

L'ÉVALUATION D'UNE NOUVELLE DÉFINITION DE
L'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DE PROJECTILES
SOUS UNE APPROCHE DE RAPPORT DE VRAISEMBLANCE

Mémoire

Hassen Djadja

Introduction

Contexte du travail

Chaque tir par arme à feu à canon rayé laisse des traces sur la douille et le projectile de la munition utilisée. Dans une affaire criminelle liée à l'utilisation d'armes à feu, le tribunal pose généralement les questions suivantes : 1- combien d'armes ont été utilisées dans le tir d'indices matériels (douilles et projectiles) récupérés de la scène de crime ? 2- Est-ce que ces armes ont été utilisées dans le tir d'indices relatifs à une autre affaire criminelle ? 3- Est-ce qu'une arme suspecte saisie a tiré l'un des indices récupérés de la scène de crime ?

Afin de répondre à ces questions purement techniques, le tribunal réquisitionne systématiquement un laboratoire de criminalistique dans le but d'effectuer des examens techniques sur les indices balistiques récupérés.

Pour les deux premières questions, le spécialiste en identification balistique confronte le cas « **indice-indice** » pour conclure (ou non) que ces deux indices ont été tirés par une seule arme inconnue. Quant à la dernière question, le spécialiste va faire face au cas « **indice-source** », afin de conclure (ou non) que cette source (l'arme suspecte) a tiré l'indice.

Les conclusions du spécialiste dans le cas « **indice-indice** » se basent sur la comparaison entre les traces trouvées sur les deux indices. Par contre pour le cas « **indice-source** » les conclusions du spécialiste se basent sur la comparaison entre les traces trouvées sur l'indice et les échantillons issus des tirs de référence effectués par l'arme suspecte.

Selon la littérature (Identification Committee 1992), les traces laissées par une arme sur un indice sont classées dans trois catégories, à savoir, les caractéristiques de classe, les caractéristiques de sous classe et les caractéristiques individuelles. Le degré de ressemblance au niveau des caractéristiques dites individuelles est décisif pour conclure (ou exclure) une identification entre deux indices, ou entre un indice et une arme suspecte. Mise à part l'approche de stries consécutives concordantes (Consecutive Matching Striae) (Alfred A. Biasotti and Murdock 1984), qui a tenté de fixer un seuil de ressemblance nécessaire pour conclure une identification, aucun seuil de ressemblance n'a été proposé. Chose qui rend les résultats de l'expertise balistique purement subjectifs, car le spécialiste en matière se base uniquement sur sa formation, ces connaissances acquises et son expérience personnelle.

Étant donné la non-reproductibilité des traces balistiques d'une part et la subjectivité qui entâche les conclusions résultantes d'une expertise balistique d'une autre part, l'identification balistique a subi ces dernières années plusieurs critiques par la communauté académique, telles que l'article de Schwartz (Schwartz 2005a), Ballistic Imaging (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008), et les rapports (Council 2009) (Advisors on Science and Technology 2016), générant dans plusieurs cas des problèmes d'admissibilité des rapports d'expertise balistique devant les tribunaux. Afin de renforcer cette admissibilité, plusieurs études ont été réalisées dans le but de donner plus d'objectivité à cette discipline criminalistique, en se basant toujours sur les définitions de l'AFTE des traces laissées par une arme sur les indices balistiques.

Buts du travail

L'objectif de ce travail est de contribuer efficacement dans la consolidation de l'admissibilité de la discipline de l'identification des armes à feu en général et l'identification des projectiles en particulier. Dans cette optique, ce travail de recherche tente d'atteindre les buts suivants :

1. Proposer une nouvelle définition de l'empreinte balistique trouvée sur un projectile, à travers une réflexion vérifiée par des constatations pratiques ;
2. Proposer une nouvelle approche pour l'identification des projectiles sur la base de l'ossature de la théorie d'identification de l'AFTE, et la nouvelle définition proposée de l'empreinte balistique ;
3. Mettre en place un système d'identification automatique capable de : . extraire l'empreinte balistique conformément à la nouvelle définition proposée ; . modéliser les rayures et les canons par le biais des techniques de modélisation par apprentissage automatique ; . évaluer numériquement la comparaison entre un projectile et les modèles d'armes potentielles d'une base de données, ou entre un fragment de

- projectile et les modèles de rayures potentielles d'une base de données ; . évaluer numériquement la comparaison entre deux projectiles ;
4. Mesurer l'évolution de l'intravariabilité de l'empreinte balistique d'un canon au fil du temps ;
 5. Mesurer l'éventuel changement de l'intervariabilité de l'empreinte balistique sous l'effet de la présence, dans la base de données, d'un groupe d'armes, dont les canons ont été rayés consécutivement ;
 6. Évaluer les résultats de la comparaison automatique entre un projectile (ou un fragment de projectile) et le modèle d'une arme suspecte, par un rapport de vraisemblance dans le cas général, et par un rapport de vraisemblance étendu dans le cas de présence d'un groupe d'armes, dont les canons ont été rayés conséutivement avec le canon de l'arme suspecte.

Pland du document

Le présent document est subdivisé en trois parties. La première est consacrée au cadre criminalistique en matière d'identification balistique en général et l'identification de projectiles en particulier, aux critiques qu'a subi ce domaine ; Les travaux de recherche réalisés dans l'automatisation de l'identification de projectile et les systèmes automatiques actuels d'identification balistique. La deuxième partie est dédiée aux exposés de motifs pour la nouvelle définition proposée de l'empreinte balistique ; L'approche relative à l'identification balistique ; Les algorithmes développés pour l'extraction de l'empreinte balistique dans sa nouvelle définition ; La modélisation d'une arme à feu, ainsi que l'identification automatique entre un projectile et une arme ou entre deux projectiles. Finalement, la troisième partie détaille le mode d'acquisition de projectiles, le choix des armes et l'échantillonnage, les tests de performance du système proposé, le calcul du rapport de vraisemblance dans le cas général et dans le cas de présence d'un groupe constitué par des armes dont les canons ont été rayés conséutivement avec l'arme suspecte. À la conclusion de cette partie, des hypothèses relatives à l'évolution de l'intravariabilité et l'intervariabilité au fil du temps pour les types d'armes choisies sont présentées.

Contexte théorique

Cadre criminalistique

Origine des traces sur un projectile récupéré dans une affaire criminelle

Chaque projectile récupéré dans le cadre d'une affaire criminelle peut porter sur lui des traces liées à son contact avec des objets plus durs que sa surface, telles que les traces laissées lors : - du sertissage de la cartouche ; - du remplissage et vidage du chargeur ou magasin ; - du tir avec un revolver ayant un mauvais alignement de l'âme du canon avec le barillet ; - de son passage dans le canon ; - des ricochets ; - du son passage d'un obstacle ; - de l'impact avec la cible finale ;

Traces laissées par le canon sur un projectile

Afin de donner plus de précision au tir et d'assurer un transfert maximal de l'énergie de la combustion de la poudre au projectile, le canon doit avoir des rayures et un diamètre intérieur légèrement inférieur de celui du projectile. À cause de la présence de ces rayures et la différence de diamètre entre le projectile et la lumière du canon, les champs et les rayures de ce dernier enlèvent la matière de surface du projectile. Cet enlèvement est plus profond par les champs que par les rayures. Les traces laissées par les rayures et les champs du canon sont appelées respectivement les impressions de champs et les impressions de rayures.

L'association des experts en traces d'outils et en armes à feu « *Association of Firearms and Toolmarks Examiners* » a subdivisé les caractéristiques (traces) dans trois catégories. Les caractéristiques de classe, individuelles et de sous-classe.

Caractéristiques de classe (ou issues de la fabrication) « *Measurable feature of a specimen that indicate a restricted group source; they result from design factors, and therefore determined prior to manufacture* ». Il s'agit de caractéristiques communes à tous les outils de même type. Dans le cas de projectile, lors du tir, la température et la pression engendrée par l'inflammation de la poudre, provoquent l'expansion des gaz

et le projectile est propulsé au travers du canon. Durant ce processus, les caractéristiques de fabrication d'une arme laissées sur un projectile sont les suivantes : le nombre d'impressions des champs, la largeur d'impressions des champs, le pas et le sens de rotation des impressions des champs.

Caractéristiques individuelles « *Are imperfections or irregularities produced accidentally during manufacture or caused by use, abuse, corrosion, rust, or damage to an object. They are unique to that object and distinguish it from all other objects* ». Ces caractéristiques peuvent être, soit permanentes soit non permanentes. Il peut y avoir une évolution de ce type de caractères avec le temps et la fréquence d'utilisation. Ce sont généralement les stries dans les impressions des champs et les impressions des rayures.

Après la fabrication du canon, les caractéristiques discriminantes qui se présentent à son intérieur changent avec le temps (Skolrood 1975). Ces changements sont dus essentiellement à la corrosion, à l'érosion et à d'autres facteurs et ils s'installent de manière aléatoire et ils sont particuliers pour chaque canon. La qualité et la quantité des traces laissées par les outils sur les surfaces sont dépendant de quatre facteurs : la dureté relative entre l'outil et la surface, le caractère de la surface d'outil, l'ampleur de la pression de l'outil sur la surface et le mouvement relatif entre l'outil et la surface. Parmi ces facteurs, le caractère de la surface la plus dure ou le canon est considéré comme constant. La dureté relative dépend considérablement de la surface de projectile et il a été souvent constaté des variations de dureté entre les projectiles du même lot. L'intensité de la pression entre le canon et le projectile dépend aussi de la charge propulsive de la cartouche et qui peut se varier d'un projectile à l'autre du même lot. L'intensité de la pression change considérablement si on utilise des projectiles sous-calibrés ou sur calibrés, ce qui implique des stries plus profondes ou des stries superficielles. D'où la présence de certaines stries sur un projectile et leur absence sur d'autres projectiles, tirés par la même arme (Kirby 1983). Par contre, Lindsay (Lindsay 2000) a constaté que la diminution de 50% de la charge propulsive n'influence pas la capacité d'un expert à procéder à l'identification.

Caractéristiques de sous classe « *Are surface features that are more restrictive than class characteristics, are produced incidental to manufacture, relate to a smaller group source, and can arise from a source that changes over time* ». Ce genre de caractéristiques n'est pas intentionnel, mais n'est pas non plus unique à un seul outil. Ces caractéristiques se forment lors du processus de fabrication d'un ordre qui possédant des similarités en apparence. Jusqu'aux nos jours, il n'y a pas un moyen pour distinguer les caractéristiques de sous classe des caractéristiques individuelles. (Lomoro 1972) a constaté la présence de traces de sous-classe sur 1000 canons différents. (Murdock 1981) a également constaté la présence des traces de sous-classe sous forme de lignes grossières et des lignes fines.

Approches d'identification de projectiles

Dans le contexte criminalistique, et plus particulièrement en armes à feu, le terme identification est utilisé afin d'exprimer la relation entre une trace et un objet, comme étant la cause de la présence de cette trace, à l'exclusion de tous les objets potentiels. Ces derniers sont sélectionnés à la base des caractéristiques de classe mesurées sur la trace indiciaire. L'identification se fait à la base de la comparaison entre les caractéristiques dites individuelles révélées sur la trace indiciaire et celles révélées sur les traces de comparaison. Il est utile de signaler que le mot identification signifie la connaissance de la composition physique d'une matière. Mais, par abus d'usage, le mot identification signifie l'individualisation d'un objet comme étant la seule source d'une trace. Dans le domaine de l'expertise d'arme à feu et traces d'outils, il y a trois approches utilisées dans l'identification. La première est l'approche classique qui utilise l'échelle de la théorie d'identification du comité de l'AFTE. La deuxième utilise le seuil des stries consécutives concordantes CMS. La dernière utilise le rapport de vraisemblance.

Approche d'identification de l'AFTE

C'est l'approche la plus ancienne et la plus utilisée par les experts en matière d'identification des outils et les armes à feu. Dans cette théorie, l'expert permet d'aboutir après la comparaison entre la pièce indiciaire et la pièce de comparaison, permet d'aboutir à l'une des quatre conclusions (Identification Committee 1992). Le critère le plus important dans cette approche est le degré de compatibilité dans les caractéristiques

individuelles entre les surfaces de deux indices (étant entendu une correspondance des caractéristiques de classe)

- **Identification** : compatibilité dans la combinaison des caractéristiques individuelles et toutes les caractéristiques de classe, dont le degré de compatibilité est supérieur de celui de la meilleure compatibilité peut-être présente dans la comparaison entre deux traces laissées par deux outils différents, et cohérent avec la compatibilité observée entre deux traces laissées par le même outil. « *Agreement of a combination of individual characteristics and all discernible class characteristics where the extent of agreement exceeds that which can occur in the comparison of tool marks made by different tools and is consistent with the agreement demonstrated by toolmarks known have to been produced by the same tool* »
- **Non conclusive** : il peut être prononcé dans l'un des trois cas :
 1. quelques compatibilités observées au niveau des caractéristiques individuelles et des caractéristiques de classe, mais elles sont insuffisantes pour conclure à une identification. « *Some agreement of individual characteristics and a discernable class characteristics, but insufficient for an identification* »
 2. compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe sans compatibilité ou incompatibilité au niveau des caractéristiques individuelles, à cause de l'absence, l'insuffisance ou le manque de la reproductibilité. « *Agreement of all discernible class characteristics without agreement or disagreement of individual characteristics due to an absence, insufficiency, or lack of reproducibility* »
 3. compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe et des incompatibilités au niveau des caractéristiques individuelles, mais elles ne permettant pas une exclusion « *Agreement of all discernible class characteristics and disagreement of individual characteristics, but insufficient for an elimination* ».
- **Exclusion** : incompatibilité significative dans les caractéristiques de classes et/ou les caractéristiques individuelles. « *Significant disagreement of discernible class characteristics and/ or individuals characteristics* »
- **Inadapté** : la pièce indiciaire n'est pas convenable pour la comparaison « *Unsuitable for comparison* »

Approche de

Approche basée sur les CMS

Cette approche a vu le jour après les travaux de recherche empiriques (A. Biasotti 1959), où il a conclu que le nombre des stries concordantes consécutives est plus significatif que le nombre total des stries concordantes ou le pourcentage des stries concordantes. Ainsi, il conclut qu'il peut utiliser le nombre des stries concordantes consécutives comme un moyen d'identification dans la comparaison entre les projectiles. Biasotti et Murdock (A. A. Biasotti and Murdock 1997) ont proposé des seuils numériques selon la morphologie des stries, pour l'identification dans le domaine des traces d'outils et des armes à feu .

Dans le cas des traces tridimensionnelles, et avec l'écartement de l'influence des caractéristiques de sous classe, il faut avoir au moins la présence dans la même position relative, de deux groupes différents dans lesquels il y a au moins trois stries concordantes consécutives, ou la présence d'un groupe de six stries concordantes consécutives, dans la comparaison entre la trace d'outil indiciaire et la trace d'outil de comparaison. « *In three dimensional toolmarks when at least two different groups of at least three consecutive matching striae appear in the same relative position, or one group of six consecutive matching striae are in agreement in an evidence toolmark compared to a test toolmark. This is predicated on the understanding that all subclass influence has been ruled out* ».

Dans le cas des traces bidimensionnelles, et en excluant de l'influence des caractéristiques de sous classe, il faut avoir au moins la présence dans la même position relative, de deux groupes différents dans lesquels il y a au moins cinq stries concordantes consécutives, ou la présence d'un groupe de huit stries concordantes

consécutives, dans la comparaison entre la trace d'outil indiciaire et la trace d'outil de comparaison. « *In two dimensional toolmarks when at least two different groups of at least five consecutive matching striae appear in the same relative position, or one group of eight consecutive matching striae are in agreement in an evidence toolmark compared to a test toolmark. This is predicated on the understanding that all subclass influence has been ruled out* ».

Approche du rapport de vraisemblance

Le rapport de vraisemblance est une méthode d'évaluation de la trace matérielle liée à une affaire criminelle dans un contexte de raisonnement logique qui prend en compte les circonstances entourant l'affaire, afin de ne pas surestimer ou sous-estimer les résultats d'analyse de la trace. Elle constitue un outil pour l'évaluation des croyances après l'analyse de la trace, à partir des croyances avant l'analyse de la trace, par le biais de l'évaluation des résultats de l'analyse de la trace. Dans une affaire criminelle, et après l'analyse de la trace, le juge et les jurés veulent savoir jusqu'à quel point l'arme à feu a été la source de la trace. D'une autre façon, dans les cas de traces d'outils, ils veulent savoir la grandeur du rapport entre deux termes suivants. Le premier est la probabilité que l'outil soit la source de la trace en tenant en compte les résultats de l'analyse et les circonstances de l'affaire. Tandis que le deuxième est la probabilité que l'outil ne soit pas la source de la trace en tenant en compte les résultats de l'analyse et les circonstances de l'affaire. En désignant :

I : les circonstances de l'affaire

E : les résultats de l'analyse ou les observations

H_0 : l'hypothèse que l'outil est la source de la trace

H_1 : l'hypothèse que l'outil n'est pas la source de la trace

Le rapport entre les deux termes $P(H_0|E, I)$ et $P(H_1|E, I)$ s'appelle les chances à posteriori « *posterior odds* », tandis que le rapport entre les deux termes $P(H_0|I)$ et $P(H_1|I)$, s'appelle les chances à priori « *prior odds* ». Selon le théorème de Bayes, il est possible de décrire la relation entre les rapports sous l'équation suivante :

$$\frac{P(H_0|E, I)}{P(H_1|E, I)} = \frac{P(E|H_0, I)}{P(E|H_1, I)} \cdot \frac{P(H_0|I)}{P(H_1|I)}$$

Le terme $\frac{P(E|H_0, I)}{P(E|H_1, I)}$ s'appelle le rapport de vraisemblance « *Likelihood Ratio: LR* » en anglais.

Donc, *les chances à postérieur = LR x les chances à priori* (Lindley 1977).

Dans le cas des armes à feu, H_0 est l'hypothèse que l'arme suspecte a tiré le projectile trouvé dans l'affaire criminelle et H_1 est l'hypothèse qu'une autre arme parmi le groupe d'armes potentielles a tiré ledit projectile.

$P(E|H_0, I)$: la probabilité de faire les observations (concordances et discordances) durant la comparaison entre le ledit projectile et les projectiles de comparaison tirés par l'arme suspecte sous l'hypothèse que ce projectile a été tiré par cette arme. Donc il représente l'intravariabilité de l'observation entre les projectiles tirés par l'arme suspecte.

$P(E|H_1, I)$: la probabilité de faire les observations (concordances et discordances) durant la comparaison entre ledit projectile et les projectiles de comparaison tirés par l'arme suspecte sous l'hypothèse que ce projectile a été tiré par une autre arme parmi le groupe d'armes potentielles. Donc, elle représente l'intervariabilité de l'observation dans les autres armes du groupe d'armes potentielles.

Le *LR* résume d'une façon élégante le résultat de l'examen en science forensique. Si le *LR* est supérieur à 1, le résultat de la comparaison entre le projectile et du matériel de référence viendra à l'appui de l'hypothèse H_0 , tandis que, s'il est inférieur à 1, ce résultat viendra à l'appui de l'hypothèse H_1 . Par contre, si le *LR* est égal à 1, ce résultat n'est pas en faveur de l'une à l'autre des hypothèses considérées, chose qui rend la trace non pertinente vis-à-vis des proposition en examen

Critiques de la discipline balistique par la communauté académique

Comme été le cas pour les différentes disciplines de la criminalistique, le domaine de l'identification d'armes à feu a été dans l'obligation de s'adapter avec l'évolution des critères d'admissibilité de l'expertise scientifique

devant les tribunaux.

L'admissibilité de l'expertise scientifique aux États-Unis est passée par trois phases. La première, été avant 1923, durant laquelle est considéré comme expert celui qui gagne sa vie par la pratique de ses compétences. Ce critère repose sur le fait que la société dans cette époque estime que la réussite professionnelle est une condition suffisante pour prouver des compétences. La deuxième phase a commencé en 1923, où le droit, par l'arrêt de Frye, a remplacé l'ancienne condition par une nouvelle exigence : l'expertise scientifique est admise si elle est basée sur des connaissances généralement admises par la communauté des spécialistes. La troisième phase a commencé dès 1993, date où la Cour suprême des États-Unis a rendu l'arrêt de Daubert. Cet arrêt a remplacé la condition des connaissances généralement admises posée par l'arrêt de Frye, par les quatre conditions d'admissibilité à savoir :

1. la technique ou la théorie utilisée par l'expert a été (ou peut-être) testée, car une théorie est dite scientifique lorsqu'elle a l'aptitude de se soumettre à une expérience scientifique susceptible d'un résultat négatif ou positif ;
2. la théorie ou la technique utilisée a donné lieu à une évaluation par les pairs et a fait l'objet d'une publication ;
3. considérer le pourcentage d'erreurs potentiel ou connu dans l'application de la technique ou de la théorie ;
4. la reconnaissance de la technique ou la théorie utilisée par la communauté scientifique.

Après l'adoption de l'arrêt de Daubert, plusieurs voix ont contesté l'admissibilité de l'expertise balistique, mais les plus fameuses critiques sont celles émises par Adina Schwartz, le *National Research Council (NRC)* et le *President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST)*.

Schwartz

Dans ses articles (Schwartz 2005a) (Schwartz 2005b), Schwartz a énumérée trois sources majeures qui peuvent causer une fausse identification, à savoir : 1) les caractéristiques individuelles sont composées de traces non uniques, 2) les caractéristiques de sous-classe et les caractéristiques individuelles sont indiscernables et 3) que ces dernières changent continuellement avec le temps. Dans le même contexte, Schwartz a fait ressortir les points suivants :

- l'existence des différences entre les traces issues de la même source, et la possibilité d'observer des ressemblances entre les traces laissées par des sources différentes implique qu'il faut répondre à une question statistique pour déterminer si un outil particulier est à l'origine d'une trace ou non ;
- l'absence d'études statistiques évaluant la probabilité qu'une caractéristique individuelle soit produite par un outil choisi aléatoirement ;
- l'absence de tests de compétences adéquats dans le domaine de l'identification d'armes à feu et traces d'outils. Ces points ont été considérés par Schwartz, comme des arguments solides pour exclure l'admissibilité des rapports d'identification d'armes à feu et de traces d'outils devant la cour.

Afin de défendre l'admissibilité du domaine de l'identification d'armes à feu et de traces d'outils et de faire face aux critiques de Schwartz, (Nichols 2007), s'est appuyé sur les travaux de recherche empiriques réalisés dans les différents sujets critiqués par Schwartz, à savoir, le principe de l'identification, les caractéristiques de sous-classe, la variabilité des caractéristiques individuelles, et les tests de performance. Pour minimiser l'aspect subjectif de la discipline, Nichols a souligné que les critères de l'identification sont à la fois subjectifs et objectifs. Car, pour lui, dans l'identification l'expert donne une interprétation subjective à ses objectives observations. Quant à la différence de la meilleure ressemblance entre les traces de différents outils (*Best-known nonmatch*) chez les différents experts, Nichols argumente que les tests de compétence montrent qu'elle est légère et insignifiante.

Rapports du National Research Council

Dans ces deux rapports publiés , le Conseil national de recherche, (Committee to Assess the Feasibility Accuracy and National Ballistics Database 2008) (Council 2009), a évoqué les deux prémisses régissant le domaine de l'identification balistique, à savoir l'individualité et la reproductibilité des traces laissées par une arme à feu. En effet, selon les deux rapports, jusqu'à nos jours il n'y a aucune étude statistique qui a été réalisée à une grande échelle, pour vérifier l'impossibilité de la présence fortuite de similitude significative entre des traces laissées par deux armes différentes. De même, il n'y a aucune recherche empirique qui a été effectuée afin de mesurer la stabilité de la reproductibilité des traces laissées par les différents types d'armes à feu. Donc, outre la subjectivité de l'examen balistique et le manque de la vérification de ces deux prémisses, l'expert en identification balistique quand il conclut une identification, il la prononce avec une certitude absolue, chose qui fragilise l'admissibilité de l'identification des armes à feu devant les tribunaux.

Rapport du President's Council of Advisors on Science and Technology

Outre les remarques révélées par les deux précédents rapports, le rapport du PCAST (Advisors on Science and Technology 2016) a mis l'accent sur le problème du manque de tests de compétence fiables nécessaires pour estimer les taux d'erreur (fausses identifications et fausses exclusions) dans les conclusions des experts balistiques, car selon ce rapport il n'existe qu'une seule étude pertinente qui a été réalisée (David P. Baldwin 2014) par laquelle un taux d'erreur de 1 sur 66 a été enregistré dans un test de compétence distribué sur 218 experts en balistique.

Travaux de recherche effectués

Afin de faire face au grand nombre d'affaires cumulées au niveau des laboratoires balistiques et de répondre aux requérants en temps opportun, il serait judicieux de penser à l'automatisation des différentes étapes du processus d'analyse, à savoir, la numérisation, la comparaison et l'interprétation. Mais, après l'adoption des critères de Daubert de l'admissibilité des expertises forensiques devant les cours, et l'ampleur des critiques envers le domaine de l'identification des armes à feu et traces d'outils, il est indispensable que la communauté des chercheurs et spécialistes en balistique réalise des études et des recherches dans le but de minimiser au maximum la subjectivité de la discipline par l'automatisation des étapes de l'analyse balistique.

Le tableau ci-dessous dresse les plus importants travaux de recherche effectués dans l'automatisation de l'identification de projectiles, les techniques d'acquisition et d'extraction de signatures, et les méthodes de comparaison. Il est utile de signaler que ces vingt-neuf (29) travaux de recherche sont subdivisés, selon les techniques d'acquisitions, en deux groupes (optique et non optique), et selon le type de données dans deux groupes (2D ou 3D). Ils sont aussi classés, selon les techniques d'extraction de signatures, en deux groupes (les différentes transformées : Hough, Fourier, Radon et ondelettes, et les descripteurs de la texture). Ils sont également classés, selon les méthodes de comparaison, en trois groupes (comparaison directe par l'utilisation des fonctions de corrélation pour l'évaluation de la similarité, des fonctions de distance pour mesurer la dissemblance, ou par la modélisation par les techniques de l'apprentissage automatique).

Table 1: Travaux de recherches effectués dans l'automatisation de l'identification de projectiles

| Approches | Acquisition | Extraction.de.signatures | Discrimination | Échantillonnage | Remarque |
|---|------------------------------------|--|---|--|--|
| Computer Identification Of Bullets (Gardner 1978) | Microscope électronique à balayage | Calcul de la hauteur, largeur et position des stries | Probabilité de concordance fortuite de n strie dans la comparaison entre 2 impressions de champs ou 2 impressions de rayure | 13 projectiles tirés par 04 revolvers de calibre .38 | |
| Criterion for Land Mark Identification (Uchiyama 1988) | Non | Non | Oui | 01 pistolet de calibre .45 Colt (5 projectiles) et un pistolet de calibre .22 Colt (2 projectiles) | La comparaison entre les stries de deux impressions de champs a été réalisée par l'analyse combinatoire et les CMS |
| Feature extraction Of Optical Projectiles Images (Pirlot et al. 1999) | Image optique 2D | Extraction des lignes par la transformée de Hough | Corrélation entre les phases de la transformée de Fourier de deux signatures | 01 pistolet de calibre 9 mm (02 projectiles) | La sélection de la région d'intérêt se fait manuellement |

| Approches | Acquisition | Extraction de signatures | Discrimination | Échantillonnage | Remarque |
|---|---|---|---|--|---|
| Automated Firearms Evidence Comparison: A Forensic Tool for Firearms Identification—An Update (Tontarski and Thompson 1998) | Non | Non | Oui | | |
| Surface Topology Of Bullet The User During Visualisation And Turn Out To Be Very Helpful Striations: An Innovating Technique (Jan De Kinder and Nys 1998) | Profilomètre laser | Non | | 01 pistolet de calibre 9 mm (une impression de champs) | |
| Automated comparisons of bullet striations based on 3D topography (De Kinder and Bonfanti 1999) | Profilomètre laser | Profile de la surface | Corrélation entre deux vecteurs (profils de surfaces) | 2 pistolets de caliber 9 mm (2 x 3 projectiles) | |
| Visualisation By Confocal Microscopy Of Traces On Bullet and Cartridge Cases (Bonfanti and Ghaouharali 2000) | Microscope laser | Non | | 01 pistolet de calibre 9 mm (au moins 2 projectiles) | Étude comparative entre le microscope optique comparateur et le microscope laser confocale |
| Automated analysis and comparison of striated toolmarks (Heizmann and Puente Leon, n.d.) | Image optique 2D résultante par la fusion de deux images (éclairages directionnel et diffusé) | Vecteur de positions des sommets et creux | Oui | 6 outils (54 traces d'outils) | |
| Development Of A 3D-Based Automated Firearms Evidence Comparison System (Bachrach 2002) | Microscope confocal | Vecteur de Profil de la surface | Corrélation entre deux vecteurs de profile de surfaces | 3 pistolets de calibre 9 mm (2 projectiles par arme) | |
| Three dimensional visualization and comparison of impressions on fired bullets (Banno, Masuda, and Ikeuchi 2004) | Microscope confocal | Topographie des impressions de champs | Calcul de distance par l'alignement automatique entre deux surfaces | 01 pistolet de calibre .25 (2 projectiles) et un pistolet de calibre 7.65 mm (2 projectiles) | |
| NIST Bullet Signature Measurement System for RM (Reference Materiel) 8240 Bullets (Ma et al. 2004) | Profilomètre stylus | Profil de la surface et prétraitement par filtre passe-haut | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profile et la distance entre ces deux vecteurs | 6 pistolets de calibre 9 mm (6 projectiles réels et 40 projectiles standards fabriqués à partir des signatures de ces 6 projectiles réels) | Uniquement l'étude de la répétabilité et de la reproductibilité de profile de surface dans l'usinage des 40 projectiles standards |

| Approches | Acquisition | Extraction de signatures | Discrimination | Échantillonnage | Remarque |
|---|---|--|---|--|---|
| Toolmarks Identification Using SEM Images In An Optoelectronic Correlator Device (Demoli et al. 2004) | Microscope électronique à balayage | Transformée de Fourier de l'image 2D et la conversion du résultat à un code à bar 1D | Corrélation entre deux codes à bar | 3 traces d'outil laissées par 01 seule pince | |
| Correlation Of Topography Measurements Of NIST SRM 2460 Standard Bullets by four techniques (J. Song et al. 2006) | Microscope interforemetre, Microscope confocal, Microscope confocal par balayage laser et Profilomètre stylus | Topographie de la surface | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profile | 01 projectile standard | La faisabilité d'utilisé la technique d'acquisition de topographie de surface comparaison entre les topographies de surface au lieu la comparaison optique |
| Automated comparison of firearm bullets (Puent León 2006) | Plusieurs Images optiques 2D prises sous différents angles d'éclairage | Prétraitement par filtrage passe-bas; Fusion de plusieurs images afin de donner un contraste local maximal dans l'image finale; Filtrage passe-haut; Profile totale par la projection dans le sens des stries; L'obtention du vecteur descripteur par la suppression des structures grossières à l'aide de l'application des opérateurs morphologiques d'ouverture et de fermeture sur le profile totale | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de descripteurs | 12 pistolets de calibre 9 mm (27 projectiles de test) | Une comparaison de performance a été effectuée entre le système proposé et celui d'IBIS Héritage. Une meilleure concentration de mesure (14.7%) pour le système proposé par rapport au système IBIS (27.2%) |
| Ballistics Projectile Image Analysis for Firearm Identification (Li 2006) | Image optique 2D | Prétraitement et extraction de contour par le filtre Sobel; Transformée de Fourier de l'image 2D résultante; Vecteur descripteur composé des valeurs du maximum, la moyenne, la médiane et l'écart-type des spectres radiaux angulaires de la transformée de Fourier de l'image traitée | Non | 8 pistolets de calibre 9 mm et 8 pistolets de calibre .22 LR | |
| Pilot Study Of Automated Bullet Signature Identification Based on Topography Measurements and Correlations (Chu, Song, Vorburger, Yen, et al. 2010) | Microscope confocal | Prétraitement par filtrage de la topographie de la surface; Sélection de la zone d'intérêt ayant une somme des résiduelles carrées minimale; Calcule du profil moyen de la zone d'intérêt | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil moyen | 12 pistolets de calibre 9 mm (48 projectiles) | |
| Striation Density For Predicting The Identifiability Of Fired Bullets With Automated Inspection Systems (Chu, Song, Vorburger, and Ballou 2010) | Microscope confocal | Suppression des points mal scannés et leur remplacement par interpolation; Suppression de hautes et basses fréquences par un filtre Gaussien; Suppression des structures grossières à l'aide de l'application des opérateurs morphologiques d'ouverture et de fermeture sur le profile totale; Détection de contours par le filtre de Canny; Calcul de densité de stries : proportion des pixels des stries par rapport à la taille de l'image | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil moyen | 12 pistolets de calibre 9 mm (48 projectiles) | L'étude a démontré empiriquement le lien entre la densité des stries et la discrimination entre les projectiles tirés par la même arme de ceux tirés par armes différentes |
| Similarity Measurement of Striation Marks Based Upon the Longest Common Subsequence Method (Lin and Wen 2010) | Image optique 2D | Détection de stries par l'application du filtre de Canny et l'opérateur morphologique de fermeture; Conversion des rubans de 20 pixels de largeur à des codes à barres; Codification des codes à barres par des lettres selon la distance entre les piqûres | Similarité entre deux codes à barres par la méthode de la plus longue séquence commune (Longest Common Subsequence) | 12 tournevis | |

| Approches | Acquisition | Extraction de signatures | Discrimination | Échantillonnage | Remarque |
|---|---|--|--|--|--|
| Numerical Classification Of Curvilinear Structures For The Identification Of Pistol Barrels (Bolton-King et al. 2012) (1 moulage par canon) | Image optique 2D | Fusion de plusieurs images, prises à plusieurs plans, par la technique des ondelettes complexes; Binarisation de l'image résultante suivi par une réduction de taille au moitié; Récupération du module de la transformée de Fourier de cette image et la suppression des hautes fréquences; Transformation de l'image module à un vecteur L'étude a démontré l'importance de l'exploitation des zones de transition entre les rayures et les champs d'un canon dans la discrimination entre les fabricants de canons | Analyse par composantes principales afin de réduire la dimensionnalité des vecteurs et la distance euclidienne pondérée | 15 pistolets de calibre 9 mm | |
| Comparison and Statistical Analysis Of Land Impression From Successively Rifled Barrels (Monkres et al. 2013) | Image optique 2D | Calcul manuel de la largeur et la position des stries horizontales à partir de la limite inférieure de l'impression du champ; Création d'un code à barres à partir des positions et largeurs de stries; Utilisation de la PCA pour le choix des variables principales | Modélisation des impressions de champs par PCA et SVM | 10 pistolets de calibre 9 mm (35 projectiles avec au moins 3 projectiles de chaque arme) | |
| Texture Based Firearms Striations Analysis For Forensics Image Retrieval (Chorás 2013) | Image optique 2D | Calcul de la matrice de cooccurrences de niveaux de gris; Calcul des 4 variables du vecteur descripteur : l'homogénéité, le second moment angulaire, l'énergie et l'entropie | Distance euclidienne entre les vecteurs descripteurs | 10 images | |
| Proposed "NIST Ballistics Identification System (NBIS)" Based On 3D Topography Measurements On Correlation Cells (@ J.-F. Song 2013) | Microscope confocal | Cadrage de la topographie acquise dans une matrice de cellules carrées selon la technique appelée Contiguous Matching Cells (CMC) « entre 50 et 200 cellules par type de traces » | Pour conclure une identification il faut avoir dans la comparaison au moins 6 CMC ou deux groupes, chacun a au moins 3 CMC, vérifiant les trois paramètres d'identification, à savoir : une corrélation maximale $CCF \geq 60\%$, les mêmes coordonnées (x, y) et les mêmes angles initiaux de recalage | 10 pistolets de calibre 9 mm (40 douilles, mais pas de projectiles) | |
| The Use Of Near-Infrared Photography To Image Fired Bullets And Cartridge Cases (Stein and Yu 2013) | Image optique 2D, filtres et caméra infrarouges | Non | Non | 5 pistolets et 1 revolver (4 projectiles) | Aucune amélioration significative dans l'acquisition |
| Automated Bullet Striation Feature Using 3D Laser Color Scanner (Jing et al. 2014) | Scanner laser couleur 3D | Transformation linéaire de l'image; Détection de contour par l'application de l'opérateur Robert; Squelettisation par l'application de l'algorithme de Hilditch; La sélection de 3 profils de contour, A, B et C (à 350, 400 et 450 pixels de hauteur) | -Distance minimale entre les 3 vecteurs de profils pour deux projectiles puis la moyenne des 3 distances minimales | 3 pistolets (3 projectiles par armes à feu) | |

| Approches | Acquisition | Extraction.de.signatures | Discrimination | Échantillonnage | Remarque |
|--|---|---|--|---|---|
| Quantitative Comparative Of Striated toolmarks (Baiker et al. 2014) | Image 2D : Microscope optique et Topographie 3D : microscope à focus infini (Alicona) | Rotation de l'image afin d'aligner les stries avec l'axe horizontal; Débruitage par l'application du filtre Chebyshev; La valeur de chaque point du profil final de la trace d'outil égale à la moyenne des profils horizontaux; Application de l'analyse multi échelles à 4 niveaux sur le profil final | Corrélation croisée entre les 5 paires (profil final plus les 4 profils aux différentes échelles) pour les deux traces d'outils | 50 tournevis (moulage de traces d'outils laissées par ces tournevis sous différents angles) | |
| Adding An Objective Component To Routine Casework: Use Of Confocal Microscopy For The Analysis Of 9 mm Calibre Bullets (McClarin 2015) | Microscope confocal | Assemblage des 5 images afin d'obtenir l'image de l'impression de champs; Décomposition du signal en 4 composants, à savoir la microrugosité, la rugosité, l'ondulation et la forme; Prendre en considération uniquement la rugosité et l'ondulation, par l'élimination de la microrugosité (par filtre Gaussian) et de la forme (par l'élimination des profils ayant la courbe de polynômes de 2ème degrés); La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux | Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil final | 10 pistolets de calibre 9 mm leurs canons ont été rayés consécutivement.(deux projectiles par arme) | |
| Automatic Matching Of Bullet Lands (Eric Hare and Carrquiry 2017) | Microscope confocal | -Détection des bords des impressions de champs par le lissage des profils et les positions de minima et maxima locaux des impressions de rayures; La signature du profil est obtenue par la suppression de la courbure par l'utilisation de la régression polynomiale | Lissage des deux signatures; Identification du bon alignement par l'utilisation de la fonction de corrélation croisée; Identification des positions des pics et vallées; Application de deux techniques l'apprentissage automatique : l'arbre décisionnel et forêt aléatoire (Decision Trees ou Random Forest) sur les 7 caractéristiques trouvées dans la comparaison entre les deux signatures pour le : Calcul de CMS maximal, nombre des stries concordantes, et non concordantes, la valeur maximale de la fonction de corrélation croisée, la distance euclidienne entre les deux signatures et la somme des moyens de hauteurs des pics ou vallées - Fonction de corrélation croisée entre deux vecteurs de profil final | 10 pistolets de calibre 9 mm leurs canons ont été rayés consécutivement | |
| A correlation Based Bullet Identification Method Using Empirical Mode Decomposition (Bigdeli and Hamed Danandeh 2017) | Microscope optique | Détection de contour par l'opérateur de Canny; Calcul de l'angle d'inclinaison de l'impression de champs par l'utilisation de la transformée de Radon; Rotation de l'image par un angle opposé à l'angle d'inclinaison; La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux; Décomposition du profil par la décomposition en mode empirique EMD (Empirical Mode Decomposition) en 9 niveaux; Le profil final est formé par l'addition des 6 modes (du 3 au 8) | | 90 fusils d'assaut AK47 (2 projectiles par arme) | sensibilité de 70.49% pour les 10 meilleurs scores |
| A Bayesian approach based on Kalman filter frameworks for bullet identification (Hesar, Bigdeli, and Moghad-dam 2019) | Microscope optique | Détection de contour par l'opérateur de Canny - Calcul de l'angle d'inclinaison de l'impression de champs par l'utilisation de la transformée de Radon - Rotation de l'image par un angle opposé à l'angle d'inclinaison - La valeur de chaque point du profil de l'impression de champs égale à la moyenne des profils horizontaux - Décomposition du profil par la décomposition en mode empirique EMD (Empirical Mode Decomposition) en 9 niveaux - Le profil final est formé par l'addition des 6 modes (du 3 au 8) | Fonction de corrélation circulaire croisée normalisée entre deux vecteurs de profil final | 90 fusils d'assaut AK47 (2 projectiles par arme) | sensibilité de 73.22% pour les 10 meilleures scores |

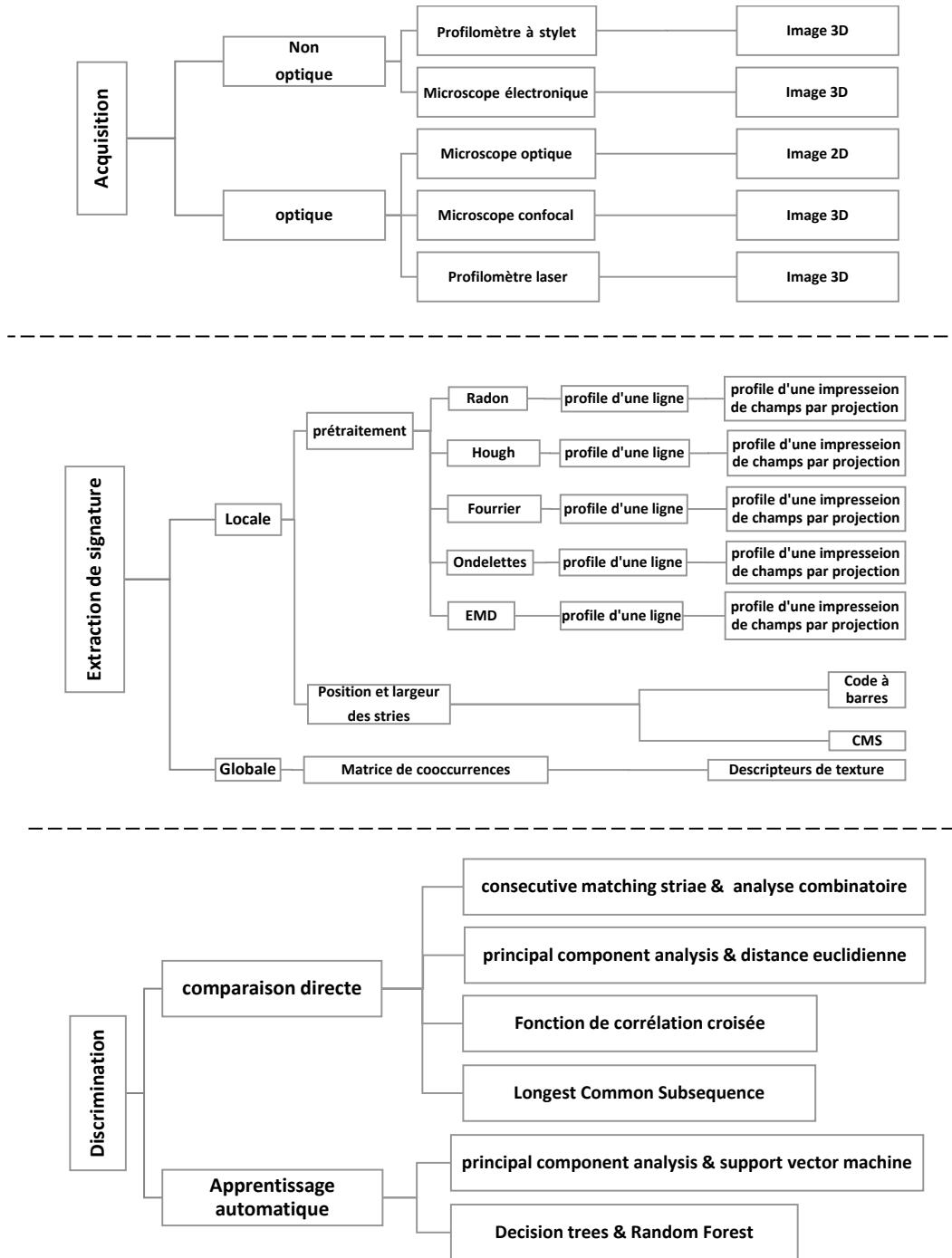


Figure 1: Techniques utilisées dans la littérature pour l'acquisition, l'extraction de signature et la discrimination

contribution personnelle

Définition proposée de l'empreinte balistique

Comme dans toutes les traces glissées générées lors d'un mouvement parallèle entre un outil et la surface d'un objet, l'impression de champ se manifeste sous forme des stries parallèles au sens du mouvement du projectile dans le canon, guidé par les deux bords de champ. Pour un canon dont les rayures sont orientées vers la droite, le bord droit et le bord gauche communément appelés respectivement le bord d'attaque et le bord de fuite. Inversement, pour un canon dont les rayures sont orientées vers la gauche, le bord gauche et le bord droit communément appelés respectivement le bord d'attaque et le bord de fuite. Dans les deux cas de figure, les stries dans l'image de l'impression de champ sont plus au moins parallèles au bord d'attaque qu'au bord de fuite.

Dans sa définition actuelle, l'empreinte balistique d'une arme sur un projectile est représentée par l'ensemble des impressions de champs et de rayures du canon laissées sur la surface du projectile. Étant donné que généralement les champs laissent des traces plus prononcées et plus spécifiques que les rayures [Lomoro, 1972], les impressions de champs sont généralement suffisantes pour représenter cette empreinte.

D'après la théorie de l'identification de l'AFTE, la strie est la composante élémentaire de l'empreinte balistique et que cette dernière est composée par l'ensemble des stries parallèles observées dans les différentes impressions de champs.

Dans la comparaison, sous le microscope comparateur, entre deux projectiles, inconnus ou l'un des deux est issu d'un tir de test, l'examineur compare entre les impressions de champs des deux projectiles tout en cherchant la phase qui donne de meilleures concordances au niveau des stries horizontales. En utilisant ces concordances observées et à la base de sa formation et de son expérience, l'examineur peut conclure, d'une manière subjective, une identification ou une exclusion.

Dans le cas d'une identification, l'examineur argumente sa conclusion par des images de comparaison indiquant les stries claires horizontales concordantes observées. Donc, il est possible de dire qu'une impression de champs est une superposition entre un *Premier plan* qui comporte l'information utile à l'identification, à savoir les stries claires horizontales (caractéristiques individuelles), et un *Arrière plan* qui englobe les données non pertinentes, à savoir la texture, qui est considérée comme un *bruit de fond*.

Dont le *Premier plan* n'est rien d'autre que la signature balistique dans sa définition actuelle de l'AFTE, à savoir les stries horizontales claires, étant donné que les stries sombres ne sont visibles que sous un éclairage opposé, elles ne soient pas prises en compte. Tandis que *l'Arrière plan* représente le reste de l'image de l'impression de champs, donc, l'information non pertinente vis à vis la définition actuelle, qui se manifeste sous forme de *Textures*.

Les *Textures* sont généralement composées de *Textures directionnelles* et de *Textures non directionnelles*. De leur tour, les *Textures directionnelles* sont composées des *Stries horizontales sombres* et les *Textures orientées*.

De ce qui précède:

Impression de champ = Stries horizontales claires et Stries horizontales sombres et Textures orientées et Textures non directionnelles

Impression de champ = Signature balistique|AFTE + Bruit de fond|AFTE

Où: *Signature balistique|AFTE = Stries horizontales claires*

Bruit de fond|AFTE = Stries horizontales sombres et Textures orientées et Textures non directionnelles

La figure 2 est un exemple pour l'omniprésence des stries sur toute l'impression de champs. La figure 3 donne un exemple où les stries sont noyées dans la texture. les figures 4 et 5 illustrent les textures directionnelles. La figure 6 est un exemple de la dominance des textures directionnelles et non directionnelles au détriment des stries conventionnelles.

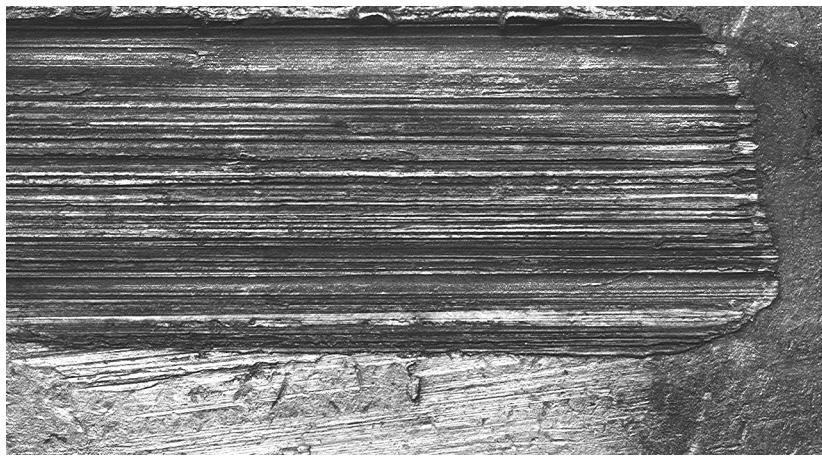


Figure 2: des stries claires et de la texture dans une impression de champs

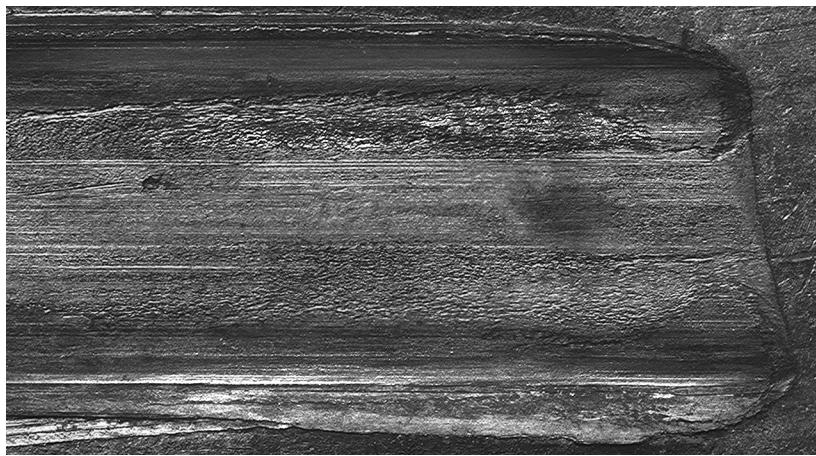


Figure 3: Stries claires melangées avec la texture

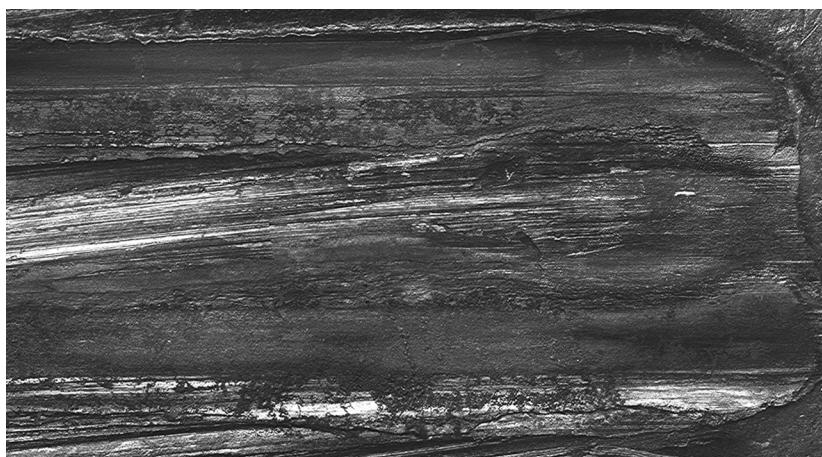


Figure 4: Stries claires et texture directionnelle

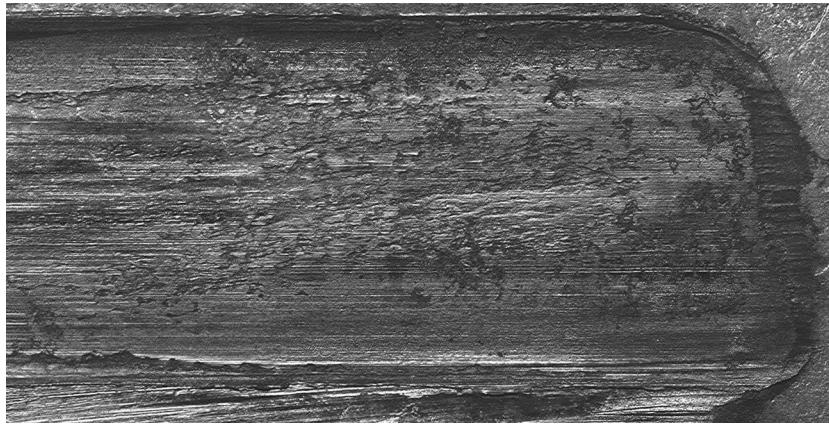


Figure 5: Stries claires noyées dans la texture



Figure 6: Omniprésence de la texture directionnelle et non directionnelles

Il est utile de soulever les trois points suivants :

- Selon l'angle d'éclairage, la strie peut être sombre ou claire, car la nuance perçue d'une strie n'est pas une caractéristique intrinsèque, mais elle dépend fortement de l'intensité et l'angle d'éclairage utilisés et elle ne reflète pas correctement la morphologie de la strie.
- Il n'y a aucun moyen ou technique pour vérifier, si une strie donnée, observée dans une impression de champ, a été laissée par un champ, ou par d'autres surfaces rencontrées durant la trajectoire balistique ou avant le tir.
- Dans une échelle d'observation donnée, les textures orientées sont dues principalement aux frottements du projectile avec d'autres surfaces (entre autres, les champs et les rayures du canon), et que les textures non-directionnelles représentent généralement l'état brut de la surface du projectile après son usinage.

À partir de ce constat, le sousigné propose une nouvelle définition de la signature balistique observée dans une impression de champ, comme étant l'ensemble de stries et des textures orientées, incluses entre les deux bords de l'impression de champs. L'ensemble de stries et des textures orientées sont dues aux différents contacts entre le projectile et d'autres objets (entre autres, le champ du canon).

Donc, la signature balistique dans sa nouvelle définition est le résultat de la superposition des stries et des textures orientées laissées par le champ durant la balistique intérieure, et des stries et des textures orientées laissées par d'autres objets rencontrées durant la balistique extérieure et la balistique finale, et éventuellement avant le tir.

Table 2: Comparaison de la définition des caractéristiques discriminantes sous la théorie de l'identification de l'AFTE et sous l'approche proposée

| Approches | Caractéristiques discriminantes | Arrière-plan |
|-------------------|--|--|
| Théorie AFtE | Stries horizontales claires | Stries horizontales sombres; Textures orientées; |
| Approche proposée | Stries horizontales claires; stries horizontales sombres; Textures orientées | Textures non-directionnelles |

Du tableau 2, il est clair que la signature balistique sous la définition proposée est plus pertinente que sous la définition actuelle, car cette dernière se contente de réduire la signature balistique (les caractéristiques dites individuelles) à l'ensemble des stries claires horizontales, sous le prétexte que la signature du champ est peut être représentée seulement par le groupe des stries claires horizontales, et que ces dernières sont dues uniquement au contact entre le champ et le projectile, ce qui n'est pas forcément correct ou vérifié. Par contre, sous la nouvelle définition, la signature balistique est mieux représentée, car elle regroupe les stries horizontales, sombres et claires, et les textures orientées (les textures directionnelles) qui sont plus invariantes par rapport à l'éclairage que les stries horizontales claires. Toutefois, il n'est pas possible de distinguer dans l'impression de champ, les textures directionnelles issues du contact entre le projectile et le champ, de celles issues du contact entre le projectile avec d'autres objets. Donc, il est avéré que, quel que soit la technique utilisée, optique ou non-optique, il n'est pas possible, à partir d'une seule acquisition, de discerner la signature balistique d'un champ, à savoir les stries et les textures orientées, des celles laissées par d'autres objets. Afin de réaliser cette distinction, le recours à l'apprentissage, humain ou automatique, est considéré comme l'une des meilleures solutions. Cette solution va être détaillée ultérieurement.

Approche proposée de l'identification balistique

Comme cité supra, l'approche la plus ancienne et la plus utilisée dans l'identification est l'approche adoptée par l'AFTE en 1992. Dans cette approche, le seul critère utilisé dans l'identification ou l'exclusion est le degré de compatibilité, au niveau des caractéristiques individuelles, observée dans la comparaison entre deux indices. Dans le cas des projectiles, la compatibilité est observée au niveau des stries horizontales claires concordantes. Afin de déclarer une identification entre deux projectiles, outre la compatibilité au niveau de

toutes les caractéristiques de classe, le degré de compatibilité, sous-entendu les concordances entre les stries horizontales claires, doit satisfaire les deux conditions suivantes :

- Supérieur au meilleur degré de compatibilité observé, au niveau des caractéristiques individuelles, dans la comparaison entre les projectiles tirés par des armes différentes ;
- Cohérent avec la compatibilité observée, au niveau des caractéristiques individuelles, dans la comparaison entre les projectiles tirés par la même arme.

Du point de vue du soussigné, ces deux conditions sont parmi les causes principales de la vulnérabilité de la discipline de l'identification balistique et dans celles-ci réside la subjectivité qui entache cette discipline, car, dans le cas des projectiles il est facile de formuler les suivantes remarques :

- Il n'y a pas une définition précise pour mesurer le degré de compatibilité, donc, de concordance au niveau des stries horizontales claires. Est-ce que c'est le pourcentage des stries concordantes par rapport au nombre total des stries, ou c'est le nombre des stries concordantes ;
- Pour le même examinateur, au cours de son expérience professionnelle, le meilleur degré de compatibilité observé, au niveau des caractéristiques individuelles dans la comparaison entre les projectiles tirés par des armes différentes, se change et s'accroît. De ce fait, ce degré est variable dans le temps pour le même examinateur et il est différent d'un examinateur à l'autre, ce que le rend quasiment inutilisable par la communauté des examinateurs en balistique ;
- Idem pour la deuxième condition, car le degré de compatibilité observée, au niveau des caractéristiques individuelles, dans la comparaison entre les projectiles tirés par la même arme, évolue avec l'expérience professionnelle du même examinateur, et il est différent d'un examinateur à un autre, ce le rend en réalité inutilisable par la communauté des examinateurs en balistique ;
- D'après ces deux conditions, il est sous-entendu implicitement que le degré de compatibilité, observé dans la comparaison au niveau des caractéristiques individuelles, entre les projectiles tirés par la même arme est toujours supérieur à celui observé entre les projectiles tirés par des armes différentes. Cependant, il n'existe aucun argument logique ou des études statistiques pouvant justifier cette prémissse. Il est tout à fait possible de trouver un degré de concordance, soit en pourcentage ou en nombre, de stries dans la comparaison entre deux projectiles tirés par armes différentes, supérieur à celui trouvé dans la comparaison entre deux projectiles tirés par la même arme. Idem pour les impressions de champs. Il est également possible de trouver un degré de concordance, soit en pourcentage ou en nombre, dans la comparaison entre les impressions de deux champs, supérieur à celui observé dans la comparaison entre deux impressions du même champ.

En réalité, le calcul du degré de concordances entre les projectiles tirés par des armes différentes ou par les mêmes armes n'a jamais été fait. Pour cette raison, et afin de conclure une identification, l'examinateur n'utilise guère ces deux conditions, mais, il se base uniquement sur sa formation et son expérience dans la matière.

Manque dans la définition de strie : dans la définition des traces striées ou glissées, la théorie de l'identification adoptée par l'AFTE [AFTE, 1998] a défini la strie, qui est le seul descripteur des caractéristiques individuelles laissées sur un projectile, comme étant une variation dans le contour « Striation : Contour variations, generally microscopic, on the surface of an object caused by a combination of force and motion where the motion is approximately parallel to the plane being marked ». Cette définition est relativement vague, car elle fait appel à un terme, à savoir le contour, qui n'a pas encore une définition exacte, d'autant plus que le contour est utilisé plutôt dans les traces moulées pour délimiter des régions bien précises telles que les traces du percuteur, de l'éjecteur ou de la tête de culasse, et non pas dans les traces glissées, où l'aspect région est absent, et qui est remplacé par la texture.

Ce manque de précision dans la définition de la strie a permis à la subjectivité d'occuper une place importante dans la partie technique de l'expertise balistique, à savoir la comparaison optique, après s'être approprier toute la partie interprétation. Il y a une différence entre la réalité d'une strie comme étant un arrangement connexe de crêtes, réparties sur une direction, et son aspect visuel qui apparait comme une forme rectiligne brillante ou sombre selon le type et l'angle d'éclairage et le grossissement utilisés.

De ce qui précède, et dans l'optique de la définition proposée de la signature balistique, il est judicieux de proposer une nouvelle approche pour l'identification des projectiles.

Les caractéristiques de classe mesurées sur un projectile sont, le nombre et l'orientation des impressions de champs et leurs largeurs.

Les caractéristiques discriminantes révélées sur un projectile sont l'ensemble des textures directionnelles réparties sur les impressions de champs et éventuellement sur les impressions de rayures.

Pour conclure qu'une arme suspectée d'avoir tiré un projectile est la plus probable, parmi toutes les armes saisies dans une base de données, il faut satisfaire les deux conditions suivantes :

- *Une compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe entre les projectiles issus des tirs de test et ce projectile ;*
- *Le degré de compatibilité dans la comparaison des caractéristiques discriminantes entre ce projectile et les projectiles de test de cette arme, doit être supérieur à tous les degrés de compatibilité dans la comparaison des caractéristiques discriminantes entre ce projectile et les projectiles de test d'autres armes saisies dans une base de données, tout en étant au même niveau que la compatibilité dans la comparaison des caractéristiques discriminantes entre les projectiles de test de l'arme suspecte.*

Pour conclure que deux projectiles sont probablement tirés par la même arme inconnue, il faut satisfaire les deux conditions suivantes :

- *Une compatibilité dans toutes les caractéristiques de classe ;*
- *Le degré de compatibilité dans la comparaison des caractéristiques individuelles entre les deux projectiles doit être supérieur à tous les degrés de compatibilité dans la comparaison des caractéristiques individuelles entre chacun des deux projectiles et les projectiles de test des autres armes saisies dans une base de données. Dans les deux cas, le taux de compatibilité est égal au degré de compatibilité dans les caractéristiques individuelles.*

L'avantage de cette nouvelle approche de discrimination est qu'elle est plus pratique et plus réaliste que la théorie d'identification de l'AFTE, notamment grâce aux points suivants :

- Elle utilise un descripteur (les textures directionnelles) de caractéristiques discriminantes plus représentatif que celui utilisé par la théorie de l'AFTE (les stries claires horizontales) dans la comparaison entre les projectiles.
- Au lieu de donner, après la réalisation de la comparaison seulement entre les projectiles de test et le projectile récupéré, une identification formelle que l'arme suspecte a tiré le projectile en question et que l'hypothèse qu'une autre arme, parmi toutes les armes potentielles au monde, est pratiquement impossible, l'approche proposée exprime la relation de causalité entre l'arme suspecte et le projectile en question sous forme de rapport de vraisemblance, après avoir comparé objectivement ce projectile avec toutes les armes potentielles saisies dans une base de données. Le choix d'une approche probabiliste, au lieu de l'approche déterministe utilisée par la théorie de l'AFTE, est dicté par la nature de l'empreinte balistique, car cette dernière, contrairement à l'empreinte digitale et l'empreinte génétique qui sont représentées par des descripteurs bien définis et stables, varie continuellement pour la même arme et que son descripteur (textures directionnelles) varie d'une arme à l'autre.
- Le taux d'erreur conjoint à une identification réalisée peut être exprimé par la proportion des faux positifs observés dans la comparaison entre les tirs de test des différentes armes saisies dans la base de données. De même, le taux d'erreur conjoint à une exclusion conclue peut être présenté par le pourcentage de faux négatif observé dans les comparaisons effectuées entre les projectiles tirés par les mêmes armes.

Dans une affaire impliquant l'utilisation d'une arme à feu, il existe généralement au moins une arme suspectée d'avoir tiré un indice balistique (douille ou projectile) récupéré des lieux. Les enquêteurs veulent vérifier, par le biais d'une expertise balistique, si l'arme suspecte est à l'origine des traces individuelles révélées sur l'indice balistique, et il est très rare, de présenter devant un tribunal un indice balistique sans la présence d'au moins

une arme suspecte. Donc, dans un cas criminel, de conclure une identification (ou exclusion) entre deux indices il est sous-entendu de confirmer (ou infirmer) qu'une arme suspectée a tiré un indice. L'intérêt de l'approche proposée par rapport à la théorie d'identification de l'AFTE, réside dans le fait qu'elle a remplacé les deux conditions de cette théorie, par deux autres conditions plus pertinentes et plus applicables.

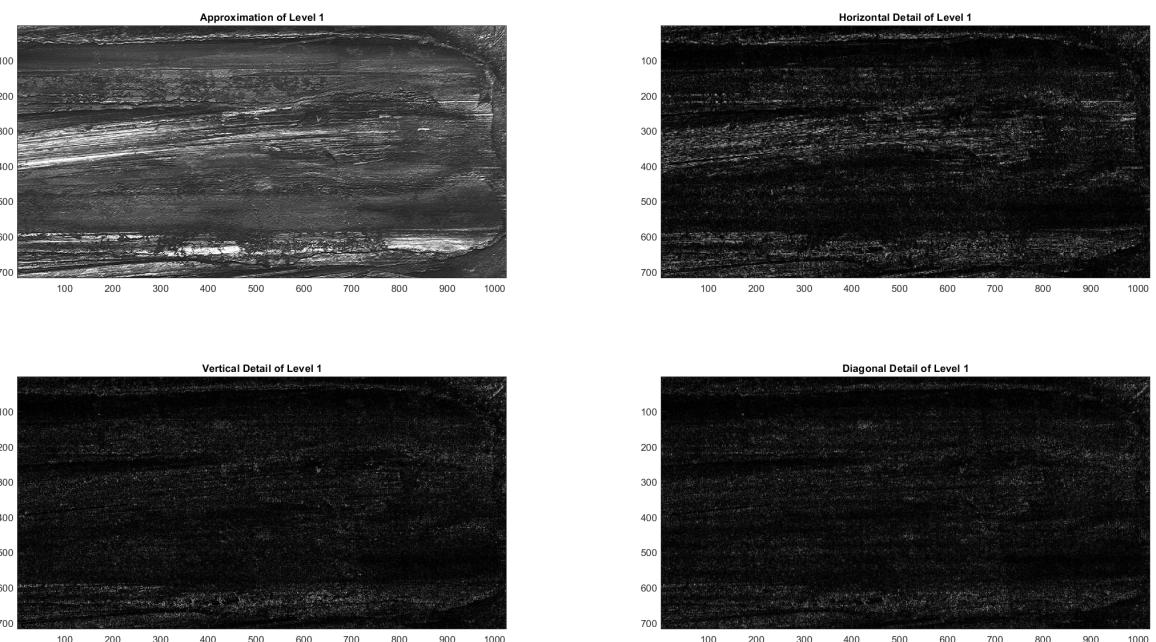
Algorithmé développé pour l'extraction de l'empreinte balistique

Étant donné que le but de cette recherche est le développement d'un système de discrimination automatique de projectile et que la nouvelle proposition de la signature balistique indique que le descripteur des caractéristiques discriminantes laissées par un canon est l'ensemble des textures directionnelles réparties sur les impressions de champs, et que les textures non directionnelles sont considérées comme un bruit, il est judicieux de mettre en œuvre un algorithme pour l'extraction automatique des textures directionnelles par l'élimination des textures non-directionnelles.

Afin de réaliser l'extraction des textures directionnelles une chaîne de traitement automatique, composé de plusieurs opérations et transformations, a été adopté. La figure N°2 représente les différentes étapes du traitement automatique.

L'entrée de cette chaîne, est une image optique 2D en niveau de gris de l'impression de champs. Le choix de l'imagerie optique 2D a été forcé par le fait qu'elle est la seule technique à disposition du soussigné au niveau du département balistique de l'Institut National de Criminalistique et de Criminologie de la Gendarmerie Nationale (INCC/GN). Cette image, de taille de 3 mégapixels (2048 x 1436), à 8 bit, est obtenue par la caméra Leica DFC 290 du microscope comparateur Leica FS C et avec un grossissement de x40.

Afin d'éliminer les formes verticales, car a priori ,elles ne proviennent pas du frottement entre le projectile et le champs du canon, une décomposition par la transformée par ondelettes Haar 2D, par l'utilisation de est appliquée sur l'image originale. La figure 7 illustre la décomposition, à un niveau, de la figure 4 en ces 4 composantes, à savoir approximation, verticale, horizontale et diagonale.



bibliographie

- Advisors on Science, President's Council of, and Technology. 2016. "Report to the President: Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods." Report. Executive Office of the President. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCA-ST/pcast_forensic_science_report_final.pdf.
- Bachrach, Benjamin. 2002. "Development of a 3d-Based Automated Firearms Evidence Comparison System." Journal Article. *Journal of Forensic Science* 47 (6): 1253–64.
- Baiker, Martin, Isaac Keereweer, René Pieterman, Erwin Vermeij, Jaap van der Weerd, and Peter Zoon. 2014. "Quantitative Comparison of Striated Toolmarks." Journal Article. *Forensic Science International* 242: 186–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.06.038>.
- Banno, Atsuhiko, Tomohito Masuda, and Katsushi Ikeuchi. 2004. "Three Dimensional Visualization and Comparison of Impressions in Fired Bullets." Journal Article. *Forensic Science International* 140 (2-3): 233–40.
- Biasotti, A. A., and John Murdock. 1997. "Firearms and Toolmarks Identification: Scientific Status, §23-2." Book Section. In *Modern Scientific Evidence: The Law and Science of Expert Testimony*, edited by David L. Faigman, David H. Kaye, Michael J. Saks, and Joseph Sanders, 2:55–78. St. Paul, Minn.: West Publishing Co.
- Biasotti, Alfred. 1959. "A Statistical Study of Individual Characteristics of Fired Bullets." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 4 (1): 34–50.
- Biasotti, Alfred A., and John Murdock. 1984. "'Criteria for Identification' or 'State of the Art' of Firearm and Toolmark Identification." Journal Article. *AFTE Journal* 16 (4): 16–34.
- Bigdeli, Saeed, and Mohsen Ebrahimi Moghaddam Hamed Danandeh. 2017. "A Correlation Based Bullet Identification Method Using Empirical Mode Decomposition." Journal Article. *Forensic Science International* 278: 351–60. <https://doi.org/doi:10.1111/1556-4029.13956>.
- Bolton-King, Rachel, M. Bencsik, J. Evans, C. L. Smith, Derek F. Allsop, J. Painter, and W. Cranton. 2012. "Numerical Classification of Curvilinear Structures for the Identification of Pistol Barrels." Journal Article. *Forensic Science International* 220 1-3: 197–209.
- Bonfanti, M. S., and R. I. Ghauharali. 2000. "Visualisation by Confocal Microscopy of Traces on Bullets and Cartridge Cases." Journal Article. *Science & Justice* 40 (4): 241–56. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1355-0306\(00\)71994-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1355-0306(00)71994-0).
- Choraś, Ryszard S. 2013. "Texture Based Firearm Striations Analysis for Forensics Image Retrieval." Conference Proceedings. In *Image Processing and Communications Challenges* 4, edited by Ryszard S. Choraś, 25–31. Springer Berlin Heidelberg.
- Chu, Wei, John Song, Theodore Vorburger, and Susan Ballou. 2010. "Striation Density for Predicting the Identifiability of Fired Bullets with Automated Inspection Systems*." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 55 (5): 1222–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01438.x>.
- Chu, Wei, John Song, Theodore Vorburger, James Yen, Susan Ballou, and Benjamin Bachrach. 2010. "Pilot Study of Automated Bullet Signature Identification Based on Topography Measurements and Correlations*†." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 55 (2): 341–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01276.x>.
- Committee to Assess the Feasibility Accuracy, National Research Council -, and Technical Capability of a National Ballistics Database. 2008. *Ballistic Imaging*. Edited Book. Washington DC: National Research Council.
- Council, National Research. 2009. *Strengthening Forensic Science in the United States: A Path Forward*. Book. Washington, D.C.: The National Academies Press.

- David P. Baldwin, Max Morris, Stanley J. Bajic. 2014. "A Study of False-Positive and False-Negative Error Rates in Cartridge Case Comparisons." Report. Defense Forensic Science Center. <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/249874.pdf>.
- De Kinder, Jan, and Monica Bonfanti. 1999. "Automated Comparisons of Bullet Striations Based on 3d Topography." Journal Article. *Forensic Science International* 101 (2): 85–93.
- Demoli, N., K. Sariri, Z. Stanic, V. Mastruko, and O. Milat. 2004. "Toolmarks Identification Using SEM Images in an Optoelectronic Correlator Device." Journal Article. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 115 (11-12): 487–92. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B7GVT-4GHB794-2/2/7cb285ab5898cdd72e7f946b6b63cedc>.
- Eric Hare, Heike Hofmann, and Alicia Carriquiry. 2017. "Automatic Matching of Bullet Lands." Journal Article. *Annals of Applied Statistics* 11 (4): 2332–56.
- Gardner, Groffrey. 1978. "Computer Identification of Bullets." Journal Article. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 8 (1): 69–76. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4309834>.
- Heizmann, Michael, and Fernando Puente Leon. n.d. "Automated Analysis and Comparison of Striated Toolmarks." Conference Proceedings. In *Proceedings / Fourth European Meeting for Shoe Print, Tool Mark Examiners, SPTM 2001, May 15 - 18, 2001*. Ed.: H. Katterwe, 121–32. BKA.
- Hesar, H. Danandeh, S. Bigeli, and M. Ebrahimi Moghaddam. 2019. "A Bayesian Approach Based on Kalman Filter Frameworks for Bullet Identification." Journal Article. *Science & Justice* 59: 390–404. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scijus.2019.02.009](https://doi.org/10.1016/j.scijus.2019.02.009).
- Identification Committee, AFTE Criteria for. 1992. "Theory of Identification, Range of Striae Comparison Reports and Modified Glossary of Definitions." Journal Article. *AFTE Journal* 24 (2): 336–40.
- Jan De Kinder, Marc Pirlot, Pascal Prevot, and Bart Nys. 1998. "Surface Topology of Bullet Striations: An Innovative Technique." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 30 (2): 294–99.
- Jing, Lu, Wu Shi-hong, Yang Ke-cheng, and Xia Min. 2014. "Automated Bullet Identification Based on Striation Feature Using 3d Laser Color Scanners." Journal Article. *Optik Journal* 125 (10): 2270–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.065>.
- Kirby, Shane J. 1983. "Comparison of 900 Consecutively Fired Bullets and Cartridge Cases from a 455 Caliber s&w Revolver." Journal Article. *AFTE Journal* 15 (3): 113–26.
- Li, D. 2006. "Ballistics Projectile Image Analysis for Firearm Identification." Journal Article. *IEEE Transactions on Image Processing* 15 (10): 2857–65. <https://doi.org/10.1109/TIP.2006.877530>.
- Lin, Ming-Feng, and C. Wen. 2010. "Similarity Measurement of Striation Marks Based Upon the Longest Common Subsequence Method." Conference Proceedings. In *Forensic Science Journal*, 9:35–52. 1.
- Lindley, Dennis V. 1977. "Probability and the Law." Journal Article. *The Statistician* 26 (3): 203–20.
- Lindsay, David. 2000. "The Effect of Powder Load and Bullet Material on an Identification." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 32 (3): 271–76.
- Lomoro, V. J. 1972. "32 SWL Caliber f.i.e. Coporation Titanic Revolver." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 4 (20): 46.
- Ma, Li, John Song, Eric Whitenton, Alan Zheng, Theodore Vorburger, and Jack Zhou. 2004. "NIST Bullet Signature Measurement System for RM (Reference Material) 8240 Standard Bullets." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 49 (4): 649–59.
- McClarlin, Derrick S. 2015. "Adding an Objective Component to Routine Casework: Use of Confocal Microscopy for the Analysis of 9mm Caliber Bullets." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 47 (3): 161–70.

- Monkres, Jeremy, Christopher Luckie, Nicholas D. K. Petraco, and Allison Milam. 2013. "Comparison and Statistical Analysis of Land Impressions from Consecutively Rifled Barrels." Conference Proceedings. In *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal*, 45:3–20. 1.
- Murdock, John E. 1981. "A General Discussion of Gun Barrel Individuality and an Empirical Assessment of the Individuality of Consecutively Button Rifled .22 Caliber Rifle Barrels." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 13 (3): 84–111.
- Nichols, Ronald G. 2007. "Defending the Scientific Foundations of the Firearms and Tool Mark Identification Discipline: Responding to Recent Challenges." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 52 (3): 586–94. <https://doi.org/doi:10.1111/j.1556-4029.2007.00422.x>.
- Pirlot, M., A. Chabottier, E. Celens, J. De Kinder, and P. Van Ham. 1999. "Feature Extraction of Optical Projectiles Images." Journal Article. *Science & Justice* 39 (1): 53–56. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1355-0306\(99\)72015-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1355-0306(99)72015-0).
- Puente León, Fernando. 2006. "Automated Comparison of Firearm Bullets." Journal Article. *Forensic Science International* 156 (1): 40–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.12.016>.
- Schwartz, Adina. 2005a. "A Systemic Challenge to the Reliability and Admissibility of Firearms and Toolmark Identification." Journal Article. *The Columbia Science and Technology Law Review* 6: 1–42.
- . 2005b. "Ballistics Recognition and Identification Systems." Book Section. In *Encyclopedia of Law Enforcement*, edited by Larry E. Sullivan and Dorothy Moses Schulz, 2:551–55. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4135/9781412952415>.
- Skolrood, R W. 1975. "Comparison of Bullets Fired from Consecutively Rifled Cooey. 22 Calibre Barrels." Journal Article. *Canadian Society of Forensic Science Journal* 8 (2): 49–52.
- Song, Jaqui, Theodore Vorburger, T. B. Renegar, Hyug-Gyo Rhee, Xiaoyu Zheng, Li Ma, John Libert, S. Ballou, Benjamin Bachrach, and K. Bogart. 2006. "Correlation of Topography Measurements of NIST SRM 2460 Standard Bullets by Four Techniques." Journal Article. *Measurement Science and Technology* 17: 500–503. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/3/S07>.
- Song, Jun-Feng. 2013. "Proposed "NIST Ballistics Identification System (NBIS)" Based on 3d Topography Measurements on Correlation Cells." Journal Article. *Association of Firearm and Tool Mark Examiners Journal* 45 (2): 184–94. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=910868.
- Stein, Darrell, and Jorn Chi Chung Yu. 2013. "The Use of Near-infrared Photography to Image Fired Bullets and Cartridge Cases." Technical note. *Journal of Forensic Sciences*. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12256>.
- Tontarski, Richard E., and Robert M. Thompson. 1998. "Automated Firearms Evidence Comparison: A Forensic Tool for Firearms Identification – an Update." Journal Article. *Journal of Forensic Sciences* 43 (3): 641–47.
- Uchiyama, Tsuneo. 1988. "A Criterion for Land Mark Identification." Journal Article. *AFTE Journal* 20 (3): 236–51.