

La datation des traces digitales (partie II): proposition d'une approche formelle

par Aline GIROD*, Claude ROUX**, Céline WEYERMANN*

Résumé

«Quel est l'âge de cette trace digitale?» Cette question est relativement souvent soulevée durant une investigation ou au tribunal, lorsque la personne suspectée admet avoir laissé ses traces sur une scène de crime mais prétend l'avoir fait à un autre moment que celui du crime et pour une raison innocente. La première partie de cet article mettait en évidence le manque de consensus actuel dans les réponses données à cette question par les experts du domaine, ainsi que le fait qu'aucune méthodologie n'est pour l'heure validée et acceptée par la communauté forensique. C'est pourquoi ce deuxième article propose une approche formelle et pragmatique afin d'aborder la question de la datation des traces digitales en se basant sur la recherche actuelle dans le domaine du vieillissement de composés lipidiques détectés dans les traces digitales. Cette approche permet ainsi d'identifier quel type d'information le scientifique serait capable d'apporter aux enquêteurs et/ou à la Cour lors de cas de datation des traces digitales à l'heure actuelle, dans quelles conditions, et quels sont les développements encore nécessaires.

Mots-clés: traces digitales, datation, modélisation du vieillissement, lipides, âge absolu, hypothèses alternatives

Summary

“How old is this fingerprint?” This question is relatively often raised in trials when suspects admit that they have left their fingerprints on a crime scene but allege that the contact occurred at a time different to that of the crime and for legitimate reasons. The first part of this article highlighted the current lack of consensus among the answers given to this question by the experts. It was also emphasised that no methodology has been validated and accepted by the forensic community so far. This is why this second part proposes a formal and pragmatic framework to approach the fingerprint dating question using current research about aging kinetics of lipid compounds found in fingerprint residue. This framework allows identifying which type of information the scientist would be able to bring so far to investigators and/or Justice about fingerprint dating, in which conditions and what developments are still required.

Keywords: fingerprints, fingerprints, dating, aging models, lipids, absolute age, alternative hypotheses

1. Introduction

L'usage des traces digitales comme moyen d'identification durant une investigation ou au tribunal date de plus d'un siècle et fait l'objet d'une littérature spécialisée de plus en plus abondante (Berry et Stoney 2001; Cole 2001; Sengoopta

* Institut de Police Scientifique, Université de Lausanne, Batochime, CH-1015 Lausanne, Suisse

** Centre for Forensic Science, University of Technology, Sydney, Broadway NSW 2007, Australie

2003). Toutefois, alors que la question de la source («qui?») est fréquemment abordée, il n'en va pas de même pour les questions liées à l'activité («comment?»; «quand?»). En se penchant sur les cas jugés dans les tribunaux américains et européens, il apparaît que la datation de traces digitales peut prendre un rôle primordial dans les conclusions formulées quant à la culpabilité ou l'innocence d'une personne suspecte, et peut également s'avérer importante dans les phases précédant le jugement, afin d'orienter l'investigation judiciaire (Girod et Weyermann 2013). En effet, s'il est possible de déterminer que la trace digitale d'un suspect a été déposée au moment du crime ou, au contraire, à un autre moment, l'âge de cette trace digitale devient un élément central permettant d'incriminer ou non une personne suspectée. La pertinence de la trace digitale peut donc dépendre, dans certain cas, de son âge.

La datation des traces digitales sert ainsi deux des trois buts de la datation des traces en science forensique identifiés par Weyermann et Ribaux (2012): aider l'investigation (*aspect investigatif*) et servir de preuve lors du jugement (*aspect judiciaire*). D'ailleurs, que la trace soit légitime ou non, la stratégie de défense de personnes suspectées consiste de plus en plus fréquemment à mettre en doute la pertinence des traces digitales en invoquant la date ou l'époque de leur déposition (Girod et Weyermann 2013). C'est pourquoi le développement d'une méthodologie de datation des traces digitales serait particulièrement utile dans la pratique forensique. Pourtant, comme la première partie de cet article l'a mis en évidence, une telle méthodologie n'est actuellement ni validée, ni acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique. Ce second article propose donc une approche formelle permettant d'aborder la datation de traces digitales en se basant sur la modélisation du vieillissement de composés détectés dans les résidus papillaires à l'aide de techniques analytiques généralement accessibles dans les laboratoires forensiques. Cette approche considère la problématique dans son ensemble et propose une méthodologie pragmatique mettant en évidence les possibilités actuelles tout en précisant les éléments devant encore être étudiés de manière approfondie dans le cadre de la recherche sur le sujet.

Le premier chapitre de cet article concerne la sélection de composés **endogènes** cibles utilisables dans le contexte de la datation des traces digitales. La problématique de l'estimation de l'âge d'une trace par la modélisation du vieillissement de ces composés cibles est ensuite abordée au travers d'exemples concrets. Finalement, les aspects pratiques de l'approche proposée sont discutés.

2. Choix des composés cibles et des techniques analytiques

Plusieurs recherches ont été conduites sur l'identification de composés présents dans les résidus de traces digitales, et il s'avère que ces derniers sont majoritairement de nature eccrine ou sébacée. Les composés de nature eccrine sont principalement des protéines, des acides aminés, des sels et des composés inorganiques, alors que les sécrétions sébacées sont essentiellement composées de glycérides, d'esters de cire (esters créés entre un alcool gras et un acide gras),

d'acides gras libres, de squalène, de cholestérol et d'esters de stérol. Les détails liés à l'identification de ces composés dépassant toutefois le cadre de cet article, le lecteur intéressé peut se tourner vers une récente revue sur le sujet (Girod, Ramotowski et al. 2012). Ce qu'il est important de mentionner ici est que les composés cibles choisis pour une méthode de datation doivent faire partie des composés endogènes identifiés dans les résidus de traces digitales et, idéalement, doivent répondre à l'ensemble des critères suivants:

1. Les composés cibles doivent être détectables chez tous les individus et donc fréquemment présents dans les résidus papillaires. De plus, ils doivent être endogènes et différenciables des contaminants pouvant se trouver sur les doigts, tels que les cosmétiques.
2. La présence des composés cibles doit être mesurable à l'aide de techniques analytiques utilisables dans un contexte pratique.
3. Les composés cibles doivent montrer une variabilité aussi faible que possible vis-à-vis des différents facteurs d'influence affectant la composition initiale ou le vieillissement des traces digitales.
4. Les composés cibles doivent montrer des modifications reproductibles et mesurables dans le temps, comme, par exemple, une diminution ou une augmentation de leur quantité (absolue ou relative).

En se basant sur l'ensemble de ces critères et en considérant l'état actuel des recherches, il est possible de déterminer que les composés de nature lipidique représentent des cibles plus adéquates dans le développement d'une méthodologie d'estimation de l'âge des traces digitales que les principaux composés de nature eccrine tels que les acides aminés et les protéines. En effet, les acides aminés, bien qu'analysables à l'aide de techniques relativement simples et répandues (p. ex. la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, GC/MS) ne semblent pas présenter de modifications reproductibles dans le temps (Croxtton, Baron et al. 2006; Croxtton, Baron et al. 2010). Leur intérêt pour la datation des traces digitales est donc moindre. Concernant les protéines identifiées au sein des résidus papillaires (Reinholz 2008; Drapel, Becue et al. 2009; Lambrechts, van Dam et al. 2012; Van Dam, Aalders et al. 2013), aucune donnée concernant leur variabilité et leur cinétique de vieillissement n'a été récoltée à ce jour. Ceci s'explique par le fait que ce type d'analyses nécessite la mise en œuvre de techniques d'ionisation avancées (telles que FAB, ESI, APCI ou encore MALDI (1)) couplées à de la spectrométrie de masse simple ou en tandem, à cause des quantités limitées de matériel à disposition dans les traces, ainsi qu'à la masse moléculaire élevée des protéines (Riches, Polce et al. 1988; Bantscheff, Schirle et al. 2007; Keller, Sui et al. 2008; Helsens, Martens et al. 2011). L'utilisation de ce genre de techniques dans un contexte pratique étant peu probable, les protéines ne sont donc pas non plus des cibles pertinentes à l'heure actuelle. Certains lipides, par contre, répondent à la majorité des critères mentionnés ci-dessus. Chacun de ces critères va donc être détaillé en fonction des recherches actuelles sur les composés de nature sébacée identifiés dans les résidus des traces digitales.

2.1 Composés fréquents, endogènes et différenciables des contaminants courants

Les composés sébacés ayant été identifiés ci-dessus comme intéressants, il s'agit maintenant de déterminer plus précisément quelles sont les molécules à cibler. Ces dernières doivent être présentes chez une majorité d'individus, afin qu'elles puissent être recherchées et analysées dans toutes les traces de question et pour chaque cas. De plus, elles doivent être endogènes, c'est-à-dire provenir des sécrétions naturelles de la peau. En effet, elles ne doivent pas être originaires de contaminants se déposant fréquemment sur les doigts tels les cosmétiques, car leur présence serait alors aléatoire et rendrait ainsi difficile toute analyse à but de datation. Seuls les travaux ayant étudié les composés sébacés présents dans les traces digitales de manière générale, sans viser un type de lipides particulier, sont donc considérés dans cette section.

Une étude de population récente réalisée par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC/MS) a permis d'identifier 26 composés lipidiques présents dans toutes les traces de 25 donneurs, dont 10 acides gras, le squalène et 4 de ses produits d'oxydation, le cholestérol et 10 esters de cire (Girod et Weyermann 2014). Toutefois, bon nombre de ces composés, principalement les acides gras et certains esters de cire, se retrouvent également dans des produits cosmétiques courants, tels que les crèmes hydratantes ou le maquillage. D'après cette étude, 10 composés lipidiques sont présents chez tous les individus testés mais rarement utilisés dans les cosmétiques, à savoir le squalène, le cholestérol et 8 esters de cire (EC) (2). Ces composés endogènes représentent donc des cibles intéressantes pour l'estimation de l'âge de traces digitales.

D'autres études réalisées sur des traces digitales par spectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier (FTIR) ont également permis d'identifier des zones spectrales présentes chez tous les individus testés, à savoir $3020-2800\text{ cm}^{-1}$, $1800-1700\text{ cm}^{-1}$ et $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ (Hemmila 2008; Fritz et al. 2012). Ces longueurs d'ondes représentent respectivement les liaisons atomiques C-H, C=O (esters) et (C-O), ce qui correspond aux molécules d'intérêt identifiées par GC/MS. Ces zones spectrales peuvent toutefois également correspondre aux acides gras fréquemment rencontrés dans les cosmétiques. Il est donc nécessaire d'être prudent dans l'utilisation de ces zones de spectres et des recherches supplémentaires doivent être menées à ce sujet.

Enfin, des analyses usant de techniques d'ionisation avancées (ESI ou DESI, APCI, LDI, SALDI ou encore MALDI (3)) combinées à de la spectrométrie de masse et/ou de l'imagerie hyper spectrale ont également permis d'identifier les composés sébacés cités ci-dessus (Tang, Lu et al. 2010; Wolstenholme, Bradshaw et al. 2009; Mountfort, Bronstein et al. 2007; Frick, Berryman et al. 2011; Emerson, Gidden et al. 2011; Ifa, Manicke et al. 2008; Lim, Mab et al. 2011). Toutefois, le contexte pratique dans lequel une méthode de datation des traces digitales doit s'inscrire rend l'utilisation de ces techniques de pointe coûteuses peu probable. Elles ne seront donc pas détaillées dans cet article.

2.2 Composés mesurables à l'aide de techniques utilisables dans un contexte pratique

De nombreuses techniques analytiques sont capables de mesurer les composés de nature sébacée présents dans les résidus papillaires (Girod, Ramotowski et al. 2012). Idéalement, la technique de choix dans le cadre de l'estimation de l'âge d'une trace digitale devrait être:

- (i) facilement accessible pour toute unité forensique et peu coûteuse (*disponibilité et coût*)
- (ii) capable de différencier les composés endogènes des traces digitales de leurs contaminants (*spécificité*)
- (iii) capable d'analyser des traces digitales sur une majorité de substrats (*polyvalence*)
- (iv) non-destructive pour la trace (*non-destructivité*)
- (v) simple et rapide d'utilisation (*simplicité et rapidité*)

Les paragraphes suivants visent ainsi à comparer deux techniques analytiques particulièrement intéressantes dans ce contexte, sans toutefois expliquer précisément leur fonctionnement, car celui-ci ne représente pas le propos principal de ce chapitre. Le lecteur intéressé peut toutefois se tourner vers la littérature spécialisée mentionnée ci-dessous.

Deux techniques fréquemment utilisés en science forensique (par exemple, pour l'analyse de stupéfiants ou de microtraces) permettent de détecter les composés sébacés d'intérêt identifiés ci-dessus et répondent au critère de disponibilité et coût abordable (point (i)). Il s'agit de la GC/MS (Mahuzier, Hamon et al., 2002; de Hoffmann et Stroobant, 2005) et de la FTIR (Pavia, Lampman et al., 2001). En effet, ces techniques relativement peu coûteuses sont à disposition dans de nombreux laboratoires et les unités forensiques peuvent donc facilement y avoir accès.

Toutefois, des différences notables sont à relever concernant les autres points mentionnés ci-dessus (Table 1). Tout d'abord, la GC/MS permet d'identifier précisément les lipides et peut donc faire la différence entre des composés endogènes et des contaminants (tels que les acides gras présents dans les cosmétiques), alors que la FTIR ne permet de détecter que des liaisons atomiques et non des composés cibles précis. En FTIR, il s'agit donc de définir des zones spectrales d'intérêt correspondant principalement à des composés endogènes et non à des contaminants, ce qui peut s'avérer difficile puisque ces derniers sont fréquemment constitués de molécules similaires. De plus, alors que la GC/MS permet d'analyser des traces digitales laissées sur des substrats poreux et non poreux, la FTIR ne permet pas une analyse de qualité sur supports poreux, puisque le principe de cette technique implique une réflexion que seul un support non-poreux peut fournir. Par contre, la FTIR permet une analyse non-destructive de la trace, alors que la GC/MS nécessite l'extraction des composés formant cette dernière, ce qui cause sa destruction. Enfin, concernant la simplicité et rapidité d'utilisation, il apparaît que la FTIR ne demande qu'une préparation d'échantillons minimale puisque l'analyse peut se faire *in-situ* en quelques minutes, alors que l'extraction nécessaire à la préparation des traces pour l'analyse par GC/MS prend un certain

	FTIR	GC/MS
(i) disponibilité et coût	✓	✓
(iii) spécificité	✗	✓
(iv) polyvalence (substrat)	✗	✓
(v) non-destructivité	✓	✗
(iv) simplicité et rapidité	✓	✗

Table 1: Comparaison de la FTIR et de la GC/MS pour l'analyse des lipides dans les traces digitales selon cinq points considérés importants dans le cadre d'une application pratique.

temps, tout comme l'analyse de l'extrait (environ 1h30 au total selon la méthode proposée par Girod et Weyermann (2014))

Cette comparaison montre donc que la GC/MS et la FTIR sont des techniques complémentaires concernant l'analyse des lipides au sein des traces digitales. Selon le contexte des cas en question, il s'agira donc d'utiliser une ou l'autre de ces techniques, voir même de les appliquer en séquence sur des supports non poreux (FTIR puis GC/MS). La recherche doit toutefois encore déterminer le gain réel qu'apporterait une telle combinaison, celle-ci n'ayant à la connaissance des auteurs jamais été testée dans le contexte de l'analyse des lipides présents dans les résidus de traces digitales. De plus, il est également essentiel de déterminer quelle quantité de matériel – et donc quelle qualité de trace (en terme de complétude) – est nécessaire à l'analyse.

2.3 Composés faiblement variables vis-à-vis de facteurs d'influence

La composition des traces digitales a été définie comme un système de nature complexe évoluant dans le temps entre un état de «composition initiale» (résidus transférés sur un substrat juste après le contact entre le doigt et ce substrat) et un état de «composition âgée» (évolution de la composition initiale dans le temps jusqu'à l'analyse) (Girod, Ramotowski et al. 2012). Le premier état influence le second et le système dans son ensemble est également affecté par les effets de nombreux facteurs d'influence classés en cinq groupes principaux (Figure 2, adaptée de Girod et al. (2012)):

1. les caractéristiques du donneur
2. les conditions de déposition
3. la nature du substrat
4. les conditions environnementales
5. l'application de techniques de révélation

La composition des traces digitales est donc variable, et cette variabilité concerne tous les types de composés, y compris les composés lipidiques cibles sélectionnés. Il a ainsi été observé que la variabilité entre différents donneurs (inter-

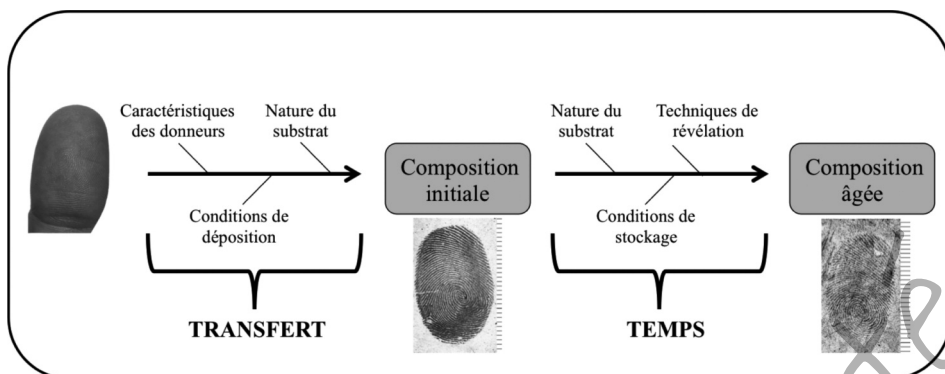


Figure 1: Représentation schématique de la variabilité de la composition des traces digitales induite par différents facteurs d'influence s'exerçant lors de deux phases successives: (1) le transfert entre le doigt et le substrat résultant en la création de la trace digitale dans sa composition initiale et (2) le temps conduisant à l'émergence de la composition après vieillissement. Les facteurs influençant la composition peuvent être classifiés en cinq groupes: les caractéristiques des donneurs, les conditions de déposition, la nature des substrats, les conditions de stockage et l'application de techniques de révélation (Figure adaptée et traduite de Girod et al. (2012)).

variabilité) est plus grande qu'au sein des traces digitales d'un même donneur (intra-variabilité) pour ce type de sécrétions (Archer, Charles et al. 2005; Koenig, Girod et al. 2011; Weyermann, Roux et al. 2011; Bailey, Bright et al. 2012; Girod et Weyermann 2014). Cette variabilité peut être diminuée par prétraitement de données ou calculs de rapports entre différents composés, mais elle ne peut pas être entièrement supprimée. De plus, ces différentes études ont également montré que l'intra-variabilité des lipides est propre à un donneur et ne peut donc pas être considérée similaire pour tous les donneurs. Des variations ont également été notées selon le type de substrat sur lequel la trace est déposée, notamment entre surface poreuse (papier) et non poreuse (verre) (Weyermann, Roux et al. 2011). Selon les recherches en cours des auteurs (4), la pression appliquée lors du dépôt ainsi que la température de stockage ont également une influence sur la composition initiale et le vieillissement des traces. L'application des techniques de révélation impliquant de baigner les traces dans des solvants (ex. application de l'indanedione) affecte également la composition lipidique des traces digitales. En effet, une partie des lipides sont extraits lors de ce trempage puisque les quantités relatives retrouvées dans les traces digitales sont diminuées de moitié (Koenig, Girod et al. 2011). Par contre, l'application de poudrage et cyanoacrylate ne semble pas influencer significativement la composition lipidique (Koenig, Girod et al. 2011). Enfin l'exposition à la lumière a également un effet sur le vieillissement des traces digitales, puisqu'une diminution de la quantité de squalène plus rapide a été notée lorsque les traces sont exposées à la lumière que lorsqu'elles sont

stockées dans l'obscurité, ceci étant dû à l'oxydation de ce composé (Archer, Charles et al. 2005).

La variabilité due aux différents facteurs d'influence mentionnés ci-dessus ne peut pas être complètement contrôlée ni supprimée lors de cas pratiques. Il apparaît en effet raisonnable de penser qu'il n'existe aucun composé totalement stable face aux facteurs d'influence. Cette variabilité doit donc être prise en compte dans la définition d'une méthodologie d'estimation de l'âge des traces digitales basée sur des composés cibles.

2.4 Composés se modifiant dans le temps de manière reproductible et mesurable

Il a été mentionné plus haut que les composés lipidiques cibles analysés par GC/MS ou FTIR montrent une certaine variabilité dans les traces fraîches, mais il s'agit maintenant de déterminer si le vieillissement de ces composés montrent des tendances mesurables et reproductibles. Différentes études ont montré que la GC/MS était capable de suivre les modifications de composés lipidiques dans le temps (leur vieillissement) sur une période de l'ordre du mois et de manière relativement fiable (Archer, Charles et al. 2005; Weyermann, Roux et al. 2011). Le vieillissement du squalène et du cholestérol par GC/MS a notamment montré des tendances régulières qu'il était possible de détecter par la construction de courbes de vieillissement (Weyermann, Roux et al. 2011). Ces courbes ont été construites en

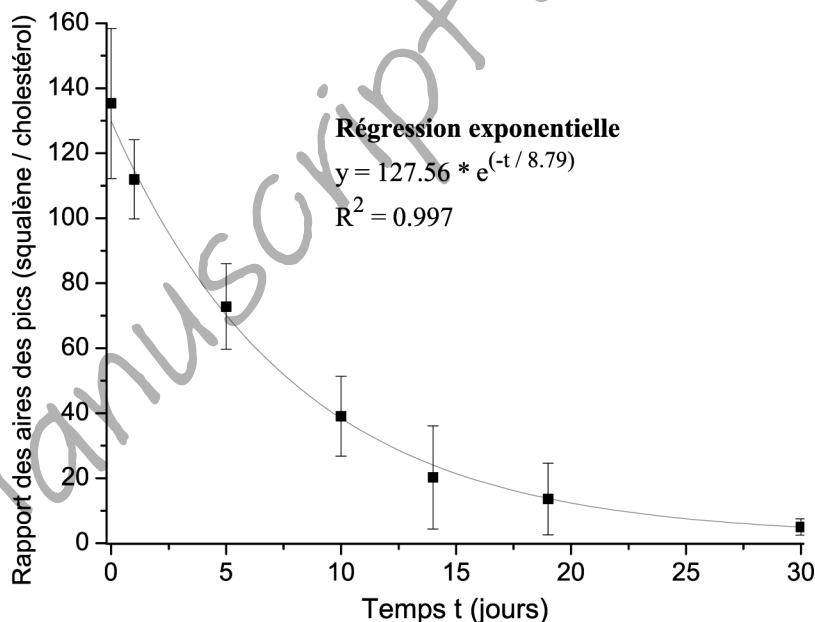


Figure 2: Courbe de vieillissement obtenue par analyse de traces digitales déposées sur des papiers par GC/MS. Le rapport de l'aires des pics du squalène et du cholestérol est représenté en fonction du temps (Figure adaptée et traduite de Weyermann, Roux et al. (2011))

analysant plusieurs traces digitales d'âges différents provenant d'un seul donneur (déposées au même moment et analysées dans le temps). Dans cette étude, un paramètre de vieillissement reproductible a été identifié à savoir le rapport entre l'air du pic du squalène et l'air du pic du cholestérol et une courbe de régression exponentielle a été calculée (Figure 2). Plusieurs traces digitales du même âge ont été considérées afin de construire ces courbes, dans le but de pouvoir calculer l'erreur due à leur variabilité. Il n'existe actuellement pas d'autres publications mentionnant de telles courbes sur des lipides présents dans les traces digitales. La recherche doit donc encore évaluer si ce paramètre de vieillissement est applicable aux traces digitales de toute personne, ou tout du moins d'une population élargie. De plus, il est nécessaire de déterminer si la régression est similaire pour d'autres courbes faites avec des traces digitales d'un même donneur mais récoltées à des moments différents (étude de l'intra-variabilité dans le temps). La robustesse de ces courbes doit également être testée en variant d'autres facteurs tel que les conditions de stockage. Finalement, d'autres paramètres de vieillissement doivent encore être étudiés, notamment en utilisant les 10 lipides mentionnés plus haut comme composés cibles.

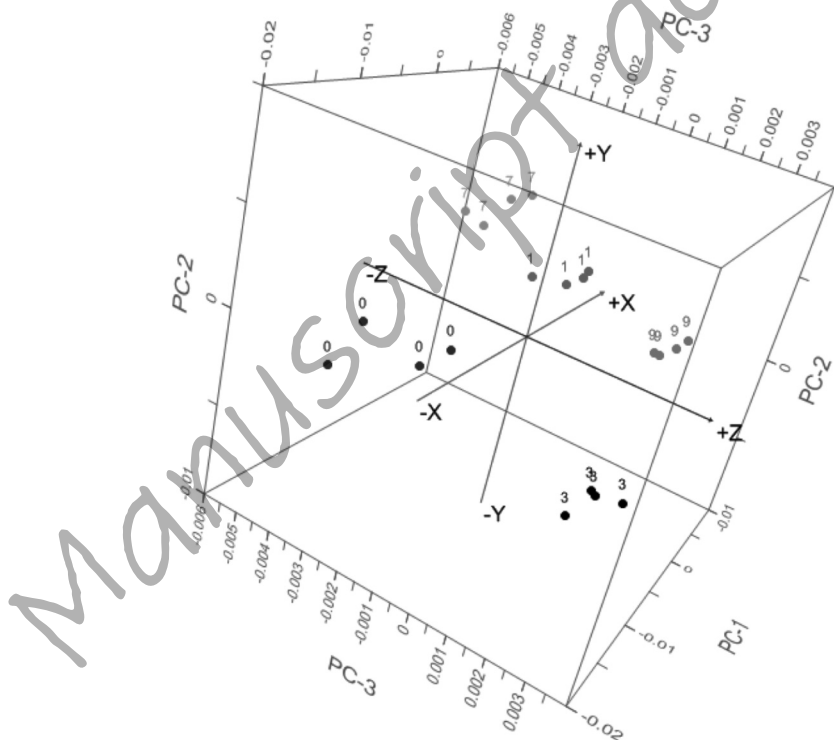


Figure 3: Modèle PCA obtenu par analyse des traces digitales d'un donneur déposées sur du papier aluminium et analysées par FTIR aux âges suivants (jours): 0, 1, 3, 7 et 9. Les zones des spectres FTIR 3020-2760, 1800-1500 et 1290-650 cm^{-1} ont été utilisées (Girod, Xiao et al., 2013).

Concernant la spectroscopie infrarouge, Fritz et al. (2012) ont étudié les modifications se produisant au sein des composés lipidiques dans des traces digitales d'âges différents en se focalisant sur la zone spectrale $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ et en utilisant la microscopie IR couplée à une source synchrotron. Lors du dépôt des traces, un doigt a été apposé plusieurs fois au même endroit afin d'augmenter la quantité de résidus déposés et cette «superposition» de traces a ensuite été analysée. Toutefois, aucune modification reproductible n'a pas pu être observée dans le temps en analysant des traces fraîches et âgées de 3, 6 et 9 mois. Par contre, dans une autre recherche réalisée par FTIR (Girod, Xiao et al., 2013), les traces digitales d'un donneur déposées sur des feuilles aluminium sans superposition (mais avec répliquas, c'est-à-dire plusieurs traces de même âge), ont pu être groupées selon leur âge, sur une période d'un mois. Cette classification a été obtenue par traitement chimiométrique (5). Un modèle utilisant l'analyse en composante principale (*principal component analysis* ou PCA (6)) a ainsi pu être créé en se basant sur les zones spectrales $3020-2760\text{ cm}^{-1}$, $1800-1500\text{ cm}^{-1}$ et $1290-650\text{ cm}^{-1}$ traitées en absorbance (Figure 3). La technique d'analyse, l'échantillonnage des traces, les zones spectrales considérées et le traitement appliqué aux données semblent donc permettre la mise en évidence du vieillissement de la composition lipidique des traces digitales sur une période d'environ 1 mois, ce qui est prometteur pour le développement d'une méthode de datation. La recherche doit toutefois se poursuivre afin d'évaluer si ce type de classification est applicable aux traces digitales d'une large population. De plus, il est aussi nécessaire de déterminer si cette classification est reproductible avec des traces digitales d'un même donneur mais récoltées à des moments différents (étude de l'intra-variabilité dans le temps). Enfin, la robustesse de ces classifications doit également être testée en variant les facteurs d'influence (par exemple, les conditions de stockage).

Les courbes de régression et modèles PCA décrits ci-dessus sont capables de représenter le vieillissement de composés lipidiques cibles présents dans les traces digitales, mais montrent également des limitations majoritairement inhérentes à la variabilité des traces digitales due à des facteurs d'influence non contrôlables dans la pratique. La recherche doit donc encore déterminer quels facteurs ont le plus d'influence sur les modèles proposés. De plus, il s'agit aussi d'étudier différents paramètres de vieillissement pour les techniques analytiques retenues afin d'identifier ceux permettant d'obtenir la modélisation du vieillissement la plus reproductible. Enfin, il est également nécessaire que la recherche génère des informations quant aux limites d'application des techniques d'intérêt dans le temps afin de déterminer l'âge maximal des traces permettant encore la détection d'un signal et le traitement statistique de ce dernier.

3. Datation de traces digitales par modélisation du vieillissement de composés cibles

Des composés cibles ayant été identifiés ci-dessus, il est possible de se pencher sur les possibilités de datation de traces digitales à l'aide de ces composés. A la

connaissance des auteurs, aucune publication n'a pour l'heure proposé de méthodologie pratique et objective d'estimation de l'âge des traces digitales basée sur le vieillissement de composés cibles. Dans d'autres domaines de la science forensique toutefois, des propositions de modèles permettant une telle estimation ont déjà été faites et seront résumées ci-dessous. Deux approches principales, utilisables indépendamment ou en séquence, ont ainsi pu être identifiées et vont être détaillées et appliquées à la problématique de la datation des traces digitales à l'aide d'exemples: (1) l'estimation d'un âge absolu associé à un intervalle de confiance et (2) la comparaison de deux hypothèses temporelles alternatives dans le but d'estimer la force de l'une par rapport à l'autre.

3.1 Estimation d'un âge absolu associé à un intervalle de confiance

Dès le début d'une investigation et jusqu'à la phase de jugement d'une affaire, il peut être particulièrement utile de déterminer l'âge absolu d'une trace digitale, par exemple pour déterminer si une trace est contemporaine à la commission d'un crime ou si son âge est compatible avec un alibi.

Les questions de datation en science forensique se posent pour de nombreux types de traces. Des recherches ont notamment été effectuées sur la datation des encres, des résidus de tir et des traces de sang. Concernant la datation d'encres, de nombreux modèles consistent à définir des seuils de décisions. Ces seuils se basent sur l'étude de nombreuses données provenant de l'analyse de traits d'encre d'âges différents effectués avec une population de stylos considérée représentative du marché. Lorsqu'un trait d'encre de question est analysé, le résultat est ensuite comparé aux seuils prédéfinis (Aginsky 1996; Bugler, Buchner et al. 2008; Gaudreau et Aginsky 2010). Il a également été proposé d'effectuer plusieurs analyses du trait d'encre dans le temps, sur plusieurs semaines, afin de pouvoir effectuer un calcul de tendance dans le but de déterminer si l'encre vieillit encore (Weyermann, Almog et al. 2011; Koenig, Bügler et al. 2014). Au sujet de la datation de résidus de tir, des modèles représentant la diminution des résidus volatils dans le canon d'une arme après le tir, ou dans la cartouche, ont également été proposés (Andrasko, Norberg et al. 1998). La mesure effectuée sur la cartouche de question est ainsi comparée à une courbe de vieillissement servant de calibration dans l'estimation de l'âge du tir. L'utilisation de seuils a également été proposée dans ce domaine afin de définir des intervalles durant lesquels le tir a pu avoir lieu (Persin, Touron et al. 2007).

Les approches de datation d'encres et de résidus de tir par seuils comportent toutefois des limitations liées à la fixation parfois arbitraire de ceux-ci et au fait qu'ils ne permettent que de déterminer si une trace se trouve au-dessous ou au-dessus de seuils prédéfinis, sans donner d'informations précises quant à son âge absolu. L'utilisation de courbes de vieillissement permet quant à elle d'estimer plus précisément un âge absolu, mais très peu de détails sont généralement fournis sur les taux d'erreur et les intervalles de confiance, ce qui limite pour l'instant la fiabilité de cette approche (Gallidabino, Weyermann et al. 2013).

En ce qui concerne la datation des traces de sang, la construction d'une courbe de vieillissement représentant la diminution de l'hémoglobine par rapport au

temps (régression) et passant par l'analyse de différentes traces d'âge connu est également proposée (Bremmer, Nadort et al. 2011; Edelman, van Leeuwen et al. 2012). Dans cette approche, la trace de question est analysée et introduite dans la courbe, avant d'utiliser un algorithme permettant de calculer la distance minimale entre cette courbe et le point associé à la trace de question. Le point de la courbe correspondant à cette distance minimale est ainsi l'âge théorique de la trace de question (Edelman, van Leeuwen et al. 2012). Un âge théorique absolu peut donc être déterminé et des erreurs peuvent également être calculées de manière transparente en se basant sur les paramètres de la régression. Ce type d'approche est parfaitement adaptable à la datation de l'encre, des résidus de tir et des traces digitales, et pourrait fortement diminuer les limitations actuelles identifiées dans la datation des traces.

En se basant sur ces travaux, et plus précisément sur les propositions faites quant à la construction de courbes de régression, le principe de l'estimation de l'âge absolu d'une trace digitale peut être illustré par un exemple utilisant la courbe de régression présentée en Figure 2 et dont les données sont détaillées dans la Table 2. Cette courbe a été obtenue suite à des analyses GC/MS et représente la diminution du rapport de l'air du pic du squalène sur l'air du pic du cholestérol en fonction du temps. Son équation exponentielle est:

$$y = 127.56 * e^{(-t/8.79)} \text{ (Eq. 1)}$$

Si une valeur $y_0 = 60$ est obtenue pour le rapport du squalène sur le cholestérol suite à l'analyse d'une trace de question, il est possible d'utiliser l'équation 1 afin d'estimer t , c'est-à-dire l'âge absolu de la trace de question en jours:

$$t = LN\left(\frac{y_0}{127.56}\right) * (-8.79) = LN\left(\frac{60}{127.56}\right) * (-8.79) = 6.63 \text{ jours (Eq. 2)}$$

Il est ensuite nécessaire d'affiner cette première estimation en y associant un intervalle de confiance, fixé par exemple à 95% (Miller et Miller 2005). Deux nouvelles courbes encadrant la courbe de régression originale peuvent ainsi être calculées (7), tout comme leurs équations respectives (Figure 4). Il est alors possible d'estimer l'âge minimal et maximal pouvant correspondre au résultat y_0 :

$$t_{min} = LN\left(\frac{60}{102.71}\right) * (-4.47) = 2.40 \text{ jours (Eq. 3)}$$

$$t_{max} = LN\left(\frac{60}{167.16}\right) * (-9.83) = 10.01 \text{ jours (Eq. 4)}$$

Dans le cas de figure présenté ici, on estimerait ainsi l'âge de la trace de question entre 2 et 10 jours. Il est à noter que cet exemple ne prend pas de facteurs

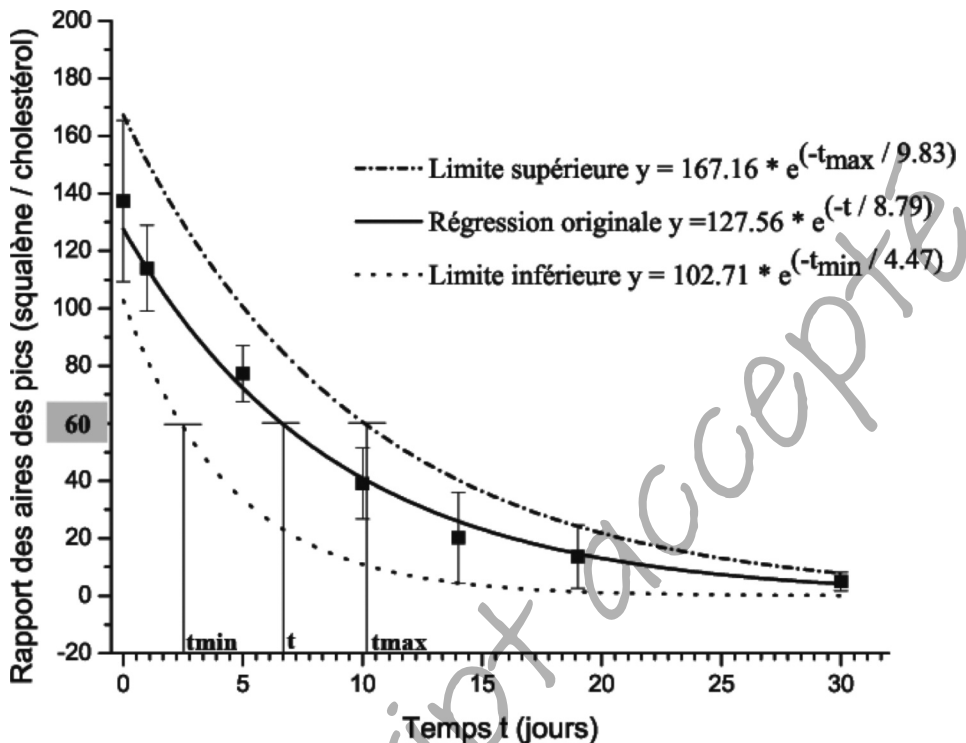


Figure 4: Courbe de vieillissement représentée en Figure 2, associée à un intervalle de confiance à 95%. Si, suite à l'analyse d'une trace de question, le résultat $y_0=60$ est obtenu, il est possible d'estimer l'âge absolu de cette trace t (courbe continue), ainsi que l'âge minimal t_{\min} et maximal t_{\max} (courbes discontinues).

d'influence en compte. Toutefois, il est tout à fait envisageable de générer des courbes de régression dans différentes conditions représentant les facteurs d'influence pertinents et de conduire cette estimation en utilisant l'ensemble des courbes ainsi créées.

Précisons également que l'exemple présenté ci-dessus se base sur une courbe de régression, mais pourrait tout aussi bien s'appuyer sur un modèle de classification tel la PCA. Il s'agirait alors de classer la trace de question dans ce modèle (8) et de calculer l'erreur liée à cette classification. Différents facteurs d'influence pourraient également être considérés dans ce modèle.

L'estimation de l'âge absolu de traces digitales est donc possible. Toutefois, cette estimation ne peut avoir lieu que si la personne à l'origine de la trace est identifiée et à disposition des enquêteurs, ce qui est une précision d'importance. Celle-ci explique d'ailleurs pourquoi l'estimation par seuils effectuée dans d'autres domaines n'est pas envisageable dans le domaine des traces digitales. En effet, dans le cas des encres ou des résidus de tir, les données de référence utilisées pour créer les modèles de vieillissement et fixer des seuils proviennent générale-

ment d'analyses d'instruments scripturants et de cartouches différents du stylo et de la munition à l'origine de la trace de question. Or, dans le cas des traces digitales, l'inter-variabilité entre donneurs est trop importante pour permettre l'utilisation de modèles généraux. Il est donc essentiel que le matériel de comparaison provienne de la même source que la trace de question. Il en va de même pour l'estimation de l'âge relatif de plusieurs traces digitales apposées par différentes personnes, car cette approche, fréquemment utilisée pour les encres notamment (Weyermann 2008), mais également pour les résidus de tir (Andersson 1999) et les traces de sang (Edelman 2014), nécessite l'utilisation de modèles généraux.

3.2 Comparaison de deux hypothèses temporelles alternatives

Le type d'approche présenté ci-dessus permet d'obtenir un intervalle temporel pouvant s'avérer utile tout au long d'une investigation. Toutefois, lorsque différents scénarios expliquant les faits sont avancés (dans un cadre investigatif ou judiciaire), il peut également s'avérer intéressant de comparer deux hypothèses temporelles alternatives provenant de ces scénarios. Cette comparaison peut s'effectuer de différentes manières, notamment en adoptant une approche probabiliste basée sur le calcul d'un rapport de vraisemblance (LR pour *likelihood ratio* en anglais). Ce type d'approche permet d'évaluer la probabilité d'un événement ou d'un résultat (par exemple, la valeur du paramètre de vieillissement obtenu pour la trace de question suite à son analyse) selon deux hypothèses alternatives appelées H_a (hypothèse de «l'accusation») et H_d (hypothèse de «la défense»):

- H_a : la trace digitale a été déposée au moment du crime (exemple $t=5$ jours ou $t=4$ à 6 jours)
- H_d : la trace digitale a été déposée avant le crime de manière légitime (exemple $t=19$ jours ou $t>19$ jours)

Le rapport de ces deux probabilités est ainsi appelé LR et permet de déterminer quantitativement sous laquelle des deux hypothèses le résultat obtenu est le plus probable. Il est à noter ici que les hypothèses peuvent prendre la forme d'un âge fixe ou d'un intervalle d'âges. De plus, cette approche permet également d'englober l'évaluation d'autres éléments, tels que les facteurs d'influence (Aitken et Taroni 2004; Taroni, Bozza et al. 2010; Gallidabino, Weyermann et al. 2013).

En science forensique, l'approche probabiliste a déjà été fréquemment proposée, notamment dans le processus d'identification de traces digitale (Champod et Evett 2001). Concernant la datation des traces, une interprétation probabiliste discrète basée sur un calcul de LR a précédemment été rapportée concernant les encres (Weyermann, Schiffer et al. 2008; Weyermann, Almog et al. 2011). Une publication sur la datation du tir d'armes à feu par l'analyse des résidus présents dans les douilles propose également le calcul d'un LR en se basant sur des modèles de régression considérant une distribution normale des résultats obtenus pour chaque âge mesuré (Gallidabino, Weyermann et al. 2013).

En s'inspirant de ces travaux, un exemple d'application est donc proposé ci-dessous pour l'estimation de l'âge des traces digitales, en utilisant des hypothèses d'âge fixe pour simplifier le propos. Quel que soit le type de modèles utilisé pour

Âge des traces de comparaison [jours]	Air (Squal) / Air (Chol)				Estimateurs	
	T1	T2	T3	T4	μ	σ^2
0	124	134	177	114	137	783
1	127	120	93	116	114	224
5	82	64	86	78	77	96
10	46	23	51	36	39	151
14	37	11	30	3	20	251
19	30	6	12	6	14	121
30	n.a.	8	5	3	5	6

Table 2: Exemple de données obtenues suite à l'analyse GC/MS de traces digitales d'âges différents (0 à 30 jours) et de répliques pour chaque âge (T1 à T4). Ces traces étaient déposées sur du papier. La moyenne (μ) et la variance (σ^2) du paramètre de vieillissement Air(Squal)/Air(Chol) sont les estimateurs définissant la loi normale associée à ces données (provenant de Weyermann et al. (2011)).

représenter le vieillissement des traces de comparaison, les valeurs du paramètre de vieillissement choisi (par exemple, le rapport des airs des pics du squalène et du cholestérol) seront calculées pour plusieurs traces d'âges différents avec des répliques pour chaque âge. Si les données montrent une adéquation à une loi mathématique telle qu'une loi normale, il s'agit alors d'estimer la moyenne (μ) et la variance (σ^2) des valeurs obtenues pour le paramètre de vieillissement selon l'âge des traces (voir Table 2).

Ainsi, pour un résultat donné y_0 obtenu par l'analyse de la trace de question, il est possible d'obtenir la fonction de densité de probabilité pour chacune des hypothèses H_a et H_d préalablement définies (Equation 5). Le LR peut ensuite être calculé selon l'Equation 6 (Jackson 2000; Aitken et Taroni 2004; Gallidabino, Weyermann et al. 2013).

$$f(y_0 | \mu_{Hi}, \sigma_{Hi}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{Hi})^2}{2\sigma_{Hi}^2} \right] \quad (Eq. 5)$$

$$LR = \frac{P(y_0 | H_a)}{P(y_0 | H_d)} = \frac{f(y_0 | \mu_{H_a}, \sigma_{H_a}^2)}{f(y_0 | \mu_{H_d}, \sigma_{H_d}^2)} \quad (Eq. 6)$$

Pour un résultat $y_0 = 60$ obtenu suite à l'analyse de la trace de question et en considérant les hypothèses d'âge fixe données en exemple ci-dessus $H_a=5$ jours et $H_d= 19$ jours, alors:

$$LR = \frac{f(y_0=60 | \mu_{5j}=77, \sigma_{5j}^2=96)}{f(y_0=60 | \mu_{19j}=14, \sigma_{19j}^2=121)} = \frac{9 * 10^{-3}}{6 * 10^{-6}} = 1500 \quad (Eq. 7)$$

Ce résultat signifie qu'il est 1500 fois plus probable d'obtenir un rapport de l'air du pic du squalène sur celui du cholestérol $y_0 = 60$ si la trace de question est âgée de 5 jours (H_a) que si elle est âgée de 19 jours (H_0). Ce résultat correspond à l'estimation de l'âge absolu obtenue précédemment (trace âgée de 2 à 10 jours).

Une approche probabiliste basée sur le calcul d'un LR et liée à la construction d'un modèle de vieillissement permet donc d'évaluer la force probante d'une hypothèse par rapport à une autre, et peut également être utilisée de manière complémentaire à l'estimation d'un âge absolu. A noter que tout comme pour l'estimation d'un âge absolu, cette approche nécessite la récolte de matériel de comparaison provenant de la personne à la source de la trace de question et comporte également quelques autres limitations. En effet, si les hypothèses quant à l'âge de la trace sont vagues ou changent radicalement, il peut s'avérer nécessaire de prélever des traces de comparaison supplémentaires et de conduire un nombre plus élevé d'analyses afin d'obtenir un modèle adapté. Pour contourner ce problème, la proposition de construire un modèle de régression paramétrique non linéaire a été faite dans le cadre de la datation des résidus de tir (Gallidabino, Weyermann et al. 2013). Un tel modèle peut être combiné à une approche bayésienne et permet de décrire la relation entre deux variables (dans notre cas, ces variables étant le paramètre de vieillissement choisi et le temps) quelles que soient les hypothèses soulevées, sans nécessiter une récolte supplémentaire de traces de comparaison. Des développements sont encore nécessaires avant l'application d'un tel modèle dans la pratique, puisqu'il s'agit de l'entraîner à l'aide d'un grand nombre de données que la recherche doit encore collecter, dans le domaine des résidus de tir et des encres, tout comme dans celui des traces digitales. Toutefois, ces développements peuvent s'avérer très intéressants pour l'estimation de l'âge des traces et sont à considérer comme perspectives futures dans ce domaine.

4. Considérations pratiques

Les chapitres précédents décrivent les composés cibles intéressants ainsi que la manière de représenter leur vieillissement et d'estimer l'âge de traces digitales. La présente section aborde maintenant précisément les étapes pratiques à effectuer dès la découverte d'une trace de question. Ces étapes sont résumées dans la Figure 5.

4.1 Trace de question (spécimen)

Tout d'abord, avant toute analyse, il s'agit de déterminer si la question de la datation est bel et bien pertinente dans le cas d'espèce. En effet, l'estimation de l'âge d'une trace digitale nécessitant des analyses chimiques pouvant prendre du temps et impliquant un coût non-négligeable, il est raisonnable de considérer que ces analyses seront conduites uniquement dans des cas spécifiques et selon le contexte et les moyens à disposition. A noter que, dans n'importe quel cas, si aucune explication légitime quant à la présence des traces digitales ne peut être apportée, la tentative de datation des traces digitales ne sera sans doute pas

nécessaire (Margot 2014). De plus, le type de datation proposée se basant sur l'analyse de composés cibles disparaissant dans le temps, elle doit préférentiellement être conduites sur des cas récents, et non pas sur des «cold cases» datant de plusieurs années puisque les composés cibles auront probablement complètement disparus. La recherche doit encore déterminer jusqu'à quel laps de temps il est possible de détecter ces composés. A l'heure actuelle, concernant les composés lipidiques, ce laps de temps est de l'ordre de deux à trois mois. Il s'agit donc d'utiliser les informations contextuelles à disposition afin de déterminer rapidement si une estimation de l'âge de la trace de question est possible et nécessaire.

Ensuite, il s'agit de déterminer si le support sur lequel la trace se trouve et les conditions environnementales permettent une analyse chimique. S'il s'agit d'un support poreux ou non poreux standard (papier, verre ou métal), l'analyse est possible. S'il s'agit d'un plastique ou de surfaces semi-poreuses, la recherche doit encore se prononcer sur les possibilités d'analyses. Quant aux conditions environnementales, si l'objet se trouve à l'intérieur, les analyses sont envisageables, alors que s'il se trouve à l'extérieur, les données manquent encore à ce sujet.

Si l'analyse chimique peut être conduite, la possibilité d'estimer l'âge d'une trace digitale de question devient donc réelle. Toutefois, il est considéré ici que généralement, la datation interviendra suite aux questions habituelles d'identification. Cela signifie qu'avant l'analyse chimique de la trace, la révélation de cette dernière aura pu avoir lieu. Les techniques de révélation devront donc être choisies avec soin. S'il s'agit de cyanoacrylate ou de poudres, les analyses ne semblent pas problématiques. Si une technique de révélation implique de baigner l'objet dans un solvant, des pertes de composés sont par contre observables (Koenig, Girod et al. 2011). Il s'agit donc d'effectuer un seul bain rapide dans la solution. Des données plus précises sur le sujet seraient toutefois encore utiles. C'est pourquoi, si la trace est visible et identifiable en l'état, il est préférable de n'appliquer aucune technique de révélation avant les analyses chimiques. De plus, entre chaque étape et à la fin des étapes permettant l'identification de la trace, cette dernière devrait être conservée au congélateur dans l'obscurité afin de stopper le vieillissement des composés cibles, comme cela est proposé dans les cas de datation des encres.

Enfin, lorsque les étapes permettant l'identification de la trace ont été menées à bien, cette dernière peut être analysée par GC/MS ou FTIR. Selon le substrat sur lequel la trace de question est déposée et selon la nécessité de conserver cette trace, la technique la plus adéquate sera sélectionnée, sans oublier la possibilité de les appliquer en séquence (voir Table 1). Quelle que soit l'analyse choisie, il s'agit ensuite d'extraire les paramètres de vieillissement appropriés. En l'état actuel des recherches, le rapport entre l'air du pic du squalène et l'air du pic du cholestérol pour les analyse GC/MS et les valeurs des zones 3020-2760 cm^{-1} , 1800-1500 cm^{-1} et 1290-650 cm^{-1} traitées en absorbance pour les analyses FTIR représentent les paramètres de vieillissement les plus prometteurs.

4.2 Matériel de comparaison

Une fois la trace de question analysée, il est nécessaire de confronter ce résultat avec du matériel de comparaison afin de pouvoir se prononcer sur son âge. Il n'est

pas envisagé ici d'utiliser les données de recherche récoltées sur des donneurs ne correspondant pas à la personne ayant laissé la trace, puisque l'inter-variabilité élevée de la composition des traces digitales rendrait cette approche peu fiable. Les données de recherche sont principalement utiles pour déterminer les conditions dans lesquelles une estimation de l'âge peut être tentée, mais ne peuvent pas être utilisées pour estimer cet âge à proprement parler. De ce fait, il est nécessaire d'avoir identifié et localisé la personne à l'origine de la trace afin de permettre la récolte de matériel de comparaison pertinent. Cette identification aura lieu grâce à la trace elle-même en utilisant par exemple une base de données (telle qu'AFIS) ou grâce à d'autres informations d'enquête conduisant à l'identification de suspects dont les empreintes pourront être comparées avec la trace de question.

Ce matériel de comparaison doit être récolté sur un support similaire au support original et est constitué de deux sets de traces digitales différents:

- **«Composition initiale»:** ce set doit être prélevé afin de pouvoir évaluer l'intra-variabilité de la composition initiale des traces du suspect (analyses à temps $t=0$). Au vu des recherches en cours, trois à six récoltes réparties sur quatre semaines à raison de trois traces digitales par dépôt (pour un total de 9 à 18 traces) devraient être effectuées.
- **«Vieillessement»:** ce set doit être récolté afin d'étudier le vieillissement durant la période pertinente selon les conditions du cas (analyses au temps $t>0$). Si possible, il s'agit d'analyser un large panel d'âges afin de maximiser les chances de pouvoir répondre au mandant. Un vieillissement de l'ordre de deux à trois mois serait donc idéal. L'intervalle entre les âges analysés doit être plus rapproché au début du vieillissement. Il est donc conseillé d'analyser des traces de comparaison de 0, 1, 2, et 3 jours, puis de continuer avec un intervalle de 5 jours. Enfin, un nombre minimum de trois traces par âge est nécessaire. Par contre, si une évaluation par hypothèses alternative est envisagée, il peut être suffisant de récolter des traces uniquement pour les âges mis en cause par les hypothèses énoncées (avec, si possible, un nombre plus élevé de répliques).

Comme vu précédemment, différents facteurs d'influence affectent la composition et le vieillissement des traces digitales (Figure 1). Les paragraphes ci-dessus ont montré qu'il est possible de contourner les effets des «caractéristiques des donneurs» et de la «nature du substrat» en faisant déposer des traces de comparaison par le suspect à l'origine de la trace de question sur un support similaire. Toutefois, il reste encore les effets non contrôlables des «conditions de dépositions», telles que la pression lors du dépôt, des «conditions de stockage» de la trace de question, telles que la température ou l'humidité ainsi que de l'application de techniques de révélation. Il s'agit donc d'évaluer les conditions plausibles d'après les informations contextuelles du cas et de récolter plusieurs sets «vieillessement» pour chaque condition jugée pertinente. La recherche doit toutefois encore déterminer les limites d'applicabilité de modèles englobant différentes conditions. Il est en effet possible que l'incertitude liée à de tels modèles soit trop élevée et que la datation de traces digitales devienne impossible si le contexte du cas ne peut pas être précisé.

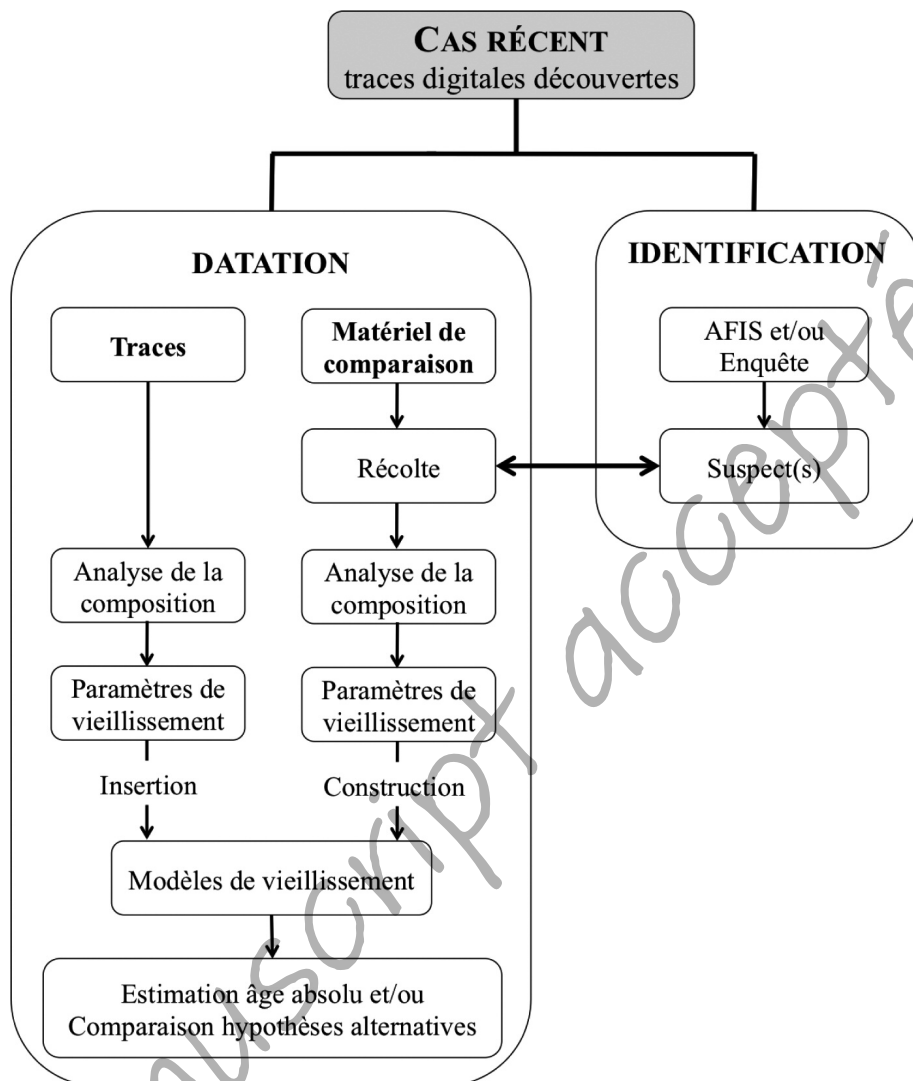


Figure 5: Approche formelle de datation des traces digitales à appliquer dans des cas spécifiques selon le contexte et les moyens à disposition. L'identification et la datation sont envisagées parallèlement. La datation passe par l'analyse de la composition des traces (par exemple par GC/MS ou FTIR) afin d'en extraire des paramètres de vieillissement. Ceux-ci sont ensuite insérés dans un modèle de vieillissement construit à partir du matériel de comparaison collecté. Ceci est possible uniquement si le suspect à l'origine de la trace a été identifié et localisé. L'information temporelle ainsi fournie peut prendre la forme d'une estimation d'âge absolu associé à un intervalle de confiance et/ou d'une comparaison de deux hypothèses alternatives.

Lorsque les traces de comparaison sont récoltées et atteignent l'âge ciblé, elles sont analysées avec la même technique analytique que celle utilisée pour l'analyse de la trace de question (par exemple la GC/MS ou la FTIR). Les mêmes paramètres de vieillissement sont ensuite extraits et utilisés afin de construire un modèle de vieillissement approprié (par exemple, des courbes de régression ou des modèles PCA). Ces modèles permettent d'étudier la stabilité et reproductibilité du vieillissement des traces. Si ces paramètres sont fiables, le matériel de comparaison peut alors être utilisé dans l'estimation de l'âge de la trace de question. Cette estimation peut passer par le calcul d'un âge absolu associé à un intervalle de confiance et/ou la comparaison d'hypothèses alternatives. Dans le cas contraire, si la composition initiale est très variable ou que les paramètres de vieillissement ne correspondent à aucune régression ou ne donnant aucune séparation pertinente par PCA, une évaluation de l'âge de la trace de question ne sera pas possible.

5. Conclusion

Cet article propose, pour la première fois, une formalisation du problème de datation des traces digitales, qui pourrait conduire, à terme, à un consensus quant au traitement de ce type de cas et à une meilleure orientation de la recherche dans le domaine. Cette approche a été développée sur la base de résultats de recherches impliquant l'analyse de composés lipidiques endogènes à l'aide de GC/MS ou FTIR, dans le but d'aider l'enquête (aspect «*investigatif*») et/ou de servir de preuve lors d'un jugement (aspect «*judiciaire*»). Ces analyses ont permis de définir des paramètres de vieillissement pouvant être utilisés dans le développement de modèles d'estimation de l'âge d'une trace. Sur la base de ces modèles, le scientifique en charge de l'analyse de la trace de question peut alors formuler une réponse quant à l'âge de cette dernière. Cette réponse peut prendre la forme d'une estimation d'âge absolu associé à un intervalle de confiance et/ou d'une comparaison de deux hypothèses temporelles alternatives au travers du calcul d'un LR par exemple.

A l'heure actuelle, cette approche de datation ne serait envisageable que dans le cadre de cas récents dont les traces digitales ne datent pas de plus de deux à trois mois et ont été déposées à l'intérieur sur du papier, du verre ou du métal. Idéalement, un minimum de techniques de révélation devrait avoir été appliquées avant l'analyse afin de préserver les composés cibles présents dans les traces de question. De plus, comme les paramètres de vieillissement identifiés considèrent uniquement les sécrétions sébacées, cette approche n'est actuellement pas applicable à des traces majoritairement eccrines. Enfin, il est essentiel de construire les modèles de vieillissement sur la base de traces de comparaison provenant de la personne à l'origine des traces de question, car l'inter-variabilité des traces digitales est trop importante pour considérer des modèles généraux. Cette personne doit donc avoir été identifiée et être à disposition des enquêteurs afin de pouvoir considérer l'application pratique de cette approche. Ces éléments représentent les

limites d'application actuelles principales de la datation des traces digitales et doivent absolument être considérés dans la pratique afin d'éviter des analyses inutiles ou biaisées.

Des études supplémentaires quant au choix des composés cibles, des techniques analytiques et des modèles de vieillissement doivent encore être menées afin de déterminer notamment dans quelle mesure des supports supplémentaires, des traces plus âgées ou eccrines pourraient également être considérés. Les modèles de vieillissement proposés doivent également être testés sur différents donneurs et dans des conditions réalistes tenant compte de l'impact de différents facteurs d'influence. De plus, tout laboratoire devra valider ses méthodes et procédures en accord avec son système de gestion de qualité avant de proposer un service sur des questions de datation de traces digitales. Enfin, l'entièreté de l'approche devra impérativement être validée par des tests à l'aveugle avant son implémentation pratique. Ces différents aspects de la datation des traces digitales font donc partie intégrante de l'effort de recherche devant encore être fourni dans le domaine.

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes travaillant dans le domaine des traces digitales et du traitement statistique de données à l'École des Sciences Criminelles de l'Université de Lausanne et au Centre for Forensic Science de l'University of Technology de Sydney pour les nombreuses discussions ayant influencé la rédaction de cet article. Les auteurs aimeraient également remercier le fonds national suisse de la recherche scientifique pour son soutien (Fonds no.PP00P1_123358).

Bibliographie

- Aginsky, V. (1996). *Dating and characterizing writing, stamp, pad, and jet printer inks by gas chromatography/mass spectrometry*. International Journal of Forensic Document examiners 2(2): 103-116.
- Aitken, C. G. G. et Taroni, F. (2004). *Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists*. Chichester, England, John Wiley & Sons.
- Andersson, C., Andrasko, J. (1999). *A novel application of time since the latest discharge of a shotgun in a suspect murder*. Journal of Forensic Sciences 44(1): 211-213.
- Andrasko, J., Norberg, T. et Stahling, S. (1998). *Time since discharge of shotguns*. Journal of Forensic Sciences 43: 1005.
- Archer, N. E., Charles, Y., Elliott, J. A. et Jickells, S. (2005). *Changes in the lipid composition of latent fingerprint residue with time after deposition on a surface*. Forensic Science International 154(2-3): 224-239.
- Bailey, M. J., Bright, N. J., Croxton, R. S., Francese, S., Ferguson, L. S., Hinder, S., Jickells, S., Jones, B. J., Jones, B. N., Kazarian, S. G., Ojeda, J. J., Webb, R. P., Wolstenholme, R. et Bleay, S. (2012). *Chemical characterization of latent fingerprints by matrix-assisted laser desorption ionization, time-of-flight secondary ion mass spectrometry, mega electron volt secondary mass spectrometry, gas chromatography/mass spectrometry, X-ray photoelectron spectroscopy, and attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopic imaging: An intercomparison*. Analytical Chemistry 84(20): 8514-8523.
- Bantscheff, M., Schirle, M., Sweetman, G., Rick, J. et Kuster, B. (2007). *Quantitative mass spectrometry in proteomics: A critical review*. Analytical and Bioanalytical Chemistry 389(4): 1017-1031.
- Berry, J. et Stoney, D. A. (2001). *The History and Development of Fingerprinting* in Advances in Fingerprint Technology: H. C. Lee, R. E. Gaensslen, Boca Raton, CRC Press: 1-40.

- Bremmer, R. H., Nadort, A., van Leeuwen, T. G., van Gemert, M. J. C. et Aalders, M. C. G. (2011). *Age estimation of blood stains by hemoglobin derivative determination using reflectance spectroscopy*. *Forensic Science International* **206**(1-3): 166-171.
- Bugler, J. H., Buchner, H. et Dallmayer, A. (2008). *Age determination of ballpoint pen ink by thermal desorption and gas chromatography-mass spectrometry*. *Journal of Forensic Sciences* **53**(4): 982-988.
- Champod, C. et Evett, I. W. (2001). *A probabilistic approach to fingerprint evidence*. *Journal of Forensic Identification* **51**(2).
- Cole, S. (2001). *Suspect identities: a history of fingerprinting and criminal identification*. Harvard University Press.
- Croxton, R. S., Baron, M. G., Butler, D., Kent, T. et Sears, V. G. (2010). *Variation in amino acid and lipid composition of latent fingerprints*. *Forensic Science International* **199**(1-3): 93-102.
- Croxton, R. S., Baron, M. G., Butler, D., Kent, T. et Sears, V. G. (2006). *Development of a GC-MS method for the simultaneous analysis of latent fingerprint components*. *Journal of Forensic Sciences* **51**(6): 1329-1333.
- de Hoffmann, E., Stroobant, V. (2005). *Spectrométrie de masse*. Dunod, Paris.
- Drapel, V., Becue, A., Champod, C. et Margot, P. (2009). *Identification of Promising Antigenic Component in Latent Fingerprint Residues*. *Forensic Science International* **184**(1-3): 47-53.
- Edelman, G., van Leeuwen, T. G. et Aalders, M. C. G. (2012). *Hyperspectral imaging for the age estimation of blood stains at the crime scene*. *Forensic Science International* **223**(1-3): 72-77.
- Edelman, G. J. (2014). *Spectral analysis of blood stains at the crime scene*. PhD., University van Amsterdam.
- Emerson, B., Gidden, J., Lay, J. O. et Durham, B. (2011). *Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry of Triacylglycerols and Other Components in Fingerprint Samples*. *Journal of Forensic Sciences* **56**(2): 381-389
- Frick, A. A., Berryman, D. et Lewis, S. W. (2011). *Mass spectral imaging: a powerful new tool for the study of latent fingerprint chemistry*. *Identification Canada* **September**.
- Fritz, P., van Bronswijk, W., Lepkova, K., Lewis, S. W., Lim, K. F., Martin, D. E. et Puskar, L. (2012). *Infrared microscopy studies of the chemical composition of latent fingerprint residues*. *Microchemical Journal* (0).
- Gallidabino, M., Weyermann, C., Romolo, F. S. et Taroni, F. (2013). *Estimating the time since discharge of spent cartridges: A logical approach for interpreting the evidence*. *Science and Justice* **53**(1): 41-48.
- Gaudreau, M. et Aginsky, V. (2010). *Essentials of the solvent loss ratio method*. 68th Annual Conference of the American Society of Questioned Document Examiners (ASQDE), Victoria, USA.
- Girod, A., Ramotowski, R. et Weyermann, C. (2012). *Composition of fingerprint residue: a qualitative and quantitative review*. *Forensic Science International* **223**(1-3): 10-24.
- Girod, A. et Weyermann, C. (2013). *La datation des traces digitales (partie I): Revue critique*. *Revue internationale de criminologie et de police technique* **66**(3): 364-377.
- Girod, A., Xiao, L., Reedy, B., Weyermann, C., Spindler, X. and Roux, C. *Fingerprint composition and aging: μ -FTIR and FTIR coupled with chemical imaging*. *9th International Fingerprints Research Group meeting (IFRG), Tel-Aviv (IL), June 2013*.
- Girod, A. et Weyermann, C. (2014). *Lipid composition of fingerprint residue and donor classification using GC/MS*. *Forensic Science International* **238**(May): 68-82.
- Helsens, K., Martens, L., Vandekerckhove, J. et Gevaert, K. (2011). *Mass spectrometry-driven proteomics: an introduction*. *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.) **753**: 1-27.
- Hemmila, A., McGill, J., Ritter, D. (2008). *Fourier transform infrared reflectance spectra of latent fingerprints: a biometric gauge for the age of an individual*. *Journal of Forensic Sciences* **53**(2): 369-376.
- Ifa, D. R., Manicke, N. E., Dill, A. L. et Cooks, R. G. (2008). *Latent fingerprint chemical imaging by mass spectrometry*. *Science* **321**(5890): 805.
- Jackson, G. (2000). *The scientist and the scales of justice*. *Science & Justice* **40**(8).
- Keller, B. O., Sui, J., Young, A. B. et Whittal, R. M. (2008). *Interferences and contaminants encountered in modern mass spectrometry*. *Analytica Chimica Acta* **627**(1): 71-81.

- Koenig, A., Bügler, J., Kirsch, D., Köhler, F. et Weyermann, C. (2014). *Ink dating using thermal desorption and gas chromatography / mass spectrometry: Comparison of results obtained in two laboratories*. Journal of Forensic Science In Press.
- Koenig, A., Girod, A. et Weyermann, C. (2011). *Identification of wax esters in fingerprint residues by GC/MS and their potential use as aging parameters*. Journal of Forensic Identification 61(6): 652-676.
- Lambrechts, S. A. G., van Dam, A., de Vos, J., van Weert, A., Sijen, T. et Aalders, M. C. G. (2012). *On the autofluorescence of fingerprints*. Forensic Science International 222(1-3): 89-93.
- Lim, A. Y., Mab, Z., Ma, J. et Rowell, F. (2011). *Separation of fingerprint constituents using magnetic silica nanoparticles and direct on-particle SALDI-TOF-mass spectrometry*. Journal of Chromatography B 879: 2244-2250.
- Mahuzier, G., Hamon, M., Ferrier, D., Prognon, P. (2002). *Chimie analytique, Tome 2*. Masson, Paris.
- Margot, P. (2014). *Traçologie: la trace, vecteur fondamental de la police scientifique*. Revue internationale de criminologie et de police technique LXVII (1): 72-97.
- Miller, J. N. et Miller, J. C. (2005). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry*. Pearson, Prentice Hall.
- Mountfort, K. A., Bronstein, H., Archer, N. et Jickells, S. M. (2007). *Identification of oxidation products of squalene in solution and in latent fingerprints by ESI-MS and LC/APCI-MS*. Anal Chem 79(7): 2650-2657.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S. et Vyvyan, J. R. (2009). *Introduction to spectroscopy: A guide for students of organic chemistry*. 4th edition, Brooks/Cole, Belmont (USA).
- Persin, B., Touron, P., Mille, F., Bernier, G. et Subercazes, T. (2007). *Evaluation de la date d'un tir*. Canadian Society of Forensic Science Journal 40(2): 65-68.
- Reinholz, A. D. (2008). *Albumin development method to visualize friction ridge detail on porous surface*. Journal of Forensic Identification 58(5): 524-539.
- Riches, P. G., Polce, B. et Hong, R. (1988). *Contaminant bands on SDS-polyacrylamide gel electrophoresis are recognised by antibodies in normal human serum and saliva*. Journal of Immunological Methods 110: 117-121.
- Sengoopta, C. (2003). *Imprint of the Raj – How fingerprinting was born in colonial India*. London, Macmillan.
- Tang, H. W., Lu, W., Che, C. M. et Ng, K. M. (2010). *Gold nanoparticles and imaging mass spectrometry: Double imaging of latent fingerprints*. Analytical Chemistry 82(5): 1589-1593.
- Taroni, F., Bozza, S., Biedermann, A., Garbolino, P. et Aitken, C. G. G. (2010). *Data analysis in forensic science: a bayesian decision perspective*. Chichester, England, John Wiley & Sons.
- Van Dam, A., Aalders, M. C. G., van de Braak, K., Hardy, H. J. J., Van Leeuwen, T. G. et Lambrechts, S. A. G. (2013). *Simultaneous labeling of multiple components in a single fingerprint*. Forensic Science International 232(1-3): 173-179.
- Weyermann, C. (2008). *Revue des méthodes de datation de l'encre: Est-il possible de déterminer l'âge d'un document en analysant l'encre?* Revue Internationale de Criminologie et de Police Technique et Scientifique 3 (LXI): 359-376.
- Weyermann, C., Almog, J., Bügler, J. et Cantu, A. A. (2011). *Minimum requirements for application of ink dating methods based on solvent analysis in casework*. Forensic Science International 210(1-3): 52-62.
- Weyermann, C. et Ribaux, O. (2012). *Situating forensic traces in time*. Science and Justice 52(2): 68-75.
- Weyermann, C., Roux, C. et Champod, C. (2011). *Initial Results on the composition of Fingerprints and its Evolution as a Function of Time by GC/MS Analysis*. Journal of Forensic Sciences 56(1): 102-108.
- Weyermann, C., Schiffer, B. et Margot, P. (2008). *A logical framework to ballpoint ink dating interpretation*. Sci Justice 48(3): 118-125.
- Wolstenholme, R., Bradshaw, R., Clench, M. R. et Francese, S. (2009). *Study of latent fingerprints by matrix-assisted laser desorption/ionisation mass spectrometry imaging of endogenous lipids*. Rapid Communications in Mass Spectrometry 23: 3031-3039.

Notes

- 1 FAB: Fast Atom Bombardment, ESI: ElectroSpray Ionisation, APCI: Atmospheric Pressure Chemical Ionisation, MALDI: Matrix Assisted Laser Desorption Ionisation
 - 2 Les molécules d'EC se décrivent par leur nombre de carbones (A) et d'insaturations (B) dans la partie alcool gras et le nombre de carbones (C) et d'insaturations (D) dans la partie acide gras; EC[A:B, C:D].
Les 8 esters de cire sélectionnés sont donc les suivants: EC[3:0,12:0] (laurate d'isopropyle), EC[14:0, 16:1] (palmitoleate de myristyle), EC[14:0, 16:0] (palmitate de myristyle), EC[16:0, 16:1] (palmitoleate de palmityle), EC[16:0, 16:0] (palmitate de palmityle), EC[17:0, 16:1], EC[18:0, 16:1] (palmitoleate de stearyle), EC(20:0, 16:1).
 - 3 (D)ESI: (Desorption) ElectroSpray Ionisation, APCI: Atmospheric Pressure Chemical Ionisation, (M/SA)LDI: (Matrix/Surface Assisted) Laser Desorption Ionisation
 - 4 Présentation orale: Girod, A. and Weyermann, C. Aging kinetic of lipid compounds in fingermark residue: towards the development of a dating technique. *21th international Symposium on the Forensic Sciences of the Australian and New Zealand Forensic Science Society (ANZFSS), Hobart (TAS), September 2012.*
 - 5 La chimiométrie est l'utilisation d'outils mathématiques et statistiques dans le but d'obtenir de l'information à partir de données chimiques (Miller et Miller 2005).
 - 6 La PCA est une technique exploratoire (non supervisées) typique de la chimiométrie et peut être appliquée à pratiquement tout type de données. Elle permet de réduire la complexité d'un jeu de données en calculant un nouveau système de coordonnées ne contenant que les dimensions les plus informatives, dimensions appelées PC_x (les PCs 1-3 étant les plus souvent utilisées) (Miller et Miller 2005).
 - 7 Ce calcul utilise la Loi t de Student permettant de déterminer des intervalles de confiance sur de petits jeux de données (Miller et Miller 2005).
 - 8 Cette classification peut avoir lieu par Soft Independant Modeling of Class Analogies (SIMCA) par exemple, qui est une méthode de classification supervisée permettant d'attribuer une nouvelle observation (la trace de question) à des groupes préexistants (le modèle PCA) avec un taux d'erreur connu (Miller et Miller 2005).
-