la PCA permet de fusionner les résultats obtenus pour la trace du percuteur et ceux de la tête de culasse afin d'obtenir un seul rapport de vraisemblance. Les paragraphes suivants montrent les résultats obtenus suite à cette fusion.

10.4.1 Armes SIG Sauer

L'image ci-dessous montre la position ainsi que la forme de l'intravariabilité (Figure 171 – bleue) par rapport à l'intervariabilité (Figure 171 – rouge). Les deux distributions se présentent sous la forme de deux nuages de points relativement concentrés si l'on considère

que les valeurs aberrantes ont été écartées pour visualiser les résultats. Les deux distributions se superposent légèrement.

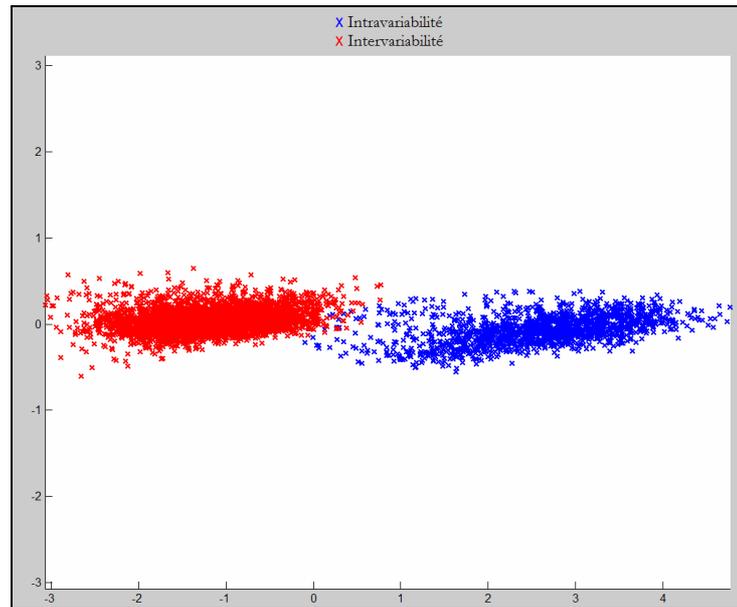


Figure 171

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 53, dont 43 pour l'intravariabilité (n=1539) et 10 pour l'intervariabilité (n=3315).

La modélisation des données au moyen du KDE permet d'apprécier d'avantage le faible taux de recouvrement entre les deux distributions (Figure 172).

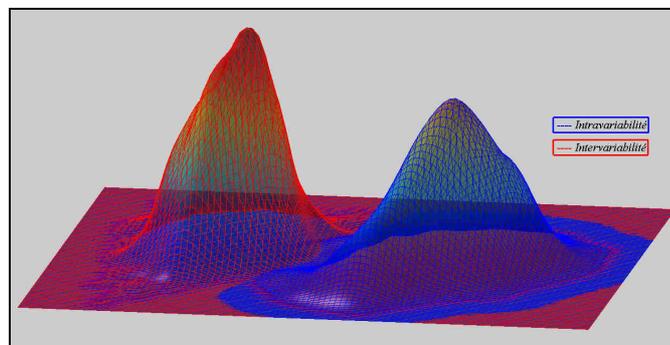


Figure 172

KDE des valeurs de proximité (métriques) obtenues à partir de la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse laissées par des armes de type SIG Sauer.

Les Tippett plots présentent des taux de RMED plus importants que les RMEP. Malgré que la superposition entre les deux distributions soit relativement faible, le RMED est plutôt élevé (Figure 173). Ceci s'explique par la présence de valeurs considérées préalablement comme aberrantes, qui ont été écartées pour la modélisation et ensuite réintroduites pour l'établissement des Tippett plots. Cette tendance est plus marquée pour le RMED que pour le RMEP. En effet, pour l'intravariabilité, les valeurs aberrantes qui ont été écartées temporairement sont normalement des données qui s'éloignent du nuage et qui se dirigent vers la distribution de l'intervariabilité. En revanche, pour l'intervariabilité, ces données sont plutôt des valeurs qui se situent relativement loin sur la gauche du nuage rouge (Figure 171).

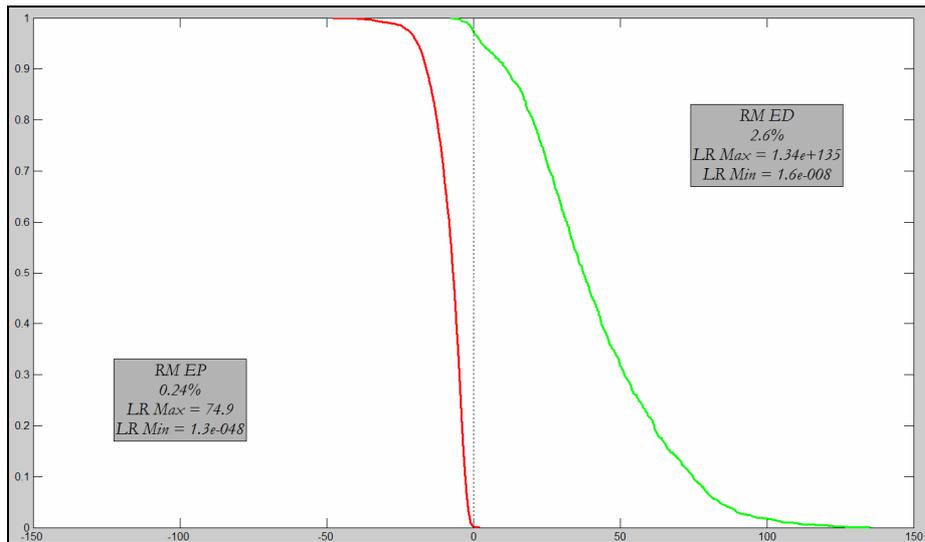


Figure 173

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse d'armes de type SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

La loi normale bivariée modélise bien la distribution des données. L'emploi d'une telle fonction permet de diminuer l'ampleur des rapports de vraisemblance, notamment ceux qui sont particulièrement élevés (ou très petits en fonction de l'hypothèse en question) une fois extrapolés au moyen du KDE (Figure 174). En revanche, le RMEP passe d'une valeur de 0.24% à 0%. Ce phénomène est principalement causé par le fait que, dans le cas de la loi normale, le maximum de la densité de probabilité se situe aux coordonnées dictées par la moyenne des données. Cette dernière ne correspond pas forcément au maximum du KDE. Cette hypothèse est corroborée par le fait que la plupart des points se concentrent vers la droite du nuage et pas au centre de ce dernier (Figure 171).

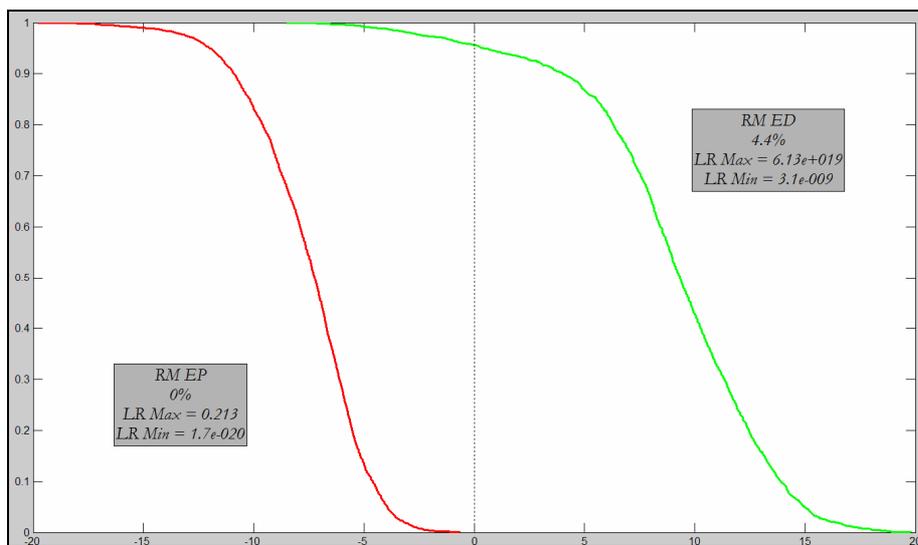


Figure 174

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les résultats pour la deuxième arme SIG Sauer montrent un taux de RMED de 0%. La différence avec les résultats décrits dans la Figure 174 peut être expliquée par la qualité des traces. Les traces laissées par la deuxième arme présentent des reliefs mieux définis ainsi qu'un nombre plus important de stries (cf. Annexe C.1.2). Ceci se traduit par un pourcentage plus élevé d'alignements qui aboutissent.

10.4.2 Armes Ceska Zbrojovka (CZ)

Les résultats de la fusion des données relatives à la trace du percuteur et à la tête de culasse se présentent sous la forme de deux distributions bien distinguées (Figure 175).

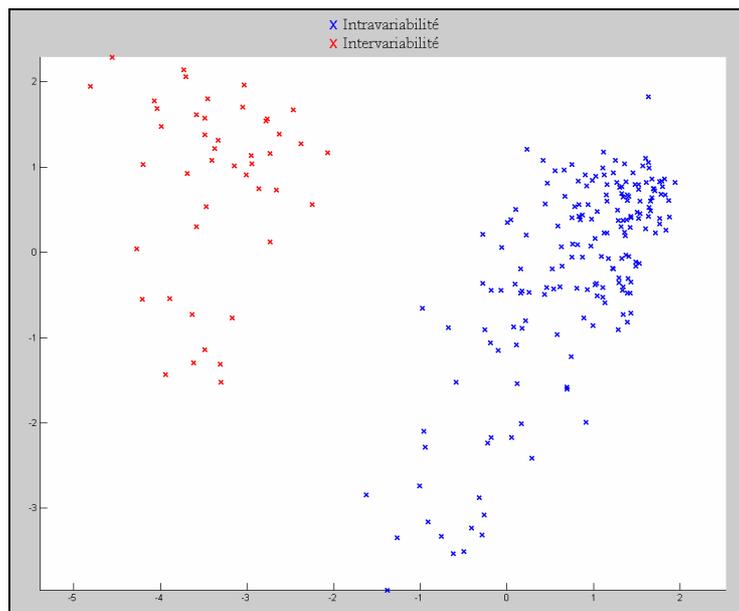


Figure 175

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 5, dont 5 pour l'intravariabilité (n=190) et 0 pour l'intervariabilité (n=45).

Les deux nuages de points sont parfaitement séparés, par conséquent, les taux d'erreur forensique est nul (Figure 176).

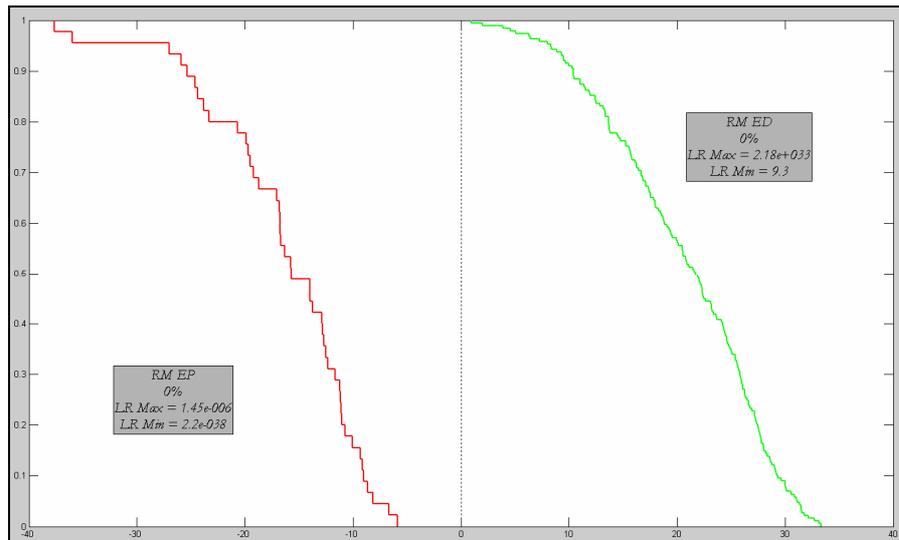


Figure 176

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse d'armes de type CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (log₁₀) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

La construction du Tippett plot suite à la modélisation des données par la loi normale ne change quasiment pas les résultats (Figure 177).

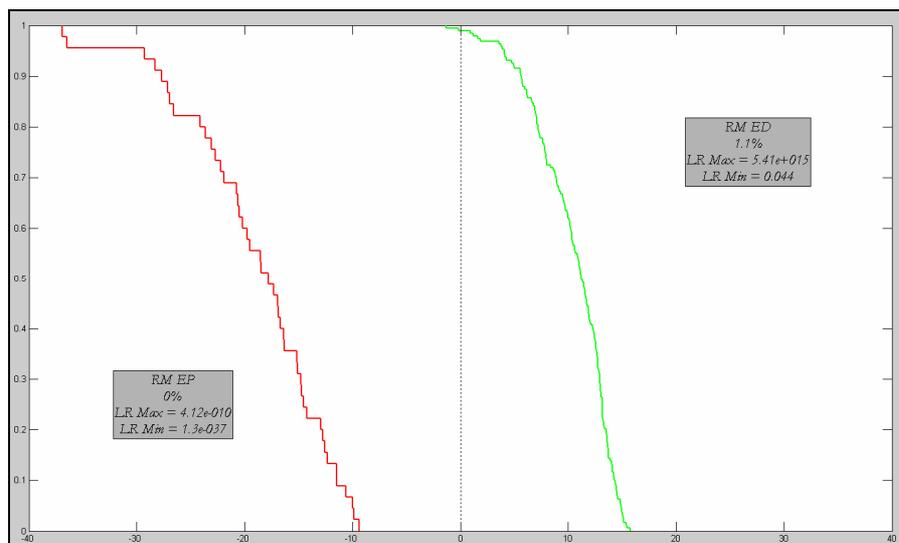


Figure 177

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (log₁₀) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

10.4.3 Armes de type PPK

Comme pour les armes CZ, les distributions pour les armes de type PPK sont complètement séparées (Figure 178). Ces résultats étaient plutôt prévisibles étant donné les différences morphologiques des traces laissées par les armes composant ces deux échantillonnages (cf. Annexe C.2 et Annexe C.3).

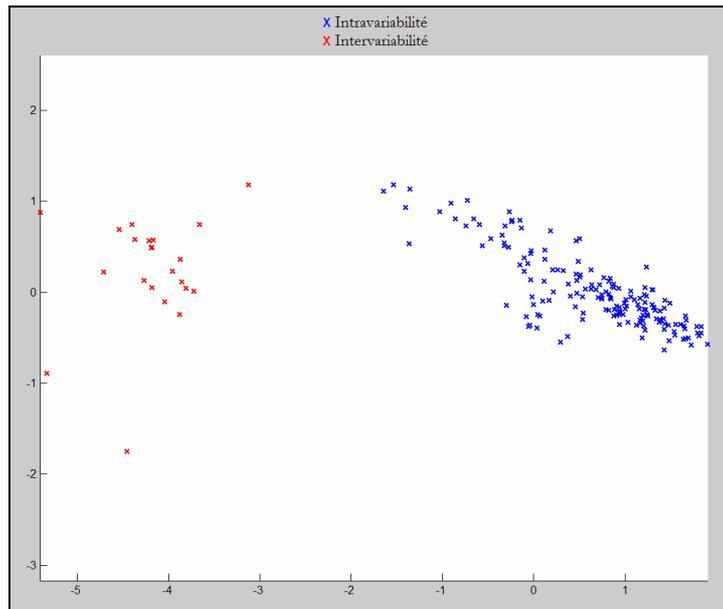


Figure 178

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 5, dont 3 pour l'intravariabilité (n=190) et 2 pour l'intervariabilité (n=24).

Les Tippett plots illustrent les observations effectuées sur les nuages de points (Figure 179 et Figure 180).

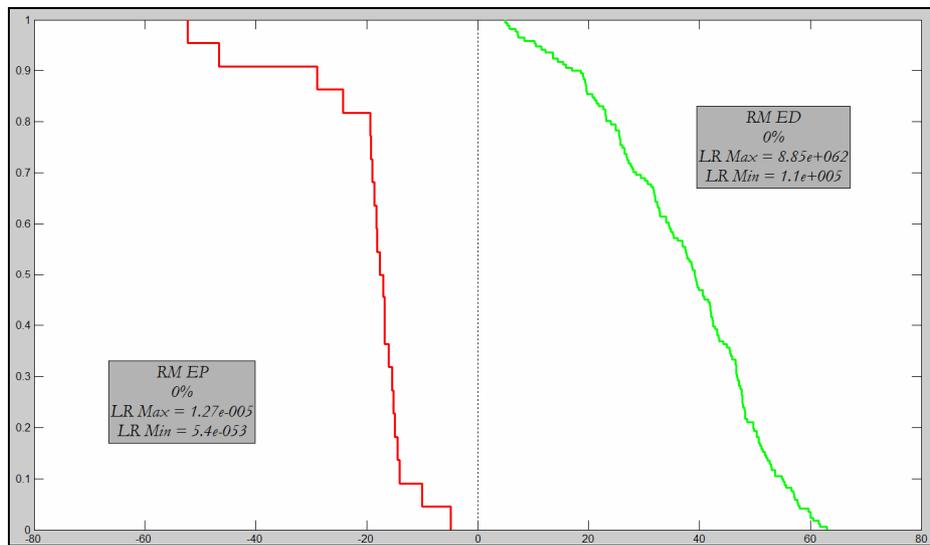


Figure 179

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse d'armes de type PPK. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

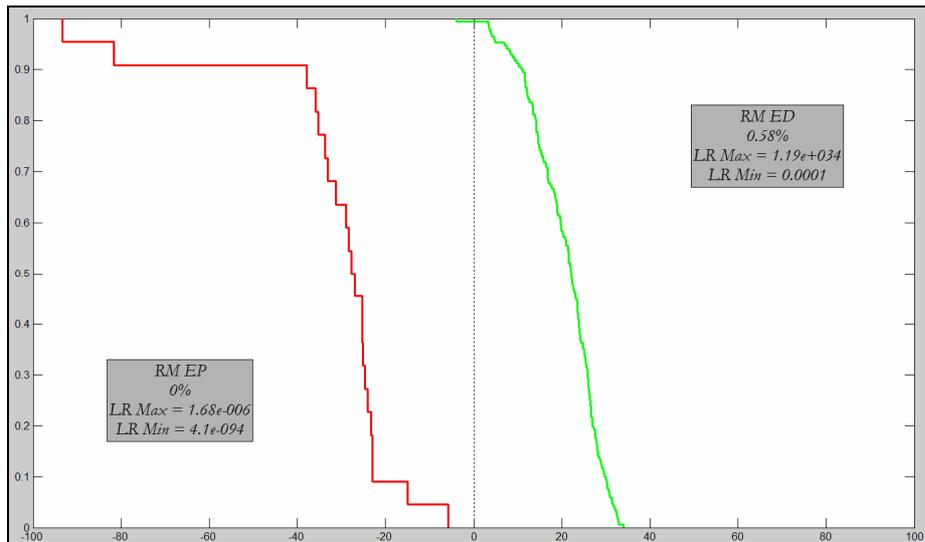


Figure 180

Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

10.4.4 Etude détaillée du numérateur et du dénominateur

Dans le cas particulier de la fusion des traces, les rapports de vraisemblance calculés n'ont pas été étudiés uniquement par le biais des Tippet plots, mais des observations plus détaillées ont été effectuées. En effet, la valeur du numérateur du LR a été comparée à celle du dénominateur afin de vérifier les LR qui favorisent une hypothèse de manière plus ou moins prononcée, mais où les densités de probabilité sont extrêmement petites quelque soit l'hypothèse en jeu. Ces LR sont définis comme « non fiables ».

Pour vérifier la présence de rapports de vraisemblance « non fiables », il faut d'abord définir un seuil numérique au-delà duquel le numérateur et le dénominateur sont trop petits et le LR peut être considéré comme « inexploitable ». Afin d'éviter de prendre position en définissant un seuil au delà duquel les LR sont considérés comme « non fiables »; la quantité de LR ayant simultanément le numérateur et le dénominateur inférieur à un certains seuil a été étudiée en faisant varier ce seuil. Les graphes ci-dessous montrent donc la proportion de rapports de vraisemblance « non fiables » sur la totalité des LR générés en fonction du seuil numérique utilisé pour définir les LR comme « non fiables » (Figure 181 et Figure 182). Les résultats mettent en évidence les constatations suivantes :

- Les résultats sont similaires pour tous les types d'armes prises en considération, à savoir les armes SIG Sauer, CZ et de type PPK.
- Le type de modélisation (KDE ou loi normale bivariée) n'a pas d'influence particulière sur les résultats (Figure 181 et Figure 182). Les résultats obtenus avec le KDE montrent qu'après un seuil d'environ 10^{-2} / 10^{-3} la proportion de LR pouvant être considérés comme « non fiables » est très limitée. En revanche, pour la loi normale bivariée le seuil pour observer des résultats similaires est d'environ à 10^{-3} / 10^{-4} .
- La proportion de rapports de vraisemblance ayant à la fois un numérateur et un dénominateur extrêmement petits reste très limitée, voir inexistante.

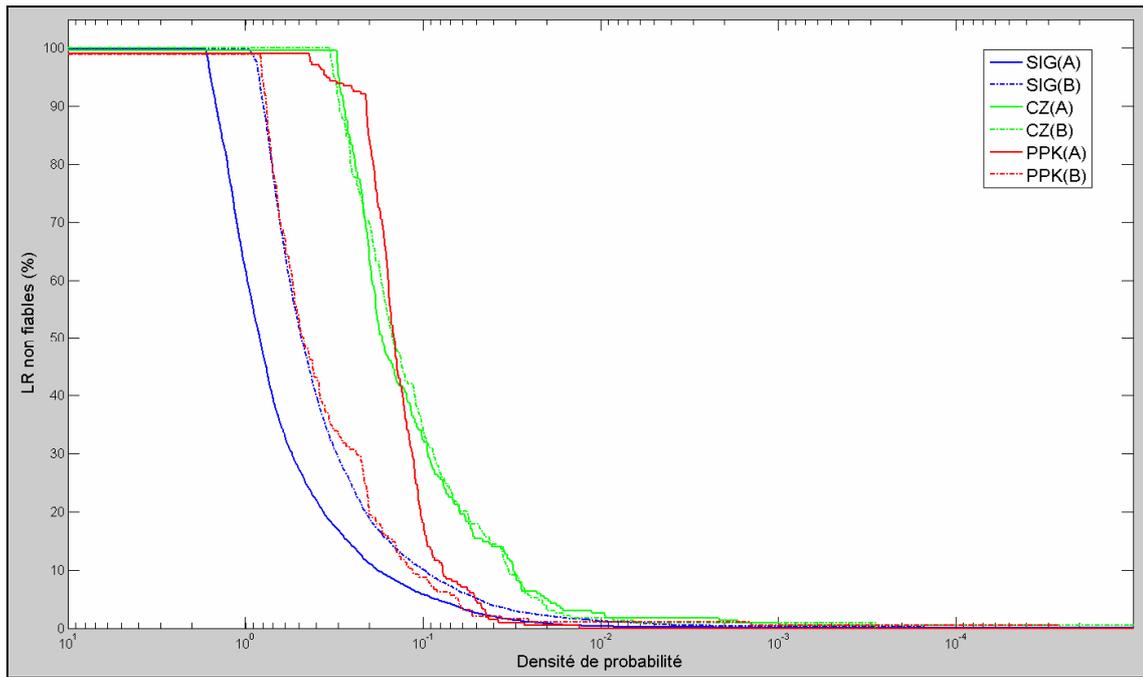


Figure 181

Graphique montrant l'évolution du pourcentage des LR non fiables en fonction d'un seuil au delà duquel les densités de probabilité du numérateur et du dénominateur sont considérées comme trop faibles. Les LR ont été calculés par le biais du KDE. Les courbes bleues représentent les résultats des armes SIG Sauer alors que les courbes vertes et rouges représentent respectivement les résultats obtenus pour les armes CZ et de type PPK.

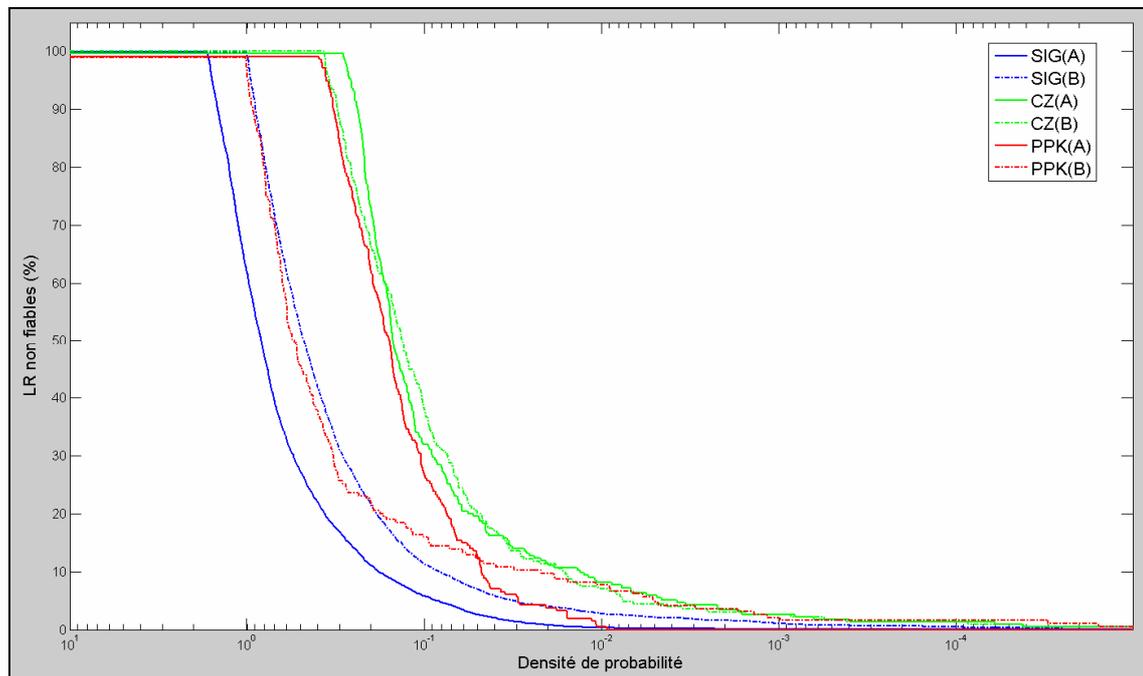


Figure 182

Graphique montrant l'évolution du pourcentage des LR non fiables en fonction d'un seuil au delà duquel les densités de probabilité du numérateur et du dénominateur sont considérées comme trop faibles. Les LR ont été calculés par le biais de la loi normale bivariée. Les courbes bleues représentent les résultats des armes SIG Sauer alors que les courbes vertes et rouges représentent respectivement les résultats obtenus pour les armes CZ et de type PPK.

Le même concept a été appliqué uniquement aux LR soutenant la mauvaise hypothèse, à savoir les RMED et RMEP. Dans ce cas particulier, seulement une partie des distributions a

pu être étudiée car certaines d'entre elles présentent des taux d'erreur forensique inexistantes. Le graphique suivant montre un exemple obtenu en analysant l'évolution des LR « non fiables » en sachant que le pourcentage affiché (Figure 183 – ordonnées) représente uniquement les LR inférieurs à 1 lorsque H_p est vérifiée (RMED). Les courbes représentent les résultats pour les deux armes SIG Sauer, les deux armes CZ et une seule arme de type PPK (l'autre présentait un RMED de 0%) sur des LR obtenus grâce à la modélisation paramétrique (Figure 183).

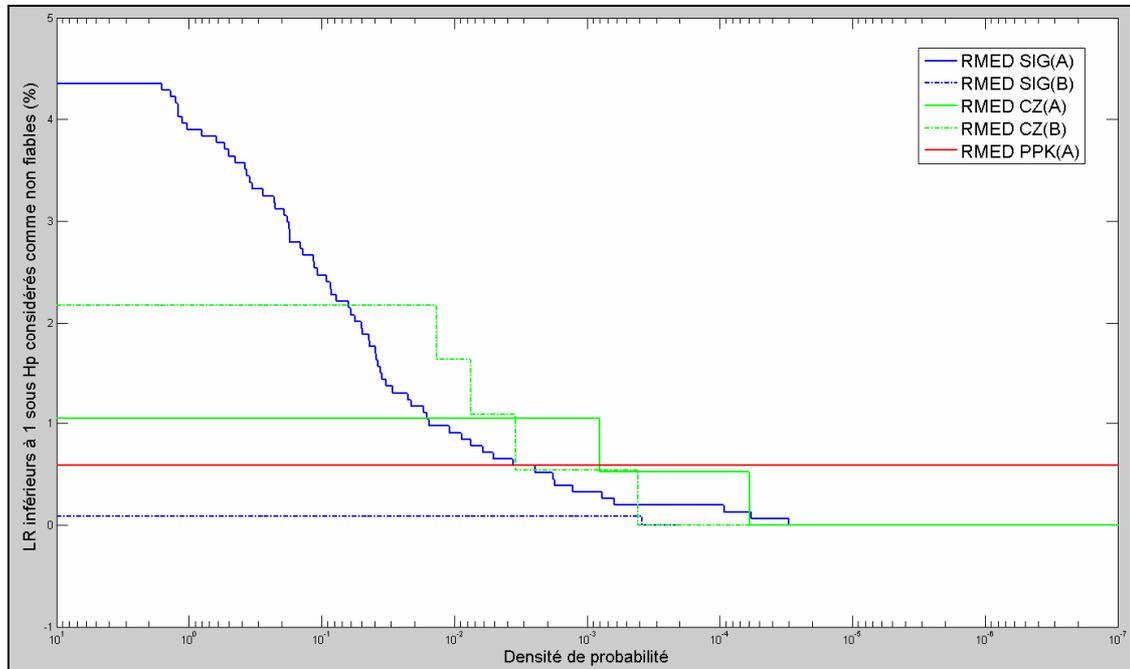


Figure 183

Graphique montrant l'évolution du pourcentage des LR non fiables en fonction d'un seuil au delà duquel les densités de probabilité du numérateur et du dénominateur sont considérés comme trop faibles. Les LR en question, qui ont été calculés par le biais de la loi normale bivariée, sont uniquement ceux qui ont soutenu de façon erronée l'hypothèse de la défense (RMED). Les courbes bleues représentent les résultats des armes SIG Sauer alors que les courbes vertes et rouge représentent respectivement les résultats obtenus pour les armes CZ et une arme de type PPK.

Les observations suivantes peuvent être faites :

- Sauf exception (Figure 183 – Courbe rouge/Arme de type PPK), les résultats sont similaires pour toutes les armes prises en considération.
- Sauf exception, la quantité des rapports de vraisemblance montrant simultanément des petits numérateurs et dénominateurs devient très limitée, voire inexistante, après un seuil d'environ 10⁻⁴.

En général, les résultats ont montré que la contribution des LR pouvant être considérés comme « non fiables » reste limitée, quelle que soit le type d'arme ou le type de modélisation. En outre, quelle que soit le type de modélisation, les valeurs considérées préalablement comme aberrantes (*outliers*) représentent normalement une grande partie des LR ayant simultanément des petits numérateurs et dénominateurs.

Ces résultats montrent que les performances du système, représentées par les RMED et RMEP, ne changeraient pas drastiquement si les LR considérés comme « non fiables » seraient écartés au moment de l'évaluation.

10.4.5 Résumé des résultats relatifs à la fusion des traces

Les RMEP et RMED relatifs à la fusion des traces pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant :

	SIG Sauer	Ceska Zebrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	0.2 % (3 sur 8)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (KDE)	2.6 % (32 sur 40)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMEP (loi normale)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (loi normale)	4.4 % (39 sur 67)	1.1 % (2 sur 2)	0.6 % (1 sur 1)

Tableau 3

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la fusion des traces pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèse représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

Les résultats montrent des RMEP et RMED généralement inférieurs par rapport aux résultats obtenus pour les traces prises de manière distincte (cf. Sections N°10.2.4 et 10.3.4). En outre, le RMEP est toujours moins élevé que sa contrepartie.

10.5 Simulation de cas forensiques

Dans la section N°9.5.2, la notion de simulation de cas forensiques a été introduite. Cette procédure permet d'établir un Tippett plot à partir d'un nombre défini de simulations effectuées avec les données à disposition pour chaque échantillonnage. Les phases nécessaires pour accomplir la simulation impliquent une étape générant des chiffres aléatoires pour la sélection de 6 des 7 douilles utilisées pour la modélisation de l'intravariabilité. De ce fait, les valeurs des RMED et RMEP, ainsi que l'ampleur des rapports de vraisemblance peuvent varier sensiblement d'une simulation à l'autre. Ceci implique forcément que deux simulations consécutives peuvent présenter des légères différences. Afin de présenter les résultats de la manière la plus cohérente possible, à la place d'une illustration via les Tippett plot, les variations des RMEP et RMED suite à 50 simulations, sont présentées, dans les paragraphes qui suivent, sous la forme d'un histogramme. Dans ce cas particulier, les résultats pour les deux armes utilisées pour construire les distributions de l'intravariabilité sont présentées simultanément (dans ce cas il s'agit des armes considérées comme suspectes et donc utilisées pour tirer les douilles de comparaison). Aucun résultat relatif aux simulations de cas forensiques n'est donc présenté en annexe car la totalité des résultats est présentée dans cette section. Ce choix est justifié par le besoin de pouvoir comparer la spécificité des traces laissées par les deux armes par rapport à la même population potentielle. Cette étape permet donc de vérifier si les traces d'une arme peuvent être plus ou moins rares dans la population potentielle par rapport aux traces de l'autre arme.

10.5.1 Armes SIG Sauer

Les résultats ci-dessous montrent des différences entre les deux armes. En effet, la première arme (Figure 184) présente des RMED toujours plus élevés que la deuxième arme (Figure 185). Il en va de même pour les RMEP qui sont souvent plus élevés pour la première arme. Ceci signifie que les traces de la première arme sont moins reproductibles ou plus difficiles à aligner car elles sont moins marquées que celles de la deuxième arme ; ce qui est

effectivement le cas (cf. Annexe C.1). En revanche, les RMEP indiquent que les traces laissées par la deuxième arme peuvent être considérées, la plupart du temps, comme plus « rares »⁵³ dans la population potentielle par rapport à celles de la première arme. En effet, le nombre de stries de qualité (mieux marquées) laissées par la deuxième arme est plus important.

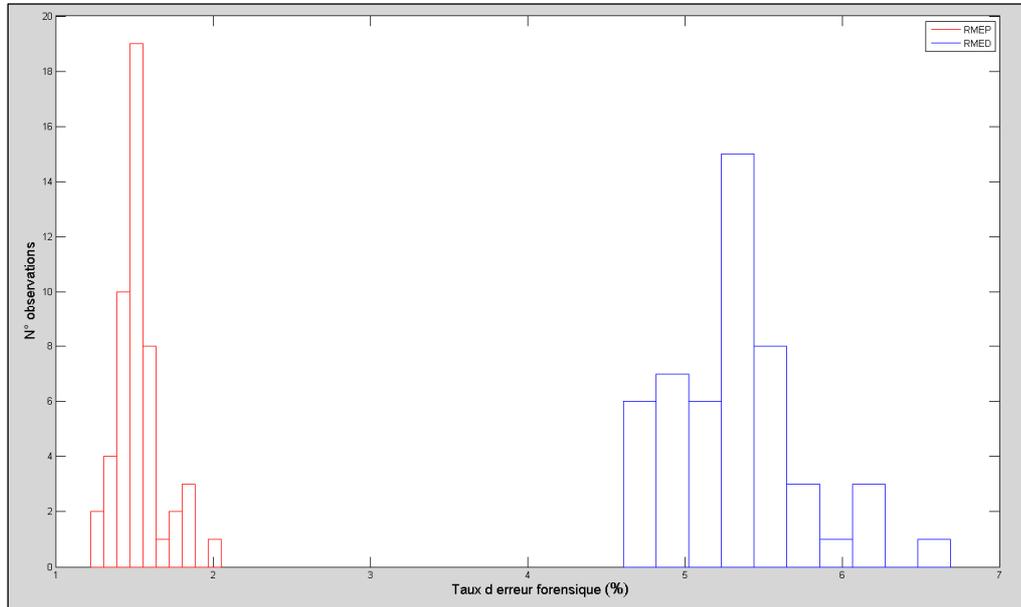


Figure 184

Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la première arme SIG Sauer.

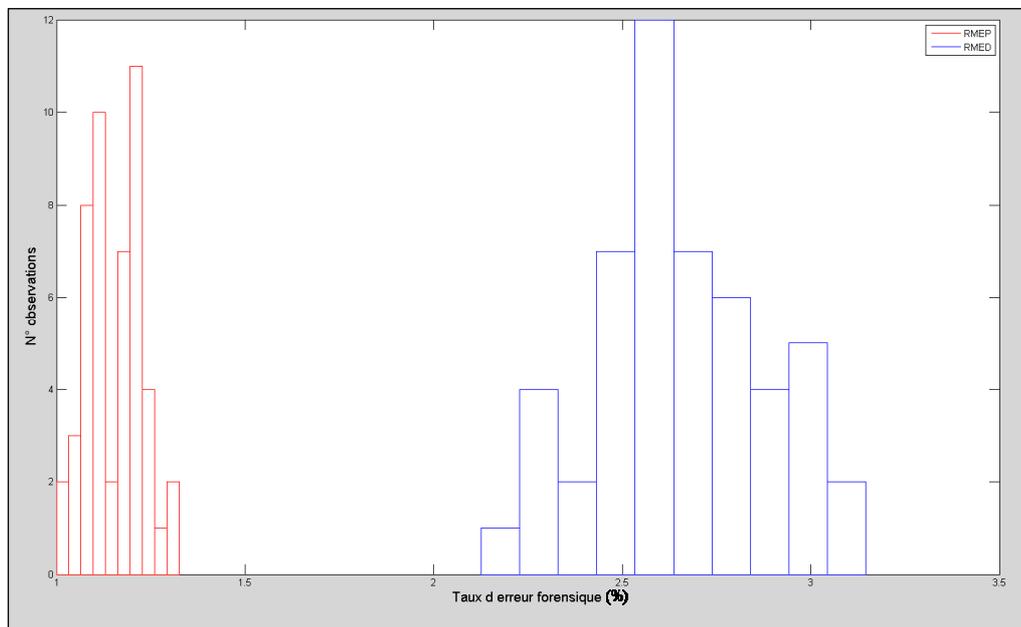


Figure 185

Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la deuxième arme SIG Sauer.

⁵³ Le fait que les RMEP soient plus grands ne signifie pas forcément que les traces laissées par cette arme ont trouvé une correspondance avec des traces laissées par des armes faisant partie de la population potentielle en question. Il s'agit simplement de métriques se rapprochant de celles observées normalement pendant les comparaisons entre douilles tirées par la même arme.

10.5.2 Armes Ceska Zebrojovka

Contrairement aux armes SIG Sauer, les résultats montrent une plus grande stabilité au niveau du RMEP qui se situe aux alentours de 0% mais des variations plus prononcées au niveau du RMED qui varie entre 8% et 16%.

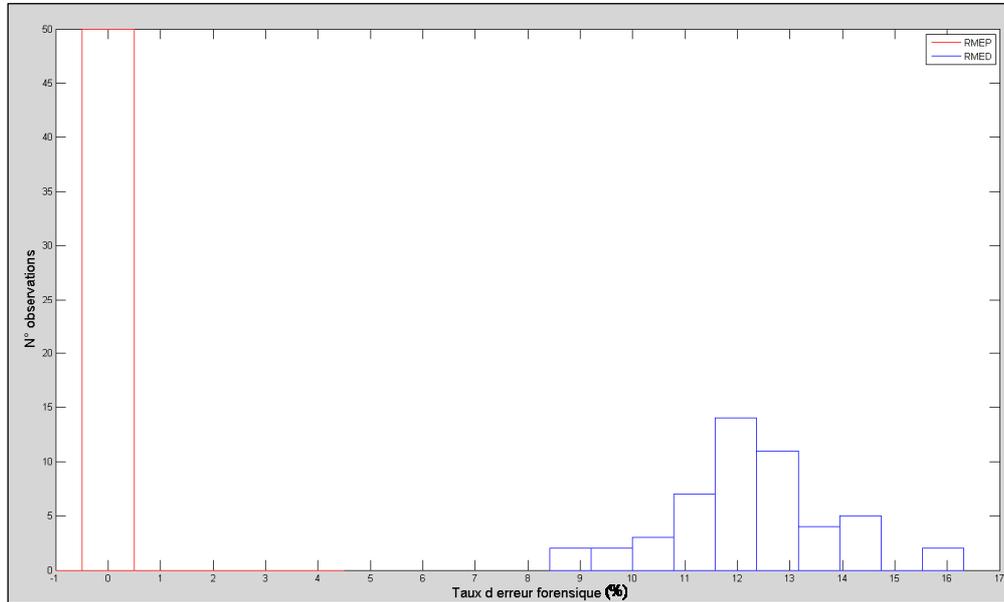


Figure 186
Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la première arme CZ.

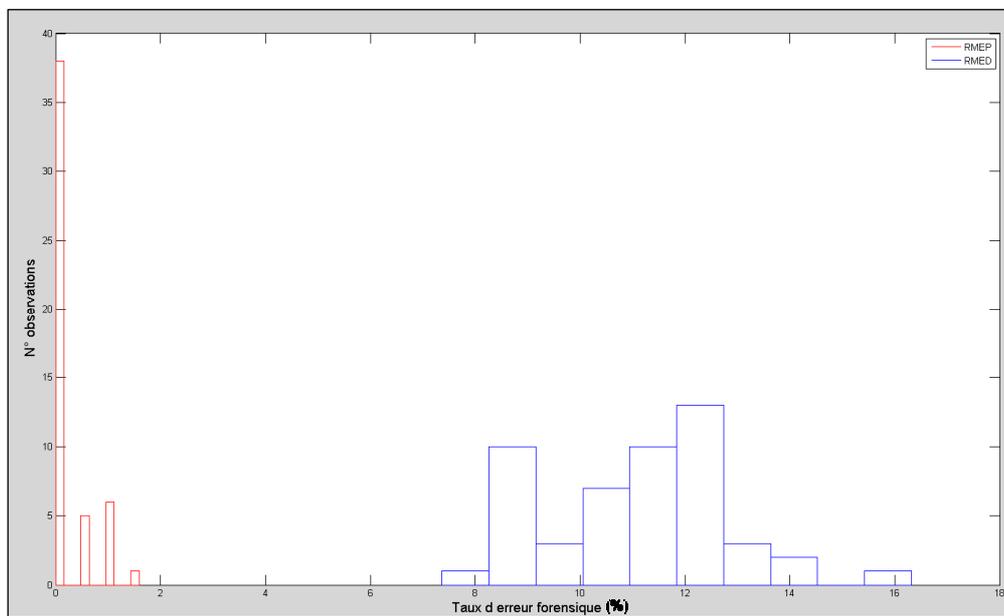


Figure 187
Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la deuxième arme CZ.

Une des raisons pouvant expliquer ce phénomène réside, en partie, dans la modélisation des données par la loi normale bivariée. En effet, il est possible que la modélisation paramétrique

de l'intervariabilité (Figure 188 à droite – Courbe rouge) s'étende beaucoup vers les données relatives à l'intravariabilité étant donné que, sous H_d , l'arme employée pour les tirs de comparaison est considérée comme une arme faisant partie de la population potentielle (Figure 188 à gauche – Flèche rouge sur la droite du graphique). Si les données relatives à l'intravariabilité sont plutôt éparpillées, une partie d'entre elles sont situées où la densité de probabilité est plus importante pour l'intervariabilité que pour l'intravariabilité (Figure 189 à droite). Par conséquent, le taux de RMED est plus élevé.

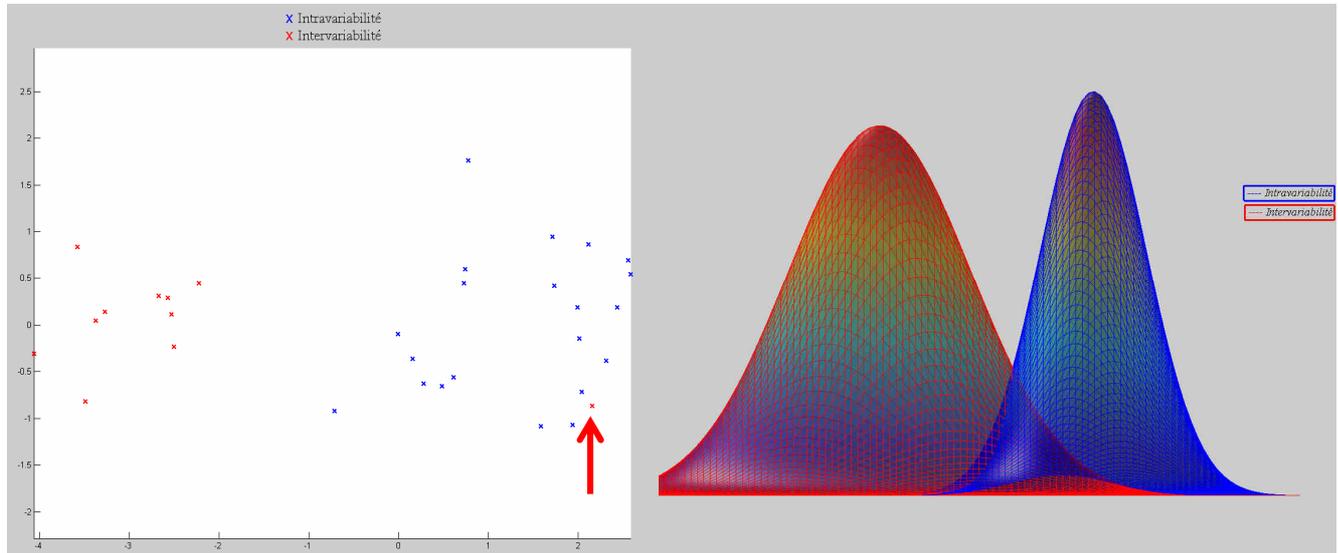


Figure 188

Calcul d'une simulation forensique sous H_p . Image montrant la distribution des points (à gauche) et la modélisation résultante par le biais de la loi normale bivariée (à droite).

Dans ce genre de cas, bien que le test de Mardia accepte la normalité des données, la loi normale bivariée modélise difficilement les observations concernant la fusion des traces. Cela a lieu tout simplement parce que, à cause du faible nombre de données représentant l'intervariabilité, le centre de la courbe est fortement influencé par des points s'éloignant du nuage. Si la population potentielle avait été composée par un nombre plus grand d'armes, les RMED auraient été probablement moins élevés.

10.5.3 Armes de type PPK

Les résultats entre les deux armes de type PPK sont légèrement différents. La première arme présente des RMEP variant entre environ 1% et 2% alors que les RMED varient entre environ 1.5% et 5% (Figure 189).

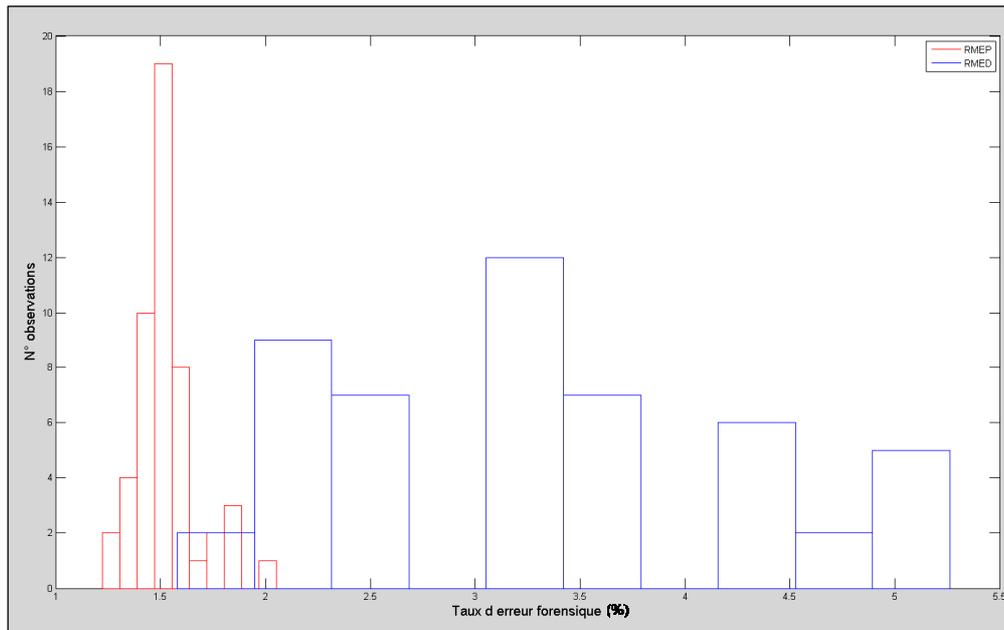


Figure 189

Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la première arme de type PPK.

En revanche, dans le cas de la deuxième arme, le taux de RMEP a toujours été observé comme étant égal à zéro pour les 50 simulations effectuées. Il n'en va pas de même pour le RMED qui varie sensiblement d'une simulation à l'autre (Figure 190). Ceci signifie que les différences entre les traces laissées par l'arme « suspecte » et les armes constituant la population potentielle en question sont d'une certaine importance.

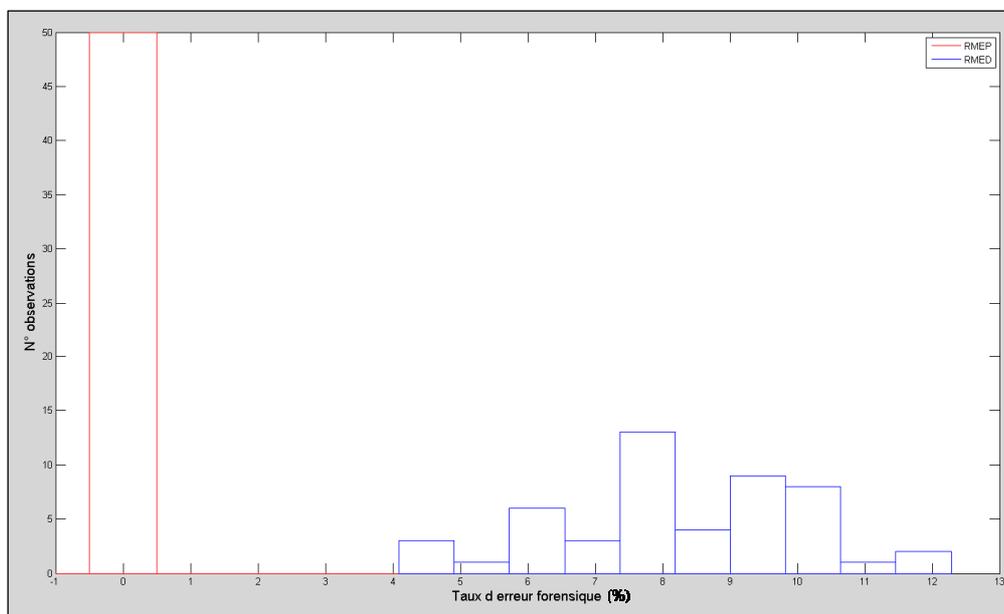


Figure 190

Histogramme illustrant la distribution des RMEP (en rouge) et des RMED (en bleu) suite à 50 simulations forensiques effectuées à l'aide des données relatives à la deuxième arme de type PPK.

10.6 Influence du type de munition

Afin d'étudier l'influence du type de munition utilisé sur le rapport de vraisemblance, ainsi que la versatilité du système face à des situations moins contrôlées, des comparaisons ont été effectuées et évaluées entre douilles tirées par la même arme mais provenant de munitions différentes. Pour chaque type de munition, un tir a été effectué ; un rapport de vraisemblance a été calculé en utilisant les mêmes distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité qui ont été présentées au point N°10.4 obtenues avec une munition donnée (Geco Sintox[®] pour les SIG Sauer, Dynamit Nobel pour les CZ et PMC pour les armes de type PPK). Afin de calculer les rapports de vraisemblance, les distributions ont été modélisées par des lois normales bivariées. Les résultats sont résumés sous la forme de tableau dans les paragraphes suivants.

10.6.1 Armes de type SIG Sauer

Huit munitions différentes de calibre 9 mm Parabellum ont été employées, à savoir : Fiocchi, Geco[®], Geco Sintox[®], Magtech (CBC), Sellier & Bellot (S&B), la munition suisse fabriquée à Thun, Remington (UMC) et Winchester (Win). Pour rappel, la munition Geco Sintox[®] a été également employée pour construire les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité. Le tableau ci-dessous montre les LR résultant des comparaisons entre les différentes munitions. Chaque douille est comparée avec une douille tirée par la même arme mais provenant d'une munition différente.

	Fiocchi	Geco	Geco SX	CBC	S&B	Thun	UMC
Geco	223.0158						
Geco SX	3.5946e-004	1.7830e+008					
CBC	9.0328e-005	1.6657e-013	2.7002e-009				
S&B	6.0527e-006	2.1060	2.6257e-004	7.3849e-009			
Thun	1.1246e-005	NaN	1.3091e-013	1.3241e-013	6.8391e-010		
UMC	0.0014	1.1792e+006	2.3169e+010	5.2323e-008	5.5374	0.0036	
Win	1.0860e+006	7.9746e+010	1.8219e+016	4.8334e+003	349.8990	12.6666	4.8165e+011

Tableau 4

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme de type SIG Sauer.

Parmi toutes les comparaisons, le 53.57% présentent un LR inférieur à 1 même si les douilles ont été tirées par la même arme. Le rapport de vraisemblance résultant de la comparaison entre la munition suisse fabriquée à Thun et celle fabriquée par Geco[®] ne possède pas de valeur définie. En effet, le LR est représenté par un NaN (*Not a Number*). Pour plus d'informations sur cette valeur, il est possible de consulter la section N°7.1.

Les munitions employées présentent plusieurs différences physiques; leur capsule d'amorçage est souvent composée par des métaux différents, certaines munitions présentent soit du vernis sur l'amorce (S&B), soit le logo du fabricant (CBC), d'autres possèdent des fines couches de vernis pour assurer l'étanchéité, celles-ci peuvent interférer avec la tête de culasse lors du tir (Thun et Geco[®]). Tous ces facteurs sont des éléments qui peuvent expliquer la présence de rapports de vraisemblance inférieurs à 1. Des mauvais *scores* peuvent résulter soit des différences morphologiques entre deux traces, soit de l'impossibilité d'effectuer un alignement correct car la minimisation de l'erreur métrique ne s'effectue pas sur les traces les plus fines, tels que les stigmates laissés par l'arme. Malgré cela, le type de munition qui

présente des rapports de vraisemblance toujours supérieurs à 1 demeure la munition fabriquée par Winchester qui est équipée d'une capsule d'amorçage en laiton.

10.6.2 Armes de type Ceska Zebrojovka

Sept munitions différentes de calibre 9 mm Parabellum ont été employées, à savoir : Magtech (CBC), Dynamit Nobel (DAG), Fiocchi, Geco[®], Hirtenberger, Sellier & Bellot (S&B) et Winchester. Le tableau ci-dessous montre les LR résultants des comparaisons entre les différentes munitions. Pour rappel, la munition Dynamit Nobel a été employée pour construire les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité.

	CBC	DAG	Fiocchi	Geco	Hirtenberger	S&B
DAG	2.1869e-042					
Fiocchi	0.0018	1.5807e+003				
Geco	5.3587e+005	943.1956	6.3642e+009			
Hirtenberger	1.0812e+007	616.6253	1.2076e+010	2.2428e+011		
S&B	2.5881e-016	5.6099e-014	0.0019	9.2470e-026	1.5343e-020	
Winchester	2.1025e+003	0.0069	4.0308e+005	4.3795e-015	37.1893	1.1175e-007

Tableau 5

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme de type CZ.

Pour les armes de type CZ, la munition est également un facteur primordial. Le taux des LR inférieurs à 1 reste très élevé, à savoir 47.62%. Comme pour les munitions employées dans les armes de type SIG Sauer, les munitions ci-dessus présentent diverses particularités au niveau de la capsule d'amorçage. Ce facteur peut facilement expliquer l'énorme taux de LR inférieurs à 1. La munition qui présente la plupart des rapports de vraisemblance supérieurs à 1 est celle fabriquée par Fiocchi, équipée d'une capsule d'amorçage nickelée n'ayant ni logo, ni vernis.

10.6.3 Armes de type PPK

Sept munitions différentes de calibre 7.65 mm Browning ont été employées, à savoir : Magtech (CBC), Fiocchi, Geco[®], Hirtenberger, Norma, Winchester et PMC. Le tableau ci-dessous montre les LR résultant des comparaisons entre les différentes munitions. Pour rappel, la munition PMC a été employée pour construire les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité.

	CBC	Fiocchi	Geco	Hirtenberger	Norma	Winchester
Fiocchi	NaN					
Geco	2.2096e-020	1.5184e-011				
Hirtenberger	2.6552e+006	6.5395e-008	3.9750e-015			
Norma	0.1422	1.8427e-009	1.8979e-017	5.5040e-008		
Winchester	3.5235e-009	5.3159e-019	2.9946e-015	1.0414e+004	7.7162e+005	
PMC	4.7093e+024	2.5247e-008	5.4224e-012	1.7484e+005	1.6471e+010	7.3768e+005

Tableau 6

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme de type PPK.

Les résultats observés pour les autres armes de calibre plus important sont accentués pour cette arme où le 65% des rapports de vraisemblance sont inférieurs à 1 bien que les douilles aient été tirées par la même arme. Le type de munition fournissant les meilleurs résultats est

celle fabriquée par PMC, équipée d'une capsule d'amorçage nickelée présentant ni logo, ni vernis. Les résultats obtenus pour les armes de type PPK ne peuvent pas, à proprement parler, être comparées aux autres résultats. En effet, les calibres nominaux employés sont différents ; beaucoup de paramètres changent entre les deux calibres (9 mm Parabellum et 7.65 Browning), notamment la pression développée lors du tir, le type de capsule d'amorçage, etc.

Les résultats obtenus montrent que le type de munition employé reste un facteur déterminant. Une comparaison entre douilles de munitions différentes mais tirées par la même arme peuvent facilement fournir un LR inférieur à 1. La comparaison des douilles de munitions différentes est donc à éviter. La seule solution envisageable reste donc la mise en place des distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité pour chaque type de munition pour lequel le calcul du LR est souhaité. Cet aspect sera discuté de manière plus détaillée dans la section N°11.4.4.

10.7 Généralisation de l'intravariabilité

Pour chaque fabricant, les deux armes employées dans cette étude ont également fait l'objet d'une comparaison au niveau de la distribution de l'intravariabilité, afin d'étudier d'éventuelles possibilités de généraliser cette dernière. Il est tout à fait possible d'imaginer que la distribution de l'intravariabilité soit un ensemble de données qui ne varie pas drastiquement d'une arme à l'autre et qu'il est donc possible d'utiliser les résultats obtenus pour une arme en particulier et de les appliquer d'une manière universelle à d'autres armes.

Afin de vérifier cette hypothèse, les intravariabilités de deux armes de modèles similaires ont été comparées visuellement, et ceci respectivement pour la fusion des deux traces, pour la trace de la tête de culasse et pour celle du percuteur. La procédure employée pour diminuer les dimensions au moyen de la PCA dépend strictement des données utilisées. Dans ce cas particulier, la transformation extrapolée par la PCA est donc calculée à partir de la totalité des données à disposition, à savoir l'intravariabilité des deux armes et l'intervariabilité simultanément. Cette procédure évite que la PCA maximise la discrimination entre les deux intravariabilités sans qu'elle puisse prendre en considération l'intervariabilité.

Les résultats obtenus avec les armes SIG Sauer sont présentés ci-dessous. En revanche, ceux relatifs aux pistolets CZ et type PPK, sont présentés uniquement en annexe vu la faible quantité de données à disposition (cf. Annexe B.5). En général, les résultats pour les autres armes mettent en évidence plusieurs difficultés lors de la généralisation de l'intravariabilité et ceci pour les deux types de traces, qu'elles soient considérées simultanément ou de manière distincte.

En ce qui concerne la fusion des traces, les résultats obtenus pour les armes SIG Sauer montrent que les deux distributions de l'intravariabilité se ressemblent, mais le barycentre ainsi que la dispersion des données ne sont pas tout à fait les mêmes (Figure 191).

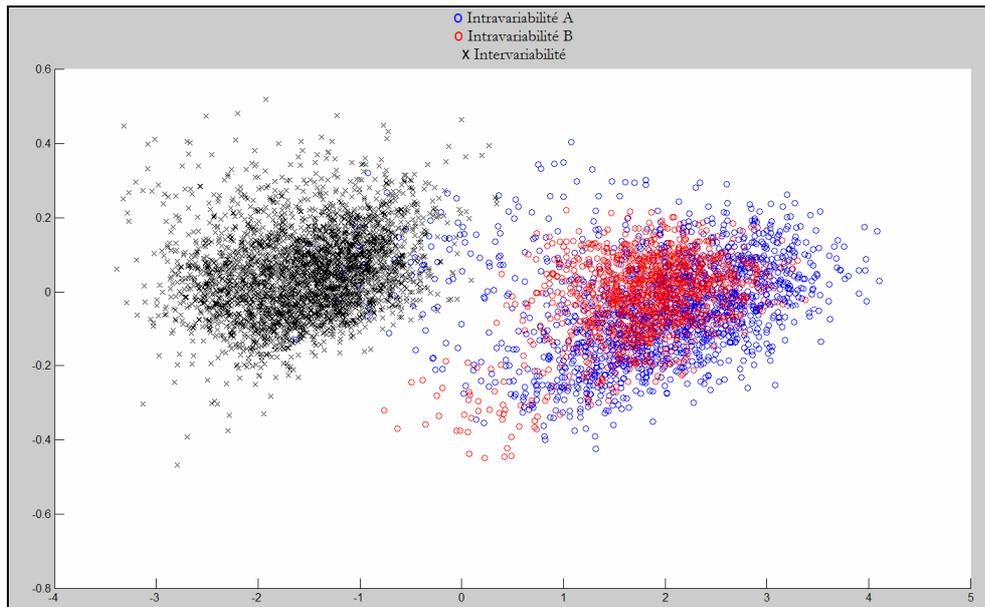


Figure 191

Distributions de l'intervariabilité (noir), de la première intravariabilité (bleu) et de la deuxième intravariabilité (rouge) pour la fusion des traces.

Afin de mieux comprendre le mécanisme qui différencie les deux distributions, un essai a été effectué en modélisant la distribution relative à l'intravariabilité d'une arme par une loi normale. Le Tippett plot a ensuite été établi. La différence, par rapport à la procédure employée normalement, demeure dans le fait que les rapports de vraisemblance, destinés à l'établissement du Tippett plot, ont été calculés en utilisant les données de l'intravariabilité de la deuxième arme. Le Tippett plot pour la première arme a été présenté auparavant (Figure 174). Le Tippett plot de la deuxième arme ainsi que celui créé par l'«échange» de l'intravariabilité peuvent être appréciés ci-dessous (Figure 192 et Figure 193).

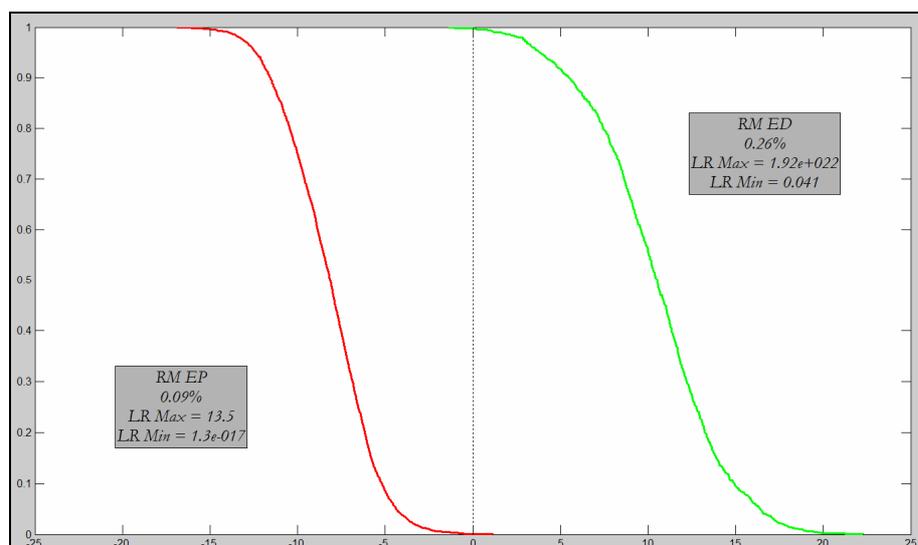


Figure 192

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariee pour la deuxième arme de type SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

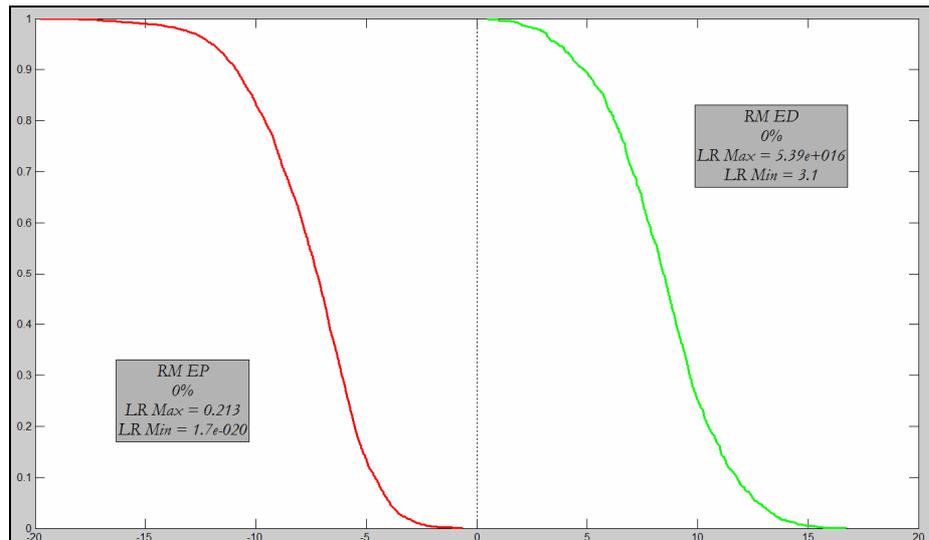


Figure 193

Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariee de la première arme de type SIG Sauer, mais en utilisant les données relatives à l'intravariabilité de la deuxième arme de type SIG Sauer pour calculer les LR. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les résultats montrent une diminution de l'étendue des valeurs des rapports de vraisemblance ainsi qu'une diminution des taux d'erreur forensique qui passent respectivement pour le RMEP et le RMED de 0.09% à 0% et de 0.26% à 0%. Cela peut être expliqué simplement par le fait que l'intravariabilité de la deuxième arme (Figure 191 – rouge) est plus concentrée et presque complètement recouverte par la distribution de l'autre arme (Figure 191 – bleu). Les différences mises en évidence par l'analyse des Tippet plots sont relativement limitées et plutôt attendues. Ceci s'explique par les similitudes existant entre les deux distributions. Dans d'autres cas de figure, les résultats peuvent être différents. C'est notamment le cas des traces laissées par la tête de culasse. En effet, pour ce type de trace, les deux distributions diffèrent au niveau de la position ainsi qu'au niveau de leur variabilité (Figure 194).

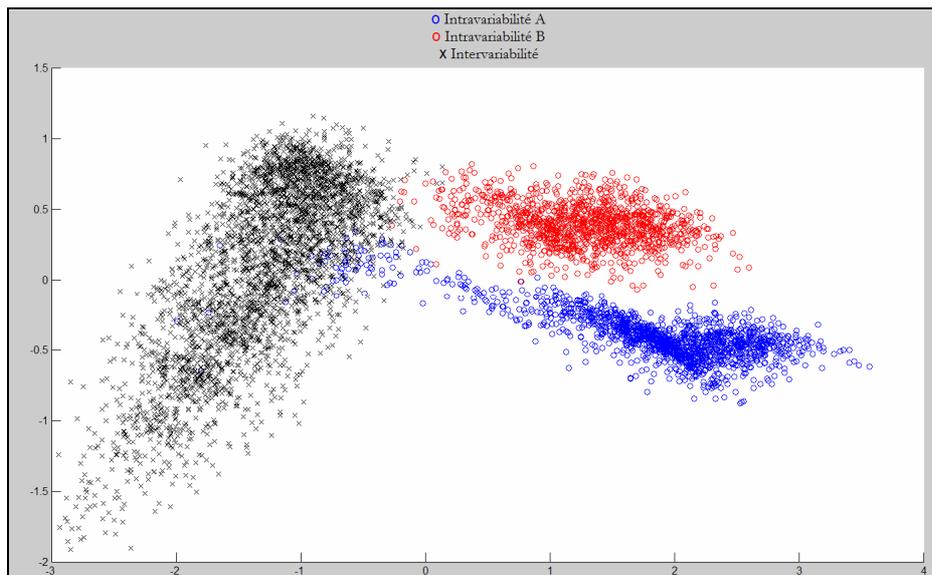


Figure 194

Distributions de l'intervariabilité (noir), de la première intravariabilité (bleu) et de la deuxième intravariabilité (rouge) pour la trace de la tête de culasse.

Le même « échange » d'intravariabilité qui a été effectué pour calculer les LR destinés à l'établissement du Tippett plot pour la fusion des traces a également été effectué pour la trace de la tête de culasse. Les résultats montrent que le RMED augmente de 0.51% à 7.1%, alors que le RMEP diminue de 0.57% à 0.09% pour la deuxième arme et que les valeurs des rapports de vraisemblance diminuent drastiquement en même temps sous H_p (en vert) et H_d (en rouge). Le Tippett plot pour la première arme a été présenté auparavant (Figure 161). Celui de la deuxième arme ainsi que le Tippett plot créé par l'« échange » de l'intravariabilité peuvent être appréciés ci-dessous (Figure 195 et Figure 196).

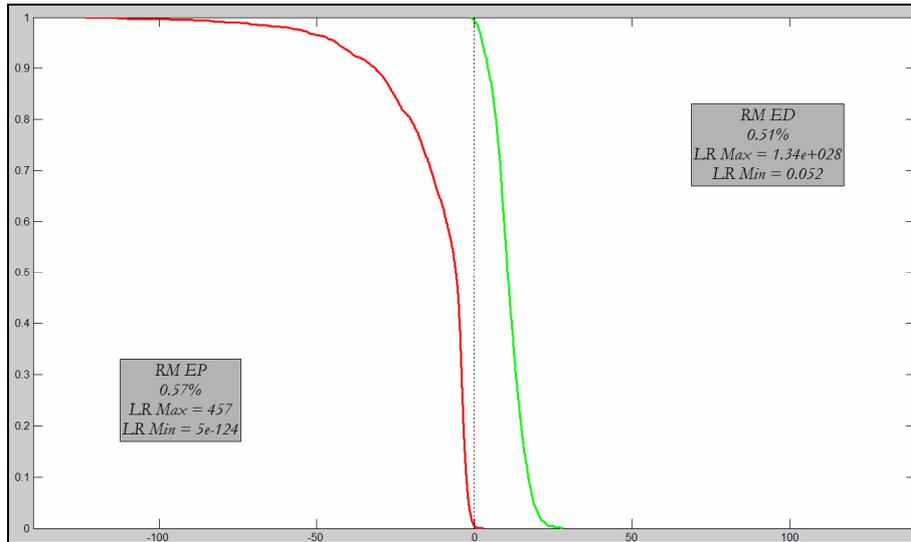


Figure 195

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée pour la deuxième arme de type SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

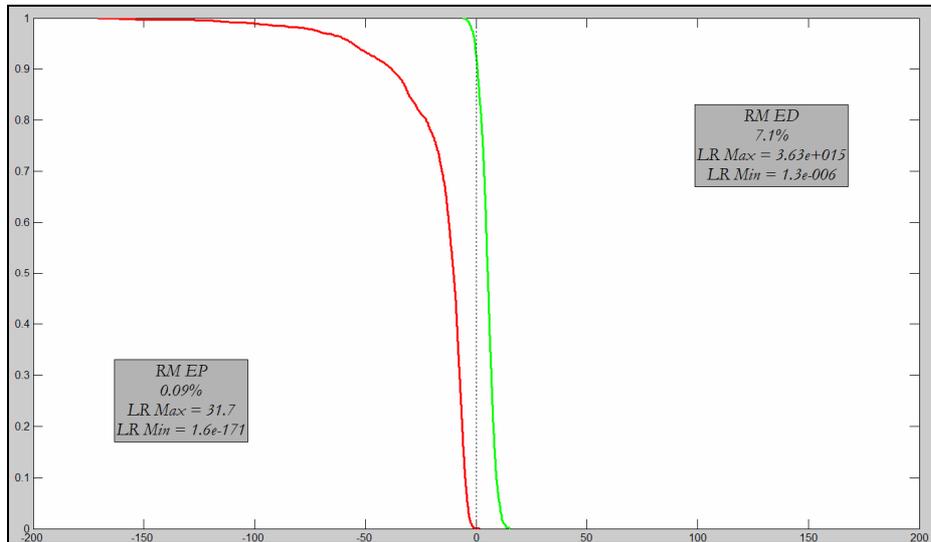


Figure 196

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée de la première arme de type SIG Sauer, mais en utilisant les données relatives à l'intravariabilité de la deuxième arme de type SIG Sauer pour calculer les LR. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les différences au niveau des distributions relatives à la tête de culasse peuvent être expliquées par la qualité de l'impression des traces laissées par les deux armes. En effet, une arme laisse des traces de la tête de culasse plus marquées et ayant une quantité de stries plus importante (Figure 194 – rouge) par rapport à l'autre (Figure 194 – bleue). Cette dernière présente également plus d'observations à l'intérieur du nuage relatif à l'intervariabilité ; cet élément se traduit logiquement par un taux de RMED plus élevé.

Les distributions des deux armes se ressemblent d'avantage si les résultats de la fusion des traces sont pris en considération (Figure 191). Ceci peut être expliqué par le fait que les métriques « choisies » par la PCA sont les plus discriminantes par rapport à l'intervariabilité (une pour le percuteur et une pour la tête de culasse). Parmi les deux métriques décrivant les nuages de points dans l'image ci-dessus (Figure 194), la métrique la plus discriminante est probablement, celle représentée sur l'axe des abscisses, similaire pour les deux intravariabilité.

Enfin, en ce qui concerne les distributions de l'intravariabilité relatives aux traces du percuteur laissées par les deux armes SIG Sauer, elles se ressemblent beaucoup au niveau de la forme et de leur emplacement. En raison de l'impossibilité de les différencier sur le même graphique, les distributions relatives aux traces du percuteur ne sont pas illustrées. Les similitudes observées entre les deux intravariabilités s'expliquent facilement par les ressemblances qui existent entre les traces du percuteur laissées par ces deux armes ; elles sont relativement lisses et sans reliefs particuliers (cf. Annexe C.1).

Ces résultats mettent en évidence les dangers auxquels l'examineur peut être confronté lorsqu'il envisage de généraliser l'intravariabilité d'une arme par les données provenant des comparaisons de douilles tirées par une autre arme. Ceci implique que, pour chaque cas, mettant en jeu une nouvelle arme, il serait judicieux de rebâtir une intravariabilité propre à l'arme en question. Ce sujet sera discuté ultérieurement dans la section N°11.4.6.

10.8 Simulation de cas d'un point de vue opérationnel

Pour les armes de type SIG Sauer, deux armes différentes⁵⁴ ont été employées pour simuler des cas d'un point de vue opérationnel. Pour ce genre de simulation, on admet qu'une douille indiciaire Geco Sintox® calibre 9 mm Parabellum est trouvée sur les lieux d'un crime et qu'une arme de type SIG Sauer 9 mm Parabellum est séquestrée chez un suspect. Sept tirs de comparaison sont effectués avec l'arme du suspect afin d'établir l'intravariabilité étant donné l'impossibilité de la généraliser d'une arme à l'autre. En utilisant les données collectées pour les pistolets semi-automatiques SIG Sauer (cf. Section N°10.4.1), les rapports de vraisemblance sont ainsi calculés à partir des comparaisons entre la douille indiciaire et toutes les douilles de référence.

Les résultats suivants se réfèrent à une des deux armes, les informations concernant la deuxième arme peuvent être consultés en annexe (cf. Annexe B.6). L'image ci-dessous représente les modélisations paramétriques relatives respectivement à l'intravariabilité de l'arme séquestrée (Figure 197 – bleu) et à l'intervariabilité de la population potentielle d'armes (Figure 197 – rouge).

⁵⁴ A noter que les deux armes en question n'ont jamais été impliquées dans les résultats présentés jusqu'ici.

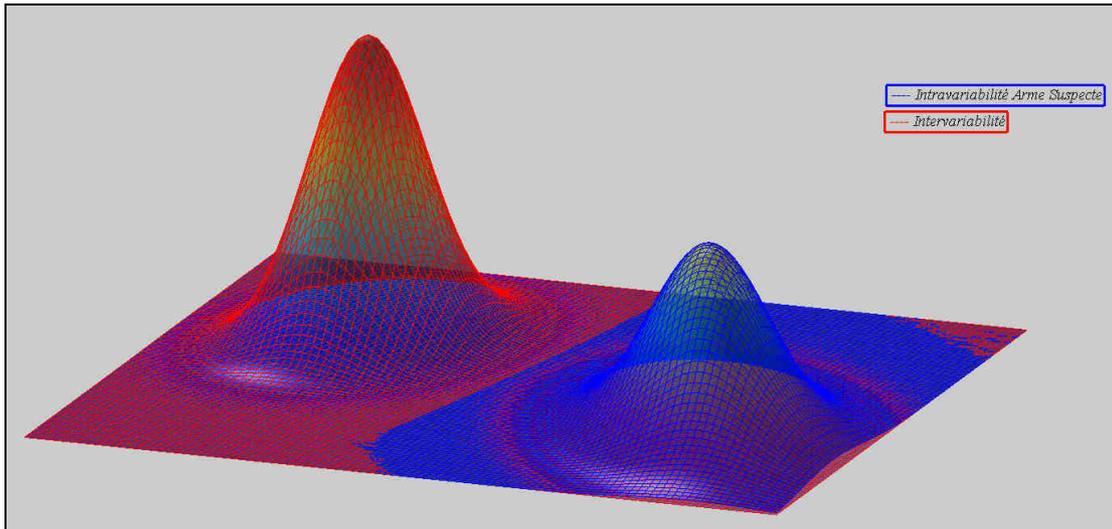


Figure 197

Loi normale bivariée des valeurs de proximité obtenues à partir de la fusion des traces pour l'intravariabilité de l'arme du suspect (bleu) et l'intervariabilité représentant la population potentielle (rouge).

Chacune des douilles tirées avec l'arme du suspect est comparée à la douille indiciaire retrouvée sur la scène de crime. Les sept *scores* résultant de ces comparaisons sont exposés, dans l'image ci-dessous (Figure 198), sous la forme de cercles noirs par rapport aux distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité qui se présentent respectivement sous la forme de croix bleues et rouges.

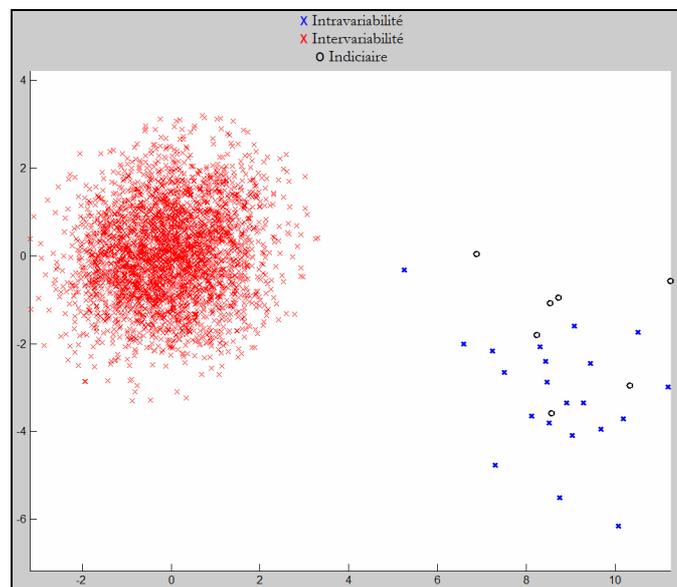


Figure 198

Distributions relatives à l'intervariabilité (rouge), à l'intravariabilité de l'arme du suspect (bleu) et les comparaisons entre la douille indiciaire et celles de comparaison (noir).

Les sept rapports de vraisemblance sont tous largement supérieurs à 1, avec une valeur maximal de $2.4764e+030$ et une valeur minimale de $1.1227e+016$. Cela signifie, que si la douille considérée comme « indiciaire » aurait été retrouvée sur les lieux d'un crime et que des tirs de comparaisons auraient pu être réalisés dans ces conditions, les comparaisons entre la douille indiciaire et celles de comparaison auraient toujours soutenu largement l'hypothèse

H_p , à savoir l'hypothèse correcte. Un seul bémol pour cette procédure, la douille indiciaire ainsi que celle de comparaison ont été produites dans des conditions complètement contrôlées et sans délai particulier entre le tir indiciaire et les autres tirs. Or, dans les affaires réelles, les conditions sont souvent différentes.

10.9 Valeurs aberrantes – *Les outliers*

Pour chacune des représentations effectuées dans le cadre de cette recherche (cf. Chapitres 10.2, 10.3 et 10.4), des valeurs ont été considérées comme aberrantes et ont été exclues pendant la modélisation des fonctions de densité. Ces données, appelées *outliers*, ont, par contre, été prises en considération pour l'établissement des Tippett plots. Les observations effectuées sur ces données particulières ont montré que leur réinsertion influence de manière plus importante le RMED que le RMEP. Ceci est dû principalement au fait qu'il y a plus d'*outliers* pour la distribution de l'intravariabilité que celle de l'intervariabilité. Il s'agit d'un résultat plutôt attendu car, par exemple, pour l'intravariabilité, les valeurs aberrantes sont normalement des données qui s'éloignent du nuage et qui se dirigent vers la distribution de l'intervariabilité. En revanche, pour l'intervariabilité, ces données sont plutôt des valeurs qui s'éloignent du nuage de l'intervariabilité mais qui ne se reprochent pas forcément du nuage de l'intravariabilité.

10.10 Normalité des distributions

La modélisation des données par une loi paramétrique, telle que la loi normale bivariée, est recommandée lorsque les données à disposition sont en nombre insuffisant pour être modélisées au moyen du KDE. Cette application prend tout son sens lors de simulations au niveau opérationnel. En effet, pour des questions pratiques liées à l'enquête, il est difficile d'imaginer la mise en place d'une intravariabilité à partir d'un grand nombre de douilles de comparaison. Plus le nombre de douilles de comparaison est grand, plus le temps nécessaire pour effectuer les mesures et la totalité des comparaisons est important. De ce point de vue, il est facile de justifier l'emploi d'un tel type de modélisation dans les cas particuliers de la simulation des cas forensiques ou dans des cas opérationnels, où le nombre de douilles utilisées pour constituer l'intravariabilité reste relativement petit.

Chaque fois qu'une distribution a été modélisée par une loi normale, le test de Mardia a été effectué afin de tester la normalité des données. Les résultats du test ont montré que, pour des distributions avec un grand nombre de données, les conditions de normalité ne sont que rarement remplies. En revanche, pour des distributions avec un nombre limité de données, comme pour la comparaison des 7 douilles entre elles, le test de Mardia était accepté dans la plupart des cas. Ce phénomène a pu être observé, par exemple, pendant la simulation de cas forensiques où les distributions de l'intravariabilité sont composées uniquement d'une vingtaine de points.

11 DISCUSSION

Ces dernières années, le domaine d'identification des armes à feu a dû faire face à diverses critiques soulevées par des auteurs impliqués le plus souvent aux Etats-Unis [Schwartz, 2005 et NRC, 2009]. Ces critiques portent surtout sur la validité des lois fondamentales relatives à la spécificité et la reproductibilité des traces, sur les besoins croissants de quantifier statistiquement la probabilité de correspondance fortuite et sur le manque d'objectivité omniprésent dans le domaine de l'identification des armes à feu.

Ces critiques ne se sont pas manifestées uniquement au niveau de la littérature, mais elles se sont aussi souvent concrétisées dans les tribunaux. Les cas au niveau pénal, tel que le cas opposant les Etats-Unis à Chaz Glynn⁵⁵ (cf. Section N°2.6), montrent de manière claire que le domaine de l'identification n'est pas à l'abri de ces attaques et qu'il doit évoluer afin de contrer à ces critiques.

Afin de répondre à ces critiques, cette recherche a eu comme but la mise en place d'un modèle basé sur une approche statistique permettant une interprétation objective et reproductible des résultats d'une comparaison entre les traces présentes sur des douilles. Pour ce faire, un système de comparaison assisté par un ordinateur et basé sur la saisie tridimensionnelle de surface a été mis en place. Le système de comparaison développé est couplé à un modèle statistique visant à l'obtention d'un rapport de vraisemblance.

11.1 Saisie tridimensionnelle de surface

Malgré le fait que les récents développements technologiques permettent d'acquérir des images en deux dimensions de haute qualité, la saisie tridimensionnelle de surface a été employée pour l'accomplissement de cette recherche. Cela a permis d'établir des fondements stables, en termes de qualité et de reproductibilité des mesures, sur lesquels baser l'entièreté de l'étude.

11.1.1 Technologie 3D

Un des plus grands avantages de cette technologie réside dans la reproductibilité des mesures. En effet, les différences entre deux mesures effectuées sur le même sujet ne montrent que des différences ponctuelles, et la plupart sont situées dans des endroits non pertinents d'un point de vue forensique, à savoir les bords de la capsule d'amorçage. L'emploi d'une technique peu reproductible n'aurait jamais permis d'atteindre un tel pouvoir discriminatoire, car une mauvaise reproductibilité des mesures engendre automatiquement une mauvaise reproductibilité des résultats pour une même douille. Les répercussions sur la distribution relative à l'intravariabilité sont facilement imaginables.

Un autre point crucial lié à l'acquisition des données en 3D est la possibilité d'accéder à la troisième dimension d'un objet. Les informations relatives au relief de certaines

⁵⁵ *United States vs Chaz Glynn*, Defendant No06 Cr. 580 (JSR – 2008).

caractéristiques, ainsi qu'à la profondeur de certaines formes restent des données qui doivent être exploités à des fins de comparaison et qui peuvent éventuellement faire la différence par rapport aux technologies en deux dimensions. En effet, il s'agit de caractéristiques des traces qui peuvent qu'accroître la discrimination. Ce phénomène, même s'il n'a pas pu être démontré grâce à une confrontation avec un système basé sur des images 2D, est probablement plus marqué pour des traces comme celles du perceur. Pour un enregistrement sur une image digitale en 2D, l'information intrinsèque à ce genre de trace reste, à cause de leur nature, difficilement accessible dans sa totalité, même à l'aide d'excellents éclairages. Certaines caractéristiques des traces présentes sur les douilles sont parfois pas ou peu visibles pendant l'observation traditionnelle. En utilisant la saisie tridimensionnelle de surface, ces informations particulières sont enregistrées et elles ne sont donc pas perdues. Elles peuvent être facilement exploitées ou supprimées, si désiré. Au contraire, sur une image en deux dimensions, si des caractéristiques ne sont pas mises en évidence pendant l'acquisition, elles sont perdues de manière irréversible.

Le potentiel de la saisie tridimensionnelle de surface appliquée aux traces sur les douilles a pu être démontré dans le cadre de ce travail. Malgré le fait qu'il s'agisse de technologies encore aujourd'hui difficilement accessibles pour un laboratoire forensique pour des raisons de coûts, elles permettent d'ouvrir des portes à un type d'analyse encore méconnu.

11.1.2 Profilomètre à détection confocale

Le profilomètre à détection confocale choisi, à savoir la station μ Scan[®] de Nanofocus AG, a permis de mesurer avec succès les traces habituellement présentes sur la capsule d'amorçage après un tir. Même si la qualité des mesures, ainsi que leur reproductibilité a été remarquable, des petits artefacts ont été mis en évidence, surtout sur les parois de la trace du perceur. L'influence de leur présence n'a pas pu être évaluée, mais il est tout à fait possible qu'elle ait eu un impact sur les résultats de certaines comparaisons, même après la suppression d'une partie des bords de la trace. Les algorithmes développés pour la comparaison ont été conçus de telle manière à négliger les grandes différences morphologiques entre traces, telles que celles causées par la présence de ces artefacts. Cela étant, en fonction de la quantité d'artefacts et de la morphologie de la trace, il est tout à fait possible que l'alignement ait pu être influencé négativement et impacter ainsi ultérieurement sur l'erreur métrique.

Un facteur, qui n'a pas eu un poids déterminant pour le choix de la technologie à employer lors de ce travail, mais qui pourrait avoir plus d'importance d'un point de vue opérationnel, est le temps nécessaire à l'acquisition des mesures. Malgré la bonne qualité des images 3D, cette technologie nécessite beaucoup de temps pour effectuer des mesures. Pour cette recherche, les mesures ont été effectuées avec une résolution de 3 μ m, qui a été, par la suite, diminuée à 6 μ m pour des raisons liées au développement algorithmique. Il pourrait donc être envisageable d'effectuer directement des mesures à 6 μ m en réduisant ainsi le temps de mesure à environ 30 min pour une capsule d'amorçage, à savoir la moitié du temps employé pour une mesure à 3 μ m.

Dans l'optique de poursuivre l'application des mesures 3D sur les traces présentes sur les douilles, certaines restrictions liées au profilomètre en question doivent être prises en considération. En effet, l'appareil employé possède des restrictions au niveau de la profondeur de champ, qui se trouve limitée à un maximum de 1 mm. Pour des traces telles que celles étudiées jusqu'à maintenant sur des munitions de calibre 9 mm Parabellum, cette limitation n'a pas eu d'influence car la profondeur des traces a toujours été largement

inférieur à 1 mm. Par contre, des armes de calibre plus important pourraient présenter des traces du percuteur trop profondes pour être mesurées par ce genre d'appareillage.

En ce qui concerne le système même, l'achat du profilomètre à détection confocale a été effectué en 2006. Depuis, l'évolution dans ce domaine a été impressionnante et à l'heure actuelle les performances des appareils employés pour la saisie topographique de surface sont nettement meilleures en termes de vitesse et de précision. Le nombre de compagnies s'intéressant aux applications des mesures 3D dans le domaine de la balistique a également augmenté. Il est possible d'imaginer que dans quelques années ce genre de technologie puisse effectuer les mesures sur des douilles et les comparer entre elles dans des temps drastiquement réduits par rapport à ceux employés pendant cette étude. Quelle que soit l'appareil de mesure employé, tant que les mesures tridimensionnelles peuvent être importées dans le programme utilisé pour la comparaison, la compatibilité avec les algorithmes employés dans cette recherche devrait être assurée.

11.2 Algorithmes de comparaison

Les algorithmes employés peuvent être partagés en trois catégories. Les traitements préliminaires qui permettent de sélectionner et mettre en évidence les caractéristiques des traces les plus pertinentes, le pré-alignement qui prépare les traces à l'étape finale de la comparaison, à savoir l'alignement.

11.2.1 Traitements préliminaires

Les traitements préliminaires peuvent être décrits comme l'étape permettant d'extraire les caractéristiques d'intérêt d'une trace présente sur une douille. Les traitements préliminaires sont donc une étape cruciale qui précède le processus de comparaison. En effet, cette étape permet non seulement d'atténuer les grandes fréquences d'une image, en mettant en évidence les caractéristiques plus fines des traces, mais également de supprimer les parties des traces qui ne doivent pas entrer en ligne de compte pendant l'alignement et ensuite pendant le calcul de l'erreur métrique. Une des plus grandes difficultés pendant la mise en place d'un tel système de comparaison reste le choix des caractéristiques à comparer. Un mauvais choix des caractéristiques ne permettra jamais d'atteindre un niveau de discrimination suffisant. C'est notamment le cas de la trainée du percuteur ; cette dernière est une trace laissée par le percuteur suite à la combustion de la poudre. Malgré que des stries soient parfois présentes à l'intérieur de la trainée, sa reproductibilité est plutôt mauvaise. Il a donc été décidé de l'éliminer complètement du processus de comparaison afin d'éviter qu'elle ait une mauvaise influence sur l'alignement et sur le calcul de l'erreur métrique.

Pendant le développement des algorithmes destinés à l'extraction des informations essentielles transmises par l'arme sur la douille, différents paramètres ont été évalués de manière empirique. Aucune étude spécifique n'a été entreprise afin de vérifier, de manière exhaustive, l'influence de changements au sein de ces paramètres sur les résultats. C'est notamment le cas pour le choix du seuil de coupage des fréquences. Il a été évalué en se basant sur la littérature, ainsi que sur une analyse visuelle des résultats. Un autre exemple concerne le facteur d'amplification des fréquences. Celui-ci a été choisi *ad hoc*.

11.2.2 Le pré-alignement

Malgré que parfois les algorithmes destinés à effectuer la dernière phase de l'alignement, à savoir un alignement fin et précis, permettent des poses initiales relativement éloignées, le pré-alignement reste une étape nécessaire dans le processus de comparaison. En effet, plus le pré-alignement est bien effectué et plus les chances d'obtenir un minima local seront faibles, comparées à celles d'obtenir le minima absolu. La probabilité que les algorithmes prévus pour aligner deux topographies atteignent leur but, ne dépendra pas seulement de la qualité du pré-alignement, mais également du type de traces. Des traces ayant plus de relief et des stries ou des caractéristiques plus évidentes ont plus de probabilité de s'aligner correctement par rapport à des traces plutôt lisses qui risquent de présenter des minima locaux plus facilement atteignables. Enfin, plus le résultat du pré-alignement est proche de la solution finale et plus le temps employé pour effectuer l'alignement sera réduit. C'est notamment le cas des alignements effectués au moyen de l'algorithme ICP. En effet, le nombre d'itérations à effectuer dépendra de la proximité entre la pose initiale et la solution finale recherchée par l'algorithme d'alignement.

11.2.3 Alignement – ICP (Iterative Closest Point)

L'emploi de l'algorithme ICP n'a pas eu de succès lors de son application sur des traces de la tête de culasse. Ce phénomène est principalement dû au manque de relief de ce type de trace. Les zones caractérisées par les reliefs les plus marqués restent soit les bords intérieurs (trace du percuteur), soit les stries. Selon les résultats obtenus, ce genre de relief n'est donc pas suffisant pour garantir un alignement correct lorsque les traces ne sont pas bien marquées. L'algorithme converge ainsi plus facilement dans un minima local, empêchant un alignement complet. Les erreurs métriques calculées par la suite ne reflètent donc pas correctement le niveau de ressemblance entre les deux traces.

Lorsque l'algorithme ICP a été appliqué aux traces du percuteur, les résultats étaient plus fiables par rapport à ceux obtenus sur les traces de la tête de culasse. Les traces du percuteur, caractérisées plus souvent par des formes en relief, se prêtent mieux à cette procédure. Plusieurs variantes de l'ICP ont été développées pour ce travail. Aucune différence significative, en termes d'alignement n'a pu être mise en évidence entre les différentes options testées. La seule différence réside dans le temps employé pour effectuer l'alignement. Certains algorithmes nécessitent tout simplement plus de temps que d'autres. Le choix a donc été effectué en fonction du rapport entre la qualité de l'alignement et le temps employé. À cause de la différence en termes de quantité de points nécessaires pour décrire la surface, le temps employé pour l'alignement des traces du percuteur reste relativement limité par rapport au temps nécessaire pour les traces laissées par la tête de culasse, quelle que soit la variante employée.

Le seul grand inconvénient de l'ICP, dans son application aux traces du percuteur, a été observé pendant l'alignement des traces laissées par les armes CZ. Les différences morphologiques, dues probablement à la qualité de l'impression, ou également en partie à la présence d'artéfacts, ont forcé l'algorithme à pivoter une trace sur l'autre pour minimiser l'erreur métrique. Ce phénomène s'est traduit par des grandes différences entre les deux images alignées. En effet, dans ce cas particulier, l'ICP a minimisé la distance métrique en donnant moins d'importance aux caractéristiques plus fines et plus d'importance aux grandes différences. Les erreurs engendrées par ce phénomène ont été également accentuées par

l'interpolation des points lors de leur projection dans le plan XY. Il s'agit donc d'un facteur à prendre en considération pour des éventuels développements futurs.

11.2.4 Alignement – Algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation a été testé avec succès pour l'alignement des traces de la tête de culasse. Le grand avantage de cet algorithme réside dans sa capacité à minimiser l'erreur métrique par rapport aux petites différences entre les traces, tout en atténuant l'influence des grandes différences morphologiques qui sont souvent représentées par des caractéristiques moins pertinentes. L'algorithme d'optimisation se focalise donc sur des stries plutôt que sur des structures moins intéressantes d'un point de vue forensique. Une des problématiques liées à cet algorithme réside dans le choix du seuil utilisée pour différencier les erreurs métriques plus petites des grandes différences entre deux traces. En fonction de la morphologie et la nature de la trace, le seuil doit être spécifiquement adapté pour assurer l'alignement des traces. Des recherches supplémentaires doivent donc être entreprises afin de définir la valeur du seuil de manière automatique et indépendante de la morphologie de la trace. En ce qui concerne la trace du percuteur, l'application de cet algorithme dans le cadre de cette trace n'a pas montré de meilleurs résultats par rapport à ceux obtenus par l'ICP. Il en résulte ainsi une complémentarité entre ces deux algorithmes.

L'algorithme utilisé exploite des formes géométriques, appelées « Simplex », pour se guider dans le bassin de convergence et minimiser ainsi la distance entre deux traces. D'autres algorithmes existent pour minimiser l'erreur métrique d'une fonction objective [Venkataraman, 2009]. Ces algorithmes diffèrent entre eux dans leur conception et dans les caractéristiques employées pour trouver le minima d'une fonction préalablement définie. La totalité des algorithmes utilisés pour le recalage d'images n'a pas pu être évidemment testée dans le cadre de cette étude. Mais il est tout à fait possible que certains d'eux puissent éventuellement trouver des applications dans ce domaine en augmentant la vitesse de convergence ou en améliorant la flexibilité et la versatilité de l'algorithme.

11.2.5 Correction des alignements

Quelle que soit la provenance des douilles (tirées par la même arme ou par des armes différentes), certaines comparaisons, qui ont abouties à un mauvais alignement, ont été alignées une seconde fois en partant d'un nouveau pré-alignement, établi manuellement. Etant donnée la quantité des comparaisons, à savoir, pour les pistolets SIG, plus de 5500 en tenant compte de l'intravariabilité des deux armes ainsi que de l'intervariabilité, il a été impossible de détecter et ensuite de corriger tous les mauvais alignements. Une partie des RMED ainsi que certaines valeurs aberrantes sous H_0 (hypothèse selon laquelle les douilles ont été tirées par des armes différentes) peuvent donc trouver une explication dans un alignement n'ayant pas aboutit au minima absolu. Dans certains cas, l'algorithme d'alignement n'est pas arrivé à aligner correctement les deux traces, malgré que le pré-alignement ait été corrigé. Ce phénomène a pu être observé lorsque la qualité des traces n'était pas suffisante ou lorsque les distances relatives aux traces plus fines n'ont pas pu être minimisées.

11.2.6 Métriques

Le choix des métriques représente un des points décisifs de la recherche. En effet, deux métriques différentes peuvent donner des résultats complètement différents pour un même ensemble de comparaisons. Ceci est dû au fait que les caractéristiques choisies pour quantifier la distance entre deux traces ne possèdent pas le même pouvoir discriminatoire. Lors de cette étude, certaines métriques se sont montrées, en fonction du cas, plus discriminantes que d'autres. Du fait que la discrimination d'une métrique est strictement liée aux caractéristiques employées pour la calculer, il est évident que la meilleure solution devrait prendre en considération uniquement les différences relatives aux traces propres à l'arme, en négligeant les informations moins pertinentes. Mais cela impliquerait une détection et une sélection préalable des caractéristiques d'intérêt ; tâche pas toujours triviale et difficilement envisageable de manière totalement automatique.

Sur la base du coefficient de discrimination (cf. Section N°8.3.1), parmi les six métriques prises en considération au début du travail, trois métriques ont été choisies pour la suite. Ces dernières sont basées respectivement sur la distance Euclidienne, sur l'indice de corrélation et sur la différence entre vecteurs normaux à la surface. Les tests préliminaires ont montré que les scores les plus discriminants étaient obtenus à l'aide des deux dernières métriques. Etant donné que le pouvoir discriminatoire des trois scores peut éventuellement varier en fonction du type de trace et parfois également en fonction de l'arme, il a été décidé de poursuivre le travail en gardant les trois métriques. Une telle procédure aurait pu être difficilement maintenue si une technique pouvant réduire le nombre de dimensions, telle que celle basée sur la PCA, n'avait pas été employée. Dans le cas particulier des armes CZ, cette procédure a permis d'optimiser la discrimination des données. En effet, dans ce cas particulier des armes possédant des traces du percuteur à cercles concentriques, la métrique basée sur la distance Euclidienne a montré un indice de discrimination plus élevé que la métrique basée sur l'indice de corrélation. Toujours dans ce cas, les vecteurs normaux fournissent la métrique la plus discriminante. Comme il a pu être observé, l'utilisation d'une métrique basée sur la distance Euclidienne se justifie d'avantage pour les traces du percuteur qui, afin de s'aligner, subissent des transformations dans l'espace en trois dimensions. En revanche, les traces de la tête de culasse s'alignent quant à elles sur le plan XY, et obtiennent une meilleure discrimination par l'emploi d'une métrique basée sur l'indice de corrélation plutôt que sur la distance Euclidienne. Ceci est principalement dû au fait que la distance Euclidienne est calculée entre un point dans une trace et le point le plus proche dans l'autre trace. Ceci ne signifie donc pas forcément que les deux points soient superposés.

Trois types de métriques, exploitant des principes complètement différents, ont été employés. La recherche d'autres procédures pour décrire une comparaison n'a pas été exhaustive ; il est donc tout à fait envisageable d'intégrer des nouvelles métriques dans le processus d'interprétation, afin d'accroître le pouvoir discriminatoire de la technique.

11.2.7 Vitesse de calcul

La vitesse du calcul n'a jamais été une priorité pour cette étude. Néanmoins, d'un point de vue plus opérationnel, une vitesse de calcul plus grande pourrait être nécessaire. Dans le but d'augmenter la vitesse de calcul, il serait possible d'agir sur plusieurs variables en même temps. Les deux facteurs qui influencent le plus la vitesse de calcul sont le langage employé pour la mise en place des algorithmes et la puissance de calcul de l'ordinateur. Les algorithmes ont été écrits en employant le langage utilisé par Matlab®. Malgré la facilité

d'emploi, ce dernier n'est de loin pas le langage le plus rapide en termes de calcul. D'un autre point de vue, des améliorations pourraient également être effectuées en optimisant le langage utilisé. En effet, la façon avec laquelle un problème algorithmique est abordé influencera forcément le temps nécessaire pour le calcul.

Le temps nécessaire pour effectuer une comparaison entre deux traces ne dépend pas seulement du code employé ou de l'ordinateur utilisé, mais il est également en fonction des traces comparées. Des traces tirées par la même arme possèdent normalement des similitudes ; la convergence vers le minima absolu se trouve donc accélérée. Au contraire, la comparaison entre deux traces présentant plusieurs différences morphologiques nécessite normalement plus de temps à cause des difficultés rencontrées pendant l'alignement.

Les algorithmes destinés à l'alignement et employés dans cette étude, possèdent une structure hiérarchique, permettant d'affiner la qualité de l'alignement, en passant d'un niveau de résolution relativement bas vers des niveaux plus élevés. Malgré le fait que les rotations et translations plus importantes ont lieu dans les premières phases de l'alignement, les étapes plus coûteuses en termes de temps de calcul sont celles qui s'effectuent à des niveaux de résolution plus élevés. Ces dernières affinent l'alignement, sans le modifier drastiquement. Afin de diminuer le temps employé pour une comparaison, il pourrait donc être envisageable de diminuer le nombre d'étapes du processus multirésolution. Un tel changement pourrait affecter la qualité des alignements. Ces derniers pourraient être légèrement moins précis ; mais le temps de calcul devrait diminuer considérablement. Afin de diminuer le temps requis pour effectuer une comparaison, il convient de trouver le bon équilibre entre le temps nécessaire pour effectuer le calcul et la perte de qualité au niveau des résultats.

11.3 Le rapport de vraisemblance

Dans la littérature, les premières applications du rapport de vraisemblance dans le domaine de l'identification des armes à feu remontent à plusieurs années [Bunch, 2000]. Même si, dans ce domaine, les qualités de cette approche ne sont que partiellement reconnues, l'emploi du rapport de vraisemblance possède plusieurs avantages. En premier lieu, pour exprimer les résultats d'une comparaison, même sans s'appuyer sur une approche numérique, l'emploi du rapport de vraisemblance permet de prendre en considération plusieurs paramètres en même temps. En effet, lors de l'établissement de l'intravariabilité et de l'intervariabilité, une multitude de facteurs, tels que la rareté des traces ainsi que la reproductibilité des ces dernières au sein d'une arme particulière, peuvent être prises en compte. En outre, le LR permet de s'exprimer sur les probabilités d'observer un certain niveau de ressemblance entre deux traces en évitant ainsi d'exprimer les conclusions en termes de probabilité à posteriori, en se substituant aux fonctions du juge et du tribunal.

La procédure employée pour calculer le rapport de vraisemblance, comme elle a été conçue dans cette étude, nécessite tout d'abord la diminution du nombre de dimensions au moyen de la PCA. Cette dernière permet de choisir celles qui sont les erreurs métriques plus discriminantes ainsi que de fusionner les résultats relatifs à la trace du percuteur à ceux de la tête de culasse. La modélisation des données à l'aide du KDE ou d'une loi normale bivariée permet enfin de calculer les densités de probabilité nécessaires pour l'extrapolation du rapport de vraisemblance.

11.3.1 L'analyse en composantes principales (PCA)

La PCA a été l'un des points importants dans le développement du modèle interprétatif basé sur le rapport de vraisemblance et utilisé lors de ce travail. L'existence de plusieurs métriques décrivant une comparaison rend difficile l'extrapolation d'un seul LR. Les résultats auraient également pu être montrés de manière séparée pour chaque métrique, mais avec les conséquences que ce choix aurait comportées. La possibilité de choisir, au moyen de la PCA, les deux dimensions, qui montrent une plus grande variabilité, a permis de maximiser le pouvoir discriminant de la technique. Cela parce que le choix des métriques n'est pas toujours le même et s'effectue en fonction de leur variabilité. En outre, la possibilité de pouvoir représenter les distributions en deux dimensions permet de garder un maximum de discrimination par rapport au cas unidimensionnel où une perte reste inévitable. Un autre grand avantage lié à l'emploi de cette procédure réside dans la fusion entre les résultats relatifs à la comparaison des deux traces. La fusion au moyen de la PCA permet de prendre en considération les deux dimensions ayant une plus grande variabilité pour l'ensemble des six *scores* résultants de la comparaison des traces du percuteur et de la tête de culasse. La séparation entre les distributions relatives à l'intravariabilité et l'intervariabilité se trouve normalement optimisée par rapport aux celles relatives aux traces prises en considération séparément. Enfin, un seul rapport de vraisemblance peut être employé pour décrire la comparaison des deux traces les plus exploitées en termes d'identification. Ceci trouve un intérêt d'un point de vue opérationnel où il est souhaité de connaître plutôt la valeur d'une comparaison pour la globalité des traces que pour les traces prises séparément.

11.3.2 Modélisation des données

Deux types de modélisation des données ont été employés afin d'obtenir les densités de probabilité nécessaires au calcul du rapport de vraisemblance : une modélisation non paramétrique (KDE) et une modélisation paramétrique (loi normale bivariée). Le KDE possède le grand avantage de modéliser fidèlement les données. Par contre, ce type de modélisation peut être difficilement employé lorsque le nombre de données est relativement limité. Dans ce cas de figure, l'emploi d'une modélisation paramétrique semble être plus adaptée. Un autre facteur important, lié à l'emploi du KDE, réside dans le fait que les valeurs des densités de probabilité en absence d'observation sont extrêmement basses. Ceci engendre des rapports de vraisemblance extrêmes. Ce problème est partiellement résolu par l'emploi de la loi normale bivariée. En effet, pour des zones caractérisées par des valeurs extrêmes avec peu d'observations, la loi normale bivariée possède des densités de probabilité légèrement plus importantes que celles du KDE. Malgré le fait que l'emploi d'une loi normale puisse modérer l'étendue des valeurs des LR, d'autres recherches devraient être effectuées afin de trouver des modélisations plus adaptées aux zones des courbes caractérisées par des valeurs extrêmes.

En ce qui concerne l'application de la loi normale bivariée, le test de Mardia a montré que lorsque le nombre de données est faible, la normalité des données est acceptée. En revanche, en ce qui concerne les distributions comportant plusieurs milliers de points, la normalité des données a rarement été observée (cf. Section N°10.10). L'emploi de la loi normale a trouvé également des limitations pour des distributions bimodales. Ces dernières se présentent habituellement sous la forme de deux modes. Il est donc difficile de justifier l'emploi d'une loi normale bivariée dans ce genre de cas, car les densités de probabilité s'en trouveraient complètement faussées par rapport à celles calculées par le KDE. Cela a été vérifié pour la distribution relative aux traces du percuteur de la première arme CZ où le taux d'erreur

forensique lorsque H_d est vérifiée monte pour la première arme de 2.2% à 40% suite à la modélisation par la loi normale (cf. Section N°10.2.2). Par rapport à des modélisations plus simples, la modélisation paramétrique d'une distribution bimodale en deux dimensions reste une tâche relativement difficile à accomplir correctement.

Des recherches supplémentaires pourraient donc se focaliser sur des lois paramétriques pouvant contourner les problèmes évoqués ci-dessus, à savoir, les valeurs extrêmes des courbes qui engendrent des rapports de vraisemblance anormalement élevés, ainsi que la forme particulière prise par certaines distributions.

11.3.3 L'influence des paramètres de lissage sur les résultats

La valeur du paramètre de lissage employé pour modéliser les données à l'aide du KDE a toujours été estimée au moyen d'une relation mathématique qui prend en considération simultanément la taille des données et la variance de ces dernières. Aucune étude approfondie n'a été effectuée dans le but d'investiguer l'influence de ce paramètre sur les résultats et en particulier sur l'étendue des rapports de vraisemblance et les taux d'erreur forensique.

Il s'agit donc d'un aspect qui pourrait être approfondi afin d'optimiser d'avantage le modèle statistique employé pendant cette recherche.

11.3.4 L'étendue des rapports de vraisemblance

Dans le paragraphe précédent la problématique liée à l'étendue des rapports de vraisemblance a été évoquée. La cause principale a été attribuée aux valeurs extrêmes des courbes ayant servi à la modélisation des données. Il est parfois difficile de juger la représentativité des rapports de vraisemblance lorsque les valeurs sont si élevées (ou si petites) ; mais il faut toujours garder à l'esprit que les valeurs sont calculées par rapport à la population potentielle utilisée pour bâtir l'intervariabilité. Si l'étendue des valeurs extrêmes est due principalement aux lois statistiques sous-jacentes, la rareté des traces dans la population potentielle, et donc la représentativité de cette dernière, peut également impacter sur l'ampleur des LR. En effet, si l'échantillon d'armes sélectionné est trop limité et ne représente pas correctement la population potentielle en question, il est possible que la probabilité associée au dénominateur du LR soit sous-estimée. Il n'est donc pas toujours surprenant d'observer des rapports de vraisemblance élevés ou très petits lorsque l'intervariabilité est composée d'un nombre restreint d'armes qui présentent des différences morphologiques évidentes. En effet, plus les différences morphologiques sont prononcées et plus la probabilité de correspondance fortuite diminue. En revanche, si la population potentielle en question comprenait des armes présentant des caractéristiques de sous – classe en commun, la probabilité associée au dénominateur du LR serait sûrement plus grande et les valeurs du LR moins extrêmes.

Malgré cela, les aspects liés au choix de la population potentielle ne se suffisent pas à eux-mêmes pour justifier des LR ayant des valeurs de l'ordre de 10^{60} . Les rapports de vraisemblance de cet ordre de grandeur sont causés, majoritairement, par des densités de probabilité peu réalistes et peu défendables d'un point de vue pratique. Des solutions statistiques plus appropriées doivent donc être investiguées.

11.4 Résultats obtenus

L'ensemble des comparaisons a pu être évalué au moyen de rapports de vraisemblance ainsi que par le biais des Tippett plots pour des traces prises distinctement les une des autres, mais également lorsqu'elles sont considérées en même temps.

11.4.1 La trace du percuteur

Malgré le fait que le nombre d'armes étudiées a été relativement limité (deux intravariabilités pour chaque type d'arme, c'est-à-dire deux armes de chaque type), les résultats ont montré que la valeur indicielle relative à la trace du percuteur dépend fortement du type d'arme, mais reste relativement similaire pour des armes appartenant à des modèles analogues. Les résultats obtenus pour les armes SIG Sauer et celles de type PPK confirment ces constatations. Les premières présentent souvent des percuteurs relativement lisses sans grands reliefs. Ce phénomène, observé sur les deux armes étudiées, se traduit par la difficulté de séparer les distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité. Ces résultats sont similaires aux conclusions qui auraient pu être effectuées par un expert en utilisant un microscope comparateur. En effet, l'absence de caractéristiques dites individuelles rend la prise de position concernant une éventuelle source commune difficile. L'évaluation des taux d'erreur forensique (RMED et RMEP) obtenus à l'aide de l'approche automatique n'a pas pu être corroborée de manière exhaustive à l'aide d'une étude au moyen des techniques de comparaison traditionnelles. Toutefois, des taux d'erreur forensique si élevés ne sont pas seulement le fruit du manque de différences entre traces laissées par des armes différentes, mais sont également la conséquence d'un certain nombre de mauvais alignements. Pour les armes de type PPK, les résultats reflètent correctement leur force indicielle et les différences visibles entre les traces. En effet, ces traces du percuteur sont caractérisées par des reliefs plus ou moins importants. Les douilles tirées par des armes différentes peuvent ainsi être facilement différenciées. Enfin, dans le cas particulier des traces laissées par les armes CZ, les résultats ne peuvent pas être comparés avec les observations effectuées sous un microscope comparateur. En effet, les traces du percuteur laissées par ce genre d'armes sont facilement différenciables à l'aide de l'approche traditionnelle, alors que le système n'a pas pu quantifier cette différence.

11.4.2 La trace de la tête de culasse

Sauf exception, la trace de la tête de culasse reste plus sélective que celle laissée par le percuteur. Comme prévu, la trace de la tête de culasse montre une variabilité importante entre armes différentes ainsi qu'une reproductibilité relativement bonne en fonction de l'arme et de la munition employée. La seule arme qui a présenté des taux d'erreur forensique élevés a été une des deux armes de type PPK. La reproduction des traces pour l'arme en question n'était pas très constante. Ce phénomène s'est traduit d'une part par l'augmentation de l'erreur métrique et d'autre part par des mauvais alignements. Ces facteurs additionnés ont engendré une distribution relative de l'intravariabilité plutôt large, ainsi que des taux de RMED et RMEP élevés. Dans le cas particulier des traces laissées par les armes SIG Sauer, des comparaisons à l'aide du microscope comparateur ont été effectuées dans le but de vérifier la présence d'éventuelles similitudes entre des traces laissées par des armes différentes. Malgré le fait que la relation entre la proximité du numéro de série et la consécutive pendant la fabrication n'ait pas pu être prouvée, les comparaisons se sont concentrées plutôt sur les armes présentant des numéros de série proches. Les observations effectuées pendant les

comparaisons ont montré que dans certains cas les traces de la tête de culasse présentaient quelques similitudes au niveau des stries, mais que le nombre de similitudes était largement inférieur à la quantité de différences présentes entre les traces (Figure 199). Lorsque des stries sont présentes, les différences morphologiques entre deux douilles tirées par des armes différentes sont relativement faciles à mettre en évidence.

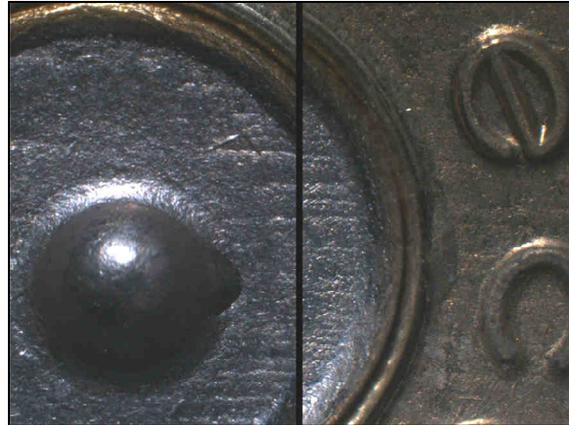


Figure 199

Comparaison entre deux traces laissées par deux pistolets SIG Sauer différents, mais ayant un numéro de série proche. Les traces sont différentes mais un nombre limité de similitudes peut être présent.

La situation est différente en cas d'absence de traces évidentes. C'est notamment le cas lorsque les capsules d'amorçage sont relativement lisses ou uniquement rugueuses en surface. Dans ce genre de cas, différencier les deux douilles sous le microscope n'est pas toujours une tâche évidente.

Les résultats obtenus mettent donc en avant les qualités du système de comparaison basé sur des mesures tridimensionnelles de surface qui a pu parfois apporter, par rapport à l'approche traditionnelle, des informations additionnelles, et cela surtout dans des cas où les stigmates de l'arme sont en faible nombre ou peu caractéristiques.

11.4.3 La fusion des traces

La possibilité d'appliquer la PCA pour réduire le nombre de dimensions a permis d'évaluer les résultats provenant de la tête de culasse en même temps que ceux du percuteur. La procédure mise en place prévoit que la PCA soit toujours appliquée simultanément aux six *scores* relatifs à la tête de culasse et au percuteur. Même s'il s'agit d'un phénomène plutôt rare, il est possible que les deux *scores* les plus discriminants puissent ne pas provenir de deux traces distinctes. Il s'agirait, par exemple, du cas où le *score* le plus discriminant d'une trace soit moins discriminant que le deuxième *score* le plus discriminant de l'autre trace. Ce phénomène n'a jamais été observé. En effet, chaque fusion des traces a engendrée une meilleure séparation des distributions (intravariabilité et intervariabilité) ainsi que des RMED et RMEP inférieurs à ceux observés lorsque les traces étaient prises séparément. Il est évident que la fusion des traces pourrait également se faire en choisissant toujours, au moyen de la PCA, le *score* présentant la plus grande variabilité pour chaque trace prise en considération de manière distincte.

Enfin, la possibilité de représenter les données par une distribution bivariée a permis de mettre en évidence l'excellent niveau de discrimination qui peut être atteint lorsque la trace du

percuteur et celle de la tête de culasse sont prises en considération simultanément. D'un point de vue purement lié à la valeur indicielle des traces, les résultats de cette étude ont démontré que la valeur probante extrapolée par la prise en compte simultanée des deux traces reste considérable et de grande importance en termes d'identification.

11.4.4 L'effet de la munition

Les résultats obtenus pour des comparaisons entre douilles tirées par la même arme, mais provenant de munitions différentes, ont mis en évidence les difficultés rencontrées par le système de comparaison. En effet, lorsque des munitions différentes sont employées, soit le système n'arrive pas à aligner les traces correctement à cause des grandes différences morphologiques, soit les différences entre les deux douilles sont tellement importantes que le *score* ne reflète pas les similitudes entre les caractéristiques dites individuelles. La difficulté rencontrée par le système dans ce cas particulier est liée à la nature des métriques employées pour décrire les similitudes entre deux traces. En effet, elles se basent sur une distance globale sans pouvoir pondérer le poids pour les caractéristiques propres à l'arme. Pour ce faire, une détection préalable des caractéristiques individuelles devrait être effectuée. Enfin, il faut mentionner que les munitions employées dans le cadre de cette recherche, comme les munitions fabriquées par Magtech, Sellier & Bellot, Norma, etc., présentent des capsules d'amorçage recouvertes de vernis ou ayant une impression du logo du fabricant. Les résultats ainsi obtenus ne sont que difficilement comparables à ceux obtenus avec une même munition. Des études ultérieures pourraient être effectuées afin d'évaluer davantage l'influence de la munition et les solutions envisageables pour améliorer la discrimination.

Malgré les améliorations qui peuvent être apportées au système de comparaison, des questions se posent concernant les applications d'un point de vue opérationnel. En effet, il a été démontré qu'il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'utiliser les *scores* provenant d'une comparaison entre douilles de munitions différentes afin de calculer un LR par le biais des données recueillis pendant cette recherche. Il est donc indispensable, à l'heure actuelle, de comparer des douilles provenant de la même munition.

Enfin, même si la comparaison à interpréter a été effectuée entre douilles provenant de la même munition, il est très probable que les données obtenues à l'aide d'une munition ne puissent pas être généralisées à d'autres munitions. En d'autres termes, les données obtenues pendant cette recherche avec une munition donnée (Geco Sintox[®] pour les armes SIG Sauer) ne pourraient théoriquement pas être utilisées pour évaluer une comparaison entre deux douilles d'une autre munition. Ceci devrait être dû aux différences morphologiques existantes entre les traces laissées sur munitions différentes. Des traces sur une munition peuvent donc se transférer d'une manière nette et avec une certaine profondeur. Ce n'est pas le cas pour toutes les munitions. Des erreurs métriques de gammes différentes peuvent donc apparaître si des munitions différentes sont employées. Afin d'investiguer d'avantage cette problématique, il faudrait construire plusieurs distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité. Pour chaque distribution une autre munition devrait être employée.

11.4.5 Simulation de cas forensiques

Le terme « simulation forensique » a été employé pour décrire un ensemble de simulations de cas en employant les données à disposition. Chaque douille faisant partie de l'intravariabilité à disposition, a été considérée, successivement, comme étant une douille indiciaire. Une

nouvelle intravariabilité a été construite pour chaque douille indiciaire à partir de 6 douilles de comparaison sélectionnées par un procédé randomisé ainsi que par la douille considérée comme indiciaire. L'intervariabilité a été créée à partir des comparaisons entre la douille considérée comme indiciaire et un ensemble de douilles tirées par des armes différentes. Des rapports de vraisemblance sont ainsi calculés pour chacune des hypothèses en jeu. L'ensemble des rapports de vraisemblance permet ensuite de créer un Tippett plot et de calculer les taux d'erreur forensique respectifs. Ces derniers, ainsi que l'étendue des rapports de vraisemblance, peuvent varier sensiblement d'une simulation à l'autre car 6 douilles sur 7 sont utilisées pour créer la distribution de l'intravariabilité sont choisies de manière randomisée dans l'échantillonnage des douilles à disposition. Cette procédure représente la façon la plus réaliste de calculer les rapports de vraisemblance. En effet, l'intervariabilité pour chaque simulation est construite en prenant comme référence la douille indiciaire. Cela permet de quantifier la rareté des traces indiciaires dans la population potentielle, contrairement à la procédure décrite à la section N°9.5.1, qui implique l'utilisation d'une intravariabilité et d'une intervariabilité définies comme « totales ». Dans ce dernier cas de figure, la probabilité de correspondance fortuite n'est pas directement en relation avec la douille indiciaire, mais représente la probabilité que deux douilles faisant partie de la population potentielles puissent présenter des similitudes.

En outre, pendant la mise en place des données relatives à l'intervariabilité, l'arme suspecte fait partie de l'ensemble des armes de la population potentielle choisie, en élargissant ainsi l'étendu de la distribution elle-même. Il n'est donc pas étonnant d'observer des taux d'erreurs forensiques plus élevés pour ce genre de simulation, que dans le cas où les distributions sont fabriquées à partir des comparaisons obtenues à partir de la totalité des combinaisons possibles.

Enfin, dans le cadre des simulations forensiques ou des simulations des cas d'un point de vue opérationnel, 7 douilles ont été employées pour modéliser la distribution de l'intravariabilité. Le choix du nombre de douilles a été principalement effectué en fonction du temps nécessaire pour collecter et comparer les douilles entre elles. En effet, d'un point de vue plutôt opérationnel, il n'est pas envisageable de comparer une grande quantité de douilles dans un temps relativement limité. Le choix s'est donc porté sur 7 douilles, car il s'agit d'un compromis entre le temps nécessaire pour comparer les douilles et la quantité de données à disposition pour la modélisation au moyen de la loi normale. Des essais préliminaires ont été effectués afin d'étudier l'influence du nombre de douilles sur les résultats. Les observations effectuées ont montré que le fait de varier sensiblement le nombre des douilles (5, 7, 9, etc.) n'influence pas significativement les résultats.

11.4.6 Généralisation de l'intravariabilité

Généraliser l'intravariabilité signifie pouvoir utiliser la distribution des données relative à l'intravariabilité d'une arme afin de calculer des rapports de vraisemblance pour n'importe quelle autre arme. Cette généralisation est théoriquement possible si les distributions de l'intravariabilité se ressemblent pour toutes les armes. Cette procédure trouve son intérêt dans le fait qu'il serait possible de construire une seule fois l'intravariabilité d'une arme avec une importante quantité de données et s'en servir pour d'autres armes.

La généralisation pourrait être envisagée entre des armes de même modèle ou de modèles similaires mais également entre des armes complètement différentes. En ce qui concerne la différence de distributions entre types d'armes complètement différentes, telles que celles

employées pour cette étude, à savoir les armes SIG Sauer, CZ et de type PPK, une généralisation de l'intravariabilité n'est pas possible. Même si ce résultat était attendu, les images ci-dessous, qui présentent sur un même graphique deux intravariabilités provenant d'armes de fabricants différents, montrent cette difficulté (Figure 200). Ces images ne représentent pas parfaitement la différence réelle existante entre les distributions. En effet, la transformation proposée par la PCA s'effectue uniquement sur la base des deux intravariabilité sans qu'aucune autre distribution, telle que l'intervariabilité, ne soit prise en considération (la PCA maximise donc la « discrimination » par rapport aux deux intravariabilité). Malgré cela, les différences restent significatives. À noter toutefois que les images ci-dessous représentent la différence entre deux nuages lorsque les deux métriques les moins discriminantes ont été choisies parmi les trois à disposition. La différence est d'autant plus flagrante si les métriques les plus discriminantes sont employées.

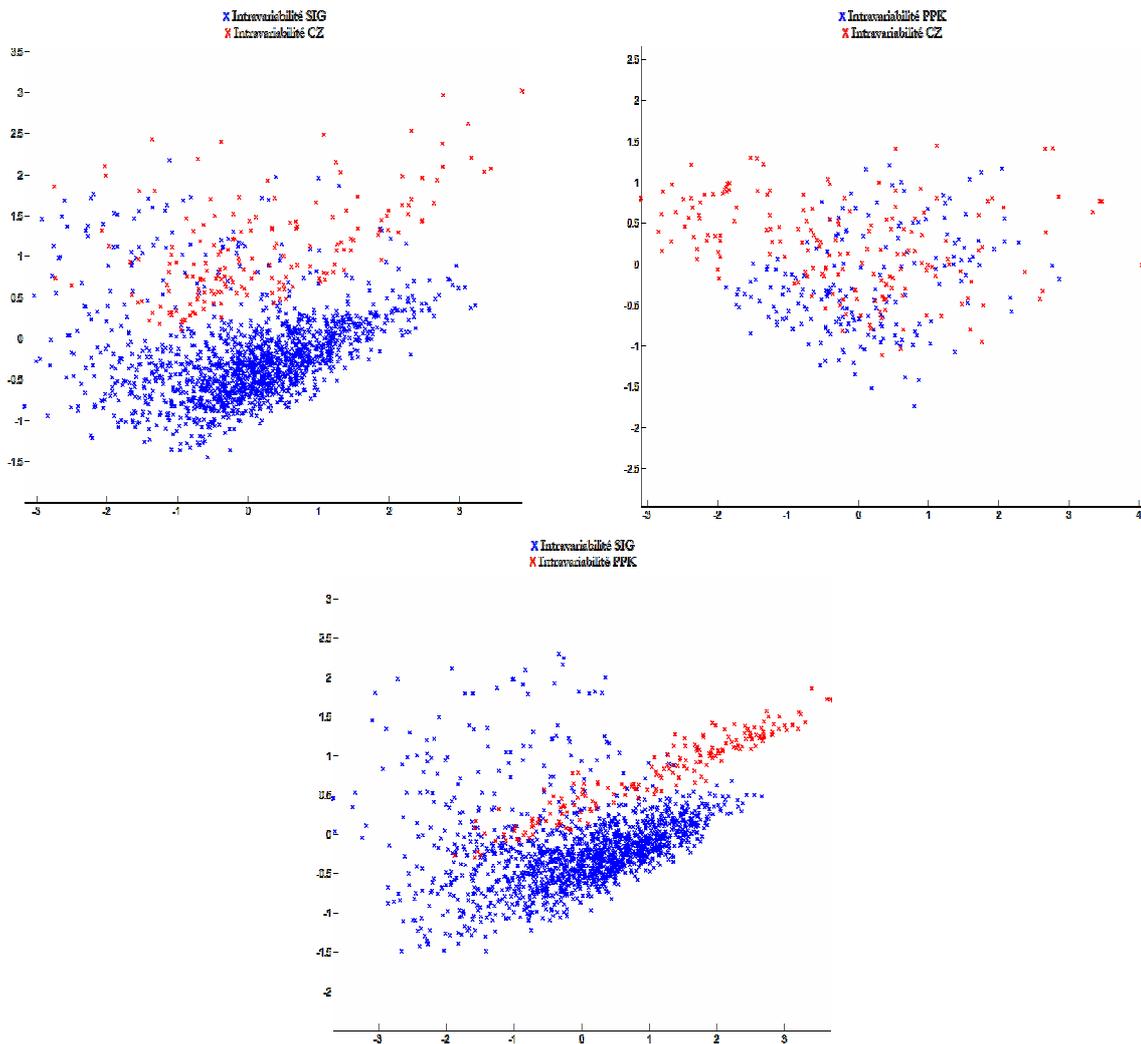


Figure 200

Intravariabilité d'armes SIG et CZ (à gauche), type PPK et CZ (à droite), SIG et type PPK (en bas) pour les données relatives à la fusion des traces.

Les traces laissées par ces armes sont différentes non seulement au niveau des caractéristiques les plus fines, mais également au niveau des formes des traces et des reliefs des topographies. Ces différences se reflètent également au niveau des métriques obtenues.

En ce qui concerne la comparaison entre intravariabilité pour des armes de même modèle ou modèle similaire (SIS Sauer P226, P220, etc.), les résultats obtenus ont montré que, malgré les similitudes souvent présentes entre les distributions, généraliser la distribution relative à l'intravariabilité pour un même type d'arme implique certains risques (cf. Section N°10.7). En effet, la généralisation de l'intravariabilité, peut modifier les taux d'erreur forensique ainsi que l'étendue des valeurs des rapports de vraisemblance. Les difficultés liées à l'utilisation d'une seule distribution générale résident dans le fait que chaque arme reproduit les traces d'une manière différente et avec une autre intensité entre un tir et l'autre. Ces différences sont accentuées par l'emploi de l'algorithme proposé pour la comparaison. En effet, la qualité des traces influence le taux de réussite en termes d'alignements. Il est donc possible qu'une arme, présentant une bonne reproductibilité mais un nombre de stries peu important et des stries peu marquées, obtienne une distribution plus dispersée par rapport à celle obtenue par une arme du même type ayant des traces de meilleure qualité et bien marquées. Chaque fois qu'une nouvelle arme est employée dans le but d'évaluer les résultats d'une comparaison, il serait donc judicieux de reconstruire une nouvelle intravariabilité afin d'éviter l'emploi de distributions construites à l'aide d'autres armes.

11.4.7 Généralisation de l'intervariabilité

Par analogie, généraliser l'intervariabilité signifie pouvoir utiliser la distribution des données relative à l'intervariabilité d'une population potentielle donnée afin de calculer des rapports de vraisemblance pour d'autres populations potentielles. Il est évident qu'il n'est pas possible de généraliser l'intervariabilité pour toute population potentielle car, dans certains cas, la phase interprétative nécessite le choix d'une population d'armes particulière et relativement restreinte par rapport au nombre d'armes utilisées pendant cette étude. Par contre, il est possible d'investiguer la possibilité de généraliser l'intervariabilité pour des lots d'armes composés de plusieurs armes de modèles similaires, comme c'est le cas des échantillonnages sélectionnés dans le cas présent. Il s'agit donc de vérifier si les résultats des comparaisons entre des douilles tirées par des armes différentes (mais de modèles similaires) peuvent montrer des allures similaires à des comparaisons effectuées entre des douilles tirées par des armes de fabricants différents.

En ce qui concerne la différence au niveau des distributions entre des types d'armes complètement différents, telles que ceux utilisés dans cette étude, une généralisation de l'intervariabilité n'est normalement pas envisageable. Les images ci-dessous, qui présentent sur un même graphique deux intervარიabilités provenant d'armes de fabricants différents, montrent cette difficulté (Figure 201). Les distributions ont été comparées selon la même procédure décrite dans la section précédente (cf. Section N°11.4.6).

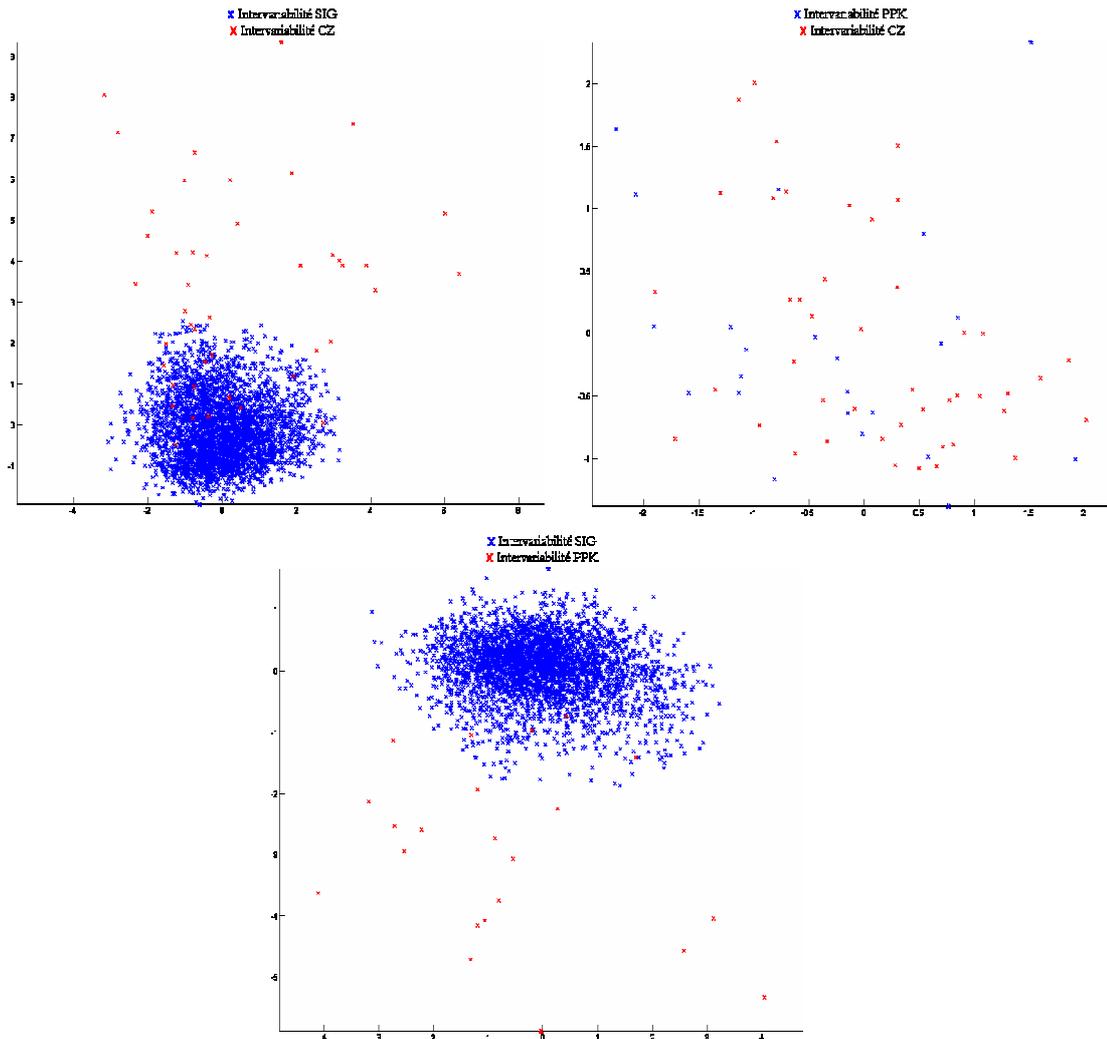


Figure 201

Intervariabilité d'armes SIG et CZ (à gauche), CZ et type PPK (à droite), SIG et type PPK (en bas) pour les données relatives à la fusion des traces.

Les différences sont plus évidentes lorsque les armes SIG sont comparées aux armes CZ ou de type PPK et moins marquées lorsque les données relatives aux armes CZ sont mises en relation avec celles des pistolets de type PPK. Ces résultats sont plutôt attendus car les traces laissées par les armes CZ et de type PPK sont caractérisées par des défauts plus évidents que celles des armes SIG et ceci d'autant plus pour la trace du percuteur que pour celle de la tête de culasse.

Il en résulte donc que l'intervariabilité est difficilement généralisable pour des traces n'ayant pas des morphologies similaires. Plus les défauts sur la capsule d'amorçage sont grossiers et plus les différences morphologiques entre les traces sont prononcées.

11.5 Considérations finales sur la technique de comparaison

Le système de comparaison assisté par ordinateur développé a montré ses capacités à atteindre un bon niveau de discrimination et à évaluer la valeur indicielle des comparaisons prises en considération ; les Tippett plot en sont les témoins. Malgré l'emploi de métriques

solides, un recouvrement partiel entre les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité a pu souvent être observé. Ce phénomène peut être expliqué principalement par deux causes : les alignements n'ayant pas complètement abouti et les différences morphologiques entre les traces laissées par la même arme⁵⁶. Les conséquences engendrées par l'élargissement de l'intravariabilité se sont souvent traduites par une augmentation, non seulement du RMED, mais également du RMEP. Cela s'explique par le fait, qu'à cause de l'extension de l'intravariabilité, les KNM (*known non match* – mise en correspondance entre douilles tirées par armes différentes) plus proches de la distribution de l'intravariabilité possèdent une densité de probabilité sous H_d plus petite que celles sous H_p .

En ce qui concerne le point le plus important lié à une technique de comparaison, à savoir le taux de RMEP, les résultats ont montré que les comparaisons entre KNM n'ont pu que rarement se rapprocher des résultats obtenus pour des KM aboutissants à un alignement correct (*known match* – mise en correspondance entre douilles tirées par la même arme), à l'exception du cas où les stigmates laissés par l'arme sont insuffisants pour permettre de différencier deux échantillons. C'est notamment le cas d'une grande partie des traces du percuteur laissées par les armes de type SIG Sauer.

Des observations détaillées ont également eu lieu afin de vérifier que les taux d'erreur forensique n'étaient pas caractérisés par des LR considérés comme « non fiables », à savoir des rapports de vraisemblance qui présentent simultanément des numérateurs et des dénominateurs extrêmement faibles. Il s'agit donc de comparaisons qui, d'un point de vue pratique, ne devraient pas supporter une hypothèse plutôt que l'autre. Les résultats de ces observations ont bien montré que le RMED et le RMEP ne sont pas affectés par ce genre de données. Cela signifie qu'il n'est pas possible d'atténuer les taux d'erreur forensique en isolant les résultats considérés comme « non fiables »; la cause principale réside donc ailleurs.

Exception faite des traces caractérisées par l'absence de stigmates, la seule solution pour diminuer d'avantage les taux d'erreur forensique, et en particulier le RMED, reste donc une amélioration au niveau de l'alignement. En effet, le système de comparaison assisté par ordinateur devrait limiter au maximum le nombre de comparaison n'aboutissant pas au minima absolu, à savoir à un alignement parfait.

11.6 Applicabilité de cette procédure

La procédure développée pendant cette recherche a été mise en place pour fournir des indications concernant la valeur d'une comparaison et ainsi aider un expert pendant le processus d'interprétation. Dans les paragraphes qui suivent, les difficultés pouvant être rencontrées lors de l'usage d'un tel système dans le cadre pratique sont prises en considération.

11.6.1 Limitations liées à la qualité des traces

Les traces étudiées, à savoir les traces de la tête de culasse et celle du percuteur, sont souvent utilisées pendant la comparaison afin de pouvoir se prononcer sur une éventuelle source

⁵⁶ Les différences morphologiques entre des traces laissées par la même arme peuvent provenir soit d'une mauvaise reproductibilité de l'arme soit de défauts morphologiques qui ne sont pas en relation avec l'arme, tels que des chocs qui ont eu lieu suite au tir.

commune. Parfois, la nature de ces traces ne permet pas de guider l'analyse d'un expert en identification. C'est notamment le cas où les stigmates laissés par l'arme sont en nombre insuffisant ou de mauvaise qualité. Dans ce genre de cas, l'expert base normalement ses conclusions sur d'autres traces présentes sur la douille, telle que la trace de l'extracteur ou de la chambre à cartouche. Ce genre de trace n'a pas pu être pris en considération dans le cadre de cette étude. Il en découle que, dans un tel cas, la prise de décision concernant une comparaison ne peut pas être effectuée en se basant sur les traces analysées à l'aide du modèle interprétatif proposé, mais doit être effectuée par un expert en exploitant uniquement d'autres stigmates. Afin d'étudier des traces moins communes, il faudrait effectuer des recherches ciblées sur des zones particulières de la douille et reconsidérer la structure de comparaison employée dans ce travail pour mieux l'adapter à un nouveau sujet.

Un autre aspect à prendre en considération, lorsque l'applicabilité de cette méthode est évoquée, concerne la comparaison des traces dans des cas considérés comme difficiles. Ceci pourrait être une comparaison qui présente, par exemple, des concordances d'une certaine valeur sur une partie de la trace de la tête de culasse, mais également plusieurs discordances sur le reste de la surface. Dans ce genre de situation, les discordances morphologiques peuvent éventuellement être expliquées par une mauvaise reproductibilité ou d'autres facteurs qui entrent en jeu pendant le tir. Un expert peut donc faire abstraction de ces différences et baser principalement les conclusions sur la partie de la trace présentant les similitudes. Ce genre de raisonnement ne peut pas être fait par le système de comparaison en question. La pondération des traces reste donc un facteur important lors de la phase interprétative. Cela signifie, qu'à l'heure actuelle, ce système de comparaison automatique ne peut être employé avec succès que pour des comparaisons considérées comme peu problématiques.

11.6.2 Limitations liées à l'insuffisance de données à disposition

D'autres facteurs entrant en ligne de compte au niveau de l'applicabilité concernent la généralisation des données ainsi que le type de munition employée. Dans les chapitres 11.4.4, 11.4.6 et 11.4.7 il a été montré que généraliser les données pour des armes différentes ou des munitions différentes n'est souvent pas possible. Malgré le fait que des investigations ultérieures doivent être effectuées dans ce sens, ces constatations limitent l'application de cette procédure dans des cas réels. Cela signifie que la quantité de données à disposition devrait être étendue afin de pouvoir faire face à des situations plus variées, par exemple lorsque des munitions autres que celles utilisées dans le cadre de cette recherche sont utilisées.

Sous réserve des cas tels que ceux évoqués ci-dessus, le système interprétatif développé peut être employé par un expert en armes à feu dans la phase interprétative. Le processus pourrait paraître relativement simple étant donné qu'il suffit de comparer les mesures tridimensionnelles respectivement d'une douille incriminée et d'une douille de référence pour obtenir un rapport de vraisemblance. Malgré cela, le passage entre l'obtention du LR et l'écriture des conclusions destinées à un tribunal reste relativement compliqué. Le prochain paragraphe se focalise donc sur différents cas de figure auxquels il est possible d'être confrontés lorsque l'on fait appel à un tel système interprétatif.

11.6.3 Applications concrètes dans l'optique d'une présentation au tribunal

Malgré le fait qu'il s'agisse d'une constatation évidente, ce système peut être employé par des experts qui ont la volonté de prononcer des conclusions à l'aide de termes probabilistes sous

la forme d'un rapport de vraisemblance. Le système développé a été conçu dans le but d'être un support pour l'expert. Lorsqu'un tel système de comparaison est utilisé afin de donner des conclusions concernant une éventuelle source commune entre deux douilles, l'expert en arme à feu ne peut pas se baser uniquement sur ses observations au microscope comparateur, ou uniquement sur les résultats du système. Est-il donc possible de combiner le rapport de vraisemblance proposé par le système de comparaison automatique avec les observations effectuées par l'expert ? Si oui, de quelle manière et sous réserve de quelles restrictions ?

Les limitations du système évoquées ci-dessus (cf. Sections N°11.6.1 et 11.6.2) montrent que l'application d'une telle procédure n'est pas universelle. Cela ne signifie pas que le système ne doit pas être employé, mais simplement que la fiabilité des résultats doit être appréciée au cas par cas. Les cas de figure suivants montrent quels sont les points importants à prendre en considération afin de présenter les résultats dans le cadre d'une expertise.

Dans chaque cas évoqué ci-dessous, une douille Geco Sintox[®] ainsi qu'un pistolet SIG Sauer P226 sont retrouvés sur les lieux d'un meurtre. Sept tirs de comparaison sont effectués avec l'arme en question en utilisant la même munition utilisée pour le tir incriminé. Les caractéristiques de classe concordent entre les différentes douilles en question. Le travail de l'expert chargé de l'affaire se présente donc en deux parties distinctes :

- A. La comparaison au microscope comparateur de toutes les traces présentes sur les douilles de référence, ainsi que la comparaison entre la douille indiciaire et celles de comparaison.
- B. La mesure tridimensionnelle de la capsule d'amorçage de la totalité des douilles en question. Les résultats des comparaisons entre les douilles de comparaison sont utilisés pour établir la distribution relative à l'intravariabilité. En revanche, les données relatives à l'intervariabilité sont tirées des comparaisons effectuées pendant l'étude en question (cf. Section N°10.4.1). Enfin, la douille indiciaire est comparée aux douilles de référence afin de pouvoir calculer les LR respectifs.

Cas de figure N°1

- A. La comparaison effectuée à l'aide du microscope comparateur a mis en évidence une intravariabilité de l'arme relativement limitée pour la trace du percuteur et celle de la tête de culasse. Les traces de l'extracteur et de l'éjecteur montrent une variabilité plus prononcée et des marques moins informatives. Les autres traces sont inexploitable. La comparaison entre la douille indiciaire et une douille de comparaison (celle montrant le meilleur niveau de concordance) montre des concordances au niveau de quelques défauts dans la trace du percuteur ainsi qu'un nombre limité de stries au niveau de la trace de la tête de culasse (Figure 202 – Flèches rouges). La comparaison des traces de l'éjecteur et de l'extracteur ne montre aucune similitude particulière. L'expert évalue subjectivement un rapport de vraisemblance en se basant sur une reproductibilité des traces plutôt constante et sur leur rareté, qui, selon son expérience, sont plutôt modérée. Selon ses observations, la comparaison de la trace de la tête de culasse n'est pas très informative car peu de stries concordent et des différences sont observées au niveau de certaines stries très fines résultantes de l'éjection de la douille (Figure 202 – Flèche bleue). En revanche, les concordances observées à l'intérieur de la trace du percuteur sont plus solides. L'expert penche ainsi pour une source commune mais reste discret dans ses conclusions car les caractéristiques dites individuelles observées à l'aide du microscope comparateur

sont en nombre limité et pas d'une grande spécificité. Qualitativement, ses conclusions pourraient être les suivantes :

«Les observations effectuées soutiennent l'hypothèse selon laquelle la douille indiciaire ainsi que la douille de comparaison ont été tirées par l'arme retrouvée sur les lieux plutôt que par une autre arme⁵⁷. Le rapport de vraisemblance estimé se situe entre 100 et 1000».

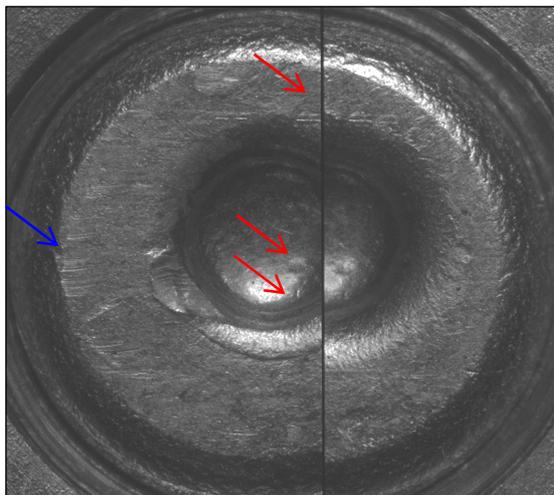


Figure 202

Image montrant la comparaison entre la douille indiciaire (à gauche) et une douille de comparaison (à droite). Les flèches rouges mettent en évidence les caractéristiques prises en considération par l'expert. La flèche bleue montre des stries inexistantes sur l'autre douille.

B. La douille indiciaire est comparée à la même douille de comparaison utilisée par l'expert pendant la comparaison au microscope. Les LR pour le percuteur, la tête de culasse et la fusion des traces sont respectivement de $5.2^e +004$, 1.56 et $3.4^e +004$.

Les rapports de vraisemblance calculés par le système sont compatibles avec les observations effectuées par l'expert ; le percuteur possède plus de défauts que la tête de culasse, il est donc normal que son LR soit plus élevé. En revanche, en ce qui concerne les conclusions sur la totalité des traces, le LR calculé par le système soutient l'hypothèse du procureur d'une manière plus prononcée par rapport aux conclusions exposées par l'expert, car, selon le système, il est 34'000 fois plus probable d'observer ce niveau de ressemblance entre deux douilles si elles ont été tirées par la même arme plutôt que par une autre arme.

Dans ce cas de figure, les conclusions pour un rapport d'expertise pourraient être présentées par le biais du rapport de vraisemblance calculé par le système car ce dernier est basé sur un procédé statistique beaucoup plus solide et complètement reproductible par rapport à l'approche subjective proposée par l'expert. Malgré cela, il faut s'assurer que le système ait été mis dans des conditions adéquates pour fournir un résultat fiable et il faut également rendre attentif le destinataire du rapport d'expertise des taux d'erreurs liés à la technique en question.

Concernant la validité du LR calculé, les images ci-dessous (Figure 203) montrent les mesures tridimensionnelles des deux douilles en question (Figure 202). La surface de la capsule d'amorçage ne possède pas des traces parasites particulières ou des zones présentant des

⁵⁷ Une remarque devrait être effectuée afin de préciser par rapport à quel type de population potentielle cette conclusion se réfère.

différences morphologiques évidentes (cf. Section N°11.6.1). Dans le cas de douilles tirées par la même arme, des différences évidentes entre traces peuvent parfois être expliquées par certains facteurs entrant en ligne de compte pendant le tir. Ce type de différence peut être pondéré par l'expert contrairement au système de comparaison automatique qui ne peut pas en faire la différence. Dans le cas présent, la qualité des traces permet donc au système d'être dans des conditions adéquates pour rendre un résultat fiable, surtout pour la trace du percuteur.

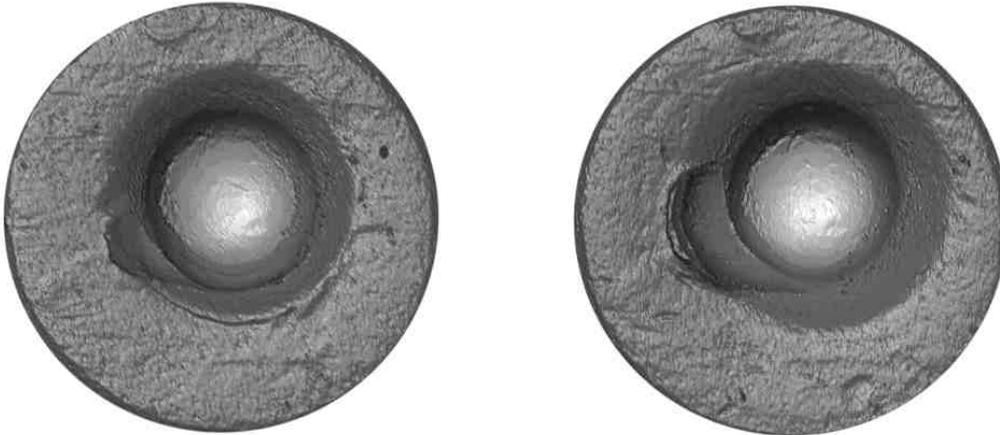


Figure 203

Images des mesures tridimensionnelles de la capsule d'amorçage de la douille indiciaire (à gauche) et de la douille de comparaison (à droite).

La fiabilité des résultats est d'autant plus soutenue par le fait que les coordonnées dictées par le résultat de la comparaison entre la douille indiciaire et celle de comparaison se trouvent comprises dans la distribution relative à l'intravariabilité et non dans des zones caractérisées par des valeurs extrêmes des courbes (Figure 204).

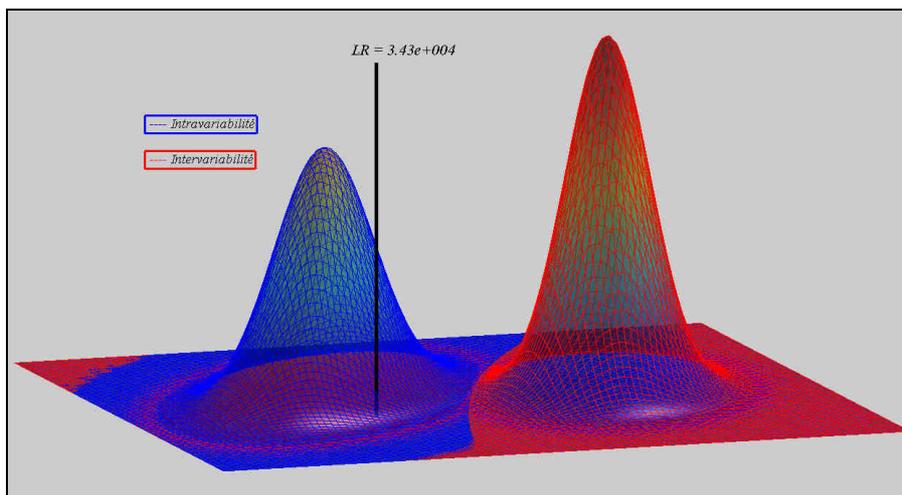


Figure 204

Modélisation par le biais d'une loi normale bivariée des distributions relative à l'intravariabilité de l'arme retrouvée sur les lieux (bleue) et à l'intervariabilité (rouge). La ligne noire indique les coordonnées auxquelles le LR est calculé.

Enfin, un dernier paramètre doit être pris en considération pour la présentation des résultats destinée à un tribunal, à savoir le taux d'erreur lié à la technique en question. Dans le cas

présent, l'attention se focalise sur la probabilité que le LR calculé ait été généré suite à une comparaison entre douilles tirées par des armes différentes, à savoir le RMEP. Pour une arme SIG Sauer le plus grand taux d'erreur forensique observé lorsque H_d est vérifiée a été de 0.09% avec un LR maximal de $2.4^e +003$ (cf. Annexe B.3.1). Cela signifie qu'il n'a jamais été observé une comparaison entre douilles tirées par des armes différentes, résultant en une erreur forensique, tel que celui obtenu pour la comparaison en question ($3.4^e +004$). Malgré que des discussions puissent naître concernant le niveau de confiance à accorder à cette constatation, il s'agit d'une information nécessaire pour un tribunal afin de juger de la fiabilité à accorder aux résultats. Dans le cas en question, le rapport de vraisemblance calculé par le système peut donc être utilisé dans un rapport d'expertise car il s'agit d'un résultat considéré comme fiable et basé sur une procédure solide d'un point de vue juridique.

Cas de figure N°2

- A. La comparaison effectuée à l'aide du microscope comparateur a mis en évidence une reproductibilité relativement constante pour l'ensemble des traces. La comparaison entre la douille indiciaire et une douille de comparaison montre des concordances au niveau des stries de la trace de la tête de culasse. Ces dernières se présentent sous la forme de stries bien marquées et bien espacées (Figure 205). En revanche, la comparaison de la trace du percuteur et des autres traces montre des différences évidentes.

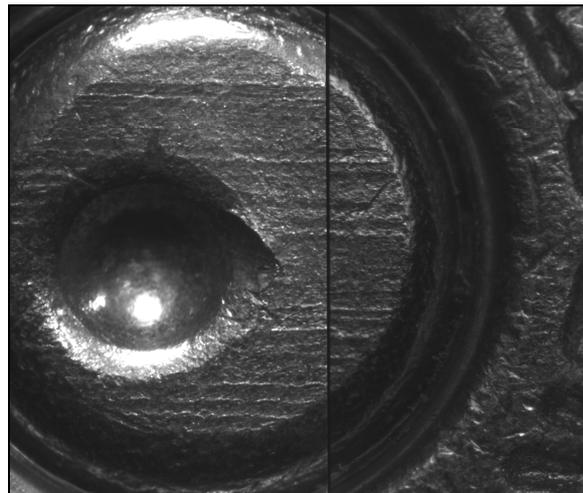


Figure 205

Image montrant la comparaison entre la douille indiciaire (à gauche) et une douille de comparaison (à droite)⁵⁸.

L'expert juge que les similitudes au niveau des traces de la tête de culasse sont le résultat d'un transfert de caractéristiques de sous – classe. Le poids accordé à ces concordances est donc pondéré par rapport au fait qu'il s'agit de traces pouvant être partagées par plusieurs armes. Les différences au niveau des autres traces semblent évidentes ; selon l'expert ces observations soutiennent très fortement l'hypothèse de la défense, à savoir l'hypothèse selon laquelle la douille indiciaire n'a pas été tirée par l'arme retrouvée sur les lieux.

⁵⁸ Dans le cas présent, il ne s'agit pas de traces laissées par un pistolet SIG Sauer mais par deux pistolets S&W ayant des numéros de série proches et montrant un transfert de caractéristiques de sous – classe au niveau de la trace de la tête de culasse. Malgré le fait que la population potentielle représentée par des SIG Sauer ne soit pas la plus adaptée, elle a quand même été employée dans le cadre de cet exemple. La comparaison ci-dessus est donc considérée, dans le cadre de cet exemple, comme provenant de douilles tirées par armes SIG Sauer.

- B. Le système de comparaison, quant à lui, calcule les rapports de vraisemblance pour les traces du percuteur et de la tête de culasse de manière distincte et prises en considération simultanément. Les LR pour le percuteur, la tête de culasse et la fusion des traces sont respectivement de $4.2^e -002$, $7.92^e +005$ et 1.24.

Dans ce cas de figure, l'expert doit faire abstraction de la procédure adoptée par le système et doit donc ignorer, au moins partiellement, les résultats proposés par ce dernier. En effet, ces derniers soutiennent l'hypothèse d'une source commune (H_p) pour la trace de la tête de culasse et l'hypothèse de la défense (H_d) pour la trace du percuteur. Le résultat pour la fusion des traces penche légèrement pour la première hypothèse (H_p). Ces résultats ne peuvent que partiellement être utilisés par l'expert, et cela pour les raisons suivantes. Tout d'abord, le système n'a pas été mis dans des conditions adéquates pour calculer des rapports de vraisemblance fiables. En effet, contrairement à l'expert, le système ne peut pas pondérer le poids à attribuer à chaque stigmaté laissé par l'arme. Il n'arrive donc pas à différencier les caractéristiques de sous – classe des celles dites individuelles. De ce fait, pour le cas présent, il attribue un LR relatif à la trace de la tête de culasse très élevé, malgré le fait que les douilles ont été tirées par des armes différentes. Ce résultat n'est pas uniquement le fruit de l'incapacité du système de comparaison de pondérer les traces moins (ou plus) spécifiques, mais plutôt le fruit de la représentativité de la population potentielle prise en considération qui ne comporte pas d'échantillons ayant des caractéristiques de sous – classe aussi évidentes que celles présentées dans ce cas. En revanche, l'expert peut utiliser les résultats relatifs à la trace du percuteur de la même manière que le cas de figure présenté ci-dessus.

Dans ce cas de figure, la solution retenue par l'expert est d'autant plus correcte et défendable puisqu'il peut baser ses conclusions non seulement sur la trace du percuteur et de la tête de culasse, mais également sur le reste des traces à disposition.

Ce deuxième cas de figure peut être comparé au cas où des traces laissées par la même arme présentent des zones très spécifiques sur la capsule d'amorçage, mais également des différences morphologiques évidentes. Dans ce cas, l'expert, contrairement au système de comparaison automatique, peut faire abstraction des différences morphologiques s'il arrive à expliquer leur présence.

Malgré que ces deux cas de figure ne soient pas des cas réels, la démarche adoptée ci-dessus a montré quels sont les paramètres à prendre en question afin de pouvoir supporter l'expert dans sa démarche pendant la phase interprétative. Ces exemples ont montré que les résultats d'une telle méthodologie ne doivent pas être appliqués sans réserve, mais qu'au contraire, il faut évaluer si les conditions pour les employer sont réunies. En outre, lorsque les rapports de vraisemblance générés par le système de comparaison automatique sont utilisés dans le cadre d'un rapport d'expertise et présentés devant un tribunal, une discussion concernant les taux d'erreur liés à la technique en question ainsi que sur la fiabilité des résultats doit être effectuée.

11.7 Inscription de cette recherche dans le cadre des critiques soulevées récemment

Les récentes publications dans le domaine de l'identification d'armes à feu, telles que Ballistic Imaging [NRC, 2008] et le rapport du NRC [NRC, 2009], ont soulevé plusieurs critiques. Ces dernières portent surtout sur les besoins croissants de quantifier statistiquement la spécificité

des traces et sur le manque d'objectivité omniprésent dans le domaine de l'identification d'armes à feu. Cette recherche a essayé d'aborder certaines de ces critiques. Les points les plus importants sont énumérés ci-dessous :

Objectivité du processus d'identification : le processus employé par un expert en armes à feu pendant la comparaison de deux éléments de munition ainsi que l'évaluation des similitudes et des différences entre deux traces et leur interprétation sont des étapes subjectives, fortement corrélées à son expérience. Ceci implique qu'une comparaison évaluée par deux personnes différentes peut aboutir à des conclusions ayant une force et une signification différentes. Il est donc compréhensible que des questions soient posées concernant la nature du processus de comparaison et les solutions pour le rendre plus objectif. Pendant cette recherche, une procédure de comparaison couplée à un modèle d'interprétation a été développée. Les résultats obtenus à l'aide de ce système proviennent d'une procédure presque totalement objective et reproductible. Une telle solution a pu être obtenue grâce à l'emploi d'une technique basée sur une approche algorithmique dans laquelle les interventions humaines sont très limitées.

Quantification statistique de la signification d'une comparaison : l'emploi d'algorithmes permettant l'alignement ainsi que le calcul des similitudes entre deux traces a permis de quantifier les résultats et ainsi d'appliquer un modèle interprétatif basé sur le concept du rapport de vraisemblance. L'emploi du rapport de vraisemblance possède le grand avantage d'évaluer la probabilité d'observer les résultats obtenus pendant une comparaison sous deux optiques différentes. La première donne des indications sur la reproductibilité des traces et l'autre sur la rareté des traces dans une population potentielle. Quelle que soit le type de comparaison, ces deux informations sont nécessaires pour évaluer les résultats obtenus. Cette procédure permet enfin de formuler les conclusions d'une façon probabiliste sans devoir forcément se prononcer de manière absolue quant à la source d'une trace. Ce type de conclusion possède également des bases logiques adéquates pour une présentation des résultats devant un tribunal.

Manque d'études et validité des lois fondamentales : parmi les critiques soulevées ces dernières années, certaines d'entre elles portent sur le manque de recherches dans ce domaine et sur le fait que, selon les auteurs, les lois fondamentales d'unicité et de reproductibilité des traces n'avaient pas encore été complètement démontrées. Cette recherche ne prétend pas de contrer ce genre de critique, toutefois, elle représente un pas vers la transparence et l'objectivité. Elle contribue également à renforcer l'idée selon laquelle il est possible de se prononcer lorsque les traces laissées par une même arme sont suffisamment similaires et que les traces laissées par armes différentes restent, sauf exception, différenciables. Les observations effectuées surtout pour les armes SIG Sauer, qui présentaient des traces souvent peu marquées, ont montré, pour la fusion des traces, des rapports de vraisemblance soutenant souvent d'une manière extrême les hypothèses respectives ainsi que des taux d'erreur forensique (surtout le RMEP) très limités. Ces résultats montrent que les traces laissées par la même arme se reproduisent plus ou moins régulièrement (RMED) et qu'elles peuvent, sauf exception (RMEP), être distinguées des traces laissées par d'autres armes.

11.8 Perspectives

Le potentiel de la saisie tridimensionnelle de surface dans le domaine de l'identification des armes à feu a été démontré. Cela n'implique pas que le système en question doit rester tel quel sans qu'aucune modification n'ait lieu. Ce système doit encore faire l'objet de plusieurs

améliorations, aussi bien d'un point de vue algorithmique que d'un point de vue statistique (cf. Section N°11.3.2). En outre, malgré le nombre important d'échantillons employés dans cette recherche, des études sur des échantillons différents sont envisageables à l'aide d'une technologie similaire à celle employée dans ce travail.

11.8.1 Polyvalence de la technique

L'ensemble des algorithmes développés a été testé avec succès pour les armes employées dans cette recherche. Ça ne signifie pas que l'application de cette procédure soit généralisable et qu'elle puisse être appliquée à n'importe quel type de trace ou d'arme. En ce qui concerne la polyvalence de ces techniques, des adaptations devraient éventuellement être entreprises pour la comparaison de traces plus particulières ou ayant des formes différentes de celles analysées jusqu'à maintenant. C'est notamment le cas des traces du percuteur laissées par des pistolets de type Glock® qui se présentent sous une forme rectangulaire et souvent en relation avec des *Shear marks*. Les étapes préliminaires ainsi la technique de comparaison devrait être revue afin de pouvoir séparer correctement les traces et de prendre en considération également les *Shear marks* qui sont des traces glissées.

En ce qui concerne les algorithmes assurant l'alignement final, pour la poursuite d'une éventuelle recherche à plus grande échelle, ils devraient être en mesure de s'adapter au type de trace et à leur morphologie en accomplissant correctement les alignements sans qu'aucune intervention de la part d'un opérateur n'ait lieu. En d'autres termes, il faudrait s'assurer, dans les limites du possible, que les algorithmes arrivent à minimiser les distances relatives aux stries et aux stigmates laissées par l'arme dans des situations considérées comme plus difficiles par rapport aux cas approchés dans cet étude. Enfin, en ce qui concerne les autres traces présentes sur le culot de la douille, des essais préliminaires ont déjà été effectués pour la comparaison des traces laissées par l'éjecteur. L'emploi de l'algorithme d'optimisation a montré qu'il était mieux adapté pour l'alignement de ces traces par rapport à l'algorithme ICP. Il s'agit simplement de tests préliminaires qui devraient être corroborés avec des recherches à plus large échelle.

11.8.2 Soumission de la technique à des cas plus difficiles

Les populations potentielles employées pendant cette recherche étaient principalement composées par des armes ayant les mêmes caractéristiques de classe et faisant partie de quelques modèles différents. Dans le cas des armes CZ ou de type PPK, l'histoire ainsi que la durée de vie des armes n'était pas connue étant donné qu'elles provenaient de la collection du NFI. Malgré cela, les différences morphologiques entre traces étaient bien présentes pour les armes CZ ainsi que pour celles de type PPK. Même si les différences étaient moins évidentes pour les armes fabriquées par SIG Sauer, aucune comparaison entre des traces différentes n'a montré un niveau de ressemblance considérable (à l'exception des cas avec absence de stigmates). Soumettre le système de comparaison en question à des échantillonnages plus difficiles d'un point de vue de l'identification permettrait d'étudier les limites du système en termes de discrimination. Pour ce faire, des armes construites consécutivement montrant la présence de caractéristiques de sous-classe pourraient, par exemple, être utilisées. Ce type d'échantillonnage n'est pas seulement intéressant d'un point de vue des limites du système en question, mais également d'un point de vue purement forensique où les similitudes entre des traces laissées par des armes différentes restent un facteur crucial lors de l'évaluation des résultats.

12 CONCLUSION

Le processus d'identification d'une arme à feu peut être défini comme la séquence d'étapes nécessaires pour mettre en relation un élément de munition, tel qu'un projectile ou une douille, à l'arme qui l'a tiré, sur la base des traces transmises par l'arme à la cartouche. Depuis environ un siècle, les experts en identification d'armes à feu ont pour rôle d'évaluer les similitudes et les différences entre ces traces afin de pouvoir se prononcer sur une éventuelle source commune entre deux éléments de munition. Toutefois, ce processus d'identification ne possède actuellement pas de lignes directrices universelles et transparentes. Il en résulte que les conclusions formulées dans ce domaine sont majoritairement basées sur l'expérience et parfois considérées donc comme purement subjectives. Le manque d'objectivité liée à l'interprétation des résultats s'attaque directement aux fondements régissant le domaine de l'identification. Dans certains pays comme aux Etats-Unis, l'admissibilité des témoignages en termes d'identification d'armes à feu ainsi que les lois fondamentales régissant le domaine ont été récemment remises en cause. Des critères d'identification plus objectifs ainsi que plus de transparence sont requis.

La recherche présentée dans ce document s'inscrit donc dans une optique visant à une interprétation objective des résultats afin de soutenir l'expert en armes à feu dans la prise de décision concernant une origine commune entre une douille indicielle et une douille de comparaison. Un système de comparaison assisté par ordinateur basé sur la saisie tridimensionnelle de surface a donc été développé et couplé à un modèle basé sur le concept de rapport de vraisemblance. Cette approche permet l'évaluation d'une comparaison entre des traces présentes sur deux douilles d'une manière objective et reproductible.

Les résultats obtenus ont montré tout d'abord le potentiel de la saisie tridimensionnelle de surface ainsi que la possibilité de l'appliquer dans ce domaine. Grâce à la haute qualité des mesures ainsi qu'à leur remarquable niveau de reproductibilité, la technique employée pour acquérir la topographie d'une trace a permis de construire des bases solides pour la poursuite de la recherche. Ensuite, l'emploi d'un procédé algorithmique pour quantifier une comparaison reste, à l'heure actuelle, le meilleur moyen pour assurer une évaluation la plus objective et reproductible possible. Les résultats obtenus au moyen de cette procédure sous forme numérique ont permis l'emploi d'un modèle statistique permettant d'extrapoler des rapports de vraisemblance destinés à soutenir l'expert en armes à feu pendant la prise de décision. Indépendamment du système employé, le rapport de vraisemblance reste un outil robuste, à disposition des experts, permettant de s'exprimer de manière transparente face à un juge ou un tribunal.

D'un point de vue des prémisses régissant le domaine de l'identification des armes à feu, les résultats obtenus ont montré que les traces étudiées laissées par la même arme se reproduisent souvent de manière régulière et qu'elles peuvent être, sauf exception, distinguées des traces laissées par d'autres armes. Ces hypothèses ont été de plus soutenues par les valeurs des rapports de vraisemblance obtenus ainsi que par des taux d'erreur forensique très limités. Ces résultats contribuent donc à renforcer l'idée selon laquelle les traces laissées par une même arme sont suffisamment similaires et que les traces laissées par armes différentes restent, sauf exception, différenciables en permettant ainsi de se prononcer par degré sur une éventuelle source commune entre deux douilles.

Des bases solides ont également été bâties dans l'optique d'une application plus opérationnelle. Le travail à accomplir pour assurer la réussite sous ce point de vue reste malgré tout encore considérable et nécessite des modifications pour améliorer la polyvalence du modèle développé face à des cas plus proches de ceux couramment rencontrés dans les laboratoires de balistique. En effet, les informations relatives à l'influence du type de munition sur l'évaluation des résultats semble être une question qui doit être abordée afin d'accroître les possibles applications de cette technique et dans le but de ne se limiter qu'à un type de munition.

En conclusion, cette recherche constitue un pas en avant considérable vers une procédure d'identification transparente et objective, sans pour autant répondre de manière exhaustive aux critiques émises récemment contre le domaine de l'identification d'armes à feu. Cependant, des efforts doivent encore être effectués afin d'accroître la polyvalence de cette technique ainsi que les données à disposition et ceci dans le but d'envisager une gamme d'applications plus large dans le futur.

A l'heure actuelle, l'expert en armes à feu ne peut pas encore s'appuyer régulièrement et avec une confiance absolue sur un procédé automatique et complètement objectif. Quoique les systèmes assistés par ordinateur deviennent de plus en plus performants, leur polyvalence n'est pas à la hauteur de la versatilité de l'être humain face à des situations plus compliquées que celles auxquelles le système en question a dû faire face dans le cadre de cette recherche. En revanche, des recherches de ce type démontrent que des fondements solides existent pour faire évoluer le domaine de l'identification d'armes à feu vers des procédures de plus en plus objectives.

13 BIBLIOGRAPHIE

AFTE Criteria for Identification Committee. Theory of Identification, Range of Striae Comparison Reports and Modified Glossary Definitions – an AFTE Criteria for Identification Committee Report. *AFTE Journal*, 24(2), 1992 : 336 – 340.

AFTE. Theory of Identification as it Relates to Toolmarks. *AFTE Journal*, 30(1), 1998 : 88.

Alexander A, Botti F, Drygajlo A. Handling Mismatch in Corpus-Based Forensic Speaker Recognition. In Proceedings of 2004: A Speaker Odyssey, Toledo, Spain, 2004 : 69 – 74.

ASME B46.1 – 1995. Surface Texture, American Society of Mechanical Engineers. New York, 1995.

Bachrach B. Automated System and Method for Tool Mark Analysis. International publication number: PCT/US2005/031104. International publication number: WO 2006/026706 A2, 2006.

Bachrach B, Jain A, Jung S, Koons R D. A Statistical Validation and Repeatability of Striated Tool Marks: Screwdrivers and Tongue and Groove Pliers. *Journal of Forensic Sciences*, 55(2), 2010 : 348 – 357.

Balakrishnan N, Lai C D. *Continuous Bivariate Distributions*. Second Edition, Springer, New York, 2009.

Baldur R. Fired Cartridge Examination Method and Imaging Apparatus. Patent N°US5654801, 1997.

Banno A, Masuda T, Ikeuchi K. Three Dimensional Visualization and Comparison of Impressions on Fired Bullets. *Forensic Science International*, 140, 2004 : 233 – 240.

Berger M A. The Supreme Court's Trilogy on the Admissibility of Expert Testimony. Reference Manual on Scientific Evidence. Second Edition, Federal Judicial Center, Washington, 2000 : 9 – 38⁵⁹.

Besl P J, McKay N D. A Method for Registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, 1992 : 239 – 256.

Biasotti A A. A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets. *Journal of Forensic Sciences*, 34(4), 1959 : 34 – 50.

Biasotti A A, Murdock J. Criteria for Identification or State of the Art of Firearm and Toolmark Identification. *AFTE Journal*, 16(4), 1984 : 16 – 24.

⁵⁹ Le manuel en entier est également disponible à l'adresse suivante:
http://www.fjc.gov/public/home.nsf/autoframe?openform&url_l=/public/home.nsf/inavgeneral?openpage&url_r=/public/home.nsf/pages/610 – Dernière consultation effectuée en date du 30 septembre 2010

Biasotti A A, Murdock J. Firearms and Toolmark Identification: Legal Issues and Scientific Status. *Modern Scientific Evidence: The Law and Science of Expert Testimony*, editors Faigman D L, Kay D H, Saks M J and Sanders J, West Publishing Co., St Paul, 1997 : 124 – 151.

Bonfanti M, De Kinder J. Revue des Méthodes Utilisées pour la Comparaison des Traces sur les Douilles et les Projectiles. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 31(2), 1998 : 95 – 112.

Bonfanti M, De Kinder J. The Influence of the Use of Firearms on their Characteristic Marks. *AFTE Journal*, 31(3), 1999 : 318 – 323.

Bonfanti M. Exploitation et Interprétation des Traces Présentes sur les Projectiles et les Douilles. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 32(1), 1999 : 25 – 37.

Bonfanti M. Etude des Caractéristiques Présentes sur les Douilles et les Projectiles au Moyen de la Saisie, du Traitement et de l'Analyse de Données en 3D. Thèse de doctorat, Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne, Imprimeur, Pully, 2002.

Braverman S. *The Firearms Encyclopedia*. Shelley Braverman. Athens, New York, 1959.

Buckleton J, Nichols R, Triggs C, Wevers G. An Exploratory Bayesian model for firearm and tool mark interpretation. *AFTE Journal*, 37(4), 2005 : 352 – 361.

Buckleton J, Triggs C, Taroni F, Champod C, Wevers G. Experimental Design for Acquiring Relevant Data to Address the Issue of Comparing Consecutively Manufactured Tools and Firearms, *Science and Justice*, n°48, 2008 : 178 – 181.

Bunch G S. Consecutive Matching Striation Criteria: A General Critique. *Journal of Forensic sciences*, 45(5), 2000 : 955 – 962.

Bunch G S, Smith E D, Giroux B N, Murphy D P. Is a Match Really a Match? A primer on the Procedures and Validity of Firearms and Toolmark Identification. *Forensic Science Communications*, 11(3), 2009.

Burrard G. *The Identification of Firearms and Forensic Ballistic*. Herbert Jenkins, London, 1951.

Champod C, Baldwin D, Taroni F, Buckleton J.S. Firearm and tool marks identification : the Bayesian approach. *AFTE Journal*, 35(3), 2003 : 307 – 316.

Champod C, Vuille J. Preuve Scientifique en Europe – Admissibilité, appréciation et égalité des armes. Etude Comparative sur la Preuve Scientifique établie pour le Bureau du Comité Européen pour les Problèmes Criminels (CDPC) du Conseil de l'Europe, 2010⁶⁰.

Chan R. The Relationship Between Acquisition Position of Cartridge Cases and Discrepancy in Correlation Scores on IBIS. *AFTE Journal*, 32(4), 2000 : 337 – 341.

⁶⁰ Disponible à l'adresse suivante: [http://www.coe.int/t/e/legal_affairs/legal_cooperation/steering_committees/cdpc/Documents/1CDPC\(2010\)10-f_Preuve_scientifique_en_Europe.pdf](http://www.coe.int/t/e/legal_affairs/legal_cooperation/steering_committees/cdpc/Documents/1CDPC(2010)10-f_Preuve_scientifique_en_Europe.pdf) – Dernière consultation effectuée en date du 10 septembre 2010

Coffman B. Computer Numerical Control (CNC) Production Tooling and Repeatable Characteristics on Ten Remington Model 870 Production Run Breech Bolts. *AFTE Journal*, 35(1), 2003 : 75 – 78.

Collins E R. How Unique are Impressed Toolmarks? – An Empirical Study of 20 Worn Hammer Faces. *AFTE Journal*, 37(4), 2005 : 252 – 295.

Coody A C. Consecutively Manufactured Ruger P-89 Slides. *AFTE Journal*, 35(2), 2003 : 157 – 160.

National Research Council (NRC) – Committee: Cork D L, Rolph J E, Meieran E S, Petrie C V. Ballistic Imaging – Committee to Assess the Feasibility, Accuracy and Technical Capability of a National Ballistics Database, National Research Council, Washington DC, 2008.

Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous Amplitude-contrast and Quantitative Phase-contrast Microscopy by Numerical Reconstruction of Fresnel Off-axis Holograms. *Applied Optics*, 38(34), 1999 : 6994 – 7001.

Czaderna A W, Madey T E, Powell C J. *Beam Effects, Surface Topography, and Depth Profiling in Surface Analysis*. Plenum Press, New York, London, 1998.

Davis J E. *An Introduction to Toolmarks, Firearms and the Striagraph*. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, 1958.

De Kinder J, Prévot P, Pirlot M, Nys B. Surface Topology of Bullet Striations: an Innovative Technique. *AFTE Journal*, 30(2), 1998 : 294 – 299.

De Kinder J. Ballistic Fingerprinting Databases. *Science and Justice*, n°42, 2002 : 197 – 203.

Dessimoz D, Champod C. Linkages between Biometrics and Forensic Science. *Handbook of Biometrics*. Chapitre 21, Editors: Jain A K, P J Flynn, Ross A, Springer Verlag, 2008 : 425 – 459.

Di Maio V. J-M. *Blessures par Armes à Feu – Aspects Pratiques des Armes à Feu, de la Balistique et des Techniques Médico-légales*. Masson, Paris, 1991.

Dutton G. The Advantage of Co-Axial Lighting in Comparative Microscopy. *AFTE Journal*, 31(4), 1999 : 457 – 460.

Filzmoser P. Identification of Multivariate Outliers: a Performance Study. *Austrian Journal of Statistics*, 34(2), 2005 : 127 – 138.

Formaggio T. Contribution à l'Identification des Armes à Feu par l'Examen des Douilles. *Revue internationale de criminologie et de police technique*, 3(4), 1949 : 276 – 291.

Gallusser A, Bonfanti M, Schütz F. *Expertise des Armes à Feu et des Éléments de Munition dans l'Investigation Criminelle*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2002.

Geradts Z J, Zaal D, Hardy H, Lelieveld J, Keereweer I, Bijhold, J. Pilot Investigation of Automatic Comparison of Striation Marks with Structured Light. *Proc. SPIE Vol. 4232, 2001a* : 49 – 56 .

Geradts Z, Bijhold J, Hermsen R, Murtagh F. Image Matching Algorithms for Breech Face Marks and Firing Pins in a Database of Spent Cartridge Cases of Firearms. *Forensic Science International*, 119(1), 2001b : 97 – 106.

Gouwe J, Hamby J E, Norris S A. Comparison of 10'000 Consecutively Fired Cartridge Cases from a Model 22 Glock .40 S&W Caliber Semiautomatic Pistol. *AFTE Journal*, 40(1), 2008 : 57 – 63.

Gunther J D, Gunther C O. *The Identification of Firearms.* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1935.

Haag L C. *Shooting Incident Reconstruction.* Academic Press, New York, 2005.

Hatcher J S, Jury F J, Weller J. *Firearms Investigation, Identification and Evidence.* Third Edition, Stackpole Book, Harrisburg, Pennsylvania, 1977.

Heard B J. *Handbook of Firearms and Ballistics : Examining and Interpreting Forensic Evidence.* Second Edition, John Wiley & Sons, Singapore, 2008.

Heizmann M. Automated Comparison of Striation Marks with de System GE/2. Investigative Image Processing II, Zeno J. Geradts, Lenny I. Rudin, Editors, *Proc. SPIE Vol. 4709, 2002* : 80 – 91.

Hermsen R, Lory M, Pfoser L, Pérez de la Lama LM. Firearms Fundamentals: Criteria for Identification - A Discussion about the Criteria Used in Practice. European Network of Forensic Science Institutes - Working Group Firearms - Project 3, 2004.

Johnson A E, Hebert M. Recognizing Objects by Matching Oriented Points, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, 1997: 684 – 689.

Jones BC, Guerci JR. Intelligent Image Capture of Cartridge Case for Firearms Examiners. *Proc. SPIE Vol. 2942, 1997* : 94 – 104.

Jost T. Fast Geometric Matching for Shape Registration. Thèse soumise à la faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel pour l'obtention du grade de docteur en sciences, 2002.

Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation of 3D Shape Descriptors. In Kobbelt S., Schröder S., Hoppe S. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 2003 : 156 – 164.

Kennington R H. 9mm ARCHOLOGY: Arch Contenders. *AFTE Journal*, 27(3), 1995 : 213 – 219.

Kreiser J. Primer « Flowback » Is Not Always Due To High Pressure. *AFTE Journal*, 27(1), 1995: 1 – 4.

Kundu D, Dey A K. Estimating the Parameters of the Marshall Olkin Bivariate Weibull Distribution by EM Algorithm. *Computational Statistics and Data Analysis*, n°53, 2009 : 956 – 965.

Labbett P. *Encyclopédie Mondiale des Munitions Modernes*. Pygmalion, Paris, 1982.

Lambert R R. Firearms Identification. *AFTE Journal*, 21(2), 1989 : 143 – 147.

Lardizabal P P. Cartridge Case Study of the Heckler & Koch USP. *AFTE Journal*, 27(1), 1995 : 49 – 51.

Li D G. Image Processing for the Positive Identification of Forensic Ballistics Specimens. *The Sixth International Conference of Information Fusion*, Vol. 2, 2003 : 1494 – 1498.⁶¹

Lin M, Chun C. A Correlative Demonstration of Various Tool-marks of 9 mm Auto-loading Pistols on the Spent Cartridge Cases Based upon the Formulation Mechanism. *Forensic Science Journal*, n°3, 2004 : 13 – 22.

Lopez L, Grew S. Consecutively Machined Ruger Bolt Faces. *AFTE Journal*, 32(1), 2000 : 19 – 24.

Lyons D J. The Identification of Consecutively Manufactured Extractors. *AFTE Journal*, 41(3), 2009 : 246 – 256.

Machowski L A, Marwala T. Evolutionary Optimisation Methods for Template Based Image Registration, School of Electrical and Information Engineering, 2004.⁶²

Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 1989 : 674 – 693.

Mardia K V. Measures of Multivariate Skewness and Kurtosis with Applications. *Biometrika*, 57(3), 1970 : 519 – 530.

Marti G. Segmentation Fémorale par Modèle Déformable et Programmation Dynamique. Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, n°3833, 2007.

Martinez W L, Martinez A R. *Computational Statistics Handbook with Matlab*[®]. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2002.

Masuda T, Sakaue K, Yokoya N. Registration and Integration of Multiple Range Images for 3-D Model Construction. 13th *International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 1, Vienna, 1996 : 879 – 883.

Matty W. Raven 25 Automatic Pistol Breech Face Tool Marks. *AFTE Journal*, 16(3), 1984 : 57 – 60.

⁶¹ Disponible à l'adresse suivante: www.isif.org/fusion/proceedings/fusion03CD/poster/p241.pdf - Dernière consultation effectuée en date du 10 juin 2010

⁶² Disponible à l'adresse suivante: <http://wiredspace.wits.ac.za/bitstream/handle/10539/244/AppendixB2.pdf> Dernière consultation effectuée en date du 10 juin 2010

Matty W, Johnson T. A Comparison of Manufacturing Marks on Smith&Wesson Firing Pins. *AFTE Journal*, 16(3), 1984 : 51 – 56.

Maxwell G A. Open Bolt Conversion Apparatus. Patent N°US4057003, 1977.

Meuwly D. Reconnaissance de Locuteurs en Sciences Forensiques: l'Apport d'une Approche Automatique. Thèse de doctorat, Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne, 2001.

Montet G. Enfin le Martelage Vint. *Cibles*, n°10, 1968 : 182 – 186.

Moran B. A Report of the AFTE Theory of Identification and Range of Conclusions for Tool Mark Identification and Resulting Approaches to Casework. *AFTE Journal*, 34(2), 2002 : 227 – 235.

National Research Council (NRC) – Committee on Identifying the Needs of the Forensic Sciences Community. Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward. National Academies Press, Washington DC, 2009.

Nestares O, Heeger D J. Robust Multiresolution Alignment of MRI Brain Volumes. *Magnetic Resonance in Medicine*, n°43, 2000: 705 – 715.

Neel M, Wells M. A Comprehensive Statistical Analysis of Striated Tool Mark Examinations Part I: Comparing Known Matches and Known Non-Matches. *AFTE Journal*, 39(4), 2007: 176 – 198.

Nichols R. G. Firearm and Tool Mark Identification : The Scientific Reliability and Validity of the AFTE Theory of Identification Discussed Within the Framework of a Study of Ten Consecutively Manufactured Extractors. *AFTE Journal*, 36(1), 2004: 67 – 88.

Ogihara Y, Kubota M, Sanada M, Fukuda K, Uchiyama T, Hamby J. Comparison of 5000 Consecutively Fired Bullet and Cartridge Cases from a .45 Caliber M1911A1 Pistol. *AFTE Journal*, 15(3), 1983 : 127 – 140.

Organisation Internationale de Normalisation. Spécification Internationale des Produits (GPS) – Etat de Surface : Méthode du Profil – Termes, Définitions et Paramètres d'État de Surface – Norme internationale ISO 4287, 1998.

Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Mutual-information-based Registration of Medical Images: A survey. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 22(8), 2003 : 986 – 1004.

Rivera G C. Subclass Characteristics in Smith & Wesson SW40VE Sigma Pistols. *AFTE Journal*, 39(3), 2007 : 247 – 256.

Rowe F W. *Firearms Investigation*, in : Saferstein R., Forensic Science Handbook, Vol. II, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988 : 398 – 401.

Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient Variants of the ICP Algorithm. Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001.⁶³

⁶³ Disponible à l'adresse suivante: http://www.cs.princeton.edu/~smr/papers/fasticp/fasticp_paper.pdf - Dernière consultation effectuée en date du 10 juin 2010

- Russ J C.** *The Image Processing Handbook*. Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- Sakarya U, Leloglu U M, Tunali E.** Three-dimensional Surface Reconstruction for Cartridge Cases Using Photometric Stereo. *Forensic Science International*, 175(2), 2008 : 209 – 217.
- Schechter B, Silverwater H, Etzion M.** Extended Firing of a Galil Assault Rifle. *AFTE Journal*, 24(1), 1992 : 37 – 45.
- Schwartz A.** “A Systemic Challenge to the Reliability and Admissibility of Firearms and Toolmark Identification”. *The Columbia Science and Technology Law Review*, n°6, 2005 : 1 – 42.
- Senin N, Groppetti R, Garofano L, Fratini P, Pierni M.** Three-dimensional Surface Topography Acquisition and Analysis for Firearm Identification. *Journal of Forensic Sciences*, 51(2), 2006 : 282 – 295.
- Serino R.** *Balistica e Ricarica. Teoria e pratica del caricamento*. Editoriale Olimpia, Firenze, 2001.
- Shem R, Striupaitis P.** Comparison of 501 Consecutively Fired Bullets and Cartridge Cases from a .25 Caliber Raven Pistol. *AFTE Journal*, 15(3), 1983 : 109 – 112.
- Starck J L, Mortagh F, Bijaoui A.** *Image Processing and Data Analysis, the Multiscale Approach*. University Press, Cambridge, 1998.
- Stone R S.** How Unique are Impressed Toolmarks? *AFTE Journal*, 35(4), 2003 : 376 – 383.
- Stout K J.** *Three-Dimensional Surface Topography; Measurements, Interpretation and Applications. A Survey and Bibliography*. Penton Press, London, Bristol, 1994.
- Tam C K.** Overview of Manufacturing Marks on Center Fire Cartridges. *AFTE Journal*, 33(2), 2001 : 112 – 115.
- Tangelder J W H, Veltkamp R C.** A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods. Proceedings of Shape Modeling International, Genova, 2004 : 145 – 156.⁶⁴
- Thompson E.** Phoenix Arms Breech Face Tool Marks. *AFTE Journal*, 26(2), 1994: 134 – 135.
- Thompson E.** False Breech Face ID's. *AFTE Journal*, 28(2), 1996: 25 – 26.
- Tulleners F A.** Technical Evaluation: Feasibility of a Ballistics Imaging Database for all New Handgun Sales, Report No. AB1717. Sacramento, CA: California Department of Justice, 2001.
- Uchiyama T.** Similarity among Breech Face Marks Fired from Guns with Close Serial Numbers. *AFTE Journal*, 18(3), 1986 : 15 – 52.
- Venkataraman P.** *Applied Optimization with Matlab Programming*. Second Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2009.

⁶⁴ Disponible à l'adresse suivante: http://cgit.nutn.edu.tw:8080/cgit/PaperDL/uang_0903261349104305.pdf - Dernière consultation effectuée en date du 10 juin 2010

Vicario A, Bonfanti M, Gallusser A. Développement d'un Système Automatique de Comparaison de Traces d'Outils en 3D. Rapport technique n°95 – 07, Université de Lausanne, Lausanne, 1995.

Vinci F, Falamingo R, Campobasso C P, Bailey A J. Morphological Study of Class and Individual Characteristics Produces by Firing 2500 Cartridges in a .45 Caliber Semi-Automatic pistol. *AFTE Journal*, 37(4), 2005 : 368 – 373.

Vorburger T V , Yen J H, Bachrach B, Renegar T B, Filliben J J, Ma L, Rhee H-G, Zheng A, Song J-F, Riley M, Foreman C D & Ballou S M. Surface Topography Analysis for a Feasibility Assessment of a National Ballistics Imaging Database. NISTIR 7362: A Report Prepared for the National Academies Committee to Assess the Feasibility, Accuracy, and Technical Capability of a National Ballistics Database under National Institute of Justice Grant 2003-IJ-R-029 with the NIST Office of Law Enforcement Standards, 2007.⁶⁵

Wallace J S. *Chemical Analysis of Firearms, Ammunition and Gunshot Residue. International Forensic Science and Investigation series.* CRC Press, Boca Raton, 2008 : 35 – 40.

Yborra L F, McClary J R. Toolmarks on Remington 9mm Luger Caliber Ammunition. *AFTE Journal*, 36(4), 2004 : 308 – 310.

Zubal G, Wisniewski G. Fourier Space and Filter Selection. *Journal of Nuclear Cardiology*, 4(3), 1997 : 234 – 243.

⁶⁵ Disponible à l'adresse suivante: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=822733 - Dernière consultation effectuée en date du 10 juin 2010

A. ANNEXE – SYSTEMES D’ACQUISITION

L’acquisition de l’information propre à un objet peut s’effectuer via des images digitales en 2D ou encore via une saisie tridimensionnelle de surface. Chaque technique possède ses propres principes et divers facteurs influençant les résultats de l’acquisition. Le but de cette annexe n’est pas de rédiger une liste exhaustive des techniques pouvant être employées pour ce genre d’acquisition, mais plutôt de fournir, tout simplement, les bases pour la compréhension des concepts théoriques employés dans le reste du document.

A.1 Acquisition de l’information en 2D

Une photographie est la représentation type en deux dimensions d’un sujet ayant une structure bi ou tridimensionnelle. De nos jours, la technique d’acquisition en deux dimensions la plus répandue reste l’acquisition d’images numériques. La numérisation consiste dans la transformation d’une image réelle en une image numérique. Cette dernière peut être représentée par une matrice dont chaque élément est appelé *pixel* (abréviation de *picture element*). Les *pixels*, qui peuvent avoir différentes valeurs discrètes et différentes significations en fonction du type d’image, sont caractérisés par leurs coordonnées (i, j). Une image ayant seulement des *pixels* de valeur 0 (noir) ou 1 (blanc) est appelée image Bitmap ou image binaire, contrairement, à une image en niveaux de gris, où chaque *pixel* possède une valeur entre 0, correspondant au noir, et 255, correspondant au blanc (pour une image codée à 8 bits). Par contre, en ce qui concerne les images en couleurs, elles sont formées par trois couches Rouge, Vert, Bleu (RVB) à 256 niveaux ou de quatre couches Cyan, Magenta, Jaune, Noir (CMJN) à 256 niveaux pour les images à 8 bits. Les images à 8 bits restent les plus courantes dans le domaine numérique, même s’il est également possible d’utiliser des codages à 12 ou 16 bits ; ces dernières permettant d’atteindre une gamme de niveaux beaucoup plus étendue [Russ, 1995]. Un autre aspect important lié à l’acquisition d’images numériques est la résolution employée pendant l’enregistrement de l’image. Le concept de résolution est lié au nombre de points utilisés pour décrire une image. Plus la résolution est élevée et plus le nombre de *pixels* employé est important. Le niveau de détail dépend donc de la résolution. D’autres paramètres influencent la formation d’une image en deux dimensions. Parmi ces derniers il y a l’éclairage illuminant le sujet, le trajet optique suivi par la lumière avant d’arriver au capteur et ce dernier qui permet l’acquisition de l’image.

A.1.1 Le capteur

Les capteurs numériques permettent de créer des images numériques à partir de la lumière atteignant le capteur. Leur principe de fonctionnement se base sur le fait que le capteur, équipé de photodétecteurs en silicone, transforme le signal lumineux en impulsions électriques. Ces dernières sont ensuite traduites en valeurs numériques, formant ainsi une image sous forme de matrice. Plusieurs types de capteurs existent sur le marché, tous fonctionnant, en général, selon le même principe (CCD, CMOS, Foveon, etc.). En ce qui concerne la résolution, certains appareils photographiques sont munis de capteurs numériques à grand format, permettant l’enregistrement d’images composées par environ 60 millions de *pixels* ; ces derniers pouvant atteindre une taille de l’ordre du micromètre sur le

capteur⁶⁶. Certains capteurs numériques peuvent présenter des aberrations, ces dernières résultent dans la formation d'artéfacts sur l'image finale.

A.1.2 Le système optique

Le système optique peut être défini comme étant l'ensemble des lentilles qui permet la canalisation de la lumière réfléchi par le sujet, vers le capteur qui effectuera l'enregistrement de l'image. Un système optique possède normalement la capacité de modifier le grossissement en faisant varier la distance entre les différentes lentilles le constituant. Cette capacité permet de cibler certaines caractéristiques et de les analyser à différents ordres de grandeurs. Un autre aspect important, lié au grossissement, est la profondeur de champ. La capacité d'un système optique à représenter de manière nette un objet entre deux plans plus ou moins éloignés, diminue avec l'augmentation du grossissement. Donc, plus le grossissement est élevé et plus la capacité de représenter de manière nette des objets ayant une profondeur importante diminue. Les lentilles également peuvent avoir des défauts ; ces derniers se présentent souvent sous la forme d'aberrations affectant la qualité de l'image finale (par exemple des aberrations chromatiques).

A.1.3 L'éclairage

Pour que l'observation d'un objet soit possible, il faut que de la lumière puisse atteindre l'objet en question et être ensuite réfléchi en direction du capteur. La manière avec laquelle la lumière arrive sur le sujet et interagit avec ce dernier, influence radicalement les images résultantes. En faisant varier l'intensité de l'éclairage ou son inclinaison, il est possible de mettre en évidence certaines caractéristiques plutôt que d'autres. Ainsi, dans le domaine des armes à feu, les éléments de munitions qui ont été tirés sont l'objet d'observations et d'analyses sous différents éclairages.

Lumière directe

Ce type d'éclairage est constitué par une source lumineuse produisant un faisceau de lumière (une fibre optique, une lampe à incandescence, LED, etc.), qui atteint directement l'échantillon avec un certain angle par rapport à la normale (Figure 206). L'inclinaison du trajet lumineux par rapport à la normale peut être changée en fonction des caractéristiques que l'on souhaite mettre en évidence. Généralement, la lumière frappe l'échantillon avec une inclinaison d'environ 45°. Ce genre d'éclairage est un des plus exploités pour la comparaison des traces au microscope comparateur, car il est facile à mettre en place. La facilité d'emploi est malheureusement contrebalancée par les difficultés de standardisation. En effet, il est très difficile d'arriver à reproduire le même éclairage sur un même sujet dans le but d'arriver à une image finale identique. L'éclairage direct peut également causer une distorsion au niveau des caractéristiques circulaires des traces [Jones et al., 1997]. Malgré tout, ce genre d'éclairage est utilisé, avec de bons résultats, pour mettre en évidence les traces laissées par la tête de culasse [Dutton, 1999].

⁶⁶ www.phaseone.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

Lumière indirecte

L'éclairage indirect possède une source lumineuse similaire à l'éclairage direct, sauf que la lumière est réfléchiée, et donc déviée, avant d'arriver sur l'échantillon (Figure 206). Les résultats, ainsi que les problèmes liés à l'emploi de cet éclairage, sont similaires à ceux de l'éclairage direct. Il est également possible d'arriver à des images différentes en fonction du matériel utilisé pour réfléchir la lumière. En effet, en fonction du matériel employé pour réfléchir la lumière, cette dernière peut être diffusée d'une façon plus ou moins prononcée. Ce genre d'éclairage a été utilisé dans le système de comparaison automatique GE/2 développé par Heizmann, qui utilise une cupule qui réfléchit la lumière provenant d'un panneau de LEDs [Heizmann, 2002].

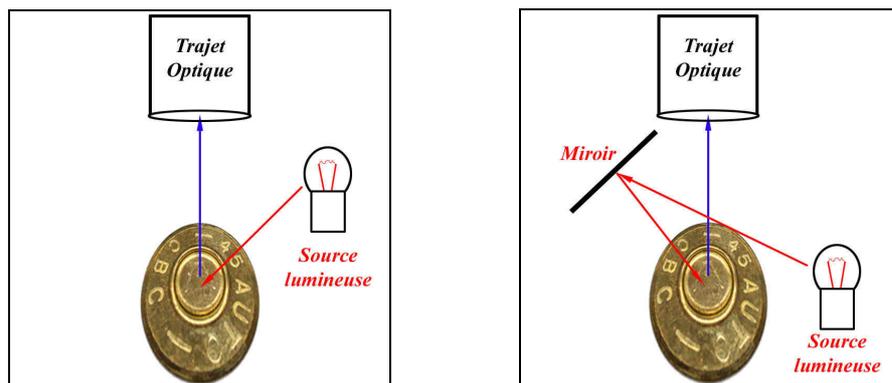


Figure 206

Schémas représentant un éclairage direct (à gauche) et un éclairage indirect (à droite).

Episcopie coaxiale

Il s'agit d'un éclairage dont le rayon lumineux arrive perpendiculairement à la surface observée à l'aide d'un miroir semi transparent. L'éclairage épiscopique coaxial (réflexion spéculaire) est partiellement diffusé en surface. La lumière qui n'est pas diffusée par le sujet vient se réfléchir perpendiculairement et arrive au capteur, en traversant un miroir semi transparent (Figure 207). Si l'échantillon n'est pas plat, la lumière coaxiale est diffusée en plusieurs rayons. La topographie de l'échantillon diffuse la lumière, ce qui donnera une image contrastée. Ce type d'éclairage se base donc sur la diffusion de la lumière pour créer un contraste sur l'image ; alors que la lumière directe compte sur les ombres pour le générer [Dutton, 1999]. L'épiscopie coaxiale peut être utilisée avec succès sur des surfaces planes comme le culot d'une douille, où il est possible de mettre en évidence efficacement la trace du percuteur, de la tête de culasse et de l'éjecteur. Lorsqu'elle est appliquée sur des surfaces courbes, telles que le corps d'une douille, il n'y a malheureusement pas assez de réflexion pour obtenir une image comportant une quantité suffisante d'informations [Dutton, 1999]. Le grand avantage de cet éclairage, consiste dans le fait que, pour avoir une image représentative, il faut simplement que l'échantillon soit placé perpendiculairement à l'axe optique. L'image résultante ne change donc pas si l'angle entre la surface et le trajet optique ne varie pas. Ainsi, l'échantillon peut subir des rotations le long de son axe longitudinal sans que l'image ne soit modifiée.

Eclairage annulaire

Il s'agit d'un éclairage composé d'une source de lumière annulaire qui éclaire circulairement l'échantillon. Ce genre d'éclairage comporte normalement une source de lumière entourant

l'objectif. Etant donné que la lumière arrive sur l'échantillon de tous les côtés (360°), les ombres sont réduites au minimum [Dutton, 1999]. Dans certains cas, cette particularité pourrait avoir des avantages, mais des caractéristiques pertinentes pourraient ne pas être mises en évidence. Des études ont montré qu'il existe une corrélation entre l'image obtenue à l'aide de l'éclairage annulaire et la rotation de la douille par rapport à son axe longitudinal. En effet, la comparaison entre des images acquises sous des angles de rotation différents à l'aide d'un système de comparaison automatique, tel que IBIS[®], donne des résultats différents pour la même douille. La différence de résultats est plus importante pour la comparaison de la trace laissée par la tête de culasse par rapport à celle du percuteur [Chan, 2000].

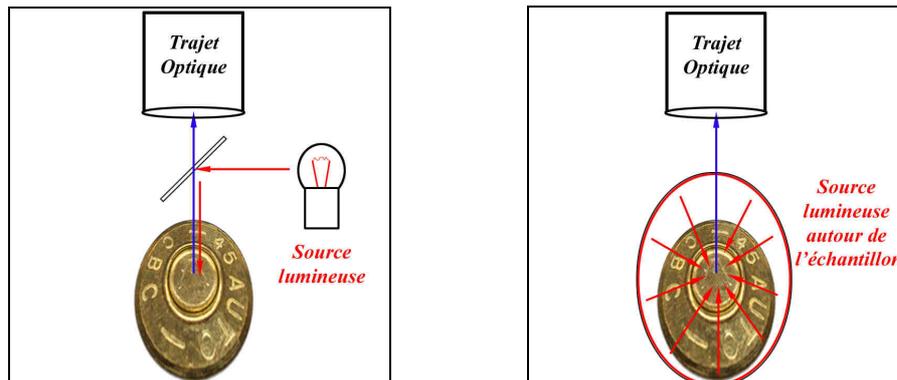


Figure 207

Schémas représentant un éclairage épiscopique coaxial (à gauche) et un éclairage annulaire (à droite).

Comme beaucoup de domaines, celui de la digitalisation d'images est en pleine évolution et les améliorations technologiques ne se font pas attendre. A l'heure actuelle, il est ainsi possible de trouver des capteurs plus performants, des systèmes optiques de meilleure qualité ainsi que des éclairages équipés avec des LEDs plus appropriés au domaine de l'identification en armes à feu.

A.2 Acquisition de l'information en 3D

Le concept de structure tridimensionnelle et les techniques pouvant être employées pour extrapoler les dites structures sont décrits dans les paragraphes qui suivent. Les informations relatives aux topographies tridimensionnelles ont été reprises principalement des livres rédigés respectivement par Stout en 1994 et Cadzerna et al. en 1998 [Stout, 1994 et Cadzerna et al., 1998].

A.2.1 Saisie tridimensionnelle de surface

Les données en trois dimensions peuvent être définies comme des données numériques qui représentent la topographie d'une surface. De façon générale, le terme « topographie » se réfère à la structure géométrique globale d'une surface, tandis que les irrégularités microscopiques sont plutôt désignées sous les termes de « rugosité » ou « rugosité de surface ». Toutefois, l'expression « saisie topographique de surface », peut être employée lorsque la structure tridimensionnelle d'un objet est exprimée comme la variation de sa hauteur (axe cartésien Z) en fonction des coordonnées cartésiennes X et Y, l'axe X étant

(pour la plupart des méthodes de saisie) la direction de mesure⁶⁷, l'axe Y étant théoriquement dans le plan de la surface réelle (surface limitant le corps et le séparant du milieu environnant). Plusieurs systèmes de coordonnées peuvent être utilisés pour décrire une topographie de surface, mais le système le plus couramment employé reste le système orthogonal de coordonnées cartésiennes. [Organisation Internationale de Normalisation, 1998] cité par [Bonfanti, 2002].

De cette façon, chaque point dans l'espace peut être décrit en utilisant des coordonnées en trois dimensions. Les données représentant les points dans l'espace peuvent être stockées dans une matrice sous différentes formes. A titre d'exemple, il est possible de représenter une surface en trois dimensions composée par NxM points en utilisant une matrice NxM où la valeur de chaque point (X et Y) représente la hauteur du point dans l'espace (Z). La même surface peut être représentée par une matrice (NxM)xD où D correspond au nombre de dimensions. Dans le cas présent, D prend la valeur 3 car un point est décrit par des coordonnées dans un système tridimensionnel. Chaque ligne de la matrice correspond donc à un point dans l'espace et chaque colonne correspond à une dimension dans ce dernier.

Contrairement à la définition utilisée pour les images en deux dimensions, la résolution des topographies en trois dimensions ne se limite pas qu'à des paramètres liés à la résolution latérale (sur le plan XY), mais elle possède également un paramètre concernant la résolution verticale (en Z). Cette dernière est définie comme la variation de hauteur minimale dans un profil pouvant être distingué du bruit de fond⁶⁸.

A.2.2 Systèmes d'acquisition

Plusieurs techniques peuvent être employées afin d'extrapoler la topographie tridimensionnelle d'une surface. Les différentes techniques existantes peuvent être classées selon les principes physiques qui les caractérisent. Une liste non exhaustive de ces techniques est présentée dans les paragraphes suivants.

Une grande partie des techniques qui sont utilisées pour quantifier la topographie d'une surface peuvent être classés en trois catégories (en accord avec le standard de l'ASME B46.1 [ASME B46.1, 1995]) : la profilométrie (profilométrie en 2D), la « profilométrie de zones » (profilométrie en 3D) et le « moyennement des zones ». La profilométrie est une technique qui fournit une évaluation quantitative de la surface à travers une mesure à haute résolution point par point. La « profilométrie de zones » est simplement la mesure de profils parallèles, qui donne lieu à une troisième dimension. La troisième technique, qui ne sera pas traitée dans ce document, mesure une propriété qui représente une moyenne statistique des pics et des vallées de la surface. Une classification se basant sur les propriétés physiques de la technique peut également être effectuée pour les différencier ; on distingue celles qui enregistrent les données concernant la topographie d'une surface suite au contact avec le sujet et celles qui analysent la surface sans entrer en contact avec cette dernière.

⁶⁷ www.predev.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

⁶⁸ www.predev.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

A.2.3 Techniques avec contact

Les instruments à pointe de lecture

Ce genre d'instruments est utilisé principalement dans le but de mesurer le profil d'une surface. Cette technique utilise une pointe de diamant, appelé *stylus*, ayant une taille allant de 0.1 à 10 μm , pour balayer la surface. Lorsque la pointe balaye la surface, le mouvement vertical de la pointe est converti en un signal électrique. Ce dernier est ensuite amplifié et traité. Etant donné qu'il s'agit d'une technique utilisée normalement pour extrapoler les profils des surfaces, pour obtenir une topographie en trois dimensions, il faut ajouter une troisième dimension. Une des deux méthodes suivantes est employée dans ce but : le balayage à trame, utilisé par la plupart des instruments à pointe de lecture, ou le balayage radial. Lors du balayage de la pointe sur la surface, il y a deux façons de collecter les données. La première, appelée dynamique, permet l'enregistrement des données de manière synchronisée avec le balayage de la pointe. La deuxième, appelée statique, effectue une mesure en arrêtant la pointe de lecture à chaque intervalle ΔX , en obtenant de cette manière un morceau unique de données. Ce processus de balayage fournit les mesures beaucoup plus lentement par rapport au balayage dynamique, suite aux interruptions nécessaires pour collecter les données. Puisque que la mesure du profil d'une surface est effectuée par contact avec la pointe, la surface peut subir une déformation. Cette dernière dépendra de la dureté de la surface, de la force de la pointe, de la largeur de la pointe et de la vitesse du balayage. Une pointe ayant une largeur de 2.5 μm ne devrait pas produire des dommages détectables sur des surfaces dures, telles que l'aluminium, tant que la force de la pointe est inférieure à 0.01 mN.

Pour un instrument à pointe de lecture, la résolution latérale est limitée par les dimensions de la pointe et de son angle de flanc. Par contre, la résolution verticale dépend du système de capture employé. Normalement, la résolution latérale maximale qui peut être atteinte par ce genre d'appareillages se situe au niveau du dixième de micromètre. La résolution verticale est normalement de l'ordre de l'angström, tandis que la plage de mesure verticale peut atteindre quelques millimètres en fonction de l'appareil utilisé.

A.2.4 Techniques non contact

Ces techniques d'acquisition fournissent des mesures topographiques sans qu'il n'y ait de contact avec l'échantillon. Certaines techniques, comme les instruments à détection focale ou les instruments interférométriques, peuvent exploiter des propriétés optiques, alors que d'autres, comme la microscopie à force atomique ou la microscopie électronique, utilisent les propriétés des atomes ou des particules telles que des électrons pour extrapoler des profils tridimensionnels.

Les instruments à détection focale

Le terme « détection focale » implique que le profil d'une surface est mesuré en maintenant le foyer du système optique ou en utilisant le principe du foyer optique. Les instruments à détection confocale fonctionnent à l'aide d'un faisceau de lumière qui est réfléchi par un miroir dichroïque. En passant le long de l'objectif, il est focalisé par une lentille, sous la forme d'un point, sur son plan focal. Une mesure en trois dimensions est effectuée en balayant le faisceau sur la surface. Lors du balayage, le spot de lumière est maintenu focalisé par un mouvement vertical du spécimen ou en ajustant l'objectif, ce qui permet d'extrapoler la dimension verticale. Plusieurs méthodes de détection focale ont été développées. Elles

diffèrent principalement en fonction du mécanisme de détection, ainsi que de la méthode de scannage vertical et/ou horizontal. Les différentes méthodes de détection focale sont les suivantes : détection d'intensité, différentielle, de l'angle critique, astigmatique, de Foucault, du faisceau oblique, du défaut de focalisation et confocale. La résolution latérale, qui dépend de la taille du spot de lumière, est de l'ordre du dixième de micromètre. Certaines méthodes peuvent atteindre des résolutions verticales inférieures au nanomètre. La plage de mesure selon l'axe vertical n'est généralement pas limitée par la longueur d'onde, au contraire d'autres techniques, telles que les techniques interférométriques. Ce genre de technique possède l'avantage d'effectuer des mesures sans altérer l'échantillon, mais possède malgré tout, certaines limitations. En effet, si l'inclinaison de l'échantillon dépasse une certaine limite, la lumière est complètement diffusée et aucune réponse n'arrive au détecteur. De plus, la mise au point devient impossible si la lumière réfléchie est inférieure à 4% de la lumière incidente.

A titre d'exemple, dans le cas de la profilométrie laser, la surface est mesurée en focalisant un laser infrarouge sur celle-ci. La lumière réfléchie est collectée par les mêmes lentilles et elle est ensuite détectée par un ensemble de diodes. Le signal qui arrive au détecteur est utilisé pour corriger la position de focalisation des lentilles, de manière à ce que le spot du laser soit parfaitement focalisé sur la surface. Ainsi, la position des lentilles de focalisation correspond à la distance entre la surface relative et un point de référence commun. Le spot du laser peut être focalisé jusqu'à des dimensions inférieures à 1 μm , ce qui permet d'obtenir de très bonnes résolutions latérales [De Kinder et al., 1998].

Les instruments interférométriques

L'interférométrie est une technique très utilisée pour mesurer la rugosité de surface et pour l'inspection optique de haute qualité des surfaces. Le concept d'interférométrie se base sur le principe optique de la lumière qui peut être décrite par une onde ayant une fréquence et une amplitude données. Si deux rayons de lumière sont combinés, ils interfèrent l'un avec l'autre. Cette interférence peut donner différents résultats. Si la crête d'une onde coïncide avec le creux de l'autre, on aura une interférence destructive et donc annulation des deux ondes. Par contre, si les deux crêtes d'ondes coïncident, on aura une interférence constructive, donnant lieu à une onde renforcée.

Un interféromètre emploie un rayon de lumière divisé en deux faisceaux au moyen d'un collimateur. Les deux faisceaux possèdent la propriété d'avoir la même amplitude et d'être en phase l'un avec l'autre. Un des faisceaux est dirigé vers un miroir (faisceau de référence) où il sera réfléchi, alors que l'autre est dirigé vers l'échantillon. Le faisceau dirigé vers l'échantillon est réfléchi et revient à la source où il interfère avec le faisceau de référence. La texture du spécimen change la distance effectuée par le deuxième faisceau. Lorsque les deux faisceaux se recombinent, certaines parties du deuxième faisceau seront en phase avec le faisceau de référence, alors que d'autres ne le seront pas. La relation spatiale entre ces deux faisceaux contient les informations relatives à la topographie de la surface. Les instruments interférométriques utilisent les interférences entre les faisceaux afin d'obtenir une topographie en trois dimensions de la surface analysée. Plusieurs types d'interféromètres ont été développés ; ils peuvent être classés en deux grandes catégories : ceux mesurant directement les hauteurs de surface et ceux mesurant l'inclinaison de la surface.

Les interféromètres pour l'extrapolation de la topographie en trois dimensions sont normalement une combinaison entre des interféromètres, des microscopes et des micro-ordinateurs. De ce fait, la plage de mesure latérale pour un microscope interférométrique est limitée par le champ de vue du système optique. Avec l'aide d'un ordinateur, il est toutefois

possible d'enregistrer plusieurs morceaux de la surface et de les « coller » ensemble, il s'agit d'une technique appelée *stitching*. La résolution latérale dépend du système optique, elle se situe entre 0.35 et 0.55 μm . La résolution verticale est de l'ordre du nanomètre, voir inférieur.

Les instruments exploitant d'autres principes optiques

D'autres principes optiques peuvent être exploités afin d'extrapoler la topographie d'un objet. Parmi ces principes, il est possible de citer les techniques qui se basent sur l'holographie digitale ou sur les aberrations chromatiques de la lumière blanche.

Holographie digitale

Ce genre de technique utilise les principes de l'interférométrie afin de créer une représentation de la surface observée. La structure de base d'un appareil qui travaille selon ce principe comporte un interféromètre ayant comme source de lumière un laser. À la sortie de l'appareil, l'interférence entre le rayon provenant de l'objet et un rayon de référence produit l'intensité de l'hologramme. Un hologramme digital est ensuite enregistré en utilisant une caméra CCD standard. Cette dernière transmet les données à un ordinateur qui, en appliquant des procédures numériques, reconstruit une image en trois dimensions de l'échantillon [Cuche et al., 1999].

Aberrations chromatiques de la lumière blanche

Dans le but de déterminer le positionnement dans l'espace d'un point, sans devoir procéder par focalisation dynamique, c'est-à-dire sans aucun mouvement mécanique d'un composant le long de l'axe Z, il faut procéder à un codage de l'espace de mesure, autre que temporel. L'espace de mesure peut donc être codé en fonction du spectre de lumière en utilisant le chromatisme axial des objectifs. Le chromatisme axial est dû à la dispersion (variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde) des lentilles utilisées dans les instruments optiques. Comme les caractéristiques optiques d'un objectif dépendent de la longueur d'onde, l'image d'une source ponctuelle de lumière blanche est généralement un continuum de points images monochromatiques, répartis le long de l'axe optique (Figure 208).

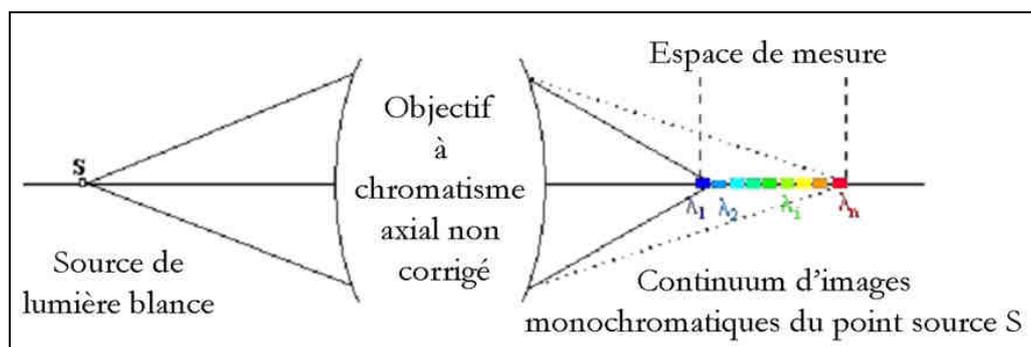


Figure 208

Schéma montrant les points images monochromatiques répartis le long de l'axe optique⁶⁹.

En pratique, une source de lumière blanche est représentée au moyen de l'objectif à chromatisme axial étendu en une série d'images ponctuelles monochromatiques dans l'espace de mesure. Lorsqu'un objet intercepte l'espace de mesure, une seule des images ponctuelles

⁶⁹ www.stilsa.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

monochromatiques est alors focalisée. Par application de la propriété de confocalité, seule la longueur d'onde focalisée à ce point sera transmise avec un maximum d'efficacité. Une fois que le signal lumineux a été sélectionné par filtrage spatial, il reste à le « décoder » pour en extraire l'information d'altitude recherchée. Cette opération est réalisée par analyse spectrométrique⁷⁰.

Les microscopes à balayage non optique

Il s'agit de microscopes qui n'utilisent pas de lentilles optiques pour visualiser les images, mais plutôt des tubes à rayons cathodiques ou des écrans d'ordinateurs. Il existe deux grandes classes de microscopes à balayage non optique : les microscopes électroniques et les microscopes à balayage à sonde.

Les microscopes électroniques

Cette catégorie comprend les microscopes électroniques à balayage (MEB), les microscopes électroniques à transmission (MET) et les microscopes électroniques à balayage par transmission (STEM). La microscopie électronique se base sur le principe suivant : si un rayon d'électrons est dirigé vers un échantillon, il est possible d'enregistrer le courant émis en fonction de la position relative de l'échantillon. La microscopie électronique permet d'atteindre une résolution latérale très élevée de l'ordre de plusieurs nanomètres. Cette dernière dépend de plusieurs paramètres, tels que la largeur du faisceau d'électrons ou le courant employé. En outre, le microscope électronique possède une grande profondeur de champ qui dépasse largement celle d'un microscope optique. Malheureusement, cette technique ne permet pas de faire d'extrapolation directe des données quantitatives relatives à la topographie de l'objet. Les données résultantes peuvent donc être désignées comme « pseudo tridimensionnelles » [Bonfanti, 2002].

Afin d'extrapoler des données quantitatives, deux méthodologies peuvent être adoptées. La première se base sur une approche stéréographique. Les données en trois dimensions sont extrapolées automatiquement par un logiciel à partir de deux images en stéréo obtenues en inclinant simplement le stage de mesure⁷¹ (plan sur lequel l'échantillon est positionné). La deuxième se base sur le signal provenant des électrons rétrodiffusés émis par l'échantillon qui s'avère être proportionnel à l'inclinaison de la surface le long de la direction de balayage. Parmi les deux approches, celle exploitant la stéréographie permet d'atteindre une meilleure résolution latérale. La plage de mesure verticale est limitée à quelques centaines de micromètres, tandis que la plage de mesure spatiale dépend uniquement du grossissement utilisé.

Les microscopes à balayage à sonde

Cette catégorie comprend entre autres, les microscopes à balayage à effet tunnel (STM), les microscopes à force atomique (AFM), les microscopes à balayage à capacitance (SCM), les microscopes thermiques à balayage (TSM), les microscopes acoustiques à balayage (SAM) et les microscopes à force magnétique (MFM). Les techniques les plus connues sont la microscopie à effet tunnel et à force atomique (STM et AFM). Toutes ces techniques permettent de mesurer la topographie de surface en utilisant une très petite sonde, qui balaye la surface de l'échantillon de très près. Il s'agit donc de techniques similaires aux instruments

⁷⁰ www.stilsa.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

⁷¹ www.alicon.com – Dernière consultation effectuée en date du 26 mai 2010

à pointe de lecture, mais contrairement à ces derniers, la plupart de ces appareils effectuent les mesures sans entrer en contact avec l'échantillon. La différence entre les différents microscopes à balayage à sonde se situe au niveau du principe physique exploité par le mécanisme régissant le fonctionnement de la sonde [Bonfanti, 2002]. Dans le cadre de cette étude, seulement les notions théoriques concernant la microscopie à effet tunnel et à force atomique ont été prises en considération car les autres techniques possèdent des applications plutôt spécifiques.

Lorsque la sonde du microscope à effet tunnel (STM) balaye la surface, un courant s'installe entre la pointe de mesure et l'échantillon, qui sont, les deux, composées d'un matériel conducteur. Le courant est proportionnel à la distance les séparant ; ce principe permet donc d'extrapoler les informations concernant les changements de hauteurs dans la surface. Ce genre d'appareillage permet d'atteindre des résolutions très élevées. En effet, la résolution latérale est environ d'un angström, alors que la résolution verticale se rapproche du centième d'angström.

Contrairement au STM, le microscope à force atomique (AFM) exploite le changement de force entre atomes en fonction de la distance pour extrapoler une topographie de surface, permettant ainsi l'analyse d'échantillons n'ayant pas des propriétés conductrices. La résolution que peut atteindre un AFM est inférieure au STM. En effet, la résolution verticale se situe autour d'un angström, alors que la résolution latérale est de plusieurs nanomètres. Un des plus grands inconvénients liés à l'usage de ce genre de techniques réside dans la plage de mesure très réduite. Elle peut parfois être limitée à environ $100 \times 100 \mu\text{m}^2$.

B. ANNEXE – RESULTATS

Pour chaque type d'arme, deux spécimens ont été employés pour construire les distributions relatives à l'intravariabilité ainsi que pour extrapoler l'ensemble des rapports de vraisemblance utilisés pour l'établissement des Tippett plots. La plupart des résultats ont été présentés dans le chapitre N°10. Cette annexe a pour but de compléter les informations présentes dans les chapitres précédents de ce document. Comme il a été le cas dans le chapitre N°10, les résultats sont exposés séparément pour chaque type de trace. C'est-à-dire que les résultats sont présentés tout d'abord pour la trace du percuteur, ensuite pour celle de la tête de culasse et enfin pour la fusion des deux traces et cela pour les trois échantillonnages d'armes.

B.1 La trace du percuteur

B.1.1 Armes SIG Sauer

Les résultats pour cette arme sont similaires à ceux présentés dans la section N°10.2.1. Les distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité se superposent d'une manière relativement importante (Figure 209). En outre, la forme des nuages de points indique que les deux variables sont corrélées pour la distribution de l'intravariabilité aussi bien que pour celle de l'intervariabilité.

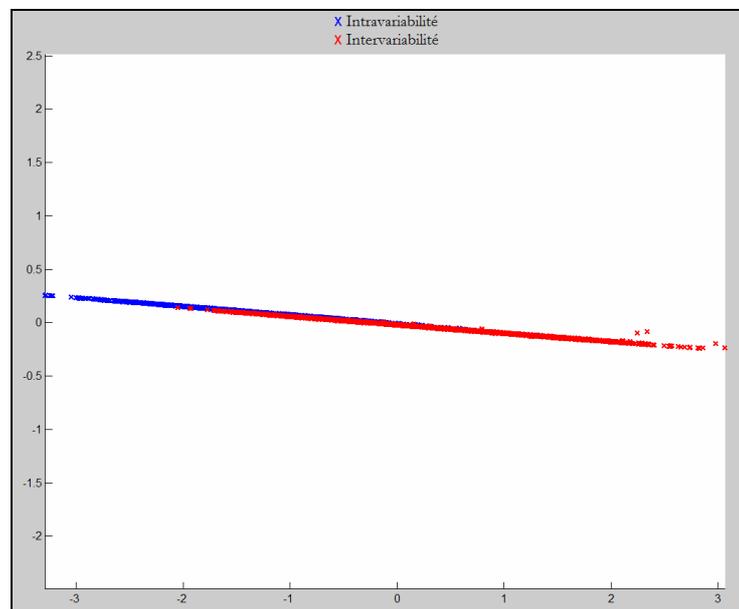


Figure 209

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour les traces du percuteur. La totalité des points aberrants est de 63, dont 45 pour l'intravariabilité (n=1176) et 18 pour l'intervariabilité (n=3315).

Comme pour la première arme SIG Sauer, le Tippett plot montre des taux d'erreur forensique relativement élevés (Figure 210). Il s'agit d'un résultat plutôt attendu, car les traces

du percuteur laissées par ce genre de pistolet sont relativement lisses et ne présentent pas toujours des défauts morphologiques particuliers.

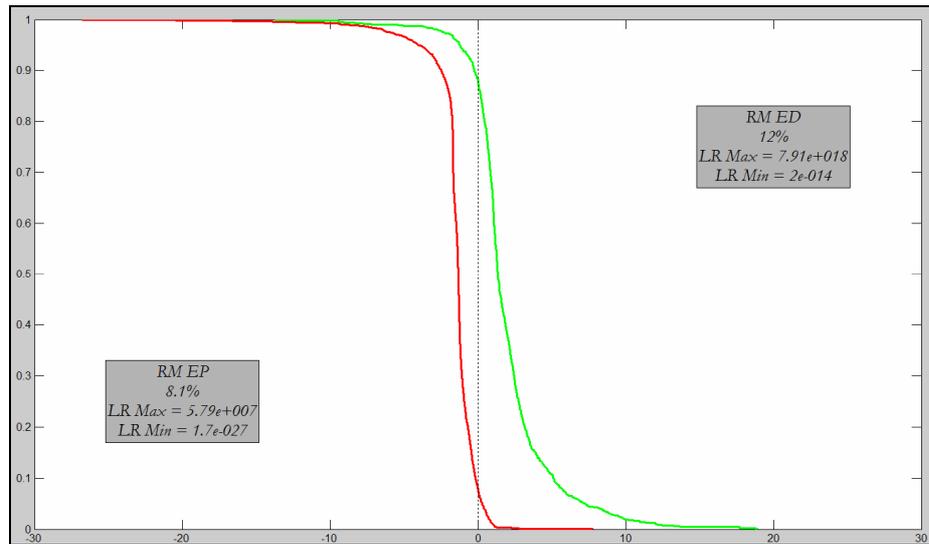


Figure 210

Tippet plot pour les traces du percuteur de la deuxième arme SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les observations faites concernant l'influence des *outliers* sur les résultats montrent que le RMED est beaucoup plus affecté par les points aberrants que sa contrepartie⁷².

Le remplacement du KDE utilisé plus haut par une loi normale bivariée est peu adapté à des données ayant un niveau de corrélation si élevé. Dans ce cas particulier, les résultats obtenus à l'aide de la loi normale bivariée ne sont pas présentés.

⁷² Tous les Tippet plots présentés dans ce document ont été calculés en prenant en considération les *outliers* qui ont été écartés pour la modélisation des courbes. Les valeurs des RMED et RMEP ont également été calculées suite à l'exclusion des *outliers*. Ces valeurs sont exposées dans un résumé à la fin de chaque section, mais sans qu'aucun Tippet plot ne soit présenté.

B.1.2 Armes Ceska Zebrojovka (CZ)

Les données relatives à l'intravariabilité sont plus concentrés par rapport à ceux observés pour l'autre arme de marque CZ. Mais également dans ce cas, les deux distributions ne sont pas complètement séparées (Figure 211).

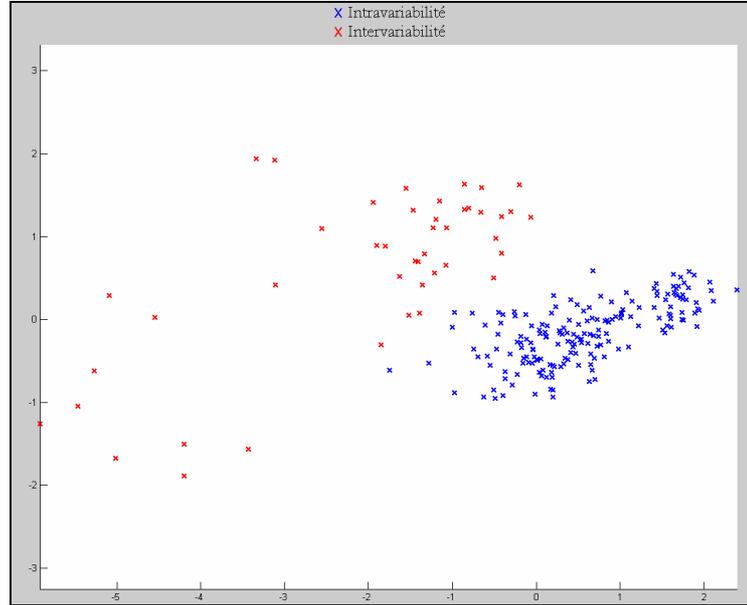


Figure 211

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour les traces du percuteur. La totalité des points aberrants est de 5, dont 4 pour l'intravariabilité (n=184) et 1 pour l'intervariabilité (n=45).

La légère superposition des deux distributions se reflète dans les taux de RMED et de RMEP qui sont respectivement de 2.7% et 0% (Figure 212). Le RMED observé lors de la modélisation par KDE change lorsque les données sont modélisées par une loi normale bivariée en passant de 2.7% à 4.3% (Figure 213).

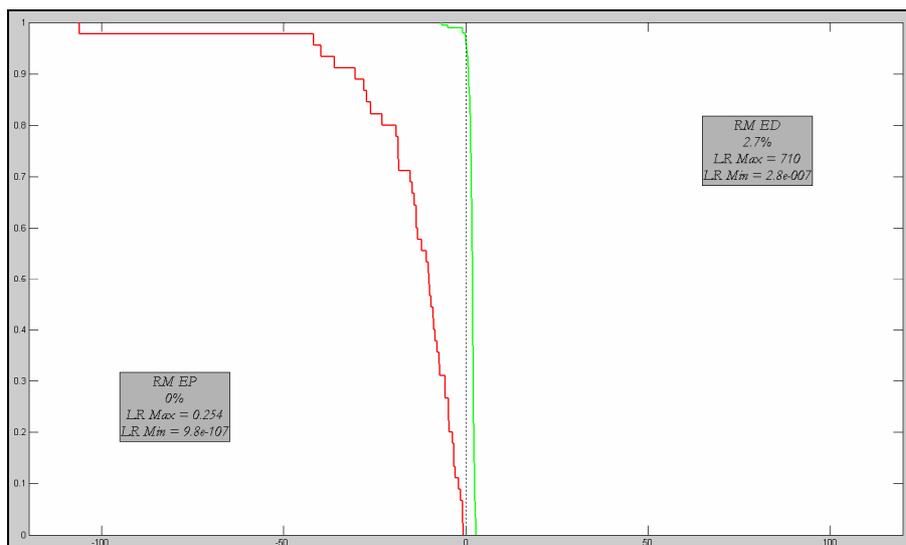


Figure 212

Tippett plot pour les traces du percuteur de la deuxième arme CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

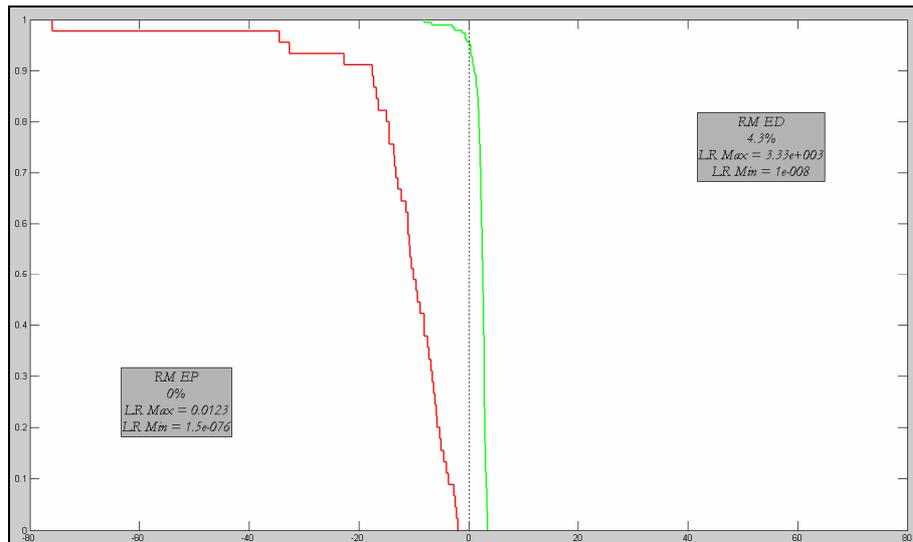


Figure 213

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Encore une fois, les résultats ne retranscrivent pas parfaitement la réalité car les traces du percuteur laissées par ce genre d'arme sont facilement différenciables entre elles. En outre, il est intéressant de voir que l'étendue des LR sous H_p reste très limitée lorsque les données sont modélisées par la fonction non paramétrique (LR maximal de 710). Les valeurs augmentent pour la loi normale bivariée. L'étendue limitée des rapports de vraisemblance sous H_p peut éventuellement s'expliquer par la proximité entre les deux distributions.

Quel que soit le type de modélisation, le RMED des Tippett plots ci-dessus (Figure 212 et Figure 213) est en bonne partie représenté par des *outliers*.

B.1.3 Armes de type PPK

Les résultats des deux armes de type PPK restent très similaires à l'égard de la trace du percuteur (Figure 214). La principale différence réside dans le fait que dans le cas présent, les taux d'erreur forensique sont réduits à zéro (Figure 215 et Figure 216).

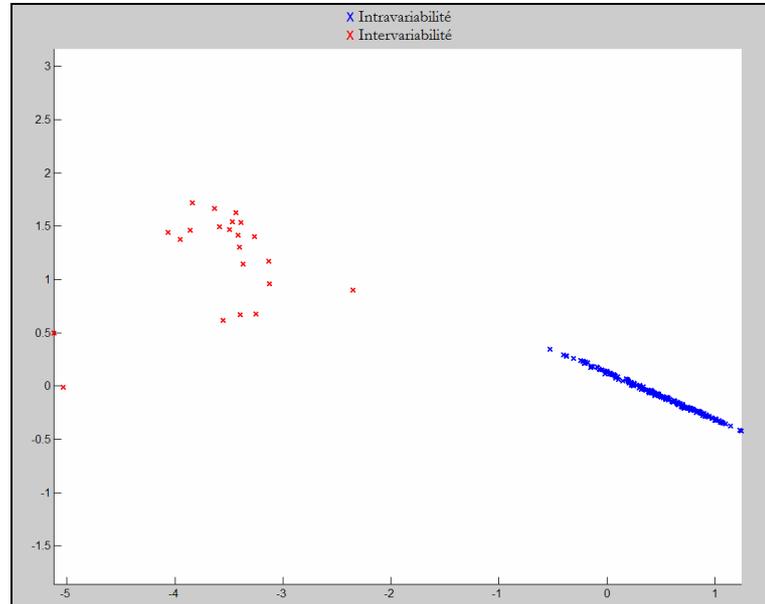


Figure 214

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace du percuteur. La totalité des points aberrants est de 2, dont 0 pour l'intravariabilité (n=190) et 2 pour l'intervariabilité (n=24).

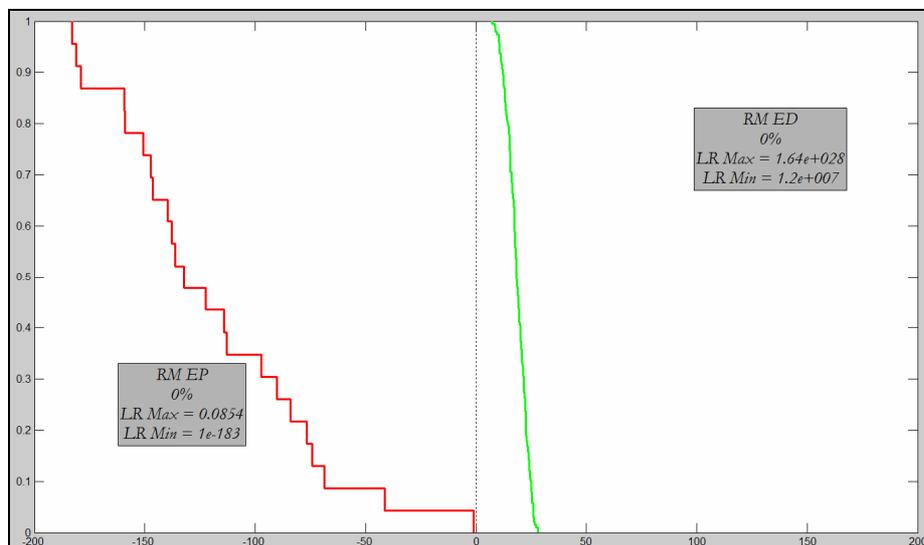


Figure 215

Tippett plot pour les traces du percuteur de la deuxième arme de type PPK. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

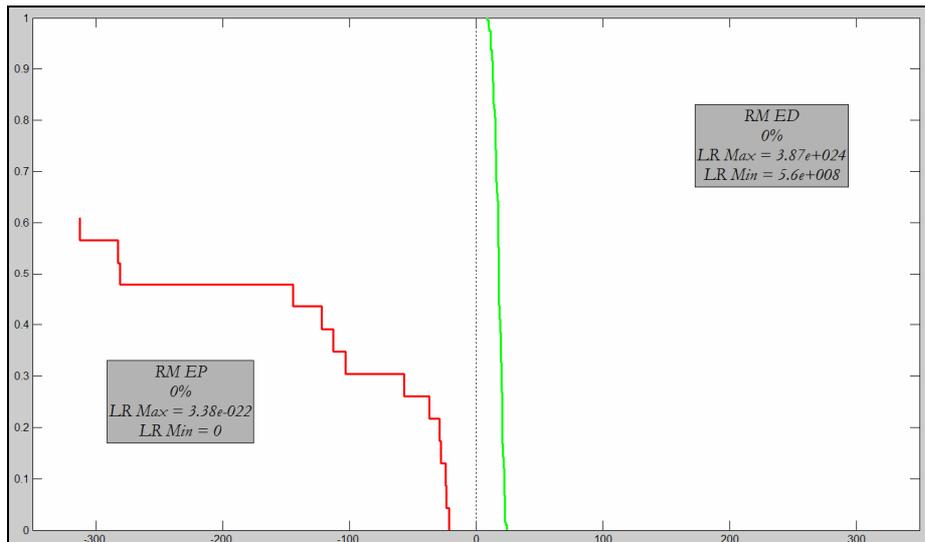


Figure 216

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

B.1.4 Résumé des résultats relatifs à la trace du percuteur

Les RMEP et RMED relatifs à la trace du percuteur pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant :

	SIG Sauer	Ceska Zebrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	8.1 % (9 sur 268)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (KDE)	12 % (43 sur 137)	2.7 % (4 sur 5)	0 % (0 sur 0)
RMEP (loi normale)	-	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (loi normale)	-	4.3 % (4 sur 8)	0 % (0 sur 0)

Tableau 7

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la trace du percuteur pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèses représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

B.2 La trace de la tête de culasse

B.2.1 Armes SIG Sauer

Par rapport à la première arme fabriquée par SIG Sauer, le taux de recouvrement des deux distributions est légèrement inférieur (Figure 217).

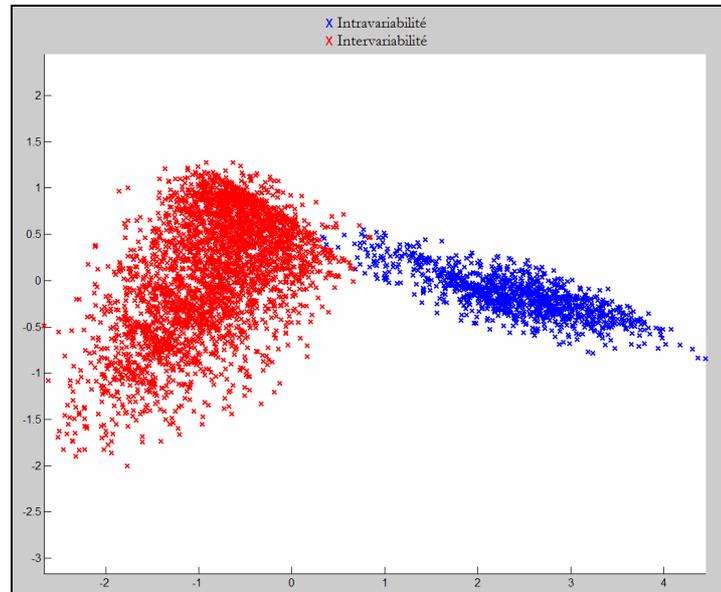


Figure 217

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour les traces de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 75, dont 9 pour l'intravariabilité (n=1176) et 66 pour l'intervariabilité (n=3315).

Ces observations se traduisent également par des taux d'erreurs forensique moins importants (Figure 218 et Figure 219).

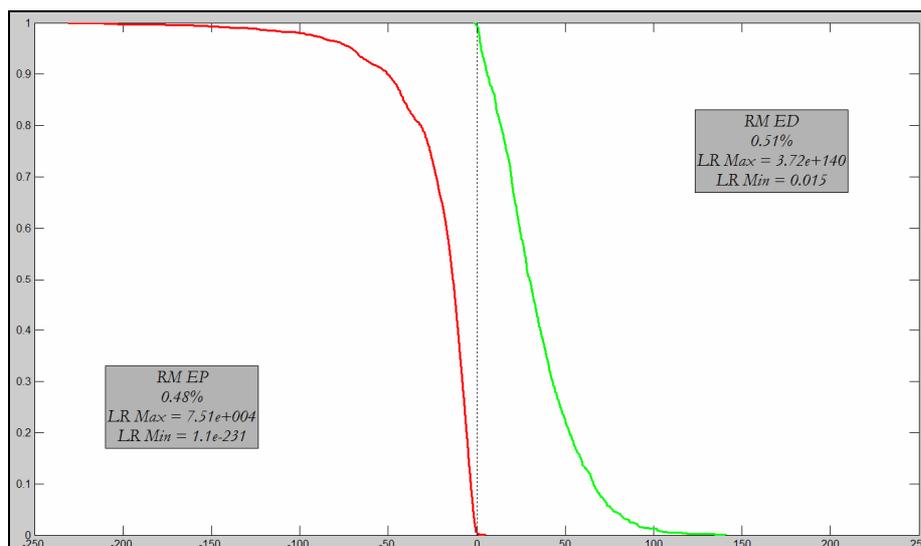


Figure 218

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse de la deuxième arme SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Encore une fois, la modélisation par une loi paramétrique, telle que la loi normale bivariée, permet de modérer les valeurs des rapports de vraisemblance qui restent relativement élevés lorsque les résultats sont évalués au moyen du KDE (Figure 219).

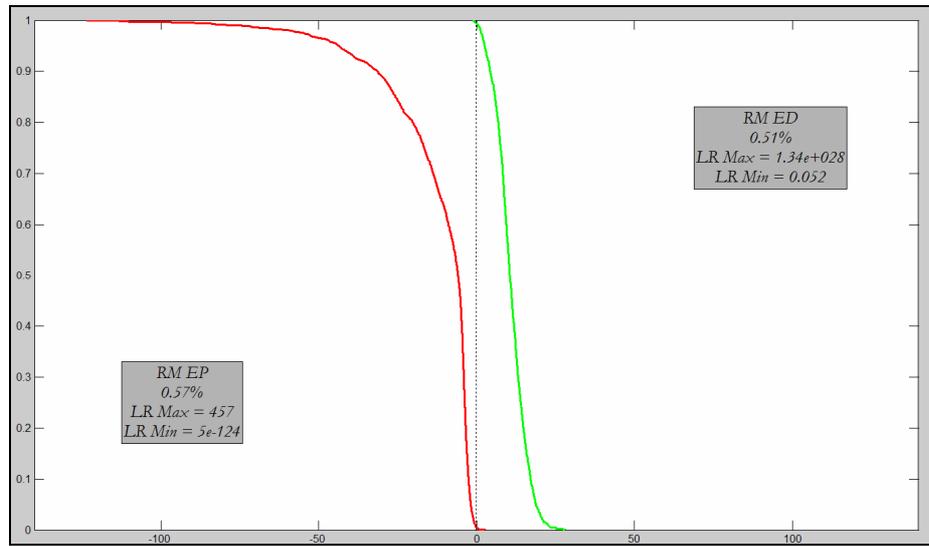


Figure 219

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les observations effectuées concernant les points aberrants ont montré que, quel que soit le type de modélisation, les *outliers* représentent au moins le 25% des LR considérés comme étant des erreurs forensique.

B.2.2 Armes Ceska Zebrojovka (CZ)

Les données relatives aux traces des têtes de culasse des armes CZ se ressemblent beaucoup entre elles et montrent une excellente séparation entre les distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité (Figure 220).

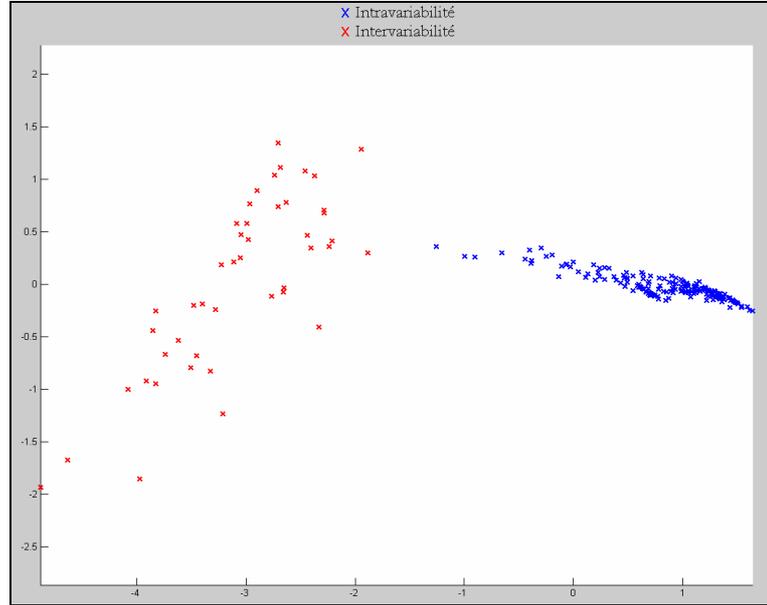


Figure 220

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 6, dont 6 pour l'intravariabilité (n=184) et 0 pour l'intervariabilité (n=45).

Etant données les différences morphologiques entre les traces laissées par des armes différentes ainsi que la bonne reproductibilité des traces laissées par l'arme en question, une telle séparation entre les deux distributions est normalement attendue (cf. Sections N°C.2).

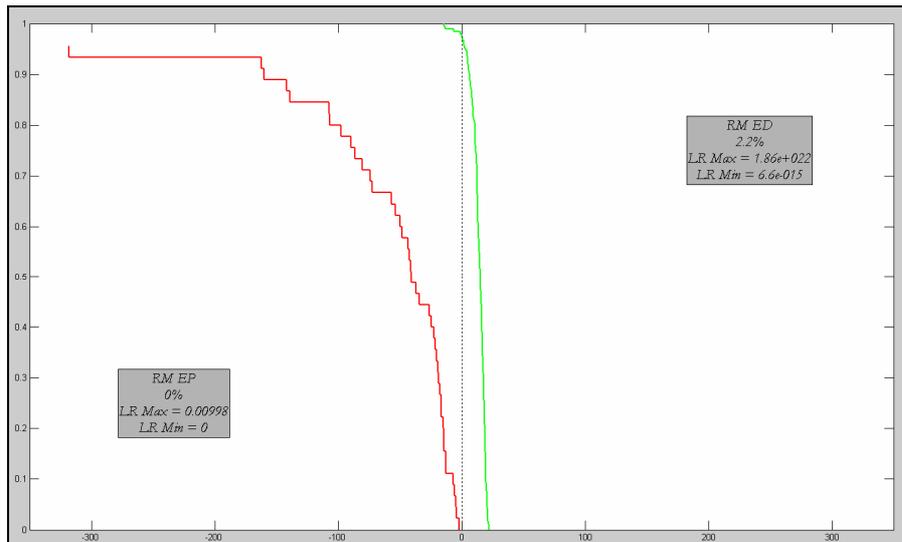


Figure 221

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse de la deuxième arme CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

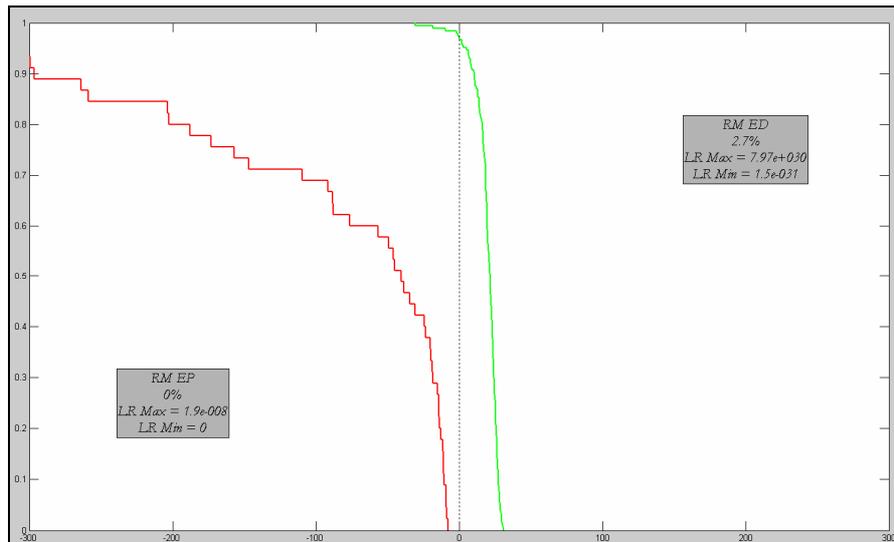


Figure 222

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Encore une fois, le taux des rapports de vraisemblance inférieurs à 1 lorsque H_p est vérifiée peut être expliqué par des alignements n'ayant pas abouti au minima absolu (Figure 221 et Figure 222). Les observations faites concernant l'influence des *outliers* sur les résultats montrent que, quel que soit le type de modélisation, la totalité des LR inférieurs à 1 lorsque H_p est vérifiée (RMED) provient de points qui avaient été considérés préalablement comme des *outliers*.

B.2.3 Armes de type PPK

L'observation des deux distributions montre que l'ensemble des données relatives à l'intravariabilité sont plutôt concentrés le long d'une ligne, ce phénomène démontre l'existence d'une corrélation entre les deux variables (Figure 223). En revanche, il y a une grande variabilité le long de la première dimension. En effet, l'intravariabilité s'étend jusqu'à l'intervariabilité.

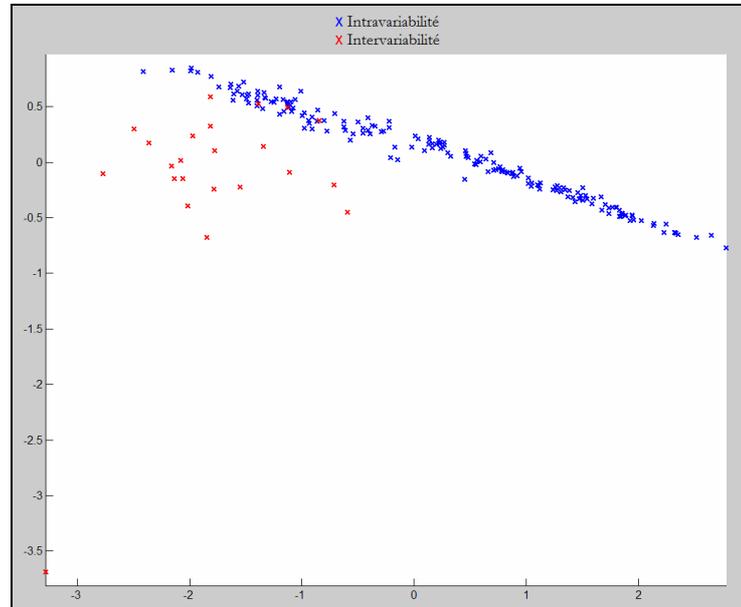


Figure 223

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la trace de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 3, dont 2 pour l'intravariabilité (n=190) et 1 pour l'intervariabilité (n=24).

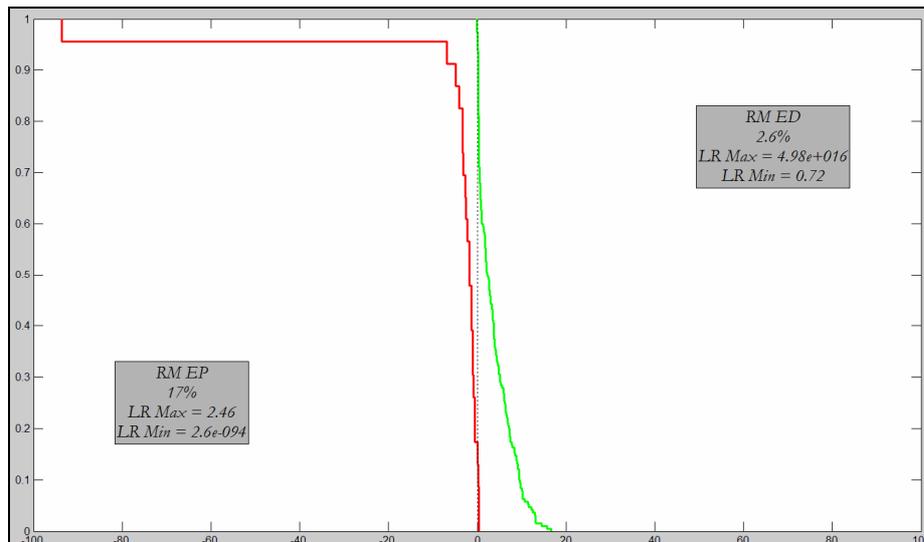


Figure 224

Tippett plot pour les traces de la tête de culasse de la deuxième arme de type PPK. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Le taux de RMEP, qui monte à 17% pour le KDE et à 13% pour une modélisation normale (Figure 224 et Figure 225), trouve une explication dans l'ampleur de l'intravariabilité qui englobe dans son ensemble également des points faisant partie de l'intervariabilité (Figure 223). La discussion concernant les causes de ce phénomène peut être consultée à la section N°10.3.3.

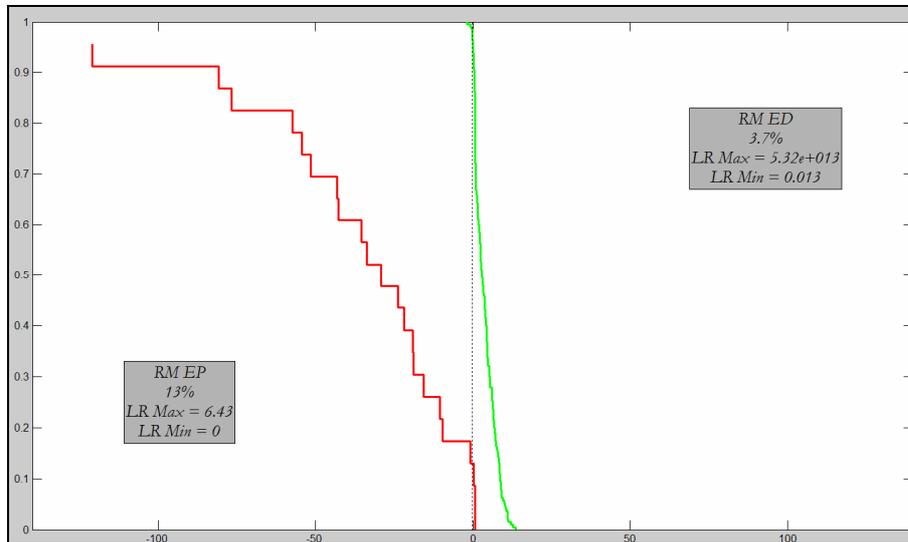


Figure 225

Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les *outliers* n'ont aucune influence sur les taux d'erreur forensique. Leur utilisation pour le calcul des LR ou leur écartement n'affectent pas les RMED et RMEP.

B.2.4 Résumé des résultats relatifs à la trace de la tête de culasse

Les RMEP et RMED relatifs à la trace de la tête de culasse pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant :

	SIG Sauer	Ceska Zebrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	0.48 % (5 sur 16)	0 % (0 sur 0)	17 % (0 sur 4)
RMED (KDE)	0.51 % (3 sur 6)	2.2 % (4 sur 4)	2.6 % (0 sur 5)
RMEP (loi normale)	0.57 % (5 sur 19)	0 % (0 sur 0)	13 % (0 sur 3)
RMED (loi normale)	0.51 % (3 sur 6)	2.7 % (5 sur 5)	3.7 % (1 sur 7)

Tableau 8

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la trace de la tête de culasse pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèses représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

B.3 Fusion des deux traces

Les paragraphes suivants montrent les résultats obtenus suite à la fusion de l'ensemble de données, à savoir, ceux résultant de la comparaison des traces du percuteur et de la tête de culasse.

B.3.1 Armes SIG Sauer

Les deux distributions sont quasiment séparées et relativement concentrées autour d'une moyenne avec des écarts-type plus prononcés pour une variable par rapport à l'autre (Figure 226).

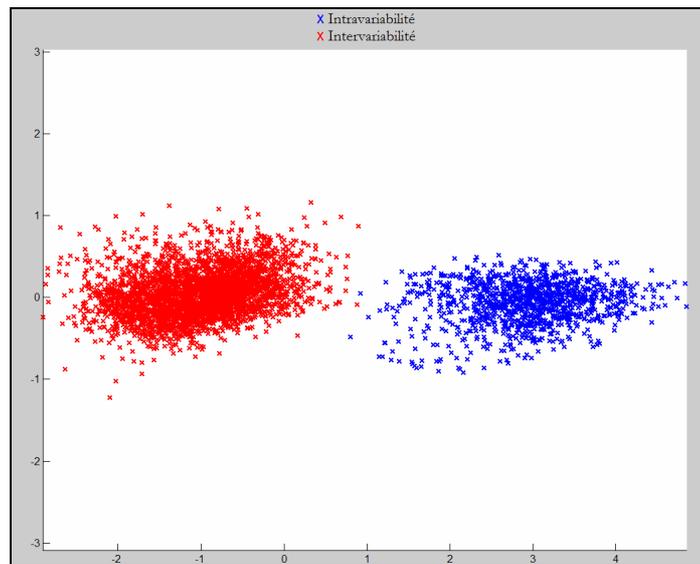


Figure 226

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 39, dont 25 pour l'intravariabilité (n=1176) et 14 pour l'intervariabilité (n=3315).

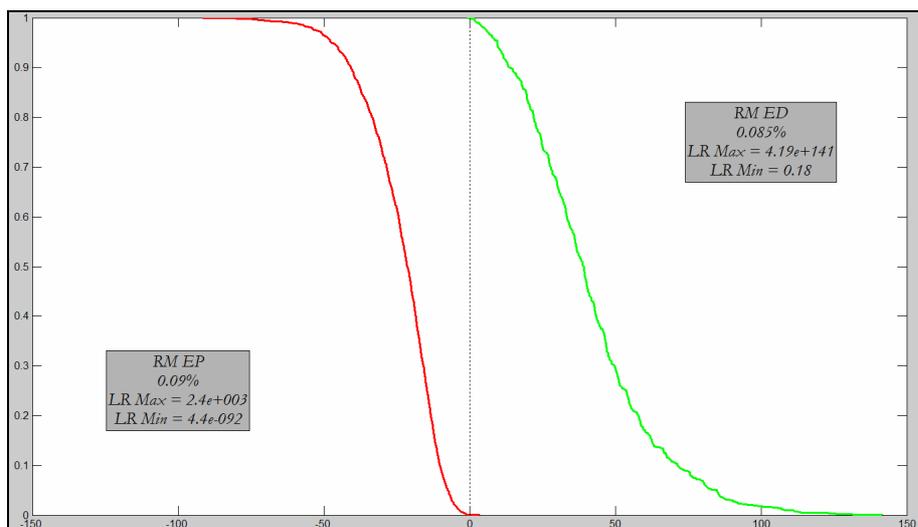


Figure 227

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse de la deuxième arme SIG Sauer. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

L'excellente séparation des résultats lorsque l'une ou l'autre hypothèse est vérifiée se traduit par des taux d'erreur forensique très proches de zéro (Figure 227 et Figure 228).

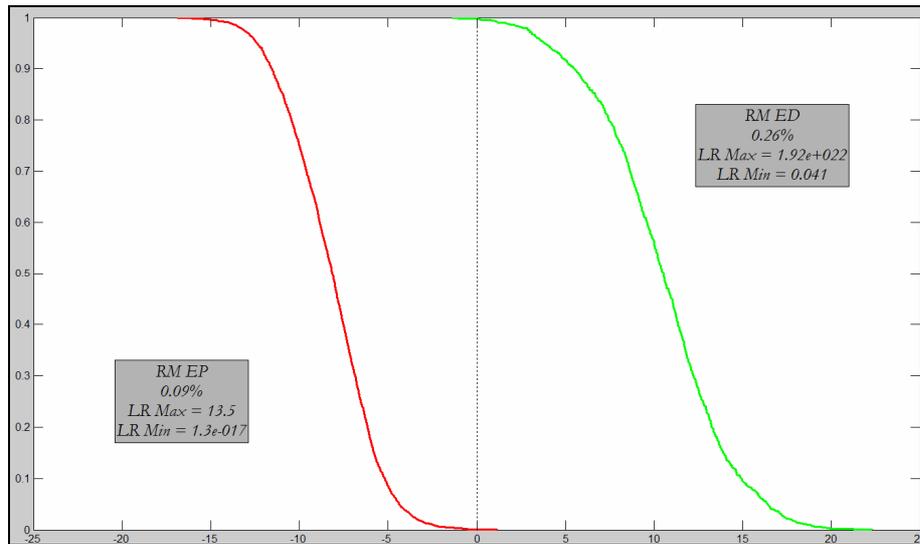


Figure 228

Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Les résultats pour les deux armes SIG Sauer se ressemblent beaucoup sauf pour le taux de RMED qui est sensiblement plus bas pour l'arme en question. Cette diminution pourrait trouver une explication dans le fait que les traces de la tête de culasse laissées par la deuxième arme sont plus marquées et présentent plus de stries par rapport à la première (cf. Annexe C.1.2). Cette différence de marquage se traduit par un pourcentage de mauvais alignements nettement moins important. La distance entre l'intravariabilité et l'intervariabilité se trouve ainsi augmentée.

En ce qui concerne la contribution des *outliers*, les résultats ont montré qu'une grande partie des points contribuant aux taux d'erreur forensique est représentée par des valeurs considérées préalablement comme aberrantes.

B.3.2 Armes Ceska Zebrojovka (CZ)

Les résultats ci-dessous ressemblent beaucoup aux résultats obtenus au moyen de la première arme CZ (cf. Section N°10.4.2 et Figure 229). Les distributions sont bien séparées et par conséquent les taux d'erreur sont proches de zéro (Figure 230 et Figure 231).

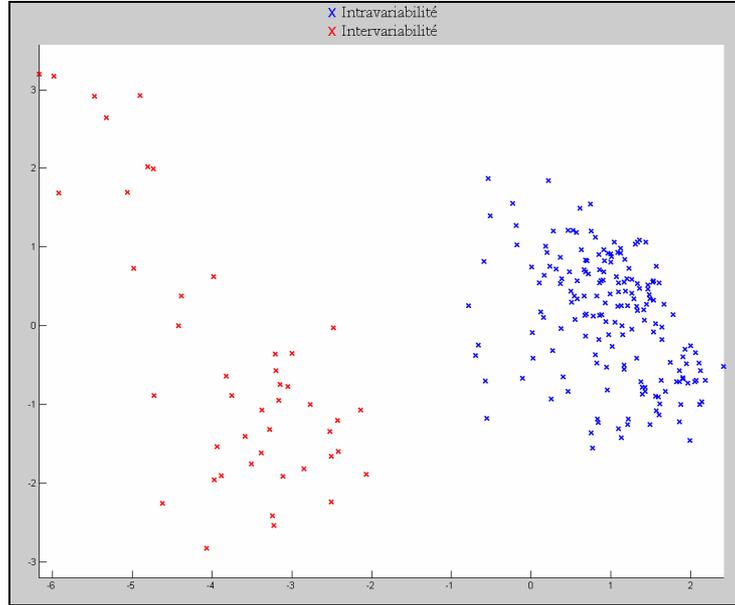


Figure 229

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 6, dont 6 pour l'intravariabilité (n=184) et 0 pour l'intervariabilité (n=45).

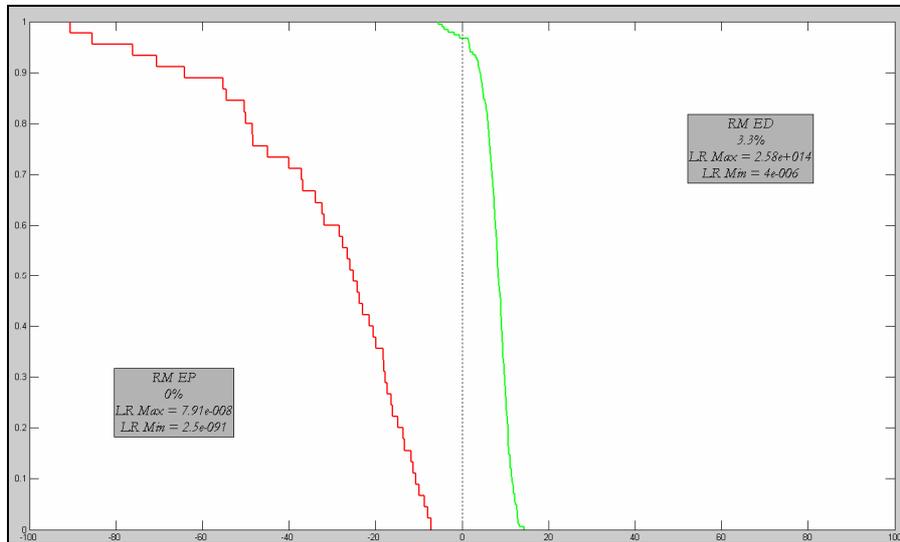


Figure 230

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse de la deuxième arme CZ. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

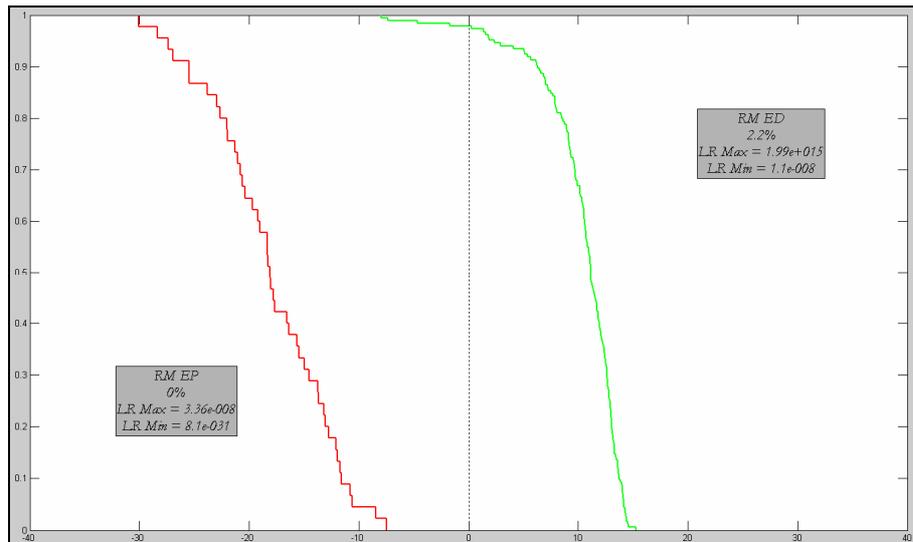


Figure 231

Tippett plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmique (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

Le RMED est complètement représenté par les points qui ont été considérés préalablement comme des *outliers*. Ce résultat est plutôt attendu car dans l'image ci-dessus les distributions sont complètement séparées (Figure 229). Seuls les points aberrants, éliminés pour la visualisation des distributions ainsi que pour la modélisation des données, peuvent donc expliquer des RMED supérieurs à 0%.

B.3.3 Armes de type PPK

Comme dans le cas des armes CZ, les résultats obtenus avec les armes de type PPK se ressemblent beaucoup. Les différences évidentes entre les traces du percuteur et de la tête de culasse laissées par des armes différentes se reflètent sur les taux d'erreur forensique, lesquels sont réduits à zéro (Figure 232, Figure 233 et Figure 234).

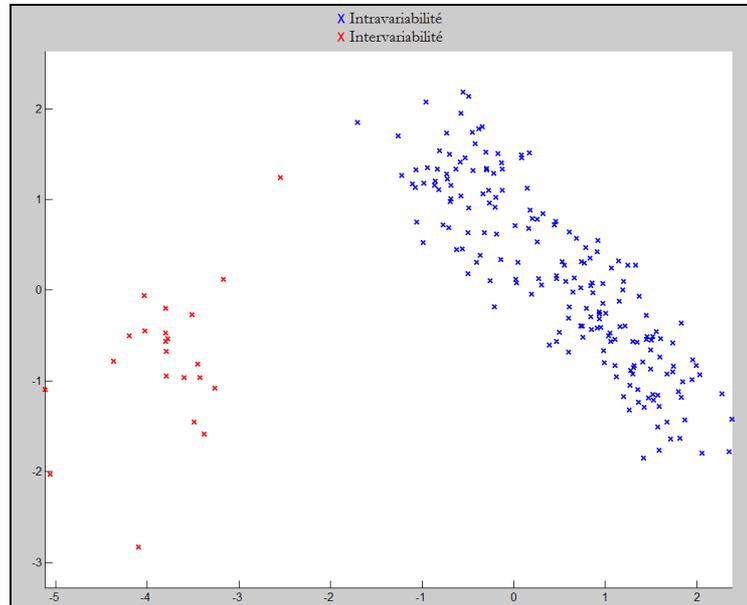


Figure 232

Distributions relatives à l'intravariabilité (en bleu) et l'intervariabilité (en rouge) pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse. La totalité des points aberrants est de 2, dont 2 pour l'intravariabilité (n=190) et 0 pour l'intervariabilité (n=24).

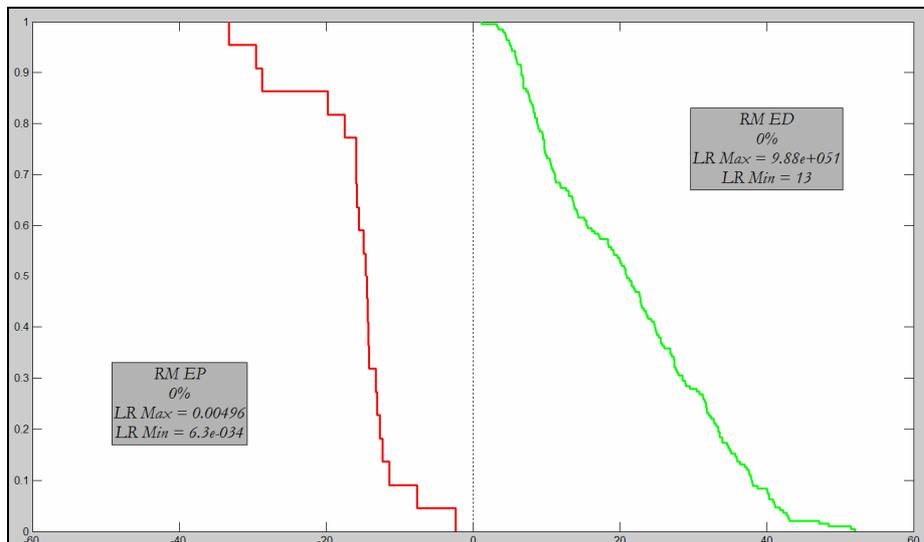


Figure 233

Tippett plot pour la fusion des traces du percuteur et de la tête de culasse de la deuxième arme de type PPK. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

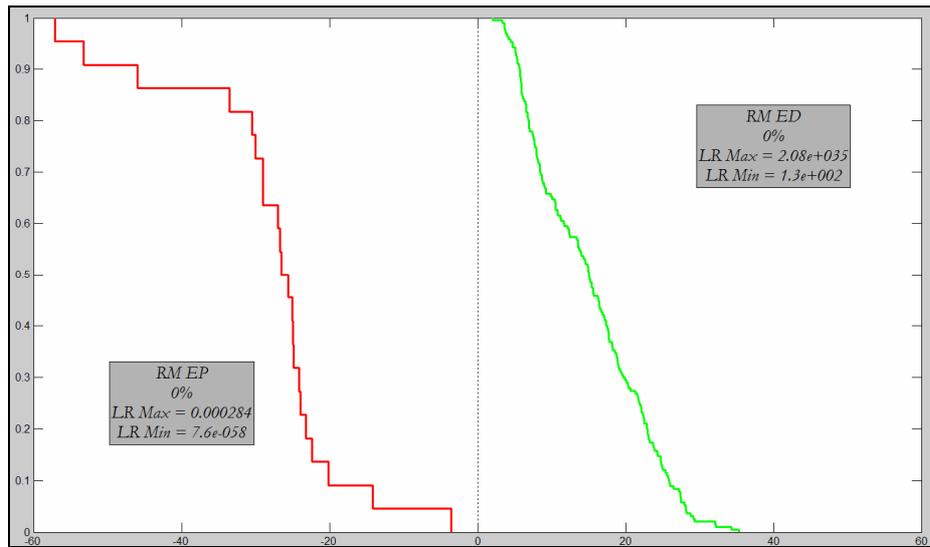


Figure 234

Tippet plot suite à la modélisation par la loi normale bivariée. L'axe des abscisses représente le LR en échelle logarithmiques (\log_{10}) alors que l'axe des ordonnées représente la probabilité cumulée d'observer un LR inférieur ou égal à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

B.3.4 Résumé des résultats relatifs à la fusion des traces

Les RMEP et RMED relatifs à la fusion des traces pour chaque échantillonnage pris en considération sont résumés dans le tableau suivant :

	SIG Sauer	Ceska Zbrojovka	Type PPK
RMEP (KDE)	0.09 % (2 sur 3)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (KDE)	0.85 % (1 sur 1)	3.3 % (6 sur 6)	0 % (0 sur 0)
RMEP (loi normale)	0.09 % (2 sur 3)	0 % (0 sur 0)	0 % (0 sur 0)
RMED (loi normale)	0.26 % (3 sur 3)	2.2 % (4 sur 4)	0 % (0 sur 0)

Tableau 9

Résumé des résultats présentant les RMEP et RMED relatifs à la fusion des traces pour les trois échantillonnages. Les valeurs entre parenthèses représentent la proportion d'*outliers* parmi la totalité des LR ayant été considérés comme faisant partie du taux d'erreur forensique (RMEP et RMED).

B.4 Influence du type de munition

Afin d'étudier l'influence du type de munition employé sur le rapport de vraisemblance, ainsi que la versatilité du système face à des situations moins contrôlées, des comparaisons ont également été effectuées et évaluées entre douilles tirées par la même arme mais provenant de munitions différentes. Pour chaque type de munition, un tir a été effectué ; un rapport de vraisemblance a été calculé en utilisant les mêmes distributions relatives à l'intravariabilité et à l'intervariabilité qui ont été présentées à la section N°B.3 obtenues avec une munition donnée (Geco Sintox® pour les SIG Sauer, Dynamit Nobel pour les CZ et PMC pour les armes de type PPK). Afin de calculer les rapports de vraisemblance, les distributions ont été modélisées par des lois normales bivariées. Les résultats sont résumés sous la forme de tableaux dans les paragraphes suivants.

B.4.1 Armes SIG Sauer

Huit munitions différentes de calibre 9 mm Parabellum ont été employées, à savoir : Fiocchi, Geco[®], Geco Sintox[®], Magtech (CBC), Sellier & Bellot (S&B), la munition suisse fabriquée à Thun, Remington (UMC) et Winchester (Win). Le tableau ci-dessous montre les LR résultant des comparaisons entre les différentes munitions entre elles. Chaque douille est comparée avec une douille tirée par la même arme mais provenant d'une munition différente.

	Fiocchi	Geco	Geco SX	CBC	S&B	Thun
Geco	0.2490					
Geco SX	1.1652e+003	3.6240e+012				
CBC	0.0024	6.5960	2.3911e+003			
S&B	5.9443e-010	1.9470e-009	3.7315e-013	5.2986e-013		
Thun	86.6483	4.6227e+007	3.3252e+005	2.3705e-006	4.8018e-007	
UMC	1.1909e-007	3.1148e-007	3.2328e-007	7.5444e-007	1.5862e-008	5.4592e-008
Win	3.8660e+004	1.1859e+017	0.3289	8.1334e+004	2.4209e-005	1.3889e+007

Tableau 10

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme SIG Sauer.

Seulement 40.74 % des comparaisons a abouti à un rapport de vraisemblance supérieur à 1.

B.4.2 Armes Ceska Zbrojovka

Sept munitions différentes de calibre 9 mm Parabellum ont été employées, à savoir : Magtech (CBC), Dynamit Nobel (DAG), Fiocchi, Geco[®], Hirtenberger, Sellier & Bellot (S&B) et Winchester. Le tableau ci-dessous montre les LR résultant des comparaisons entre les différentes munitions. Chaque douille est comparée avec une douille tirée par la même arme mais provenant d'une munition différente.

	CBC	DAG	Fiocchi	Geco	Hirtenberger	S&B
DAG	4.5605e+004					
Fiocchi	1.1611e-004	384.9970				
Geco	7.9948e+003	1.1367e+009	4.2940e+007			
Hirtenberger	3.8303e-005	1.4818e+008	0.2752	0.3373		
S&B	3.5271e-008	3.0490	2.5515e-011	0.0160	6.8287e-005	
Winchester	3.7636e-008	0.0083	16.6939	1.5120	2.5009e-011	5.9535e-024

Tableau 11

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme CZ.

Egalement pour les armes CZ, la munition reste un facteur primordial. Le taux des LR inférieur à 1 reste très élevé, à savoir 57.14%.

B.4.3 Armes de type PPK

Sept munitions différentes de calibre 7.65 mm Browning ont été employées, à savoir : Magtech (CBC), Fiocchi, Geco[®], Hirtenberger, Norma, Winchester et PMC. Le tableau ci-dessous montre les LR résultant des comparaisons des différentes munitions entre elles. Chaque douille est comparée avec une douille tirée par la même arme mais provenant d'une munition différente.

	CBC	Fiocchi	Geco	Hirtenberger	Norma	Winchester
Fiocchi	NaN					
Geco	5.9567e-020	7.9248e-006				
Hirtenberger	NaN	NaN	1.3741e-023			
Norma	4.4898e+007	1.8743e-009	4.3781e-018	5.7698e-011		
Winchester	NaN	NaN	2.5705e-016	NaN	NaN	
PMC	NaN	NaN	9.6536e-018	NaN	1.3347e+022	NaN

Tableau 12

Résultats des comparaisons entre douilles de munitions différentes tirées par la même arme de type PPK.

Les résultats observés pour cette arme sont encore plus préoccupants par rapport à ceux observés avec l'autre arme de type PPK (arme présentée dans la section N°10.6.3). Dans ce cas, l'influence de la munition est très marquée et le taux de rapports de vraisemblance inférieurs à 1 se trouve être extrêmement élevé si l'on tient en considération le fait que les NaN (*Not a Number*) proviennent d'observations sortant de la plage de données utilisée pour calculer les LR. Il s'agit, dans ce cas, de valeurs inférieures à 1 mais qui ne peuvent pas être calculées car situées en dehors de la plage où les données ont été modélisées.

B.5 Généralisation de l'intravariabilité

Pour chaque fabricant, les deux armes employées dans cette étude ont également fait l'objet d'une comparaison au niveau de la distribution relative à l'intravariabilité, afin d'étudier d'éventuelles possibilités de généraliser cette dernière. Les paragraphes suivants montrent, en fonction du type de trace (percuteur, tête de culasse et fusion des traces), la comparaison entre les deux intravariabilité, respectivement pour les armes CZ (Figure 235, Figure 236 et Figure 237) et type PPK (Figure 238, Figure 239 et Figure 240). La procédure pour comparer les distributions relatives à l'intravariabilité a été la même que celle adoptée pour les armes SIG Sauer. Ces dernières ont été présentées à la section N°10.7.

B.5.1 Armes Ceska Zbrojovka

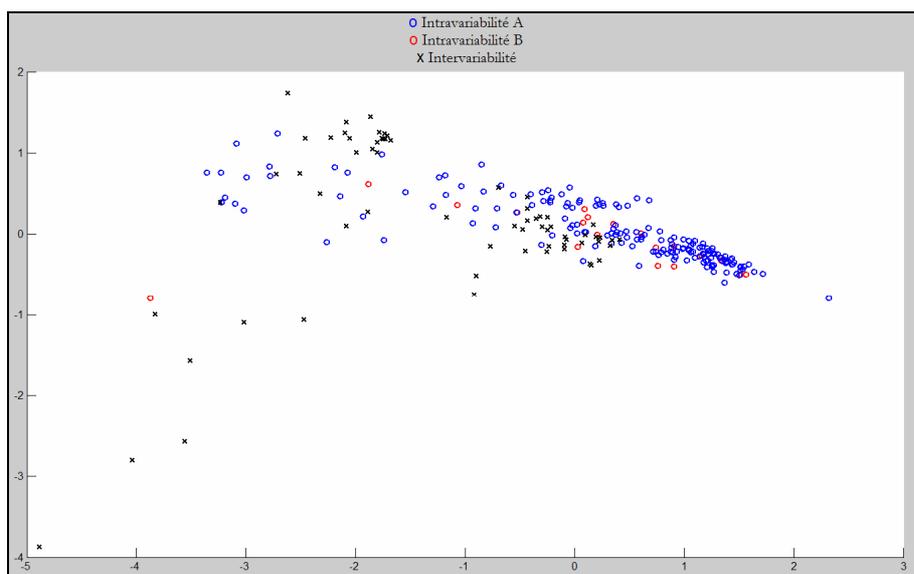


Figure 235

Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la trace du percuteur.

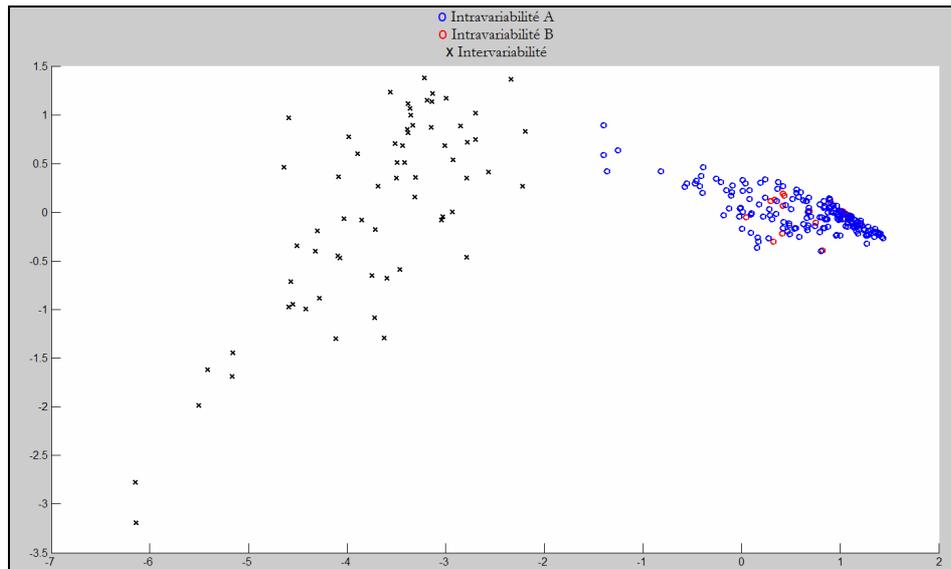


Figure 236

Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la trace de la tête de culasse.

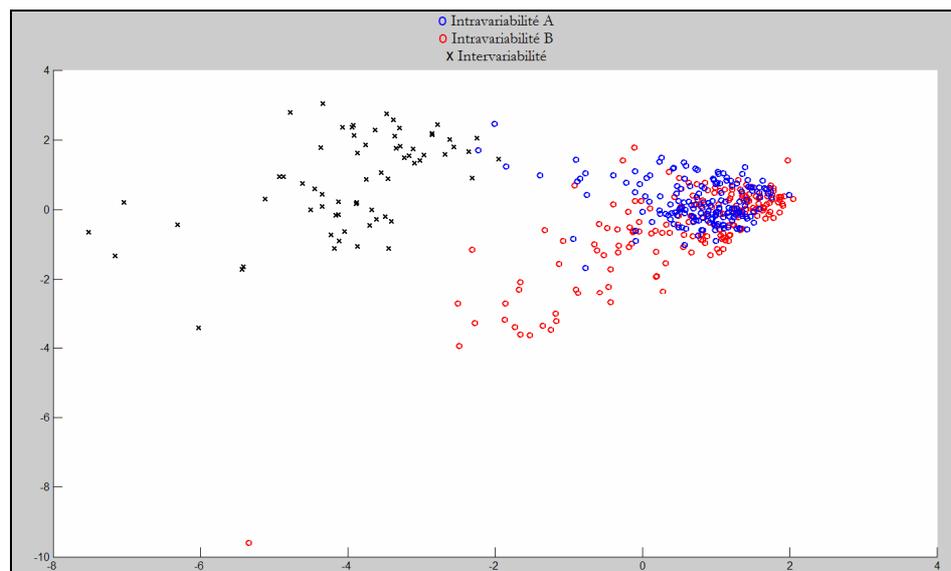


Figure 237

Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la fusion des traces.

B.5.2 Armes de type PPK

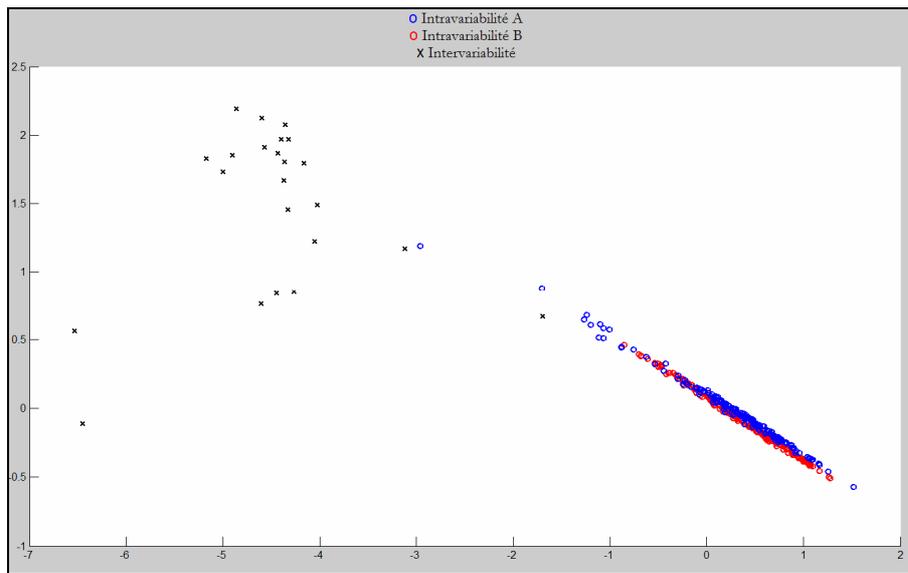


Figure 238
Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la trace du percuteur.

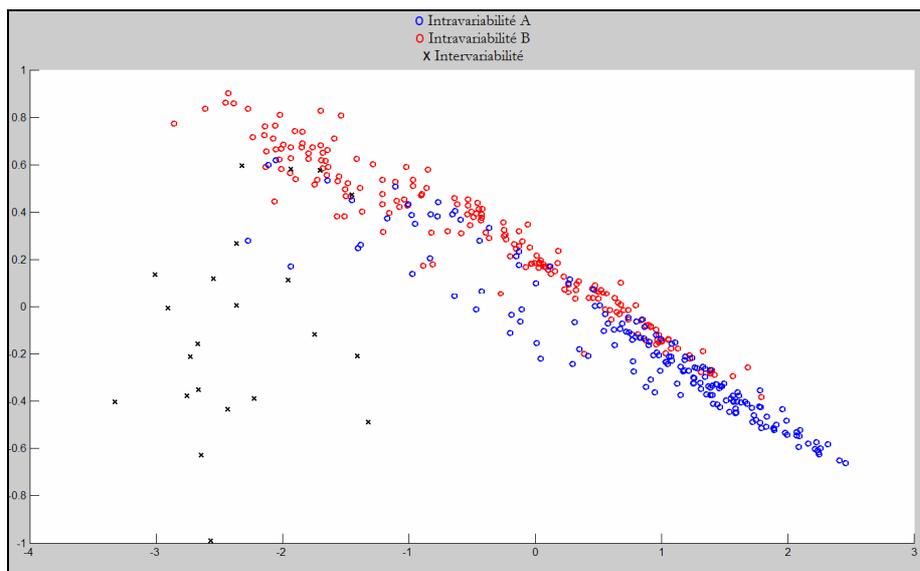


Figure 239
Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la trace de la tête de culasse.

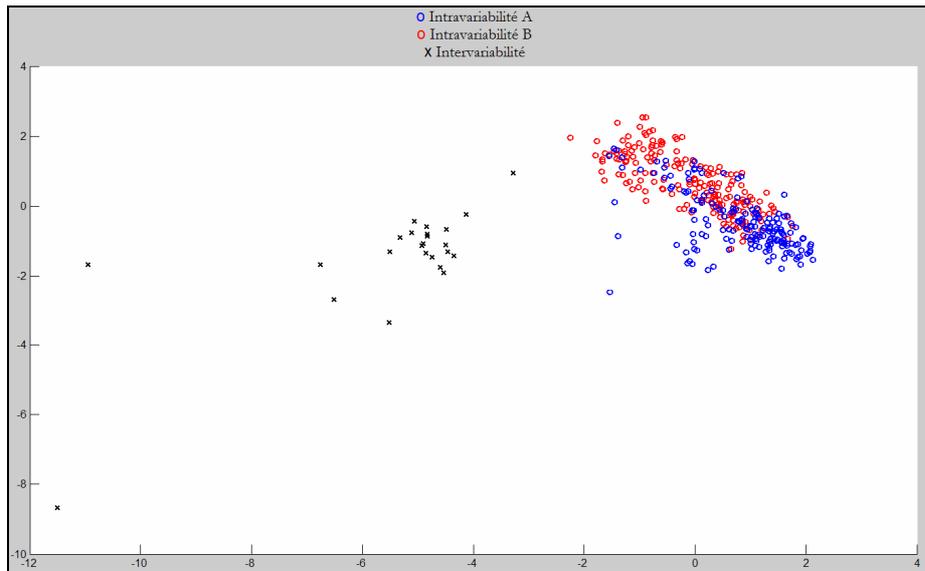


Figure 240

Distributions relatives à l'intervariabilité (noir), à l'intravariabilité de la première arme (Intravariabilité A – bleu) et l'intravariabilité de la deuxième arme (Intravariabilité B – rouge) pour la fusion des traces.

B.6 Simulation de cas d'un point de vue opérationnel

Pour les armes SIG Sauer, deux armes différentes, autres que celles employées auparavant, ont été employées pour simuler des cas d'un point de vue opérationnel. Pour ce genre de simulation, on admet qu'une douille indiciaire Geco Sintox[®] calibre 9 mm Parabellum est trouvée sur les lieux d'un crime et qu'une arme SIG Sauer 9 mm Parbellum est séquestrée chez un suspect. Sept tirs de comparaison sont effectués avec l'arme du suspect afin d'établir l'intravariabilité étant donné l'impossibilité de la généraliser d'une arme à l'autre. En utilisant les données collectées pour les pistolets semi-automatiques SIG Sauer, les rapports de vraisemblance sont ainsi calculés à partir des comparaisons entre la douille indiciaire et toutes les douilles de référence. Les résultats pour la première arme SIG Sauer ont été présentés dans la section N°10.8. Ceux relatifs à la deuxième arme peuvent être observés dans les images suivantes. La première image représente la modélisation par la loi normale bivariée relative respectivement à l'intravariabilité de l'arme séquestrée (Figure 241 – bleu) et à l'intervariabilité (Figure 241 – rouge).

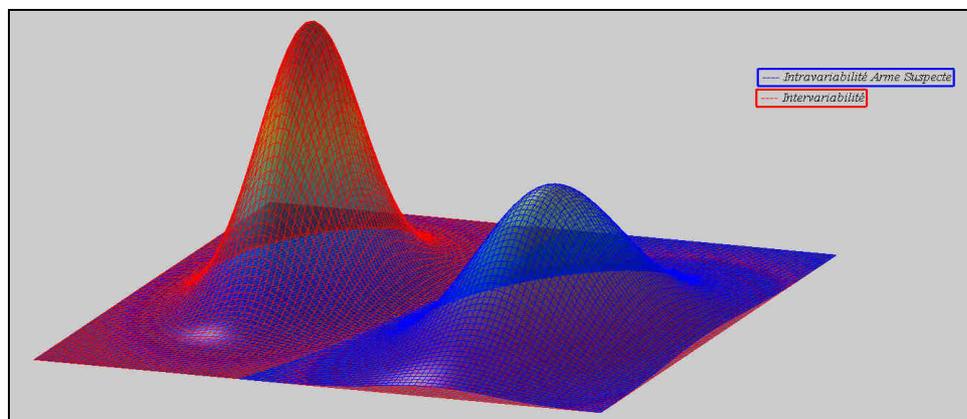


Figure 241

Loi normale bivariée des valeurs de proximité obtenus à partir de la fusion des traces pour l'intravariabilité de l'arme du suspect (bleu) et l'intervariabilité représentant la population potentielle (rouge).

Chaque douille est comparée à la douille indiciaire retrouvée sur la scène de crime ; sept comparaisons sont donc effectuées. Les *scores* résultant de ces comparaisons sont affichés, dans l'image ci-dessous (Figure 242), sous la forme de cercles noirs parmi les distributions de l'intravariabilité et de l'intervariabilité, qui se présentent respectivement sous la forme de croix bleues et rouges :

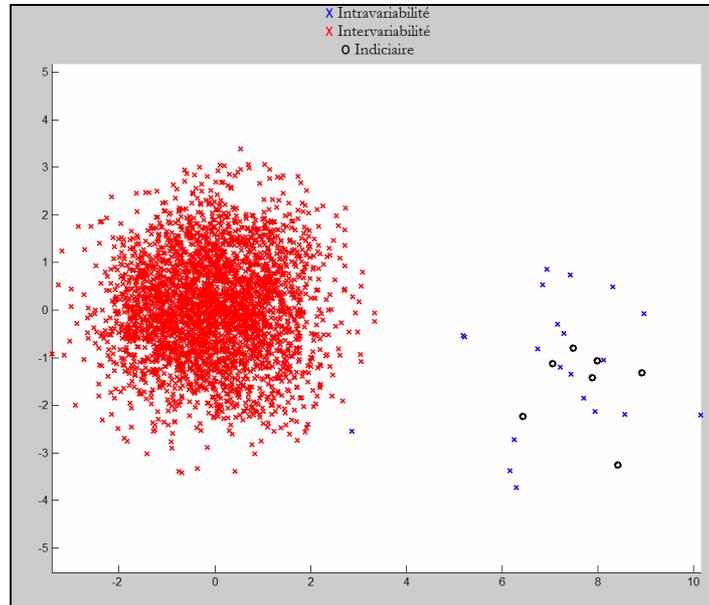


Figure 242

Distributions relatives à l'intervariabilité (rouge), à l'intravariabilité de l'arme du suspect (bleu) et les comparaisons entre la douille indiciaire et celles de comparaison (noir).

Les sept rapports de vraisemblance sont tous largement supérieurs à 1, avec une valeur maximale de $1.1737e+015$ et une valeur minimale de $5.2394e+008$.

C. ANNEXE – ARMES EMPLOYEES

Cette annexe a pour but de montrer les images relatives aux traces analysées pendant cette recherche pour chaque type d'arme prise en considération. Etant donnée la quantité d'armes employées, seulement une partie des images est montrée ci-dessous. Ce chapitre permet ainsi de mettre en évidence les différences morphologiques existantes dans l'ensemble des traces étudiées ainsi que la reproductibilité des traces laissées par une même arme. Les images présentes dans les paragraphes suivants proviennent de mesures tridimensionnelles effectuées sur l'ensemble de l'échantillonnage. Pour chaque type d'arme, deux séries d'images relatives aux deux intravariabilité, ainsi qu'une série relative à l'intervariabilité sont présentées.

C.1 Armes SIG Sauer

C.1.1 Intravariabilité première arme

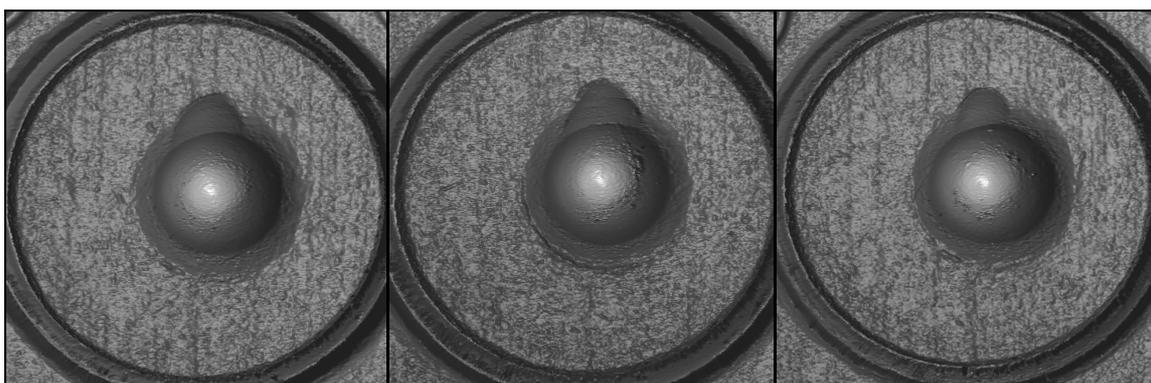


Figure 243
Images des douilles tirées par la première arme SIG Sauer.

C.1.2 Intravariabilité deuxième arme

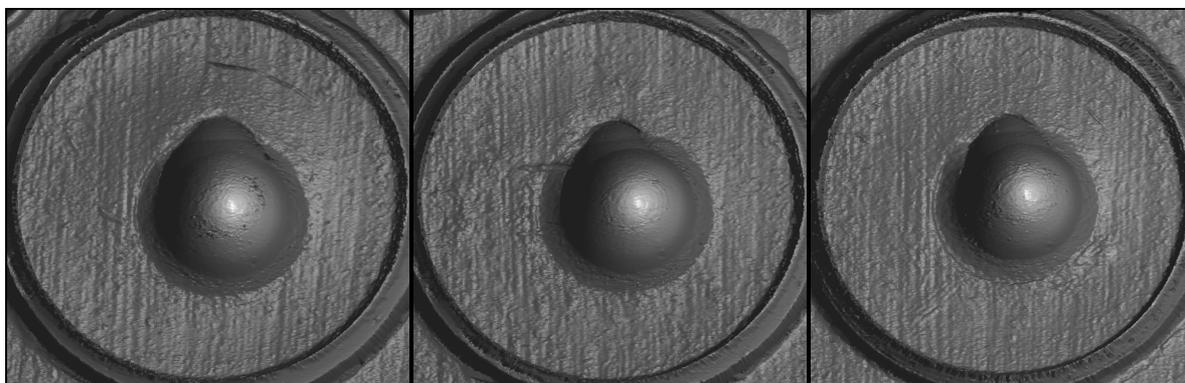


Figure 244
Images des douilles tirées par la deuxième arme SIG Sauer.

C.1.3 Intervariabilité

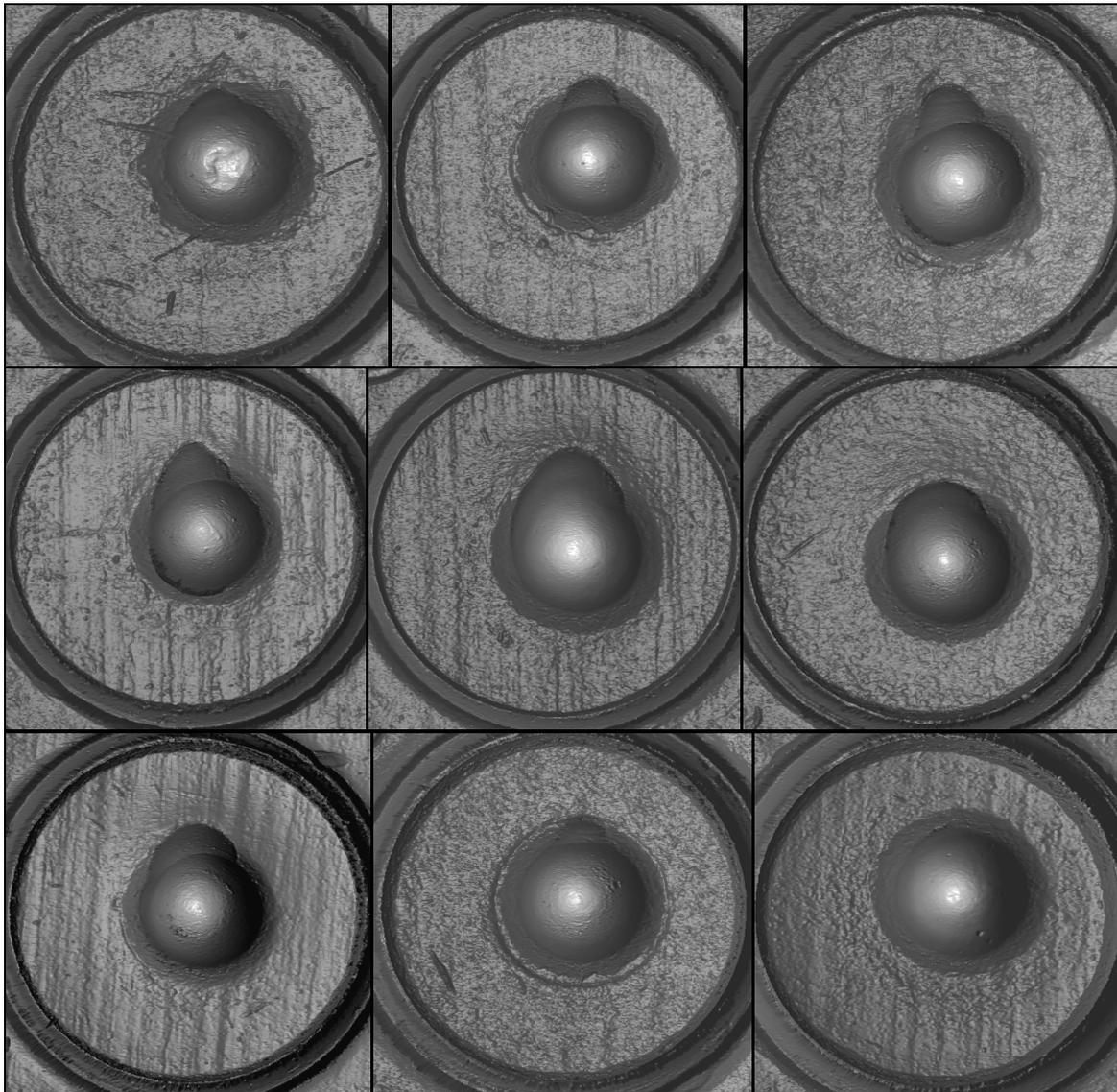


Figure 245
Images des douilles tirées par armes différentes fabriquées par SIG Sauer.

C.2 Armes Ceska Zbrojovka (CZ)

C.2.1 Intravariabilité première arme

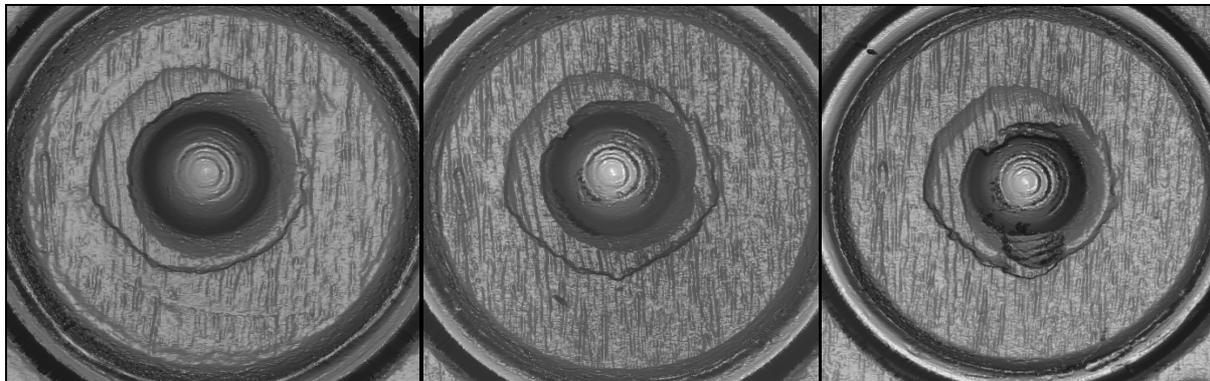


Figure 246
Images des douilles tirées par la première arme CZ.

C.2.2 Intravariabilité deuxième arme

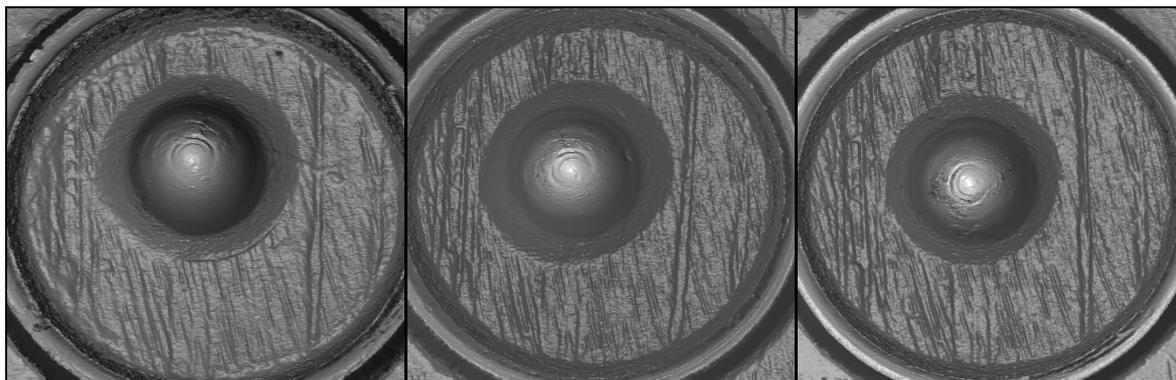
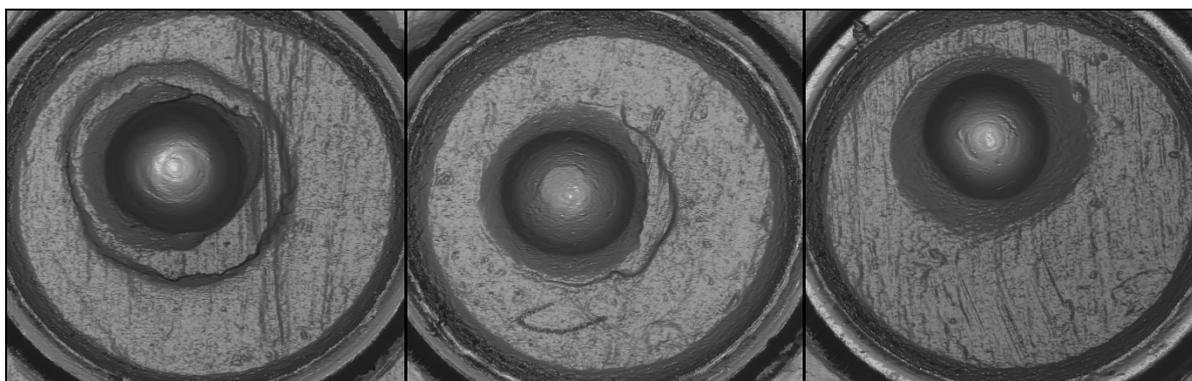


Figure 247
Images des douilles tirées par la deuxième arme CZ.

C.2.3 Intervariabilité



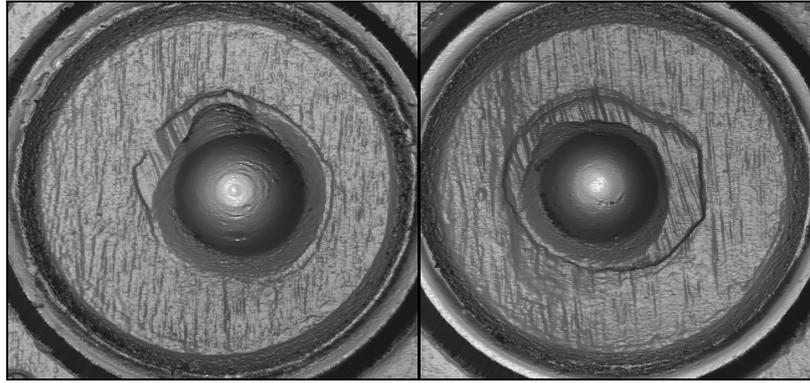


Figure 248
Images des douilles tirées par armes différentes fabriquées par CZ.

C.3 Armes de type PPK

C.3.1 Intravariabilité première arme

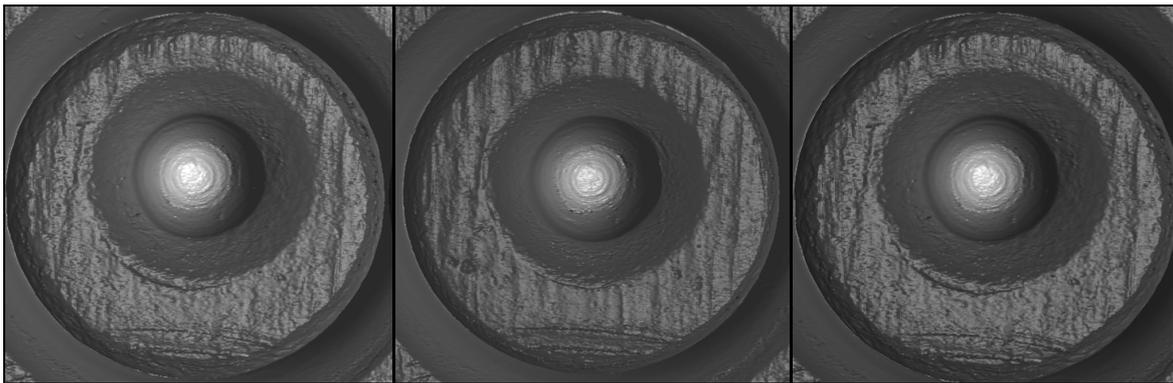


Figure 249
Images des douilles tirées par la première arme de type PPK.

C.3.2 Intravariabilité deuxième arme

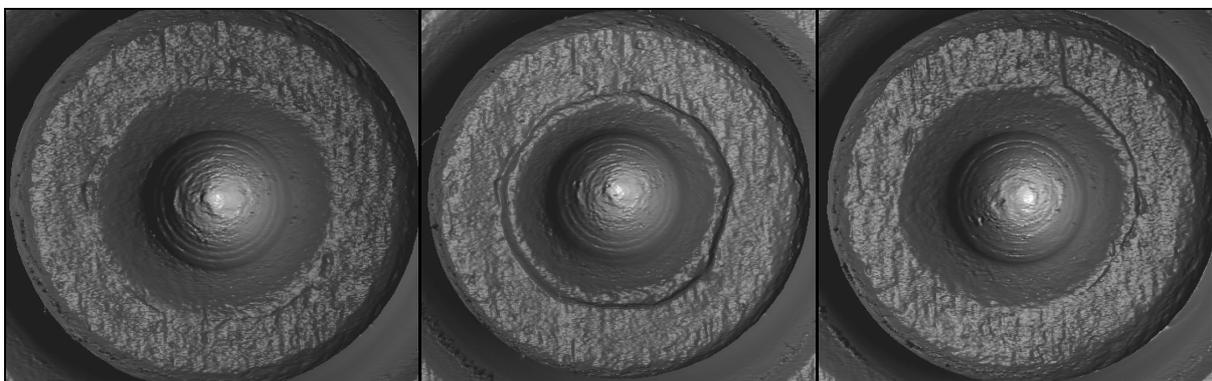


Figure 250
Images des douilles tirées par la deuxième arme de type PPK.

C.3.3 Intervariabilité

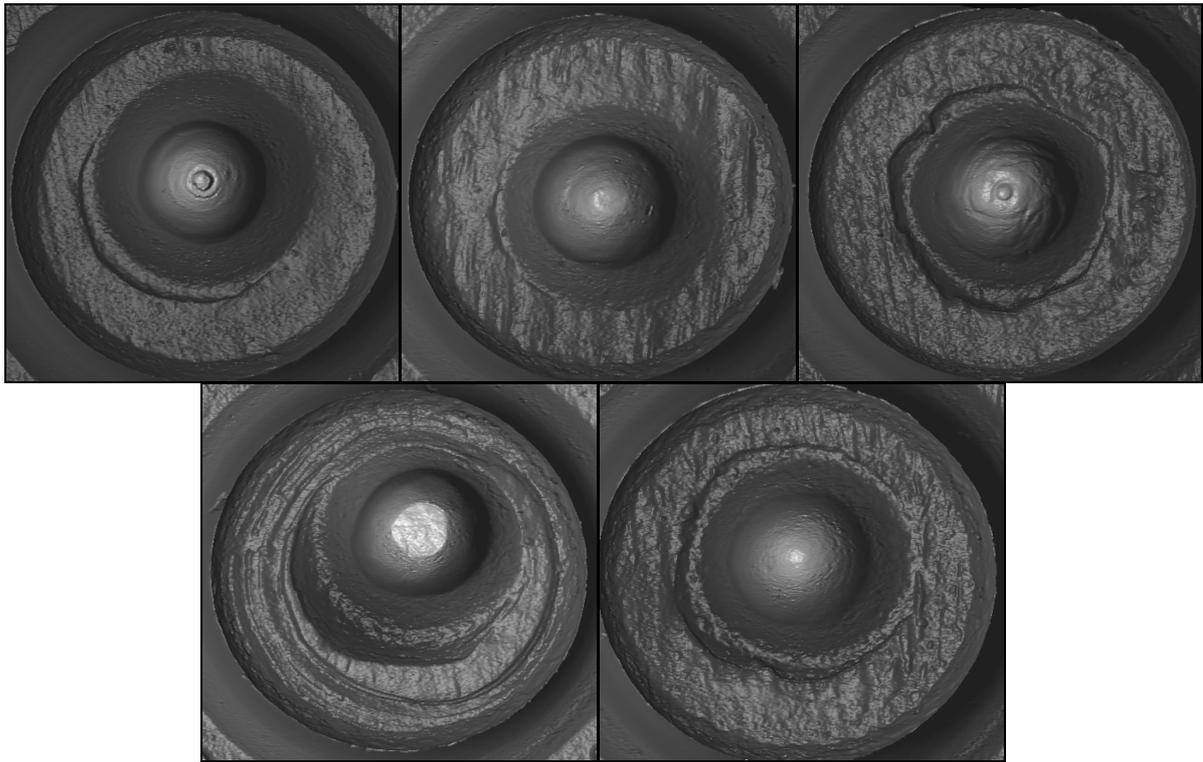


Figure 251
Images des douilles tirées par armes différentes de type PPK.

D.ANNEXE – CERTIFICAT DE CALIBRATION

Une copie du certificat de calibration fournit avec la livraison du profilomètre laser μ Scan[®] de Nanofocus AG est présentée dans les pages qui suivent.

nanofocus
see more

NanoFocus AG
Im Lipperfeld 33
D-47046 Oberhausen

Kalibrierschein / Calibration Certificate

Gegenstand <i>Object</i>	Laserprofilometer	Die Kalibrierung erfolgt entweder durch Vergleich mit Normalen oder Normalmeßeinrichtungen oder auf der Grundlage dokumentierter Kalibrierverfahren. Die Normale oder Normalmeßeinrichtungen sind rückführbar auf nationale Normale der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder andere nationale Normale.
Hersteller <i>Manufacturer</i>	NanoFocus AG	
Type/Bauart <i>Type</i>	NF μ Scan CF/CP	Die Kalibrierergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Kalibriergegenstand. Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert vervielfältigt werden. Auszüge und Änderungen bedürfen unserer Genehmigung. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.
Kal.-Nr. <i>Calibration No.</i>	K#0162-061213	
Serien-Nr. <i>Serial No.</i>	#0162	The calibration is performed by comparison with reference standards, with standard measuring equipment or on the basis of documented calibration procedures. The reference standards and standard measuring equipment are traceable to the national measuring standards maintained by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) or to other national standards.
Kunde <i>Customer</i>	Institute o. Scientific Police	
Anzahl der Seiten <i>Number of pages of the Certificate</i>	5	The calibration results refer exclusively to the object. This calibration certificate may not be circulated other than in full, except with our permission. Calibration certificates without signature have no validity.
Kalibrierdatum <i>Date of calibration</i>	12/13/2006	
Kalibrierschein-Nr. <i>Calibration Certificate No.</i>	K#0162-061213	
Auswertung <i>Evaluation</i>	Die ermittelten Meßwerte waren zum Zeitpunkt der Kalibrierung innerhalb der vom Hersteller angegebenen Toleranzen. The detected measuring values were at calibration time between the tolerances.	
Prüfer <i>Tester</i>		
Datum <i>Date</i>	12/13/2006	
Unterschrift des Prüfers <i>Sign</i>		
Seite <i>page</i>	1 zu Kalibrierschein to Calibration Certificate	K#0162-061213

Messprotokoll / Measure protocol

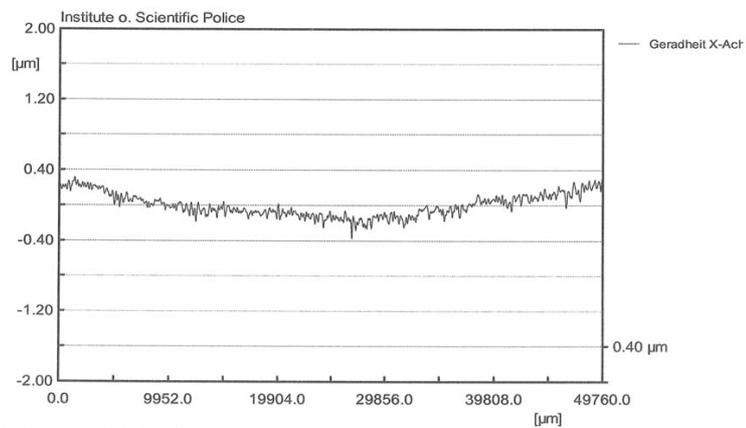


Geradheit der X-Achse / Straightness of X-axis

System NF µScan CF/CP #0162
 Lineareinheit PMT 160-200, S/N 100533-M
 Stage

Messbedingungen / Terms of measurement

Prüfmittel Edmund Scientific Co., S/N 4534
 Reference standard
 Sensor CF4, S/N 000707/ #67 Messlänge 50 mm
 Distance
 Profilrichtung X Auflösung 0.01 mm
 Profile direction Resolution
 Geschwindigkeit 3 mm/s Punkte 5000
 Speed Points



Auswertung / Evaluation

Filter Gauss DIN4777
 LC (CutOff) 250 µm
 Nadel Filter 0 µm

Wt soll:	<1 µm
Wt ist	0.70 µm

Messprotokoll / Measure protocol

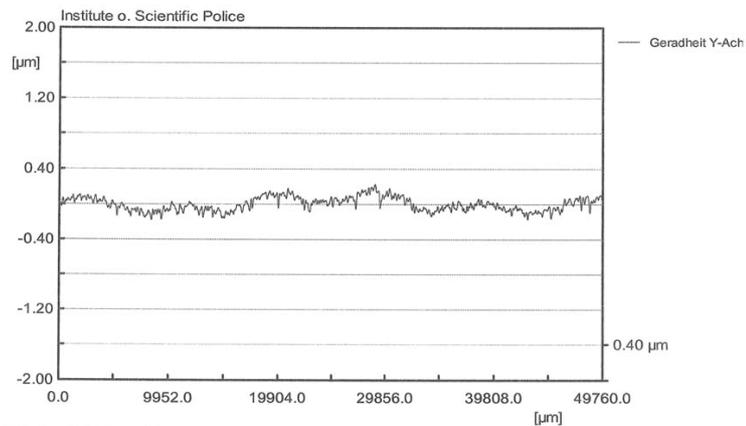


Geradheit der Y-Achse / Straightness of Y-axis

System NF µScan CF/CP #0162
 Lineareinheit PMT 160-200, S/N 100510-L
 Stage

Messbedingungen / Terms of measurement

Prüfmittel Edmund Scientific Co., S/N 4534
 Reference standard
 Sensor CF4, S/N 000707/ #67 Messlänge 50 mm
 Distance
 Profilrichtung Y Auflösung 0.01 mm
 Profile direction Resolution
 Geschwindigkeit 3 mm/s Punkte 5000
 Speed Points



Auswertung / Evaluation

Filter Gauss DIN4777
 LC (CutOff) 250 µm
 Nadel Filter 0 µm

Wt soll:	<1 µm
Wt ist	0.40 µm

Messprotokoll / Measure protocol

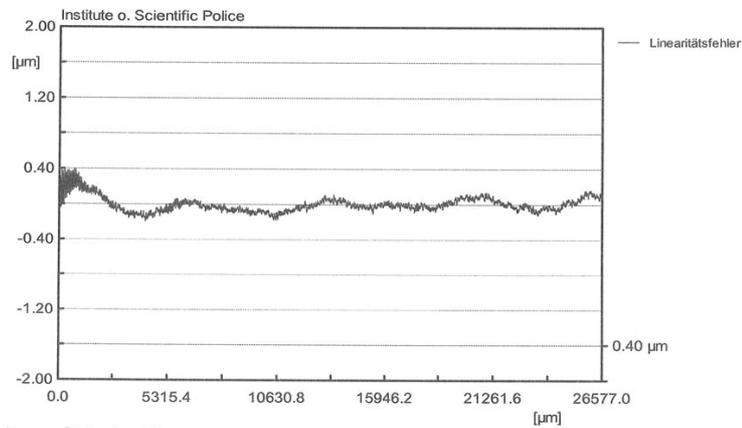


Linearitätsfehler / Linearity Error

System NF µScan CF/CP #0162
 Sensor CF4, S/N 000707/ #67

Messbedingungen / Terms of measurement

Prüfmittel Edmund Scientific Co., S/N 4534
 Reference standard
 Geschwindigkeit 2 mm/s Messlänge -26.613 mm
 Speed Distance
 Auflösung 0.005 mm
 Resolution
 Punkte -5322.6
 Points



Auswertung / Evaluation

Messbereich -1.005 mm
 Measuring range

L-Fehler soll	<2 µm
L-Fehler ist	0.59 µm

Messprotokoll / Measure protocol

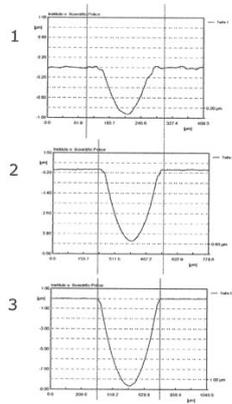


Tiefenmessung / Depth measurement

System NF µScan CF/CP #0162

Messbedingungen / Terms of measurement

Prüfmittel KNT 2060/01 057 PTB 05
 Reference standard
 Sensor CF4, S/N 000707/ #67 Messlänge 3.2 mm
 Distance
 Auflösung 0.001 mm
 Resolution
 Geschwindigkeit 0.8 mm/s Punkte 3200
 Speed Points



Auswertung Tiefe / Depth Evaluation

Filter
 LC (CutOff) 10 µm
 Nadel Filter 0 µm

	Istwert / Nominal	Sollwert / Measured
1	0.93 µm	0.93 µm
2	4.22 µm	4.24 µm
3	8.67 µm	8.65 µm

zul. Toleranz / Tolerance 1 µm

Seite 5 zu Kalibrierschein K#0162-061213
 page to Calibration Certificate