



Le rôle des caractéristiques acquises en matière de traces de semelles : Une revue et discussion de littérature.

Malou den Harder¹ et Christophe Champod¹

¹ École des sciences criminelles, Université de Lausanne, 1015 Lausanne-Dorigny, Suisse
Contact : malou.denharder@unil.ch

Résumé

À la suite d'une comparaison entre des traces et des empreintes de semelles, une étape cruciale concerne l'évaluation du poids à accorder aux observations, et plus particulièrement la valeur à accorder aux caractéristiques acquises. Cette étape d'évaluation est souvent peu balisée et ne s'appuie que rarement, pour ce qui est des caractéristiques acquises, sur des données empiriques concrètes.

Cet article propose une discussion critique de la littérature afin de présenter les avancées dans le domaine et de donner une vue d'ensemble des publications actuelles qui traitent spécifiquement des caractéristiques acquises des semelles. Le recours systématique à l'argument de l'unicité de ces caractéristiques pour justifier une identification est également discuté afin de rediriger le débat vers des questions forensiques jugées plus pertinentes. De même, la terminologie utilisée pour qualifier les caractéristiques acquises est examinée pour identifier les raccourcis fallacieux qui viennent corrompre la logique du débat dans ce domaine. Finalement, le cadre général de l'interprétation des traces de semelles ainsi que les connaissances actuelles concernant les caractéristiques acquises plus spécifiquement seront couverts. Cette contribution couvre autant les études sur l'occurrence des caractéristiques acquises que les recherches relatives aux divers facteurs et dépendances qui influent sur les caractéristiques acquises.

Mots clés

Traces de souliers, interprétation, unicité, terminologie, caractéristiques accidentelles

The role of acquired characteristics in the domain of footwear marks – a discussion and review.

Abstract

A crucial step in any comparison of footwear marks with a potential source is to assign the weight or determine the importance and impact of the observations made, particularly with regard to acquired characteristics. However, this stage is still often poorly structured and relies rarely on empirical data.

The aim of this literature review and discussion is to present the advances in the field and give an overview of current publications dealing with acquired characteristics of outsoles. The concept of using the often-assumed uniqueness of these features as a basic tenet for identification is also discussed, in order to redirect the focus of the field towards more forensically relevant issues. Similarly, the terminology concerning acquired characteristics is addressed, in particular to highlight the sometimes erroneous or misleading concepts that can be attached to certain notions. Finally, the general framework for interpreting footwear marks, as well as current knowledge concerning acquired features more specifically, are reviewed. This includes studies on the occurrence of acquired characteristics, as well as research concerning various factors and their dependencies that have an influence on acquired characteristics.

Keywords

Shoeprints, interpretation, uniqueness, terminology, randomly acquired characteristics (RAC)

Citation : den Harder, M. et Champod, C. (2025) Le rôle des caractéristiques acquises en matière de traces de semelles : Une revue et discussion de littérature. *Criminologie, Forensique et Sécurité*, 3 (1): 6003.

Introduction

Les traces de semelles constituent une trace matérielle, souvent présente sur les lieux d'infractions, qui s'avèrent très utiles tant pour la reconstruction des faits que pour faire un rapprochement de personnes potentiellement impliquées au travers des semelles qu'elles portent. En présence d'empreintes de références obtenues des semelles d'intérêt, une comparaison peut être entreprise avec les traces, de source non établies, relevées sur la scène. À la suite de cette comparaison visuelle, allant du général (taille, motif de la semelle) au particulier (usures générales et caractéristiques accidentelles), se pose la question du poids à attribuer aux observations. En matière de traces de semelles, l'évaluation d'une comparaison est généralement peu structurée, laissée pour grande partie à l'appréciation du ou de la spécialiste. Les données structurées, organisées par exemple dans une banque de données, pouvant aider à guider quant à la rareté relative des caractéristiques, sont très limitées et, souvent, ne concernent que les motifs généraux et les tailles des semelles. Aussitôt que le ou la spécialiste doit apprécier la force à attribuer à la présence ou à l'absence de caractéristiques acquises, de nature accidentelle, comme des coupures ou des enlèvements de matière, les données structurées se font rares et les praticiens et praticiennes s'en remettent à leur expérience. Comme le constate le rapport du *President's Council of Advisors on Science and Technology* (PCAST, 2016), l'évaluation d'une comparaison entre une trace de semelle et une potentielle source manque de transparence et dans une certaine mesure de fondements scientifiques.

Afin de discriminer les potentielles sources d'une trace, les caractéristiques de fabrication, l'usure générale et les caractéristiques acquises rentrent évidemment en jeu. Mais par leur pouvoir discriminant élevé, les caractéristiques acquises ont, si observées, une grande importance lors de l'assignation du poids attribuable aux résultats des comparaisons. Pourtant, l'estimation concrète de la reproductibilité et de la rareté d'une caractéristique acquise reste une tâche complexe et pose plusieurs défis.

Cette contribution cherche à présenter l'état actuel de la littérature scientifique concernant les caractéristiques acquises associées aux semelles et par extension à leurs traces et empreintes. Tout d'abord, quelques notions générales du domaine et une discussion sur l'importance de l'utilisation d'une terminologie avisée sont présentées. Puis, les principes et progrès actuels du domaine concernant l'interprétation des observations sont couverts avant de se plonger plus spécifiquement dans les avancées de la littérature sur les caractéristiques acquises. Dans ce contexte, une analyse des facteurs d'influence sur les attributs d'une caractéristique acquise sera proposée en distinguant notamment l'influence de la semelle, de la personne portant les chaussures et de la trace elle-même. Finalement, avant de conclure, une dernière section relate les études qui visent à évaluer les examinateurs-trices, notamment en évaluant leurs taux d'erreurs.

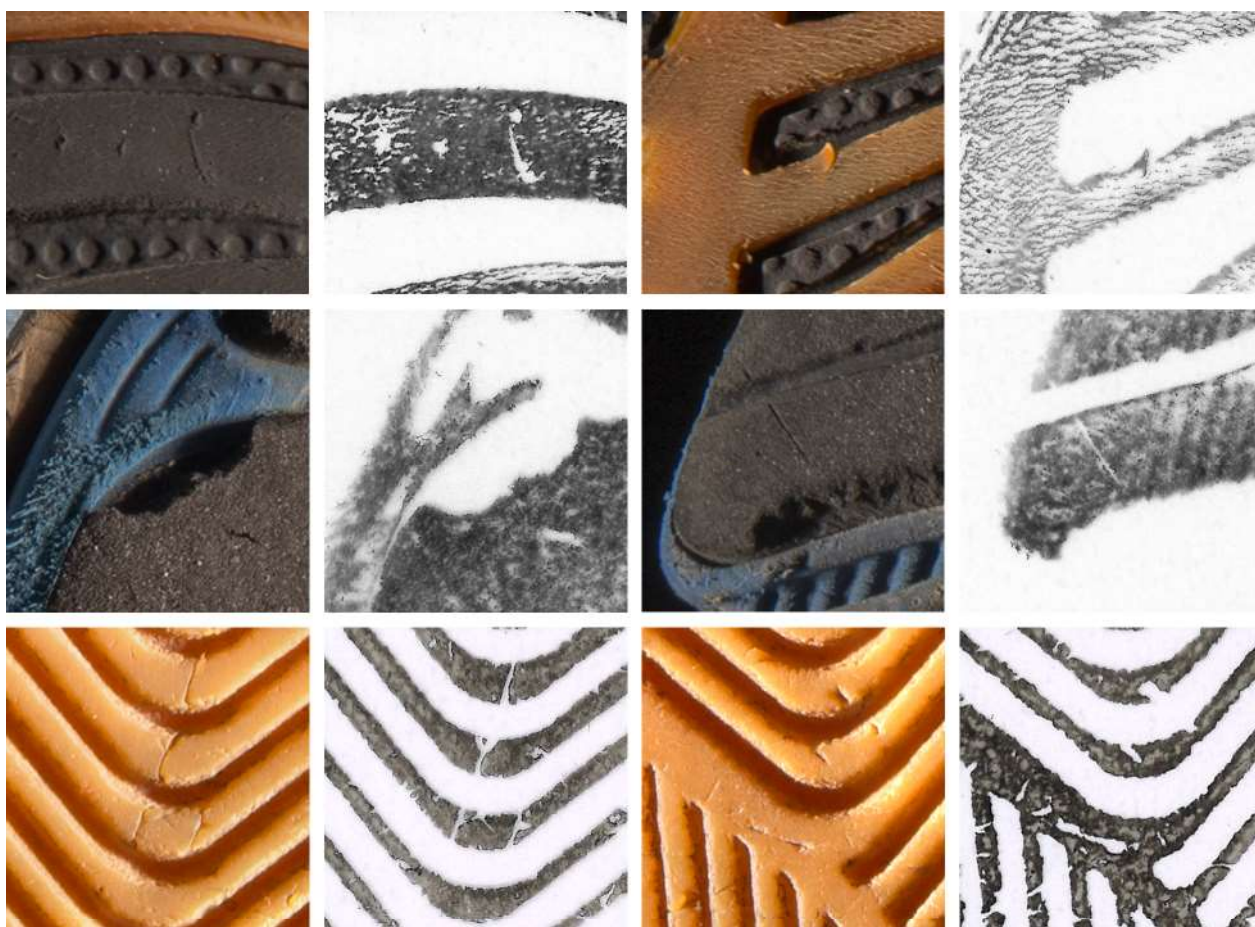


Figure 1 : Exemples de caractéristiques acquises telles qu'observées sous la semelle et sur l'empreinte de référence (standard encré) associée (den Harder, 2019)

Connaissances générales et terminologie

Les caractéristiques acquises¹ des semelles (parfois également appelées caractéristiques accidentelles) désignent les événements, les « accidents » ponctuels qui se manifestent sur les semelles suite au port et à l'usure de cette dernière. Quelques exemples de caractéristiques acquises sont illustrés dans la Figure 1. Il s'agit notamment de coupures, d'arrachements de matière, de trous, d'entailles ou de déchirures. Certains ajouts d'éléments étrangers, comme l'encastrement de fragments de verres ou la prise d'un caillou entre deux éléments du motif, peuvent également être considérés comme caractéristiques acquises.

Les caractéristiques acquises jouent un rôle fondamental dans l'interprétation des traces de semelles. Lorsqu'elles sont observées en concordance entre une trace et une référence, elles sont considérées comme les observations permettant de passer d'une simple association du type de chaussure à une association ayant un poids beaucoup plus fort (Bodziak, 2017; Girod *et al.*, 2008; SWGTREAD, 2013a). Souvent considérée comme étant intuitive et liée à l'expérience des expertes, l'évaluation concrète d'une concordance des caractéristiques acquises reste relativement peu balisée et sans base scientifique étendue. Or, comme constatées par Schmied (2020), les plus grandes différences qui sont observées entre examinateurs-trices concernent justement l'évaluation des caractéristiques acquises.

Avant de s'intéresser à l'état des connaissances actuelles concernant les caractéristiques acquises, l'utilisation de certains termes et leurs implications seront discutées plus bas. Il est important de préciser certaines notions – notamment le concept de l'unicité et de l'individualité ainsi que l'aspect aléatoire ou non des caractéristiques acquises – afin de pouvoir ensuite déplacer l'argumentaire vers des questions forensiques que nous jugeons plus pertinentes.

La question de l'unicité et le caractère « aléatoire » des caractéristiques acquises

L'affirmation qu'une trace et une référence ont une source commune est souvent justifiée en faisant recours au concept d'unicité (Cole, 2009). Si une caractéristique est déclarée être unique, alors le fait de la retrouver en correspondance entre une trace et une référence est retenu comme étant une preuve infaillible et cela parfois même lorsque des observations contraires, des dissemblances, sont présentées (Page *et al.*, 2011). La question de l'unicité et de l'individualisation soulève, en effet, des problématiques fondamentales en science forensique.

Bodziak (2017) discute également la question de l'unicité ou de l'individualité. Il mentionne que, pour autant que le niveau de détail soit suffisamment élevé, il serait possible de distinguer toutes les chaussures entre-elles. L'argument est imparable, car, par définition, tout objet est unique lorsque nous l'examinons avec un niveau de détail infini. Pourtant, les comparaisons forensiques ne considèrent généralement pas des comparaisons entre semelles, mais se basent sur des traces. Étant entendu que la trace est par définition incomplète (Margot, 2014), les comparaisons forensiques sont toujours limitées par la qualité de celle-ci.

Malgré le fait d'être encore souvent utilisée comme argument soutenant la force absolue d'une comparaison (Page *et al.*, 2011), l'unicité des caractéristiques observées n'a jamais été prouvée scientifiquement et ne peut tout simplement pas l'être. Bien que plusieurs études aient tenté de soutenir cette hypothèse empiriquement (Adair *et al.*, 2007; Hamburg et Banks, 2010; Wilson, 2012), cela reste finalement illusoire par le simple fait qu'il n'est pas possible d'observer toutes les entités concernées (Cole, 2009). Petraco *et al.* (2010) expliquent que, pour prouver l'unicité d'une caractéristique acquise, il faudrait connaître toutes les caractéristiques acquises de toutes les chaussures existantes à chaque instant ; une tâche tout simplement impossible. La limite s'applique également pour les modèles statistiques. Ils ne peuvent pas démontrer définitivement l'unicité, mais uniquement y apporter du soutien par des observations empiriques limitées. En 1991 déjà, Stoney constate que ces modèles d'unicité demandent toujours une certaine extrapolation, un saut de croyance, afin de décider d'une individualisation. Ce saut de croyance est par nature personnel et va à l'encontre d'un processus objectif (Stoney, 1991). Les ingrédients entrant en jeu dans la décision d'une individualisation vont en effet bien au-delà qu'une simple affirmation d'unicité (Champod et Biedermann, 2023).

Un autre argument qui est souvent avancé pour soutenir l'hypothèse de l'unicité des caractéristiques acquises se base sur le nombre important de facteurs ayant une influence sur leur apparition et leur évolution. Ces deux aspects sont précisément discutés par Cole (2009). Premièrement, ces paramètres sont, en général, insuffisamment étudiés pour en déterminer leur importance. Deuxièmement, le fait d'avoir une multitude de variables impliquées ne dit encore rien sur la possibilité d'arriver au même résultat par des voies de développement différentes. Comme évoqué par McLachlan (1995), il n'existe aucun mécanisme concret qui empêcherait que deux entités soient qualifiées d'identiques.

Le principe de l'unicité est souvent brandi comme un étendard, comme l'explication ultime à la décision d'individualisation. Cette pratique doit être remise en cause. Il est une évidence que chaque entité est en elle-même unique et ne peut être identique qu'à elle-même (Evet *et al.*, 1998). Même si deux entités sont indifférenciables, par exemple par leur apparence, elles ne seront pas pour autant identiques. En effet, deux entités (comme par exemple les caractéristiques d'une trace et d'une référence) peuvent être indifférenciables, mais certainement pas identiques et ceci par définition (Champod et Evett, 2001). Savoir si deux objets (p.ex. une trace et une référence) sont identiques n'est alors finalement pas la question d'intérêt. La question fondamentale en science forensique est de savoir quelle inférence peut être tirée par rapport aux propositions données sur la base des examens comparatifs mettant en évidence des caractéristiques de qualité et quantité variable (Champod et Evett, 2001).

L'utilisation du caractère « unique », comme indicateur de fiabilité des résultats, a également été critiquée dans le rapport du *National Research Council* (2009) et a ensuite été reprise dans le rapport PCAST (*President's Council of Advisors on Science and Technology*) :

« La question n'est pas de savoir si les objets ou les caractéristiques diffèrent ; c'est certainement le cas si examinés à un niveau suffisamment fin. La ques-

¹ Dans cette contribution, les caractéristiques acquises font référence à ces événements ponctuels comme illustrés dans la Figure 1 et n'incluent pas les caractéristiques qui relatent à l'abrasion graduelle de la semelle lors de son utilisation. Ces nuances terminologiques seront discutées plus en détail dans le chapitre « De la nécessité d'une précision terminologique ».

tion est de savoir dans quelle mesure et dans quelles circonstances les examinateurs-trices, en appliquant une méthode métrologique donnée, peuvent détecter de manière fiable des différences pertinentes concernant les caractéristiques afin de déterminer avec fiabilité si elles ont une source commune. [...] En outre, il n'est pas nécessaire que les caractéristiques soient uniques pour qu'elles soient utiles pour réduire les possibles sources d'une caractéristique. »² (traduction libre de PCAST, 2016, p. 62)

Le constat plus haut permet une affirmation qui est fondamentale à notre avis: l'unicité, même si effective, n'est pas pertinente pour pouvoir s'exprimer sur une comparaison entre une trace et une potentielle source.

De la nécessité d'une précision terminologique

Dans la littérature anglophone, ainsi que dans les définitions proposées par le *Scientific Working Group for Shoeprint and Tire Tread Evidence* (SWGTHREAD, 2013b), le terme *randomly acquired characteristics* – RAC (anglais pour des caractéristiques acquises aléatoirement/par hasard) est souvent utilisé pour les caractéristiques acquises.

Décrire les caractéristiques acquises comme étant aléatoires pose plusieurs problèmes. Certes, les caractéristiques acquises sont très diverses et peuvent se présenter sous de formes, orientations et emplacements variés. Cependant, surtout dans un contexte scientifique, l'utilisation du mot aléatoire (*random* en anglais) n'est pas anodine. Par aléatoire, il est attendu que plusieurs caractéristiques acquises entre elles ainsi que leurs attributs (comme la forme, l'orientation et l'emplacement) soient indépendants. De même, il est attendu que la distribution de l'emplacement des caractéristiques soit imprédictible (suivant une loi uniforme) sur toute la surface au contact avec le sol et que la chance d'apparition d'une caractéristique acquise spécifique soit, dès lors, équiprobable pour chaque endroit de la semelle. Force est de constater que ces hypothèses n'ont pas été suffisamment étudiées pour être qualifiées de scientifiquement solides. Au contraire, les recherches tendent à réfuter l'hypothèse d'indépendance et d'équiprobabilité. Notamment, pour ce qui est de la localisation des caractéristiques acquises, plusieurs études ont constaté une distribution non uniforme des caractéristiques acquises sur la semelle (Davis et DeHaan, 1977; Kaplan-Damary et al., 2020, 2022; Liu et al., 2019; Monico, 2005; Richetelli et Speir, 2022; Speir et al., 2016; Toso, 1997).

Dans la littérature, comme dans la pratique, une distinction est également faite entre les caractéristiques de classe (voire sous-classe) et les caractéristiques dites « individuelles » (par exemple : Bodziak, 2017; Hammer, 2013; Keereweer, 2000; Wilson, 2012).

Dans le document de SWGTHREAD sur la terminologie recommandée par la profession, les termes *identifying characteristic* (caractéristique identifiante), *individual characteristic* (caractéristique individuelle) et *accidental characteristic* (caractéristique accidentelle) sont définis

en les renvoyant au terme *randomly acquired characteristic* (caractéristique acquise aléatoirement) dont la définition donnée est la suivante :

« Une caractéristique de la semelle d'une chaussure ou de la bande de roulement d'un pneumatique résultant d'événements aléatoires comprenant, mais sans s'y limiter : des coupures, des éraflures, des déchirures, des trous, l'incrustation de pierres, des abrasions et l'acquisition de débris. La position, l'orientation, la taille et la forme de ces caractéristiques contribuent au caractère unique d'une semelle ou d'une bande de roulement. Les caractéristiques acquises aléatoirement sont essentielles pour l'identification d'une semelle ou d'un pneu spécifique comme source d'une trace. »³ (traduction libre de SWGTHREAD, 2013b, p. 10)

Au vu des problèmes rencontrés par l'utilisation des termes *unique* et *aléatoire* pour la description des caractéristiques acquises, leur usage doit être évité à notre avis. Il en va de même pour les termes *caractéristique identifiante* et *caractéristique individuelle*. Ces formulations accordent déjà une valeur à l'observation avant que celle-ci soit évaluée (Girod et al., 2008) et renvoient à l'utilisation de l'unicité comme argument de la véracité d'une association entre une trace et une référence. Il est avisé d'utiliser plutôt le terme *caractéristique acquise* (*acquired characteristic* en anglais) ou *caractéristique accidentelle* (*accidental characteristic* en anglais) qui ne renvoient pas au poids attribué à l'observation.

Il est à noter que les définitions des différents termes ne sont pas directement transférables. En effet, en utilisant la distinction de caractéristique de classe et caractéristique individuelle, l'usure générale est considérée comme une caractéristique de classe (SWGTHREAD, 2013b), tandis qu'en utilisant la distinction entre caractéristique de fabrication et caractéristique acquise, l'usure générale s'inscrit dans les caractéristiques acquises. La terminologie qui distingue les caractéristiques de fabrication des caractéristiques acquises est brièvement abordée ci-dessous. Des informations plus détaillées sont disponibles dans l'ouvrage de Girod et al. (2008).

Par *caractéristiques de fabrication* sont généralement entendues les caractéristiques qui sont propres à la production de la semelle (notamment le motif de la semelle, la taille, les éléments de motifs et d'éventuels défauts ou particularités de moule) (Girod et al., 2008). Il s'agit des caractéristiques qui sont déjà présentes avant toute utilisation de la semelle.

Selon Girod et al. (2008), les *caractéristiques acquises* concernent toutes les caractéristiques qui apparaissent sur la semelle consécutivement à l'utilisation et l'usure de cette dernière. Cela comprend donc également l'usure générale. La terminologie proposée par Girod et al. (2008) peut toutefois prêter à confusion, car aucun terme spécifique n'est proposé pour se référer aux coupures et accidents, majoritairement appelés *randomly acquired characteristics* (RAC) en anglais. Dans cet article, afin d'éviter toute ambiguïté, le terme

² Traduction libre de l'anglais : "The issue is not whether objects or features differ; they surely do if one looks at a fine enough level. The issue is how well and under what circumstances examiners applying a given metrological method can reliably detect relevant differences in features to reliably identify whether they share a common source. [...] Moreover, it is not necessary for features to be unique in order for them to be useful in narrowing down the source of a feature."

³ Traduction libre de l'anglais : "A feature on a footwear outsole or tire tread resulting from random events including, but not limited to: cuts, scratches, tears, holes, stone holds, abrasions and the acquisition of debris. The position, orientation, size and shape of these characteristics contribute to the uniqueness of a footwear outsole or tire tread. Randomly acquired characteristics are essential for an identification of a particular item of footwear or tire as the source of an impression."

caractéristique acquise sera utilisé de façon plus restreinte ; pour se référer spécifiquement à une RAC. Le terme usure générale sera utilisé pour se référer à l'état d'usure de la semelle suite à l'érosion progressive de cette dernière.

L'usure générale est souvent interprétée comme étant moins discriminante que les caractéristiques acquises. La forme spécifique de l'usure générale ainsi que l'interaction de l'usure avec les éléments du motif, si bien visible sur la trace, peuvent également être hautement signalétiques (Girod *et al.*, 2008). L'usure générale peut majoritairement être décrite comme conséquence linéaire du frottement entre la matière constituant la semelle et la surface sur laquelle s'effectue la démarche. De leur côté, les caractéristiques acquises semblent plus complexes dans leurs mécanismes d'acquisition.

La présente contribution se focalisera sur les caractéristiques acquises et non pas sur l'usure générale des semelles.

L'utopie de la banque de données idéale

Un outil important pour apprécier le poids des caractéristiques observées est l'accès à des données empiriques et structurées. L'objectif est d'utiliser la fréquence relative d'occurrence d'une observation parmi un nombre élevé de données indépendantes et pertinentes afin d'en estimer la rareté relative (Aitken *et al.*, 2021).

En matière de traces de semelles, une banque de données empiriques idéale contiendrait alors une quantité de données importante pour chaque type de semelle, pour chaque pointure, ayant divers degrés d'usure et une annotation complète des caractéristiques acquises, en offrant, en outre, une possibilité de sélection de la population pertinente (selon le dessin général par exemple) pour le cas en question.

Une telle banque de données est cependant inexistante et irréaliste. Il est difficile de compiler et de structurer ces données pour chaque type de semelle ; d'autant plus que le marché des chaussures et des semelles est en perpétuelle évolution et que l'annotation des caractéristiques acquises est laborieuse.

L'utilité des banques de données existantes pour l'évaluation des caractéristiques acquises est donc modeste en raison des limitations qui les caractérisent, notamment en termes de taille d'échantillons et des dessins généraux investigués. Toutefois, elles peuvent venir à l'appui du ou de la spécialiste et participer à une appréciation de probabilités épistémiques comme le décrit Pasquier (2018) :

« [...] une probabilité n'est pas nécessairement issue de données statistiques parfaites. Elle peut être épistémique, c'est-à-dire basée sur les connaissances de celui qui l'évalue. C'est donc bien dans ce sens que nous entendons utiliser la banque de données dans l'évaluation de la force indiciaire : en tant que source de connaissances permettant à l'examineur, lors de l'évaluation du résultat des comparaisons entre une trace et une chaussure de référence, de se forger une opinion quant à la rareté du motif en question. » (Pasquier, 2018, p. 158)

Cette description se réfère à l'utilisation de l'élément de motif, mais reste tout à fait applicable à d'autres types d'observations, notamment les caractéristiques acquises.

Les bases de données actuelles sont limitées dans leur taille et ne contiennent souvent qu'un seul exemple par type/modèle de chaussure (Rida *et al.*, 2019), ce qui rend leur utilisation difficile dans un but d'une évaluation probabiliste. Les banques de données existantes concernent surtout des systèmes rattachés à des services de police (Pasquier, 2018). Ces banques de données sont adaptées aux besoins spécifiques des services en question, difficilement comparables et se basent majoritairement sur des systèmes de classification du dessin général (Pasquier, 2018). Malgré leur utilité indiscutable au sein des polices, elles ne contiennent pas des données structurées relatives aux caractéristiques acquises.

Le cadre général de l'interprétation des comparaisons entre traces et empreintes de semelles

Le rapport du *National Research Council* (2009) a relevé la nécessité d'un progrès drastique en science forensique afin de pouvoir garantir la solidité scientifique des disciplines. Par la suite, pour le domaine des traces de semelles, le rapport du PCAST (2016) a constaté une absence criante d'études empiriques. Actuellement, le processus complet de l'analyse et de comparaison des traces de semelles se base sur l'appréciation subjective des personnes conduisant l'expertise sans pour autant se baser sur des données concrètes et démontrables (PCAST, 2016). En se référant à l'argument de l'expérience des examinateurs-trices comme base scientifique, le rapport indique qu'il est extrêmement problématique qu'une analyste se fie uniquement à sa mémoire expérientielle pour déterminer la rareté d'une caractéristique.

La façon traditionnelle de rendre des résultats dans le domaine des traces de semelles consiste à juger si les correspondances ou différences observées sont assez significatives pour en conclure l'individualisation ou non de la source. Pour les traces de semelles (et plus généralement pour les traces dont l'évaluation se base sur une comparaison visuelle), la conclusion finale de cette approche reste très largement, voire même entièrement, liée à l'avis de l'expert et ne se base ni sur des sources statistiques concrètes ni sur un modèle de probabilités (Stern, 2017).

Afin de savoir quels types de données sont nécessaires pour créer et solidifier les bases scientifiques en matière des traces de semelles, il convient de partir du cadre interprétatif solide et reconnu.

En 1998, Evett *et al.* ont présenté un cadre général basé sur le rapport de vraisemblance pour l'interprétation concernant les traces de semelles qui suit un canevas d'interprétation reconnu et aujourd'hui admis dans tous les cercles forensiques. Son grand avantage est qu'il respecte les lois de probabilités (Biedermann et Taroni, 2006). Le but est d'assigner le poids accordé aux observations faites de façon structurée en considérant les hypothèses pertinentes en question (Stern, 2017). L'utilisation du rapport de vraisemblance a été recommandée par l'ENFSI, le réseau européen des instituts forensiques (*European Network of Forensic Science Institutes*) (Willis *et al.*, 2015), par l'institut national de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande pour les sciences forensiques (*National Institute of Forensic Science Australia and New Zealand*, 2017) et, plus récemment, par le régulateur en charge des sciences forensiques en Angleterre et Pays de Galles (*The Forensic Science Regulator in partnership with the Chartered Society of Forensic Sciences and the Royal Statistical Society*, 2021).

Pour l'évaluation des résultats d'une comparaison entre une trace de semelle et une référence (semelle), le raisonnement s'articule autour de deux questions principales (Girod *et al.*, 2008) :

1. Quelle est la probabilité de retrouver les caractéristiques observées sur la trace si la chaussure est à la source de la trace ?
2. Quelle est la probabilité de retrouver les caractéristiques observées sur la trace si une autre chaussure inconnue est à la source de la trace ?

Les caractéristiques dont il est question ici peuvent être de nature diverse. Typiquement, une différenciation entre les caractéristiques de fabrication et les caractéristiques relevant de l'utilisation des chaussures, notamment l'usure générale et les caractéristiques acquises, est effectuée (Girod *et al.*, 2008).

La première question invite à prendre en compte la *reproductibilité* des caractéristiques en fonction de facteurs spécifiques au cas comme le temps de port de la semelle en question entre le dépôt de la trace et sa saisie, la nature de la surface portant la trace et celle du résidu déposé, la manière avec laquelle la trace a été déposée pouvant dépendre des lieux, des circonstances et finalement la personne portant les chaussures. Ce seront des études propres à mesurer et apprécier la reproductibilité au plus près des circonstances spécifiques du cas en examen qui permettront aux spécialistes d'apprécier cette première probabilité. Le nombre d'études permettant d'évaluer la reproductibilité est encore limité comme nous le verrons plus bas. Notamment, les phénomènes d'acquisition et de disparition des caractéristiques en fonction du port des semelles et de l'usure sont peu documentés. Leur appréciation est laissée aujourd'hui au jugement informé des spécialistes.

La seconde question s'attèle à la question d'une potentielle coïncidence fortuite entre les caractéristiques observées sur la trace et une autre semelle inconnue. C'est donc sous le prisme de la *sélectivité* des caractéristiques qu'il faut aborder cette seconde question. Dans ce contexte, les études détaillées plus bas sont plus nombreuses, mais ne répondent que partiellement, à tout le moins pour ce qui est des caractéristiques acquises, à la question posée.

En général, une indépendance entre les caractéristiques de fabrication et les caractéristiques acquises est postulée, ce qui permet simplement de multiplier les probabilités sans autre conditionnement. Par contre, cette hypothèse d'indépendance n'est pas soutenue par les observations empiriques, s'avère être plutôt une simplification de la réalité, et peut conduire à des surestimations drastiques du poids accordé aux observations.

Dans l'article de Evett *et al.* (1998) il a été illustré comment procéder à l'évaluation des observations sans devoir supposer l'indépendance entre plusieurs composantes. Le même principe de procéder est également discuté dans l'article de Skerrett *et al.* (2011) ainsi que dans le livre de Girod *et al.* (2008). Il s'agit principalement de tenir compte des observations faites pour un premier niveau de généralité (le motif par exemple) dans l'évaluation des observations faites pour un deuxième niveau (les caractéristiques acquises par exemple). Cette approche conditionnée invite à exploiter la 3^e loi des probabilités pour des événements dépendants et est décrite plus en détail dans le livre de Aitken *et al.* (2021, p. 86–87).

Dans la section suivante, la focalisation sera faite sur l'évaluation des caractéristiques acquises. Elle montrera que le corpus de connaissances permettant pleinement et sans hypothèses sous-jacentes injustifiées d'apprécier les deux questions génériques de l'interprétation est encore relativement limité.

L'évaluation des caractéristiques acquises

La littérature actuelle présente plusieurs façons d'approcher l'évaluation du poids à accorder aux caractéristiques acquises. La plus simple est de procéder de façon purement théorique et en supposant qu'elles sont indépendantes et complètement aléatoires. Une caractéristique acquise aura donc la même probabilité de se retrouver à n'importe quel endroit de la semelle, dans n'importe quelle orientation. L'évaluation finale de la rareté des caractéristiques acquises se réduit ainsi à un modèle purement mathématique basé sur une hypothèse d'indépendance. Un exemple pour un tel modèle a été donné par Stone (2006). Les nombreuses hypothèses qui sous-tendent au modèle n'ont jamais été convenablement justifiées. L'application aveugle du modèle conduit à des probabilités purement théoriques sans aucune applicabilité réelle ; une limite qui a également été relevée dans le rapport du PCAST (2016).

D'autres publications restent descriptives et laissent la question de l'appréciation des observations, et en particulier des caractéristiques acquises, à la libre appréciation des spécialistes. Bodziak (2017), mentionne par exemple la multitude de facteurs qui sont à considérer et décrit entre autres l'échelle des conclusions proposées par SWGTREAD (2013a). Il ne décrit pourtant pas réellement l'évaluation elle-même. En effet, tant Bodziak (2017) que SWGTREAD (2013a) décrivent que la conclusion issue d'une comparaison, en particulier une identification, se base sur la question de savoir si les caractéristiques observées sont *suffisantes* en qualité et quantité pour aboutir à la conclusion proposée. Cependant, il n'est jamais décrit en quoi constituent les critères concrets pour que les observations soient qualifiées de « *suffisantes* ».

Une autre approche a été adoptée par le NFI (*Netherlands Forensic Institute*) au travers d'un guide d'évaluation⁴. Ce dernier est principalement basé sur l'expérience et l'appréciation personnelle des expert-es (Keereweer, 2000). Le guide utilise un système de classification des caractéristiques acquises en fonction de leur degré de complexité et part d'une distribution uniforme concernant la localisation. Certaines contradictions logiques ont été relevées par Sjerps et Keereweer (2001) et une adaptation du guide a été proposée qui exploite un modèle basé sur la simple multiplication des valeurs de chaque caractéristique jugée indépendantes pour guider l'évaluation. Le guide a été jugé utile à des fins de formation ainsi que pour l'harmonisation du processus (Sjerps et Keereweer, 2001). Cependant, l'estimation de la rareté des caractéristiques n'a pas été basée sur des données empiriques effectives et le modèle associé à la combinaison de plusieurs caractéristiques est analogue au modèle tant disputé de Stone (2006).

Plus récemment, des études visant à l'établissement de larges bases de données de caractéristiques acquises ont été publiées. Cet effort donne lieu au développement de modèles d'interprétation

⁴ Le guide est disponible en annexe de l'article de Keereweer (2000). Sjerps et Keereweer (2001) proposent une version adaptée à une interprétation probabiliste.

qui se basent, au moins en partie, sur des données empiriques et permet de vérifier les hypothèses sous-jacentes souvent invoquées. Ainsi Yekutieli *et al.* (2016) ont établi un système d'enregistrement semi-automatique de caractéristiques acquises et ont constitué une base de données conséquente. Cette dernière a par la suite été élargie pour contenir plus de 33'000 caractéristiques acquises (Wiesner *et al.*, 2020). Sur la base de l'hypothèse que les trois attributs des caractéristiques acquises (localisation, orientation et forme) sont indépendants, un modèle statistique a été développé qui calcule automatiquement la probabilité de correspondance fortuite entre deux caractéristiques (Yekutieli *et al.*, 2016). Pour tenir compte de l'influence du dessin général, les données de la localisation ont été normalisées en utilisant pour chaque semelle les zones effectives de contact avec le sol (Wiesner *et al.*, 2020; Yekutieli *et al.*, 2016). Les données collectées ont permis d'obtenir plus d'informations concernant la distribution des caractéristiques acquises par rapport à leur localisation, leur orientation et leur forme. Toutefois, le modèle reste basé sur l'hypothèse d'indépendance des attributs comme Stone (2006). L'approche consistant à multiplier les poids attribués à la position, l'orientation et la forme n'est pourtant pas soutenue par la littérature actuelle. Au contraire même, l'étude de Kaplan Damary *et al.* (2018) a montré que les différents aspects ne sont pas indépendants et que le dessin général des semelles exerce également une influence sur les caractéristiques acquises.

Spencer et Murray (2020) ont montré que l'incorporation des dépendances, par exemple en utilisant des variables corrélées et en les intégrant dans un modèle hiérarchique bayésien, permet d'améliorer le modèle utilisé.

Une option pour contourner la question des dépendances est de procéder de façon plus holistique, en considérant les observations comme étant un tout. Ce principe est appliqué par le groupe de recherche de Speir *et al.* (2016).

Dans leur étude, une base de données de plus de 57'000 caractéristiques acquises observées sur plus de 1000 semelles a été établie (Speir *et al.*, 2016). Cette dernière a ensuite été élargie pour compter plus de 72'000 caractéristiques acquises de 1300 semelles, contenant des informations concernant la localisation et la forme des caractéristiques acquises (Speir, 2018). En utilisant les données cumulées pour un endroit donné, cette base de données permet d'estimer la probabilité de co-occurrence de caractéristiques acquises (sans tenir compte de leur forme) à un endroit donné (dans une zone de 5 mm x 5 mm) sans devoir postuler une distribution sous-jacente (Speir *et al.*, 2016). Leur base de données donne également la possibilité d'estimer la probabilité d'une co-occurrence de caractéristiques acquises à un endroit donné qui appartiennent en plus à la même catégorie de forme (Speir *et al.*, 2016). Cette façon de procéder respecte les possibles dépendances entre la localisation et la forme en conditionnant la forme par la localisation.

Dans une publication subséquente, l'information concernant la surface de contact de la semelle avec le sol a été intégrée (Richetelli *et al.*, 2019). Ainsi, il est possible d'obtenir des informations plus précises sur la rareté d'apparition des caractéristiques acquises à un endroit spécifique d'une semelle. En appliquant un filtrage des données, seules les semelles qui, à cet endroit, entrent effectivement en contact avec le sol sont prises en compte. (Richetelli *et al.*, 2019). Finalement, une méthode numérique permettant de mesurer la similarité/dissimilarité de la forme de deux caractéristiques acquises a été développée (Richetelli *et al.*, 2017; Speir, 2018). Pour définir la limite

entre des formes qui sont considérées comme « différenciables » et « non-différenciables », des données provenant de comparaisons visuelles, physiques ont été utilisées (Richetelli *et al.*, 2019). Cela a permis de calculer la probabilité de co-occurrence en position pour laquelle les caractéristiques en question sont considérées comme étant non-différenciables (Richetelli *et al.*, 2019).

Cependant, comme mentionné dans l'article, la base de données n'est pas une collection quantitative de caractéristiques indépendantes et il n'est donc pas possible de multiplier les événements entre eux pour en extrapoler des informations sur un jeu de caractéristiques acquises (Speir *et al.*, 2016).

Dans une publication plus récente, Smale et Speir (2023) ont étudié la fréquence générale de correspondance fortuite (*random match frequency*, RMF, en anglais) de caractéristiques acquises dans la base de données établie par Richetelli *et al.* (2019). Il a été constaté que seulement 32% des chaussures étudiées n'ont eu aucune correspondance fortuite d'au moins une caractéristique acquise avec une autre chaussure dans la base de données⁵ (Smale et Speir, 2023). Le critère de correspondance répond ici au critère d'indistinguabilité établie par Richetelli *et al.* (2019) qui concerne tant la géométrie que la localisation de la caractéristique en question. Des comparaisons de paires de semelles⁶ ont montré une fréquence de correspondance fortuite d'au moins une caractéristique acquise de 0.2% (Smale et Speir, 2023). Cette étude permet ainsi de confirmer tout d'abord que des correspondances fortuites de caractéristiques acquises peuvent avoir lieu. En outre, elle donne une première appréciation de l'ordre de grandeur de la fréquence de correspondance fortuite de caractéristiques acquises sur des semelles qui peut généralement être attendue sur des données composées de références de bonne qualité (Smale et Speir, 2023). Par contre, leurs données ne permettent pas encore d'avoir des informations plus précises sur la probabilité de correspondance fortuite pour une combinaison de caractéristiques acquises.

Il est à noter que, les publications étudiant les caractéristiques acquises s'appuient très majoritairement du matériel sous forme de références (typiquement des standards encrés). Ce matériel est de qualité considérablement supérieure aux traces rencontrées dans des cas réels. Ainsi, l'applicabilité des résultats en pratique doit être considérée avec prudence. Typiquement, des caractéristiques considérées comme différenciables lors des études sur des références ne le seront potentiellement plus si la comparaison se base sur du matériel de qualité plus proche des traces.

L'approche concernant l'automatisation complète du processus de comparaison et d'évaluation, utilisant notamment des algorithmes de comparaison d'images donnant des scores comme résultats, ne sera pas discutée en détail ici. Des informations concernant les systèmes existants de comparaison et d'« identification » automatique de traces et références de semelles sont disponibles dans Rida *et al.* (2019). En outre, comme le mentionne Pasquier (2018), aucun outil automatique n'est actuellement implémenté en pratique, à l'exception de la Chine et de Londres. Les algorithmes comme ceux proposés par Park et Carriquiry (2020, 2021, 2022), Venkatasubramanian *et al.* (2021) et Wang *et al.* (2019) sont prometteurs, mais, actuellement, ils ne sont pas encore assez performants pour permettre

⁵ Il s'agit ici de comparaisons d'une semelle avec toute la base de données, donc 1 vs 1299.

⁶ Il s'agit ici de comparaisons directes, 1 vs 1.

l'utilisation directe comme outil d'évaluation. Malheureusement, les recherches qui s'intéressent au développement d'algorithmes en science forensique ne considèrent que rarement les questions d'implémentation (Pasquier, 2023; Swofford et Champod, 2021).

Facteurs ayant une influence sur l'occurrence et la reproductibilité des caractéristiques acquises

Sachant qu'il est important de connaître et si possible tenir compte des divers facteurs ayant une influence sur l'occurrence et la reproductibilité des caractéristiques acquises, nous poursuivons sur ce thème en référence à la littérature scientifique à disposition. Les différents facteurs sont regroupés selon trois catégories : les aspects intrinsèques à la semelle, l'influence de la personne portant la chaussure et le passage de la semelle à la trace.

La semelle

Le matériel constituant la semelle

En 1998, Evett et ses collègues ont postulé que le matériel constituant la semelle pouvait avoir une influence sur les caractéristiques acquises. Typiquement, ils indiquent que la présence de caractéristiques acquises doit être mise en relation avec la dureté de la semelle et l'aptitude du matériel à présenter des entailles (Evett *et al.*, 1998). Il serait donc plus probable d'observer une forte usure pour des semelles molles que pour des semelles plus dures. En 2016, Kim, a étudié l'usure des semelles en lien avec leurs propriétés de résistance au glissement. Dans cet article, il conclut que l'usure générale de la semelle, la vitesse d'apparition ainsi que la façon de former des fissures et ruptures dans la semelle suite à l'usure sont largement influencées par le matériel constituant la semelle et surtout par sa dureté (Kim, 2016). Même au sein d'une semelle, si le matériel la constituant n'est pas homogène, alors l'usure peut faire ressortir ces différences sous forme de caractéristiques particulières en lien avec la composition et dureté de la matrice à cet endroit (LeMay, 2013). Il a également été constaté que certains types de matériaux constitutifs des semelles peuvent reproduire temporairement des caractéristiques de la surface avec laquelle la semelle rentre en contact (Bily et Mathias, 2017).

Le matériel constituant la semelle influence le type et la forme des caractéristiques acquises. Notamment, la formation des caractéristiques de type Schallamach dépend de la rigidité de l'élastomère composant la semelle (Stauffer, 2000). Les caractéristiques de type Schallamach (parfois appelé *feathering* ou *abrasion pattern* en anglais) sont des abrasions qui se manifestent sous forme de fines distorsions ondulatoires sur des zones plutôt plates de la semelle (Hunter, 2013; Schallamach, 1953, 1958; Tart *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2021). Une semelle constituée de matériaux résistants est, par exemple, moins susceptible de montrer des caractéristiques de Schallamach que des semelles plutôt « molles » comme le caoutchouc naturel (Kaplan Damary *et al.*, 2018).

Le dessin général de la semelle

Le dessin général de la semelle, soit les éléments du motif de la semelle et leur agencement particulier⁷, détermine en grande partie les zones de la semelle qui vont rentrer effectivement en contact avec le sol. Vu que les caractéristiques acquises résultent généralement des forces exercées sur le matériel suite au contact avec le sol, il est évident que le dessin général conditionne l'apparition des caractéristiques acquises dans une certaine mesure. Plusieurs études empiriques ont permis de mettre en évidence la dépendance entre le dessin général de la semelle et les caractéristiques acquises (Kaplan Damary *et al.*, 2018; Reymond, 2010; Spencer et Murray, 2020). L'évaluation du poids à accorder à l'observation de caractéristiques acquises lors d'une comparaison devrait donc être conditionnée par le dessin général de la semelle (Evett *et al.*, 1998; Girod *et al.*, 2008).

Pour prendre en compte le dessin général, il est possible de considérer des zones de la semelle qui rentrent en contact avec le sol, comme proposé par Yekutieli *et al.* (2016) et étudié dans Spencer et Murray (2020), ou implémenté similairement par Richetelli *et al.* (2019) et Richetelli et Speir (2022). Il reste toutefois à déterminer si cette méthode permet d'apprécier toute l'influence du dessin général sur les caractéristiques acquises ou s'il y a encore d'autres facteurs liés au dessin général qui devraient être pris en compte.

Les éléments de motif

À notre connaissance, aucune étude ne s'est spécifiquement intéressée à l'éventuelle influence des éléments de motif constituant le dessin général sur l'occurrence et la distribution des caractéristiques acquises sur ces éléments (p. ex. l'effet d'avoir des éléments de motifs arrondis, angulaires ou alors des éléments en forme de lignes fines en zigzag).

Dans l'étude de Kaplan Damary *et al.* (2018), l'hypothèse a été émise que des rayures et coupures ont tendance à apparaître plutôt sur des éléments de motifs de large surface. Cette hypothèse n'a toutefois pas été étudiée plus en détail. Concernant les caractéristiques de type Schallamach, il a été noté que des éléments de motifs en forme de crampons se comportent parfois différemment et présentent des stries grossières aux bords qui peuvent être dans une autre direction qu'habituellement observées pour les caractéristiques de Schallamach (Davis et Keeley, 2000).

La largeur des lignes en creux entre les éléments de motif peut également avoir une influence, comme par exemple sur la probabilité que des pierres (ou d'autres objets étrangers) soient prises dans la semelle (Liu *et al.*, 2019).

La présence et l'emplacement de la texture du profil de la semelle ont été mentionnés par (Bodziak, 2017) comme ayant une influence sur l'usure de la semelle. Il reste à éclaircir si cette influence se limite à l'usure générale de la semelle ou si elle concerne également l'occurrence et les spécificités morphologiques des caractéristiques acquises.

⁷ Le dessin général est différencié du motif. Le motif décrit l'apparence générale de la semelle. Ainsi, des semelles présentant des formes et agencements comparables, mais légèrement différents ont un dessin général différent, mais seront classées sous le même motif.

La taille/pointure de la semelle

Par rapport à la taille, et par extension la pointure des semelles, peu de mentions ont été retrouvées dans la littérature quant à son effet sur les caractéristiques acquises. Afin de pouvoir combiner des informations provenant de chaussures de tailles différentes, les données sont souvent normalisées sur une taille de référence avant d'être exploitées dans une base de données (Liu *et al.*, 2019; Speir *et al.*, 2016; Yekutieli *et al.*, 2016).

L'usure générale de la semelle

Par définition, l'usure générale comme les caractéristiques acquises sont consécutives au port de la chaussure. Ainsi, les mécanismes et facteurs qui influencent l'érosion et donc l'usure de la semelle ont également une certaine influence sur les caractéristiques acquises (par exemple la façon de marcher, le substrat foulé et le matériau constituant la semelle). L'étude de Toso (1997) a montré que les semelles ont tendance à acquérir plus de caractéristiques acquises que d'en perdre. Mais, l'avancement de l'usure générale peut effectivement aussi provoquer la disparition de caractéristiques acquises qui étaient préalablement visibles (Davis et DeHaan, 1977; Sheets *et al.*, 2013; Toso, 1997; Wyatt *et al.*, 2005). Selon Toso (1997), ce taux de disparition est dépendant de la taille de la caractéristique en question. Les caractéristiques acquises de petite taille ont plus tendance à s'effacer de nouveau avec l'avancement de l'usure générale que les caractéristiques de grande taille (Toso, 1997). De plus, lors de l'usure de la semelle, les caractéristiques acquises déjà existantes subissent une altération (par exemple une diminution de la longueur de la caractéristique ou l'expansion voire même un lissage des bords d'une coupure) (Liu *et al.*, 2020). L'avancement de l'usure générale peut aussi mener à la création de caractéristiques acquises, comme par exemple des arrachements de matière, des déchirures, ou des caractéristiques de Schallamach (Bodziak, 2017; Girod *et al.*, 2008). Finalement, une étude plus récente a montré que la distribution spatiale des caractéristiques acquises s'explique mieux en tenant compte de la distribution de l'usure de la semelle en plus des zones de contact de la semelle avec le sol que si uniquement les zones de contact sont considérées (Richetelli et Speir, 2022).

La personne portant les chaussures

La personne portant les chaussures a une influence sur l'érosion et l'usure progressive de la semelle, ainsi que sur la trace elle-même lors de la déposition de cette dernière. Bodziak (2017) mentionne que des variables génétiques et physiques (comme la morphologie des pieds, le poids, la flexibilité et des effets de blessures ou de pathologies), l'occupation (professionnelle ou autre) et les activités qui sont exercées en portant les chaussures contribuent à leur façon à l'usure de la semelle (Bodziak, 2017). Dans une étude de Kaplan-Damary *et al.* (2020), la distribution non-uniforme des caractéristiques acquises a été mise en relation avec la morphologie des pieds et les points de pression sur une semelle. La répartition de la pression plantaire de la personne qui porte les chaussures et le contact de la semelle au sol ont également été indiqués par Liu *et al.* (2019) comme ayant une influence sur les objets retenus dans la semelle.

La trace

La qualité de la trace est primordiale pour sa comparaison avec une référence. Comme mentionné dans le livre de Bodziak (2017), si les caractéristiques acquises ne sont pas suffisamment lisibles, le poids accordé à leur potentielle association avec une semelle doit être réduit en conséquence. Shor *et al.* (2018) mentionnent la surface, la dynamique lors de la déposition de la trace et la ou les matériaux qui constituent et/ou contaminent la trace comme variables influençant l'apparence de la trace et des caractéristiques acquises. Typiquement, pour des traces dont la matrice est du sang, une étude sur la reproductibilité des caractéristiques acquises démontre que la matrice a une influence non négligeable sur la visibilité des caractéristiques et que la variabilité observée d'une trace à l'autre est grande (den Harder, 2019). Concernant toujours les traces de semelles sanglantes, l'étude de McElhone *et al.* (2016) confirme une influence du type de sang, du temps de séchage et de la profondeur du profil de la semelle sur les caractéristiques de la trace. Finalement, les méthodes de détection, de renforcement et de prélèvement influencent également la trace et les caractéristiques qui y sont visibles.

Richetelli *et al.* (2017) ont étudié la différence entre les caractéristiques acquises visibles sur des références de haute qualité et des impressions qui se rapprochent de la qualité des traces retrouvées sur une scène. Même dans ces conditions encore très favorables, il y a déjà une variabilité considérable et une perte de visibilité des caractéristiques acquises allant de 33 à 100% (avec une moyenne de 85%). Une autre étude comparant les caractéristiques acquises sur des standards encrés avec des traces poussiéreuses a constaté une reproductibilité encore plus faible des caractéristiques acquises allant de 0% à environ 76% (Vaucher, 2022). Finalement, Vaucher (2022) montre que les caractéristiques acquises étaient généralement mieux reproduites (en termes de quantité et qualité) sur le premier pas pour une série de trois pas consécutives.

Les attributs des caractéristiques acquises et leur sélectivité

Les variables qui ont une influence sur les caractéristiques acquises ne sont pas qu'extrinsèques. Les caractéristiques acquises sont souvent décrites par trois différents attributs : la position, l'orientation/l'angle et la forme⁸. Ces attributs sont toutefois potentiellement dépendants.

L'influence des attributs des caractéristiques acquises

Plusieurs études se sont intéressées à l'analyse de la distribution spatiale (la position/localisation) des caractéristiques acquises. Cependant, leurs résultats divergent parfois fortement. Chaubert (1998) a décrit la répartition spatiale (position) des caractéristiques acquises détectées sur certains éléments de motifs (analysée de façon locale et non pas globale) comme étant aléatoire selon son appréciation visuelle de la distribution des caractéristiques. Reymond (2010) a également constaté une distribution spatiale aléatoire des caractéristiques acquises selon une division de la semelle en quatre quadrants. Une autre étude à plus grande échelle décrit la distribution globale par rapport à la position des caractéristiques acquises comme

⁸ La description de la forme se limite souvent à la représentation en 2D des caractéristiques comme observées sur une empreinte de référence.

étant « approximativement uniforme » si les zones de contact de la semelle avec le sol sont prises en compte (Wiesner *et al.*, 2020). En contraste à ces résultats, plusieurs études décrivent la localisation (position) des caractéristiques acquises sur la semelle comme étant non-uniforme (notamment : Davis et DeHaan, 1977; Kaplan-Damary *et al.*, 2020, 2022; Monico, 2005; Richetelli *et al.*, 2019; Richetelli et Speir, 2022; Speir *et al.*, 2016; Toso, 1997). Il est intéressant à noter que les recherches de Kaplan-Damary *et al.* (2020, 2022) ont permis de préciser voire même de réfuter les résultats de Wiesner *et al.* (2020) sur la base des mêmes données. Cela illustre l'importance d'une analyse statistique solide. La recherche de Richetelli et Speir (2022) s'est particulièrement intéressée à la fréquence spatiale de l'occurrence des caractéristiques acquises et la modélisation de cette dernière. Elles ont constaté que les zones de contact et le degré d'usure correspondant expliquent une grande partie de la distribution spatiale des caractéristiques acquises (Richetelli et Speir, 2022). Kaplan-Damary *et al.* (2022) ont émis comme hypothèse que la distribution non-uniforme des caractéristiques acquises pourrait être liée aux points de pression relatifs à la morphologie du pied.

Peu d'études ont évalué l'orientation (angle par rapport à l'axe de la semelle ou de la marche) des caractéristiques acquises. Les recherches de Chaubert (1998) et de Wiesner *et al.* (2020) font état d'une distribution uniforme de l'orientation des caractéristiques acquises tandis que l'étude de Reymond (2010) indique que chaque angle n'a pas le même pouvoir discriminant avec une prédominance dans l'axe du sens de marche.

La caractérisation de la forme d'une caractéristique est difficile et peut, selon l'approche choisie, inclure diverses mesures comme la taille, la circularité, le contour ou l'aire de la caractéristique. Généralement, la communauté forensique part du principe que plus une caractéristique acquise est jugée « complexe », plus elle est rare (Bodziak, 2017; Keereweer, 2000; Meester *et al.*, 2004). Toutefois les facteurs permettant la distinction entre caractéristiques « simples » et « complexes » sont peu explicités.

Le guideline du NFI discuté par Keereweer (2000), distingue les caractéristiques acquises en fonction du « nombre de composants ». Il classe les caractéristiques en trois niveaux de valeur : haute (H), moyenne (M) et faible (L), avec deux sous-groupes par classe. Ainsi, une caractéristique est, par exemple, catégorisée comme ayant une très haute valeur (catégorie H1), si elle contient au moins six composants et mesure au total au minimum 7 mm. À l'inverse, une caractéristique L2 est une caractéristique présentant un seul composant (une ligne ou un cercle de maximum 2 mm) et correspond à la catégorie la moins discriminante.

Ce guideline, ainsi que sa version améliorée discutée par Sjerps et Keereweer (2001), propose une approche pragmatique pour la classification des caractéristiques acquises, et il leur attribue une certaine rareté en fonction de cette classification. Toutefois, il est essentiel de noter que ces valeurs et l'évaluation proposée ne se basent pas sur des études empiriques, mais résultent d'un consensus fondé sur l'appréciation collective des experts du NFI.

Plusieurs études ont analysé la taille voire la longueur et/ou l'aire des caractéristiques. Elles ont documenté que les caractéristiques de grande taille sont effectivement plus rares que celles de petite taille (Chaubert, 1998; Monico, 2005; Reymond, 2010; Wiesner *et al.*, 2020). Pour les études qui évaluent la forme, les résultats montrent systématiquement des raretés différentes en fonction

de la définition des catégories retenues (Davis et DeHaan, 1977; Kaplan Damary *et al.*, 2018; Monico, 2005; Richetelli *et al.*, 2019; Speir, 2018; Speir *et al.*, 2016).

Les dépendances entre les attributs d'une caractéristique acquise

Dans la majorité de la littérature qui procède à une analyse en fonction des attributs d'une caractéristique acquise (typiquement position, orientation et forme), il est postulé que ces derniers sont indépendants les uns des autres (par exemple : Chaubert, 1998; Stone, 2006; Wiesner *et al.*, 2020; Yekutieli *et al.*, 2016), sans pour autant avoir pu vérifier cette hypothèse.

La seule étude à grande échelle sur les dépendances entre les différents attributs des caractéristiques acquises est celle de Kaplan Damary *et al.* (2018). Pour cette étude, les caractéristiques acquises ont été divisées selon leur « type de forme » en utilisant des catégories. Une analyse statistique sur ces données a permis les observations suivantes (Kaplan Damary *et al.*, 2018) :

- Les caractéristiques acquises sont dépendantes entre elles – l'occurrence d'une caractéristique acquise spécifique a une influence sur l'occurrence d'une autre caractéristique acquise avec une configuration spécifique ;
- le type de forme des caractéristiques acquises est dépendant de leur localisation sur le motif de la semelle ;
- le type de forme d'une caractéristique acquise est dépendant de leur orientation ;
- l'orientation d'une caractéristique acquise est dépendante de leur localisation.

Cependant, il est à noter que les catégories des « types de forme » peuvent en elles-mêmes déjà présenter des biais en faveur des corrélations relevées plus haut. Par exemple, les caractéristiques correspondant à la catégorie des « coins d'éléments de motifs déchirés » ou « brèches » n'apparaissent que dans des zones présentant des éléments de motifs spécifiques. La dépendance du type de forme et la localisation des caractéristiques acquises pourrait donc également s'expliquer par une distribution non-uniforme des différents types d'éléments de motifs. De plus, la distribution concernant l'orientation de certains « types de forme », typiquement les caractéristiques de Schallmach, est par nature non-uniforme. En effet, les caractéristiques de Schallmach sont liées à un processus physique d'abrasion du caoutchouc créant des aspérités et crêtes perpendiculaires à la direction du frottement (Schallmach, 1953). Ainsi, pour éviter ces biais, une partie de l'étude de Kaplan Damary *et al.* (2018) a consisté à étudier uniquement les données sur les éraflures et les trous. Une indépendance entre le type de forme et la localisation, mais une dépendance entre le type de forme et l'orientation a été constatée (Kaplan Damary *et al.*, 2018). Finalement, une analyse de la taille de toutes les caractéristiques acquises a permis de constater une dépendance avec leur localisation, leur type de forme ainsi que leur orientation (Kaplan Damary *et al.*, 2018).

Dans une étude d'une échelle plus modeste, il avait déjà été trouvé que la position d'une caractéristique acquise soit indépendante de la longueur de la forme et de l'aire de cette dernière (Reymond, 2010). Cependant, les caractéristiques qui ont un angle proche de

l'axe longitudinal de la semelle ont été observées davantage vers l'intérieur de la semelle (Reymond, 2010). Les résultats suggèrent en outre que l'angle des caractéristiques reste en général indépendant de la circularité, de l'aire et de la longueur de cette dernière. Concernant la distribution de l'angle des caractéristiques, une étude à plus grande échelle a constaté une distribution uniforme sauf pour les caractéristiques très longues, qui, elles, apparaissent plus souvent dans l'axe longitudinal de la semelle (Wiesner *et al.*, 2020; Yekutieli *et al.*, 2016). Une autre étude basée sur les mêmes données empiriques a constaté que les caractéristiques acquises tendent à être plus longues dans la zone arrière et extérieure du talon ; possiblement dû à l'usure plus intense de cette zone (Kaplan-Damary *et al.*, 2022).

Finalement, comme le soulignent Wiesner *et al.* (2020), se référant à l'étude de Kaplan Damary *et al.* (2018), il est nécessaire d'effectuer des recherches pour comprendre les dépendances entre les caractéristiques acquises et la manière dont les spécialistes doivent les considérer dans leurs évaluations.

Évaluations des examinateurs-trices comme outil de validation du domaine

Une autre méthode de validation d'un domaine en science forensique et de l'approche utilisée est, comme suggéré par le comité PCAST (2016), d'évaluer le taux d'erreur des spécialistes qui effectuent les comparaisons en question. Si l'exactitude des conclusions rendues est mesurée ou contrôlée, cela fournit un indicateur de confiance solide pour le système judiciaire, justifiant l'utilisation de la méthode devant les tribunaux selon le comité PCAST (2016). Toutefois, dans le cas des traces de semelles, les recherches portant sur les performances des expert-es ou sur le processus conduisant aux conclusions sont encore rares.

En général, les études se concentrant sur l'évaluation des différences entre examinateurs constatent une variabilité significative, que ce soit de l'observation des caractéristiques, de l'évaluation de leur importance ou de la conclusion finale de la comparaison. (Hicklin *et al.*, 2022; Majamaa et Ytti, 1996; Raymond et Sheldon, 2015; Shor et Weisner, 1999; Speir *et al.*, 2020). Seule une étude, celle de Hammer *et al.* (2013), a trouvé peu de différences entre les spécialistes. Cependant, il s'agit d'une étude sur les conclusions d'expert-es basées sur du matériel indiquant les caractéristiques qui sont à prendre en compte. Une autre recherche, axée sur la variabilité des comparaisons interpersonnelles au sein d'un service de police suisse, a révélé que les conclusions des expert-es étaient généralement concordantes. Néanmoins, pour certains cas, de grandes différences ont été observées, surtout en ce qui concerne le dénombrement des caractéristiques acquises et l'assignation de leurs poids respectifs (Schmied, 2020).

Pour l'estimation des taux d'erreurs, l'équipe de Richetelli *et al.* (2020a) a défini elle-même quelles réponses pouvaient être considérées acceptables pour les différents cas en question soumis. Le consensus et la variation des réponses reçues ont été utilisés pour étudier la reproductibilité des examinateurs-trices. L'exactitude (dans le sens de *accuracy* en anglais) observée dans cette étude varie entre 55.7% et 97.1% avec une moyenne et une déviation standard de 82.8% \pm 11.9%. La reproductibilité observée pour les différents cas varie entre 51.01% et 97.33% avec une moyenne de 78.21% \pm 14.22%. Dans une publication subséquente (Richetelli *et al.*, 2020b), les résultats ont été mis en regard des trois possibles conclusions

usuelles du domaine (identification, exclusion et non concluant) pour permettre le calcul des taux d'erreurs. Un taux de faux positifs de 0.5% (2 sur 418) et un taux de faux négatifs d'environ 16% (30 sur 192) ont été rapportés.

Hicklin *et al.* (2022) ont également étudié l'exactitude et la fiabilité (*accuracy and reliability* en anglais) des expert-es en traces de semelles dans une étude à grande échelle comportant au total 6610 comparaisons effectuées par 84 personnes. Les taux d'erreurs observés étaient entre autres de 6.0% pour les faux négatifs et de 0.2% pour les faux positifs. Concernant la reproductibilité (ou cohérence entre examinateurs-trices), 44% des conclusions étaient reproduites et 70% des conclusions différaient au maximum d'un niveau dans l'échelle des conclusions proposées. Par rapport à la répétabilité (intra-variabilité), 60% des conclusions sont restées identiques et 79% des conclusions étaient cohérentes si une tolérance d'un niveau de conclusion est adoptée.

La fiabilité des taux d'erreurs obtenus dans ce type d'étude a été mise en question par Khan et Carriquiry (2023), qui soulignent le risque de sous-estimation systématique et significative. De surcroît, l'utilisation de matériel de très haute qualité dans ces recherches limite la pertinence des résultats pour des cas réels. Les travaux récents de Lin *et al.* (2022) et Reidy *et al.* (2022) ont contribué au développement de bases de données permettant d'accéder à des traces et références de qualité variable et dont l'origine est clairement établie, fournissant ainsi un matériel plus représentatif pour de futures études de performance.

Les études présentées ci-dessus confirment que les taux d'erreurs dans le domaine des traces de semelles sont non négligeables et qu'il existe des différences considérables entre les spécialistes. Ainsi, afin de pouvoir apprécier la validité d'une conclusion rendue, il est primordial de comprendre en profondeur la méthodologie appliquée et d'évaluer la solidité de celle-ci. Les efforts actuels visant à rendre le processus plus transparent, structuré et basé sur des données empiriques concrètes restent donc clairement d'actualité.

Conclusions

Pour résumer l'état actuel de la littérature sur les caractéristiques acquises des semelles, malgré le fait que des avancées non négligeables dans le domaine ont été faites, des lacunes importantes restent présentes.

Afin d'éviter certains biais et pour rediriger l'attention sur des questions d'intérêt forensique, nous avons abordé des notions terminologiques. Ainsi, trois aspects fondamentaux ont été discutés. Premièrement, l'unicité (présupposée) d'une caractéristique ne permet pas de soutenir les résultats d'une comparaison. Deuxièmement, les caractéristiques acquises des semelles ne sont pas aléatoires et ne présentent pas de distributions qui peuvent être décrites comme équiprobables ou uniformes. Et, troisièmement, il ne sera jamais possible d'avoir une banque de données idéale, permettant une appréciation simple, tant holistique qu'empirique, de la reproductibilité et la spécificité des caractéristiques acquises. Ainsi, une assignation du poids à accorder aux observations faites lors d'une comparaison dans le domaine des traces de semelles nécessitera toujours une appréciation à la lumière d'un modèle d'interprétation basé sur un rapport de vraisemblance, modèle que nous avons présenté.

Malgré le fait que le cadre général d'interprétation proposé tient compte de diverses possibles dépendances, en pratique, ces dernières sont généralement considérées comme négligeables. Cependant, surtout concernant l'appréciation de rareté de caractéristiques acquises, ce postulat d'indépendance s'avère de plus en plus sujet à remise en question. En effet, des études qui se sont focalisées sur la fréquence d'occurrence de caractéristiques acquises ont permis d'identifier de multiples possibles dépendances complexes avec différents facteurs extrinsèques et intrinsèques aux caractéristiques acquises.

Tandis que quelques études de grande ampleur ont permis d'avancer déjà considérablement le domaine, le besoin d'études supplémentaire reste capital. Cela concerne particulièrement l'appréciation de la rareté de multiples caractéristiques acquises simultanément et l'influence des caractéristiques de fabrication et l'usure générale de la semelle sur l'occurrence, la reproductibilité et la spécificité des caractéristiques acquises.

Confronté à ces limites actuelles, il est essentiel, de rester prudent pour éviter des surestimations, parfois drastiques, du pouvoir discriminant des observations. Ce risque est particulièrement accru dès qu'il s'agit d'apprécier plusieurs aspects différents d'une trace de semelle, notamment l'appréciation conjointe des caractéristiques de fabrication et de caractéristiques acquises ou encore plus lors de l'appréciation de la rareté de plusieurs caractéristiques acquises considérées conjointement. En pratique, ces problématiques sont souvent abordées en ignorant les possibles dépendances, typiquement, en procédant par une simple multiplication de la rareté estimée pour les divers attributs. La problématique est particulièrement saillante pour la multiplication de la rareté estimée de plusieurs caractéristiques acquises, atteignant rapidement des fréquences d'apparition conjointe qui sont astronomiquement petites, perdant toute solidité scientifique.

Ainsi, en attendant des connaissances plus affinées dans le cadre de l'établissement de modèles d'interprétation plus solides, nous préconisons de passer par une assignation modeste et holistique de la valeur associée à l'observation de toutes les caractéristiques acquises ensembles. L'objectif ici est d'éviter d'adopter ou de promouvoir des modèles dont les hypothèses sous-jacentes sont soit non démontrées, soit remises en question.

Références

- Adair, T. W., Lemay, J., McDonald, A., Shaw, R. et Tewes, R. (2007). The Mount Bierstadt Study: An Experiment in Unique Damage Formation in Footwear. *Journal of Forensic Identification*, 57(2), 199–205.
- Aitken, C. G. G., Taroni, F. et Bozza, S. (2021). *Statistics and the evaluation of evidence for forensic scientists* (Third edition). Chichester West Sussex UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119245438>
- Biedermann, A. et Taroni, F. (2006). Bayesian networks and probabilistic reasoning about scientific evidence when there is a lack of data. *Forensic Science International*, 157(2–3), 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.09.008>
- Bily, C. et Mathias, C. (2017). Ethylene Vinyl Acetate Outsoles and Acquired Characteristics. *Journal of Forensic Identification*, 67(4), 549–564.
- Bodziak, W. J. (2017). *Forensic Footwear Evidence*. Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19479>
- Champod, C. et Biedermann, A. (2023). Overview and Meaning of Identification/Individualization. Dans M. M. Houck (éd.), *Encyclopedia of Forensic Sciences* (Third Edition, vol. 4, p. 53–62). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823677-2.00152-5>
- Champod, C. et Evett, I. W. (2001). A Probabilistic Approach to Fingerprint Evidence. *Journal of Forensic Identification*, 51(2), 101–122.
- Chaubert, S. (1998). *Etude des caractéristiques accidentelles sur les traces de pas* [Séminaire de 4e année]. Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- Cole, S. A. (2009). Forensics without uniqueness, conclusions without individualization: the new epistemology of forensic identification. *Law, Probability and Risk*, 8(3), 233–255. <https://doi.org/10.1093/lpr/mgp016>
- Davis, R. J. et DeHaan, J. D. (1977). A Survey of Men's Footwear. *Journal of the Forensic Science Society*, 17(4), 271–285. [https://doi.org/10.1016/S0015-7368\(77\)71161-2](https://doi.org/10.1016/S0015-7368(77)71161-2)
- Davis, R. J. et Keeley, A. (2000). Feathering of footwear. *Science & Justice*, 40(4), 273–276. [https://doi.org/10.1016/S1355-0306\(00\)71997-6](https://doi.org/10.1016/S1355-0306(00)71997-6)
- den Harder, M. (2019). *Traces de semelles dans le sang : variations possibles pour une même source* [Travail de Master]. Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Evett, I. W., Lambert, J. A. et Buckleton, J. S. (1998). A Bayesian approach to interpreting footwear marks in forensic casework. *Science & Justice*, 38(4), 241–247. [https://doi.org/10.1016/S1355-0306\(98\)72118-5](https://doi.org/10.1016/S1355-0306(98)72118-5)
- Girod, A., Champod, C. et Ribaux, O. (2008). *Traces de souliers*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Hamburg, C. et Banks, R. (2010). *Evaluation of the random nature of acquired marks on footwear outsoles* [Présentation]. Impression and Pattern Evidence Symposium, Clearwater, FL. https://projects.nfstc.org/ipespresentations/Hamburg_random-acquired-marks.pdf
- Hammer, L. (2013). Footwear Marks. Dans J. A. Siegel, P. J. Saukko et M. M. Houck (éds.), *Encyclopedia of Forensic Sciences* (Second Edition, p. 37–42). Amsterdam: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00278-6>
- Hammer, L., Duffy, K., Fraser, J. et Daéid, N. N. (2013). A Study of the Variability in Footwear Impression Comparison Conclusions. *Journal of Forensic Identification*, 63(2), 205–218.
- Hicklin, R. A., McVicker, B. C., Parks, C., LeMay, J., Richetelli, N., Smith, M., Buscaglia, J., Perlman, R. S., Peters, E. M. et Eckenrode, B. A. (2022). Accuracy, reproducibility, and repeatability of forensic footwear examiner decisions. *Forensic Science International*, 339, 111418 (1–16). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111418>
- Hunter, J. (2013). *The Variation in Pattern Size of Dynamic Footwear Test Impressions as a Result of Four Impression Methods and the Development and Persistence of Schallamach Waves on Footwear Outsoles* [Master Thesis]. Centre for Forensic Science. University of Strathclyde, Glasgow.

- Kaplan Damary, N., Mandel, M., Wiesner, S., Yekutieli, Y., Shor, Y. et Spiegelman, C. (2018). Dependence among randomly acquired characteristics on shoeprints and their features. *Forensic Science International*, 283, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.11.038>
- Kaplan-Damary, N., Mandel, M., Yekutieli, Y., Shor, Y. et Wiesner, S. (2022). Location distribution of randomly acquired characteristics on a shoe sole. *Journal of Forensic Sciences*, 67(5), 1801–1809. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15091>
- Kaplan-Damary, N., Mandel, M., Yekutieli, Y., Wiesner, S. et Shor, Y. (2020). Spatial modeling of randomly acquired characteristics on outsoles with application to forensic shoeprint analysis. *arXiv: 1912.08272v2*, 1–33. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.08272>
- Keereweer, I. (2000). Guideline for Drawing Conclusions Regarding Shoeprint Examinations. *Information Bulletin for Shoeprint/Toolmark Examiners – Proceedings of the 3rd European SP/TM Conference*, 6(1), 47–62.
- Khan, K. et Carriquiry, A. L. (2023). Shining a Light on Forensic Black-Box Studies. *Statistics and Public Policy*, 10(1), 2216748 (1–11). <https://doi.org/10.1080/2330443X.2023.2216748>
- Kim, I.-J. (2016). Identifying shoe wear mechanisms and associated tribological characteristics: Importance for slip resistance evaluation. *Wear*, 360–361, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.020>
- LeMay, J. (2013). Accidental Characteristics in a Footwear Outsole Caused by Incomplete Blending of Fillers in the Outsole Rubber. *Journal of Forensic Identification*, 63(5), 525–530.
- Lin, E.-T., DeBat, T. et Speir, J. A. (2022). A simulated crime scene footwear impression database for teaching and research purposes. *Journal of Forensic Sciences*, 67(2), 726–734. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14933>
- Liu, L., Wang, W. et Luo, Y. (2019). Foreign object held in recessed areas of shoe outsole as an acquired characteristic in footwear examination: A preliminary study. *Forensic Science International*, 304, 109949 (1–10). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109949>
- Liu, L., Wu, J., Luo, Y. et Lin, S. (2020). Reproducibility of Artificial Cut on Heel Area of Rubber Outsole. *Journal of Forensic Sciences*, 65(1), 229–237. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14148>
- Majamaa, H. et Ytti, A. (1996). Survey of the conclusions drawn of similar footwear cases in various crime laboratories. *Forensic Science International*, 82(1), 109–120. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(96\)01972-X](https://doi.org/10.1016/0379-0738(96)01972-X)
- Margot, P. (2014). Traçologie: La trace, vecteur fondamental de la police scientifique. *Revue Internationale de Criminologie et de Police Technique et Scientifique*, 67(1), 72–97.
- McElhone, R. L., Meakin, G. E., French, J. C., Alexander, T. et Morgan, R. M. (2016). Simulating forensic casework scenarios in experimental studies: The generation of footwear marks in blood. *Forensic Science International*, 264, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.03.023>
- McLachlan, H. V. (1995). No two sets the same? Applying philosophy to the theory of fingerprints. *The Philosopher: Journal of the Philosophical Society of England*, 83(2), 12–18.
- Meester, L., Molenaar, J., Nuyens, M., Renzholc, Y. et van Winden, K. (2004). *Catch them ... if you can*. D. Pik et V. Rottschäfer (éds.), Proceedings of the fourty-fifth European Study Group with Industry (February 17–21, 2003), Leiden (p. 57–72).
- Monico, I. (2005). *Etude des caractéristiques acquises sous les semelles militaires* [Séminaire de 4e année]. Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- National Institute of Forensic Science Australia and New Zealand. (2017). An introductory guide to evaluative reporting. Australia New Zealand Policing Advisory Agency (ANZPAA). <https://www.anzpaa.org.au/ArticleDocuments/357/An%20Introductory%20Guide%20to%20Evaluative%20Reporting.PDF.aspx>
- National Research Council. (2009). *Strengthening forensic science in the United States: a path forward*. Washington, DC: National Academies Press. <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/grants/228091.pdf>
- Page, M., Taylor, J. et Blenkin, M. (2011). Uniqueness in the forensic identification sciences—Fact or fiction? *Forensic Science International*, 206(1–3), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.08.004>
- Park, S. et Carriquiry, A. (2020). An algorithm to compare two-dimensional footwear outsole images using maximum cliques and speeded-up robust feature. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 13(2), 188–199. <https://doi.org/10.1002/sam.11449>
- Park, S. et Carriquiry, A. (2021). Quantifying the similarity of 2D images using edge pixels: an application to the forensic comparison of footwear impressions. *Journal of Applied Statistics*, 48(10), 1833–1860. <https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1779194>
- Park, S. et Carriquiry, A. (2022). The effect of image descriptors on the performance of classifiers of footwear outsole image pairs. *Forensic Science International*, 331, 111126 (1–10). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111126>
- Pasquier, J. (2018). *Exploitation des traces de semelles dans la lutte contre la délinquance sérieuse: Conception et apport d'une banque de données dans le cadre du renseignement forensique* [Thèse de doctorat]. Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne. https://www.unil.ch/files/live/sites/esc/files/Fichiers%202019bis/The%CC%80se_Pasquier.pdf
- Pasquier, J. (2023). A footwear marks database in Western Switzerland: A forensic intelligence success. *Forensic Science International*, 348, 111726 (1–4). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111726>
- PCAST. (2016). Report to the President – Forensic Science in Criminal Courts: Ensuring Scientific Validity of Feature-Comparison Methods. President's Council of Advisors on Science and Technology, Washington DC. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/pcast_forensic_science_report_final.pdf
- Petraco, N. D. K., Gambino, C., Kubic, T. A., Olivio, D. et Petraco, N. (2010). Statistical Discrimination of Footwear: A Method for the Comparison of Accidentals on Shoe Outsoles Inspired by Facial Recognition Techniques. *Journal of Forensic Sciences*, 55(1), 34–41. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01209.x>

- Raymond, J. et Sheldon, P. (2015). Standardizing shoemark evidence – An Australian and New Zealand collaborative trial. *Journal of Forensic Identification*, 65(5), 868–883.
- Reidy, S., Harris, R., Gwinnett, C. et Reel, S. (2022). Planning and developing a method for collecting ground truth data relating to footwear mark evidence. *Science & Justice*, 62(5), 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2022.09.006>
- Reymond, J. (2010). *Etudes des caractéristiques acquises sur deux dessins généraux de semelles de chaussures* [Travail de Master]. Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- Richetelli, N., Bodziak, W. J. et Speir, J. A. (2019). Empirically observed and predicted estimates of chance association: Estimating the chance association of randomly acquired characteristics in footwear comparisons. *Forensic Science International*, 302, 109833 (1–14). <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.05.049>
- Richetelli, N., Hammer, L. et Speir, J. A. (2020a). Forensic Footwear Reliability: Part II – Range of Conclusions, Accuracy, and Consensus. *Journal of Forensic Sciences*, 65(6), 1871–1882. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14551>
- Richetelli, N., Hammer, L. et Speir, J. A. (2020b). Forensic Footwear Reliability: Part III – Positive Predictive Value, Error Rates, and Inter-Rater Reliability. *Journal of Forensic Sciences*, 65(6), 1883–1893. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14552>
- Richetelli, N., Nobel, M., Bodziak, W. J. et Speir, J. A. (2017). Quantitative assessment of similarity between randomly acquired characteristics on high quality exemplars and crime scene impressions via analysis of feature size and shape. *Forensic Science International*, 270, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.10.008>
- Richetelli, N. et Speir, J. A. (2022). Spatial frequency of randomly acquired characteristics on outsoles. *Journal of Forensic Sciences*, 67(5), 1810–1824. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15112>
- Rida, I., Bakshi, S., Proença, H., Fei, L., Nait-Ali, A. et Hadid, A. (2019). Forensic shoe–print identification: a brief survey. *arXiv: 1901.01431v2*, 1–7. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.01431>
- Schallamach, A. (1953). Abrasion Pattern on Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 26(1), 230–241. <https://doi.org/10.5254/1.3539800>
- Schallamach, A. (1958). Friction and Abrasion of Rubber. *Wear*, 1(5), 384–417. [https://doi.org/doi:10.1016/0043-1648\(58\)90113-3](https://doi.org/doi:10.1016/0043-1648(58)90113-3)
- Schmied, M. (2020). *Etude de la variabilité interpersonne dans l'évaluation du rapport de vraisemblance lors de comparaison de traces de semelles* [Travail de Master]. Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Sheets, H. D., Gross, S., Langenburg, G., Bush, P. J. et Bush, M. A. (2013). Shape measurement tools in footwear analysis: A statistical investigation of accidental characteristics over time. *Forensic Science International*, 232(1–3), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.07.010>
- Shor, Y. et Wiesner, S. (1999). A Survey on the Conclusions Drawn on the Same Footwear Marks Obtained in Actual Cases by Several Experts Throughout the World. *Journal of Forensic Sciences*, 44(2), 380–384. <https://doi.org/10.1520/JFS14.468I>
- Shor, Y., Wiesner, S., Tsach, T., Gurel, R. et Yekutieli, Y. (2018). Inherent variation in multiple shoe–sole test impressions. *Forensic Science International*, 285, 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.10.030>
- Sjerps, M. et Keereweer, I. (2001). A Likelihood Ratio View on the Interpretation of Shoeprint Evidence. *Proceedings of the Fourth European Meeting for Shoeprint/Toolmark Examiners*, 173–183.
- Skerrett, J., Neumann, C. et Mateos-Garcia, I. (2011). A Bayesian approach for interpreting shoemark evidence in forensic casework: Accounting for wear features. *Forensic Science International*, 210(1–3), 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.01.030>
- Smale, A. N. et Speir, J. A. (2023). Estimate of the random match frequency of acquired characteristics in a forensic footwear database. *Science & Justice*, 63(3), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2023.04.007>
- Speir, J. A. (2018). *A Quantitative Assessment of Shoeprint Accidental Patterns with Implications Regarding Similarity, Frequency and Chance Association of Features* [Final Technical Report] no 2013-DN-BX-K043. West Virginia University. <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/grants/251522.pdf>
- Speir, J. A., Richetelli, N., Fagert, M., Hite, M. et Bodziak, W. J. (2016). Quantifying randomly acquired characteristics on outsoles in terms of shape and position. *Forensic Science International*, 266, 399–411. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.06.012>
- Speir, J. A., Richetelli, N. et Hammer, L. (2020). Forensic Footwear Reliability: Part I – Participant Demographics and Examiner Agreement. *Journal of Forensic Sciences*, 65(6), 1852–1870. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14553>
- Spencer, N. A. et Murray, J. S. (2020). A Bayesian Hierarchical Model for Evaluating Forensic Footwear Evidence. *arXiv: 1906.05244v2*, 1–44. <https://doi.org/10.1214/20-AOAS1334>
- Stauffer, G. (2000). *Modèle de Schallamach – Compréhension et description de ce phénomène d'usure et exploitation de cette information dans le cadre de l'examen des traces de semelles* [Séminaire de 4e année]. Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- Stern, H. S. (2017). Statistical Issues in Forensic Science. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 4(1), 225–244. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-041715-033554>
- Stone, R. S. (2006). Footwear Examinations: Mathematical Probabilities of Theoretical Individual Characteristics. *Journal of Forensic Identification*, 56(4), 577–599.
- Stoney, D. A. (1991). What made us ever think we could individualize using statistics? *Journal of the Forensic Science Society*, 31(2), 197–199. [https://doi.org/10.1016/S0015-7368\(91\)73138-1](https://doi.org/10.1016/S0015-7368(91)73138-1)
- SWGTHREAD. (2013a). Range of Conclusions Standard for Footwear and Tire Impression Examinations. <https://treadforensics.com/index.php/standards/u-s/standards-swgthread>
- SWGTHREAD. (2013b). Standard for Terminology Used for Forensic Footwear and Tire Impression Evidence. <https://treadforensics.com/index.php/standards/u-s/standards-swgthread>

- Swofford, H. et Champod, C. (2021). Implementation of algorithms in pattern & impression evidence: A responsible and practical roadmap. *Forensic Science International: Synergy*, 3, 100142 (1-18). <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2021.100142>
- Tart, M. S., Adams, J., Downey, A. J., Goodyear, J. G. et Ohene, A. (1998). Feathering, Transient Wear Features and Wear Pattern Analysis: A Study of the Progressive Wear of Training Shoes Outsoles. *Information Bulletin for Shoeprint/Toolmark Examiners – Proceedings of the 2nd European SP/TM Conference*, 4(1), 51-68.
- The Forensic Science Regulator in partnership with the Chartered Society of Forensic Sciences and the Royal Statistical Society. (2021). *Development of Evaluative Opinions: Codes of Practice and Conduct for Forensic Service Providers*. Forensic Science Regulator, Brimingham. <https://www.gov.uk/government/publications/development-of-evaluative-opinions>
- Toso, B. (1997). *Evaluation des caractéristiques accidentelles sur les semelles de chaussures en fonction du temps et de l'utilisation* [Séminaire de 4e année]. Institut de Police Scientifique et de Criminologie, Université de Lausanne.
- Vaucher, K. (2022). *Traces de semelles poussiéreuses : Reproductibilité des caractéristiques acquises sur les surfaces lisses* [Travail de Master]. Ecole des Sciences Criminelles, Université de Lausanne.
- Venkatasubramanian, G., Hegde, V., Padi, S., Iyer, H. et Herman, M. (2021). Comparing footwear impressions that are close non-matches using correlation-based approaches. *Journal of Forensic Sciences*, 66(3), 890-909. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14658>
- Wang, X., Wu, Y. et Zhang, T. (2019). Multi-Layer Feature Based Shoeprint Verification Algorithm for Camera Sensor Images. *Sensors*, 19(11), 2491 (1-20). <https://doi.org/10.3390/s19112491>
- Wiesner, S., Shor, Y., Tsach, T., Kaplan-Damary, N. et Yekutieli, Y. (2020). Dataset of Digitized RACs and Their Rarity Score Analysis for Strengthening Shoeprint Evidence. *Journal of Forensic Sciences*, 65(3), 762-774. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14239>
- Willis, S., Mc Kenna, L., Mc Dermott, S., O' Donnell, G., Barrett, A., Rasmusson, B., Höglund, T., Nordgaard, A., Berger, C., Sjerps, M., Molina, J. J. L., Zadora, G., Aitken, C., Lovelock, T., Lunt, L., Champod, C., Biedermann, A., Hicks, T. et Taroni, F. (2015). ENFSI Guideline for Evaluative Reporting in Forensic Science. European Network of Forensic Science Institutes. https://enfsi.eu/wp-content/uploads/2016/09/m1_guideline.pdf
- Wilson, H. D. (2012). Comparison of the Individual Characteristics in the Outsoles of Thirty-Nine Pairs of Adidas Supernova Classic Shoes. *Journal of Forensic Identification*, 62(3), 194-203.
- Wyatt, J. M., Duncan, K. et Trimpe, M. A. (2005). Aging of Shoes and its Effect on Shoeprint Impressions. *Journal of Forensic Identification*, 55(2), 181-188.
- Yekutieli, Y., Shor, Y., Wiesner, S. et Tsach, T. (2016). Expert Assisting Computerized System for Evaluating the Degree of Certainty in 2D Shoeprints [Final Technical Report] no NIJ Task Plan 3211, Award Number: IAA-2009-DN-R-090. <https://www.ojp.gov/sites/g/files/xyckuh241/files/media/document/250336.pdf>
- Zhang, H., Liu, L., Quan, Y. et Luo, Y. (2021). The specificity and reproducibility of general Schallamach pattern on heel part of rubber outsole. *Journal of Forensic Sciences*, 66(5), 1937-1947. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14749>