UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

L'ANALYSE DE LA DÉGRADATION DES POLYMÈRES UTILISÉS POUR L'IMPRESSION 3D D'ARMES À FEU

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN CHIMIE EXTENSIONNÉE DE
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
MYLÈNE FALARDEAU

JUILLET 2022

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

En 2015, lorsque je me suis lancée dans les études universitaires en commençant mon baccalauréat en chimie (profil criminalistique) à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), j'étais loin de me douter que cela me mènerait aux études supérieures, et encore moins de l'impact que cela aurait dans ma vie personnelle et professionnelle. En effet, lors de cette merveilleuse aventure, j'ai eu la chance de rencontrer et de côtoyer des personnes fabuleuses qui ont chacune fait une différence significative dans mon parcours. Aujourd'hui, je peux être fière de tout le chemin que j'ai parcouru, qui fut parfois escarpé et sinueux, et surtout d'avoir atteint mon objectif initial de devenir spécialiste en balistique au Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale.

Je tiens à commencer mon mémoire en remerciant toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de mes études universitaires, et en particulier à l'accomplissement de mon projet de maîtrise.

Tout d'abord, je remercie mes directeurs de recherche, les Professeurs Benoit Daoust et Cyril Muehlethaler, d'avoir cru en moi et en mon choix de projet de recherche, et surtout de m'avoir guidée tout au long de ce dernier. Je remercie le Professeur Frank Crispino pour nos nombreuses séances de discussion et de réflexion qui furent très utiles à l'élaboration de ce projet, et je le remercie aussi de m'avoir mis en contact avec le département de balistique au LSJML en temps opportuns, ce qui a joué un rôle considérable dans mon avenir professionnel. Je remercie Madame Liv Cadola, Agente de recherche à l'UQTR, pour son aide précieuse lors de la recherche de subventions et de partenaires pour le projet. Je remercie Madame Catarina Leote F. Pio, Commis sénior aux études avancées de l'UQTR, pour son aide et ses judicieux conseils au niveau administratif. Je souhaite aussi adresser un énorme merci à Madame Amy

Gignac, Monsieur Francis Lafontaine et Monsieur Jocelyn Bouchard, Technicien(ne)s de laboratoire à l'UQTR, pour toute l'aide, le soutien et les conseils qu'ils m'ont apportés depuis le début de mon baccalauréat. Je remercie aussi tous mes collègues de classe, sans lesquels l'ambiance et la dynamique n'auraient jamais été les mêmes.

Évidemment, un tel projet n'aurait pu être réalisé sans collaboration. Le Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale (LSJML) a été un partenaire très important, voire essentiel à la réussite de mon projet. Je souhaite donc remercier Monsieur Jean Brazeau, Directeur de la division de criminalistique, d'avoir accepté mes nombreuses demandes et avoir fait en sorte que j'aie accès à tout le matériel et l'équipement nécessaire à la réalisation de mon projet. Je remercie aussi bien évidemment toute l'équipe de la balistique et de la chimie, en particulier Messieurs Manuel Tousignant et Guillaume Arnet, Spécialistes en balistique judiciaire, Messieurs André Tremblay et Steve Tanguay, Spécialistes en chimie judiciaire, ainsi que Mesdames Catherine Maltais, Myriam Desrosiers, Stéphanie Accolas et Marie-Eve Gagné, Techniciennes de laboratoire, de m'avoir partagé leurs connaissances sans hésiter et pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans les parties plus techniques et pratiques du projet.

Un immense merci à Monsieur Paul Barrette, Armurier et propriétaire des compagnies Redd Nobb et Location Snapshots inc., pour la conception et l'impression 3D des canons. Je remercie aussi les différentes personnes des compagnies et services d'impressions 3D qui ont gentiment accepté de me fournir de nombreux échantillons de polymère, soit Monsieur Robert Gagnon, Président de la compagnie Lezar3D inc., Messieurs Thibault Ilié, Responsable de la production, et Olivier Smiljanic, Chef d'entreprise, de la compagnie FABLAB Inc., Monsieur Mario Beaudoin, Chargé de projet informatique et technologique du Service de la Bibliothèque de l'UQTR, et Monsieur Jonathan St-Arnaud, Ingénieur du Département de Génie mécanique de l'UQTR. Sans oublier de remercier les mordus d'impression 3D à la maison qui m'ont

initiée au domaine et fourni eux aussi de nombreux échantillons de polymère, soit Messieurs Sébastien Roberge, Vincent Roy, Isaka Tassile et Tommy Doucet.

Je remercie le Professeur Olivier Delémont et Monsieur Denis Werner, Assistant doctorant, tous deux de l'École des sciences criminelles à l'Université de Lausanne en Suisse, pour le partage de leurs connaissances sur les armes à feu imprimées en 3D et l'accès aux échantillons de leur propre projet de recherche. Je remercie aussi le Professeur Andreas Ruediger de l'Institut national de la recherche scientifique pour le partage de ses connaissances et de ses idées pour mon projet.

J'adresse aussi un immense merci aux organismes subventionnaires m'ayant accordé les précieuses bourses qui m'ont permis de réaliser mon projet et de passer au travers mes années de maîtrise, soit la Fondation de l'UQTR, le Laboratoire de recherche en criminalistique de l'UQTR, le Centre intégré de criminologie comparée et la Fédération canadienne des femmes diplômées des universités. Je remercie aussi les Forces armées canadiennes pour leur soutien financier tout au long de mes études.

Finalement, je remercie mes parents, Paul et Denise, de m'avoir toujours soutenue et encouragée à poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Ma petite sœur Corinne, pour sa présence, son écoute et son soutien ainsi que nos nombreuses séances d'études depuis le début de nos études collégiales. Mes amies Nadia, Béatrice, Laurence et Vanessa de m'avoir accompagnée, chacune à leur façon, durant mes études universitaires, ainsi que mon ami et collègue militaire Jessy de m'avoir écoutée, conseillée et redonné de la motivation à maintes reprises. Mathieu, merveilleux conjoint que tu es, je te remercie de m'avoir toujours encouragée, épaulée, écoutée et aidée, et ce bien souvent au détriment du peu de temps que l'on avait ensemble.

Ce projet n'aurait pu voir le jour sans votre aide à tous, merci.

DÉDICACE

À mes très chers grands-parents,
Thérèse Morin, Victor Falardeau,
Letizia Gherardi et Bernard Salamin.
Vous avez occupé une place très importante
dans ma vie. Je souligne aujourd'hui le rôle
particulier que vous avez joué dans mon
éducation en vous dédiant mon mémoire.
Je vous serai à jamais reconnaissante.
Je vous aime.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES IX

LISTE DES TABLEAUX XVI

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES XVIII

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS XXI

RÉSUMÉ XXIII

ABSTRACT XXV

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I THÉORIE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS 5

1.1 Armes à feu conventionnelles 5

1.2 L'impression 3D 14

1.2.1 Bref historique et principe de base 14
1.2.2 Procédés d'impression 3D 16
1.2.3 Polymères utilisés pour l'impression 3D par FDM 22

1.3 Les armes à feu imprimées en 3D 24

1.3.1 Bref historique et évolution 24
1.3.2 Problématique 30
1.3.3 Cas médiatisés 33
1.3.4 Demandes d'expertises au Québec 35

1.4 Revue de la littérature 36

1.5 Objectifs de recherche 48

CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODE 51

2.1 Microscopie et photographie 51

2.1.1 Stéréomicroscope 51
2.1.2 Microscopie numérique 52
2.1.3 Appareil photo 52

2.2 Analyse instrumentale 52

2.2.1 Spectroscopie infrarouge 53
2.2.2 Spectroscopie Raman 53

2.3 Impression 3D de canons d'arme à feu 54

2.4 Carabine Ruger 10/22 56

2.5 Assemblage des canons imprimés en 3D à la carabine Ruger 10/22 57

2.6 Tirs expérimentaux 59

2.6.1 Munitions 59
2.6.2 Équipement et montage de la salle de tir 59

2.7 Traitement de données spectrales et analyses chimiométriques 60

CHAPITRE III RÉSULTATS ET DISCUSSION 62

3.1 Étude de population 62

3.2 Base de données spectrales des polymères 72

3.2.1 Analyse des spectres infrarouges 74
3.2.2 Analyse des spectres Raman 86

3.3 Analyses chimiométriques des spectres infrarouges et Raman de la base de données de polymère 96

3.3.1 Analyse en composantes principales avec les spectres infrarouges 97
3.3.2 Analyse en composantes principales avec les spectres Raman 99
3.3.3 Pouvoir discriminant 102

3.4 Tirs expérimentaux 108

3.4.1 Traces de polymère générées dans l'environnement 109
3.4.2 Assemblage physique des fragments de polymère 114
3.4.3 Analyse des éléments de munition 115
3.4.4 Vitesse et comportement des projectiles 119

3.5 Analyse de la dégradation des polymères 126

3.5.1 Mécanisme théorique de la dégradation des polymères 126
3.5.2 Dégradation contrôlée des polymères à l'étuve 129
3.5.3 Dégradation des filaments de polymère durant l'impression 3D 133
3.5.4 Analyse spectrale des fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux 135

3.6 Projection de spécimens dans les PCA d'origines effectuées avec les spectres des échantillons de polymère de la base de données spectrales 140

3.6.1 Tests à l'aveugle avec les fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux 140

3.6.2 Test à l'aveugle avec des spécimens de polymère inconnu provenant de cas réels 144

CONCLUSION 148

ANNEXE A LISTE DES ÉCHANTILLONS DE POLYMÈRE DE LA BASE DE DONNÉES 153

RÉFÉRENCES 156

LISTE DES FIGURES

Figures Page

Figure 1.1 Schéma en vue transversale d'un pistolet semi-automatique, image (modifiée) tirée de (Bev Fitchett's Guns, 2021) 7

Figure 1.2 Mécanisme d'éjection de la douille pour un pistolet semi-automatique, image (modifiée) tirée de (Gallusser, 2014; Mezger, Hess, & Hasslacher, 1931) 7

Figure 1.3 Schéma d'une cartouche et de ses différents éléments de munitions, image (modifiée) tirée de (Herdener, Gallusser, Bonfanti, & Margot, 1997) 8

Figure 1.4 Traces observées sur un projectile, a) impresssions de champs et b) impressions de rayures 9

Figure 1.5 Localisation des traces pouvant être observées sur une douille, a) trace du percuteur, b) traces de la tranche de culasse, c) traces de chambre, d) trace d'extracteur et e) trace de l'éjecteur 11

Figure 1.6 Comparaison microscopique des stries dans une impression de champ entre deux projectiles distincts 13

Figure 1.7 Comparaison microscopique des traces de la tranche de culasse entre deux douilles distinctes 13

Figure 1.8 Différents types et catégories d'imprimantes 3D, allant de l'imprimante personnelle, professionnelle à industrielle, images tirées de (ALL3DP, 2020b) 15

Figure 1.9 Les étapes de la modélisation à l'impression 3D d'un objet, figure créée à partir de (ALL3DP, 2020a; Wooten, 2015) 16

Figure 1.10 Procédés d'impression 3D les plus communs, image (modifiée) tirée de (Carew & Errickson, 2020) 17

Figure 1.11 Parties principales d'une imprimante 3D FDM de marque Prusa i3, image (modifiée) tirée de (Les impressions 3D, 2021) 21

Figure 1.12 Armes à feu entièrement imprimées en 3D, a) Liberator, b) Grizzly, c) SongBird, d) Reprringer HEXEN, e) Zig Zag et f) Washbear, images tirées de (DEFCAD, 2021) 26

Figure 1.13 Armes à feu hybrides imprimées en 3D, a) Shuty AP-9 et b) FGC-9 MKI, images tirées de (DEFCAD, 2021) 27

Figure 1.14 Carcasses imprimées en 3D pour un a) pistolet Glock, b) pistolet TEC-9, c) fusil d'assaut Kalachnikov et d) fusil d'assaut AR-15, images tirées de (DEFCAD, 2021) 28

Figure 1.15 Pièces et accessoires imprimés en 3D pour arme à feu, a) silencieux, b) DIAS, c) chargeur, d) embout de chargeur, e) poignée et f) rail pour accessoire, images tirées de (DEFCAD, 2021) 29

Figure 2.1 Canon imprimé en 3D adaptable à une carabine Ruger 10/22, a) modélisation du canon et b) canon imprimé en 3D 55

Figure 2.2 Carabine Ruger 10/22 57

Figure 2.3 Carabine Ruger 10/22, désassemblée 58

Figure 2.4 Canon imprimé en 3D assemblé à la carcasse d'une carabine Ruger 10/22 58

Figure 2.5 Cartouche Winchester Super-X Subsonic, calibre .22 LR 59

Figure 2.6 Schéma du montage de la salle de tirs expérimentaux 60

Figure 3.1 Échantillons de polymère de la collection, a) « avant impression » et b) « après impression » 63

Figure 3.2 Classification des échantillons selon le type de polymère (n = 73) 64

Figure 3.3 Classification des échantillons selon la couleur du polymère (n = 73) 69

Figure 3.4 Structure chimique générale des différents types de polymère de la collection 74

Figure 3.5 Spectres infrarouges des différents types de polymère de la collection. Les deux bandes rouges représentent les zones caractéristique des pigments 76

Figure 3.6 Spectres infrarouges (sept réplicas) de l'échantillon 14a_PETG gris_Filaments.ca, représentant la plus faible intravariabilité obtenue 78

Figure 3.7 Spectres infrarouges (sept réplicas) de l'échantillon 16a_PLA bleu_MakerBot, représentant la plus grande intravariabilité obtenue 79

Figure 3.8 Spectres infrarouges des échantillons de PLA de même marque et modèle (MarkerBot), mais de couleurs différentes (opaque) 81

Figure 3.9 Spectres infrarouges de trois échantillons de TPU de même marque et modèle (Spool 3D), mais de couleurs différentes (translucide) 82

Figure 3.10 Spectres infrarouges des échantillons de PETG noir de marques et modèles commerciaux différents 84

Figure 3.11 Spectres infrarouges des échantillons de PLA orange de marques et modèles commerciaux différents 85

Figure 3.12 Spectres Raman des différents types de polymère de la collection 88

Figure 3.13 Spectres Raman (cinq réplicas) de l'échantillon 14a_PETG gris_Filaments.ca, représentant la plus faible intravariabilité obtenue 90

Figure 3.14 Spectres Raman (cinq réplicas) de l'échantillon 30a_ASA bleu_Stratasy, représentant la plus grande intravariabilité obtenue 91

Figure 3.15 Spectres Raman des échantillons de PLA de même marque et modèle (Filaments.ca), mais de couleurs différentes 92

Figure 3.16 Spectres Raman de PLA transparent et de PLA bleu, ainsi qu'un spectre de référence du pigment bleu PB15. Les encadrés représentent des exemples de a) bandes associées à la structure chimique du polymère et b) bande associée au pigment 94

Figure 3.17 Spectres Raman de PLA transparent et de PLA orange, ainsi qu'un spectre de référence du pigment orange PO64. Les encadrés représentent des exemples de a) bandes associées à la structure chimique du polymère et b) bandes associées au pigment 95

Figure 3.18 Résultats de la PCA effectuée avec les spectres infrarouges des échantillons de polymère de la collection 98

Figure 3.19 Résultats de la PCA effectuée avec les spectres Raman des échantillons de polymère de la collection 100

Figure 3.20 Résultats des PCA itératives effectuées à partir de la PCA principale, a) PCA itérative sur le groupe des échantillons en ABS et b) PCA itérative sur un groupe d'échantillons de PLA (spectres infrarouges) 103

Figure 3.21 Résultats d'une PCA itérative effectuée avec un petit groupe d'échantillons sur la PCA principale (spectres Raman) 104

Figure 3.22 Bris du canon en ABS lors du tir expérimental 110

Figure 3.23 Gros fragments de polymère trouvés au sol à la suite des tirs expérimentaux, a) canon brisé en trois sections principales, b) canon brisé en trois sections principales s'étant fractionnées et c) vue rapprochée de deux gros fragments provenant de la jonction entre la chambre et le canon 112

Figure 3.24 Différents types de petits fragments de polymère s'étant détachés du canon lors des tirs expérimentaux et ayant été trouvés au sol 113

Figure 3.25 Assemblage physique de fragments de polymère, a) fracture longitudinale et b) fractures transversales 115

Figure 3.26 Douilles restées coincées dans la chambre à la suite de la décharge. De gauche vers la droite, il est possible d'observer une douille gonflée et fendue, gonflée et partiellement fendue, puis légèrement gonflée 116

Figure 3.27 Traces balistiques générées sur les douilles lors de la décharge des armes à feu hybrides imprimées en 3D de ce projet, a) trace du percuteur et b) trace partielle de l'extracteur 117

Figure 3.28 Projectile récupéré au sol à la suite des tirs expérimentaux effectués avec les armes à feu hybrides imprimées en 3D..... 118

Figure 3.29 Comportement du projectile lors de son vol, a) nez du projectile pointant vers le haut et b) nez du projectile pointant vers le bas 120

Figure 3.30 Vitesse et énergie cinétique du projectile à la sortie du canon en fonction de sa composition (type de polymère) 123

Figure 3.31 Mécanisme général de la dégradation thermique oxydante des polymères, image (modifiée) tirée de (Crow Polymer Database, 2022) 128

Figure 3.32 Dégradation contrôlée à l'étuve d'un échantillon de PLA soumis à différentes températures pour une période de deux minutes..... 131

Figure 3.33 Dégradation contrôlée à l'étuve d'un échantillon de PETG soumis à différentes températures pour une période de deux minutes..... 132

Figure 3.34 Comparaison des spectres infrarouges d'un échantillon de PETG « avant impression » (25a_PETG noir + fibre carbone_3D Printing Canada) et « après impression » (25b_PETG noir + fibre carbone_3D Printing Canada)..... 134

Figure 3.35 Spectres infrarouges de l'échantillon de polymère 27a_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca utilisé pour l'impression 3D d'un canon, ainsi que de trois fragments de ce canon trouvés au sol à la suite de la décharge (27c1, 27c2 et 27c3) 137

Figure 3.36 Spectres Raman de l'échantillon de polymère 28a_TPU bleu_NinjaTek utilisé pour l'impression 3D d'un canon, ainsi que de deux fragments de ce canon trouvés au sol à la suite de la décharge (28c1 et 28c2) 138

Figure 3.37 Projection des fragments de polymère récupérés à la suite des tirs expérimentaux, dans la PCA d'origine des spectres infrarouges des échantillons de polymère de la base de données 142

Figure 3.38 Projection des fragments de polymère récupérés à la suite des tirs expérimentaux, dans la PCA d'origine des spectres Raman des échantillons de polymère de la base de données 143

Figure 3.39 Projection des spécimens provenant de cas réels, dans la PCA d'origine des spectres infrarouges des échantillons de la base de données (vue agrandie sur un groupe de PLA) 145

Figure 3.40 Projection des spécimens provenant de cas réels, dans la PCA d'origine des spectres Raman des échantillons de la base de données 146

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux Page

Tableau 1.1 Caractéristiques physiques des polymères les plus communs pour l'impression 3D par FDM 24

Tableau 1.2 Traces balistiques conventionnelles pouvant être observées sur les éléments de munitions selon la constitution d'une arme à feu imprimée en 3D. 32

Tableau 2.1 Canons imprimés en 3D adaptables à une carabine Ruger 10/22 56

Tableau 3.1 Classification des échantillons selon la marque de polymère (n = 73) ... 67

Tableau 3.2 Valeurs littéraires de la position des bandes des groupes fonctionnels des polymères de la collection, en spectroscopie infrarouge (Millipore Sigma, 2022; Stuart, 2021; Stuart, 2002) 77

Tableau 3.3 Valeurs littéraires de la position des bandes des groupes fonctionnels des polymères de la collection, en spectroscopie Raman (Adar, 2016; Stuart, 2002; Wolstenholme, 2021) 89

Tableau 3.4 Échantillons différentiables et indifférentiables déterminés à partir des PCA effectuées avec les spectres infrarouges et Raman..... 105

Tableau 3.5 Vitesse et énergie cinétique du projectile à la sortie du canon en fonction de sa composition chimique (type de polymère)..... 122

Tableau 3.6 Description des prélèvements effectués sur les armes à feu et les accessoires imprimés en 3D reçus au LSJML..... 144

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

3D	Trois dimensions
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
ADN	Acide désoxyribonucléique
ASFC	Agence des services frontaliers du Canada
ASA	Acrylonitrile styrène acrylate
ATR	*Attenuated Total Reflectance* (Réflectance totale atténuée)
Ba	Baryum
DART-MS	*Direct Analysis in Real Time - Mass Spectrometry* (Analyse directe en temps réel - Spectrométrie de masse)
DIAS	*Drop-in Auto Sear*
DMLS	*Direct metal laser sintering* (Frittage laser direct de métal)
DTGS	*Deuterated Triglycine Sulfate* (Sulfate de triglycine deutéré)
FDM	*Fused Deposition Modeling* (Dépôt de filament fondu)

FFF	*Fused Filament Fabrication* (Fabrication par filament fondu)
FRP	*Fiber Reinforced Plastic* (Polymère renforcé de fibres)
FTIR	*Fourier Transform InfraRed spectroscopy* (Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier)
GC-MS	*Gas Chromatography - Mass Spectrometry Analysis* (Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse)
G-Code	*Geometric Code* (Code géométrique)
GRC	Gendarmerie royale du Canada
GSR	*Gunshot residues* (Résidus de tir)
IGSR	*Inorganic gunshot residues* (Résidus de tir inorganiques)
LR	Long Rifle
LSJML	Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale
OGSR	*Organic gunshot residues* (Résidus de tir organiques)
Pb	Plomb
PC	*Principal component* (Composantes principales)
PCA	*Principal component analysis* (Analyse en composantes principales)

PC CPE	*Polycarbonate Copolyster blend* (Mélange de polycarbonate et de copolyesters)
PETG	Polyéthylène téréphtalate glycol
PLA	*Polylactic acid* (Acide polylactique)
Rem	Remington
Sb	Antimoine
SEM-EDS	*Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy* (Microscopie électronique à balayage - Spectroscopie à dispersion d'énergie)
SLA	*Stereolithography Apparatus* (Stéréolithographie)
SLS	*Selective Laser Sintering* (Frittage sélectif par laser)
STL	*Standard Tessellation Language*
TD	*Thermal desorption* (Désorption thermique)
TPU	*Thermoplastic polyurethane* (Polyuréthane thermoplastique)
u. a.	Unité arbitraire
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

$	Dollar
%	Pourcentage
~	Environ
+	Addition
x	Multiplication
°C	Degré Celsius
Π	Pi (3.1415)
cm	Centimètre
cm^{-1}	Unité du nombre d'ondes en spectroscopie
E	Énergie
E_k	Énergie cinétique
f	Ouverture d'un objectif photographique
G	Grossissement
g/cm^3	Gramme par centimètre cube
Gn	Grain

J	Joule
J/m	Joule par mètre
J/m^2	Joule par mètre carré
J/mm^2	Joule par millimètre carré
k	Nombre de paires possibles
m	Mètre
m^2	Mètre carré
mm	Millimètre
mm^2	Millimètre carré
MPa	Mégapascal
m/s	Mètre par seconde
mW	Milliwatt
n	Taille de la population
r	Rayon
v	Vitesse

RÉSUMÉ

Les armes à feu imprimées en 3D causent un problème considérable au niveau des enquêtes criminelles, car en plus d'être des « armes fantômes », elles ne produisent pas toutes les traces balistiques conventionnelles normalement utilisées pour identifier l'arme à feu ayant tiré. Cependant, ces armes produisent d'autres types de traces qui leur sont propres, telles que les traces chimiques provenant du polymère utilisé pour imprimer l'arme en question. En effet, lors de la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D, plusieurs petits fragments de polymère peuvent se détacher de l'arme et se répandre dans l'environnement tandis que d'autres peuvent être transférés sur les éléments de munitions. Ces fragments de polymère peuvent être analysés chimiquement pour fournir de l'information très pertinente dans une enquête. La compréhension de ces armes et des traces qu'elles génèrent ainsi que l'interprétation de leur signature chimique sont primordiales afin d'être en mesure de savoir comment exploiter au maximum le potentiel d'informations qu'elles peuvent fournir. Ce projet de recherche se concentre donc sur l'analyse chimique des polymères utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu, en utilisant des méthodes d'analyses simples, efficaces et accessibles, mais surtout non destructives, soit la spectroscopie infrarouge et Raman. Pour ce faire, le projet était divisé en quatre objectifs, soit 1) effectuer une étude de population, 2) concevoir une base de données spectrales des échantillons de polymère, 3) réaliser des tirs expérimentaux avec des armes à feu imprimées en 3D et 4) étudier la dégradation que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes pressions et températures générées lors de la décharge d'une arme à feu.

L'étude de population menée auprès des compagnies d'impression 3D et des particuliers pratiquant l'impression 3D a permis de brosser le portrait de l'utilisation des filaments de polymère en vente sur le marché, en déterminant quels types, marques et couleurs de polymère sont les plus utilisés. L'analyse par spectroscopie infrarouge et Raman des échantillons de polymère récoltés lors de l'étude de population a permis de concevoir une base de données spectrales de la composition chimique des filaments de polymère commerciaux les plus communs. L'analyse et l'interprétation des spectres de la base de données ont permis de déterminer que les filaments de polymère présentent une très faible intravariabilité, mais une très grande intervariabilité provenant entre autres des différents types de polymère et des pigments utilisés pour leur coloration. L'analyse en composantes principales des spectres a permis d'établir que ces deux méthodes de spectroscopie permettent d'obtenir un très bon pouvoir discriminant. Les tirs expérimentaux effectués avec des armes à feu imprimées en 3D

ont permis de reproduire une scène de crime impliquant ce type d'arme à feu et ainsi générer des traces et des résidus de polymère. De plus, cela a permis de confirmer le fait que la vitesse et l'énergie que les projectiles atteignent lors des tirs sont suffisantes pour causer des dommages corporels graves, même s'il y a rupture de l'arme lors de la décharge. L'analyse de la dégradation thermique que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes températures et pressions engendrées par un tir a permis d'établir que la dégradation apparait de façon très localisée et que seulement certains fragments en présentent des signes. La dégradation des polymères n'est donc pas un obstacle dans l'interprétation des résultats et dans la possibilité d'identifier ou de relier des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime. Finalement les tests à l'aveugle effectués avec les fragments de polymère générés lors des tirs et avec des spécimens provenant de cas réels ont permis d'identifier correctement le type de polymère et ainsi prouver l'efficacité et la valeur de la base de données spectrales des échantillons de polymère.

En somme, ce projet a permis d'élargir les connaissances sur ce nouveau type de traces auxquels les forces de l'ordre et les scientifiques sont confrontés. En effet, il est maintenant connu qu'il est possible d'identifier les différents types de polymère utilisés pour l'impression 3D, d'associer les traces de polymère trouvées sur une scène de crime impliquant une arme à feu imprimée en 3D avec les filaments de polymère (la source) ou encore, relier deux ou plusieurs scènes entre-elles par l'entremise de ces traces. De plus, une méthode d'analyse simple et efficace des traces de polymère est proposée et la base de données spectrales des filaments de polymère créée dans ce projet se trouve être un outil de référence très puissant pouvant être utilisé par les différents laboratoires afin de les assister dans un processus de comparaison ou d'identification de spécimens indiciaires.

Mots clés : science forensique, balistique, arme à feu imprimée en 3D, microtrace, polymère, dégradation, spectroscopie infrarouge, spectroscopie Raman, base de données, chimiométrie

ABSTRACT

3D printed firearms cause a considerable problem in criminal investigations because, in addition to being "ghost guns," they do not produce all the conventional ballistic traces normally used to identify the firearm being fired. However, these firearms do produce other types of trace evidence, such as chemical traces from the polymer used to print the firearm in question. Indeed, when a 3D printed firearm is discharged, several small fragments of polymer can be detached from the firearm and spread in the environment while others can be transferred to the ammunition components. These polymer fragments can be chemically analyzed to provide highly relevant information in an investigation. Understanding these weapons and the traces they generate, as well as interpreting their chemical signature is essential to know how to exploit the maximum potential of the information they can provide. This research project therefore focuses on the chemical analysis of polymers used for 3D printing of firearms, using simple, efficient, and accessible, but above all non-destructive analysis methods, namely infrared and Raman spectroscopy. To do this, the project was divided into four objectives: 1) to conduct a population study, 2) to develop a spectral database of polymer samples, 3) to carry out experimental shootings with 3D printed firearms, and 4) to study the degradation that polymers can undergo when subjected to the high pressures and temperatures generated during the discharge of a firearm.

The population study carried out among 3D printing companies and individual practitioners of 3D printing provided an overview of the use of polymer filaments on the market, determining which types, brands and colors of polymer are the most used. Infrared and Raman spectroscopy analysis of polymer filament samples collected during the population study was used to build a spectral database of the chemical composition of the most common commercial polymer filaments. Analysis and interpretation of the spectra in the database showed that polymer filaments exhibit very low intravariability, but very high intervariability due to, among other things, the different types of polymers and the pigments used for their coloring. Principal component analysis of the spectra showed that both spectroscopic methods provide very good discriminating power. Experimental shootings with 3D printed firearms allowed to reproduce a crime scene involving this type of firearm and thus generate polymer traces and residues. Moreover, this confirmed the fact that the speed and energy that the projectiles reach when fired are sufficient to cause serious physical damage, even if the firearm breaks during the discharge. Analysis of the thermal degradation that polymers can be exposed to when they are subjected to the high

temperatures and pressures generated by firing has shown that degradation occurs in a very localized manner and that only certain fragments show signs of it. Polymer degradation is therefore not an obstacle in the interpretation of the results and in the possibility of identifying or linking unknown polymer samples found at a crime scene. Finally, the blind tests performed with the polymer fragments generated during the shootings and with specimens from real cases allowed to correctly identify the type of polymer and thus prove the efficiency and the value of the spectral database of the polymer samples

In summary, this project broadens the knowledge of this new type of trace that law enforcement and scientists are facing. Indeed, it is now known that it is possible to identify the different types of polymers used for 3D printing, to associate the polymer traces found on a crime scene involving a 3D printed firearm with its polymer filaments (the source) or to link two or more scenes together through these traces. Furthermore, a simple and efficient analysis method is proposed to analyze polymer traces and the database of the spectral composition of polymer filaments created in this project is a very powerful reference tool that can be used by different laboratories to assist them in the comparison or identification of specimens.

Keywords: forensic science, ballistics, 3D printed firearm, microtrace, polymer, degradation, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, database, chemometrics

INTRODUCTION

Lorsqu'un crime est commis ou qu'un accident survient (p. ex. un accident routier), plusieurs acteurs sont appelés à se rendre sur les lieux des événements pour en faire la gestion et l'investigation. Le succès de l'investigation repose sur le travail d'équipe entre les enquêteurs, les policiers, le personnel médical, les scientifiques et tout autre spécialiste, qui ont chacun un rôle bien défini à jouer sur la scène. Les policiers seront les premiers à sécuriser et documenter la scène ainsi que de veiller à la préserver le plus possible dans les conditions initiales. Par la suite, c'est l'enquêteur responsable de la scène qui en prendra le contrôle. Quant à eux, les techniciens en scène de crime (alias technicien en identité judiciaire) procèdent à la documentation et la collecte des traces et indices, généralement de nature chimique, physique, biologique ou numérique, qui seront envoyés aux laboratoires d'analyse judiciaires pour des analyses ultérieures. Dans le cas de certaines scènes plus complexes, les spécialistes de domaines spécifiques, tels que la balistique, les incendies/explosions et la morphoanalyse des traces de sang, peuvent être appelés à se rendre sur les lieux pour procéder à une analyse plus approfondie de la scène.

L'investigation de la scène de crime (ou d'accident) est une étape cruciale dans l'obtention des traces et indices qui serviront à reconstruire les événements et tenter de les expliquer. La préservation, la documentation et la collecte des traces doivent donc se faire de façon méthodique, avec rigueur et minutie. De plus, avec la grande quantité d'interactions humaines sur la scène qui augmente le risque de contamination de celle-ci, une attention particulière doit être prise afin de minimiser la perte ou l'altération des traces et indices (Fraser, 2010; Haag & Haag, 2011; Houck, Crispino, & McAdam, 2017).

Dans le cas d'une scène de crime impliquant l'utilisation d'une arme à feu, en plus des autres types de traces indispensables à l'enquête (p. ex. ADN, traces digitales), différents traces et éléments balistiques sont recherchés, tel que l'arme à feu elle-même, des munitions non tirées, des éléments de munitions (p. ex. douille et projectile), des résidus de tir ainsi que des vêtements ou toute autre surface pouvant contenir des résidus de tir. L'analyse de ces traces et éléments apportera de l'information pouvant aider à reconstruire les événements entourant la scène en déterminant (ou en évaluant) par exemple, le type et le calibre de l'arme à feu utilisée, le nombre d'armes à feu impliquées, le nombre de tirs, la distance de tir, les trajectoires de tir et la position du ou des tireurs. Ultimement, l'analyse des éléments de munition peut aussi permettre de relier plusieurs scènes de crime entre elles (s'il y a lieu) et procéder à l'identification de l'arme à feu qui est à la source des éléments de munitions tirés en question (Carrier & Riva, 2014; Gunther & Gunther, 1935).

Avec l'évolution constante de la technologie et l'effort soutenu des criminels pour développer de nouvelles méthodes afin de déjouer la justice (Day & Speers, 2020; Jenzen-Jones, 2015), les policiers et les scientifiques doivent constamment être à l'affût de ces nouveaux développements et être à jour dans leur méthode d'investigation et d'analyse scientifique s'ils veulent être en mesure de rivaliser avec les criminels. La lutte contre la violence faite avec des armes à feu n'échappe pas à ce phénomène. En effet, en mai 2013, Cody Wilson, le fondateur de Defense Distributed (Defense Distributed, 2021) publie sur Internet les premiers plans pour faire l'impression 3D d'une arme à feu, le Liberator (Hays, Ivan, & Jenzen-Jones, 2020; Jenzen-Jones, 2015). Aujourd'hui il existe une grande variété de plans pour faire l'impression 3D de différents types d'armes à feu, de pièces et d'accessoires d'armes à feu (DEFCAD, 2021). Évidemment, au Canada, le Code criminel (Code criminel, 1985) et la Loi sur les armes à feu (Loi sur les armes à feu, 1995) interdisent l'impression 3D d'armes à feu, de pièces et d'accessoires prohibés d'armes à feu, mais il est quand même facile

de se procurer des plans sur Internet. Plusieurs cas récents impliquant l'impression 3D d'armes à feu ont déjà été rapportés au Canada et ailleurs dans le monde.

Les armes à feu imprimées en 3D causent un problème considérable au niveau des enquêtes criminelles et du contrôle des armes à feu, car elles sont difficilement retraçables. En effet, en plus d'être des « armes fantômes[1] », selon leur constitution (arme partiellement ou entièrement imprimée en 3D), elles ne produiront pas toutes les traces balistiques conventionnelles sur les éléments de munitions qui sont normalement nécessaires pour identifier l'arme à feu qui a tiré (Walther, 2015). Cependant, ces armes peuvent produire d'autres types de traces qui leur sont propres, pouvant aider à procéder à cette identification, telles que les traces chimiques provenant du polymère utilisé pour imprimer l'arme en question. En effet, lors d'une décharge avec une arme à feu imprimée en 3D, plusieurs petits fragments et particules de polymère peuvent se détacher de l'arme et se répandre dans l'environnement (Honsberger *et al.*, 2018) tandis que d'autres peuvent être transférés lors du contact physique entre les parties imprimées en 3D de l'arme et les éléments de munitions (Black, Cody, Edwards, & Cizdziel, 2017; Crowe & Rugh, 2017). Dans un contexte d'enquête criminelle, la compréhension et l'interprétation de ces traces et de leur mécanisme de transfert sont essentielles dans le processus de reconstruction des événements.

Ce projet de recherche vise donc à étudier les traces chimiques produites par l'utilisation des armes à feu imprimées en 3D afin de générer davantage de connaissances sur ce nouveau type de traces auxquelles les forces de l'ordre sont confrontées. Cela permettra entre autres de déterminer s'il est possible d'identifier les différents types de polymère utilisés pour l'impression 3D, d'associer les traces de polymère trouvées sur une scène de crime impliquant une arme à feu imprimée en 3D

---

[1] Les « armes fantômes » ou « ghosts guns » sont des armes à feu fabriquées sans numéro de série, ce qui rend difficile pour les forces de l'ordre d'en faire la traçabilité.

avec les matériaux bruts d'impression (la source) ou encore, relier deux ou plusieurs scènes entre-elles par l'entremise ces traces.

Pour ce faire, le projet est divisé en quatre grands objectifs :

1) Effectuer une étude de population auprès des compagnies d'impression 3D afin de déterminer quels polymères sont les plus utilisés pour l'impression 3D (section 3.1);
2) Concevoir une base de données spectrales de la composition chimique des polymères (sections 3.2 et 3.3);
3) Réaliser des tirs expérimentaux avec des armes à feu imprimées en 3D afin de reproduire une scène de crime impliquant ce type d'arme à feu et ainsi générer des traces de polymère (sections 3.4 et 3.6);
4) Étudier la dégradation que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes pressions et températures engendrées par un tir d'arme à feu (section 3.5).

CHAPITRE I

THÉORIE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Dans ce chapitre, la théorie sur les différents aspects de ce projet ainsi que la problématique des armes à feu imprimées en 3D seront abordées. Plus précisément, il sera question des armes à feu conventionnelles et des traces qu'elles peuvent générer sur les éléments de munitions, de l'impression 3D en général ainsi que de l'impression 3D d'armes à feu et de la problématique que cela engendre au niveau des enquêtes criminelles. De plus, une revue de la littérature ainsi que des cas médiatisés et des demandes d'expertises impliquant des armes à feu imprimées en 3D seront présentés. Finalement, les objectifs de recherche de ce projet seront décrits en détail.

1.1 Armes à feu conventionnelles

Afin de bien comprendre comment les traces balistiques sont générées sur les éléments de munitions (c.-à-d. douille et projectile) lors d'une décharge d'arme à feu, il est important d'avoir en tête et de comprendre chacune des étapes du cycle de fonctionnement de l'arme à feu en question.

Pour les pistolets semi-automatiques[2], la séquence de tir générale est la suivante (voir Figure 1.1 et Figure 1.2) :

1) Introduction des cartouches dans le chargeur, suivi de l'insertion du chargeur dans la poignée-pistolet;
2) Chargement de l'arme en tirant la glissière vers l'arrière et en la relâchant par la suite. Cette action entraine la première cartouche du chargeur dans la chambre et arme le système de percussion (le marteau est en position armée);
3) Une pression sur la détente actionne la gâchette, libérant ainsi le marteau qui vient frapper le percuteur;
4) Le percuteur frappe l'amorce contenant des explosifs primaires. L'explosion des explosifs primaires enflamme la poudre propulsive. Combustion de la poudre propulsive et augmentation de la pression des gaz à l'intérieur de la cartouche;
5) Propulsion du projectile dans le canon. À sa sortie du canon et après que la pression a diminué, la culasse s'ouvre (la glissière recule vers l'arrière);
6) L'extracteur, qui est solidaire à la glissière, tire la douille vers l'arrière. Par la suite, le culot de la douille heurte l'éjecteur qui la fait basculer à l'extérieur par la fenêtre d'éjection;
7) En reculant, la glissière arme à nouveau le système de percussion;
8) La glissière est ramenée vers l'avant par le ressort récupérateur, ce qui chambre une nouvelle cartouche. L'arme est prête à faire feu à nouveau (Gallusser, 2014; Walker, 2012).

[2] Pistolet semi-automatique : arme à feu à répétition qui nécessite une pression distincte sur la détente pour chaque tir et qui utilise l'énergie de la décharge pour effectuer une partie du cycle de fonctionnement ou du tir (AFTE, 2013).

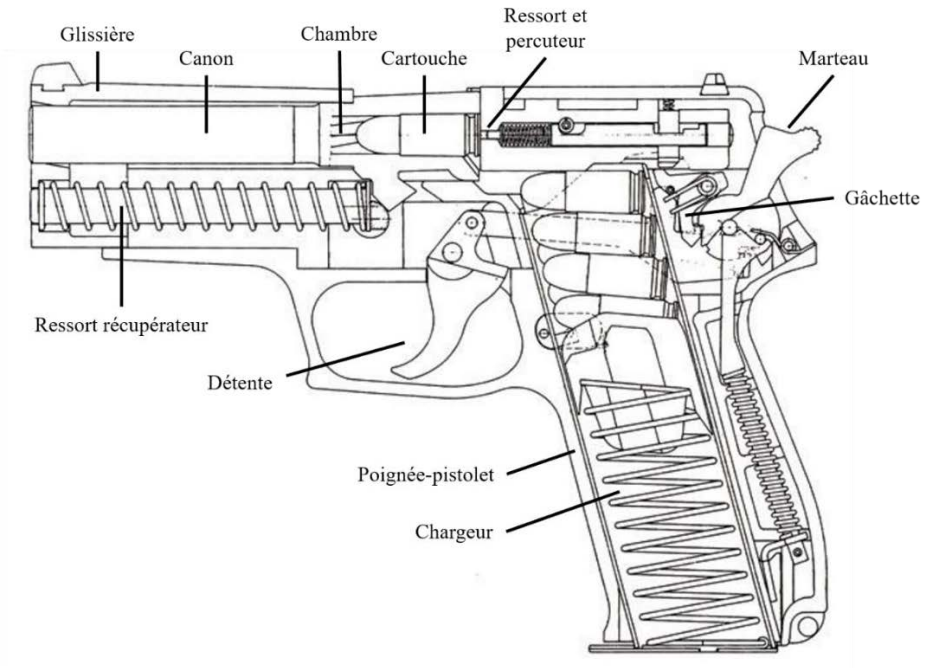

Figure 1.1 Schéma en vue transversale d'un pistolet semi-automatique, image (modifiée) tirée de (Bev Fitchett's Guns, 2021)

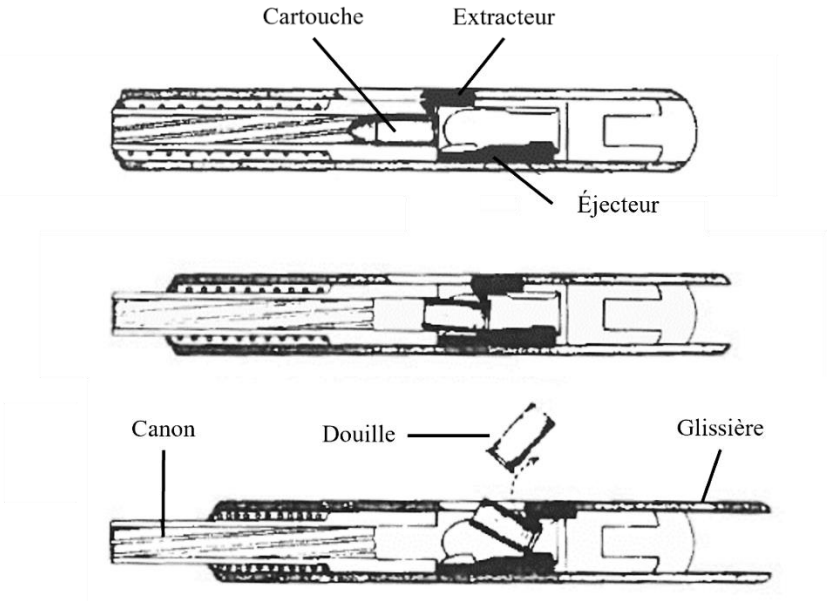

Figure 1.2 Mécanisme d'éjection de la douille pour un pistolet semi-automatique, image (modifiée) tirée de (Gallusser, 2014; Mezger, Hess, & Hasslacher, 1931)

Lors de cette séquence, les éléments de munitions, qui sont généralement fabriqués avec des matériaux moins durs que ceux utilisés pour la fabrication d'une arme à feu, vont recueillir les impressions des parties de l'arme avec lesquelles ils ont été en contact. Ces impressions, qui sont les traces balistiques dites conventionnelles, peuvent être observées sur la surface des projectiles et des douilles (voir Figure 1.3). Le type, la présence, la quantité et la position relative des traces pouvant être générées sur les éléments de munitions (surtout les douilles) lors d'un tir varient énormément, entre autres, en fonction du type et du modèle de l'arme à feu. Les traces décrites ci-après ne constituent donc pas une liste exhaustive, mais elles couvrent une bonne partie des traces principales généralement observées.

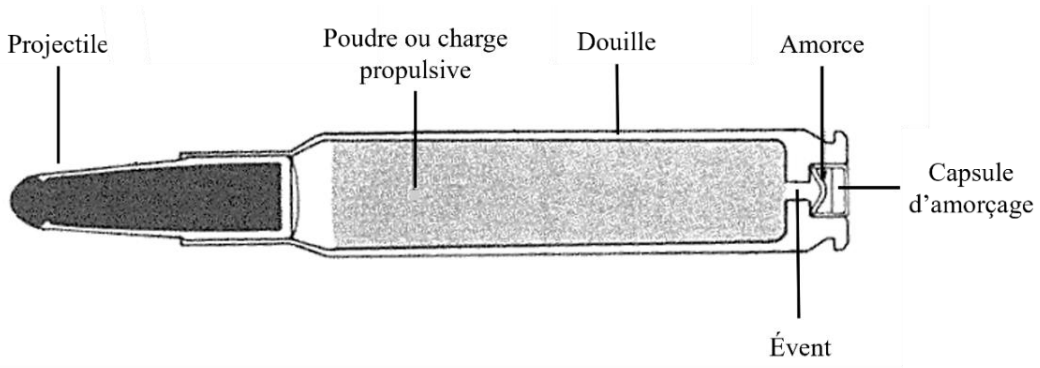

Figure 1.3 Schéma d'une cartouche et de ses différents éléments de munitions, image (modifiée) tirée de (Herdener, Gallusser, Bonfanti, & Margot, 1997)

Pour les projectiles, les traces principales étant générées lors d'un tir proviennent du rayage[3] du canon. En effet, lors du passage du projectile au travers un canon rayé, le contact entre les différentes surfaces va engendrer la formation de traces caractéristiques sur le projectile qui sont en fait les impressions des champs et des rayures du rayage du canon (voir Figure 1.4).

[3] Rayage : rainures hélicoïdales coupées ou formées dans l'âme du canon (surface interne) d'une arme à feu afin de transmettre un mouvement de rotation au projectile lors du tir (AFTE, 2013).

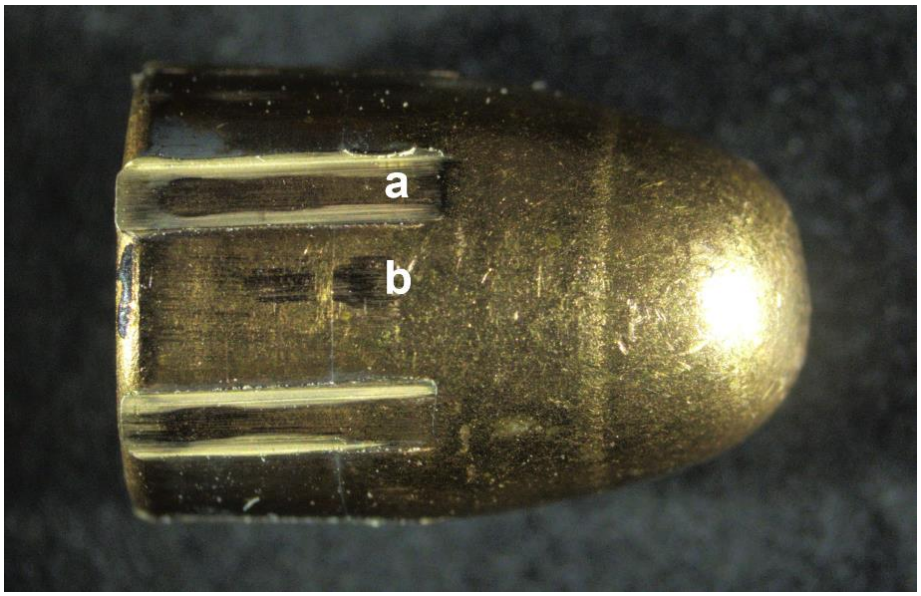

Figure 1.4 Traces observées sur un projectile, a) impresssions de champs et b) impressions de rayures

Pour les douilles, les traces pouvant être générées lors d'un tir sont principalement dues au contact entre la douille et la surface des différentes parties du mécanisme de l'arme lors de la séquence de tir. Généralement, ces traces sont produites lors du passage de la cartouche vers la chambre, lors de la mise à feu ou lors de l'éjection de la douille.

Parmi les traces générées lors de la mise à feu, on compte la trace du percuteur, les traces de la tranche de culasse et les traces de chambre. La trace du percuteur est l'impression produite par le percuteur qui frappe la capsule d'amorçage, qui se trouve au centre du culot de la douille (pour les cartouches à percussion centrale) ou au niveau du bourrelet de la douille (pour les cartouches à percussion annulaire). Les traces de la tranche de culasse proviennent de l'impression des caractéristiques de surface de la tranche de culasse sur le culot de la douille. Cette impression est causée par la forte pression lors d'un tir, ce qui vient encastrer le culot de la douille sur la tranche de culasse. Quant à elles, les traces de chambre se trouvent essentiellement sur le corps de la douille. Les gaz qui sont produits lors du tir provoquent la dilatation de la douille qui vient alors s'encastrer sur la surface de la chambre. Ainsi, lorsque la douille glisse hors

de la chambre lors de son éjection, les caractéristiques de surface de la chambre peuvent être transférées sur le corps de la douille.

Parmi les traces générées lors de l'éjection de la douille, on compte la trace d'extracteur et la trace de l'éjecteur. La trace d'extracteur, qui est normalement située dans la gorge de la douille ou sur la surface supérieure du bourrelet, est produite lorsque le projectile est sorti du canon et que la glissière commence à s'ouvrir (reculer). À ce moment, l'extracteur qui est solidaire à la glissière vient saisir la gorge (ou le bourrelet) de la douille pour la sortir de la chambre en la tirant vers l'arrière. Par la suite, une fois que la douille a parcouru environ les deux tiers de sa course, le culot de la douille vient heurter l'éjecteur et la douille est éjectée à travers la fenêtre d'éjection. Le contact entre l'éjecteur et le culot de la douille génère la trace de l'éjecteur (voir Figure 1.5).

Finalement, bien qu'elles ne soient pas décrites ici, des traces caractéristiques peuvent aussi être générées lors du passage de la cartouche dans la chambre, tel que les traces des lèvres du chargeur et/ou de la rampe d'alimentation (Bonfanti, 1999; Carrier & Riva, 2014).

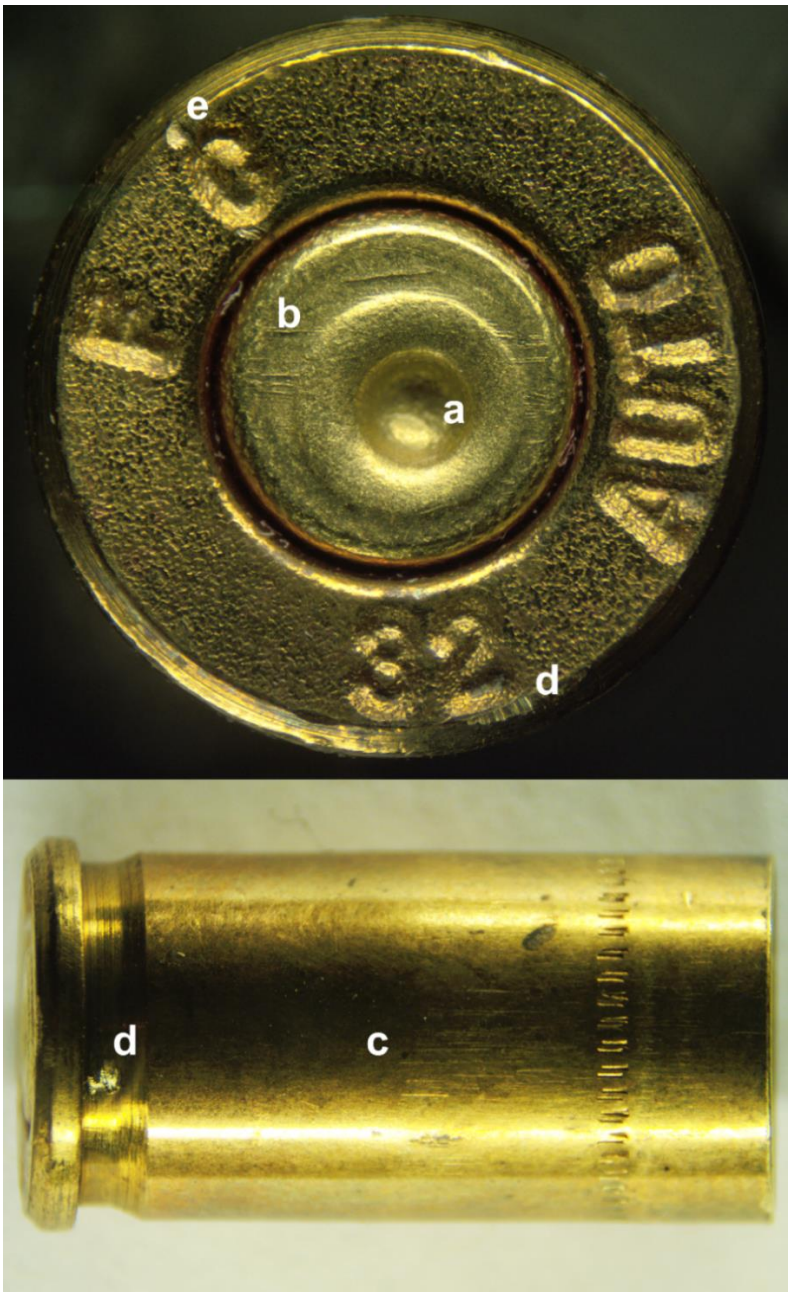

Figure 1.5 Localisation des traces pouvant être observées sur une douille,
a) trace du percuteur, b) traces de la tranche de culasse, c) traces de chambre,
d) trace d'extracteur et e) trace de l'éjecteur

Afin de déterminer si des éléments de munitions ont été tirés par la même arme à feu (même source) et ultimement procéder à l'identification d'une arme à feu, il faut

procéder à la comparaison des traces balistiques sur les éléments de munitions (voir Figure 1.6 et Figure 1.7). Lors du processus de comparaison, les traces observées sont décrites et analysées selon différents niveaux de caractéristiques, soit les caractéristiques de classe, de sous-classe et individuelles[4], afin de déterminer le niveau de ressemblance ou de dissemblance entre les traces présentes sur deux éléments de munition distincts (Carrier & Riva, 2014). Pour établir un lien (ou non) entre deux éléments de munitions, il est important de prendre en considération l'ensemble des éléments disponibles et non pas chacune des traces de façon individuelle. La spécificité d'une arme à feu (signature de l'arme) ou d'une pièce d'arme à feu provient de l'ensemble et de la combinaison de ces traces et ces caractéristiques (Biasotti & Murdock, 1984; Gunther & Gunther, 1935).

Cependant, en ce qui concerne les armes à feu imprimées en 3D en polymère, en fonction de leur constitution (arme entièrement ou partiellement imprimée en 3D), il faut s'attendre à ce qu'elles ne produisent pas toutes les traces balistiques conventionnelles attendues sur les éléments de munitions (sections 1.3.2 et 3.4.3).

---

[4] Caractéristiques de classe : caractéristiques intentionnelles imposées à l'arme par le fabricant, ayant été déterminées avant même la fabrication de celle-ci. Ces caractéristiques sont communes aux armes du même modèle, mais des armes de modèle différent peuvent aussi avoir les mêmes caractéristiques de classe.

Caractéristiques de sous-classe : caractéristiques non intentionnelles, mais commune à un groupe restreint d'armes ou de parties d'armes, qui peuvent être produites pendant la fabrication par le même outil dans le même état approximatif d'usure. Ces caractéristiques ne sont pas uniques mais sont plus restrictives que les caractéristiques de classe.

Caractéristiques individuelles : caractéristique produites de façon unique et accidentelle correspondant à des imperfections ou irrégularités aléatoires produites au cours du processus de fabrication et/ou causées par l'utilisation subséquente de l'arme en question, la corrosion ou les dommages (AFTE, 2013).

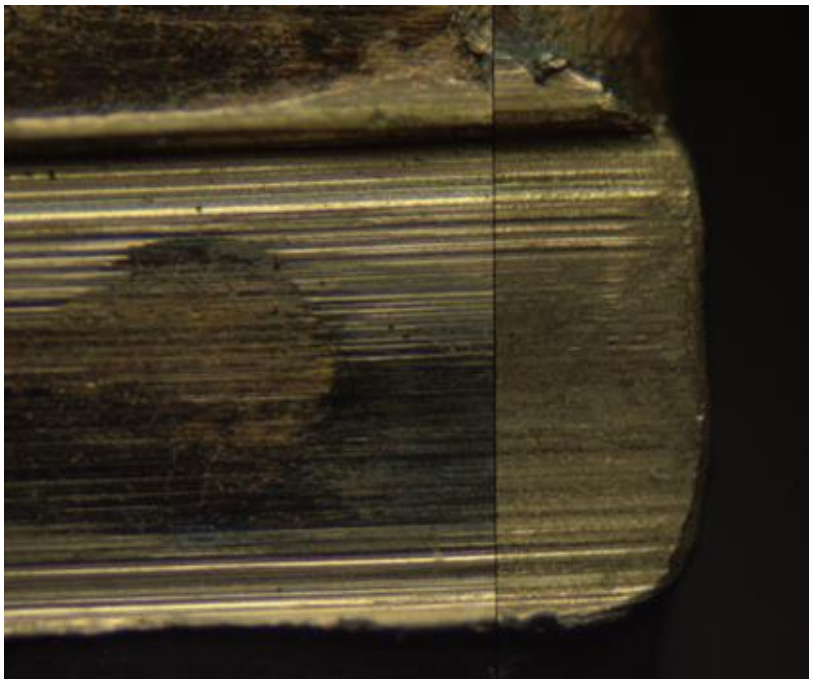

Figure 1.6 Comparaison microscopique des stries dans une impression de champ entre deux projectiles distincts

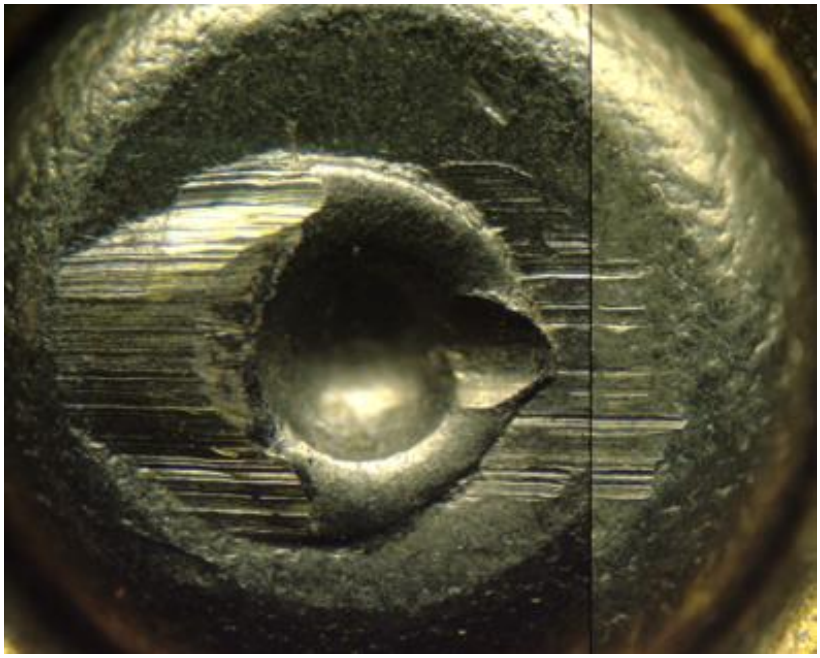

Figure 1.7 Comparaison microscopique des traces de la tranche de culasse entre deux douilles distinctes

1.2 L'impression 3D

1.2.1 Bref historique et principe de base

L'impression 3D, ou fabrication additive, est un procédé de fabrication par ajout ou liage (agglomération) de matière. L'objet ou la pièce est donc formé par l'empilement de couches successives en partant de la base jusqu'au sommet de celui-ci. L'impression 3D permet de créer des pièces spécialisées pouvant être de très petite ou de très grande taille, être composées de formes géométriques très complexes ou encore posséder des mécanismes internes qui ne nécessitent aucun assemblage ultérieur.

L'impression 3D existe depuis plus de 35 ans, mais ce n'est que récemment que les imprimantes 3D personnelles sont devenues vraiment accessibles au grand public. À ces débuts, l'impression 3D était dédiée à un usage beaucoup plus industriel permettant de créer rapidement des outils, des maquettes ou des prototypes. La toute première imprimante 3D a été créée en 1988 par l'ingénieur Chuck Hull, fondateur de l'entreprise 3D Systems. Cette imprimante utilisait le procédé d'impression SLA (*Stereolithography Apparatus*). Cette entreprise est aussi à l'origine du format de fichier STL (*Standard Tessellation Language*), qui est aujourd'hui le format de fichier standard pour l'impression 3D. Dans la même année, Scott et Lisa Crump fondent l'entreprise Stratasys, qui fera breveter l'année suivant le procédé d'impression FDM (*Fused Deposition Modeling*). C'est ce procédé qui est à l'origine des imprimantes 3D personnelles d'aujourd'hui.

Au fil des ans, l'industrie de l'impression 3D s'est énormément développée et diversifiée. Les procédés d'impressions déjà existants ont été améliorés et de nouveaux procédés ont aussi vu le jour. Les imprimantes se sont diversifiées pour répondre à des besoins plus personnels, professionnels ou de production (voir Figure 1.8). De plus, on trouve une grande variété de matériaux tels que les polymères, les métaux, les

céramiques et les matériaux organiques (p. ex. le bois et les matières alimentaires). Aujourd'hui, cette technologie est en pleine expansion et est utilisée dans une grande variété de domaines, tels que la bijouterie, la santé, l'aéronautique, le design, l'art, la mode, l'architecture, l'automobile, le cinéma, l'électronique et l'agroalimentaire. Cette technologie est devenue très accessible au grand public et il est possible de se procurer des imprimantes 3D personnelles pour un prix allant d'environ 400 $ à 4000 $ selon la performance et la qualité de l'imprimante (Berchon & Luyt, 2014; Day & Speers, 2020; Jenzen-Jones, 2015).

Figure 1.8 Différents types et catégories d'imprimantes 3D, allant de l'imprimante personnelle, professionnelle à industrielle, images tirées de (ALL3DP, 2020b)

Peu importe le procédé ou la technique d'impression utilisé, il faut passer par plusieurs étapes afin de convertir une idée de projet à imprimer en un fichier compatible, lisible et prêt pour l'impression 3D (voir Figure 1.9). Tout d'abord, il faut créer ou récupérer un modèle 3D de l'objet que l'on veut imprimer. Pour ce faire, il est possible de le créer par soi-même en utilisant un logiciel de modélisation 3D (p. ex. TinkerCad, SketchUp et Blender), d'utiliser un modèle déjà existant disponible dans les différentes bibliothèques virtuelles (p. ex. TinkerCad, MyMiniFactory et Thingiverse) ou encore

de le générer en numérisant un objet déjà existant avec un scanneur 3D. Ce modèle 3D est ensuite exporté en format STL, qui est le format de fichier universel pour l'impression 3D. Par la suite, la dernière étape avant l'impression est de passer le fichier STL dans un logiciel de découpe (*Slicer*) (p. ex. Ultimaker Cura et ChopChop3D) afin de faire la conversion du modèle d'objet 3D en instructions spécifiques pour l'imprimante. À cette étape, le modèle 3D est découpé en tranches fines et converti en un fichier G-Code, format de fichier lisible par l'imprimante 3D, qui contient toute l'information nécessaire pour réaliser l'impression 3D, soit le positionnement de l'objet, l'épaisseur des couches d'impression, la quantité de matière à déposer, la vitesse de l'extrudeur, la vitesse de déplacement de la buse, la température d'extrusion et du plateau d'impression, la densité de remplissage, l'ajout de supports sous les parties de l'objet qui sont excentrés de la base de l'objet (parties qui sont dans le vide), etc. Finalement, le fichier G-Code peut être exporté vers l'imprimante et l'impression peut commencer (Berchon & Luyt, 2014; Day & Speers, 2020).

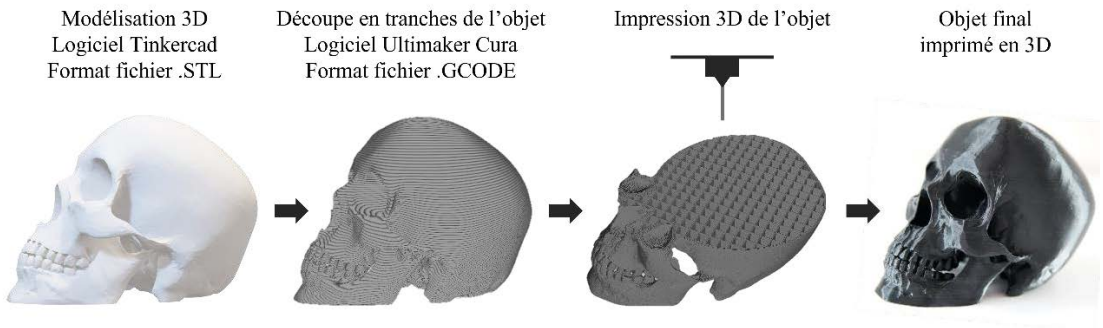

Figure 1.9 Les étapes de la modélisation à l'impression 3D d'un objet, figure créée à partir de (ALL3DP, 2020a; Wooten, 2015)

1.2.2 Procédés d'impression 3D

Il existe plusieurs types de procédés d'impression 3D, qui comportent chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les grandes familles de procédés d'impression 3D sont la polymérisation en cuve, le jet de matière, le liage de poudre (ou fusion de bain de poudre), le jet de liant, le dépôt d'énergie dirigé, la stratification (ou encollage de

papier) et l'extrusion de matière (voir Figure 1.10). Le choix du procédé dépendra de l'utilisation et de l'aspect visuel souhaités pour l'objet, des propriétés requises du matériau et des limites de l'imprimante (p. ex. résolution et taille de l'objet).

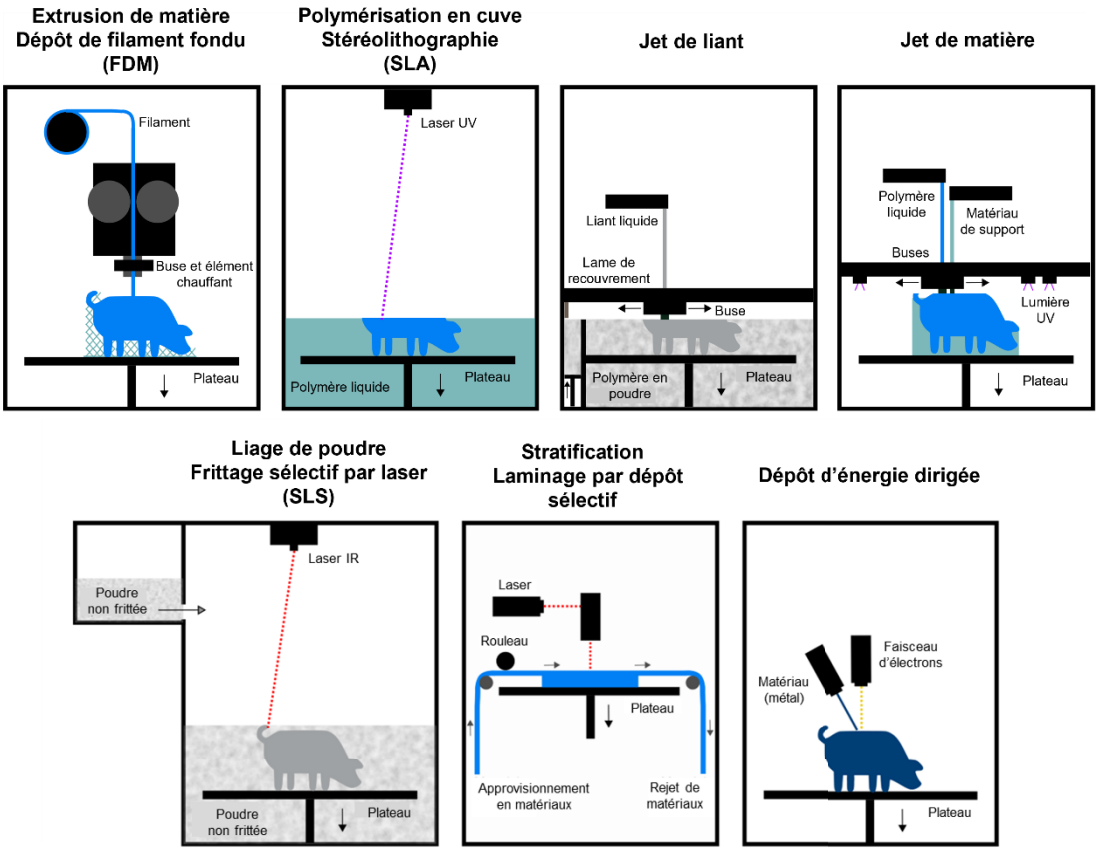

Figure 1.10 Procédés d'impression 3D les plus communs, image (modifiée) tirée de (Carew & Errickson, 2020)

L'impression 3D par polymérisation en cuve (*Vat Polymerization*) regroupe les techniques utilisant des polymères liquides qui se solidifient lorsqu'ils sont exposés à la lumière (photopolymères). Ces procédés sont principalement utilisés au niveau industriel ou professionnel en raison de la complexité du dispositif rendant cette technologie très coûteuse. Par exemple, la stéréolithographie ou SLA (*Stereolithography Apparatus*) utilise un rayon laser ultraviolet mobile qui se déplace pour solidifier de façon sélective le photopolymère liquide se trouvant dans une cuve.

L'impression est construite couche par couche, la plate-forme de construction se déplaçant vers le bas après le durcissement de chaque couche. Tout le processus d'impression se déroule dans une chambre de fabrication (enceinte fermée). Une phase de finition avec des solvants est nécessaire afin de retirer les supports de l'objet. Le processus d'impression est relativement long et le choix des matériaux d'impression est très limité (photopolymères semi-transparents uniquement). Cependant, la SLA offre une très grande précision et qualité d'impression (résolution à partir de 0,05 mm) et permet d'imprimer de très grands objets, ce qui est normalement la limitation principale des imprimantes 3D actuelles. Cette technologie est désormais aussi utilisée pour les imprimantes personnelles, mais ces dernières ne sont pas encore très accessibles en raison de leur coût élevé.

L'impression 3D par jet de matière (*Material Jetting*), comme le PolyJet ou le MultiJet, utilise aussi un photopolymère liquide. Cependant, avec cette technique le photopolymère est projeté sous forme de jets successifs sur un plateau de construction. Le matériau est alors durci au fur et à mesure de l'impression, couche par couche, par un rayon laser ultraviolet. Le grand avantage de cette technique est que plusieurs matériaux ayant des caractéristiques bien différentes peuvent être utilisés simultanément pour fabriquer un même objet en une seule impression. De plus, les matériaux de support sont hydrosolubles et s'enlèvent donc très facilement, comparativement à ceux utilisés pour la SLA qui nécessitent un traitement chimique (Berchon & Luyt, 2014; Carew & Errickson, 2020; Day & Speers, 2020; ISO/ASTM, 2015; Jenzen-Jones, 2015).

L'impression 3D par liage de poudre ou fusion de bain de poudre (*Powder Bed Fusion*) utilise des matériaux solides sous forme de fines particules de poudre qui seront fusionnées selon différentes techniques afin de créer l'objet. Ce sont des procédés offrant une bonne précision d'impression et la plupart sont économes en termes de matériau (la poudre n'ayant pas été fusionnée peut être réutilisée). De plus, il est

possible d'utiliser une grande variété de matériaux tels que la poudre de polymère, de verre, de céramique et de métal. Cependant, puisque le matériau utilisé pour l'impression est sous forme de poudre, la finition de la pièce est d'apparence sableuse ou rugueuse. Ces techniques sont utilisées majoritairement dans les domaines industriels ou professionnels. Par exemple, le frittage sélectif par laser ou SLS (*Selective Laser Sintering*) utilise une chambre de fabrication fermée dans laquelle un réservoir permet de préchauffer le matériau utilisé juste au-dessous de sa température de fusion. Une couche très mince de poudre est étalée par un rouleau sur la plate-forme de construction et un laser fusionne de manière sélective les fines particules de poudre, couche par couche. La construction de l'objet est soutenue par le matériau en poudre non fritté, ce qui permet de construire des caractéristiques telles que des bords en surplomb sans l'utilisation de supports.

L'impression 3D par jet de liant (*Binder Jetting*) utilise une chambre de fabrication à température contrôlée dans laquelle le matériau, aussi sous forme de poudre, est étalé en une fine couche sur la plate-forme de construction par une lame de recouvrement. La poudre est par la suite liée de manière sélective, couche par couche, à l'aide d'un jet de liant liquide. Comme pour le SLS, l'utilisation de support n'est pas requise. Après l'impression, l'objet doit rester encapsulé dans la poudre quelque temps afin de durcir et une étape de post-traitement est presque tout le temps nécessaire. En revanche, grâce à l'enceinte tempérée et la grande taille des imprimantes, cette technique permet d'éliminer la déformation dimensionnelle de l'objet pouvant être causée par les variations de température ambiante ainsi que d'imprimer de gros objets (ou une grande quantité d'objets en même temps) (Berchon & Luyt, 2014; Carew & Errickson, 2020; Day & Speers, 2020; ISO/ASTM, 2015; Jenzen-Jones, 2015).

L'impression 3D par dépôt d'énergie dirigée (*Directed Energy Deposition*), utilise une source d'énergie élevée, telle qu'un laser ou un faisceau d'électrons, pour solidifier de la poudre de métal dans un système sous vide. Le matériau est fusionné en même temps

qu'il est déposé sur la plate-forme de construction, couche par couche. Il s'agit d'une technique très rapide et précise et les métaux utilisés sont réputés pour leur robustesse et leurs propriétés thermiques (Berchon & Luyt, 2014; Carew & Errickson, 2020; Day & Speers, 2020; ISO/ASTM, 2015).

L'impression 3D par stratification ou encollage de papier (*Sheet Lamination*) utilise la technique de laminage par dépôt sélectif (*Selective Deposition Laminated*) qui diffère de toutes les autres techniques d'impression 3D. En effet, elle fonctionne par découpe progressive de feuilles de papier qui sont encollées les unes aux autres à l'aide d'une substance adhésive déposée de manière sélective. À chaque nouvelle feuille de papier, une presse chauffante vient coller les couches entre elles en les pressant. La forme souhaitée est découpée dans chaque nouvelle couche par une lame. L'avantage principal de ce procédé est de pouvoir fabriquer des objets multicolores avec une très bonne résolution, tout en utilisant le matériau d'impression le moins cher du marché, le papier. Cependant, le résultat final nécessite un important travail de finition et il peut être très difficile d'imprimer des pièces creuses, avec des formes complexes ou des volumes internes (Berchon & Luyt, 2014; Carew & Errickson, 2020; ISO/ASTM, 2015).

Finalement, l'impression 3D par extrusion de matière utilise le procédé de dépôt de filament fondu ou FDM (*Fused Deposition Modeling*), aussi connu sous le nom de FFF (*Fused Filament Fabrication*), qui fonctionne en effectuant des dépôts successifs de filament de polymère (ou de métal, mais pas pour les imprimantes personnelles). Le filament, qui est libéré graduellement de la bobine dans laquelle il est enroulé, passe par une tête d'extrusion qui le chauffe afin de pouvoir le distribuer par une buse plus fine. La buse dépose alors la matière en fines couches sur le plateau d'impression en suivant un tracé défini. L'objet est ainsi construit couche par couche, de la base au sommet (voir Figure 1.11). Sa simplicité d'exécution et son faible coût d'opération rendent l'impression 3D par FDM vraiment accessible par rapport aux autres

techniques d'impression, ce qui permet de propulser les ventes des imprimantes 3D personnelles. Comme il existe aujourd'hui une grande variété de marque et de modèle d'imprimantes FDM, la qualité, le coût et le choix des matériaux varient énormément selon l'imprimante. La résolution de ce procédé d'impression dépend principalement de la largeur de la buse utilisée (0,2 mm; 0,4 mm ou 0,8 mm), de la précision de mouvement de la tête d'extrusion (que l'on doit souvent ajuster par soi-même) et du matériau utilisé. Pour les imprimantes personnelles, la résolution varie généralement entre 0,1 mm et 0,3 mm. Cela peut constituer une limitation selon le type d'objet à imprimer (Berchon & Luyt, 2014; Carew & Errickson, 2020; Day & Speers, 2020; ISO/ASTM, 2015; Jenzen-Jones, 2015).

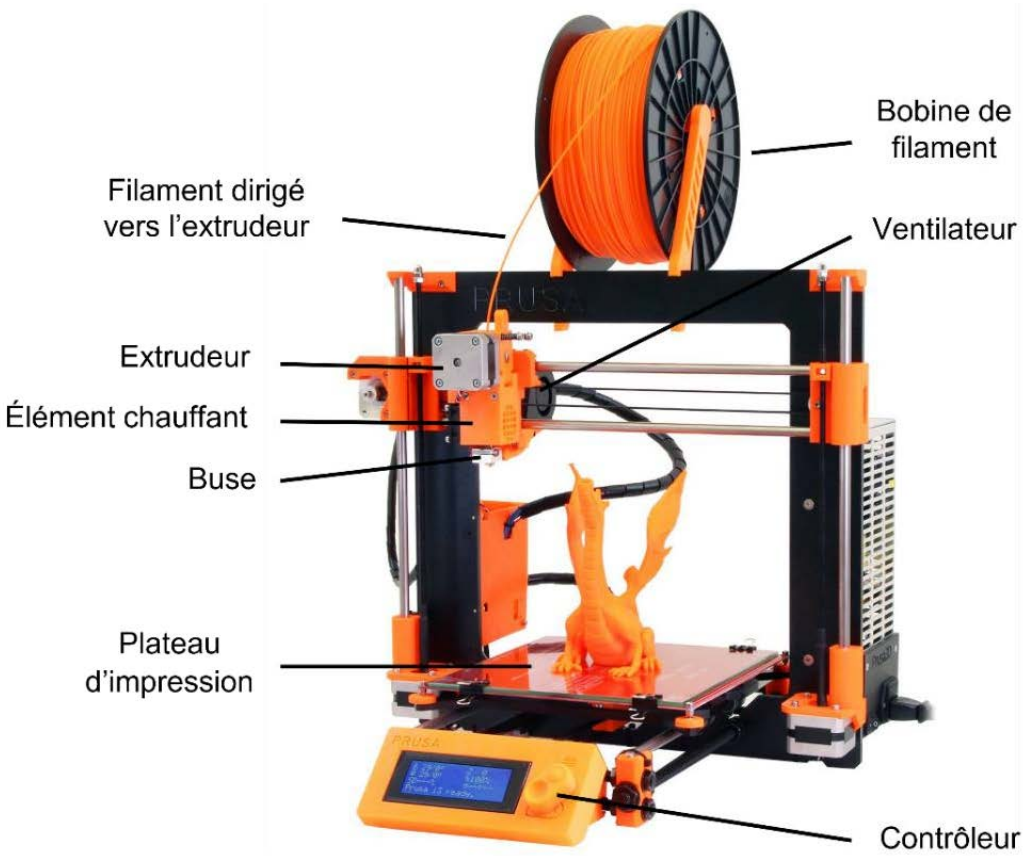

Figure 1.11 Parties principales d'une imprimante 3D FDM de marque Prusa i3, image (modifiée) tirée de (Les impressions 3D, 2021)

Comme la technique d'impression 3D par FDM est la plus courante, la plus accessible et la plus utilisée pour les imprimantes 3D personnelles, c'est cette technique qui a été retenue pour réaliser ce projet (étude de population, base de données de la composition chimique des polymères, impression 3D d'arme à feu).

1.2.3 Polymères utilisés pour l'impression 3D par FDM

Il existe une grande variété de types et de couleurs de polymères pouvant être utilisés avec les imprimantes 3D utilisant la technique FDM. Ces derniers sont toujours sous la forme de filament, vendu en bobine de plusieurs mètres. Les filaments peuvent avoir un diamètre de 1,75 mm ou 2,85 mm selon la tête de l'extrudeur de l'imprimante. Principalement, il est possible de se procurer ces filaments en ligne sur les nombreux sites de fournisseurs, tels que Filaments.ca (Filaments.ca, 2022a) ou 3D Printing Canada (3D Printing Canada, 2022a), ou encore chez des commerces en ligne tels que Amazon ou Ebay. Il est aussi possible de s'en procurer chez certains magasins physiques spécialisés dans l'impression 3D, mais l'accès est beaucoup plus restreint.

Ces différents types de polymère possèdent chacun des avantages et des inconvénients en fonction de leurs propriétés. Par exemple, l'acide polylactique (PLA) est un polymère biosourcé, biodégradable et non toxique qui est facile à imprimer, mais il présente une faible résistance à l'humidité et à la chaleur. En revanche, l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) est un matériau possédant une très bonne résistance à la chaleur et à l'abrasion ainsi qu'une bonne résistance au choc, mais il s'agit d'un matériau plus difficile à imprimer nécessitant une enceinte fermée, car il dégage une forte odeur et des vapeurs toxiques lors de l'impression. Quant au polyuréthane thermoplastique (TPU), il s'agit d'un matériau très flexible et résistant aux chocs, ce qui ouvre de nouveaux champs d'application. Cependant, il fait partie des matériaux difficiles à imprimer, car il a tendance à se tordre, s'étirer ou se plier lors de son passage dans l'extrudeur, ce qui peut engendrer une obstruction si les paramètres d'impression

ne sont pas parfaitement adaptés (3d Matter, 2021; Day & Speers, 2020; Filimprimante3D, 2021c).

Le choix du matériau à utiliser dépend donc de plusieurs critères, tels que la facilité d'impression, la qualité visuelle désirée, les capacités de l'imprimante (p. ex. la température d'extrusion maximale) et l'usage auquel l'objet est destiné (donc les performances mécaniques du matériau). Il faut prendre en considération les différentes propriétés des matériaux, notamment la densité, la toxicité, la résistance à la traction[5], la résistance à la flexion[6], la résistance au choc[7], la température de ramollissement et la température d'extrusion du polymère.

Le Tableau 1.1 dresse une liste des propriétés mécaniques et thermiques des principaux types de filament de polymère que l'on trouve sur le marché, soit l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), l'acrylonitrile styrène acrylate (ASA), le Nylon, le polycarbonate (PC), le polyéthylène téréphtalate glycol (PETG), l'acide polylactique (PLA) et le polyuréthane thermoplastique (TPU). Il est à noter que les caractéristiques physiques d'un même type de polymère peuvent varier en fonction de la marque, du modèle et des additifs de ce dernier. Les valeurs présentées dans ce tableau proviennent de fiches techniques de différents fournisseurs et doivent être considérées comme des valeurs générales de base (Filament2Print, 2021; Markforged, 2021; Simplify3D, 2021; Spool3D, 2021).

---

[5] Résistance à la traction (*Tensile strenght*) : résistance du matériau à se rompre lorsqu'il est soumis à une traction (Formlabs, 2021).

[6] Résistance à la flexion (*Flexural strenght*) : résistance du matériau à se rompre lorsqu'il est plié (Formlabs, 2021).

[7] Résistance au choc Izod (*Izod impact strength*) : capacité du matériau à absorber l'énergie de choc sans se rompre (Formlabs, 2021).

Tableau 1.1 Caractéristiques physiques des polymères les plus communs pour l'impression 3D par FDM

Type polymère	Densité (g/cm^3)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance au choc Izod (J/m)	Température de ramollissement (°C)	Température d'extrusion (°C)
ABS	1,04	40	68	442	98	220-250
ASA	1,07	55	62	441	95	235-255
Nylon	1,06	40	50	110	80	220-270
PC	1,20	72	94	640	121	260-310
PETG	1,23	53	71	105	73	230-250
PLA	1,24	65	85	118	52	190-220
TPU	1,19	26	-	-	60	225-245

1.3 Les armes à feu imprimées en 3D

1.3.1 Bref historique et évolution

En mai 2013, Cody Wilson, fondateur de Defense Distributed, une association à but non lucratif qui développe des plans pour l'impression 3D d'armes à feu (Defense Distributed, 2021), publie sur Internet les plans du pistolet Liberator, la première arme à feu fonctionnelle produite par impression 3D. Parallèlement, Cody Wilson et d'autres membres de DEFCAD, une plateforme de partage de fichier en ligne qui revendique être le plus grand répertoire d'armes 3D au monde (DEFCAD, 2021), ont été en mesure de produire des vidéos montrant que le Liberator réussit à tirer plusieurs coups de feu avant de subir une défaillance structurelle (Jenzen-Jones, 2015). Le Liberator est une arme à feu entièrement imprimée en 3D à l'exception du percuteur qui est en métal (généralement un clou). Il s'agit d'un pistolet à simple action et à un seul coup, originalement de calibre .380 Auto, dont le canon est amovible pour faciliter son

remplacement. Il a été nommé d'après le FP-45 Liberator, un pistolet à un coup conçu durant la Seconde Guerre mondiale (Greenberg, 2013).

Étant donné l'engouement instantané pour le pistolet Liberator, les autorités américaines ont très rapidement demandé à Cody Wilson de retirer les plans du Liberator et de ses autres conceptions de l'Internet, afin de prendre le temps de déterminer s'il violait l'*International Traffic in Arms Regulation*. En seulement deux jours, les fichiers avaient déjà été téléchargés environ 100 000 fois (Hays *et al.*, 2020; Jenzen-Jones, 2015; Walther, 2015). Il s'ensuit une longue bataille juridique de plusieurs années, lors de laquelle la légalité des armes à feu imprimées en 3D a connu plusieurs fluctuations, surtout au cours des dernières années, notamment en raison de changements d'orientation de la part du gouvernement. La controverse se poursuit et les Américains attendent toujours de savoir quelles mesures seront prises par l'administration de Joe Biden en ce qui concerne les armes à feu imprimées en 3D (ALL3DP, 2021). Cependant, bien que la distribution de plans et l'impression 3D d'armes à feu soient illégales dans la plupart des pays, comme au Canada (Code criminel, 1985; Loi sur les armes à feu, 1995), il est quand même possible de se procurer facilement sur Internet les plans pour l'impression 3D d'armes à feu (Hays *et al.*, 2020; Walther, 2015) sur des plateformes de partage de fichiers telles que DEFCAD (DEFCAD, 2021) et Gatalog (Gatalog, 2022).

Aujourd'hui il existe une grande variété de modèles, de types et de calibres d'armes à feu pouvant être imprimée en 3D. Il est possible de les classer en trois grandes catégories, soit les armes à feu entièrement imprimées en 3D, les armes à feu hybrides et les armes à feu dont seule la carcasse est imprimée en 3D (Hays *et al.*, 2020).

Les armes à feu entièrement imprimées en 3D contiennent généralement une seule composante non imprimée, tels qu'un clou pour servir de percuteur ou un élastique ou un ressort pour alimenter le marteau. Il s'agit généralement de pistolets à un coup ou

de revolvers combinant plusieurs canons pour permettre des tirs multiples. Dans certains cas, des sections de tubes d'acier peuvent être insérées dans le(s) canon(s) et/ou les chambres de ces armes pour augmenter leur robustesse, mais ils ne font pas officiellement partie de la conception de base de l'arme. En raison de l'absence quasi totale de composants métalliques, ces armes à feu ne sont dans la plupart des cas utilisables qu'un nombre limité de tirs avant que les pièces ne deviennent trop déformées ou structurellement dangereuses pour l'utilisation. Dans cette catégorie, on compte notamment le célèbre pistolet Liberator, mais aussi les pistolets à un coup Songbird et Grizzly, de calibre .22 LR, ainsi que les revolvers à plusieurs coups Reprringer HEXEN et Washbear, de calibre .22 LR, et le revolver Zig Zag de calibre .380 Auto (Hays *et al.*, 2020) (voir Figure 1.12).

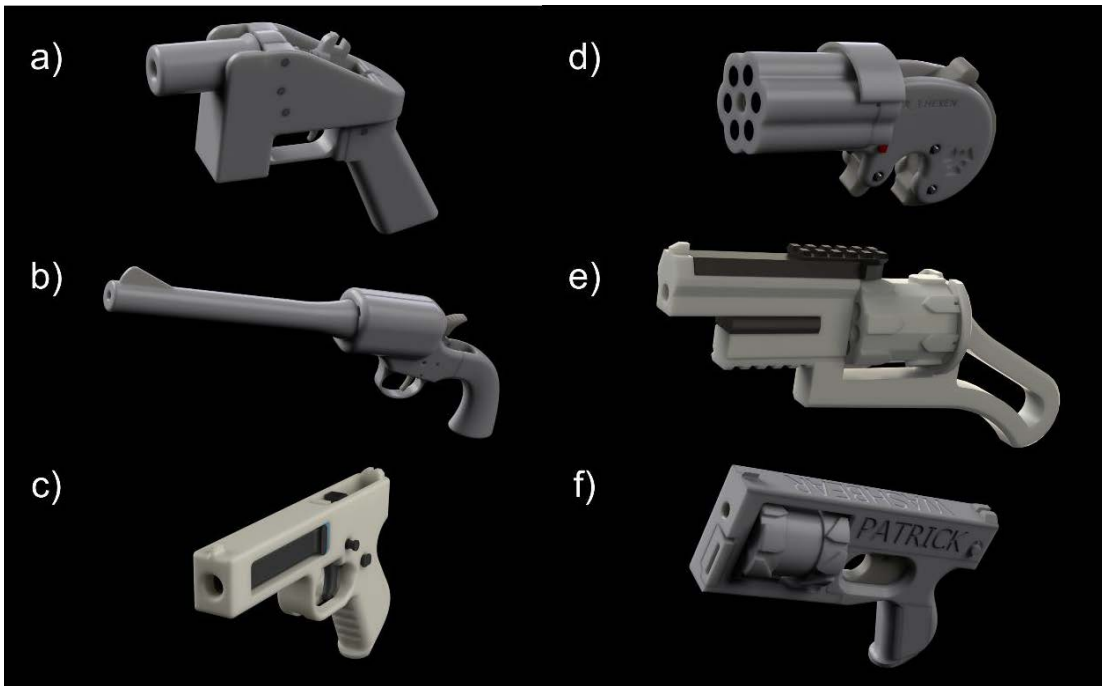

Figure 1.12 Armes à feu entièrement imprimées en 3D, a) Liberator, b) Grizzly, c) SongBird, d) Reprringer HEXEN, e) Zig Zag et f) Washbear, images tirées de (DEFCAD, 2021)

Les armes à feu hybrides sont principalement imprimées en 3D, mais sont aussi composées de certaines pièces métalliques non réglementées, telles que les tubes d'acier, les barres de métal et les ressorts, entre autres pour renforcer les principaux assemblages soumis à des contraintes importantes ou pour servir de canons et de chambres. Bien qu'aucune pièce d'armes à feu ne soit généralement utilisée pour la conception de ces armes, les modèles hybrides peuvent offrir des performances largement comparables à celles de certains types d'armes à feu conventionnelles. Les modèles hybrides sont donc des armes à feu beaucoup plus viables, et résistantes que les armes à feu entièrement imprimées en 3D. Généralement, il s'agit d'armes à feu semi-automatiques dans lesquelles il est possible d'insérer un chargeur de grande capacité et capables de tirer de nombreux coups. Parmi elles, on trouve par exemple les carabines semi-automatiques, initialement de calibre 9 mm Luger, Shuty AP-9 et FGC-9 (*Fuck Gun Controle*) et leurs variantes (Hays *et al.*, 2020) (voir Figure 1.13).

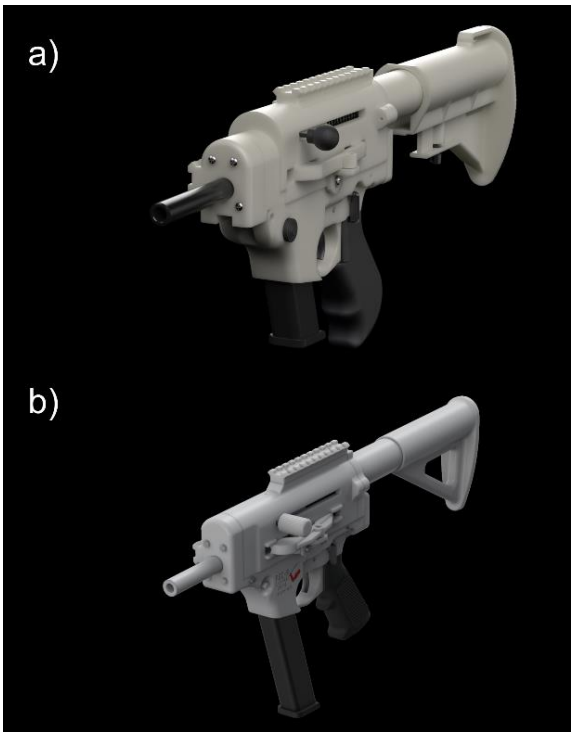

Figure 1.13 Armes à feu hybrides imprimées en 3D, a) Shuty AP-9 et b) FGC-9 MKI, images tirées de (DEFCAD, 2021)

La dernière catégorie comprend les armes à feu dont seule la carcasse est imprimée en 3D. La plupart ou la totalité des autres pièces, en particulier les composantes soumises à des contraintes importantes (p. ex. le canon, la glissière et la culasse), sont des pièces commerciales d'armes à feu fabriquées en usine. Les armes de cette catégorie sont généralement les plus fiables et les plus performantes des armes à feu imprimées en 3D. Elles sont d'ailleurs très souvent tout aussi performantes que les armes à feu conventionnelles fabriquées en usine. Cependant, le coût de conception de ces armes est généralement beaucoup plus élevé en raison de l'achat de pièces commerciales et il peut être plus difficile de les fabriquer si certaines composantes sont soumises à des restrictions légales (Hays *et al.*, 2020). Parmi les modèles existants de carcasse pouvant être imprimée en 3D, on trouve par exemple les carcasses inférieures pour les fusils d'assaut Kalachnikov de calibre 7,62 x 39 mm et les fusils d'assaut de type AR-15 de calibre .223 Rem, ainsi que les carcasses pour les pistolets Glock de différents calibres et pour les pistolets TEC-9 de calibre 9 mm Luger (voir Figure 1.14).

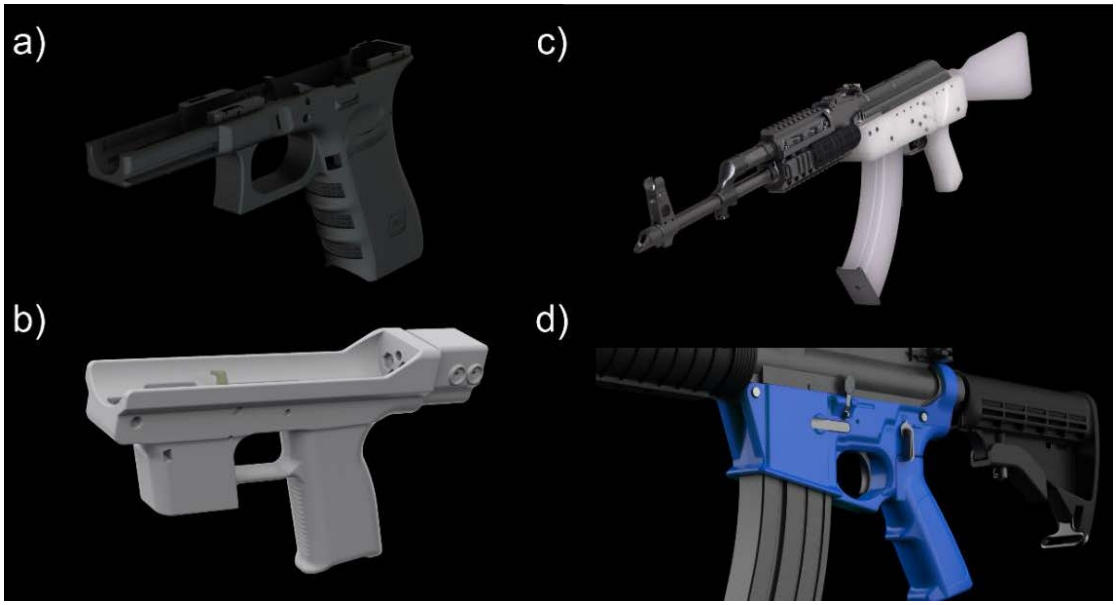

Figure 1.14 Carcasses imprimées en 3D pour un a) pistolet Glock, b) pistolet TEC-9, c) fusil d'assaut Kalachnikov et d) fusil d'assaut AR-15, images tirées de (DEFCAD, 2021)

Il est aussi possible de faire imprimer plusieurs pièces et accessoires pour arme à feu, certains étant prohibés et d'autres non. Au Canada, par exemple, les chargeurs d'armes à feu sont régulés en fonction de leur capacité de cartouches (Code criminel, 1985). Cette réglementation peut être contournée, par exemple, en faisant imprimer un chargeur qui ne respecte pas la limitation de cartouches et qui est donc un dispositif prohibé. Les armes à feu automatiques sont aussi prohibées et ne sont donc généralement pas vendues au Canada. Cependant, il est possible de faire imprimer un accessoire prohibé, surnommé DIAS (*Drop-in Auto Sear*), que l'on place dans le mécanisme interne du groupe détente d'une arme semi-automatique pour la convertir en arme à feu automatique. Il existe d'autres variantes de ce dispositif, tel que les *Glock Switch* spécialement conçus pour les pistolets Glock. Les silencieux sont aussi des dispositifs prohibés qu'il est possible de faire imprimer en 3D. Des pièces et accessoires n'étant pas prohibés peuvent aussi être imprimés, tel que des poignées, des embouts de chargeur ou des rails pour installer des accessoires sur une arme à feu (p. ex. pointeur laser, système de visé ou lampe de poche) (Hays *et al.*, 2020) (voir Figure 1.15).

Figure 1.15 Pièces et accessoires imprimés en 3D pour arme à feu, a) silencieux, b) DIAS, c) chargeur, d) embout de chargeur, e) poignée et f) rail pour accessoire, images tirées de (DEFCAD, 2021)

L'accessibilité de l'impression 3D au grand public a été une occasion en or pour les personnes voulant fabriquer des armes à feu artisanales, car cette technologie réduit considérablement les obstacles auxquels ils peuvent être confrontés lorsqu'il s'agit de fabriquer des armes à feu fonctionnelles à partir de pièces en métal. En effet, le coût, le temps, le niveau de compétence et les exigences en matière d'ajustement manuel sont réduits. La fabrication d'armes à feu viables devient donc accessible à la personne « moyenne », en particulier lorsqu'elle a accès aux dépôts de données, aux plans et aux connaissances partagées disponibles sur Internet. De plus, l'impression 3D d'armes à feu permet également aux utilisateurs d'obtenir des armes à feu sans avoir à passer par le chemin légal d'acquisition d'une arme, ni à accéder aux réseaux criminels, ce qui permet de préserver leur anonymat (Hays *et al.*, 2020).

Cependant, il est important de prendre en considération que la qualité et la viabilité des armes à feu imprimées en 3D, peu importe leur catégorie, ainsi que les pièces et accessoires imprimés en 3D dépendent grandement de plusieurs facteurs. Notamment, le type d'imprimante et le logiciel d'impression utilisé, la calibration de l'imprimante, le matériau utilisé, les compétences de la personne qui l'imprime et si les différentes parties de l'arme ont correctement été finies et assemblées (Jenzen-Jones, 2015; Walther, 2015).

1.3.2 Problématique

La problématique avec les armes à feu imprimées en 3D, en plus d'être des « armes fantômes », c'est qu'elles ne produiront pas toutes les traces balistiques conventionnelles, sur les éléments de munitions, qui sont normalement utilisées lors des analyses et du processus de comparaison en balistique (Walther, 2015). Les matériaux constituant les éléments de munitions sont généralement moins durs que ceux utilisés pour la fabrication de l'arme à feu, ce qui permet de générer des traces lors du contact entre les éléments de munitions et des parties de l'arme à feu (Bonfanti, 1999; Carrier & Riva, 2014). Cependant, cela n'est pas le cas pour les armes à feu

imprimées en 3D en polymère. Les pièces imprimées en 3D étant moins dures que les éléments de munitions, elles ne transmettront pas leurs caractéristiques de surface sur les éléments de munitions lors du contact entre les différentes surfaces. Ce sont plutôt les éléments de munitions qui vont conférer leurs caractéristiques aux différentes pièces imprimées en 3D de l'arme (Honsberger *et al.*, 2019).

Comme il a été vu précédemment, les armes à feu imprimées en 3D peuvent être classées en trois grandes catégories, soit les armes à feu entièrement imprimées en 3D, les armes à feu hybrides (assemblage de pièces imprimées en 3D avec des pièces métalliques artisanales) et les armes à feu dont seule la carcasse est imprimée en 3D (Hays *et al.*, 2020). Selon leur constitution, ces armes à feu ne produiront pas toutes les traces balistiques conventionnelles (voir Tableau 1.2). Pour les armes à feu entièrement imprimées en 3D, généralement seul le percuteur est une pièce métallique. La trace du percuteur sera donc la seule trace balistique générée sur les éléments de munitions (Al Shamsi, 2019; Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022). Pour les armes à feu hybrides, les traces produites dépendent de la nature des pièces imprimées en 3D. Si seul le canon est imprimé en 3D (p. ex. les armes dans ce projet), il n'y aura pas de traces d'impressions de champs et de rayures sur le projectile, mais les autres traces balistiques peuvent être générées sur la douille. Finalement, si uniquement la carcasse de l'arme à feu est imprimée en 3D, toutes les traces balistiques conventionnelles peuvent être produites puisque toutes les parties de l'arme entrant en contact avec les éléments de munitions sont en métal.

Tableau 1.2 Traces balistiques conventionnelles pouvant être observées sur les éléments de munitions selon la constitution d'une arme à feu imprimée en 3D[8]

Arme à feu \ Traces	Champs et rayures	Percuteur	Tranche de culasse	Chambre	Extracteur et éjecteur
Conventionnelle	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**
Entièrement imprimée en 3D		**x**			
Hybride (canon imprimé en 3D)		**x**	**x**		**x**
Seule la carcasse imprimée en 3D	**x**	**x**	**x**	**x**	**x**

En revanche, les armes à feu imprimées en 3D peuvent produire d'autres types de traces bien spécifiques, telles que les traces chimiques provenant du polymère utilisé pour imprimer l'arme en question. En effet, lors d'une décharge avec une arme à feu imprimée en 3D, plusieurs petits fragments et particules de polymère peuvent se détacher de l'arme et se répandre dans l'environnement tandis que d'autres peuvent être transférés lors du contact physique entre les parties imprimées en 3D de l'arme et les éléments de munitions (Black *et al.*, 2017; Crowe & Rugh, 2017; Honsberger *et al.*, 2018; Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022). Le polymère dont l'arme à feu (ou les pièces et accessoires d'arme à feu) est constituée, ainsi que les traces de polymère générées lors d'un tir peuvent être analysés chimiquement et fournir de l'information

[8] Il est à noter que l'on considère ici que l'arme en question est tout à fait fonctionnelle. C'est-à-dire que tous les mécanismes fonctionnent correctement et peuvent donc générer des traces. Aussi, les traces pouvant être générées lors du chargement de la munition (p. ex. traces provenant du chargeur) ne sont pas considérées puisqu'elles dépendent trop du mode de chargement de l'arme en question (p. ex. les armes à feu à un coup n'ont pas de chargeur).

très pertinente dans une enquête criminelle. L'analyse et l'interprétation de cette signature chimique sont justement le cœur de ce projet.

1.3.3 Cas médiatisés

Dans les dernières années, à l'international comme au Canada, les médias ont diffusé plusieurs cas d'arrestation en lien avec la fabrication, la possession, le trafic ou l'utilisation d'une arme à feu imprimée en 3D.

Par exemple, tout récemment en novembre 2021, en Nouvelle-Zélande, un membre du gang King Cobras a été arrêté et accusé de possession d'arme à feu imprimée en 3D à la suite d'une fusillade présumée le mois précédent. L'arme 3D a été identifiée comme étant un pistolet semi-automatique FGC-9 JStark1809 (Kapitan, 2021).

En septembre 2020, la police espagnole a démantelé un atelier de fabrication d'armes à feu en impression 3D à Santa Cruz de Tenerife. Le propriétaire était équipé pour produire toutes les pièces nécessaires à la fabrication d'armes légères. Les enquêteurs ont aussi trouvé plusieurs carcasses d'armes en cours de fabrication ainsi que les matériaux nécessaires à leur confection (Courrier international, 2021).

En 2019, en Allemagne, un terroriste a fait deux morts et plusieurs blessés en tirant vers une Synagogue avec une arme à feu comportant des composantes imprimées en 3D. À la suite de son arrestation, les enquêteurs ont saisi des pièces à conviction dans son appartement, notamment une imprimante 3D. L'analyse des documents saisis a révélé qu'il fabriquait des armes et préparait des attaques depuis plusieurs mois (Beau, 2019; Dearden, 2019).

Encore en 2019, en Angleterre, un jeune étudiant londonien a été reconnu coupable pour la fabrication d'armes à feu imprimées en 3D. La police avait d'abord eu accès au domicile de l'étudiant à l'aide d'un mandat concernant les stupéfiants, mais elle avait

aussi trouvé deux armes à feu imprimées en 3D pouvant tirer des munitions réelles, soit un revolver Washbear et un pistolet Hexen Pepper-box (Noor, 2019; Renard, 2019).

En 2014, dans la ville de Kawasaki au Japon, un jeune homme a été arrêté pour possession illégale d'armes à feu. À son domicile, les enquêteurs ont trouvé cinq modèles d'armes à feu imprimées en 3D, dont deux pouvant réellement tirer des munitions (Martel, 2014). L'arrestation a eu lieu après que les autorités japonaises aient trouvé une vidéo en ligne montrant l'homme en train de tirer avec une arme à feu imprimée 3D qu'il avait lui-même conçue, appelée Zig Zag Revolver (Milkert, 2014). Il serait la première personne à avoir été condamné à une peine de prison pour avoir imprimé des armes en 3D (Benson, 2014).

Plusieurs cas sont aussi survenus au Canada. Par exemple, en mars 2021, trois individus ont été arrêtés lors d'une perquisition dans une résidence de l'est de l'Ontario qui étaient dans la mire de l'Agence des services frontaliers du Canada (ASFC) depuis quelques mois. Lors de la fouille, les policiers ont saisi plusieurs pièces et composantes d'armes à feu ainsi qu'une imprimante 3D qui était justement en cours d'impression d'une arme de poing (Vlasveld, 2021).

En 2020, à Calgary en Alberta, la perquisition du domicile d'un homme a permis de découvrir plusieurs imprimantes 3D, ainsi que des carcasses de pistolet et de fusil d'assaut, un dispositif de conversion d'arme à feu semi-automatique en arme entièrement automatique ainsi que des silencieux imprimés en 3D. Il a été arrêté quelques mois plus tard pour fabrication et possession illégale d'armes à feu et de dispositifs prohibés (Dormer, 2020). Toujours en 2020, un homme a été inculpé pour importation, possession et fabrication d'armes à feu et de dispositifs prohibés, à la suite d'une saisie effectuée en 2019 à son domicile en Nouvelle-Écosse. L'ASFC avait à ce moment saisi plusieurs armes et dispositifs prohibés, dont un pistolet imprimé en 3D (Al-Hakim, 2020).

Plus spécifiquement au Québec, en novembre 2021 dans la ville de Gatineau, une perquisition a eu lieu chez un complotiste accusé de fabrication d'armes. Les autorités ont saisi, entre autres, trois armes de calibre 9 mm Luger, dont une munie d'un silencieux, une arme de poing de calibre .22 LR, neuf chargeurs à haute capacité, plusieurs pièces d'armes à feu ainsi que deux imprimantes 3D avec lesquelles il aurait imprimé les armes à feu (Deland, 2021).

En 2019, à Terrebonne au Québec, lors d'une perquisition chez un homme accusé d'avoir aidé un tueur à gages lors d'un meurtre, la police a découvert un atelier d'usinage et de fabrication d'armes à feu. La police y a saisi, entre autres, une imprimante 3D ainsi que plusieurs pièces et accessoires d'armes à feu imprimés en 3D, dont un canon de pistolet et un chargeur (Thibault, 2019).

1.3.4 Demandes d'expertises au Québec

Dans les dernières années (2016 à 2022), la division de balistique du Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale de Montréal (LSJML) a reçu à elle seule 14 demandes d'expertises impliquant des armes à feu imprimées en 3D et/ou des pièces et accessoires imprimés en 3D pour arme à feu. Il est à noter que les dossiers de l'année 2021 ne sont pas encore tous traités au moment d'écrire ces lignes et que les dossiers de l'année 2022 ne font que commencer à entrer au LSJML[9]. De plus, les armes, pièces ou accessoires imprimés en 3D ne sont pas systématiquement envoyés au LSJML pour analyse. D'autres organisations, telles que la Gendarmerie royale du Canada (GRC) et l'ASFC, ont donc pu recevoir elles aussi des demandes d'expertises concernant des cas au Québec.

---

[9] Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale, Division balistique, communication personnelle, 14 janvier 2022.

Parmi ces demandes, pour la catégorie des armes à feu entièrement imprimées en 3D, trois revolvers PG22 Maverick de calibre .22 Annulaire ont été reçus. Pour la catégorie des armes à feu hybrides imprimées en 3D, trois fusils d'assaut semi-automatiques FGC-9 de calibre 9 mm Luger ainsi que deux d'assaut semi-automatiques de type AR-15 de calibre .22 LR ont été reçus. Pour les armes à feu dont seule la carcasse est imprimée en 3D, quatre pistolets-mitrailleurs de marque CZ, modèle Skorpion VZ61 de calibre .32 Auto ainsi que huit pistolets semi-automatiques de type Glock 17/19 de calibre 9 mm Luger ont été reçus. Finalement, pour les accessoires et pièces imprimés en 3D, une ébauche d'un boitier de chargeur de calibre 9 mm Luger, six chargeurs grande capacité de calibre 9 mm Luger, un canon imprimé en 3D s'adaptant à un pistolet Glock 26 de calibre 9 mm et une carcasse inférieure de type AR-15 ont été reçus. Plus du trois-quarts de ces accessoires, pièces et armes à feu étaient fonctionnels ou ne nécessitaient que quelques ajustements pour le devenir.

1.4 Revue de la littérature

À ce jour, seulement quelques études portant sur les armes à feu imprimées 3D en polymère ont été publiées. Ces études se sont concentrées sur la faisabilité et la fonctionnalité de ces armes, la balistique propre à ces armes ainsi que sur les différentes traces qu'elles génèrent, l'influence du procédé d'impression, du type d'imprimante et du type de polymère sur ces traces et les méthodes pouvant être utilisées pour les identifier et les différencier des traces produites par les armes à feu conventionnelles.

La première étude, menée par LaRocco en Nouvelle-Zélande (LaRocco, 2013), est parue peu de temps après le dévoilement au grand public de la possibilité de créer des armes à feu fonctionnelles en utilisant l'impression 3D. Cette étude visait à trouver une façon de contrer les principaux facteurs limitants des premières armes à feu imprimées en 3D, c'est-à-dire le fait que ce sont des pistolets ne pouvant contenir qu'une seule cartouche à la fois et qu'ils sont à usage quasi unique (pistolets fabriqués de façon à

pouvoir changer le canon brisé à la suite d'un tir). LaRocco a donc évalué la faisabilité d'imprimer en 3D un revolver, ce qui permettrait ainsi d'augmenter la capacité de munitions (permet d'insérer une cartouche dans chacune des chambres du barillet). Pour ce faire, il s'est concentré sur la conception du barillet afin de trouver un compromis entre la sécurité, la capacité de munitions et la dimension du barillet, de sorte qu'il y ait suffisamment d'espace entre chaque chambre du barillet pour supporter la pression et la déformation provenant de la décharge, mais sans que la dimension du barillet soit démesurée. Une modélisation a été réalisée en fonction des propriétés physiques du polymère utilisé, soit l'ABS, et des calibres choisis, soit le calibre .22 Short et .22 LR, afin de déterminer les différentes spécifications théoriques que le barillet devrait avoir pour être viable. Par la suite, des simulations virtuelles ont été réalisées afin d'évaluer le stress et la déformation qu'une chambre peut subir lors d'un tir. Il en ressort que le calibre .22 LR génère un plus grand stress et un plus grand déplacement de la chambre que le calibre .22 Short. Cependant, dans les deux cas, le déplacement obtenu pour la chambre utilisée lors du tir pourrait modifier la position des autres chambres et ainsi altérer l'intégrité du barillet. LaRocco suggère qu'un barillet d'un diamètre plus large et avec une distance plus grande entre les chambres pourrait limiter le déplacement, mais que cela résulterait en un barillet disproportionné pour une arme à feu. Les résultats obtenus dans cette étude démontrent donc que l'impression 3D d'un revolver, même avec un calibre avec une pression relativement faible, est techniquement faisable, mais qu'il y a plusieurs contraintes à respecter pour qu'il soit fonctionnel. Comme il a été vu précédemment (section 1.3), il existe aujourd'hui plusieurs modèles de revolver pouvant être imprimés en 3D. Afin de minimiser la problématique de déformation, des tubes d'acier peuvent être insérés dans le(s) canon(s) et/ou les chambres de ces armes.

Deux publications portant sur les traces générées par le pistolet Liberator imprimé en 3D ont été réalisées par Honsberger *et al.* Ces publications découlent du projet de maîtrise réalisé par Hanna Honsberger, à l'Université de Lausanne en Suisse

(Honsberger, 2017), qui visait à mettre à l'essai le pistolet Liberator ainsi que d'étudier la balistique et les traces propres à cette arme. Dans la première publication (Honsberger *et al.*, 2018), les auteurs présentent les résultats obtenus sur les dommages que le pistolet peut subir lors d'une décharge, les effets sur la cible ainsi que la vitesse et le comportement des projectiles. Pour ce faire, des tirs expérimentaux ont été réalisés avec cinq Liberator de calibre .380 Auto et un de calibre .25 Auto ayant été imprimés en ABS M30 en utilisant la technologie FDM. L'étude révèle que les dommages engendrés sur le pistolet Liberator à la suite d'une décharge sont variables d'un pistolet à l'autre, malgré qu'ils aient les mêmes spécifications (p. ex. procédé d'impression, polymère et calibre). En effet, pour deux des pistolets le canon est resté intact à la suite de la décharge, mais pour les quatre autres le canon s'est brisé, et dans certains cas la carcasse s'est même fissurée. Dans tous les cas, mais spécialement pour les canons ayant brisé, des morceaux et des résidus de polymère provenant en grande partie du canon sont éjectés dans l'environnement. Pour les canons qui sont restés intacts, la douille est restée coincée dans le pistolet et pour les canons ayant brisé, la douille a été éjectée. Concernant la vitesse des projectiles, il en ressort que les projectiles ont une vitesse inférieure de 40-60 % par rapport à un tir effectué avec la même munition dans une arme à feu conventionnelle. Quant à leur trajectoire, elle est perturbée et instable et présente une variation verticale descendante et une déviation latérale comparativement à un tir effectué avec une arme à feu conventionnelle. Sur la cible, les résidus de tir (GSR) conventionnels ont été trouvés, mais avec une quantité plus importante de particules non brûlées que la normale, en plus de trouver des résidus et des débris de polymère. En raison de la trajectoire perturbée des projectiles, seulement deux des projectiles ont atteint et pénétré, à des profondeurs de 14 et 21 cm, le savon balistique. La première partie de cette étude a permis de tirer plusieurs conclusions sur le pistolet Liberator, tels qu'il est possible de tirer avec ce dernier (même si de sévères dommages peuvent être engendrés sur le pistolet lors de la décharge), que malgré une trajectoire perturbée et instable le projectile peut atteindre une cible et causer des blessures pouvant être mortelle et finalement, que lors d'un tir, des morceaux et des

fragments de polymère sont expulsés dans l'environnement et qu'il est donc possible de trouver ces fragments dans l'environnement, en plus des GSR conventionnels.

Dans la deuxième publication (Honsberger *et al.*, 2019), les auteurs présentent les résultats en lien avec les traces physiques et matérielles produites lors de la décharge d'un Liberator, avec les six mêmes pistolets que la première publication. Pour les traces générées sur les éléments de munitions, il en ressort que tous les projectiles trouvés présentent des traces de polymère, sous la forme d'un voile de polymère fondu ou sous la forme de petits fragments, et que comme attendu, ils ne présentent aucune trace de rayage. Pour les douilles, elles présentent toutes un gonflement et/ou une déchirure au niveau du corps de la douille, ne présentent pas la trace de l'extracteur ni de l'éjecteur, mais présentent bien la trace du clou qui fait office de percuteur. On trouve aussi des traces de polymère sur le culot et sur le corps des douilles. Pour les traces sur le Liberator lui-même, on observe deux types de fractures sur les canons, soit des fractures transversales suivant le sens des couches d'impression et des fractures longitudinales. En observant l'intérieur des canons, au niveau de la chambre, il est possible d'observer l'impression laissée par la douille lors de son expansion lors de la décharge ainsi que l'impression du culot de la douille sur le corps du marteau. Finalement, il est possible de trouver des morceaux du Liberator et des traces de polymère jusqu'à neuf mètres dans l'environnement entourant sa décharge. Ces différents morceaux et fragments de canons peuvent être reliés entre eux par association physique. Cette deuxième publication démontre, entre autres, qu'il est possible de trouver des traces de polymère sur les éléments de munitions, l'empreinte des douilles dans le Liberator lui-même ainsi que des résidus de polymère dans l'environnement entourant la décharge. Même si certaines des traces générées par le Liberator ne lui sont pas totalement spécifiques, d'autres traces peuvent permettre de reconnaitre une scène impliquant la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D, telle que la présence de polymère sur les éléments de munitions et dans l'environnement.

La première étude à s'être intéressée à l'analyse chimique des traces de polymère générées lors de la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D a été réalisée aux États-Unis par Crowe et Rugh (Crowe & Rugh, 2017). Cette étude visait, entre autres, à déterminer s'il est possible de différencier un tir réalisé avec une arme à feu conventionnelle d'une arme à feu imprimée en 3D par la présence de particules de polymère dans les résidus de tir inorganique (IGSR). Pour ce faire, cinq pistolets Liberator ont été imprimés en ABS par FDM, dans deux différents calibres (.22 LR et .380 Auto). Les tirs expérimentaux ont été réalisés dans un puits de tir dans lequel ont été installés des tampons collecteurs de IGSR ainsi qu'un morceau de tissu afin de récupérer les résidus et les fragments de polymère. Plusieurs résidus et fragments de polymère de taille, de forme et d'apparence différentes ont été récupérés à la suite des tirs expérimentaux. De plus, des traces ressemblant à un voile de polymère fondu ont aussi été observées sur un des projectiles de calibre .380 Auto et sur une des douilles de calibre .22 LR. L'analyse, par spectroscopie infrarouge et pyrolyse GC-MS (*Gas Chromatography - Mass Spectrometry Analysis*), de ces fragments et résidus de polymère a permis de les identifier comme étant de l'ABS. Cependant, en raison de leur faible quantité, les traces de polymère sur les éléments de munition n'ont pu être identifiées formellement comme étant de l'ABS. Quant aux analyses au SEM-EDS des tampons collecteurs, elles révèlent bien la présence des éléments typiques des IGSR, soit le Plomb (Pb), l'antimoine (Sb) et le Baryum (Ba). Cependant, comparativement aux IGSR que l'on trouve à la suite d'une décharge par arme à feu conventionnelle, ces derniers étaient mélangés à des résidus de polymère fondu. Cette morphologie et cette composition particulière permettent donc de différencier les IGSR provenant d'une décharge par arme à feu conventionnelle d'une décharge par arme à feu imprimée en 3D.

Une autre étude s'est intéressée beaucoup plus en profondeur à l'analyse chimique des traces de polymère générées lors de la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D. Cette étude a été réalisée aux États-Unis par Black *et al*. (Black *et al.*, 2017) dans le

cadre d'un des chapitres de sa thèse de doctorat (Black, 2019). L'objectif de cette étude était de déterminer s'il est possible de détecter et d'identifier les traces de polymère et les résidus de tir organiques (OGSR) générés lors de la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D, sur les projectiles, les douilles et les vêtements, en utilisant l'analyse directe en temps réel - spectrométrie de masse (DART-MS). Pour ce faire, dans un premier temps, ils ont mis au point un prototype rudimentaire d'arme à feu, de calibre .38 Special, constituée d'un canon en polymère (un canon ABS et un autre en Nylon), afin de vérifier la faisabilité du projet. Dans un deuxième temps, un revolver de type Washbear de calibre .22 Annulaire possédant un barillet-canon interchangeable a été imprimé avec une imprimante 3D FDM. La carcasse du revolver a été imprimée en PLA et quatre barillets-canon ont été imprimés en différents types de polymère, soit un en ABS, un en PLA, un en PETG et un en polyéthylène chloré. Les échantillons récupérés sur la cible à la suite des tirs expérimentaux ont tous été analysés par DART-MS et l'identification des polymères s'est faite en comparant les spectres obtenus avec ceux d'une base de données maison comprenant plusieurs types de filament de polymère en vente sur le marché. Les résultats démontrent que l'analyse par DART-MS permet de détecter et d'identifier rapidement les traces de polymère sur les éléments de munitions, les fragments de polymère recueillis dans l'environnement à la suite des tirs ainsi que plusieurs composés des OGSR (p. ex. le méthyl-centralite, l'éthyl-centralite, la diphénylamine et la nitrocellulose), même s'ils sont mélangés à des traces de polymère. De plus, l'utilisation d'une base de données spectrales des filaments de polymère commun en vente sur le marché s'avère un outil très utile afin de caractériser des échantillons inconnus.

Dans sa thèse de doctorat (Black, 2019), Black consacre aussi un chapitre à l'analyse en composantes principales (PCA) des spectres obtenus par DART-MS. L'objectif de cette partie était de déterminer s'il est possible de mettre au point une méthode semi-supervisée de classification des polymères en entrainant un modèle à partir d'une base de données spectrales de filaments de polymère commerciaux. Pour ce faire, 50

échantillons différents de filament de polymère en PLA, PETG, ABS et Nylon ont été analysés par DART-MS, ainsi que part DART-MS couplé avec une unité de désorption thermique (TD-DART-MS). Par la suite, plusieurs PCA ont été effectuées avec les spectres de masse obtenus par les deux méthodes. Il en ressort que pour les spectres obtenus par DART-MS, les échantillons sont bien séparés en groupe selon le type de polymère (p. ex. ABS ou PLA), mais que les spectres obtenus par TD-DART-MS permettent une séparation encore plus distincte des différents groupes. Finalement, Black démontre aussi que, en plus de pouvoir séparer efficacement les différents types de polymère, l'utilisation d'une méthode semi-supervisée en PCA, avec les spectres de masse obtenus par TD-DART-MS, permet d'identifier le type de polymère d'un échantillon inconnu en le classant dans le bon groupe de polymère.

Black a aussi publié un livre (Cizdziel & Black, 2019) dans lequel il présente, entre autres, une partie des résultats de sa thèse de doctorat en soulignant le potentiel de la méthode DART-MS pour l'analyse des traces d'armes à feu imprimées en 3D et en mettant de l'avant l'importance d'étudier d'autres méthodes d'analyses prometteuses pour ces traces, en particulier la spectroscopie infrarouge et Raman. Black mentionne aussi que des efforts sont également en cours pour bonifier leur base de données spectrales DART-MS et TD-DART-MS d'échantillons de polymère, qui, à terme, sera mise à la disposition des praticiens pour faciliter l'identification et la recherche de polymères susceptibles d'être utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu.

Dans un tout autre ordre d'idée, dans leur étude menée à l'Université de Lausanne en Suisse, Trincat *et al.* (Trincat *et al.*, 2022), se sont intéressés à l'influence du procédé d'impression sur les traces produites lors de la décharge d'un pistolet Liberator. Pour ce faire, un total de 36 pistolets Liberator, de calibre .380 Auto, ont été imprimés en utilisant trois procédés d'impression (FDM, SLA et SLS), quatre imprimantes et onze matériaux différents. Les résultats de cette étude sont présentés en trois parties, soit la caractérisation des traces générées lors du processus d'impression, l'impact du procédé

d'impression sur la fonctionnalité des pistolets et l'impact du procédé d'impression sur les traces générées lors d'un tir. Pour la caractérisation des traces produites lors du processus d'impression, l'étude démontre que les pièces créées avec des procédés d'impression distincts présentent suffisamment de caractéristiques pour permettre de les différencier, voire d'inférer le procédé d'impression utilisé. On parle notamment de caractéristiques telles que la position et la forme des supports de structure, de la possibilité de distinguer et mesurer la hauteur des couches d'impression, de l'angle des couches d'impression par rapport à l'objet imprimé, de la direction de l'impression, de la texture de surface et des défauts potentiels générés lors de l'impression. Concernant l'impact du procédé d'impression sur la fonctionnalité des pistolets Liberator, il en ressort que le procédé affecte non seulement la capacité du pistolet à tirer, mais aussi l'assemblage des pièces. En effet, la moitié des pistolets imprimés par SLA n'ont pu être assemblés en raison du manque de précision lors de l'impression des pièces et/ou un manque de flexibilité du matériau. Pour les pistolets imprimés par FDM et par SLS, certaines pièces ont dû être sablées ou retravaillées, mais tous les pistolets ont pu être assemblés. Lors des tirs expérimentaux, aucun des pistolets imprimés par SLA n'a pu être tiré, car les pièces n'étaient pas fonctionnelles ou brisaient lors de l'armement. À contrario, tous les pistolets imprimés par FDM (en ABS, PETG et PLA) et par SLS ont pu être tirés. Lors des tirs expérimentaux, les canons de tous les pistolets ont explosé et dans la majorité des cas, la carcasse a aussi été endommagée. Pour les pistolets imprimés par FDM, le taux de remplissage (*Infill density*) semble exercer une influence sur la fonctionnalité des armes. En effet, les pistolets imprimés en ABS avec un taux de remplissage de 100 % ont obtenu une meilleure efficacité lors des tirs (plus grande pénétration dans le savon balistique) que ceux avec un taux de remplissage de 70 % et 90 %. Les pistolets imprimés par SLS, ayant eu aussi un taux de remplissage de 100 %, sont ceux qui démontrent la plus grande efficacité en termes de capacité à tirer (plus grande vitesse et pénétration). Finalement, au niveau de l'impact du procédé d'impression sur les traces générées lors d'un tir, il en ressort que les fractures observées sur les pistolets imprimés par FDM suivent ou sont perpendiculaires aux

couches d'impression, contrairement aux fractures observées sur les pistolets imprimés en SLS qui ne semblent pas suivre les couches d'impression. Concernant les morceaux et les fragments trouvés dans l'environnement, il s'avère que tous les pistolets ont généré une grande quantité de fragments de formes, tailles et types différents. Dans le cas des pistolets imprimés par FDM, si les fragments sont suffisamment gros, il est possible de mesurer la hauteur des couches d'impression, de différencier un taux de remplissage de 100 % vs non-100% et d'inférer le motif de remplissage (*filling pattern*). Pour les pistolets imprimés en SLS, la forme et l'aspect des fragments obtenus diffèrent grandement de ceux obtenus pour les pistolets imprimés par FDM. En effet, ils ont un aspect visuel plutôt homogène qui ne permet pas de distinguer les couches d'impression ni la structure interne. Considérant cela, il est donc aussi possible de différencier les procédés d'impression à partir de fragments trouvés à la suite de la décharge d'un pistolet imprimé en 3D. De plus, autant pour les pistolets imprimés par FDM que par SLS, les différents morceaux et fragments peuvent être reliés entre eux par association physique. Concernant les traces sur les éléments de munitions, comme attendu, la seule trace balistique observée se trouve sur l'amorce de la douille et provient du clou faisant office de percuteur. Cependant, tous les éléments de munition présentent des traces de polymère en quantité variable. Finalement, toutes les douilles étaient gonflées et/ou fendues, et en fonction de l'emplacement de la rupture du canon, elles pouvaient être expulsées ou rester coincées dans le canon. Cette étude a permis d'en apprendre davantage sur les traces générées lors d'un tir avec un pistolet Liberator et surtout, de déterminer comment ces traces peuvent être utilisées pour informer sur le processus de fabrication des armes à feu imprimées en 3D, soit le type de procédé d'impression, d'imprimante, de polymère ainsi que certains paramètres d'impression.

Quant à eux, Li *et al.*, aux États-Unis, sont les premiers à étudier la possibilité d'identifier la source d'un objet imprimé en 3D, comme une arme à feu imprimée en 3D, en utilisant un système d'imagerie intelligent. Dans leur publication (Li *et al.*, 2018), ils présentent les fondements et démontrent l'efficacité et la précision du

PrinTracker, un système d'identification forensique qui permet de relier un objet imprimé en 3D à l'imprimante l'ayant imprimé en se basant sur son empreinte physique. Le PrinTracker permet de numériser un objet imprimé en 3D en utilisant un numériseur standard afin d'acquérir son image. La texture de l'image est par la suite analysée pour en extraire une empreinte qui est comparée à la base de données du logiciel par des outils statistiques et chimiométriques selon une classification basée sur la texture de surface. Afin de développer leur système, ils se sont basés sur le principe que chaque imprimante 3D possède une structure électronique et mécanique qui lui est propre et qui va inévitablement engendrer des variations dans l'impression. Ces variations, qui proviennent des composantes primaires de l'imprimante (c.-à-d. extrudeur, élément chauffant et buse), vont générer des caractéristiques individuelles dans la texture de surface des objets imprimés. De ce fait, ils ont émis les hypothèses que chaque objet imprimé en 3D possède sa propre empreinte, que les objets imprimés par la même imprimante 3D vont partager des caractéristiques communes dans leur empreinte et que les objets imprimés avec des imprimantes 3D différentes vont posséder des caractéristiques distinctes. Afin de valider leurs hypothèses, ils ont construit une base de données d'images numérisées provenant d'un modèle de clef passe-partout qu'ils ont fait imprimer avec 14 imprimantes 3D différentes, soit dix utilisant la technologie FDM (filaments de polymère PLA et ABS) et quatre la technologie SLA (photopolymères). Par la suite, plusieurs analyses ont été effectuées avec les images de la base de données afin de confirmer que les objets imprimés en 3D ont bel et bien une empreinte, ainsi que pour évaluer les performances et la précision de leur système. Les résultats de leur étude démontrent que le PrinTracker permet non seulement de déterminer le type d'imprimante utilisé, mais aussi d'identifier avec précision l'imprimante 3D ayant imprimé un objet en question en se basant sur son empreinte. Pour les objets présentant une surface d'impression complète ou suffisante, l'identification se fait avec une précision supérieure à 99 %. Pour les objets incomplets ou avec une petite surface d'impression, la précision peut atteindre 92 % (selon leur base de données d'une population de 14 imprimantes 3D de type FDM ou SLA). Il est

important de soulever ici une certaine limitation du PrinTracker. En effet, pour procéder à la détermination du type d'imprimante utilisée pour imprimer un objet ou à l'identification de l'imprimante à la source d'un objet, le modèle de ce système doit être entrainé avec l'imprimante en question. Comme il a été démontré dans l'étude de Trincat *et al*. (Trincat *et al.*, 2022), il est possible, entre autres, de déterminer le procédé d'impression utilisé pour imprimer un objet en question par analyse et comparaison visuelle. Il est donc légitime de se demander s'il y a réellement un gain de temps ou de ressources à utiliser le système plutôt que de procéder directement à la comparaison.

Finalement, à ma connaissance, la dernière étude portant sur les armes à feu imprimées en 3D en polymère a été menée à Dubaï, aux Émirats arabes unis, par Al Shamsi (Al Shamsi, 2019). Cette étude s'est intéressée aux traces physiques laissées par la seule pièce métallique du pistolet Liberator, soit le clou faisant office de percuteur. Son étude visait à déterminer si les traces générées par le percuteur possèdent suffisamment de caractéristiques individuelles afin de procéder à une identification. Pour ce faire, il a imprimé en ABS, avec une imprimante 3D FDM, un pistolet Liberator de calibre .32-20 Winchester, en utilisant un clou comme percuteur. Lors du premier tir, le canon a explosé et des fissures ont pu être observées sur la carcasse du pistolet. Pour les tirs suivants, le canon, la carcasse et la gâchette du pistolet ont été remplacés par des pièces imprimées en *Fiber Reinforced Plastic* (FRP) afin d'augmenter leur résistance. De plus, la charge de poudre dans la munition a été réduite. Lors du deuxième tir, le canon a supporté la pression et est resté en apparence intact, mais lors du troisième tir, le pistolet a complètement explosé. Le percuteur et les éléments de munition provenant des tirs expérimentaux ont été récoltés et un moulage du percuteur a été effectué. Selon Al Shamsi, l'analyse et la comparaison de la trace du percuteur sur l'amorce de chacune des douilles révèlent que ces traces possèdent suffisamment de caractéristiques individuelles afin de pouvoir relier les douilles entre elles. De plus, la comparaison entre le moulage du percuteur et les traces de percuteur sur l'amorce des douilles révèle qu'il est possible de relier les douilles au percuteur. Al Shamsi conclut donc qu'il est

pertinent de chercher non seulement les éléments de munitions, mais aussi le percuteur (clou) sur une scène de crime présentant des signes de l'utilisation d'une arme à feu imprimée en 3D, car il est possible de procéder à une identification. Afin de bonifier cette étude, il faudrait, selon moi, faire l'exercice avec plus d'un percuteur pour être en mesure de déterminer les différents niveaux de caractéristiques (classe, sous-classe et individuelle) et évaluer leur niveau de ressemblance avant de se prononcer sur la possibilité de procéder à une identification. De plus, comme il a été vu précédemment (section 1.1), pour établir un lien (ou non) entre deux éléments de munitions, il est important de prendre en considération l'ensemble des éléments disponibles et non pas chacune des traces de façon individuelle, car la spécificité d'une arme à feu provient de l'ensemble et de la combinaison de ces traces et ces caractéristiques (Biasotti & Murdock, 1984; Carrier & Riva, 2014; Gunther & Gunther, 1935), ce qui n'est pas présenté dans cette étude.

Tel que mentionné précédemment (section 1.2), l'impression 3D ne se limite pas à l'impression d'objet en polymère. Pour l'industrie des armes à feu, l'impression 3D par frittage laser direct de métal ou DMLS (*Direct metal laser sintering)*, faisant partie des procédés d'impression par liage de poudre (dont le principe de fonctionnement est le même que pour le SLS), s'avère une option très intéressante en raison de sa grande précision et des excellentes propriétés mécaniques des objets imprimés. Cette technologie, étant très dispendieuse et nécessitant de l'équipement à la fine pointe de la technologie, est plutôt réservée aux compagnies professionnelles ou industrielles d'impression 3D. Dès la fin de l'année 2013, la première arme à feu en métal imprimée en 3D (doté d'un canon avec un rayage) a été produite par la compagnie spécialisée en impression 3D Solid Concepts Inc., à l'aide de la technologie DMLS. Solid Concepts Inc. affirme que plus de 4500 cartouches ont été tirées par ce pistolet sans remplacement des pièces et qu'ils ont déjà vendu des exemplaires à des particuliers (Hays *et al.*, 2020; Jenzen-Jones, 2015). Les armes à feu imprimées en métal entrainent tout un lot de nouveaux questionnements, surtout au niveau des traces balistiques

générées par le canon qui étaient inexistantes pour les armes à feu imprimées en polymère, et ouvrent donc la voie à une multitude de recherches. La seule étude à s'y être intéressée pour l'instant fût menée par Li *et al*. aux États-Unis (Li, Turner, Golightly, Zelbst, & Yu, 2021). Cette dernière visait à déterminer si les traces sur les projectiles provenant du canon possèdent des caractéristiques individuelles, reproductibles et durables dans le temps, permettant de procéder à leur identification.

1.5 Objectifs de recherche

Avec l'évolution constante de la technologie et l'effort soutenu des criminels pour développer de nouvelles méthodes afin de déjouer la justice (Day & Speers, 2020; Jenzen-Jones, 2015), les policiers et les scientifiques doivent constamment être à l'affût de ces nouveaux développements et être à jour dans leur méthode d'investigation et d'analyse scientifique s'ils veulent être en mesure de rivaliser avec les criminels. De plus, l'augmentation considérable du nombre d'infractions commises impliquant l'usage d'une arme à feu ces dernières années au Canada (Moreau, 2021), ainsi que la recension de plusieurs cas récents impliquant une arme à feu imprimée en 3D (ou des pièces et accessoires d'arme à feu imprimés en 3D) confirment qu'il est primordial de s'intéresser davantage à ces armes qui causent problème au niveau des enquêtes criminelles. Il est donc important de bien comprendre ces armes afin d'être en mesure de reconnaitre une scène de crime impliquant la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D et d'identifier les traces et indices importants à collecter, ainsi que de savoir comment exploiter au maximum le potentiel d'informations qu'elles peuvent fournir lors des analyses scientifiques.

Considérant les études existantes et les résultats obtenus, il est évident que davantage d'études s'intéressant à l'analyse des traces chimiques produites par l'utilisation des armes à feu imprimées en 3D s'avèrent nécessaires afin d'élargir et renforcer les connaissances sur ce nouveau type de traces auxquelles les forces de l'ordre sont

confrontées. Ce projet de recherche se concentre donc sur l'analyse chimique et l'analyse de la dégradation des polymères utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu, en utilisant des méthodes d'analyse plus simples, efficaces et accessibles, mais surtout non destructives, soit la spectroscopie infrarouge et Raman. Pour ce faire, le projet est divisé en quatre objectifs.

Le premier objectif (section 3.1) est d'effectuer une étude de population auprès des compagnies d'impression 3D et des particuliers pratiquant l'impression 3D afin de brosser un portrait de l'utilisation des filaments de polymère en vente sur le marché, en déterminant quels types, marques et couleurs de polymère sont les plus utilisés. Cette étape permet aussi de récolter les échantillons de filament de polymère (avant et après impression) nécessaires à la conception de la base de données de polymère.

Le deuxième objectif de ce projet (sections 3.2 et 3.3) est de concevoir la base de données spectrales de la composition chimique des filaments de polymère commerciaux le plus communs, par l'analyse instrumentale (spectroscopie infrarouge et Raman) des échantillons de polymère recueillis lors de l'étude de population. Cette base de données sert, entre autres, à effectuer des analyses chimiométriques avec les spectres obtenus afin de valider l'efficacité de cette méthode d'analyse en établissant son pouvoir discriminant ainsi qu'en déterminant s'il est possible d'identifier les différents types de polymère. Elle sert aussi à déterminer s'il est possible d'associer les traces de polymère trouvées sur une scène de crime impliquant une arme à feu imprimée en 3D avec les matériaux bruts d'impression (la source) ou encore, de relier deux ou plusieurs scènes entre-elles par l'entremise de ces traces. De plus, les spectres infrarouges et Raman ont été compilés sous forme de librairie dans le logiciel OMNIC, facilitant ainsi la recherche par similarité pour l'identification d'inconnus. Cette base de données se veut donc être un outil de référence, éventuellement déployable, pouvant être utilisé par les différents laboratoires afin de les assister dans leurs expertises.

Le troisième objectif (section 3.4) est de réaliser des tirs expérimentaux avec des armes à feu imprimées en 3D, en différents types de polymère, afin de reproduire une scène de crime impliquant ce type d'arme à feu et ainsi générer des traces et des résidus de polymère. Ces traces et résidus de polymère ont eux aussi été analysés par spectroscopie infrarouge et Raman afin d'être comparés avec les spectres de la base de données et être inclus dans les analyses chimiométriques permettant ainsi de valider s'il est possible d'identifier et de relier (ou non) des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime (section 3.6). Parallèlement, des analyses balistiques sommaires ont été effectuées lors de tirs expérimentaux afin de compiler plus de données balistiques et permettre de corroborer et de soutenir les résultats obtenus par les études précédentes.

Finalement, le quatrième objectif de ce projet (section 3.5) est d'étudier la dégradation que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes températures et pressions engendrées par un tir d'arme à feu afin de déterminer si ces effets peuvent exercer une influence sur l'interprétation des résultats et sur la possibilité d'identifier ou de relier des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Dans ce chapitre, le matériel, les instruments et la technologie utilisés pour réaliser ce projet ainsi que la méthodologie employée seront décrits en détail. Plus précisément, il sera question de la microscopie et la photographie, l'analyse instrumentale, soit la spectroscopie infrarouge et Raman, l'impression 3D, la réalisation des tirs expérimentaux, le traitement des données et les analyses chimiométriques.

2.1 Microscopie et photographie

La microscopie est bien souvent la première méthode à utiliser dans une séquence d'analyse d'un matériau. L'utilisation d'un stéréomicroscope permet de faire rapidement l'examen préliminaire d'un objet en observant ses propriétés physiques et morphologiques. Il est aussi un instrument idéal pour effectuer la recherche de traces et lorsqu'il est muni d'une caméra, il permet de faire l'acquisition d'images. Par la suite, l'utilisation des différents types de microscopes (p. ex. microscope optique, numérique ou électronique) permet de faire une analyse plus approfondie des propriétés physiques et morphologiques de l'objet ou de la trace en question (Petraco & Kubic, 2003).

2.1.1 Stéréomicroscope

Un stéréomicroscope Nikon SMZ 745T équipé d'une caméra pour microscope Nikon DigitalSight DS-Fi2 a été utilisé pour faire l'observation des fragments et des résidus

de canon générés lors de tirs expérimentaux (échantillons de polymère « après tir ») ainsi que les éléments de munitions (douilles et projectiles).

2.1.2 Microscopie numérique

Un microscope numérique Keyence VHX-2000E équipé d'une caméra VHX-1100 Multi Scan et d'une lentille VH-Z20R (G = 20x à 200x) a été utilisé pour observer et photographier les fragments et des résidus de canon générés lors de tirs expérimentaux (échantillons de polymère « après tir ») ainsi que les éléments de munitions (douilles et projectiles).

2.1.3 Appareil photo

Un appareil photo Nikon DX3200 équipé d'un objectif macro AF-S Micro NIKKOR 60 mm f/2.8G EP a été utilisé en mode manuel pour réaliser les photographies du projet.

2.2 Analyse instrumentale

Il existe une grande variété de méthodes permettant d'analyser, de caractériser et d'identifier les polymères. La spectroscopie infrarouge et Raman sont des méthodes de choix dans l'analyse des polymères, car elles peuvent fournir énormément d'informations sur la molécule avec des analyses assez simples et rapides et relativement peu coûteuses, tout en étant sensibles et spécifiques. De plus, ce sont des méthodes d'analyses non destructives qui permettent d'analyser des échantillons solides sans préparation et même avec une faible quantité de matière (Stuart, 2021; Stuart, 2002; Wolstenholme, 2021), ce qui est un net avantage lorsqu'on travaille avec des traces ou un spécimen unique.

La spectroscopie infrarouge et Raman sont deux techniques de spectroscopie vibrationnelle qui exploitent les changements produits dans les modes de vibration des

liaisons d'une molécule, lors de l'interaction avec des rayonnements électromagnétiques. Ces deux méthodes permettent de fournir de l'information sur la structure chimique du composé, mais selon des règles de sélection différentes. En effet, la spectroscopie infrarouge étudie l'absorption de la lumière par les molécules vibrantes lorsqu'il y a un changement du moment dipolaire permanent d'une liaison, tandis que la spectroscopie Raman étudie la diffusion de la lumière par les molécules vibrantes lorsqu'il y a un changement dans la polarisabilité (c.-à-d. déformation du nuage électronique) d'une liaison. La spectroscopie infrarouge peut donc fournir des informations structurelles sur des liaisons inactives en spectroscopie Raman et vice-versa. Ces deux méthodes sont donc très complémentaires (Jenkins & Larsen, 2004; Stuart, 2021; Stuart, 2002, 2012; Wolstenholme, 2021).

2.2.1 Spectroscopie infrarouge

Les spectres infrarouges ont été réalisés avec un spectromètre Thermo Fisher Scientific Nicolet iS10 FTIR équipé d'un détecteur DTGS et ont ensuite été traités avec le logiciel OMNIC 8.1 (Thermo Fisher Scientific). Pour chaque échantillon, sept mesures (réplicas) ont été prises de façon aléatoire à différents endroits sur l'échantillon de polymère ayant directement été déposé sur le cristal ATR. Les spectres ont été collectés en transmittance dans le domaine de 4000–550 cm^{-1} avec une résolution de 2,0 cm^{-1} et 64 balayages.

2.2.2 Spectroscopie Raman

Les spectres Raman ont été réalisés avec un microscope Raman dispersif Thermo Scientific DXR2 Raman Microscope équipé d'un laser DXR 785 nm Laser et ont ensuite été traités avec le logiciel OMNIC for Dispersive Raman, V 9.9.473 (Thermo Fisher Scientific). Pour chaque échantillon, cinq mesures (réplicas) ont été prises de façon aléatoire à différents endroits sur l'échantillon de polymère ayant préalablement été monté sur une lame de verre pour microscope. Les spectres ont été collectés, à un

grossissement de 20x avec un objectif MPlan 20x/0.40 BD, dans le domaine de 3378–100 cm^{-1}, avec une résolution de 2,0 cm^{-1}, un temps d'exposition de 2,0 secondes, 35 balayages et une puissance entre 2 mW et 30 mW pour le laser selon la coloration de l'échantillon de polymère.

Le logiciel Origin® 2019 de OriginLab a été utilisé pour traiter (correction de la ligne de base) et pour normaliser (normalisation à l'échelle de 0 à 1) les spectres infrarouges et Raman présentés dans la partie des résultats (section 3).

2.3 Impression 3D de canons d'arme à feu

Pour des raisons pratiques, techniques et légales, au lieu de faire l'impression 3D d'armes à feu entières, des canons d'armes à feu adaptables à la carcasse d'une carabine Ruger 10/22 ont été modélisés et imprimés par la compagnie ReddNobb. Au total, huit canons de polymère différents ont été imprimés en utilisant la technique d'impression FDM avec une imprimante 3D Creality CR-10s Pro. Les canons, qui mesurent 120 mm, ont été imprimés avec des filaments de 1,75 mm de diamètre, avec une buse de diamètre de 0,4 mm et avec un de taux remplissage[10] (*infill*) de 100 % (voir Figure 2.1).

[10] Taux de remplissage : densité de la structure interne d'une pièce imprimée en 3D. Il est défini comme un pourcentage compris entre 0 et 100, où 0 % signifie que la pièce est creuse et 100 % qu'elle est complètement pleine (Filimprimante3D, 2021a).

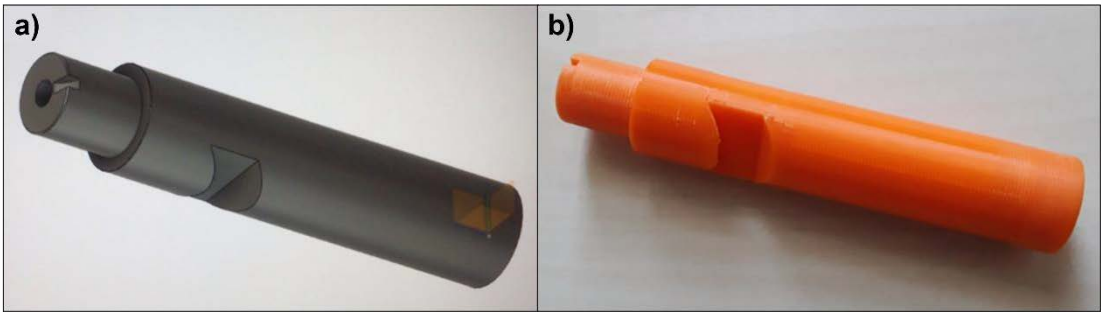

Figure 2.1 Canon imprimé en 3D adaptable à une carabine Ruger 10/22,
a) modélisation du canon et b) canon imprimé en 3D

Les types de polymère ayant été choisis, soit l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le Nylon, le polycarbonate (PC), le polyéthylène téréphtalate glycol (PETG), l'acide polylactique (PLA) et le polyuréthane thermoplastique (TPU), sont des polymères couramment utilisés pour impression 3D avec la technologie FDM (voir Tableau 2.1). Pour les canons en PETG et en Nylon, du filament renforcé par fibres de carbone a été choisi afin d'améliorer la résistance du canon. Il est à noter que l'échantillon de PC est en fait un mélange de polycarbonate et de copolyesters (PC CPE) (Filaments.ca, 2022b).

Tableau 2.1 Canons imprimés en 3D adaptables à une carabine Ruger 10/22

Type de polymère	Marque et modèle de polymère	Couleur du polymère	Marque et modèle imprimante	Température extrusion (± 3 °C)
PLA	Elixir	Bleu (aquamarine)	Creality CR-10s Pro	215
PLA	3D Printing Canada - Value PLA	Orange	Creality CR-10s Pro	215
ABS	3D Printing Canada	Gris (argent)	Creality CR-10s Pro	230
PETG + fibre carbone	3D Printing Canada	Noir	Creality CR-10s Pro	245
Nylon + fibre carbone	Filaments.ca	Noir	Creality CR-10s Pro	260
TPU	NinjaTek - Armadillo	Bleu	Creality CR-10s Pro	235
PC	Filaments.ca - Easy PC CPE (C*opolyester blend*)	Bleu	Creality CR-10s Pro	260
PC	Filaments.ca - Easy PC CPE (C*opolyester blend*)	Bleu	Creality CR-10s Pro	260

2.4 Carabine Ruger 10/22

La carabine Ruger 10/22 est une carabine semi-automatique de calibre .22 LR. Cette arme à feu a été choisie en raison de la simplicité de conception et d'impression de son canon ainsi que pour la facilité d'adaptation du canon sur la carcasse de la carabine. Le canon original de cette carabine mesure 470 mm (voir Figure 2.2).

De plus, comme le mode de fonctionnement de cette carabine semi-automatique est à culasse non verrouillée (*Blowback*[11]), le canon ne participe pas au fonctionnement

[11] *Blowback* : conception que l'on trouve dans les armes à feu semi-automatiques et automatiques où le poids de la culasse, l'inertie d'une composante complétée par un ressort récupérateur, et/ou un retard mécanique constituent la principale force de verrouillage. L'action reste fermée au moment du tir jusqu'à ce que la pression de la chambre ait baissé à un niveau sûr, après quoi les forces de recul font fonctionner l'arme à feu (AFTE, 2013).

d'ouverture de la culasse (le canon est fixe). Cela fait en sorte que le fait d'adapter un canon plus court et de masse inférieure (canon en polymère) au canon original n'allait pas avoir de répercussion sur le fonctionnement de l'arme.

Figure 2.2 Carabine Ruger 10/22

2.5 Assemblage des canons imprimés en 3D à la carabine Ruger 10/22

L'assemblage des armes à feu hybrides imprimées en 3D se fait par l'adaptation des canons imprimés en 3D sur la carcasse de la carabine Ruger 10/22, par la pièce de jonction entre la carcasse et le canon (*V-Bloc Barrel retainer system)* et deux vis (voir Figure 2.3 et Figure 2.4). Un test de fonctionnement pour chaque canon a été effectué avant les tirs afin de vérifier s'il s'assemblait correctement à la carcasse et si le mécanisme de mise à feu était fonctionnel à sec.

Figure 2.3 Carabine Ruger 10/22, désassemblée

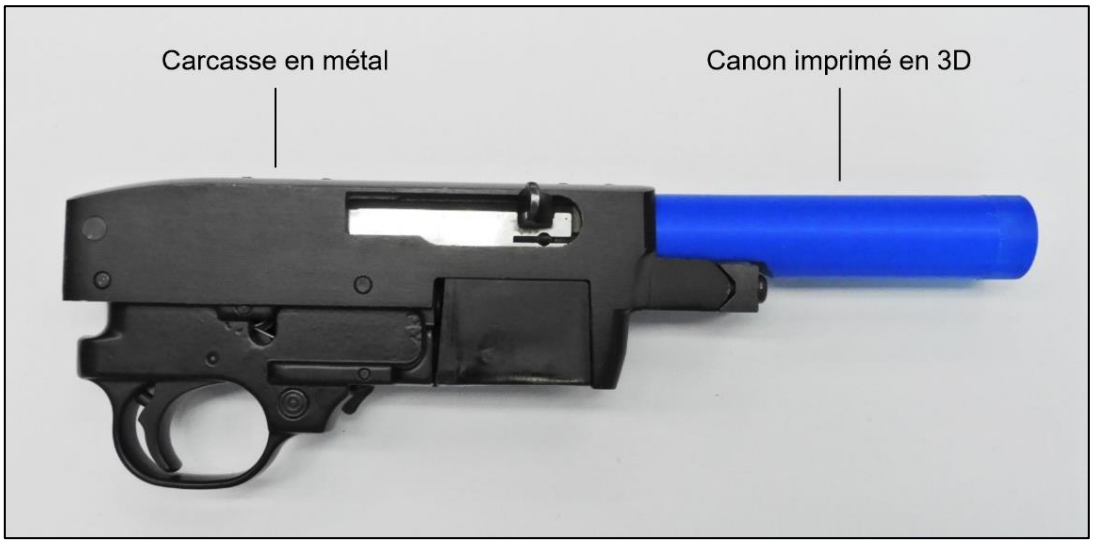

Figure 2.4 Canon imprimé en 3D assemblé à la carcasse d'une carabine Ruger 10/22

2.6 Tirs expérimentaux

Des tirs expérimentaux ont été réalisés afin de reproduire une scène impliquant des armes à feu imprimées en 3D et ainsi générer des traces de polymère « après tir ».

2.6.1 Munitions

Pour tous les tirs expérimentaux, des cartouches de marque Winchester Super-X Subsonic, de calibre .22 LR, masse du projectile de 40 Gn, ont été utilisées avec le chargeur original s'adaptant à cette carabine (voir Figure 2.5).

Figure 2.5 Cartouche Winchester Super-X Subsonic, calibre .22 LR

2.6.2 Équipement et montage de la salle de tir

Les tirs expérimentaux ont été réalisés dans la salle de tir du département de balistique du Laboratoire de sciences judiciaires et de médecine légale. Un montage comprenant une vitre de protection et un système de tir à distance avec une tige métallique, une caméra haute-vitesse ainsi que deux chronographes placés à 1 m de la bouche du canon de l'arme à feu a été mis en place afin de pouvoir réaliser les tirs expérimentaux de façon sécuritaire et collecter les données (voir Figure 2.6).

Une caméra haute vitesse Phantom V711, version V12.2 a été utilisée pour filmer les tirs expérimentaux. La résolution de cette caméra est de de 1024 x 512 pixels avec

12 bits/pixel et une vitesse de 14 000 images/seconde. Le logiciel utilisé pour exploiter les images de la caméra haute-vitesse est le PCC 2.7 Phantom Camera Control Application de Ametek Materials Analysis Division.

Deux chronographes ont été utilisés en tandem lors des tirs expérimentaux afin de mesurer la vitesse des projectiles à la sortie du canon. Il s'agit d'un chronographe Oehler modèle 35 BNC muni de deux écrans photoélectriques Oehler modèle 57, et d'un chronographe Kurzzeit BMC 21a muni de deux écrans photoélectriques Kurzzeit modèle LS1200. Les chronographes sont composés d'un ordinateur (le chronographe lui-même) et de deux écrans lumineux photoélectriques situés à une distance fixe l'un de l'autre. La différence de luminosité détectée à un moment précis lors du passage du projectile au travers chacun des écrans lumineux permet à l'ordinateur de calculer une vélocité.

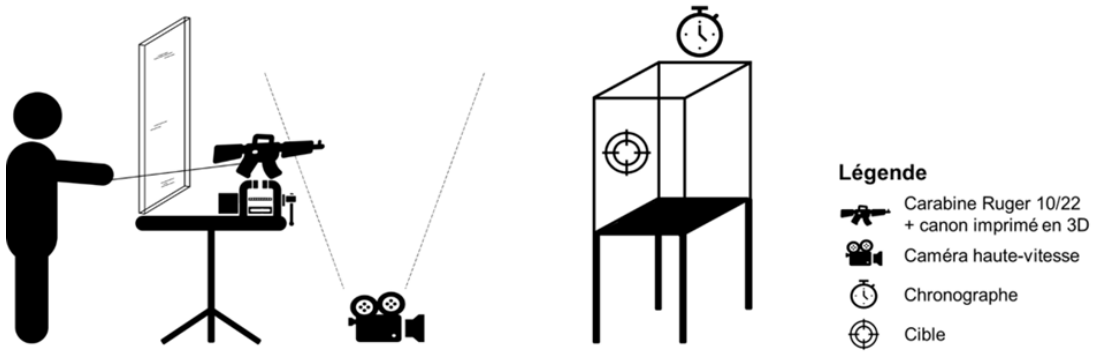

Figure 2.6 Schéma du montage de la salle de tirs expérimentaux

2.7 Traitement de données spectrales et analyses chimiométriques

Les méthodes d'analyse chimiométriques utilisent différentes approches statistiques afin d'analyser et de modéliser l'information chimique. Dans ce projet, c'est l'analyse en composantes principales (PCA) qui a été utilisée pour analyser les spectres infrarouges et les spectres Raman des échantillons de polymère de la collection. La

PCA est une méthode d'analyse exploratoire des données qui peut être appliquée à n'importe quelle matrice, tant qu'il s'agit d'un jeu de données présentant des variables qui sont corrélées entre elles, comme c'est le cas avec les spectres infrarouges et Raman. L'objectif de la PCA est de produire une visualisation simplifiée et de réduire la dimensionnalité en résumant les variables d'origine (initiales) par de nouvelles variables (latentes) (Miller & Miller, 2010; Varmuza & Filzmoser, 2009).

Les analyses en composantes principales ont été réalisées à l'aide du logiciel The Unscrambler X, version 10.5, en utilisant la méthode de validation *Cross-validation*. Tous les spectres infrarouges et Raman ont préalablement été traités à l'aide du même logiciel. Pour chacun des spectres, une correction pour la diffusion (*Scattering Effects*) a été effectuée en utilisant le prétraitement *Standard Normal Variate*, où chaque variable spectrale est soustraite de la moyenne et divisée par l'écart type de tous les points spectraux, suivi de la correction de la ligne de base par le prétraitement *Detrending*.

Des tests à l'aveugle ont aussi été effectués dans The Unscrambler X avec les fragments de polymère générés lors de tirs expérimentaux ainsi qu'avec des spécimens provenant de cas réels reçus au LSJML, afin de déterminer s'il est possible d'identifier le type de polymère d'un échantillon inconnu. Pour ce faire, les spectres de ces fragments et ces spécimens ont été projetés dans la PCA d'origine, après avoir subi les mêmes prétraitements que les autres spectres. Lors de la PCA d'origine, des coefficients sont attribués à chacune des variables en fonction de leurs axes X et Y (PC-1 et PC-2). En utilisant la fonction *Projection* avec des spécimens inconnus, chacune de leur variable est multipliée par le coefficient de la PCA originale. Cela permet de projeter le spécimen inconnu dans le système d'axe de la PCA d'origine, près des échantillons qui lui sont semblables chimiquement (Esbensen, Swarbrick, Westad, Whitcombe, & Anderson, 2018).

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats des quatre grands objectifs de ce projet sont présentés et interprétés en détail, soit 1) l'étude de population auprès des compagnies d'impression 3D, 2) la conception de la base de données spectrales des polymères ainsi que les analyses chimiométriques effectuées à partir de cette dernière, 3) les tirs expérimentaux permettant de reproduire une scène de crime impliquant une arme à feu imprimée en 3D, puis 4) l'étude de la dégradation que les polymères peuvent subir lors de la décharge de ce type d'arme à feu.

3.1 Étude de population

Une étude de population a été menée auprès de compagnies d'impression 3D et de particuliers pratiquant l'impression 3D par FDM, dans les régions de la Mauricie, de Lanaudière et de Montréal au Québec, afin de brosser un portrait de l'utilisation des différents filaments de polymère en vente sur le marché. Au total, quatre compagnies ou services d'impression 3D, soit Lezar3D, ReddNobb, la bibliothèque de l'UQTR et le département de Génie mécanique de l'UQTR, ainsi que quatre particuliers pratiquant l'impression 3D à la maison ont fourni des échantillons de polymère.

Cette étude de population a permis de créer une collection de 147 échantillons de polymère, soit 73 échantillons de filament « avant impression » et 74 échantillons « après impression », de type, de marque et de couleur différents, ayant été imprimés

avec des imprimantes et à des températures d'impression variées (voir Annexe A). Pour les échantillons de polymère « avant impression », un morceau de filament d'environ 2 cm de long est prélevé de la bobine de filament. Pour les échantillons de polymère « après impression », un petit carré de 1 x 1 cm et d'une épaisseur d'environ 0,3 cm est imprimé avec le polymère correspondant « avant impression » (voir Figure 3.1).

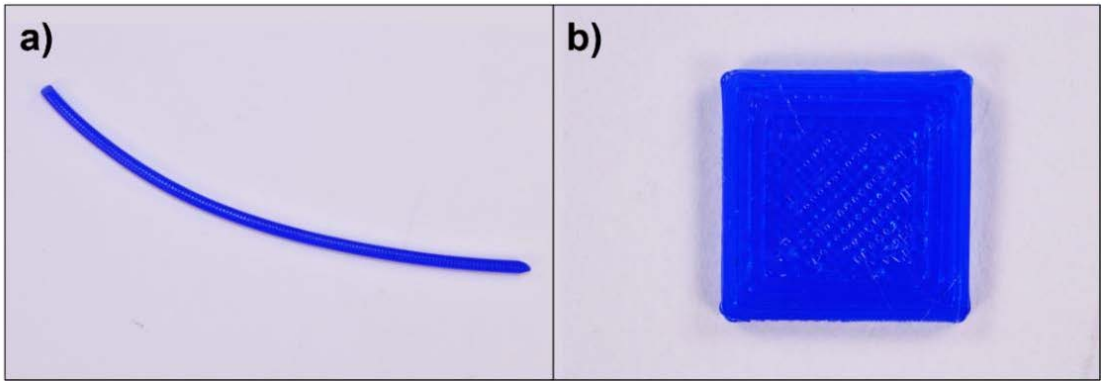

Figure 3.1 Échantillons de polymère de la collection, a) « avant impression » et b) « après impression »

Afin de faire ressortir des tendances et de générer des statistiques générales sur l'utilisation des différents filaments de polymère en vente sur le marché, les échantillons de polymère « avant impression » (n = 73) de la collection ont été classés selon le type, la marque commerciale et la couleur du polymère. Cette étape permet, entre autres, de se faire une idée des filaments de polymère les plus susceptibles d'être utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu ou de pièces et accessoires d'armes à feu.

La première classification des échantillons de polymère a été effectuée en fonction du type de polymère. Au total, sept types différents de polymère ont été comptabilisés (voir Figure 3.2). C'est le PLA que l'on trouve en plus grande quantité avec 32 échantillons (44 %), suivi du PETG avec 15 échantillons (21 %) et du TPU avec 14 échantillons (19 %), puis, en plus faible quantité, de l'ASA avec 4 échantillons (5 %), de l'ABS et du Nylon avec 3 échantillons chacun (4 %) et du PC CPE avec 2

échantillons (3 %). Bien que les proportions soient sujettes au changement en fonction du type de population sondée, le fait d'obtenir ici le PLA en plus grande quantité, soit le polymère le plus utilisé et le plus facile à imprimer (Filimprimante3D, 2021b), et les polymères plus techniques ou avec des caractéristiques physico-chimiques particulières (p. ex. ABS et PC) en plus faible quantité n'est pas surprenant. En effet, ces proportions cadrent avec la population sondée dans ce projet, c'est-à-dire une population composée de particuliers pratiquant l'impression 3D à la maison ou de compagnies offrant un service d'impression 3D majoritairement pour des projets de particuliers, et non pas des compagnies pratiquant l'impression 3D à des fins commerciales ou industrielles.

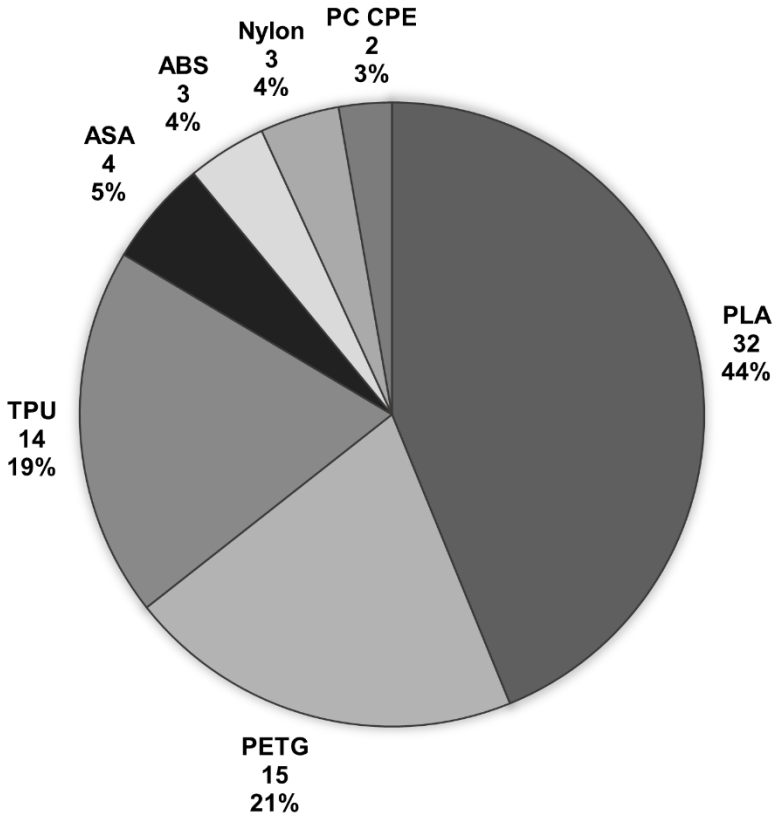

Figure 3.2 Classification des échantillons selon le type de polymère (n = 73)

Comme il a été vu précédemment, Black (Black, 2019), dans son étude menée aux États-Unis, a lui aussi créé une collection d'échantillons de filament de polymère commercialement disponibles (n = 50) afin de concevoir une base de données spectrales par DART-MS. En analysant sa collection d'échantillons[12], il est possible de constater que Black obtient lui aussi le PLA en plus grande quantité avec 23 échantillons (46 %), suivi du PETG avec 8 échantillons (16 %) et de l'ABS avec 7 échantillons (14 %), puis des copolymères avec 4 échantillons (8 %), du Nylon avec 3 échantillons (6 %), du TPU avec 2 échantillons (4 %), et finalement de l'ASA, du PC et d'un polymère inconnu avec chacun un seul échantillon (2 %). Bien que les résultats entre nos deux études soient légèrement différents (proportions de l'ABS et du TPU inversées), on observe une tendance très similaire au niveau des types de polymère utilisés, mais aussi au niveau des proportions obtenues.

La deuxième classification des échantillons de polymère a été effectuée en fonction des marques commerciales (voir Tableau 3.1). Au total, 20 marques différentes ont été comptabilisées. C'est la marque Filaments.ca qui se distingue avec 24 échantillons (33%), suivi de MakerBot avec 8 échantillons (11%), puis de Filaments3dquebec.ca et Spool 3D avec 6 échantillons chacune (9 %). Les filaments de polymère des autres marques commerciales sont en plus faibles proportions, allant de 1 à 5 échantillons (1% à 7 %). Il est à noter que ces proportions relatives ne semblent pas avoir été influencées par une compagnie d'impression 3D en particulier. En effet, l'utilisation de ces marques commerciales est assez bien répartie parmi les collaborateurs. Par exemple, pour Filaments.ca, deux des quatre compagnies d'impression 3D et trois des quatre particuliers pratiquant l'impression 3D ont fourni différents échantillons de cette

[12] Dans l'étude de Black, aucune classification des échantillons de polymère est présentée. Cependant, la liste des échantillons est fournie, ce qui m'a permis de les classer et de calculer les proportions en fonction du type, de la marque et de la couleur du polymère. De plus, il est uniquement mentionné qu'il s'agit de filament de polymère commercialement disponibles, mais il n'est pas précisé si une population en particulier a été sondée ou s'ils ont été achetés au hasard.

marque commerciale. Cependant, il est important de préciser que les marques commerciales dans cette étude de population ne représentent qu'une infime partie de ce qui est en vente sur le marché. En effet, uniquement sur le site de Filaments.ca, qui est un des plus grands fournisseurs de filaments de polymère au Canada, on trouve des milliers de marques commerciales et de types de filament de polymère différents (Filaments.ca, 2022a). Toutefois, cela permet quand même d'avoir une idée générale des marques les plus utilisées dans les régions ciblées par cette étude de population.

Tableau 3.1 Classification des échantillons selon la marque de polymère (n = 73)

Marque de polymère	Quantité d'échantillons	Proportion relative (%)
Filaments.ca	24	33
MakerBot	8	11
Filaments3dquebec.ca	6	9
Spool 3D	6	9
3D Printing Canada	5	7
NinjaTek	5	7
eSun	3	5
Markforged	2	3
Sainsmart	2	3
Stratasys	2	3
3D Hero	1	1
3D Solutech Filament	1	1
3D Spark Pro Filament	1	1
AMZ3D	1	1
Apollox FormFutura	1	1
Cyclone Filament	1	1
Elixir	1	1
Hatchbox	1	1
NextPage PLA	1	1
nGen ColorFabb	1	1
Total	73	100

Dans l'étude de Black, un total de 22 marques commerciales différentes a été comptabilisé. Bien que les marques commerciales obtenues dans l'étude de Black soient assez différentes de celles obtenues dans ce présent projet, il est possible d'observer une tendance similaire au niveau des proportions obtenues entre les deux études. En effet, Black obtient lui aussi une marque commerciale principale en plus grande quantité, soit Makeshaper avec 12 échantillons (24 %), suivi d'une autre marque avec des proportions supérieures à 10 %, soit Matterhackers avec 6 échantillons (12 %), puis d'autres marques avec des proportions plus faibles, allant de 1 à 4 échantillons (2 % à 8 %). De plus, on obtient cinq marques commerciales communes aux deux études, soit eSun, Hatchbox, ColorFabb, nGen et NinjaTek.

Finalement, la troisième classification des échantillons de polymère de la présente étude a été effectuée en fonction de leurs couleurs (voir Figure 3.3). Au total, 11 catégories de couleurs différentes ont été comptabilisées. Chaque catégorie comprend plusieurs nuances et tons d'une même couleur pour lesquels une discrimination supplémentaire aurait été possible. Les catégories de couleur ont volontairement été élargies afin de faciliter la classification. Ce sont les filaments de couleur noire que l'on trouve en plus grande quantité avec 16 échantillons (22 %), suivi du bleu et du rouge avec 9 échantillons chacun (12 %), du blanc et de l'orange avec 8 échantillons chacun (11 %), puis du vert avec 7 échantillons (10 %). Les échantillons de polymère des autres catégories de couleur sont en plus faibles proportions, allant de 1 à 5 échantillons (1 % à 7 %).

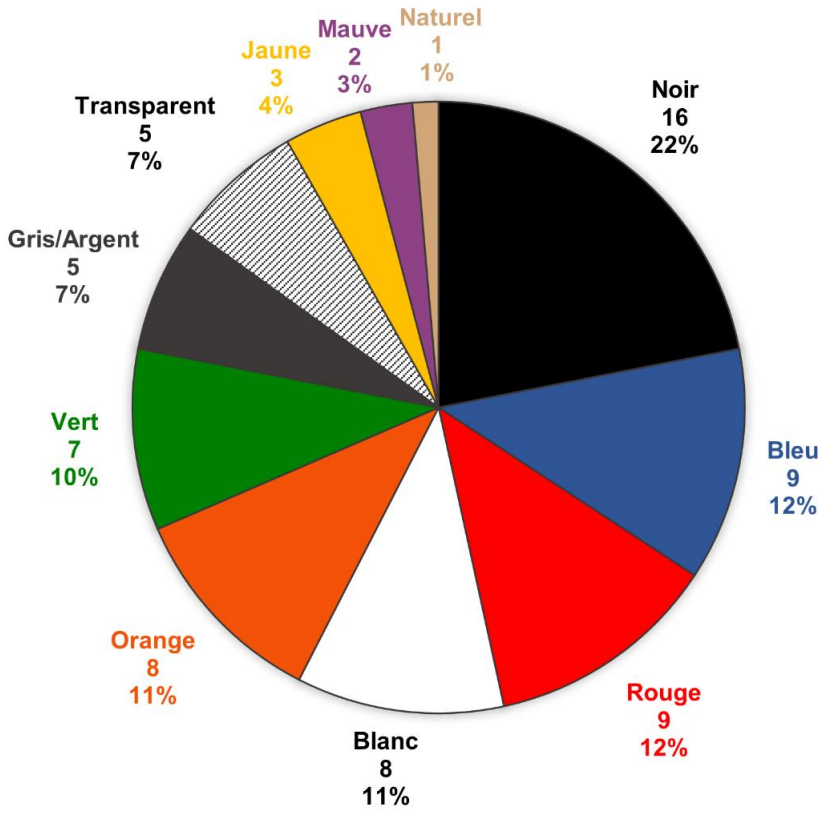

Figure 3.3 Classification des échantillons selon la couleur du polymère (n = 73)

Quant à l'étude de Black, il obtient un total 12 catégories de couleurs différentes, dont 11 d'entre elles sont les mêmes que pour le présent projet, plus une catégorie supplémentaire pour le brun/bois. Ce sont les filaments de couleur bleue qu'il obtient en plus grande quantité avec 10 échantillons (20 %), suivi du blanc et du noir avec chacun 8 échantillons (16 %), puis du rouge avec 6 échantillons (12 %). Les autres catégories de couleurs sont en plus petites proportions, allant de 1 à 4 échantillons (1 % à 8 %). Bien qu'elles ne soient pas exactement dans le même ordre de proportions, on obtient dans les deux études les quatre mêmes catégories de couleur majoritaire, soit le noir, le bleu, le rouge et le blanc.

En somme, il est possible d'observer plusieurs tendances communes entre la collection d'échantillons de filament de polymère dans l'étude de Black et l'étude de population

de ce présent projet au niveau de l'utilisation des différents filaments de polymère en vente sur le marché. Maintenant que ces tendances sont connues et que des statistiques générales sont disponibles, à quoi peut-on s'attendre concernant les armes à feu imprimées en 3D?

Pour ce qui est du type de polymère, si on combine cette étude à celle de Black, on devrait s'attendre à ce qu'il y ait une plus grande possibilité de trouver des armes à feu imprimées en 3D (ou des pièces et accessoires d'armes à feu imprimés en 3D) en PLA, en TPU, en PETG ou en ABS. Le PLA est le type de polymère que l'on trouve en plus grande proportion dans les deux études. Cependant, bien qu'il soit le polymère le plus utilisé et le plus facile à imprimer, il n'est pas réputé pour être très résistant au choc et à la chaleur (Filimprimante3D, 2021b). Considérant cela, le PLA risque plus d'être utilisé pour les armes dont seule la carcasse est imprimée en 3D ou pour les pièces des armes hybrides imprimées en 3D qui ne sont pas soumises aux fortes pressions et températures générées lors d'un tir. Pour le TPU, ce type de polymère n'est pas réellement un candidat de choix, car ses propriétés mécaniques (p. ex. matériau flexible) ne cadrent pas réellement avec celles recherchées pour les armes à feu et les pièces et accessoires d'armes à feu imprimées en 3D. Quant au PETG, il est un bon intermédiaire entre le PLA et l'ABS. En effet, ses propriétés mécaniques sont proches de celles de l'ABS, mais il n'est pas aussi résistant à la chaleur (Filimprimante3D, 2021b; Simplify3D, 2021). Tout comme le PLA, il risque donc d'être utilisé pour les armes dont seule la carcasse est imprimée en 3D ou pour les pièces des armes hybrides imprimées en 3D qui ne sont pas (ou peu) soumises aux fortes pressions et températures générées lors d'un tir. Finalement, c'est plutôt l'ABS qui risque d'être les plus utilisé pour les armes à feu imprimées en 3D, surtout pour les armes entièrement imprimées en 3D, puisque ses propriétés mécaniques, tels que la résistance aux chocs et à la chaleur lui permet de mieux supporter les contraintes auxquelles il est soumis lors d'un tir (Filimprimante3D, 2021b; Simplify3D, 2021). D'ailleurs, c'est l'ABS qui a été utilisé dans toutes les études portant sur l'impression 3D d'armes à feu mentionnées

dans la revue de la littérature (Al Shamsi, 2019; Black, 2019; Black *et al.*, 2017; Cizdziel & Black, 2019; Crowe & Rugh, 2017; Honsberger, 2017; Honsberger *et al.*, 2018; Honsberger *et al.*, 2019; LaRocco, 2013; Trincat *et al.*, 2022). Il est à noter que le PETG et le PLA ont aussi été utilisés pour imprimer des armes à feu dans l'étude de Trincat *et al*. (Trincat *et al.*, 2022) ainsi que celle de Black (Black, 2019; Black *et al.*, 2017; Cizdziel & Black, 2019). Malheureusement, comme les cas réels reçus au LSJML n'ont pas systématiquement été analysés chimiquement, il n'est pas possible de confirmer si la réalité des armes à feu imprimées en 3D correspond aux tendances observées dans les deux études de population.

En ce qui a trait à la marque commerciale de polymère pouvant être utilisée, il est plutôt difficile de se prononcer étant donné la grande variété de marques commerciales en vente sur le marché. De plus, il a été vu qu'il y a une variation considérable au niveau des marques obtenues entre la présente étude menée au Québec et celle de Black menée aux États-Unis (Black, 2019), et qu'il est donc possible de s'attendre à une variation selon la région géographique en question.

Finalement, au niveau de la couleur des polymères, les deux études ont permis de faire ressortir quatre catégories de couleur majoritaire, soit noir, rouge, blanc et bleu. Le choix de la couleur est assez subjectif et peut varier en fonction de l'objet à imprimer. Pour les armes à feu, il est possible de s'attendre à ce que le noir soit le plus utilisé. Si l'on se fie aux armes à feu imprimées en 3D et aux pièces et accessoires d'armes à feu imprimés en 3D reçues pour expertise au LSJML, 17 des armes à feu imprimées en 3D étaient de couleur noire (trois d'entre elles avaient une ou deux pièces de couleur rouge), une était de couleur rouge et noir, une de couleur grise et noir et une de couleur transparente et noire. Quant à eux, les neuf pièces et accessoires étaient tous de couleur noire (deux d'entre eux avaient une petite partie de couleur rouge).

3.2 Base de données spectrales des polymères

Les échantillons de polymère de l'étude de population ont servi à la conception de la base de données spectrales de la composition chimique des polymères. Cette dernière est composée des spectres infrarouges et Raman des 147 échantillons de polymère de la collection, soit 73 échantillons de filament « avant impression » et 74 échantillons « après impression ». Pour chacun des échantillons, sept réplicas ont été acquis par spectroscopie infrarouge et cinq réplicas par spectroscopie Raman, pour un total de 1764 spectres, soit 1029 spectres infrarouges et 735 spectres Raman. Tous ces spectres ont été compilés sous forme de librairie dans le logiciel OMNIC.

La spectroscopie infrarouge et Raman sont deux techniques de spectroscopie vibrationnelle complémentaires qui mènent généralement à un bon pouvoir discriminant. Elles sont très souvent utilisées en science forensique pour effectuer l'analyse de plusieurs substances et composés, notamment pour faire la caractérisation, la différenciation, la comparaison et l'identification de différents polymères et de matériaux à base de polymère (p. ex. les peintures et les fibres). La complémentarité de ces méthodes a d'ailleurs déjà été démontrée pour l'analyse des peintures dans lesquelles la spectroscopie infrarouge fournit la majorité des informations sur les liants et les additifs tandis que la spectroscopie Raman fournit surtout l'information sur les pigments (Buzzini & Suzuki, 2016; Causin, 2015; Falardeau, Moran, & Muehlethaler, 2019; Stuart, 2012). Le même raisonnement peut également s'appliquer aux polymères dans lesquels, pour un même type de polymère, de multiples additifs peuvent être ajoutés en fonction des caractéristiques physiques recherchées et du fabricant, ce qui constitue une grande source de discrimination (Stuart, 2021; Stuart, 2012).

Dans un contexte judiciaire où les composés à analyser sont principalement des spécimens uniques et en faible quantité (c.-à-d. sous forme de traces), il est primordial de pouvoir préserver l'intégrité de l'échantillon et, dans la mesure du possible, en

conserver une partie pour des analyses ultérieures supplémentaires. Les avantages principaux de la spectroscopie infrarouge et Raman sont, entre autres, qu'elles sont des méthodes d'analyse généralement non destructives et qu'elles requièrent une préparation très minimale de l'échantillon, ce qui permet de préserver son intégrité. De plus, ce sont des méthodes relativement rapides et une faible quantité de matière est généralement nécessaire pour procéder à l'analyse (Stuart, 2021; Stuart, 2002; Wolstenholme, 2021).

Selon la question à laquelle on veut répondre, l'interprétation des spectres infrarouges et Raman peut se faire selon deux approches principales. La première approche consiste à utiliser la position ainsi que la forme et l'intensité des différentes bandes spectrales afin de déterminer les groupes fonctionnels présents dans la molécule, dans une optique de caractérisation ou d'identification de la substance. La deuxième approche, dite comparative, consiste plutôt à comparer des spectres pour effectuer la mise en évidence des différences et/ou des similitudes entre ces derniers afin de déterminer s'ils sont de même nature, sans forcément identifier les composantes de la substance (Stuart, 2021).

Dans le présent projet, l'analyse et l'interprétation des spectres infrarouges et Raman se font principalement selon une approche comparative afin d'évaluer l'intravariabilité et l'intervariabilité des échantillons de filament de polymère de la collection. Toutefois, l'identification de certaines bandes spectrales caractéristiques est aussi effectuée afin de valider qu'il est bel et bien possible de différencier les différents types de polymère. La structure chimique générale des différents types de polymère (Stuart, 2002) de la base de données spectrales est présentée à la Figure 3.4, afin de faciliter la visualisation des groupements fonctionnels caractéristiques de chacun des types de polymère. Il est à noter que seuls les spectres des échantillons de polymère « avant impression » sont présentés dans cette section. Les spectres des échantillons « après impression » sont présentés plus loin dans la partie de l'analyse de la dégradation (section 3.5).

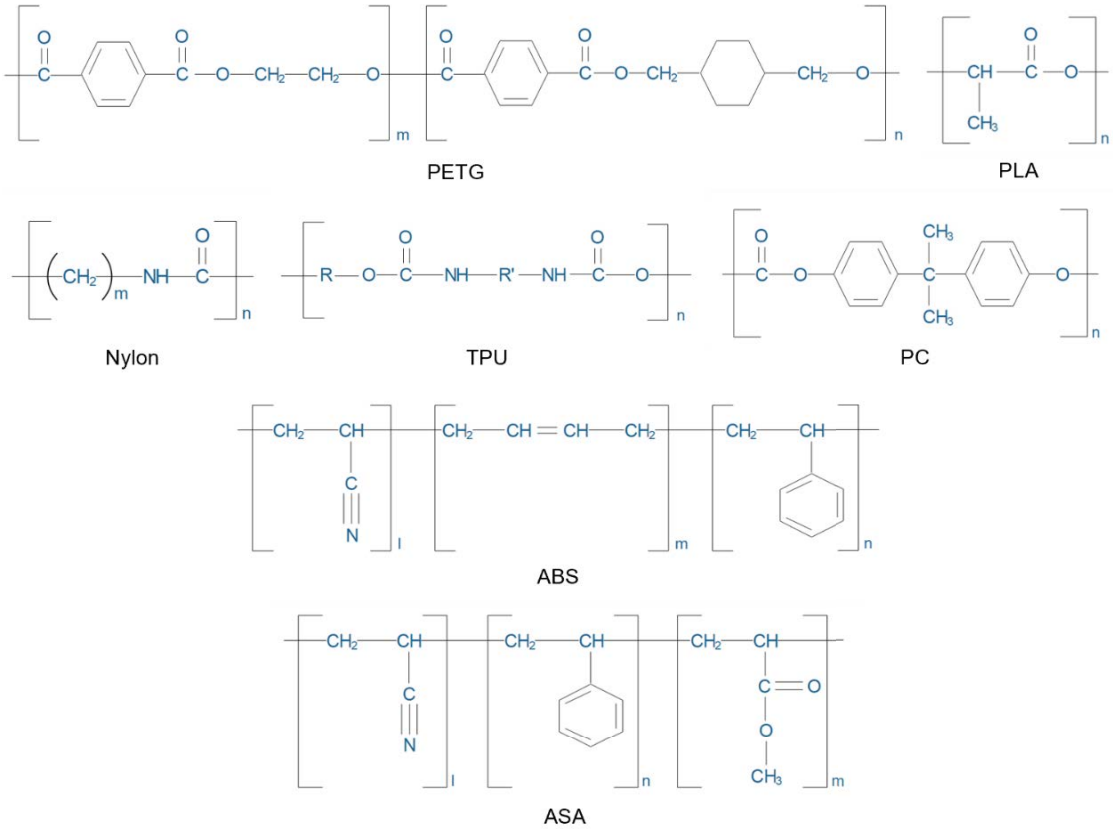

Figure 3.4 Structure chimique générale des différents types de polymère de la collection

3.2.1 Analyse des spectres infrarouges

Un spectre infrarouge est séparé en quatre zones principales, soit la zone des simples liaisons (4000 cm^{-1} à 2500 cm^{-1}), la zone des triples liaisons (2500 cm^{-1} à 2000 cm^{-1}), la zone des doubles liaisons (2000 cm^{-1} à 1500 cm^{-1}) puis la zone des empreintes digitales (1500 cm^{-1} à 500 cm^{-1}). Dans les zones allant de 4000 cm^{-1} à 1500 cm^{-1}, on trouve principalement les bandes caractéristiques des différents types de groupements fonctionnels de la molécule, tandis que dans la zone des empreintes digitales on trouve davantage les bandes caractéristiques de l'espèce chimique en général. Cette dernière région, plutôt complexe à analyser, est généralement plus utilisée pour faire une analyse comparative entre deux spécimens plutôt que pour faire l'identification des bandes

(Stuart, 2021). Certaines zones du spectre infrarouge sont aussi plus caractéristiques des pigments. Par exemple, il est possible d'observer des bandes, pouvant être bien définies et intenses, provenant des pigments dans les régions de 3600 cm^{-1} à 3000 cm^{-1} et de 1600 cm^{-1} à 1300 cm^{-1} (Falardeau *et al.*, 2019; Wiesinger *et al.*, 2018). Cependant, dans la région des empreintes digitales, les pigments sont souvent masqués par le signal des différents additifs de la molécule.

La première étape de l'analyse des spectres infrarouges est de s'assurer qu'il est possible de distinguer les différents types de polymère. La Figure 3.5 présente un spectre infrarouge pour chacun des types de polymère de la collection et le Tableau 3.2 présente les positions littéraires générales des bandes associées aux groupements fonctionnels principaux de ces polymères. Il est à noter que les polymères de la collection ne sont pas des composés purs et ils contiennent donc différents additifs et pigments propres à leur marque et modèle commercial, ce qui rend plus difficile l'identification de toutes les bandes. En raison de la complexité d'identification des bandes se trouvant dans la zone des empreintes digitales, en plus de la possible superposition avec les bandes reliées aux pigments, aucune identification n'a été faite dans cette zone. Seules les bandes principales se trouvant dans les régions de 4000 cm^{-1} à 1500 cm^{-1}, étant caractéristiques des différents groupements fonctionnels des polymères, ont été identifiées.

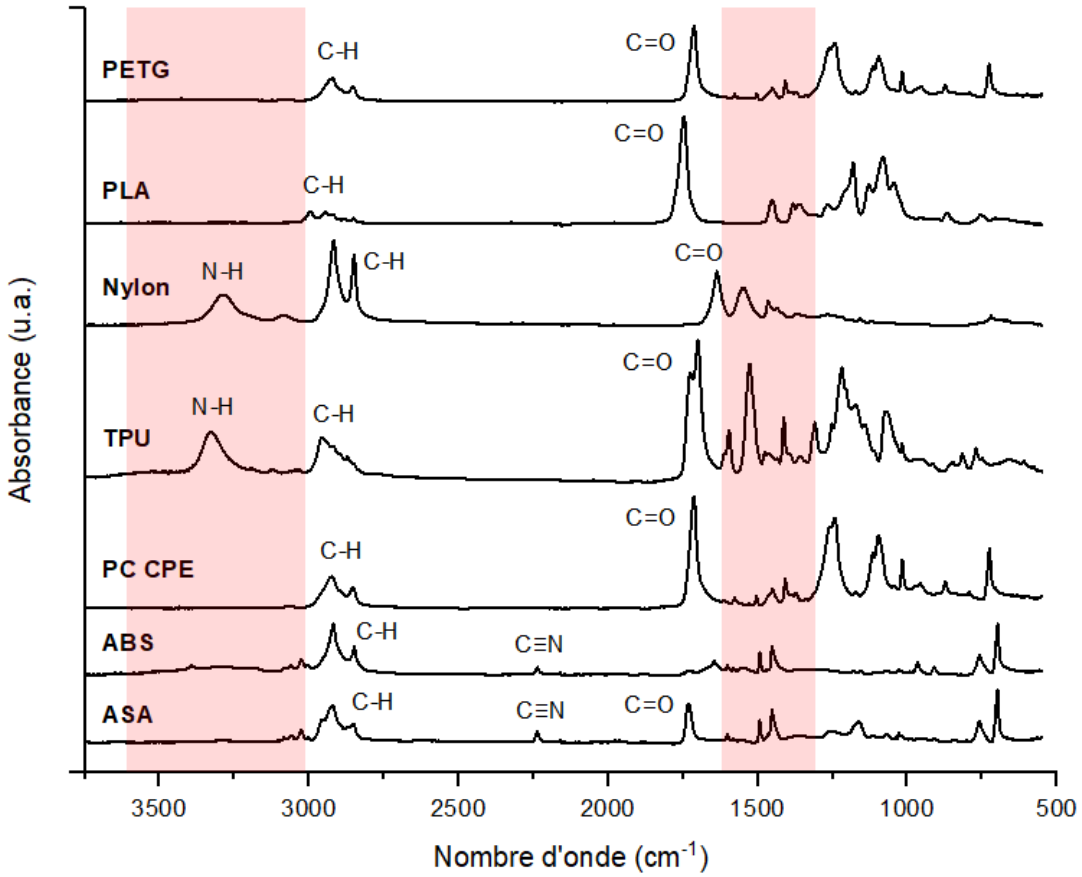

Figure 3.5 Spectres infrarouges des différents types de polymère de la collection. Les deux bandes rouges représentent les zones caractéristique des pigments

Comme il est possible de constater sur la Figure 3.5, les bandes des liaisons N-H, C-H, C≡N et C=O sont facilement identifiables et concordent bien avec les valeurs littéraires attendues (voir Tableau 3.2). Juste à partir de ces bandes, il est déjà possible de faire une discrimination entre plusieurs types de polymère de la base de données. Par exemple, le Nylon et le TPU par la bande de la liaison N-H ou encore l'ABS et l'ASA avec la bande de la liaison C≡N. Les bandes associées aux liaisons C=C, C-N et C-O n'ont pas identifiées sur les spectres, mais il est possible de connaitre leur position littéraire en se référant au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Valeurs littéraires de la position des bandes des groupes fonctionnels des polymères de la collection, en spectroscopie infrarouge (Millipore Sigma, 2022; Stuart, 2021; Stuart, 2002)

Groupe fonctionnel	N-H	C-H	C≡N	C=O	C=C[13]	C-N[14]	C-O[14]
Position (cm^{-1})	3400-3250	3200-2850	2300-2000	1830-1650	1685-1450	1400-1000	1300-1000
PETG	-	2924 et 2851	-	1711	*	-	*
PLA	-	2943 et 2851	-	1743	-	-	*
Nylon	3294	2921 et 2852	-	1640	-	*	-
TPU	3331	2961	-	1700	-	*	*
PC	-	2920 et 2850	-	1714	*	-	*
ABS	-	2920 et 2850	2234	-	*	-	-
ASA	-	2922 et 2848	2235	1735	*	-	*

* Liaison théoriquement présente dans la molécule, mais pas d'identification sur le spectre

Rappelons que les échantillons de PC sont en fait un mélange de polycarbonate et de copolyesters (PC CPE) (colorFabb, 2022; Filaments.ca, 2022b). Les spectres obtenus pour ces échantillons peuvent donc différer d'un spectre infrarouge de PC standard.

Par la suite, la deuxième étape est d'évaluer l'intravariabilité des échantillons de polymère de la collection (c.-à-d. variation chimique au sein d'un même échantillon). Cette étape, qui se fait par l'analyse de la variation entre les spectres des réplicas d'un échantillon, est très importante puisque l'intravariabilité doit être prise en compte, lors d'un processus de comparaison, dans la décision de différencier (ou non) deux

[13] Bande généralement de faible intensité et dans la région des pigments

[14] Bande dans la région des empreintes digitales (1500-500 cm^{-1})

échantillons. À la suite de l'analyse des spectres des réplicas de chacun des échantillons de la collection, il en ressort que l'intravariabilité des échantillons de la base de données, en spectroscopie infrarouge, est très faible et que même pour l'échantillon avec la plus grande intravariabilité, cette dernière reste très faible. La Figure 3.6 présente l'échantillon de la collection possédant la plus faible intravariabilité, soit du PETG gris de marque Filaments.ca. Comme il est possible de constater en comparant les spectres des sept réplicas, on observe qu'une très faible variation au niveau de l'intensité absolue des bandes, mais aucune variation au niveau de l'intensité relative entre deux bandes. Rappelons ici que les réplicas sont des mesures effectuées à sept positions différentes sur l'échantillon, et non pas sept mesures prises à la même position. Les spectres représentent donc réellement l'intravariabilité chimique au sein de l'échantillon en question.

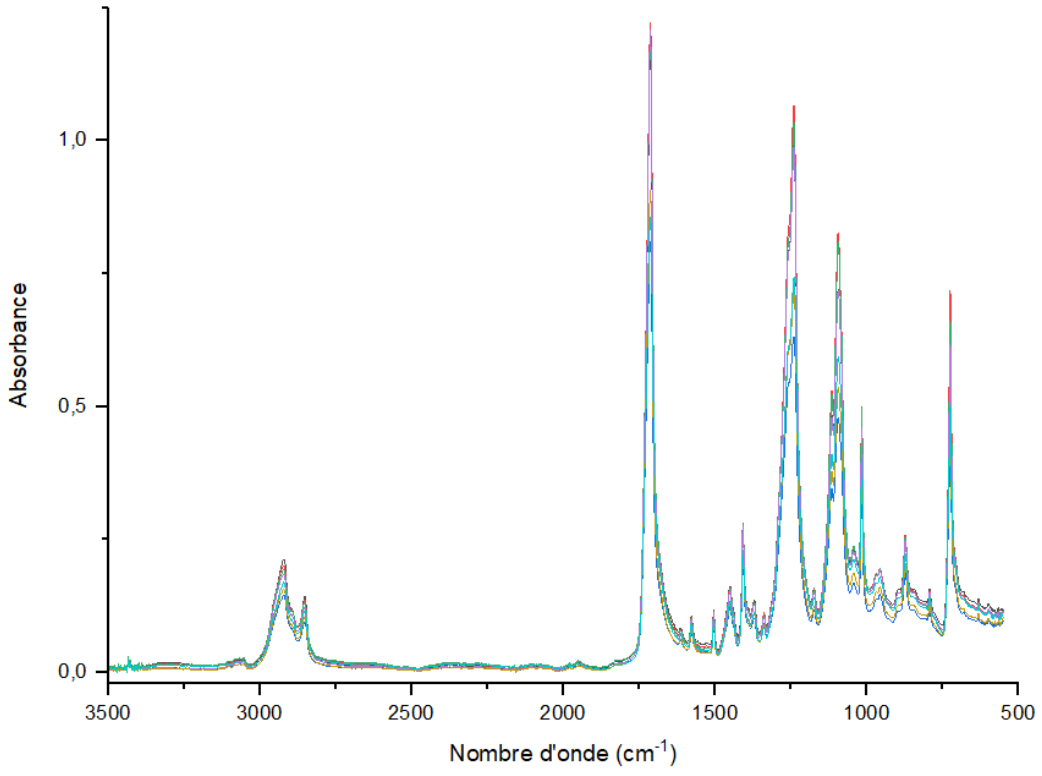

Figure 3.6 Spectres infrarouges (sept réplicas) de l'échantillon 14a_PETG gris_Filaments.ca, représentant la plus faible intravariabilité obtenue

La Figure 3.7 présente l'échantillon de la collection possédant la plus grande intravariabilité, soit du PLA bleu de marque Makerbot. Pour cet échantillon, on observe une variation légèrement supérieure au niveau de l'intensité absolue des bandes et aussi une variation au niveau de l'intensité relative entre les bandes des liaisons C-H à environ 2940 cm^{-1}. Cette variation peut provenir du fait que les longues chaînes de polymères ne sont pas toujours parfaitement cristallines, ce qui fait en sorte que les liaisons C-H ne sont pas forcément soumises au même environnement et cela engendre donc variations sur les spectres. Cependant, cette variation n'est pas suffisante pour discriminer les spectres des différents réplicas de cet échantillon. Il est à noter que les spectres présentés à la Figure 3.6 et la Figure 3.7 sont des spectres bruts dont seule la ligne de base a été corrigée.

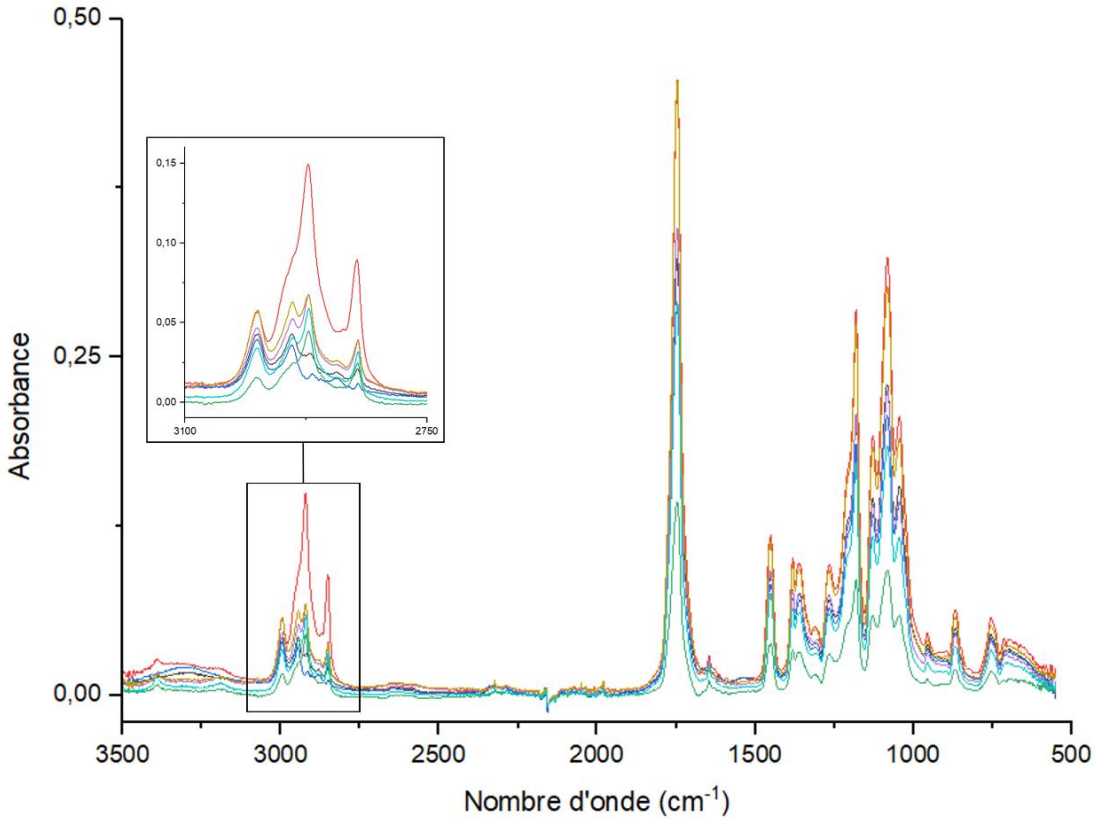

Figure 3.7 Spectres infrarouges (sept réplicas) de l'échantillon 16a_PLA bleu_MakerBot, représentant la plus grande intravariabilité obtenue

Finalement, la troisième étape de l'analyse des spectres infrarouge est d'évaluer l'intervariabilité des échantillons (c.-à-d. la variation chimique entre les différents échantillons). Pour ce faire, les échantillons ont été comparés entre eux selon deux critères distincts, soit la couleur du polymère et la marque et le modèle commercial du polymère.

Pour le critère de la couleur, selon la théorie vue précédemment, l'hypothèse posée est que pour un même type et une même marque et modèle commercial de polymère, les différentes couleurs vont exercer une influence sur les spectres infrarouges, mais que les bandes des pigments ne seront pas suffisamment visibles pour permettre de différencier les couleurs. Comme attendu, l'analyse des spectres infrarouges selon ce premier critère révèle que la coloration des polymères affecte peu ou pas les spectres obtenus, n'engendrant donc pas une très grande intervariabilité. Les légères variations observées au niveau de l'intensité absolue et de l'intensité relative se trouvent principalement au niveau des bandes des liaisons C-H. Pour certaines couleurs vives opaques, notamment le bleu, il est cependant possible d'observer des bandes supplémentaires dans la région des pigments. Cependant, les bandes des pigments ne sont pas suffisamment visibles pour différencier les couleurs. Par exemple, la Figure 3.8 présente les spectres infrarouges des échantillons de PLA de marque MakerBot, mais de couleurs différentes. En comparant les spectres des échantillons de couleur avec celui de l'échantillon transparent, on remarque que seul l'échantillon de couleur bleu possède des bandes supplémentaires dans la région des pigments (voir astérisques rouges sur la Figure 3.8). Pour les autres couleurs, on observe les légères variations d'intensité absolue et relative au niveau des bandes des liaisons C-H (bandes entre 3200 cm^{-1} et 2850 cm^{-1}).

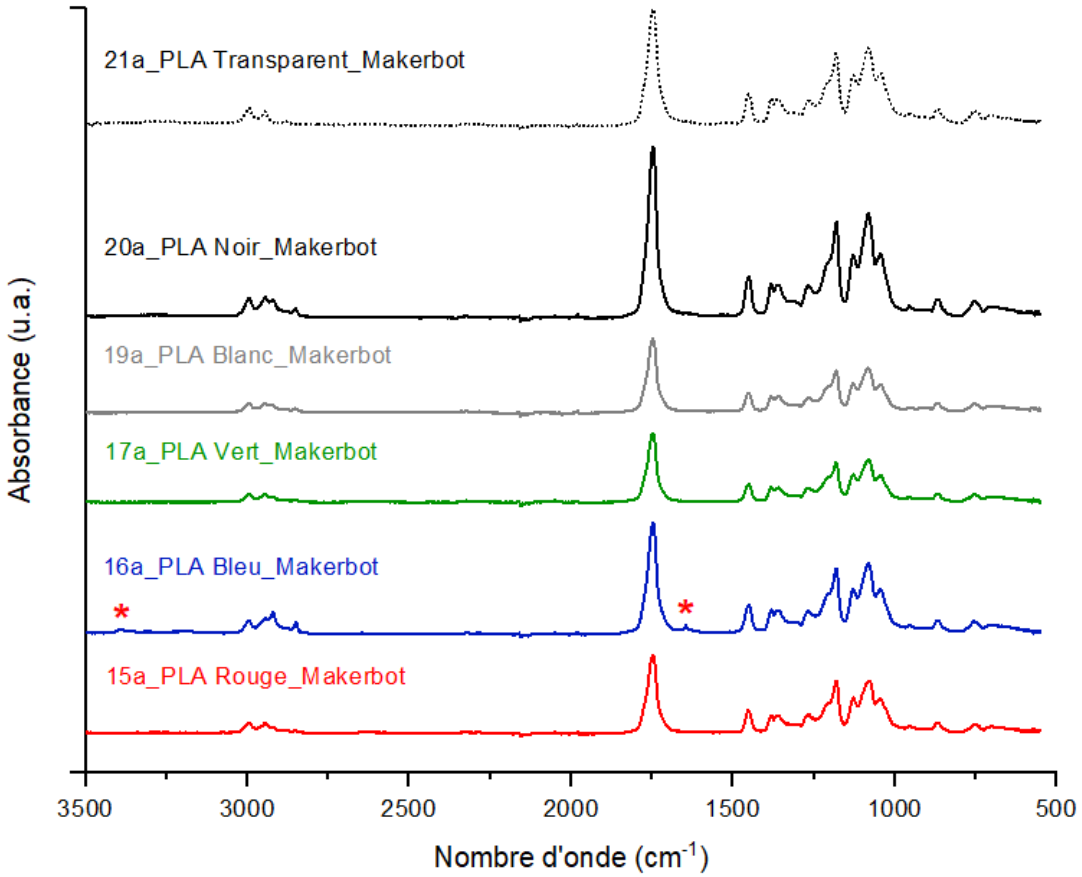

Figure 3.8 Spectres infrarouges des échantillons de PLA de même marque et modèle (MarkerBot), mais de couleurs différentes (opaque)

Pour les échantillons de polymère de couleur, mais translucide, tel que les échantillons de TPU de marque Spool 3D présentés à la Figure 3.9, aucune variation n'a été observée et aucune absorption particulière des colorants n'est visible. Leurs spectres infrarouges sont donc indifférentiables. Il est à noter que dans le cas de polymères

colorés translucides, on parle plutôt de colorant[15] que de pigment[16], car par leur nature, les pigments ne peuvent pas être translucide.

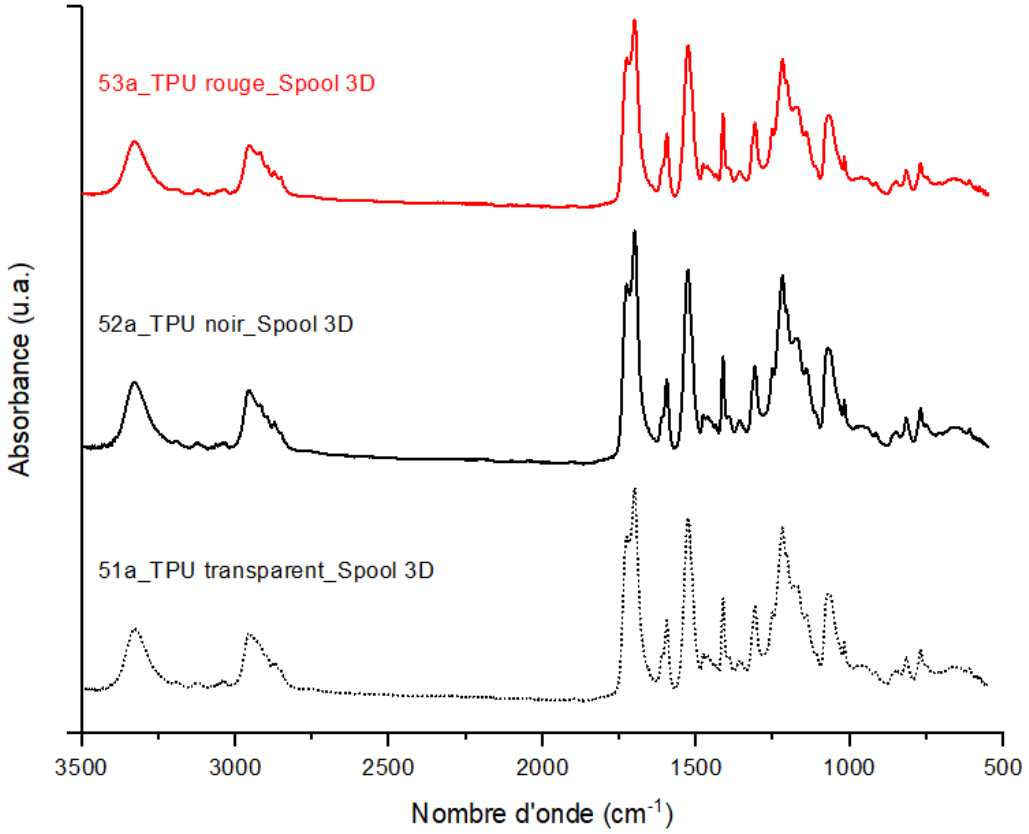

Figure 3.9 Spectres infrarouges de trois échantillons de TPU de même marque et modèle (Spool 3D), mais de couleurs différentes (translucide)

[15] Les colorants sont des substances organiques intensément colorées qui sont solubles dans le milieu qu'ils colorent. La couleur qu'ils confèrent peut être affectée par la nature physicochimique du solvant ou du support sur lequel ils sont appliqués.

[16] Les pigments sont des composés solides généralement inorganiques insolubles dans le milieu où ils sont dispersés. Ils confèrent une couleur qui n'est pas ou peu affectée par ce milieu (Society of Dyers and Colourists, 2022; Valeur, 2019).

Les résultats obtenus confirment l'hypothèse que la coloration du polymère n'engendre pas une très grande variation dans les spectres obtenus en infrarouge et ne participent donc pas beaucoup à l'intervariabilité des échantillons.

Pour le deuxième critère d'évaluation de l'intervariabilité, soit la marque et le modèle commercial du polymère, l'hypothèse posée est que pour un même type de polymère et une même catégorie de couleur, la marque commerciale induit des différences significatives au niveau des spectres infrarouges, et participe donc à l'intervariabilité. Après l'analyse des spectres infrarouges de tous les échantillons, il en ressort que ce n'est pas la marque commerciale en elle-même qui induit des différences, mais plutôt certains modèles dits renforcés ou améliorés d'un type de polymère en question afin de bonifier certaines de ses propriétés physiques. Ces modifications apportées au polymère standard génèrent des sous-classes chimiques qui induisent des changements observables sur le spectre infrarouge. Par exemple, si l'on prend la Figure 3.10, il est possible de constater que les spectres des échantillons de PETG standard (sans modification chimique) de couleur noire, soit le 32a_PETG noir_Filaments 3D Québec - Cyclone, le 72a_PETG noir_eSun et le 69a_PETG noir_Filaments.ca, présentent uniquement une légère variation au niveau de l'intensité absolue des bandes, même s'il s'agit de trois compagnies différentes. À contrario, l'échantillon de PETG modifié pour être plus rigide et plus résistant à la chaleur, soit le 58a_PETG noir_ Filaments.ca - EcoTough (Filaments.ca, 2022c), présente quant à lui plusieurs bandes supplémentaires comparativement aux trois spectres de PETG standard (voir astérisques rouges sur la Figure 3.10). Ces bandes supplémentaires proviennent assurément des modifications chimiques effectuées pour améliorer certaines propriétés du PETG, bien que les modifications effectuées ne soient pas connues.

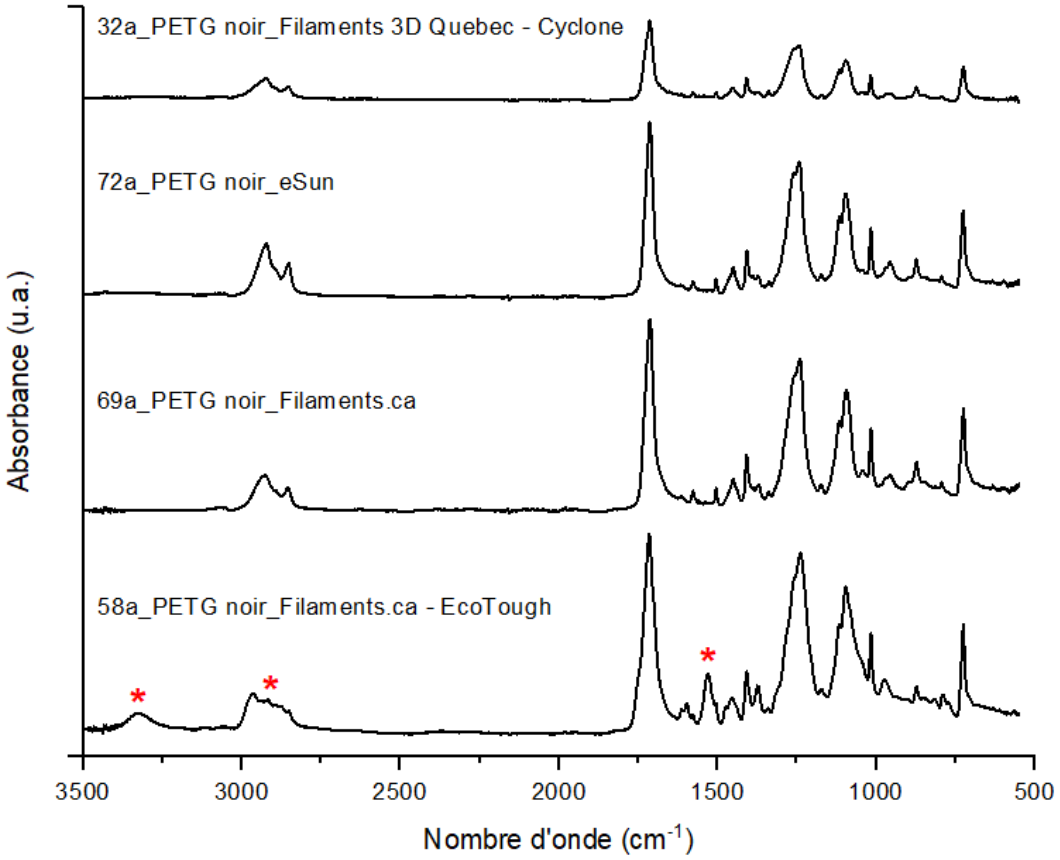

Figure 3.10 Spectres infrarouges des échantillons de PETG noir de marques et modèles commerciaux différents

Prenons maintenant l'exemple de la Figure 3.11 qui représente cette fois-ci les spectres des échantillons de PLA de couleur orange de différentes marques et modèles. Le spectre du PLA standard, soit le 6a_PLA orange_Filaments.ca, et celui du PLA dit économique, mais sans changement au niveau des propriétés, soit le 23a_Value PLA orange_3D Printing Canada (3D Printing Canada, 2022b), présentent uniquement une variation au niveau des liaisons C-H. Cependant, le spectre du PLA modifié pour être plus résistant aux chocs et à la chaleur, soit le 55a_APLA orange_Filaments.ca - Engineering Pro (Filaments.ca, 2022e) et celui du PLA modifié pour être plus résistant à la flexion et aux rayonnements ultraviolets, soit le 64a_PLA 2.0 orange_Filaments.ca - EcoTough (Filaments.ca, 2022d), possèdent

quant à eux plusieurs bandes supplémentaires, comparativement au spectre du PLA standard (voir astérisques rouges sur la Figure 3.11), en plus de la variation au niveau des bandes des liaisons C-H. La variation au niveau de ces dernières peut encore une fois s'expliquer par l'environnement légèrement différent auquel les liaisons C-H sont soumises, et les bandes supplémentaires proviennent des modifications chimiques effectuées pour améliorer certaines propriétés du PLA. Il est intéressant d'ajouter que le fait que les échantillons de PLA 6a, 55a et 64a soient de la même marque, mais qu'ils présentent des différences significatives au niveau des spectres, confirme que ces dernières proviennent vraiment de la modification chimique et non pas tout simplement de la marque commerciale.

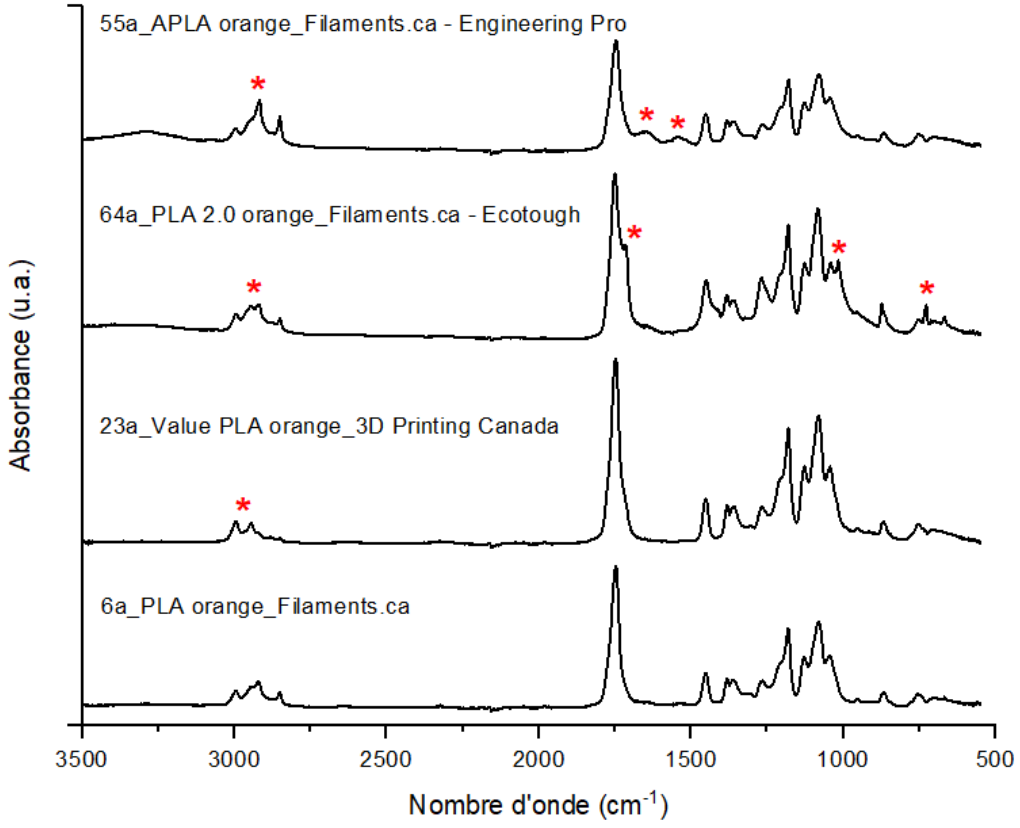

Figure 3.11 Spectres infrarouges des échantillons de PLA orange de marques et modèles commerciaux différents

Les résultats obtenus permettent de démontrer que ce n'est pas réellement la marque commerciale qui induit la variation au niveau des spectres infrarouges (comme suggéré dans l'hypothèse), mais plutôt les modifications chimiques apportées au polymère pour améliorer ses propriétés physiques, ce qui crée des sous-classes chimiques du polymère en question. Ce sont ces modifications qui génèrent la plus grande partie de l'intervariabilité dans les spectres infrarouges.

3.2.2 Analyse des spectres Raman

Comme pour les spectres infrarouges, les spectres Raman peuvent être divisés en quatre zones principales, soit la zone des simples liaisons (4000 cm^{-1} à 2500 cm^{-1}), la zone des liaisons multiples (2500 cm^{-1} à 2000 cm^{-1}), la zone des doubles liaisons (2000 cm^{-1} à 1500 cm^{-1}) puis la zone des empreintes digitales (1500 cm^{-1} à 500 cm^{-1}). Cependant, comme mentionné précédemment, les liaisons donnant un signal fort en infrarouge donneront un signal plus faible en Raman et vice-versa, ce qui fait en sorte que l'on n'obtiendra pas tout à fait les mêmes bandes caractéristiques sur les spectres Raman que les spectres infrarouges (d'où leur complémentarité). L'avantage de la spectroscopie Raman est qu'il s'agit d'une méthode d'analyse très puissante pour identifier ou différencier les pigments, même pour ceux faisant partie d'une même catégorie de couleur, mais possédant une teinte ou une nuance différente. Les bandes associées aux pigments se trouvent majoritairement dans la zone des empreintes digitales, mais il est possible d'en observer dans les autres zones du spectre. Il existe une multitude de bases de données spectrales de pigments de référence pouvant être utilisées dans le processus d'identification de ces derniers (Scherrer, Stefan, Francoise, Annette, & Renate, 2009; Stuart, 2021). Il est aussi possible d'utiliser des bases de données «maison» créées avec des pigments de référence.

Tous les spectres Raman ont été analysés selon les mêmes étapes que les spectres infrarouges. La Figure 3.12 présente un spectre Raman pour chacun des types de polymère de la collection et le Tableau 3.3 présente les positions littéraires générales

des bandes associées aux groupements fonctionnels principaux de ces polymères. Comme il est possible de constater, les bandes des liaisons C-H, C≡N, C=O, C=C et du noyau aromatique sont facilement identifiables et concordent avec les valeurs littéraires attendues (voir Tableau 3.3). Cependant, certaines bandes attendues ne sont pas visibles sur les spectres, tels que la bande du noyau aromatique pour le PETG et le PC, ainsi que les bandes associées à la liaison N-H pour le Nylon et le TPU, puis la bande associée au carbonyle pour l'ASA. Il est à noter que seuls les échantillons de polymère de PETG, PLA et TPU sur cette figure sont transparents, ce qui peut expliquer que certaines bandes associées aux groupes fonctionnels soient cachées par les pigments des polymères colorés. De plus, comme les échantillons de PC CPE sont un mélange de polycarbonate et de copolyesters, les spectres obtenus pour ces échantillons peuvent différer d'un spectre Raman de PC standard. Malgré tout, bien que la différenciation des types de polymère soit moins efficace avec les spectres Raman que les spectres infrarouges, il est quand même possible de différencier certains polymères tels que l'ABS et l'ASA avec la bande de la liaison C≡N et la bande associée au noyau aromatique.

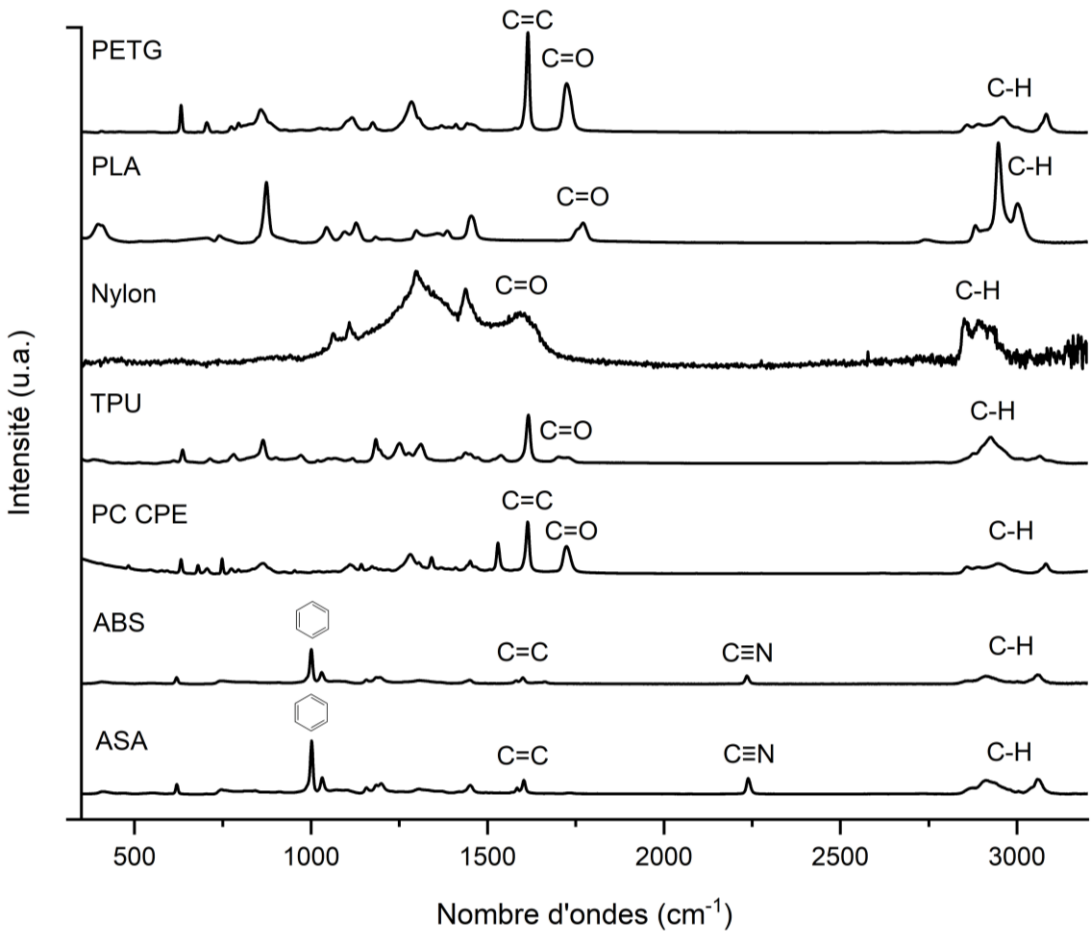

Figure 3.12 Spectres Raman des différents types de polymère de la collection

Tableau 3.3 Valeurs littéraires de la position des bandes des groupes fonctionnels des polymères de la collection, en spectroscopie Raman (Adar, 2016; Stuart, 2002; Wolstenholme, 2021)

Groupe fonctionnel	N-H	C-H	C≡N	C=O	C=C	Noyau aromatique
Position (cm^{-1})	3300-3500	2800-3000	2100-2300	1680-1820	~1650	~1000
PETG	-	3080 et 2957	-	1727	1611	*
PLA	-	2997 et 2947	-	1770	-	-
Nylon	*	2901 et 2853	-	1611	-	-
TPU	*	3063 et 2924	-	1702	-	-
PC CPE	-	3081 et 2947	-	1723	1614	*
ABS	-	3059 et 2912	2235	-	1603	1001
ASA	-	3058 et 2912	2238	*	1603	1001

* Liaison théoriquement présente dans la molécule, mais pas d'identification sur le spectre

Par la suite, l'analyse de l'intravariabilité des échantillons en spectroscopie Raman révèle qu'elle est particulièrement faible, même plus faible que celle obtenue pour la spectroscopie infrarouge (toujours pour des spectres bruts sur lesquels seule la ligne de base a été corrigée). La Figure 3.13 présente l'échantillon avec l'intravariabilité la plus faible, qui est en fait quasi nulle.

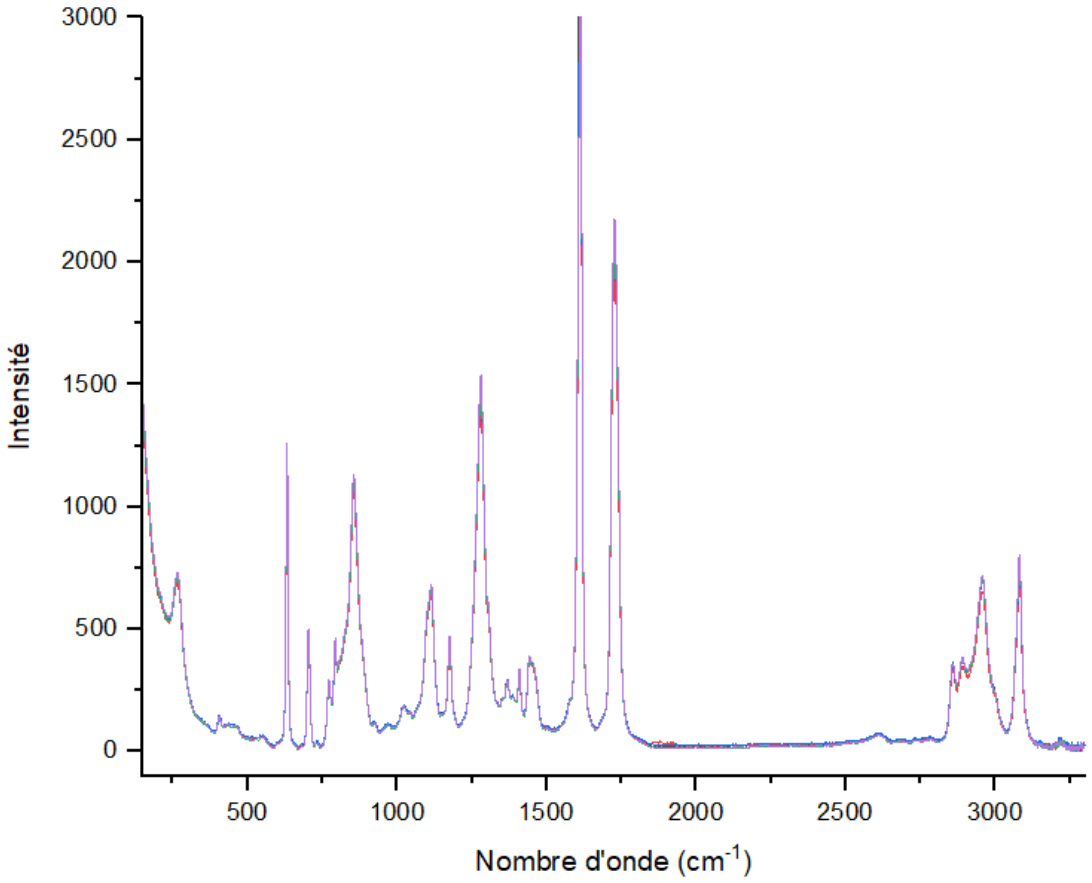

Figure 3.13 Spectres Raman (cinq réplicas) de l'échantillon 14a_PETG gris_Filaments.ca, représentant la plus faible intravariabilité obtenue

La Figure 3.14 présente l'échantillon avec l'intravariabilité la plus élevé, qui reste cependant très faible. La variation observée n'est qu'une légère différence d'intensité absolue des bandes.

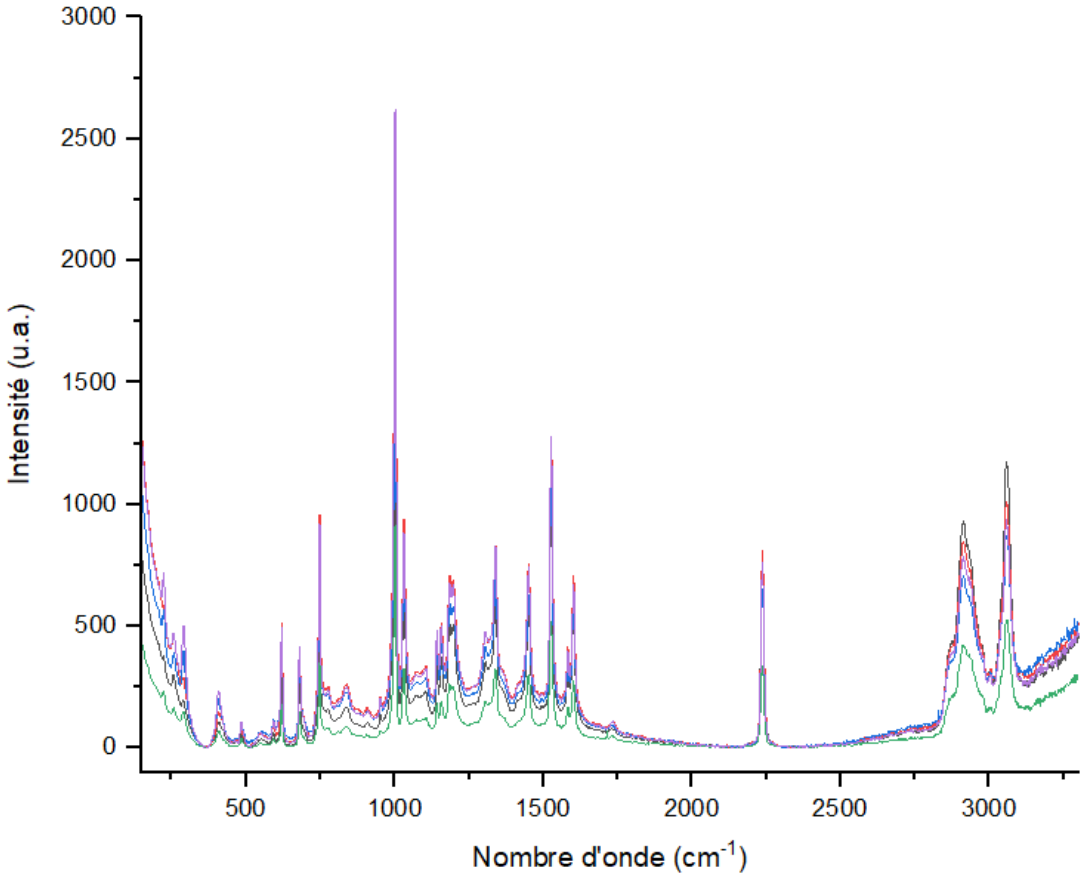

Figure 3.14 Spectres Raman (cinq réplicas) de l'échantillon 30a_ASA bleu_Stratasy, représentant la plus grande intravariabilité obtenue

L'intervariabilité au niveau des spectres Raman a principalement été évaluée en fonction du critère de la couleur du polymère. En fonction de la théorie vue précédemment, l'hypothèse est que pour un même type et une même marque commerciale de polymère, les différentes couleurs vont générer une très grande intervariabilité au niveau des spectres Raman. Comme il est possible de la constater sur la Figure 3.15, les spectres des polymères de couleur neutre, soit le blanc et le

naturel, présentent uniquement de faibles variations au niveau de l'intensité absolue des bandes (par rapport au spectre du polymère transparent), tandis que les spectres des polymères de couleur vive, soit le bleu, le vert et l'orange, présentent une plus grande variation au niveau de l'intensité absolue, mais possèdent surtout plusieurs bandes supplémentaires dans la zone des empreintes digitales.

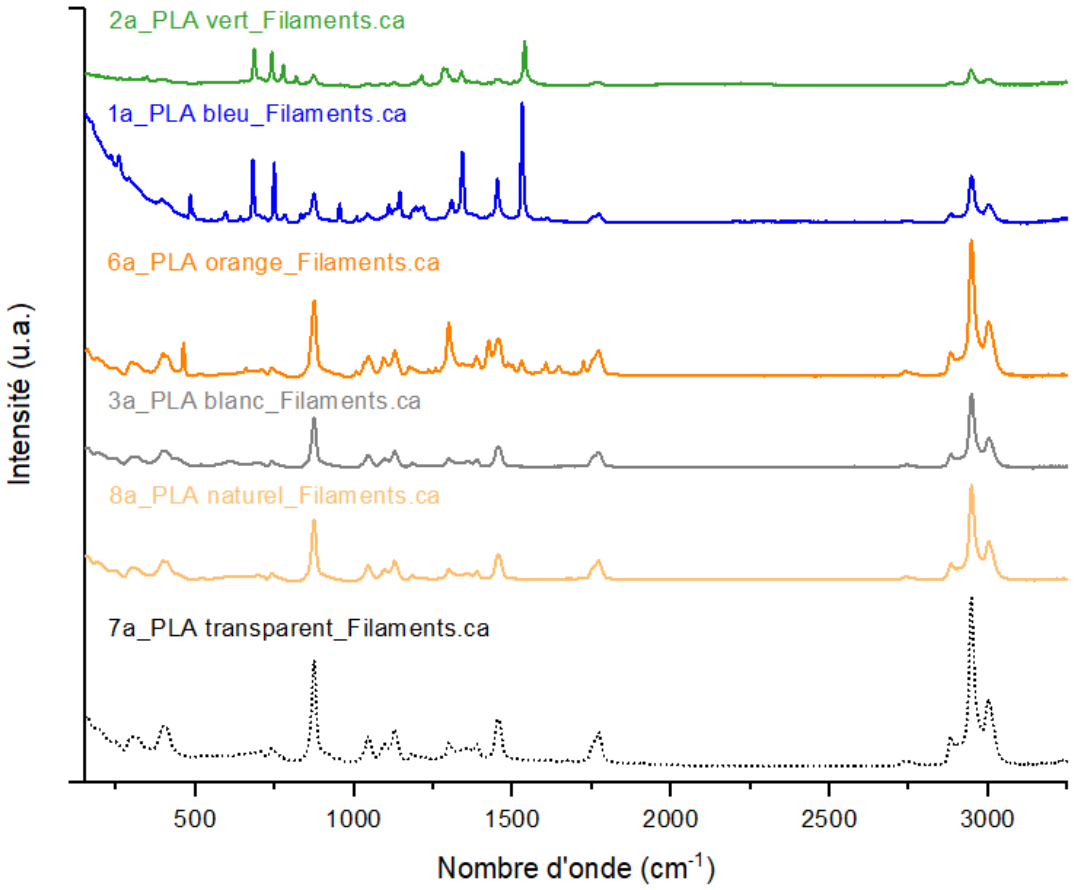

Figure 3.15 Spectres Raman des échantillons de PLA de même marque et modèle (Filaments.ca), mais de couleurs différentes

La Figure 3.16 et la Figure 3.17 présentent une comparaison entre les spectres d'un échantillon de PLA transparent, un échantillon de PLA coloré et d'un pigment de référence. Comme il est possible de le constater sur les deux figures, les bandes provenant des pigments, mais aussi ceux provenant de la structure chimique du polymère, peuvent être associées entre les spectres du PLA et celui du pigment (voir les encadrés pointillés sur la Figure 3.16 et la Figure 3.17). De plus, si on compare le spectre du pigment bleu PB15 avec celui du pigment orange PO64, il est possible de constater que l'ensemble des bandes caractéristiques d'un pigment varie énormément d'un pigment à l'autre et qu'il est donc possible de les différencier. Les pigments utilisés pour colorer les échantillons de PLA ont pu être identifiés grâce aux bases de données spectrales de pigments de référence. Le pigment identifié pour l'échantillon de PLA bleu est le pigment Cu-Phthalo PB15 (Scherrer *et al.*, 2009) et le pigment pour l'échantillon de PLA orange le pigment Benzimidazolone orange PO64 (Ferro, 2020). Tous deux sont des pigments couramment utilisés avec les polymères. Ces résultats confirment que les pigments, donc les différentes couleurs de polymère, induisent une grande variation au niveau des spectres Raman et participent grandement à l'intervariabilité des échantillons.

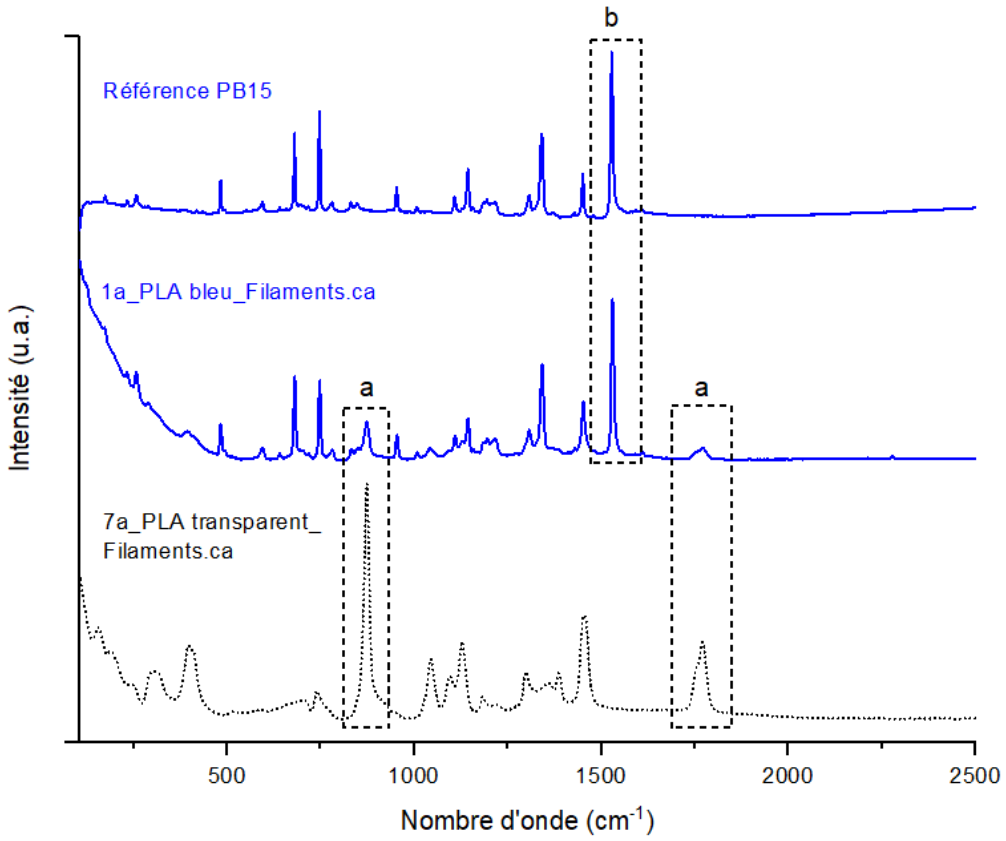

Figure 3.16 Spectres Raman de PLA transparent et de PLA bleu, ainsi qu'un spectre de référence du pigment bleu PB15. Les encadrés représentent des exemples de a) bandes associées à la structure chimique du polymère et b) bande associée au pigment

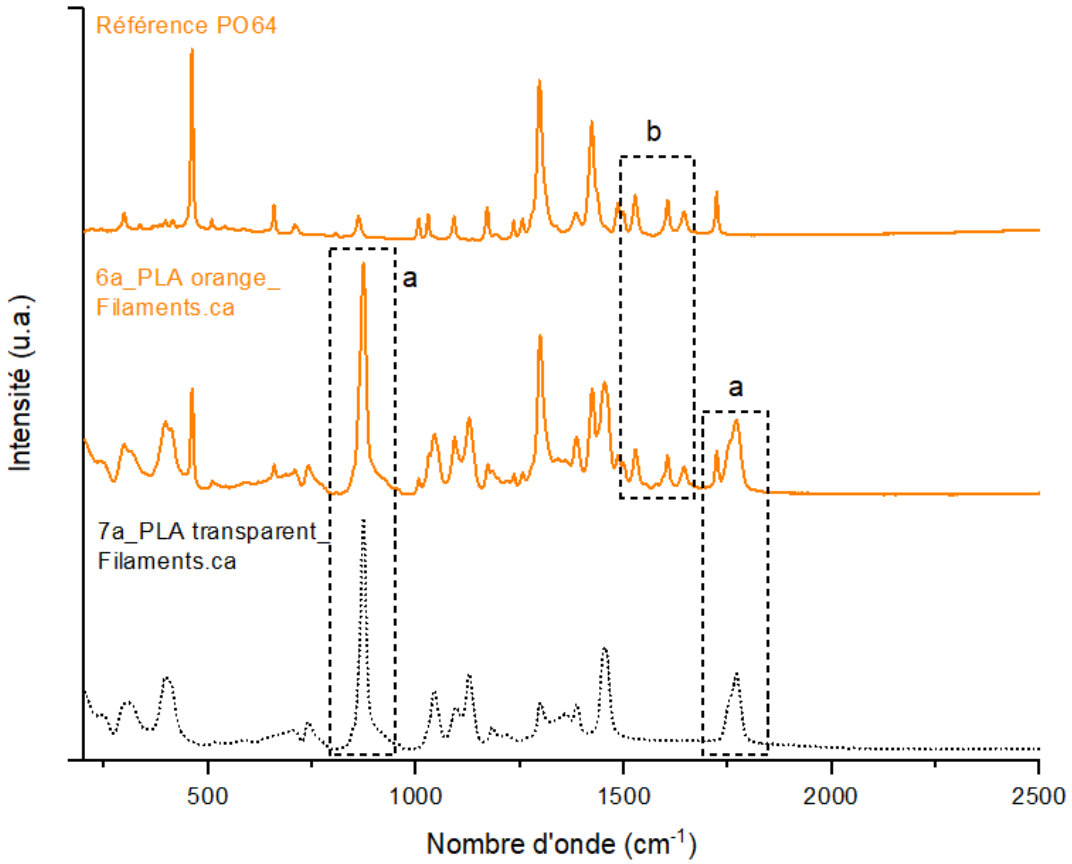

Figure 3.17 Spectres Raman de PLA transparent et de PLA orange, ainsi qu'un spectre de référence du pigment orange PO64. Les encadrés représentent des exemples de a) bandes associées à la structure chimique du polymère et b) bandes associées au pigment

Pour conclure, l'analyse des spectres infrarouges et Raman des échantillons de polymère de la collection a permis de confirmer qu'il est possible de différencier les différents types de polymère, autant par spectroscopie infrarouge que Raman, et que les échantillons de polymère ont une très faible intravariabilité, qui se traduit davantage avec de légères variations au niveau de l'intensité absolue que de l'intensité relative des bandes sur les spectres infrarouges et Raman. De plus, cela a permis de déterminer que les échantillons de polymère de la collection possèdent une très grande intervariabilité, provenant de la coloration du polymère (pigments) et des modifications

chimiques pouvant être apportées à un polymère standard afin d'optimiser certaines de ses propriétés physiques, qui se traduit en l'apparition de bandes supplémentaires sur les spectres infrarouges et Raman (par rapport au spectre du polymère standard et transparent). Cependant, les deux méthodes ne sont pas tout à fait équivalentes pour la détection de cette intervariabilité. En effet, la spectroscopie infrarouge sera plus puissante pour détecter les différences au niveau de la structure chimique du polymère en question, tandis que la spectroscopie Raman sera beaucoup plus sensible au niveau des pigments, bien qu'elle permette quand même de différencier les différents types de polymère. Il est donc possible de dire que tous les critères sont réunis afin d'avoir un bon pouvoir discriminant, soit une faible intravariabilité et une grande intervariabilité dans les échantillons, qui sera déterminée dans la prochaine section (section 3.3).

3.3 Analyses chimiométriques des spectres infrarouges et Raman de la base de données de polymère

Dans un jeu de données ayant un grand nombre d'échantillons et une grande quantité de variables, comme c'est souvent le cas avec les données chimiques (p. ex. les spectres et les chromatogrammes), il peut être parfois difficile d'identifier des modèles et des relations et de mettre en évidence les variables les plus pertinentes pour faire l'identification, la séparation, le regroupement et/ou la classification des données chimiques. La chimiométrie utilise différentes approches statistiques afin d'analyser et de modéliser l'information chimique. Il existe une grande variété de méthodes chimiométriques, mais l'analyse en composantes principales (PCA) est considérée comme « la mère de toutes les méthodes d'analyse des données multivariées » (Varmuza & Filzmoser, 2009). Elle est d'ailleurs reconnue comme étant un outil puissant dans le domaine de la science forensique pour l'interprétation et l'optimisation des procédures analytiques (Sauzier, van Bronswijk, & Lewis, 2021).

La PCA est une méthode d'analyse exploratoire des données (apprentissage non supervisé) qui peut être appliquée à n'importe quelle matrice, tant qu'il s'agit d'un jeu de données présentant des variables qui sont corrélées entre elles, comme c'est le cas avec les spectres infrarouges et Raman. L'objectif de la PCA est de produire une visualisation simplifiée et de réduire la dimensionnalité en résumant les variables d'origine (initiales) par de nouvelles variables (latentes). Pour ce faire, les algorithmes de la PCA transforment les variables corrélées entre elles en nouvelles variables décorrélées les unes des autres, soit les composantes principales (PC), ce qui permet de réduire la dimensionnalité. Par la suite, le calcul de nouvelles coordonnées des points (combinaisons linéaires) selon un système d'axes X-Y formé des PC est effectué afin de produire une visualisation simplifiée (Miller & Miller, 2010; Sauzier *et al.*, 2021; Varmuza & Filzmoser, 2009). Dans ce projet, une analyse en composantes principales (PCA) a été réalisée avec les spectres infrarouges et les spectres Raman des échantillons de polymère de la collection, de façon indépendante.

3.3.1 Analyse en composantes principales avec les spectres infrarouges

La Figure 3.18 représente les résultats obtenus pour la PCA effectuée avec les spectres infrarouges des échantillons de polymère de la collection. Il s'agit de la visualisation simplifiée des spectres infrarouges dans le nouvel espace cartésien des composantes principales. Chaque point coloré représente un spectre infrarouge (donc un réplica). Plus les points sont rapprochés, plus il y a de similarité entre les spectres. L'axe des X correspond à la composante principale 1 (PC-1) qui représente 46 % de la variance et l'axe des Y correspond à la composante principale 2 (PC-2) qui représente 25 % de la variance de ce jeu de données.

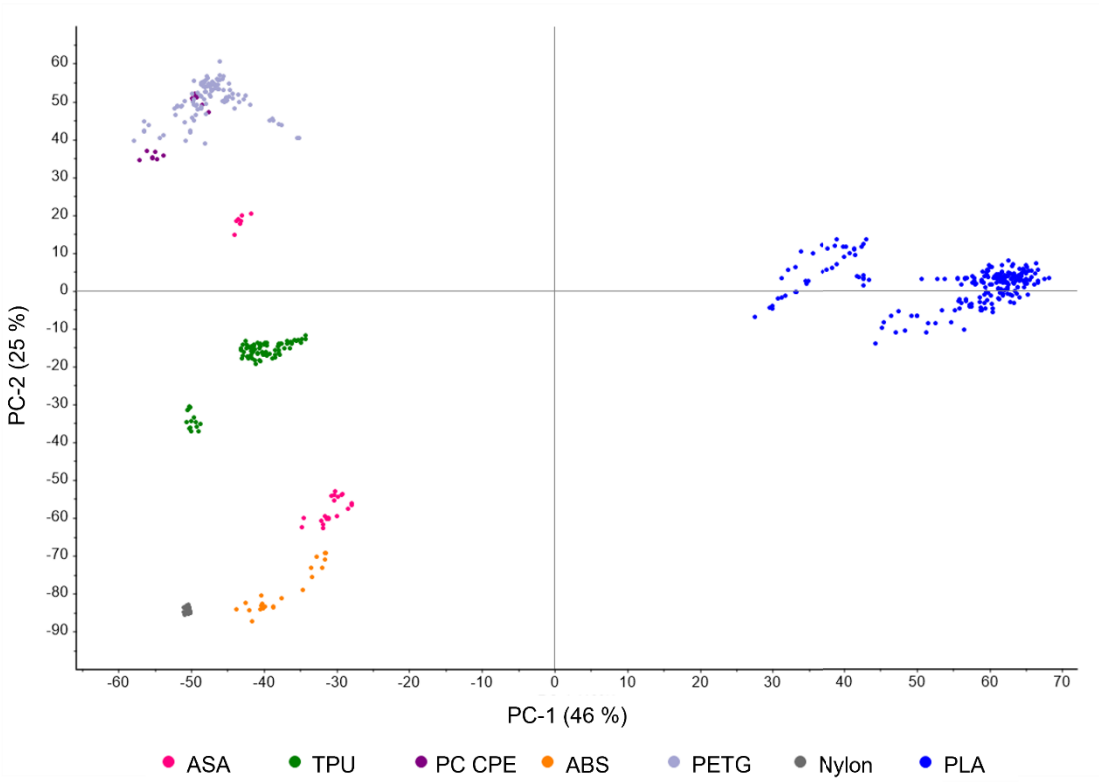

Figure 3.18 Résultats de la PCA effectuée avec les spectres infrarouges des échantillons de polymère de la collection

Comme il est possible d'observer sur Figure 3.18, la PCA effectuée avec les spectres infrarouges sépare les échantillons en groupe assez bien distinct selon les différents types de polymère. Le groupe du PLA est séparé en deux sous-groupes qui sont spatialement très proches l'un de l'autre. Le plus petit sous-groupe de PLA comprend des filaments de polymère dont la structure chimique diffère de celle du PLA standard. Il s'agit des quatre échantillons de filament de PLA EcoTough de marque Filaments.ca (62a, 63a, 64a et 65a) qui se trouve être du PLA modifié pour être plus résistant à la flexion et aux rayonnements ultraviolets (Filaments.ca, 2022d), d'un échantillon de filament de PLA de marque Spool3D (47a) qui est du PLA photoluminescent (Spool3D, 2022) et d'un échantillon de filament de PLA de marque Elixir (22a) qui est en fait un mélange de PLA avec d'autres polymères (Filaments.ca, 2022f). Les échantillons de TPU sont eux aussi divisés en deux sous-groupes très près l'un de l'autre. Le plus petit

groupe est composé des deux échantillons de TPU de marque et modèle NinjaTek Armadillo (28a et 43a) qui se trouve être du TPU renforcé (NinjaTek, 2022) et possède donc une structure chimique différente de celle du TPU standard. En ce qui concerne le groupe des échantillons d'ASA, il est possible de voir qu'il y a seulement un échantillon qui est vraiment éloigné du groupe. Il s'agit de l'échantillon d'ASA de marque Apollox FormFutura (43a) qui se trouve être un mélange avec cinq autres polymères afin de le rendre résistant aux rayonnements ultraviolets et aux intempéries (Formfutura, 2021). Finalement, les échantillons de PC CPE sont entremêlés avec ceux du PETG. Comme il s'agit d'un mélange de polycarbonate et de copolyesters, leurs structures chimiques respectives ont probablement plusieurs similarités et il n'est donc pas surprenant que les échantillons de PC CPE et de PETG soient spatialement rapprochés dans la PCA. Globalement, ces résultats démontrent que la PCA avec les spectres infrarouges sépare de façon bien distincte les différents types de polymère de la collection. De plus, pour un même type de polymère, certaines sous-classes chimiques provenant des modifications apportées pour améliorer ou changer certaines propriétés physiques du polymère sont aussi séparées par la PCA. Cependant, comme les échantillons au sein d'un même groupe ne sont pas très dispersés, cela signifie que l'intervariabilité est plutôt faible pour un même type de polymère.

3.3.2 Analyse en composantes principales avec les spectres Raman

La Figure 3.19 représente les résultats obtenus pour la PCA effectuée avec les spectres Raman des échantillons de polymère de la collection. L'axe des X correspond à la composante principale 1 (PC-1) qui représente 41% de la variance et l'axe des Y correspond à la composante principale 2 (PC-2) qui représente 25 % de la variance de ce jeu de données.

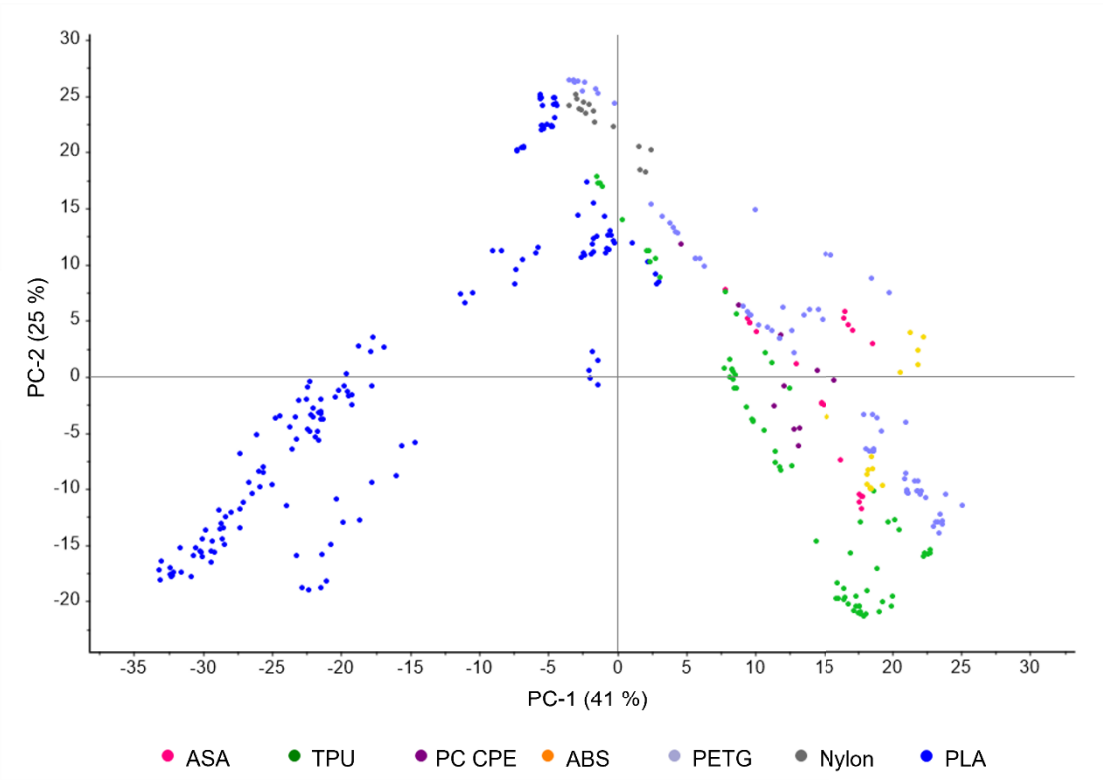

Figure 3.19 Résultats de la PCA effectuée avec les spectres Raman des échantillons de polymère de la collection

Comme il est possible d'observer sur la Figure 3.19, la PCA effectuée avec les spectres Raman ne sépare pas les échantillons en groupes bien distincts selon les différents types de polymère, contrairement aux résultats obtenus avec les spectres infrarouges. En effet, les groupes sont beaucoup plus diffus et certains d'entre eux se chevauchent. Cela s'explique par le fait que les spectres Raman décrivent beaucoup mieux l'intervariabilité des échantillons provenant de leur coloration (pigments), ce qui fait en sorte que la PCA donne des groupes beaucoup plus diffus pour un même type de polymère. Concernant le chevauchement entre les groupes de différents types de polymère, cela peut s'expliquer par le fait qu'en spectroscopie Raman le signal relié aux pigments est souvent plus fort que celui relié aux groupes fonctionnels. Certaines bandes caractéristiques des groupements fonctionnels peuvent donc être atténuées, ce qui rend la séparation des différents types de polymère moins franche.

Les résultats obtenus pour la PCA avec les spectres infrarouges et avec les spectres Raman corroborent parfaitement les observations faites lors de l'analyse visuelle des spectres infrarouges et Raman dans la section précédente (section 3.2), soit que les spectres infrarouges permettent une très bonne distinction des différents types de polymère de la collection ainsi que de leur sous-classe chimique, tandis que les spectres Raman permettent d'apprécier toute l'intervariabilité des échantillons provenant de la grande variété de couleurs (pigments), mais aussi des différents types de polymère.

Dans l'étude de Black (Black, 2019), les 50 échantillons de filament de polymère de sa collection ont été analysés par DART-MS et par TD-DART-MS, puis plusieurs PCA ont été réalisées avec les spectres de masse obtenus par les deux méthodes afin d'évaluer leur efficacité respective à séparer les échantillons ainsi que pour déterminer l'intervariabilité de sa collection d'échantillons. Les résultats qu'il obtient démontrent que, pour les spectres obtenus par DART-MS, les échantillons sont bien séparés en groupe selon le type de polymère, mais que les spectres obtenus par TD-DART-MS permettent une séparation encore plus distincte de ces différents groupes. Pour un même type de polymère, Black obtient une bonne séparation des échantillons selon la marque commerciale du filament de polymère. Cependant, comme l'information détaillée sur les échantillons et sur leur analyse spectrale n'est pas disponible, il est difficile de savoir si l'intervariabilité au niveau de la marque commerciale provient des sous-classes chimiques, tel que vu dans le présent projet, ou bien des différents additifs (p.ex. stabilisants) présents dans l'échantillon en question. Il obtient aussi une bonne séparation des échantillons selon la couleur des polymères, même au niveau des différentes teintes ou nuances d'une même catégorie de couleur. Malheureusement, comme l'intravariabilité des échantillons n'a pas été évaluée (pas de réplicas), il n'est pas possible de déterminer si ces échantillons sont différentiables (ou non), ni de déterminer le pouvoir discriminant de sa méthode d'analyse. Par exemple, pour sa PCA qui présente les échantillons d'un même type de polymère étant séparés selon la marque commerciale du filament, il est facile de penser que deux échantillons vraiment distants

un de l'autre spatialement sont bel et bien séparés. En revanche, pour deux échantillons étant près l'un de l'autre, il est difficile de déterminer, sans avoir de réplicas, s'ils sont réellement différentiables. Ces informations auraient été très pertinentes afin de comparer ses méthodes d'analyses et celles utilisées dans le présent projet afin d'évaluer la plus-value d'utiliser le TD-DART-MS plutôt que la spectroscopie infrarouge ou Raman.

3.3.3 Pouvoir discriminant

Dans un processus d'identification ou de comparaison de spécimens indiciaires, connaître l'intervariabilité du type de trace en question est primordial afin d'être en mesure de bien interpréter les résultats obtenus. Cette variation chimique entre les différents échantillons peut être évaluée avec le pouvoir discriminant (PD), qui est défini comme la probabilité que deux échantillons distincts choisis au hasard dans une population X soient différenciés. Il est à noter que pour une même population, le pouvoir discriminant peut varier selon la méthode d'analyse utilisée. Le pouvoir discriminant est calculé selon la formule de Smalldon et Moffat (Smalldon & Moffat, 1973), c'est-à-dire en considérant le nombre de paires indifférentiables par rapport au nombre total de paires possibles dans le jeu de données. Dans un contexte judiciaire, l'utilisation d'outils décisionnels statistiques peut s'avérer particulièrement importante pour appuyer ces conclusions.

Afin de déterminer le nombre de paires indifférentiables, des PCA itératives ont été effectuées sur les différents groupes de la PCA principale jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de séparer les échantillons. Deux échantillons sont considérés indifférentiables lorsqu'un ou plusieurs réplicas d'un des deux échantillons de polymère se chevauchent. À titre d'exemple, la Figure 3.20 présente les résultats de deux PCA itératives effectuées sur la PCA principale des spectres infrarouges. L'encadré a) correspond aux résultats de la PCA itérative effectuée sur le groupe d'échantillons en ABS. Les échantillons 24a, 48a et 59a sont tous les trois différentiables, car aucun des réplicas

des trois échantillons ne se chevauchent. L'encadré b) correspond aux résultats de la PCA itérative effectuée sur un groupe d'échantillons de PLA. En raison de la grande proximité et du chevauchement des réplicas, les échantillons 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 7a, 8a, 9a, 10a, 11a, 15a, 16a, 17a, 18a, 19a, 20a, 21a, 23a, 54a et 68a sont considérés indifférentiables.

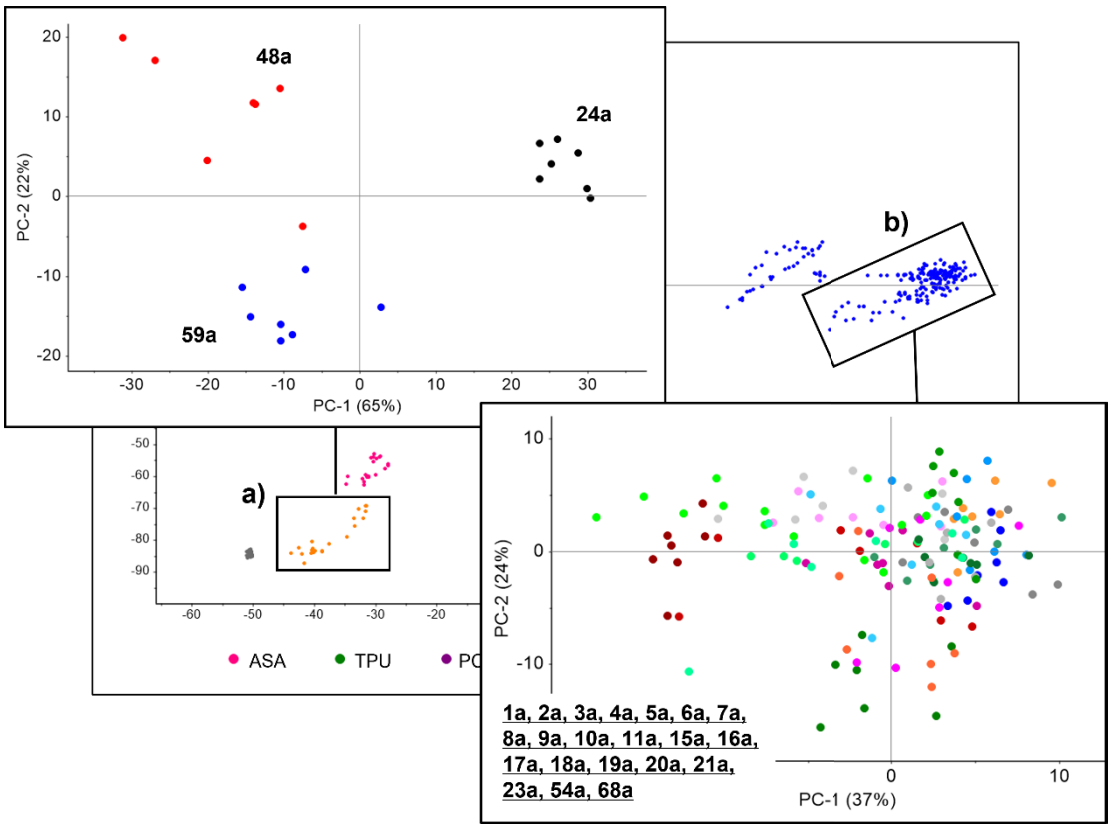

Figure 3.20 Résultats des PCA itératives effectuées à partir de la PCA principale, a) PCA itérative sur le groupe des échantillons en ABS et b) PCA itérative sur un groupe d'échantillons de PLA (spectres infrarouges)

La Figure 3.21 présente les résultats d'une PCA itérative effectuée sur la PCA principale des spectres Raman. L'encadré correspond aux résultats de la PCA itérative effectuée sur un groupe d'échantillons variés (PLA, TPU, PETG et Nylon). Dans ce cas, les échantillons 22a, 26a, 49a, 52a, 53a et 72a sont tous différentiables, car aucun des réplicas ne se chevauchent. À contrario, les échantillons 1a et 16a ainsi que 10a et 20a forme des paires indifférentiables, car un ou plusieurs réplicas se chevauchent.

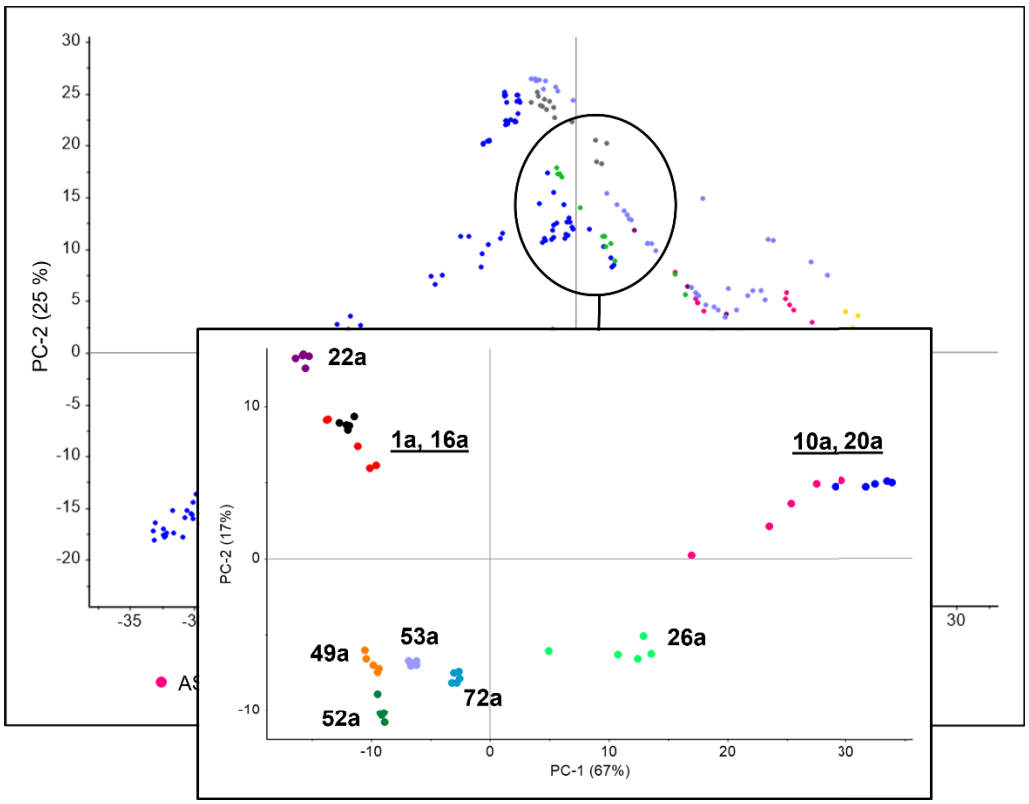

Figure 3.21 Résultats d'une PCA itérative effectuée avec un petit groupe d'échantillons sur la PCA principale (spectres Raman)

Le Tableau 3.4 présente les échantillons différentiables et indifférentiables déterminés à partir des résultats des PCA effectuées sur les spectres infrarouges et Raman.

Tableau 3.4 Échantillons différentiables et indifférentiables déterminés à partir des PCA effectuées avec les spectres infrarouges et Raman

Type polymère	Quantité échantillons	Proportion relative (%)	PCA spectres infrarouges	PCA spectres Raman
ABS	3	4,11	24, 48, 59	24, 59
ASA	4	5,48	**29, 30, 31**, 38	**29, 48***, 30, 31, 38
Nylon	3	4,11	12, 13, 26	**12, 13**, 26
PC CPE	2	2,74	37	27, 37
PETG	15	20,55	**14, 27*, 32, 33, 34, 35, 36, 49, 50, 69, 70, 71, 72, 73**, 25, 58	**14, 35**, 25, 32, 33, **34, 71**, **36, 70**, 49, **50, 69**, 58, 72, 73
PLA	32	43,84	**1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 54, 68**, 22, 47, **55, 60, 61, 67**, **62, 63, 64**, 65, 66	**1, 16**, **2, 17**, **3, 11**, 4, 5, 6, **7, 21**, **8, 19, 61**, **9, 15**, **10, 20**, 18, 22, 23, 47, 54, 55, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68
TPU	14	19,18	28, 39, 40, **41, 42, 44, 45, 46, 51, 52, 53, 56,** 43, 57	28, 39, 40, **41, 44, 51, 56**, 42, 43, 45, 46, 52, 53, 57

Les paires indifférentiables sont identifiées en gras et par la barre de soulignement

* Les échantillons identifiés par un astérisque ne sont pas du même type de polymère que les autres échantillons indifférentiables.

Dans les cas des paires indifférentiables par spectroscopie infrarouge, on remarque qu'il s'agit toujours de groupes de trois échantillons et plus, pouvant même aller jusqu'à 21 échantillons dans le cas du PLA, au sein desquels on trouve des échantillons de différentes couleurs pour un même type de polymère. En raison des observations faites préalablement, il n'est pas surprenant d'obtenir ce genre de résultats. Il est important de rappeler que l'échantillon 27a_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca, qui n'a pas été différencié d'un groupe d'échantillons de PETG, est en fait un mélange inconnu de polycarbonate de copolyesters. Leurs structures chimiques respectives ont donc sans

doute plusieurs similarités, ce qui expliquerait qu'ils n'ont pas été différenciés. À contrario, les paires indifférentiables par spectroscopie Raman correspondent à de petits groupes de deux échantillons, à l'exception d'un groupe de trois et d'un groupe de quatre échantillons. Dans presque tous les cas, les paires indifférentiables correspondent à des échantillons du même type et de la même couleur de polymère. Il est intéressant de noter que dans un seul cas, le type de polymère n'a pas été différencié avec les spectres Raman. Il s'agit des échantillons 29a_ASA noir_Filaments.ca et 48a_ABS noir_3D Hero, qui sont respectivement de l'ASA et de l'ABS. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'échantillons de couleur noire et que le signal lié à la structure chimique elle-même est complètement masqué par celui du pigment.

L'exercice d'effectuer des PCA itératives jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de séparer les échantillons a permis de déterminer qu'il y a 349 paires indifférentiables pour les spectres infrarouges et 21 paires indifférentiables pour les spectres Raman, par rapport à un total de 2628 paires possibles (voir Formule 1) dans la base de données spectrales. Il est à noter qu'une double vérification (par comparaison visuelle des spectres) a été effectuée pour chacune des paires différentiables et indifférentiables afin de confirmer que la PCA séparait réellement (ou pas) les échantillons selon des caractéristiques pertinentes (bandes pertinentes) et non pas par des différences dans la ligne de base. Le pouvoir discriminant obtenu avec les spectres infrarouges est de 86,72 % et celui pour les spectres Raman est de 99,20 % (voir Formule 2). Il s'agit de valeurs étant semblables à celles obtenues pour d'autres études spectroscopiques effectuées avec des polymères (Causin, 2015), tels que les sacs de plastique (Causin, Marega, Carresi, Schiavone, & Marigo, 2006; Roux, Bull, Goulding, & Lennard, 2000) et les peintures (Edmondstone, Hellman, Legate, Vardy, & Lindsay, 2004; Falardeau *et al.*, 2019; Muehlethaler, Massonnet, & Esseiva, 2011).

Formule 1 : Nombre de paires possibles dans une population de *n* échantillons (Causin, 2015)

$$k = \frac{n(n-1)}{2}$$

Où k = nombre de paires possibles et n = nombre d'échantillons dans l'ensemble

Formule 2 : Pouvoir discriminant (PD) (Smalldon & Moffat, 1973)

$$PD = \left(1 - \left(\frac{nombre\ de\ paires\ indifférentiables}{nombre\ total\ de\ paires}\right)\right) x\ 100$$

Finalement, comme mentionné précédemment, la spectroscopie infrarouge et Raman sont normalement des méthodes d'analyses complémentaires. En effet, la spectroscopie infrarouge permet d'obtenir l'information sur la composition chimique de l'échantillon de polymère tandis que le Raman permet d'obtenir l'information sur le pigment de l'échantillon en question. Cependant, en fonction des résultats obtenus pour l'analyse spectrale, la PCA et le pouvoir discriminant des échantillons de filament de polymère de la base de données de ce projet, il en ressort que la spectroscopie Raman surpasse la spectroscopie infrarouge et les deux méthodes ne sont donc pas autant complémentaires dans ce cas-ci. En effet, la spectroscopie Raman permet d'obtenir en une seule analyse l'information sur la composition chimique du polymère (bandes principales présentes sur les spectres Raman) et sur le pigment, ce que la spectroscopie infrarouge ne permet pas. Il n'est donc pas étonnant d'obtenir un pouvoir discriminant plus élevé pour les spectres Raman que les spectres infrarouges. Avec un PD de 99,20 % pour les spectres Raman, la spectroscopie Raman devrait suffire à elle seule pour la comparaison de deux spécimens indiciaires ou pour une analyse visant à caractériser ou identifier un échantillon (couleur et type de polymère) en utilisant la base de données. La spectroscopie infrarouge pourrait donc être utilisée en supplément uniquement au besoin.

3.4 Tirs expérimentaux

Une étape importante de ce projet était de réaliser des tirs expérimentaux avec des armes à feu imprimées en 3D afin de reproduire une scène de crime impliquant ce type d'arme à feu. Pour ce faire, huit canons d'armes à feu ont été imprimés en différents types de polymère (PLA, TPU, PC CPE, ABS, PETG + fibre carbone et Nylon + fibre carbone) et assemblés successivement à la carcasse d'une carabine Ruger 10/22 pour former une arme à feu hybride imprimée en 3D. Les fragments et les traces de polymère générés lors des tirs expérimentaux ont été collectés afin d'être répertoriés et analysés physiquement. Ils ont aussi été analysés chimiquement par spectroscopie infrarouge et Raman et comparés avec les spectres de la base de données afin de valider s'il est possible d'identifier et de relier (ou non) des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime (section 0). Parallèlement, des analyses balistiques sommaires ont été effectuées afin de compiler plus de données balistiques et permettre de corroborer les résultats obtenus par les études précédentes ayant déjà démontré qu'il est possible d'effectuer un tir (ou des tirs) avec des armes à feu complètement imprimées en 3D (Al Shamsi, 2019; Black, 2019; Crowe & Rugh, 2017; Honsberger *et al.*, 2018; Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022).

Dans ce projet, lors des tirs expérimentaux, la décharge des armes à feu hybrides a causé des dommages considérables aux canons imprimés en 3D. En effet, ces derniers ont tous explosé et généré plusieurs fragments de polymère qui ont été propulsés dans l'environnement par les gaz chauds qui se dissipent par les différentes fractures du canon. L'analyse des vidéos enregistrés avec la caméra haute-vitesse révèle que la rupture se produit avant que le projectile ne soit sorti du canon, ce qui a aussi été observé par Honsberger *et al*. (Honsberger *et al*., 2018). La rupture des canons exerce une grande influence sur le fonctionnement général de l'arme à feu. En effet, pour tous les tirs, le mécanisme d'éjection n'a pas fonctionné correctement et la douille est restée coincée dans la chambre. Cette défaillance est due en partie à l'expansion anormale des

douilles, s'expliquant par le fait que la chambre en polymère ne limite pas l'expansion de la douille comme le ferait normalement une chambre en métal conventionnelle, les rendant beaucoup plus difficiles à extraire. En se référant aux vidéos de la caméra haute-vitesse, il est possible de constater que la défaillance est aussi due au fait que la culasse ne recule pas suffisamment pour permettre l'extraction et l'éjection de la douille, en raison du manque de puissance du retour de gaz. En effet, lors du bris du canon, les gaz sont dispersés dans l'environnement plutôt que d'être dirigés et concentrés vers l'arrière, ce qui fait normalement reculer la culasse, et vers l'avant, ce qui donne la vitesse au projectile. Ce phénomène de mécanisme d'éjection défaillant a aussi été observé dans des études réalisées avec le pistolet Liberator (Honsberger *et al.*, 2018; Trincat *et al.*, 2022).

3.4.1 Traces de polymère générées dans l'environnement

Comme mentionné précédemment, les canons ont tous explosé lors des tirs expérimentaux générant ainsi plusieurs types de fragments de polymère qui se sont dispersés dans l'environnement. Aucun des types de polymère utilisés pour l'impression des canons n'a donc supporté la pression des gaz générés lors de la décharge. La Figure 3.22 présente le tir expérimental pour le canon en ABS. Il est possible d'y observer le bris du canon en gros fragments ainsi que plusieurs plus petits fragments de polymère qui sont propulsés dans l'environnement par la force des gaz qui se dissipent par les ruptures du canon.

Figure 3.22 Bris du canon en ABS lors du tir expérimental

La recherche de traces à la suite des tirs expérimentaux révèle que la majorité des fragments de polymère se trouvaient au sol entre 0 et 2 mètres en avant et sur les côtés de l'arme à feu. Dans le cas du pistolet Liberator, Trincat *et al*. (Trincat *et al.*, 2022) ont observé qu'en général, la plupart des petits fragments se trouvaient autour et à proximité de la position du pistolet, tandis que les plus gros fragments ont été projetés plus loin (effet de la déflagration). Quant à eux, Honsberger *et al*. (Honsberger *et al.*, 2019) ont observé que les petits fragments et les plus gros morceaux de polymère ont été trouvés majoritairement au sol près de l'endroit de la décharge, jusqu'à neuf mètres plus loin. Établir le patron de répartition des fragments de polymère en fonction de leur quantité et de leur taille est une perspective de recherche ultérieure très intéressante qui pourrait permettre d'estimer la position du tireur sur une scène.

Les fragments de polymère collectés dans l'environnement entourant la décharge peuvent être séparés en deux catégories principales, soit les plus gros fragments qui correspondent à différentes parties du canon et les plus petits fragments qui se sont

détachés du canon. Pour la catégorie des gros fragments, il est possible de dire que les canons se sont tous fragmentés de façon similaire, c'est-à-dire en trois sections distinctes par une fracture bien franche dans le sens des couches d'impressions. Les sections que l'on trouve sont la chambre, la jonction entre la chambre et le canon et le canon (voir Figure 3.23). En ce qui concerne la section de la chambre, les fragments mesurent entre 12 à 15 mm de longueur et peuvent présenter des fissures longitudinales (perpendiculaire aux sens des couches d'impression) ou transversales (dans le sens des couches d'impression). C'est dans cette section que les douilles sont restées coincées à la suite de la décharge. Pour la section qui correspond à la jonction entre la chambre et le canon, les fragments mesurent entre 15 et 28 mm de longueur et sont ceux qui sont le plus endommagés. En effet, ces fragments sont pour la plupart fractionnés en deux ou plusieurs petites parties par des fractures transversales ou longitudinales et présentent beaucoup de délaminage (décollement des couches d'impression). Ces fragments mesurent environ entre 5x5 mm et 10x25 mm. Pour la section du canon, les fragments mesurent entre 75 et 87 mm de longueur pour ceux ayant fragmenté en une seule partie, et entre 20 et 58 mm de longueur pour ceux ayant fragmenté en deux parties. Ces fragments ne présentent pas de fissure ni de délaminage. Plusieurs de ces gros fragments, surtout ceux provenant de la chambre et de la jonction entre la chambre et le canon, sont noircis au niveau de la portion interne du canon (probablement par les résidus de fumée) et présentent des particules de poudre partiellement brulée.

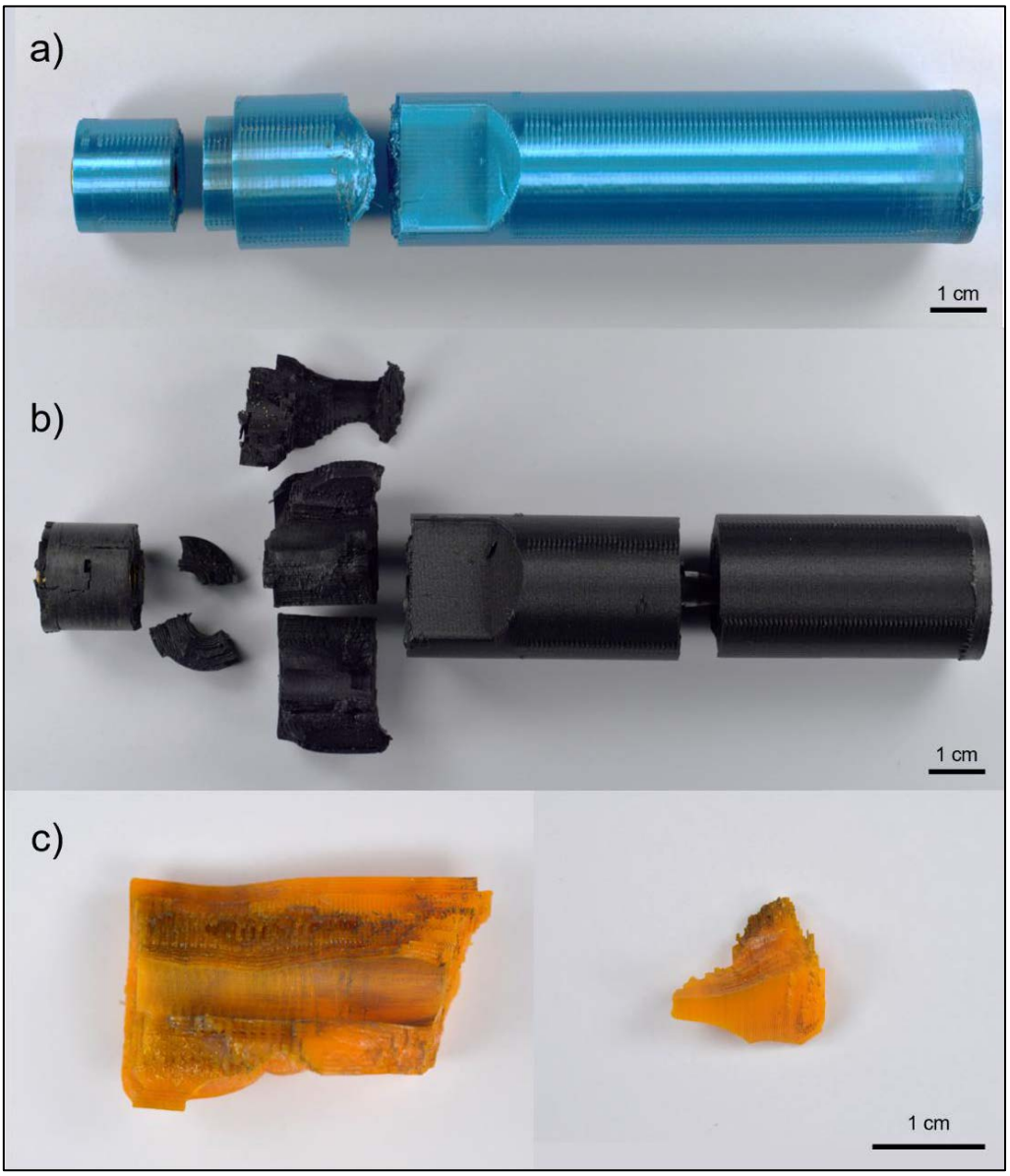

Figure 3.23 Gros fragments de polymère trouvés au sol à la suite des tirs expérimentaux, a) canon brisé en trois sections principales, b) canon brisé en trois sections principales s'étant fractionnées et c) vue rapprochée de deux gros fragments provenant de la jonction entre la chambre et le canon

Pour la catégorie des plus petits fragments, il existe une grande variation au niveau des formes et des dimensions observées. Ces fragments peuvent mesurer moins de 1x1 mm ou atteindre jusqu'à environ 5x16 mm. De plus, leur épaisseur est très irrégulière.

Certains d'entre eux sont plutôt minces et longs, mesurant environ entre 1x2 mm et 1x25 mm, et ont une épaisseur d'une ou deux couches d'impression seulement (voir Figure 3.24). La rupture de ces fragments peut provenir autant d'une fracture transversale que longitudinale. Bien que les canons aient tous explosé de façon similaire, les canons imprimés en ABS, en Nylon, en TPU et PLA Elixir, qui est en fait un mélange de PLA avec d'autres types de polymère (Filaments.ca, 2022f), sont ceux ayant le mieux supporté la pression engendrée lors de la décharge. En effet, ce sont les canons les moins endommagés et qui ont produits le moins de petits fragments de polymère. À contrario, les canons imprimés en PETG + fibre carbone, en PC CPE et en Value PLA, PLA dit économique (3D Printing Canada, 2022b), sont ceux ayant le moins bien supporté la pression et qui ont donc généré la plus grande quantité de petits fragments de polymère.

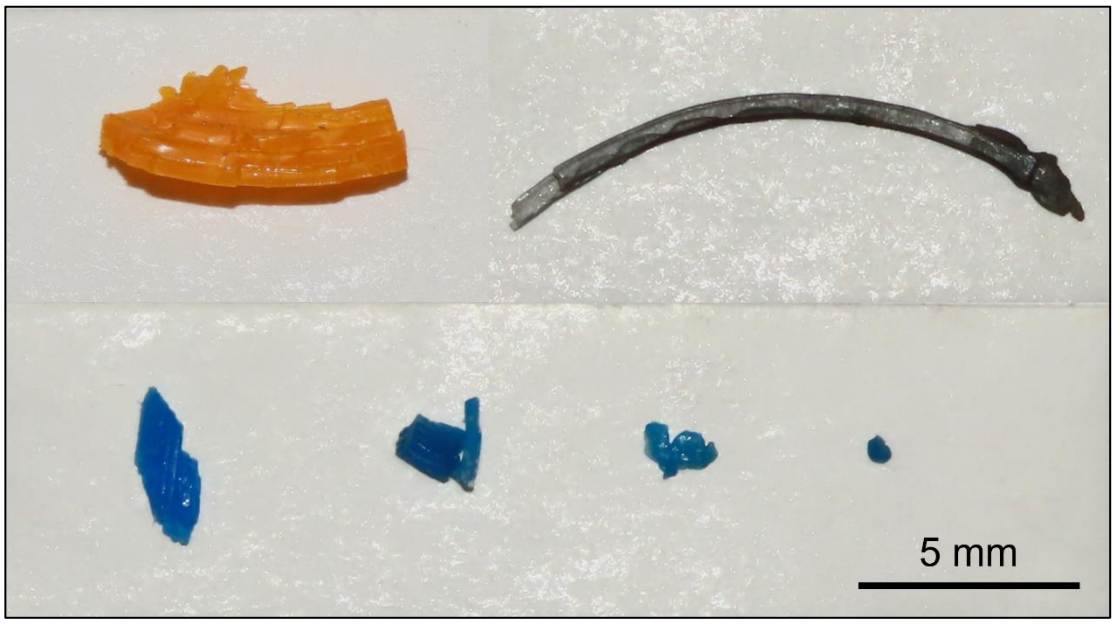

Figure 3.24 Différents types de petits fragments de polymère s'étant détachés du canon lors des tirs expérimentaux et ayant été trouvés au sol

Si l'on compare les résultats de cette étude avec ceux obtenus pour les études effectuées avec le pistolet Liberator, il en ressort que les résultats obtenus se corroborent. En effet,

les études précédentes démontrent que dans la quasi-totalité des cas, les canons ont explosé après une seule décharge, indifféremment du type de polymère utilisé et du calibre du pistolet, mais que ce sont les Liberator imprimés en ABS qui ont le mieux supporté la pression générée lors de la décharge (Al Shamsi, 2019; Honsberger *et al.*, 2018; Trincat *et al.*, 2022), comme dans le présent projet. De plus, le même genre de fragments de polymère a été généré en quantité similaire lors des tirs, soit de gros fragments provenant des différentes parties du canon et de plus petits fragments s'étant détachés de l'arme (Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022). À contrario, l'étude effectuée avec le revolver de type Washbear de calibre .22 LR (même calibre que les canons du présent projet) (Black, 2019), les canons n'ont pas explosé à la suite de la décharge du revolver. Néanmoins, de petits fragments de polymère similaires à ceux obtenus dans ce projet ont quand même été générés lors de la décharge, mais en plus faible quantité, et ont pu être collectés et analysés chimiquement. Cela révèle donc que même lorsqu'une arme à feu imprimée en 3D n'explose pas lors d'un tir, il est quand même possible de trouver des fragments de polymère dans l'environnement entourant la décharge.

3.4.2 Assemblage physique des fragments de polymère

Un examen d'assemblage physique (*physical match*) consiste à examiner et à comparer des objets cassés, coupés ou déchirés afin de déterminer si deux ou plusieurs pièces constituaient à l'origine un seul et même objet (Fraser, 2010; Houck *et al.*, 2017). Comme il a été démontré dans les études précédentes (Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022), certains fragments de taille suffisante et présentant une fracture assez franche peuvent être associés entre eux par assemblage physique. Dans ce projet, certains fragments ont également pu être assemblés physiquement autant par les fractures longitudinales que transversales (voir Figure 3.25). Cependant, il est important de prendre en considération que les fractures transversales ont une plus grande valeur probante que les fractures longitudinales, car elles sont beaucoup plus

aléatoires et suivent des trajectoires difficiles à observer une seconde fois, tandis que les fractures longitudinales sont consécutives à une délamination des couches d'impression, et ne sont donc potentiellement pas uniques. Ces associations physiques permettent de révéler que deux ou plusieurs fragments ont la même source, soit la même arme à feu imprimée en 3D. Cette information peut s'avérer pertinente dans une enquête judiciaire, par exemple dans le cas où un fragment trouvé sur les vêtements ou dans les effets personnels d'un suspect est relié par association physique à un ou des fragments provenant de la scène.

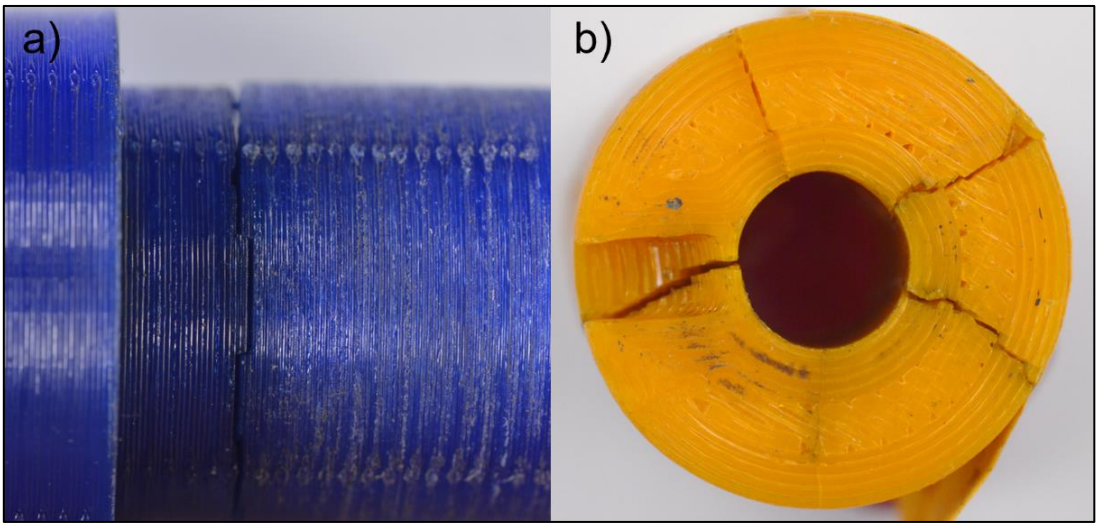

Figure 3.25 Assemblage physique de fragments de polymère, a) fracture longitudinale et b) fractures transversales

3.4.3 Analyse des éléments de munition

Comme mentionné précédemment, toutes les douilles sont restées coincées dans la chambre à la suite des tirs, en raison du mécanisme d'éjection défaillant pour ces armes à feu hybrides imprimées en 3D. Les douilles ont donc été retirées manuellement de la chambre en prenant les précautions nécessaires afin de ne pas les endommager. L'état général des douilles à la suite de la décharge varie d'un tir à l'autre, mais elles présentent toutes un gonflement et cinq d'entre elles présentent une rupture (voir

Figure 3.26). Ces caractéristiques particulières sont dues à l'expansion anormale des douilles lors des tirs. Ce phénomène a été observé dans les études sur le Liberator (Honsberger *et al.*, 2018; Trincat *et al.*, 2022), mais il peut aussi être observé chez les armes à feu artisanales ou lorsqu'on utilise des munitions de calibre inférieur à ce qui a été conçu pour l'arme à feu (Bokobza, Zidon, & Tordjman, 2014; Di Maio, 1999; Hazon, Bokobza, & Giverts, 2021).

Figure 3.26 Douilles restées coincées dans la chambre à la suite de la décharge. De gauche vers la droite, il est possible d'observer une douille gonflée et fendue, gonflée et partiellement fendue, puis légèrement gonflée

L'analyse microscopique des douilles pour la recherche des traces balistique révèle que la trace du percuteur est bien présente sur chacune des douilles et qu'il est possible de les relier entre elles par cette trace. En raison du système d'éjection défaillant, il aurait été normal de s'attendre à ce qu'il n'y ait pas de trace de l'extracteur ni de l'éjecteur sur les douilles. Toutefois, on observe une trace partielle de l'extracteur sur sept des huit douilles, mais aucune trace de l'éjecteur. Cela s'explique par le fait que l'extracteur a bel et bien fait son mouvement de récupération de la douille, mais il n'a pas été capable de l'extraire pour les raisons expliquées précédemment. L'extracteur a donc quand même frotté le bourrelet de la douille, ce qui a généré la trace partielle.

Cependant, comme la douille n'a pas été tirée vers l'arrière par l'extracteur, elle n'a pas percuté l'éjecteur, donc aucune trace n'a été générée par l'éjecteur (voir Figure 3.27). Il est à noter qu'il n'est pas possible de relier les traces partielles de l'extracteur entre elles, par manque de caractéristiques individuelles.

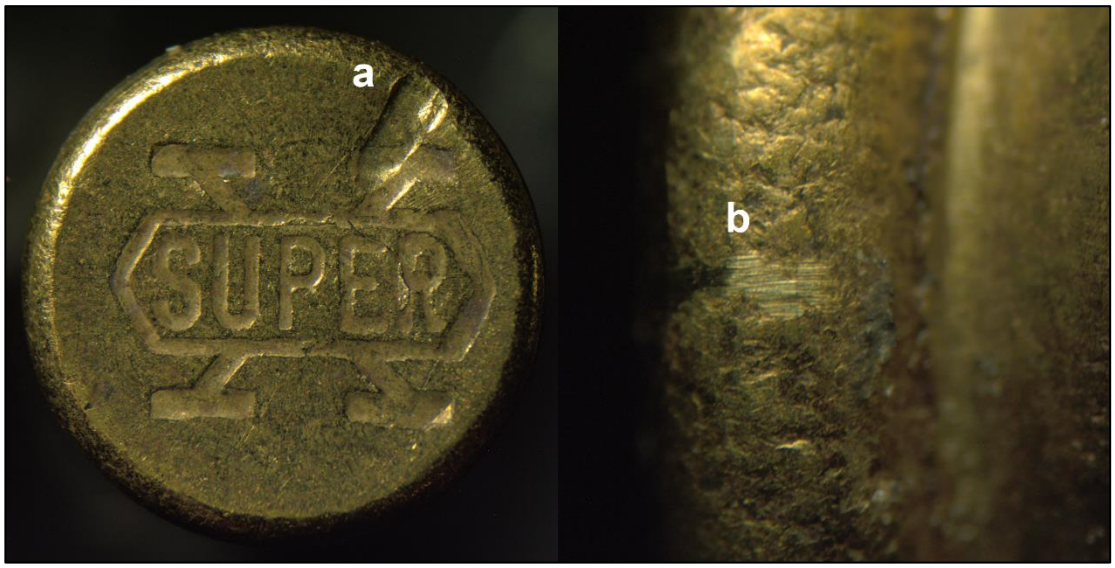

Figure 3.27 Traces balistiques générées sur les douilles lors de la décharge des armes à feu hybrides imprimées en 3D de ce projet, a) trace du percuteur et b) trace partielle de l'extracteur

Pour les traces balistiques sur les projectiles, contrairement aux armes à feu conventionnelles, aucune impression de champ et de rayure n'est présente sur les projectiles (voir Figure 3.28), ce qui est normal puisque le canon en polymère n'est pas rayé. Cependant, cette absence de rayure sur les projectiles n'est pas exclusive aux armes à feu imprimées en 3D. En effet, il est possible d'observer ce phénomène pour les autres types des armes à feu artisanales dont le canon est généralement lisse ou encore lorsqu'un projectile de calibre inférieur à celui du canon est utilisé lors d'un tir (Di Maio, 1999; Honsberger *et al.*, 2019).

Figure 3.28 Projectile récupéré au sol à la suite des tirs expérimentaux effectués avec les armes à feu hybrides imprimées en 3D

La recherche de traces de polymère sur les éléments de munition a été effectuée à l'œil nu à l'aide de lumières de différentes longueurs d'onde, puis avec un microscope. Contrairement à la majorité des autres études, aucune trace de polymère sur les douilles et les projectiles provenant des tirs expérimentaux n'a été observée. À cet égard, il est important de mentionner que les études ayant observé des traces de polymère sur les éléments de munition ont été réalisées avec une arme à feu imprimée en 3D de calibre .380 Auto ou .38 Special (Black *et al.*, 2017; Crowe & Rugh, 2017; Honsberger *et al.*, 2018; Honsberger *et al.*, 2019; Trincat *et al.*, 2022). Cependant, deux de ces études ont aussi utilisé une arme à feu imprimée en 3D de calibre .22 LR (même calibre que le présent projet). Dans ce cas, comme dans le présent projet, aucune trace de polymère n'a été observée sur les éléments de munition (Black *et al.*, 2017), à l'exception d'une seule douille qui présentait une trace de polymère en très faible quantité (Crowe & Rugh, 2017). L'hypothèse proposée pour expliquer ces résultats est que, comme le calibre .22 LR est beaucoup moins puissant et génère donc moins de chaleur et de pression que les calibres .380 Auto et .38 Special, il serait moins propice au transfert de traces de polymère sur les éléments de munitions. De plus, le diamètre interne de la chambre et du canon, et donc de l'espace vide entre la cartouche et le

polymère doit jouer lui aussi un rôle sur le transfert du polymère. Dans le présent projet, le diamètre interne des canons imprimés en 3D a justement volontairement été augmenté d'environ 0,3 mm, par rapport au diamètre interne du canon original de la carabine Ruger 10/22, afin diminuer la pression dans le canon et ainsi réduire les risques de rupture lors des tirs.

3.4.4 Vitesse et comportement des projectiles

Comme dans les autres études (Honsberger *et al.*, 2018; Trincat *et al.*, 2022), la balistique extérieure révèle que l'absence de rayage dans les canons ainsi que leur rupture lors des tirs expérimentaux exercent une grande influence sur la vélocité et le comportement des projectiles. Concernant le comportement des projectiles, les vidéos enregistrées avec la caméra haute-vitesse montrent qu'il y a absence de rotation du projectile pour tous les tirs. Ces derniers effectuent un vol très instable lors duquel, très rapidement après leur sortie du canon, ils tendent à culbuter en ramenant le nez du projectile vers le haut (pour quatre des tirs) ou vers le bas (pour deux des tirs) (voir Figure 3.29). Cette instabilité s'explique par l'absence de rayures dont le rôle est normalement de transmettre un mouvement de rotation au projectile, le long de son axe longitudinal, lui procurant ainsi une stabilité gyroscopique qui stabilise le vol du projectile (Di Maio, 1999). Avec un tel comportement, il est possible de s'attendre à trouver des impacts et des perforations de projectile atypiques, ce qu'il est important de considérer lors de l'examen et de la reconstruction d'une scène de crime.

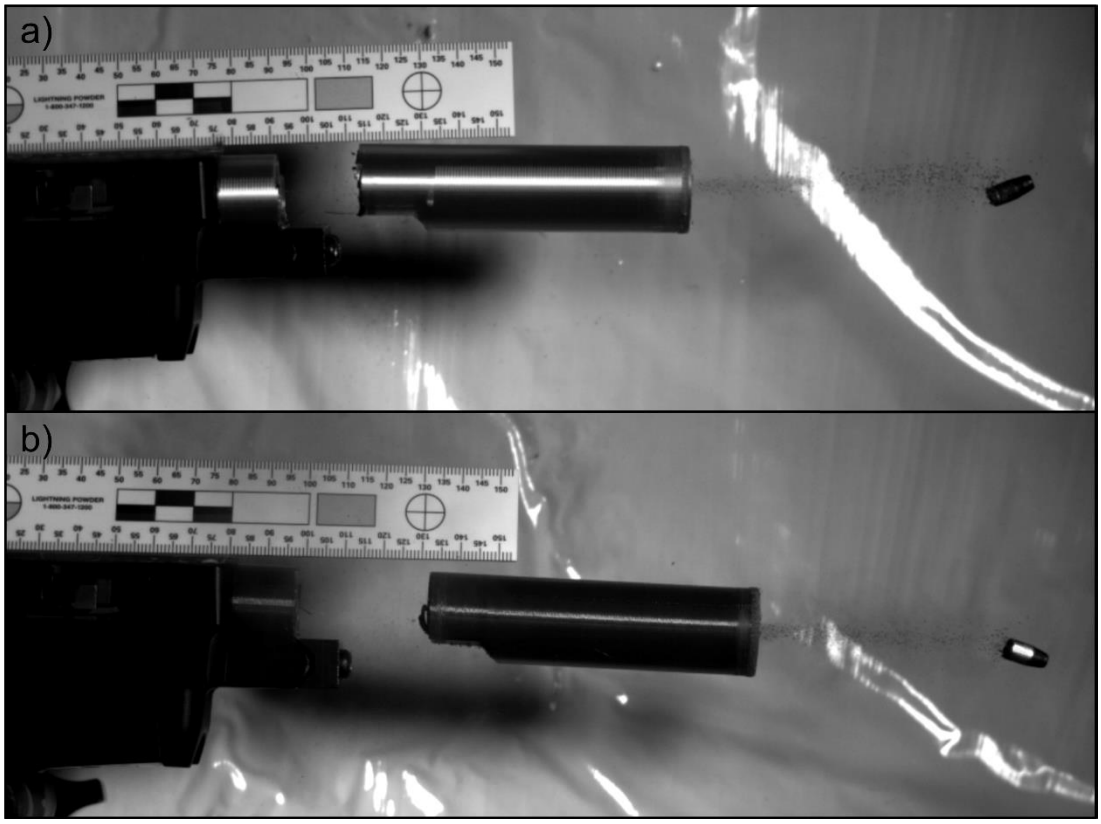

Figure 3.29 Comportement du projectile lors de son vol, a) nez du projectile pointant vers le haut et b) nez du projectile pointant vers le bas

En ce qui a trait à la vélocité des projectiles, les faibles valeurs de vitesse enregistrées par les chronographes démontrent que la diffusion des gaz lors de la rupture du canon engendre une grande perte d'énergie. Étant donné qu'il y a moins d'énergie disponible pour propulser le projectile vers l'avant, la vitesse du projectile à la sortie du canon sera plus faible. D'ailleurs, pour deux des tirs expérimentaux, le projectile est resté coincé dans le canon (canon en PETG + fibre carbone et canon en PC CPE) par manque de propulsion. À titre comparatif, en utilisant les mêmes cartouches pour effectuer des tirs avec la carabine Ruger 10/22 non modifiée (canon original), la vitesse obtenue pour le projectile est d'environ 313,6 m/s. Pour les tirs avec les canons imprimés en 3D, les valeurs de vitesse obtenues se situent entre 69,9 et 121,8 m/s, ce qui constitue un écart entre 60 à 80 % avec la valeur de la vitesse obtenue avec la carabine non modifiée.

Honsberger *et al.* (Honsberger *et al.*, 2018) obtiennent aussi un écart de vélocité entre 40 à 60 % par rapport aux valeurs obtenues pour une arme à feu classique du même calibre (.380 Auto). Trincat *et al*. (Trincat *et al.*, 2022) obtiennent des vélocités encore plus faibles.

À des fins d'analyse lésionnelle, l'énergie cinétique et l'énergie normalisée du projectile à la sortie du canon ont été déterminées. Il s'agit de propriétés très importantes, car elles donnent une indication de la puissance globale du projectile et, par conséquent, une indication de son potentiel de blessure. L'énergie cinétique du projectile a été calculée à partir de la vitesse obtenue par le chronographe de marque Kurzzeit selon la Formule 3. L'énergie normalisée du projectile, définie comme étant l'énergie cinétique du projectile divisé par la surface projetée du projectile (Kennedy, Ng, McNally, Stitzel, & Duma, 2006), a été calculée par la Formule 4.

Formule 3 : Énergie cinétique du projectile à la sortie du canon

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Où E_k = énergie cinétique du projectile (J), m = masse du projectile (kg) et v = vitesse (m/s) du projectile

Formule 4 : Énergie normalisée du projectile à la sortie du canon

$$E_{normalisée} = \frac{E_k}{\pi r^2}$$

Où E_k = énergie cinétique du projectile (J) et r = rayon de la base du projectile (m)

Les valeurs de vélocité et d'énergie des projectiles obtenues pour chacun des tirs sont répertoriées dans le Tableau 3.5 et représentées dans la Figure 3.30. Il est à noter que l'énergie normalisée a été calculée en considérant que les projectiles avaient une trajectoire conventionnelle. Toutefois, il a été vu précédemment que le nez des

projectiles ne pointait pas parfaitement vers l'avant lors de leur vol, ce qui augmente la surface du projectile diminuant ainsi son énergie normalisée.

Tableau 3.5 Vitesse et énergie cinétique du projectile à la sortie du canon en fonction de sa composition chimique (type de polymère)

Composition du canon	Vitesse du projectile (m/s)	Énergie du projectile (J)	Énergie normalisée (J/m^2)
PLA Elixir	69,9	6,4	251 450
PC CPE #1	70,9	6,6	258 690
TPU	76,5	7,6	301 170
Value PLA	97,8	12,5	492 230
Nylon + fibre carbone	107,2	15,0	591 400
ABS	121,8	19,3	763 460
PETG + fibre carbone	-	-	-
PC CPE #2	-	-	-

* Il n'y a pas de valeurs pour les canons en PETG + fibre carbone et PC CPE #2, car le projectile est resté coincé dans le canon.

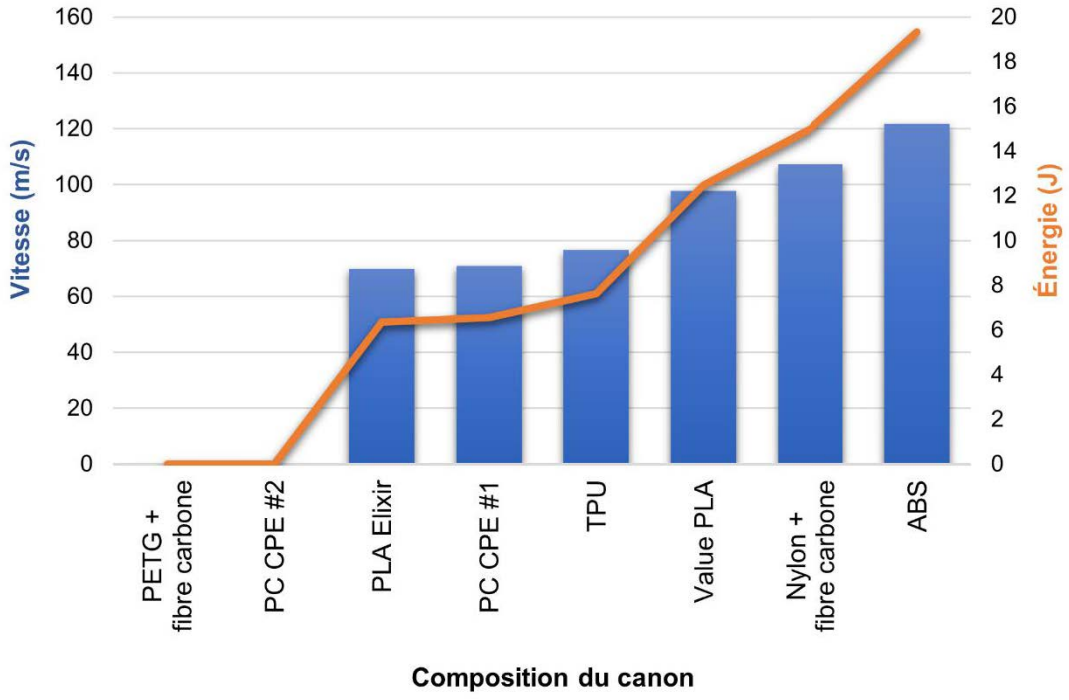

Figure 3.30 Vitesse et énergie cinétique du projectile à la sortie du canon en fonction de sa composition (type de polymère)

Considérant ces résultats, il est possible de dire que c'est le canon en ABS qui montre la meilleure efficacité pour le tir en termes de vélocité. De plus, comme il a été mentionné plus tôt, le canon en ABS est un de ceux ayant subi le moins de dommage et donc ayant le mieux résisté à la décharge. Cela n'est pas étonnant puisque, parmi les autres types de polymère, l'ABS est celui dont la structure chimique permet le moins l'empilement des chaînes et qui possède donc la meilleure élasticité. De plus, comme il a été vu précédemment, l'ABS est réputé pour sa résistance aux chocs. Ce sont sans doute ses propriétés physico-chimiques qui ont permis au canon en ABS de résister plus longtemps à la pression générée lors de tirs. Les gaz ont donc pu propulser le projectile plus longtemps avant de se dissiper dans l'environnement par les fractures du canon.

D'un point de vue lésionnel, tous les projectiles ont atteint une vitesse suffisamment élevée pour avoir l'énergie normalisée minimale nécessaire pour crever un œil humain[17], soit 35,519 J/m^2 (Kennedy *et al.*, 2006) et pour transpercer la peau humaine[18], soit 0,1 J/mm^2 (ou 100 000 J/m^2) (Bir *et al.*, 2005; Kneubuehl, 2011), ce qui représente des dommages corporels graves.

D'un point de vue juridique, même lorsqu'elles explosent, ces armes à feu hybrides imprimées en 3D correspondent à la définition d'arme à feu selon l'article 2 du Code criminel du Canada (Code criminel, 1985), car elles sont susceptibles, grâce à un canon qui permet de tirer des projectiles, d'infliger des lésions corporelles graves à une personne ou de causer la mort. Toutefois, selon l'article 84(3) du Code criminel du Canada, elles ne sont pas considérées comme étant des armes à feu, pour l'application des articles 91 à 95, 99 à 101, 103 à 107 et 117.03 et des dispositions de la Loi sur les armes à feu (Loi sur les armes à feu, 1995), car elles n'ont pas été conçues ou adaptées pour tirer des projectiles de façon à avoir une vitesse supérieure à 152,4 m/s et une énergie supérieure à 5,7 J. En effet, dans ce projet, aucun projectile n'a atteint la vitesse minimale requise, mais ils avaient tous l'énergie cinétique minimale requise.

En somme, les armes à feu imprimées en 3D laissent des traces chimiques et balistiques très caractéristiques qui sont des éléments à chercher lors de l'examen d'une scène de crime et à considérer lors de l'analyse de pièces provenant d'une scène, pouvant indiquer l'utilisation d'une telle arme. En effet, l'explosion des armes à feu imprimées en 3D lors de leur décharge génère une multitude de fragments de polymère (trace chimique) qui sont dispersés dans l'environnement et qu'il est possible de trouver à proximité et aux alentours de l'arme à feu en question. Certains de ces fragments

---

[17] V50 œil humain : rupture du globe oculaire humain dans 50% des cas, avec un projectile ayant une énergie normalisée de 35,519 J/m^2 (Kennedy *et al.*, 2006)

[18] V50 peau humaine : transpercement de la peau humaine dans 50% des cas, avec un projectile ayant une énergie normalisée de 0,1 J/mm^2 (Bir, Stewart, & Wilhelm, 2005; Kneubuehl, 2011)

peuvent être assemblés physiquement, ce qui peut permettre, par exemple, de placer un suspect sur les lieux de la décharge en reliant des fragments de polymère trouvés sur ce dernier avec des fragments de polymère trouvés sur les lieux de l'événement. De plus, il pourrait être possible d'estimer la position du tireur sur une scène en établissant le patron de répartition des fragments de polymère (études ultérieures). Les éléments de munitions peuvent eux aussi présenter des traces chimiques caractéristiques d'un tir avec une arme à feu imprimée en 3D, soit des traces de transfert de polymère sur les projectiles et les douilles, indiquant leur utilisation dans ces armes. Des traces balistiques caractéristiques peuvent aussi être observées, en fonction du type d'arme à feu imprimé en 3D, telles que l'absence de rayage des projectiles, l'unique présence de la trace du percuteur sur les douilles (pas de trace de l'extracteur ou de l'éjecteur) ainsi que le gonflement et la déchirure des douilles. Cependant, ces traces balistiques sont communes avec d'autres types d'armes à feu « maison » ou l'usage du mauvais calibre de munition pour l'arme à feu en question, et ne sont donc pas exclusives aux armes à feu imprimées en 3D.

Finalement, il est important de réitérer le fait que même si ces armes explosent lors de leur décharge, ce qui exerce une influence sur le fonctionnement général de l'arme (système d'éjection défaillant et perte de puissance du projectile), le potentiel lésionnel des projectiles pour une victime est bien présent. De plus, comme il a été soulevé par Trincat *et al*. (Trincat *et al.*, 2022), les dommages causés à l'arme lors du tir suggèrent que les armes à feu imprimées en 3D représentent aussi un danger pour le tireur.

3.5 Analyse de la dégradation des polymères

Un des objectifs importants de ce projet est d'étudier la dégradation que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes températures et pressions engendrées par un tir d'arme à feu, afin de déterminer si ces effets peuvent exercer une influence sur l'interprétation des résultats et sur la possibilité d'identifier ou de relier des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime. Pour ce faire, il est important de comprendre le mécanisme de dégradation théorique général des polymères ainsi que de déterminer quel niveau de dégradation du polymère est obtenu dans des conditions contrôlées pour ensuite faire le lien avec les tirs expérimentaux.

3.5.1 Mécanisme théorique de la dégradation des polymères

Les polymères sont des matériaux sujets au vieillissement et à la dégradation pouvant être provoqués, entre autres, par la chaleur (dégradation thermique), la lumière ou les rayons ultra-violets (photodégradation), l'oxygène (dégradation oxydante), l'eau (hydrolyse) et les micro-organismes (biodégradation). Pour les armes à feu imprimées en 3D, la source potentielle principale de dégradation est sans doute les températures élevées auquel le polymère est soumis lors des tirs. À haute température (chauffage excessif), plusieurs mécanismes de dégradation peuvent se produire, généralement de façon simultanée. Les principaux mécanismes sont la dépolymérisation, la scission aléatoire des chaînes et l'élimination des groupes latéraux. Dans certains cas, un processus de recombinaison menant à la réticulation ou à la cyclisation peut aussi se produire pendant la dégradation (Koltzenburg, Maskos, & Nuyken, 2017; Król-Morkisz & Pielichowska, 2019; Stuart, 2002).

La dépolymérisation est un processus radicalaire dans lequel les chaînes de polymère sont dégradées en monomères (processus inverse de la polymérisation). Cette réaction commence généralement aux extrémités de la chaîne où le radical libre est formé. Par

la suite, les monomères sont détachés de la chaîne principale progressivement jusqu'à ce qu'elle soit complètement dépolymérisée. La scission aléatoire des chaînes de polymère est un processus lors duquel plusieurs radicaux libres sont créés de manière aléatoire le long des chaînes principales du polymère, ce qui entraine la fragmentation du polymère en molécules plus petites de différentes longueurs de chaînes. Certaines d'entre elles sont suffisamment petites pour être volatiles. Il est à noter qu'il peut aussi se produire une scission spécifique de l'extrémité des chaînes. Quant à la réaction de l'élimination des groupes latéraux, elle entraine la rupture des liaisons entre les groupes latéraux et la chaîne principale du polymère. Dans certains cas, les groupes latéraux s'étant détachés réagissent entre eux pour former des structures cycliques. Les molécules étant formées lors du processus d'élimination sont généralement des produits volatils de dégradation (Kholodovych & Welsh, 2007; Koltzenburg *et al.*, 2017; Król-Morkisz & Pielichowska, 2019; Stuart, 2002).

Le mécanisme général de la dégradation thermique oxydante, présenté à la Figure 3.31, est constitué des étapes principales d'initiation, de propagation et de terminaison. La première étape de la dégradation thermique des polymères, soit l'initiation, implique la perte d'un atome d'hydrogène de la chaîne polymère à la suite d'un apport d'énergie par la chaleur. Cela crée un radical libre hautement réactif et instable ($R^{\bullet}$) et un atome d'hydrogène avec un électron non apparié ($H^{\bullet}$). Par la suite, l'étape de la propagation implique une multitude de réactions. La première est celle où le radical libre ($R^{\bullet}$) réagit avec une molécule d'oxygène (O_2) pour former un radical peroxy ($ROO^{\bullet}$) qui peut ensuite enlever un atome d'hydrogène d'une autre chaîne polymère pour former un hydroperoxyde (ROOH). L'hydroperoxyde se divise ensuite en deux nouveaux radicaux libres ($RO^{\bullet}$) + ($^{\bullet}OH$) qui continueront à propager la réaction à d'autres molécules de polymère. Finalement, la fin de la dégradation thermique est obtenue avec l'étape de terminaison lors de laquelle les radicaux libres réagissent entre eux

(recombinaison) pour former des produits terminaux inactifs (Crow Polymer Database, 2022; Stuart, 2002).

Initiation

$$RH \xrightarrow{\Delta} R^{\bullet} + H^{\bullet}$$

Propagation

$$R^{\bullet} + O_2 \rightarrow ROO^{\bullet}$$

$$ROO^{\bullet} + RH \rightarrow R^{\bullet} + ROOH$$

$$ROOH \rightarrow RO^{\bullet} + {}^{\bullet}OH$$

$$RO^{\bullet} + RH \rightarrow R^{\bullet} + ROH$$

$${}^{\bullet}OH + RH \rightarrow R^{\bullet} + H_2O$$

Terminaison

$$R^{\bullet} + R^{\bullet} \rightarrow RR$$

$$2\,ROO^{\bullet} \rightarrow ROOR + CO_2$$

$$R^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow ROOR$$

$$R^{\bullet} + RO^{\bullet} \rightarrow ROR$$

$${}^{\bullet}OH + ROO^{\bullet} \rightarrow ROH + O_2$$

Figure 3.31 Mécanisme général de la dégradation thermique oxydante des polymères, image (modifiée) tirée de (Crow Polymer Database, 2022)

Il est à noter que la stabilité thermique des polymères (c.-à-d. la résistance du matériau sous l'action de la chaleur), donc sa facilité (ou non) à se dégrader, est fortement liée à sa structure chimique, ses énergies de liaisons, son degré de cristallinité et son poids moléculaire. En général, les structures contenant des liaisons plus faibles dans leur chaîne principale (p. ex. les liens C-H, C-C aliphatiques et C-X où X = halogène) rendent les polymères moins résistants aux hautes températures. À contrario, les polymères contenant des liaisons fortes (p. ex. liens C=C, C=O, C=N, C≡C et C≡N) et/ou des structures cycliques et aromatiques dans leur squelette possèdent généralement une stabilité thermique beaucoup plus élevée. Cependant, malgré cela le polymère finira quand même par se dégrader lorsque la quantité d'énergie de dissociation nécessaire sera atteinte (Kholodovych & Welsh, 2007; Król-Morkisz & Pielichowska, 2019; Stuart, 2002).

3.5.2 Dégradation contrôlée des polymères à l'étuve

Une évaluation de la dégradation thermique des polymères a été effectuée dans des conditions contrôlées à l'étuve afin d'avoir un portrait de la dégradation pouvant être observée sur les spectres infrarouges. Cette étape permet d'orienter l'analyse et l'interprétation des spectres des spécimens de polymère « après tir » récoltés à la suite des tirs expérimentaux. Pour ce faire, des échantillons de polymère de PLA et PETG « avant impression » ont été soumis à différentes températures à l'étuve, soit 200, 300, 400 et 500 °C, pendant deux minutes. Par la suite, ces échantillons ont été analysés par spectroscopie infrarouge. Ces deux échantillons ont été choisis en particulier, car ils ont une structure chimique bien différente, mais aussi parce qu'il s'agit de polymères standards (c.-à-d. qu'ils n'ont pas été modifiés pour améliorer leurs propriétés), selon la description du fabricant. Cela limite le plus possible les facteurs pouvant influencer leur stabilité thermique, tels que la présence de différents additifs et stabilisant. Cependant, il est à noter que leur composition chimique précise n'est pas connue.

Comme il est possible de le constater à la Figure 3.32, on obtient une dégradation de l'échantillon de PLA (observable par spectroscopie infrarouge) après une exposition de deux minutes à une température de 500 °C. En effet, le spectre du PLA à 500 °C présente plusieurs variations par rapport au spectre de référence de l'échantillon de PLA (voir astérisques rouges sur la Figure 3.32). Par exemple, il est possible d'observer la diminution/disparition des bandes associées aux liaisons C-H (3200 cm^{-1} à 2800 cm^{-1}) due à la perte des hydrogènes lors de l'étape de l'initiation de la dégradation. L'apparition d'une bande large dans la région des alcools et des acides carboxyliques (3600 cm^{-1} à 3200 cm^{-1}) et l'apparition d'une deuxième bande dans la région des carbonyles (1800 cm^{-1} à 1610 cm^{-1}) sont quant à elles associées aux différents radicaux formés lors des diverses réactions de l'étape de propagation (p. ex. oxydation) ainsi qu'aux produits terminaux formés lors de l'étape de terminaison, tel que présenté à la Figure 3.31. Il est aussi possible d'observer que les bandes dans la région des empreintes digitales (1500 cm^{-1} à 500 cm^{-1}) ne sont plus définies en raison de leur superposition (Millipore Sigma, 2022; Stuart, 2021; Stuart, 2002). Ces variations indiquent donc la présence de différents produits terminaux (et d'un mélange de ceux-ci) générés lors de la dégradation de l'échantillon de PLA.

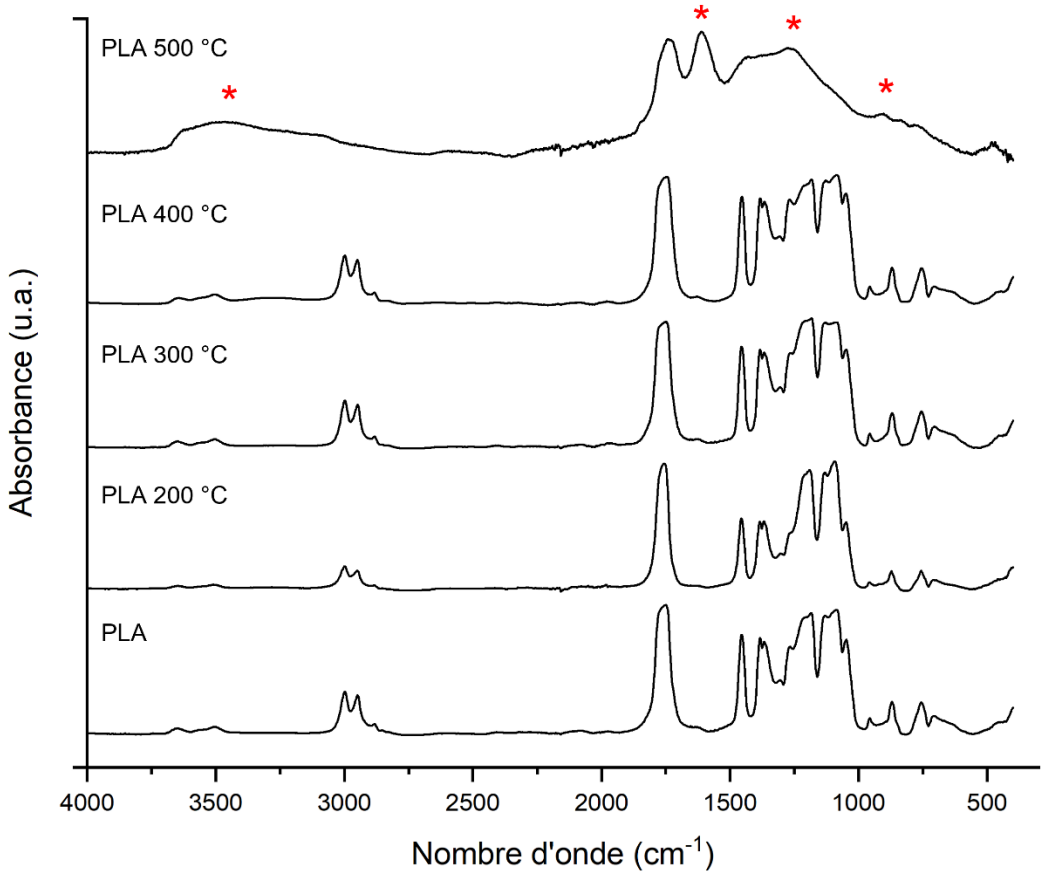

Figure 3.32 Dégradation contrôlée à l'étuve d'un échantillon de PLA soumis à différentes températures pour une période de deux minutes

À l'opposé, comme il est possible de le voir sur la Figure 3.33, une exposition d'une durée de deux minutes à une température de 500 °C n'a pas été suffisante pour amorcer la dégradation de l'échantillon de PETG. En effet, aucune variation dans les spectres infrarouges n'est observable.

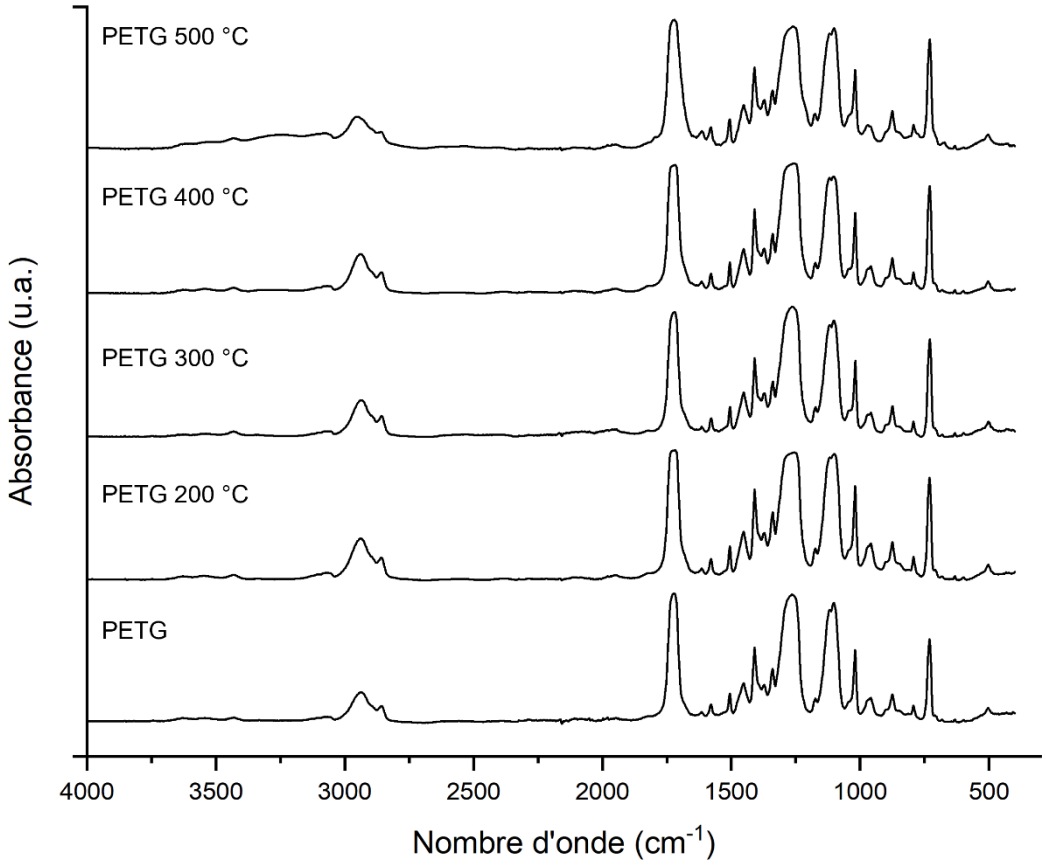

Figure 3.33 Dégradation contrôlée à l'étuve d'un échantillon de PETG soumis à différentes températures pour une période de deux minutes

Le PLA et le PETG sont tous deux des polyesters thermoplastiques, mais ayant une structure chimique bien différente. En effet, contrairement au PLA, la chaîne polymère du PETG est constituée de plusieurs structures cycliques et aromatiques qui augmentent considérablement sa stabilité thermique (Stuart, 2002). Ces différences

structurelles permettent d'expliquer le fait que de la dégradation thermique est observée pour le PLA à 500 °C, mais pas pour le PETG.

En somme, en fonction de leur structure chimique, ce ne sont pas tous les types de polymère qui présenteront de la dégradation thermique observable à l'infrarouge après une exposition prolongée à une température élevée (500 °C). Considérant cela et le fait que les armes à feu imprimée en 3D explosent lors de leur décharge, ce qui fait en sorte que le polymère n'est soumis que partiellement aux fortes températures et pressions générées lors de la décharge, il est possible que les fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux ne présentent pas (ou peu) de signe de dégradation thermique.

3.5.3 Dégradation des filaments de polymère durant l'impression 3D

Une analyse spectrale des échantillons de polymère « après impression » a été effectuée afin de déterminer si l'impression 3D engendre de la dégradation thermique visible par spectroscopie infrarouge et Raman. Cette étape est importante pour l'analyse éventuelle des fragments de polymère provenant des tirs expérimentaux, car si de la dégradation est observée sur ces fragments, il faut pouvoir exclure qu'elle provienne de l'impression 3D elle-même. Cela permet de confirmer que la dégradation thermique est engendrée lors de la décharge de l'arme à feu et non de l'impression 3D.

L'analyse des spectres infrarouges révèle que certains échantillons particuliers de polymère « après impression », indépendamment du type de polymère, présentent une variation par rapport aux échantillons « avant impression ». Par exemple, comme il est possible de le constater sur la Figure 3.34, le spectre de l'échantillon 25b_PETG noir + fibre carbone_3D Printing Canada « après impression » comporte plusieurs bandes additionnelles de faible intensité (voir astérisques rouges sur la Figure 3.34), surtout dans la région des pigments (3600 cm^{-1} à 3000 cm^{-1} et 1600 cm^{-1} à 1300 cm^{-1}) (Falardeau *et al.*, 2019; Wiesinger *et al.*, 2018) et des empreintes digitales (1500 cm^{-1} à 500 cm^{-1}) (Millipore Sigma, 2022; Stuart, 2021; Stuart, 2002).

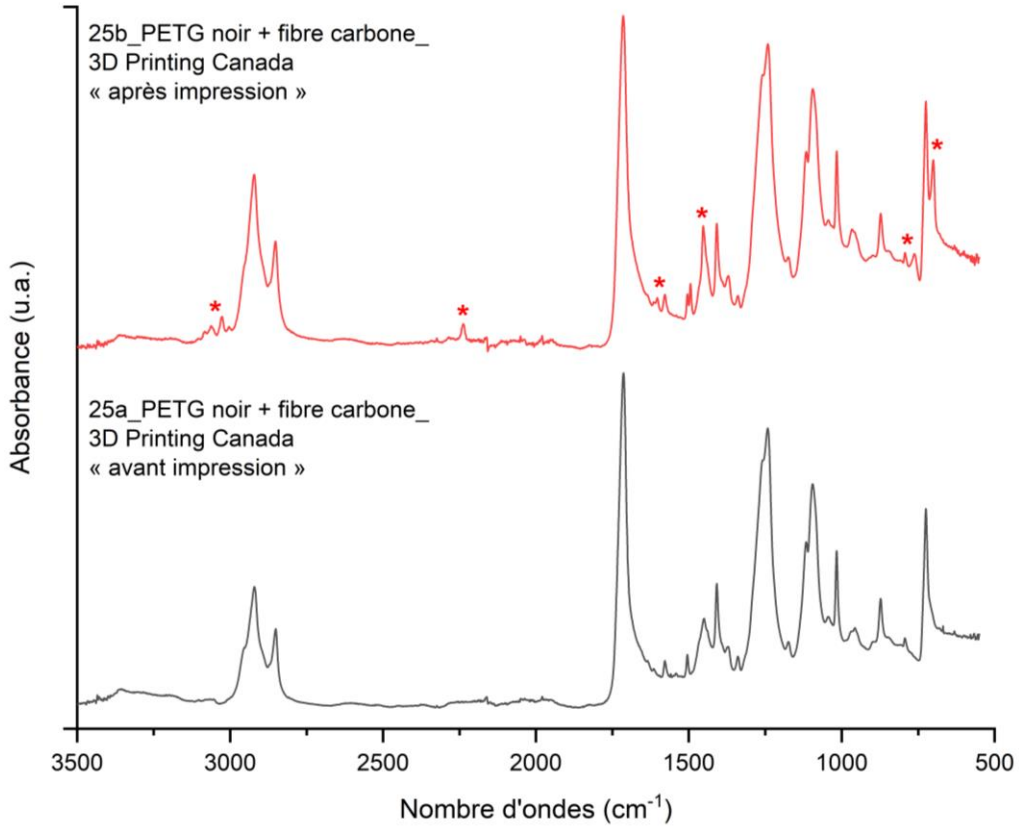

Figure 3.34 Comparaison des spectres infrarouges d'un échantillon de PETG « avant impression » (25a_PETG noir + fibre carbone_3D Printing Canada) et « après impression » (25b_PETG noir + fibre carbone_3D Printing Canada)

Pour chaque type, marque et modèle de filament de polymère, une température d'extrusion recommandée est fournie par le fabricant. Généralement, cette température est supérieure à la température de transition vitreuse du polymère, mais inférieure à sa température de fusion, afin que le polymère soit suffisamment visqueux et déformable pour passer par la buse d'extrusion de l'imprimante et être déposé sur le plateau d'impression, mais tout en gardant sa forme. Si la température d'impression recommandée est respectée, le procédé d'impression en lui-même n'engendre pas de dégradation thermique au polymère, puisqu'il s'agit uniquement d'un changement de phase. En fonction des informations fournies avec les échantillons de la collection, les températures d'extrusion recommandées ont été respectées. Les variations observées

sur les spectres «avant impression» et «après impression» des échantillons de polymères ne proviennent donc pas, en théorie, d'une température d'extrusion trop élevée. En revanche, il est possible de croire qu'elles proviennent plutôt d'une contamination avec un autre filament de polymère utilisé juste avant dans la même buse d'impression. En effet, si la buse n'est pas nettoyée après chaque impression (ce qui n'est généralement pas fait), des résidus du filament de polymère précédent (en faible quantité) pourraient être mélangés avec le filament de polymère suivant. Cependant, cet effet aurait lieu uniquement sur une courte période, soit le temps que la buse soit purgée des résidus du polymère précédant. Il est à noter que ces variations ont été observées en spectroscopie infrarouge sur quelques échantillons seulement et que la grande majorité des échantillons ne présentent pas de variation « après impression » par rapport à « avant impression ». De plus, aucune variation n'a été observée sur les spectres Raman des échantillons de polymère.

3.5.4 Analyse spectrale des fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux

Pour chacun des canons imprimés en 3D, les fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux ont été analysés par spectroscopie infrarouge et Raman, afin de déterminer s'ils ont subi de la dégradation thermique durant la décharge de l'arme à feu. La même méthode d'analyse que les échantillons de polymère de la collection a été utilisée.

À la suite de l'analyse des spectres infrarouges, il en ressort que seulement certains fragments présentent des signes de dégradation. De plus, pour un même fragment, la dégradation n'est pas homogène, c'est-à-dire qu'elle n'a pas été observée sur tous les réplicas d'un même échantillon. En effet, sur les 16 fragments analysés, seulement quatre présentaient des signes de dégradation sur un ou plusieurs réplicas. Une explication potentielle à cette variation dans l'observation de la dégradation est la localisation des mesures (réplicas). Puisque ces dernières ont été faites de façon

aléatoire sur les fragments, il est possible qu'aucune région dégradée n'ait été ciblée lors de la prise des mesures. La Figure 3.35 présente les spectres infrarouges de l'échantillon de 27a_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca utilisé pour l'impression 3D d'un des canons, ainsi que de trois fragments trouvés au sol à la suite de sa décharge, soit les fragments 27c1_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca, 27c2_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca et 27c3_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca. Comme il est possible de le constater, un seul des trois fragments présente des signes de dégradation observables sur son spectre infrarouge, soit le fragment 27c1_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca (voir astérisques rouges sur la Figure 3.35). Toutefois, il ne s'agit pas de variations aussi importantes que celles observées lors de la dégradation contrôlée à l'étuve des échantillons de polymère. En effet, dans le cas des fragments de polymère, les variations n'impliquent pas l'apparition et/ou la disparition de bandes importantes associées à la composition chimique du polymère, mais plutôt uniquement l'apparition d'épaulement, ainsi qu'un élargissement ou une variation de l'intensité absolue de certaines bandes. Il n'est pas exclu que ces variations soient dues à une contamination de surface du fragment ou proviennent de produits de combustion. Pour les autres fragments présentant eux aussi de la dégradation, mais provenant des autres canons, le même genre de résultats a été observé.

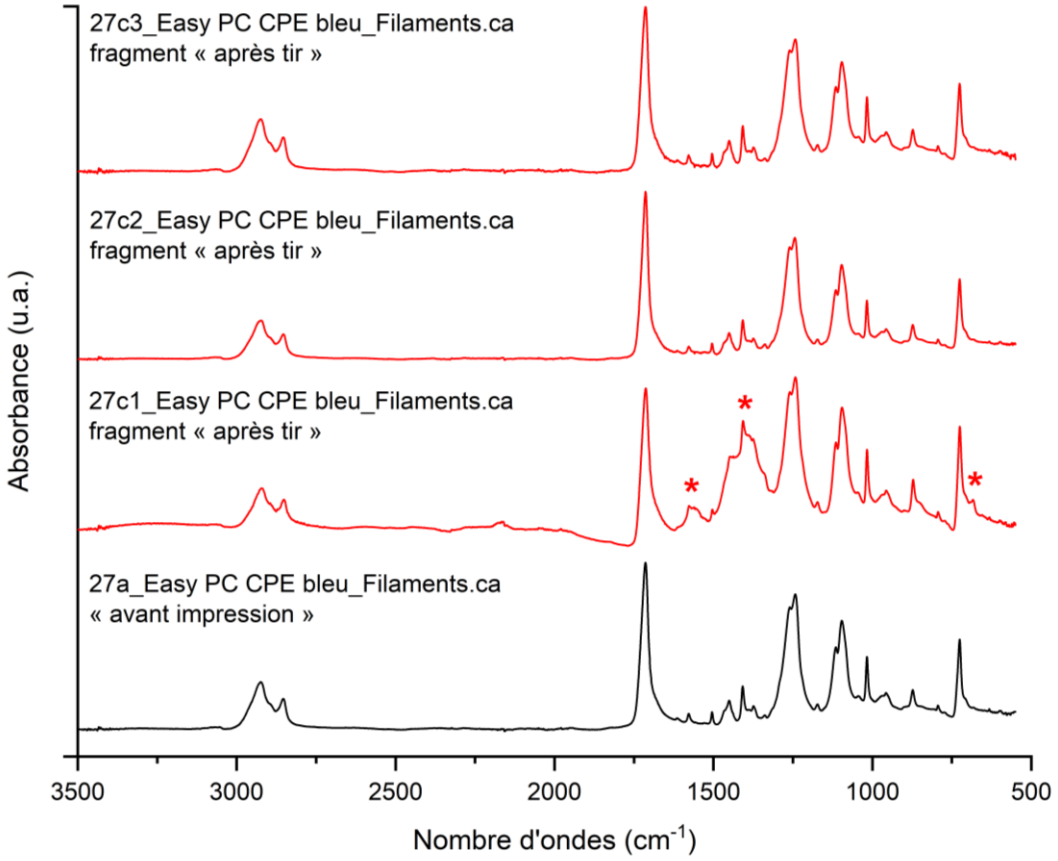

Figure 3.35 Spectres infrarouges de l'échantillon de polymère 27a_Easy PC CPE bleu_Filaments.ca utilisé pour l'impression 3D d'un canon, ainsi que de trois fragments de ce canon trouvés au sol à la suite de la décharge (27c1, 27c2 et 27c3)

À contrario, aucun signe de dégradation n'a été observé sur les spectres Raman de ces mêmes fragments de polymère. La spectroscopie Raman semble donc moins sensible aux facteurs ayant influencé les spectres infrarouges, comme pour la comparaison entre les échantillons « avant impression » et les échantillons « après impression ». Toutefois, comme il est possible d'observer à la Figure 3.36, une superposition parfaite des spectres Raman n'est pas obtenue pour les fragments générés lors des tirs, en raison d'une forte variation dans la ligne de base (même avec correction de la ligne de base). Cette variation dans la ligne de base est sans doute attribuable à la topologie de surface des fragments de polymère qui est très irrégulière et qui comporte des aspérités.

D'ailleurs, ce phénomène n'avait pas été observé avec les échantillons de polymère de la collection qui ont une surface beaucoup plus lisse et homogène que les fragments de polymère.

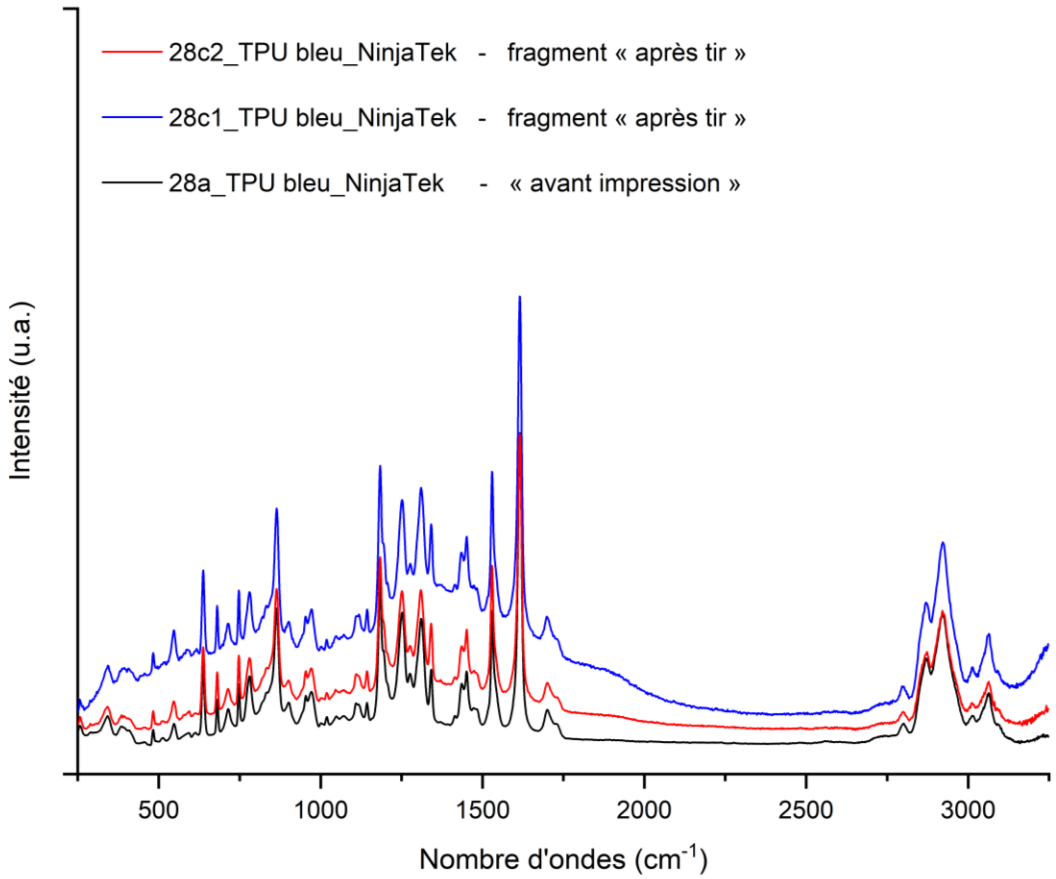

Figure 3.36 Spectres Raman de l'échantillon de polymère 28a_TPU bleu_NinjaTek utilisé pour l'impression 3D d'un canon, ainsi que de deux fragments de ce canon trouvés au sol à la suite de la décharge (28c1 et 28c2)

Ces résultats concordent avec l'hypothèse posée précédemment, c'est-à-dire que le polymère n'est que partiellement exposé aux fortes températures et pressions générées lors de la décharge (en raison de l'explosion des canons), ce qui fait en sorte que la dégradation thermique apparait de façon très localisée sur les fragments de polymère. Les fragments les plus susceptibles d'avoir subi de la dégradation thermique

proviennent de la chambre à cartouche, car ce sont ceux ayant été le plus en contact avec ces contraintes. De plus, il est possible que le très court laps de temps auquel le polymère est soumis aux fortes températures et pressions générées lors de la décharge ne soit pas suffisant pour engendrer de la dégradation thermique visible par spectroscopie infrarouge ou Raman. En effet, lors de la combustion de la poudre à la suite de la décharge (pour un calibre .22 LR), la pression des gaz atteint environ 165-172 MPa et la température grimpe de 150 °C à un peu plus de 3000 °C en une fraction de seconde (~ 0,003 s). Cependant, la pression et la température diminuent très rapidement dès la sortie du projectile du canon. L'arme à feu ne subit donc ces contraintes à leur sommet qu'une fraction de seconde (American National Standards Institute, 2015; Kneubuehl & Glardon, 2014; Rinker, 2003). Le fait que les canons explosent lors des tirs, avant même la sortie du projectile, et que les gaz chauds sont dispersés dans l'environnement par les ruptures du canon diminue probablement considérablement la température et la pression générée lors des tirs ainsi que la durée de l'exposition du polymère à ces contraintes, ce qui expliquerait que très peu de variations spectrales soient observées sur les fragments de polymère générés lors des tirs. Évidemment, ce raisonnement ne s'applique pas si l'arme à feu imprimée en 3D n'explose pas lors de la décharge. Dans une telle situation, le polymère est pleinement soumis à ces contraintes, bien qu'elles ne durent qu'une fraction de seconde, ce qui devrait normalement engendrer la dégradation thermique du polymère. De plus, le calibre de l'arme à feu doit lui aussi exercer une influence sur la dégradation thermique des polymères. Dans ce projet, le calibre .22 LR avait été choisi, entre autres, parce qu'il n'est pas très puissant, augmentant ainsi les chances que les canons n'explosent pas lors des tirs. À cet égard, il serait intéressant de déterminer si un tir effectué avec un calibre plus puissant engendrerait la dégradation thermique des polymères, malgré le fait que l'arme à feu explose lors de la décharge (p. ex. le calibre .380 Auto utilisé dans les études effectuées avec le pistolet Liberator).

Pour finir, l'avantage principal d'observer de la dégradation thermique de façon très localisée et uniquement sur certains fragments de polymère générés lors de la décharge des armes à feu 3D est que l'amplitude des différences spectrales attendues sur des traces est réduite de façon significative. Il est donc possible de s'attendre à avoir des spectres relativement similaires de la bobine de filament de polymère jusqu'aux fragments de polymère « après tir ».

3.6 Projection de spécimens dans les PCA d'origines effectuées avec les spectres des échantillons de polymère de la base de données spectrales

Cette dernière section a pour objectif de mettre en pratique la base de données spectrales des échantillons de polymère afin de déterminer si elle permet d'identifier le type de polymère d'un échantillon inconnu en le projetant le jeu de données des modèles PCA d'origines. Pour ce faire, des tests à l'aveugle ont été effectués, dans un premier temps, avec les fragments de polymère générés lors de tirs expérimentaux (dont la composition est connue), puis dans un deuxième temps avec des spécimens de polymère inconnu provenant de cas réels reçus au LSJML. Les spectres infrarouges et Raman de ces fragments et ces spécimens de polymère ont été projetés dans la PCA d'origine correspondante, en appliquant les mêmes prétraitements que ceux utilisés pour les spectres de la base de données de polymères.

3.6.1 Tests à l'aveugle avec les fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux

Le premier test à l'aveugle a été réalisé avec les spectres infrarouges des fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux. Considérant que quatre fragments de polymère ont été identifiés dans la section précédente (section 3.5.4) comme présentant des signes de dégradation thermique (ou de la présence de contaminants de surface et/ou de produits de combustion), un réplica présentant de la dégradation a volontairement été choisi pour effectuer les tests à l'aveugle. Cela permet ainsi

d'évaluer l'impact de ces variations spectrales sur la précision des projections. La Figure 3.37 présente les résultats de la projection des fragments de polymère dans la PCA d'origine réalisée avec les spectres infrarouges des polymères de la base de données. Comme il est possible de le constater, règle générale, les spectres des fragments ont été projetés dans leur groupe de polymère correspondant (bon type de polymère), en plus d'être très près des spectres de référence de l'échantillon de polymère « avant impression ». Cependant, les spectres des quatre fragments présentant de la dégradation, soit les fragments 24c2_ABS gris, 24c3_ABS gris, 25c2_PETG noir et 27c1_PC CPE bleu, n'ont pas parfaitement été projetés. Il est à noter que ces fragments ont été projetés plus ou moins loin de leur groupe respectif en fonction de l'intensité des variations spectrales. Par exemple, le spectre du fragment 24c3_ABS est celui qui présente le moins de variations et il a d'ailleurs été projeté très près de son groupe correspondant. À contrario, le spectre du fragment 27c1_PC CPE est celui qui présente la plus grande variation (épaulement, élargissement et augmentation d'intensité absolue de certaines bandes) et il a donc été projeté beaucoup plus loin de son groupe de polymère respectif.

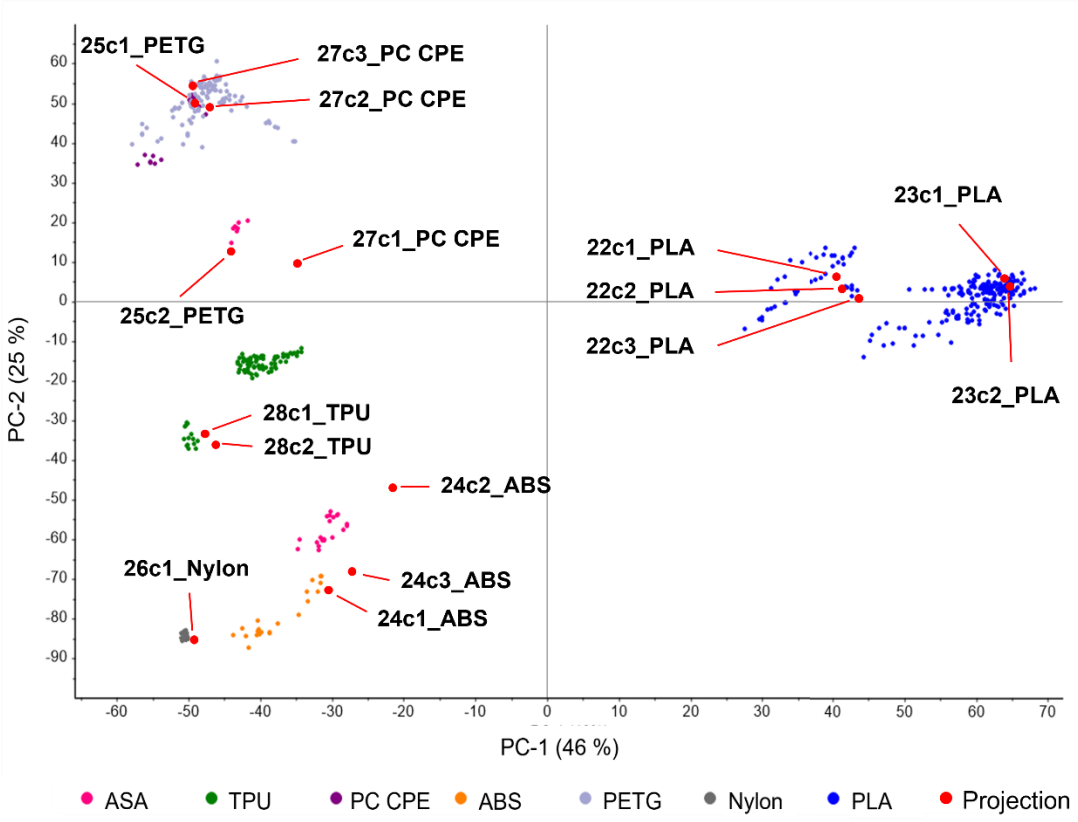

Figure 3.37 Projection des fragments de polymère récupérés à la suite des tirs expérimentaux, dans la PCA d'origine des spectres infrarouges des échantillons de polymère de la base de données

Pour le test à l'aveugle effectué avec les spectres Raman des fragments de polymère (voir Figure 3.38), il en ressort qu'ils ont pour la plupart été projetés dans leur groupe de polymère respectif, en plus d'être très près des spectres de référence de l'échantillon de polymère « avant impression ». Seuls les fragments de polymère 24c3_ABS, 27c3_PC CPE, 28c1_TPU et 28c2_TPU n'ont pas parfaitement été projetés dans la PCA d'origine. Cependant, comme il a été vu dans la section 3.5.4, les spectres Raman ne présentaient pas de signe de dégradation. L'analyse visuelle des spectres Raman des échantillons n'ayant pas été projetés au bon endroit dans la PCA d'origine permet de confirmer que cet écart dans la projection provient en fait de la forte variation au niveau de la ligne de base et de l'intensité absolue des bandes caractéristiques. Les

prétraitements n'ont donc pas été suffisants pour corriger dans tous les cas les erreurs systématiques telles que les variations au niveau de la ligne de base provenant de la topographie de surface irrégulière des fragments de polymère « après tir ». D'un point de vue qualitatif, les mêmes données ont donc été obtenues, c'est-à-dire que toutes les bandes caractéristiques sont présentes sur les spectres et selon la même intensité relative. C'est du point de vue quantitatif que les résultats diffèrent légèrement (variation de l'intensité absolue et dans la ligne de base), ce qui est suffisant pour engendrer certains écarts dans la projection.

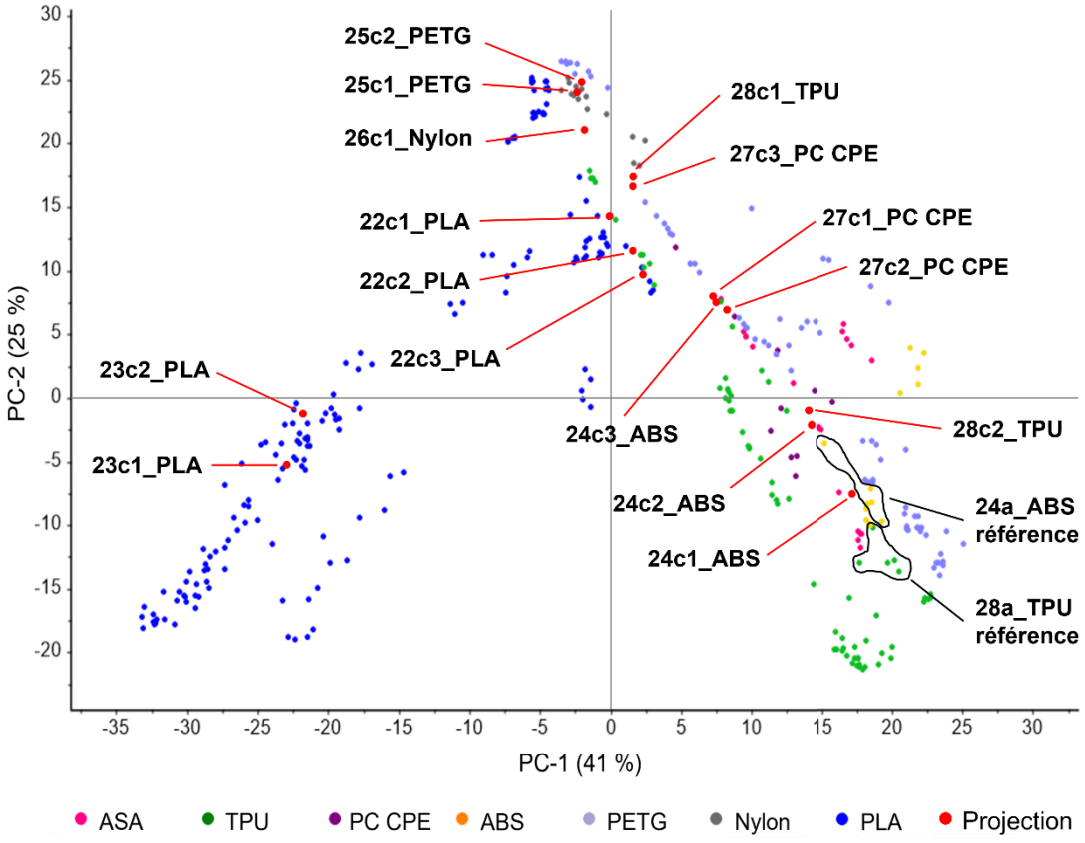

Figure 3.38 Projection des fragments de polymère récupérés à la suite des tirs expérimentaux, dans la PCA d'origine des spectres Raman des échantillons de polymère de la base de données

3.6.2 Test à l'aveugle avec des spécimens de polymère inconnu provenant de cas réels

Depuis le début de l'an 2022, plusieurs demandes d'expertises concernant des armes à feu imprimées en 3D ont été reçues au LSJML, ce qui représente une occasion en or de mettre en pratique la méthodologie et la base de données développée dans ce projet. Pour ce faire, des prélèvements ont été effectués sur certaines de ces armes afin de procéder à l'analyse du polymère, soit trois armes à feu hybrides imprimées en 3D (une carabine FGC-9 et deux carabines de type AR), une arme à feu complètement imprimée en 3D (revolver de type Maverick) ainsi qu'un chargeur imprimé en 3D. La description des différents prélèvements effectués sur ces armes est présentée dans le

Tableau 3.6. Il est à noter que puisqu'il ne s'agit pas de fragments de polymère générés lors de la décharge d'une arme à feu, mais bien de prélèvements effectués sur différentes parties extérieures d'armes à feu ou d'accessoires imprimés en 3D, les spécimens en question n'ont donc en théorie pas subi de dégradation thermique.

Tableau 3.6 Description des prélèvements effectués sur les armes à feu et les accessoires imprimés en 3D reçus au LSJML

Numéro de spécimen	Description	Emplacement du prélèvement	Couleur du polymère
76b	Chargeur	Boitier du chargeur	Noir
77b1	Carabine FGC-9	Levier d'armement	Rouge
77b2	Carabine FGC-9	Carcasse	Noir
77b3	Carabine FGC-9	Crosse	Transparent
78b	Revolver Maverick	Carcasse	Rouge
80b	Carabine type AR #1	Carcasse inférieure	Transparent
81b	Carabine type AR #2	Carcasse inférieure	Noir

Les tests à l'aveugle effectués autant avec les spectres infrarouges (voir Figure 3.39) que les spectres Raman (voir Figure 3.40) de ces spécimens suggèrent que leur composition est le PLA (tous les spectres ont été projetés à proximité d'échantillons de référence de type PLA). L'analyse visuelle et la comparaison des spectres des spécimens inconnus avec les spectres de références de la base de données permettent d'arriver aux mêmes conclusions.

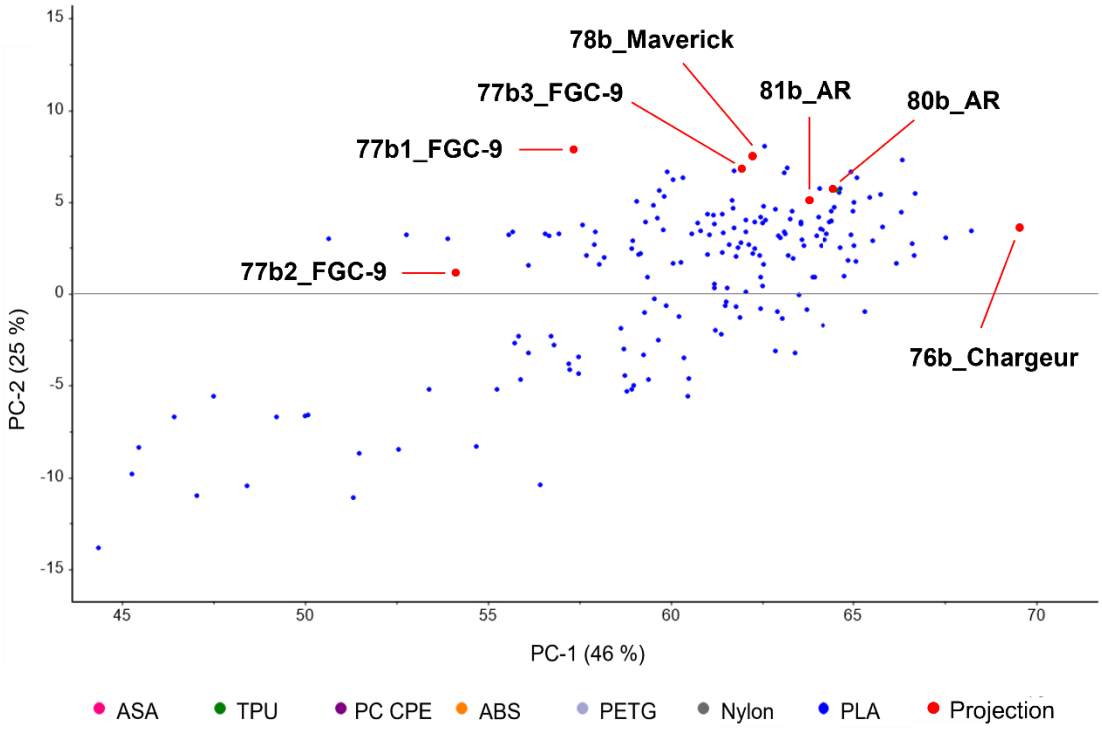

Figure 3.39 Projection des spécimens provenant de cas réels, dans la PCA d'origine des spectres infrarouges des échantillons de la base de données (vue agrandie sur un groupe de PLA)

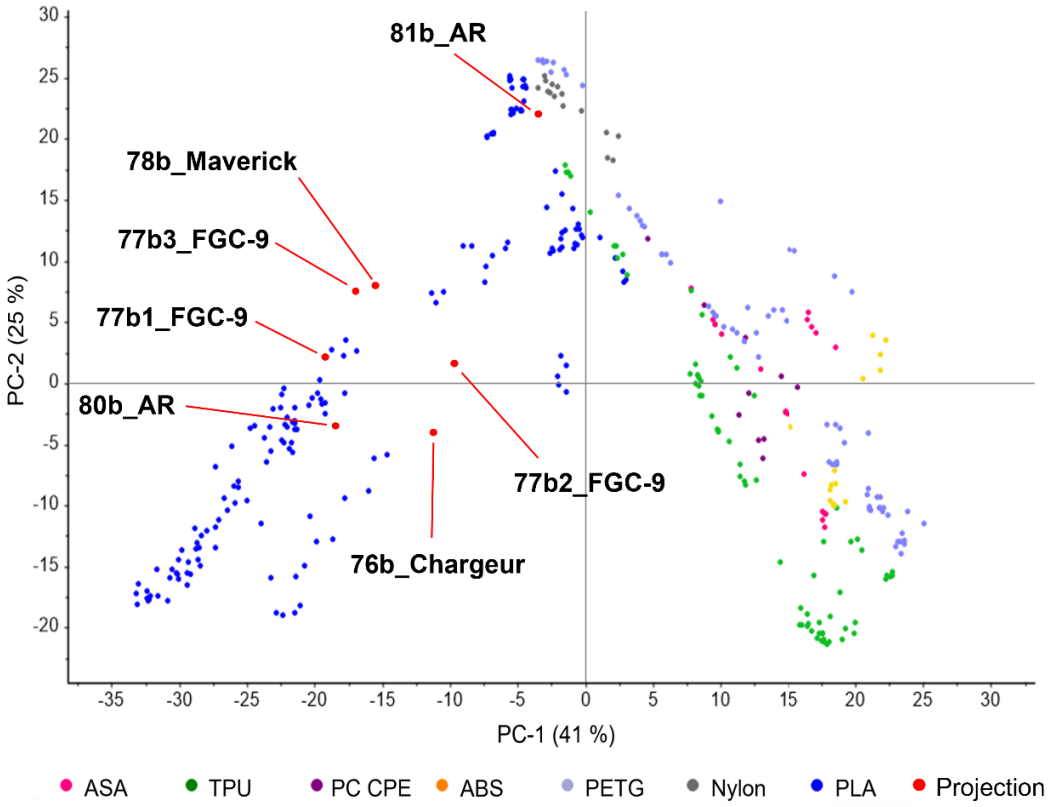

Figure 3.40 Projection des spécimens provenant de cas réels, dans la PCA d'origine des spectres Raman des échantillons de la base de données

En somme, ces résultats démontrent qu'il est possible d'identifier la nature d'un fragment de polymère généré lors de la décharge d'une arme à feu imprimée et 3D ainsi que la nature d'un spécimen indiciaire inconnu, en utilisant conjointement la base de données spectrales et l'analyse en composantes principales. Toutefois, autant pour la spectroscopie infrarouge que Raman, il a été vu que les variations observées dans les spectres exercent une influence sur les résultats obtenus. Cela rappelle l'importance d'analyser plusieurs fragments ou spécimens (lorsque c'est possible), mais surtout de faire plusieurs mesures (réplicas) afin de pouvoir prendre en compte l'amplitude des variations spectrales lors du processus de comparaison ou d'identification d'un spécimen indiciaire.

Cette méthode puissante, mais aussi relativement simple et rapide, peut être utilisée dans plusieurs situations, autant pour analyser des traces et des spécimens de polymère que des armes à feu et des accessoires imprimés en 3D. En effet, en plus de permettre d'identifier la nature chimique des traces et des fragments de polymère trouvés sur une scène de crime impliquant la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D, elle peut permettre de les relier à d'autres fragments de polymère trouvés par exemple sur les vêtements d'un suspect, à une bobine de filament de polymère ou ultimement, à l'arme à feu ayant tirée (si cette dernière n'a pas explosé lors du tir). De plus, elle peut être utilisée dans une optique de renseignement criminalistique pour relier différentes scènes entre elles par les traces de polymère ou encore relier plusieurs armes à feu ou des accessoires imprimés en 3D entre eux par la signature chimique du polymère.

CONCLUSION

Avec l'évolution constante de la technologie et l'effort soutenu des criminels pour mettre au point de nouvelles méthodes afin de déjouer la justice (Day & Speers, 2020; Jenzen-Jones, 2015), les policiers et les scientifiques doivent constamment être à l'affût de ces nouveaux développements et être à jour dans leur méthode d'investigation et d'analyse scientifique s'ils veulent être en mesure de rivaliser avec les criminels. La lutte contre la violence faite avec des armes à feu n'échappe pas à ce phénomène, les armes à feu imprimées en 3D en sont un bon exemple. En effet, les armes à feu imprimées en 3D causent un problème considérable au niveau des enquêtes criminelles, car en plus d'être des « armes fantômes », elles ne produisent pas toutes les traces balistiques conventionnelles normalement utilisées pour identifier l'arme à feu ayant tiré. En revanche, ces armes produisent d'autres types de traces qui leur sont propres, telles que les traces chimiques provenant du polymère utilisé pour imprimer l'arme en question. La compréhension de ces armes et des traces qu'elles génèrent sont primordiales afin d'être en mesure de savoir comment exploiter au maximum le potentiel d'informations qu'elles peuvent fournir. Ce projet de recherche se concentre donc sur l'analyse chimique et l'analyse de la dégradation des polymères utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu. Pour ce faire, le projet est divisé en quatre objectifs.

Le premier objectif de ce projet était de mener une étude de population auprès des compagnies d'impression 3D et des particuliers pratiquant l'impression 3D à la maison. Cela a permis de brosser le portrait de l'utilisation des filaments de polymère en vente sur le marché, en déterminant quels types, marques et couleurs de polymère sont les plus utilisés. En fonction des résultats obtenus, les types de polymère les plus susceptibles d'être utilisés pour l'impression 3D d'armes à feu ou de pièces et

accessoires d'armes à feu imprimés sont le PLA, le TPU, le PETG et l'ABS. Cette étape a aussi permis de récolter les échantillons de filament de polymère (avant et après impression) nécessaires à la conception de la base de données de polymères.

Le deuxième objectif de ce projet était de concevoir une base de données spectrales de la composition chimique des filaments de polymère recueillis lors de l'étude de population par analyse spectrale (spectroscopie infrarouge et Raman). L'analyse visuelle et l'interprétation des spectres de la base de données ont permis de déterminer qu'il est possible de différencier les différents types de polymère, autant par spectroscopie infrarouge que Raman. Les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales corroborent parfaitement les observations faites lors de l'analyse visuelle des spectres, soit que les spectres infrarouges permettent une très bonne distinction des différents types de polymère de la collection ainsi que de leur sous-classe chimique, tandis que les spectres Raman sont très puissants pour identifier les différents pigments, bien qu'ils permettent quand même de différencier les différents types de polymère. De plus, un très bon pouvoir discriminant a été obtenu avec ces méthodes, soit 86,72 % pour les spectres infrarouges et 99,20 % pour les spectres Raman. Considérant ces résultats, la spectroscopie Raman devrait suffire à elle seule lors d'une comparaison de deux spécimens indiciaires ou pour une analyse visant à caractériser ou identifier un échantillon en utilisant la base de données. La spectroscopie infrarouge pourrait donc être utilisée en supplément uniquement au besoin.

Le troisième objectif était de réaliser des tirs expérimentaux avec des armes à feu imprimées en 3D afin de reproduire une scène de crime impliquant ce type d'arme à feu et ainsi générer des traces et des résidus de polymère. Les tirs expérimentaux ont permis de déterminer que les armes à feu imprimées en 3D laissent des traces chimiques et balistiques très caractéristiques qui sont des éléments à chercher lors de l'examen d'une scène de crime et à considérer lors de l'analyse de pièces provenant d'une scène,

pouvant indiquer l'utilisation d'une telle arme. En effet, lors de la décharge des armes à feu hybrides de ce projet, les canons ont tous explosé et généré plusieurs fragments de polymère qui ont été propulsés dans l'environnement, qu'il est possible de trouver à proximité et aux alentours de l'arme à feu en question. Certains de ces fragments peuvent être assemblés physiquement, ce qui peut permettre, par exemple, de placer un suspect sur les lieux de la décharge en reliant des fragments de polymère trouvés sur ce dernier avec des fragments de polymère trouvés sur les lieux de l'événement. Les éléments de munitions peuvent eux aussi présenter des traces chimiques caractéristiques d'un tir avec une arme à feu imprimée en 3D, soit des traces de transfert de polymère sur les projectiles et les douilles.

Finalement, le quatrième objectif de ce projet était d'étudier la dégradation que les polymères peuvent subir lorsqu'ils sont soumis aux fortes températures et pressions engendrées par un tir d'arme à feu afin de déterminer si ces effets peuvent exercer une influence sur l'interprétation des résultats et sur la possibilité d'identifier ou de relier des échantillons de polymère inconnu trouvés sur une scène de crime. L'analyse des fragments de polymère générés lors des tirs expérimentaux a permis d'établir que la dégradation thermique apparait de façon très localisée et que seulement certains fragments en présentent des signes visibles avec la méthode utilisée dans ce projet. En effet, pour les spectres infrarouges, on observe uniquement l'apparition d'épaulement ou un élargissement et une variation de l'intensité absolue de certaines bandes caractéristiques. Pour les spectres Raman, aucun signe de dégradation n'a été observé. Cependant, de fortes variations dans la ligne de base ont été observées sur certains spectres, probablement attribuables à la topologie de surface très irrégulière des fragments de polymère. La dégradation des polymères n'est donc pas un obstacle dans l'interprétation des résultats et dans la possibilité d'identifier ou de relier des échantillons inconnus de polymère trouvés sur une scène de crime, tant que l'amplitude des variations spectrales est prise en considération. Finalement, afin de mettre en pratique la base de données spectrales de polymères, des tests à l'aveugle ont été

effectués avec les fragments de polymère générés lors de tirs expérimentaux et avec des spécimens de polymère inconnu provenant de cas réels. Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible d'identifier la nature d'un fragment de polymère généré lors de la décharge d'une arme à feu imprimée et 3D ainsi que la nature d'un spécimen indiciaire inconnu, en utilisant conjointement la base de données spectrales et l'analyse en composantes principales.

En terminant, l'accessibilité de l'impression 3D au grand public a été une occasion en or pour les personnes voulant fabriquer des armes à feu artisanales, car cette technologie réduit considérablement les obstacles auxquels ils peuvent être confrontés lorsqu'il s'agit de fabriquer des armes à feu fonctionnelles à partir de pièces en métal. En effet, le coût, le temps, le niveau de compétence et les exigences en matière d'ajustement manuel sont réduits. La fabrication d'armes à feu viables devient donc accessible à la personne « moyenne », en particulier lorsqu'elle a accès aux dépôts de données, aux plans et aux connaissances partagées disponibles sur Internet. Cependant, la qualité et la viabilité des armes à feu imprimées en 3D dépendent de plusieurs facteurs, tels que le type d'imprimante et le logiciel d'impression utilisés, la calibration de l'imprimante, le matériau utilisé, les compétences de la personne qui l'imprime ainsi que de la finition et de l'assemblage des différentes parties de l'arme (Jenzen-Jones, 2015; Walther, 2015). Il est important de prendre en considération que les armes à feu imprimées en 3D ne produiront pas le même type et la même quantité de traces chimiques et balistiques en fonction de leur constitution (complètement ou partiellement imprimée en 3D) et de si elles explosent (ou non) lors de leur décharge. Cependant, bien que ce projet se soit concentré sur les armes à feu hybrides imprimées en 3D et que les canons de ces dernières ont explosé lors des tirs, la méthodologie relativement simple et rapide, mais très efficace, développée dans ce projet peut s'appliquer à toutes les catégories d'arme à feu imprimées en 3D (même si elles n'explosent pas lors des tirs) ainsi qu'aux pièces et aux accessoires d'armes à feu imprimés en 3D. En effet, elle peut être utilisée autant pour identifier la nature chimique

des traces et des fragments de polymère trouvés sur une scène de crime impliquant la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D, que pour relier ces derniers à d'autres fragments de polymère trouvés par exemple sur les vêtements d'un suspect, à une bobine de filament de polymère ou ultimement, à l'arme à feu ayant tiré. De plus, elle peut être utilisée dans une optique de renseignement criminalistique pour relier différentes scènes entre elles par les traces de polymère ou encore relier plusieurs armes à feu ou des accessoires imprimés en 3D entre eux par la signature chimique du polymère utilisé. Ce projet a donc permis d'élargir les connaissances sur ce nouveau type de traces chimiques auxquels les forces de l'ordre et les scientifiques sont confrontés et ainsi mettre de l'avant leur potentiel dans un contexte judiciaire. Il est maintenant connu qu'il est possible d'identifier la nature d'un fragment de polymère généré lors de la décharge d'une arme à feu imprimée en 3D ainsi que la nature d'un spécimen indiciaire inconnu en utilisant conjointement l'analyse en composantes principales et une base de données spectrales de référence. La base de données spectrales développée dans ce projet (sous forme de librairie dans le logiciel OMNIC) est un outil de référence puissant, éventuellement déployable, pouvant être utilisé par les différents laboratoires afin de les assister dans leurs expertises.

ANNEXE A

LISTE DES ÉCHANTILLONS DE POLYMÈRE DE LA BASE DE DONNÉES

No. Échantillon	**Type de polymère**	**Marque du polymère**	**Couleur du polymère**	**Marque et modèle imprimante**	**Température extrusion (± 3°C)**
1 a, b	PLA	Filaments.ca	Bleu	Creality CR-10	208
2 a, b	PLA	Filaments.ca	Vert	Creality CR-10	208
3 a, b	PLA	Filaments.ca	Blanc	Creality CR-10	208
4 a, b	PLA	Filaments.ca	Blanc	Creality CR-10	208
5 a, b	PLA	Filaments.ca	Gris	Creality CR-10	208
6 a, b	PLA	Filaments.ca	Orange	Creality CR-10	208
7 a, b	PLA	Filaments.ca	Transparent	Creality CR-10	208
8 a, b	PLA	Filaments.ca	Naturel	Creality CR-10	208
9 a, b	PLA	Filaments.ca	Rouge	Creality CR-10	208
10 a, b	PLA	Filaments.ca	Noir	Creality CR-10	208
11 a, b	PLA	MakerBot	Blanc	MakerBot Replicator +	215
12 a, b	ONYX	Markforged	Noir	Markforged Mark II	276
13 a, b	ONYX	Markforged	Noir	Markforged Mark II	276
14 a, b1, b2	PETG	Filaments.ca	Gris	Creality CR-10	230, 240
15 a, b	PLA	MakerBot	Rouge	MakerBot Replicator	215
16 a, b	PLA	MakerBot	Bleu	MakerBot Replicator	215
17 a, b	PLA	MakerBot	Vert	MakerBot Replicator	215
18 a, b	PLA	MakerBot	Gris	MakerBot Replicator	215
19 a, b	PLA	MakerBot	Blanc	MakerBot Replicator	215
20 a, b	PLA	MakerBot	Noir	MakerBot Replicator	215

No. Échantillon	Type de polymère	Marque du polymère	Couleur du polymère	Marque et modèle imprimante	Température extrusion (± 3 °C)
21 a, b	PLA	MakerBot	Transparent	MakerBot Replicator	215
22 a, b	PLA	Elixir	Bleu (Aquamarine)	Creality CR-10s Pro	215
23 a, b	PLA	3D Printing Canada - Value PLA	Orange	Creality CR-10s Pro	215
24 a, b	ABS	3D Printing Canada	Gris (Silver)	Creality CR-10s Pro	230
25 a, b	PETG + fibre de carbone	3D Printing Canada	Noir	Creality CR-10s Pro	245
26 a, b	Nylon + fibre de carbone	Filaments.ca	Noir	Creality CR-10s Pro	260
27 a, b	PC CPE	Filaments.ca - Easy PC CPE	Bleu	Creality CR-10s Pro	260
28 a, b	TPU	NinjaTek - Armadillo	Bleu	Creality CR-10s Pro	235
29 a, b	ASA	Filaments.ca	Noir	Creality CR-10s Pro	245
30 a, b	ASA	Stratasys	Bleu	Stratasys F170	265
31 a, b	ASA	Stratasys	Orange	Stratasys F170	265
32 a, b	PETG	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Noir	Creality CR-10 Mini	230
33 a, b	PETG	Filaments.ca - Econofil	Transparent	Creality CR-10 Mini	230
34 a, b	PETG	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Rouge	Creality CR-10 Mini	230
35 a, b	PETG	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Gris	Creality CR-10 Mini	230
36 a, b	PETG	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Vert	Creality CR-10 Mini	230
37 a, b	PC CPE	nGen ColorFabb	Mauve	Creality CR-10 Mini	220
38 a, b	ASA	Apollox FormFutura	Rouge	Creality CR-10 Mini	250
39 a, b	TPU	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Rouge	Creality CR-10 Mini	220
40 a, b	TPU	Filaments3dquebec.ca - Cyclone 2018	Noir	Creality CR-10 Mini	220
41 a, b	TPU	Sainsmart	Orange	Creality CR-10 Mini	220
42 a, b	TPU	Sainsmart	Mauve	Creality CR-10 Mini	220
43 a, b	TPU	NinjaTek - Armadillo	Rouge (Fire)	Creality CR-10 Mini	220
44 a, b	TPU	NinjaTek - Cheetah	Blanc (Snow)	Creality CR-10 Mini	220
45 a, b	TPU	NinjaTek - Cheetah	Orange (Lava)	Creality CR-10 Mini	220
46 a, b	TPU	NinjaTek - Cheetah	Bleu (Saphire)	Creality CR-10 Mini	220
47 a, b	PLA	Spool 3D	Blanc (Glow in the dark Bleu)	Creality Ender 3	210
48 a, b	ABS	3D Hero	Noir	Creality Ender 3	250

No. Échantillon	Type de polymère	Marque du polymère	Couleur du polymère	Marque et modèle imprimante	Température extrusion (± 3 °C)
49 a, b	PETG	Spool 3D	Blanc	Creality Ender 3	240
50 a, b	PETG	Spool 3D	Noir	Creality Ender 3	240
51 a, b	TPU	Spool 3D	Transparent	Creality Ender 3	240
52 a, b	TPU	Spool 3D	Noir	Creality Ender 3	240
53 a, b	TPU	Spool 3D	Rouge	Creality Ender 3	240
54 a, b	PLA	Filaments.ca - EcoTough	Vert	Creality Ender 3 Pro	215
55 a, b	APLA	Filaments.ca - Engineering Pro	Orange	Creality Ender 3 Pro	215
56 a, b	TPU	3D Printing Canada	Transparent	Creality Ender 3 Pro	230
57 a, b	TPU	3D Printing Canada	Rouge	Creality Ender 3 Pro	215
58 a, b	PETG	Filaments.ca - EcoTough	Noir	Creality Ender 3 Pro	215
59 a, b	ABS	Filaments.ca	Jaune	Creality Ender 3 Pro	235
60 a, b	PLA	3D Solutech Filament	Rouge	ADIMLab Gantry-S	205
61 a, b	PLA	NextPage PLA	Blanc	Creality Ender 3 Pro	205
62 a, b	PLA 2.0	Filaments.ca - Ecotough PLA 2.0	Vert	MonoPrice Select Mini v2	230
63 a, b	PLA 2.0	Filaments.ca - Ecotough PLA 2.0	Bleu (turquoise)	MonoPrice Select Mini v2	230
64 a, b	PLA 2.0	Filaments.ca - Ecotough PLA 2.0	Orange	ADIMLab Gantry-S	230
65 a, b	PLA 2.0	Filaments.ca - Ecotough PLA 2.0	Jaune	TronXY X3	230
66 a, b	PLA +	eSun PLA+	Vert	TronXY X3	230
67 a, b	PLA +	eSun PLA+	Noir	ADIMLab Gantry Pro	230
68 a, b	PLA +	AMZ3D	Bleu	ADIMLab Gantry-S	230
69 a, b	PETG	Filaments.ca	Noir	Creality Ender 3 Pro	240
70 a, b	PETG	Cyclone Filament	Vert	Creality Ender 3 Pro	240
71 a, b	PETG	Hatchbox	Orange	ADIMLab Gantry-S	240
72 a, b	PETG	eSun	Noir	ADIMLab Gantry-S	240
73 a, b	PETG	3DSpark Pro Filament	Jaune	TronXY X3	240

RÉFÉRENCES

3d Matter. (2021). FDM 3D printing materials compared. Repéré le 2021-08-12 à https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/

3D Printing Canada. (2022a). Filaments. Repéré le 2022-06-26 à https://3dprintingcanada.com/collections/filaments

3D Printing Canada. (2022b). Orange - 1.75mm Value PLA Filament - 1 kg. Repéréà https://3dprintingcanada.com/products/orange-1-75mm-value-pla-filament-1-kg-2

Adar, F. (2016). Introduction to interpretation of Raman spectra using database searching and functional group detection and identification. *Spectroscopy, 31*(7), 16-23.

AFTE. (2013). *AFTE Glossary* (6e éd.). Association of Firearm & Tool Mark Examiners.

Al-Hakim, A. (2020). CBSA charges man with 23 weapons-related offences following search in Porters Lake, N.S. *Global News.* Repéré le 2021-11-14 à https://globalnews.ca/news/7358526/porters-lake-weapons-charges/

Al Shamsi, M. A. (2019). 3D Printed Firearms Comparison. *AFTE Journal, 51*(4), 242-245.

ALL3DP. (2020a). 3D Printed Skull: 15 Skulls & Skull-Themed Models. Repéré le 2021-08-01 à https://all3dp.com/2/3d-printed-skull-3d-models/

ALL3DP. (2020b). How Much Does a 3D Printer Cost? Repéré le 2021-08-01 à https://all3dp.com/2/how-much-does-a-3d-printer-cost/

ALL3DP. (2021). 3D Printed Guns in 2021: The Current Situation. Repéré le 2021-12-04 à https://all3dp.com/1/3d-printed-gun-firearm-weapon-parts/

American National Standards Institute. (2015). *American National Standard Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Rimfire Sporting Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers*. (ANSI/SAAMI Z299.1 - 2015). Repéré à https://saami.org/wp-content/uploads/2018/01/Z299-1_ANSI-SAAMI_Rimfire.pdf.

Beau, J. (2019). Interview with the ICSR: a 3D printed gun was not used in the Halle terror attack. *3D Printing Industry.* Repéré le 2021-11-12 à https://3dprintingindustry.com/news/interview-with-the-icsr-a-3d-printed-gun-was-not-used-in-the-halle-terror-attack-163643/

Benson, T. (2014). Japanese man who 3D printed guns sentenced to two years in prison. *United Press International.* Repéré le 2021-11-13 à https://www.upi.com/Science_News/Technology/2014/10/20/Japanese-man-who-3D-printed-guns-sentenced-to-two-years-in-prison/2151413851264/

Berchon, M., & Luyt, B. (2014). *L'impression 3D* (2e éd., p. 3-35, 65-74). Éditions Eyrolles.

Bev Fitchett's Guns. (2021). Pistol Cross Section. Repéré le 2021-07-30 à https://www.bevfitchett.us/sigsauer-p226-armourers/info-dsr.html

Biasotti, A. A., & Murdock, J. (1984). Criteria for identification or State of the Art of Firearm and Toolmark Identification. *AFTE Journal, 16*(4), 16-24.

Bir, C. A., Stewart, S. J., & Wilhelm, M. (2005). Skin penetration assessment of less lethal kinetic energy munitions. *Journal of Forensic Science, 50*(6), 1426-1429.

Black, O. (2019). *Physical and chemical trace evidence from 3d-printed firearms, and use of a quadcopter for targeted sampling of gaseous mercury in the atmosphere* [Thèse de doctorat, University of Mississippi]. Récupéré de https://egrove.olemiss.edu/etd/1739

Black, O., Cody, R., Edwards, D., & Cizdziel, J. V. (2017). Identification of polymers and organic gunshot residue in evidence from 3D-printed firearms using DART-mass spectrometry: A feasibility study. *Forensic Chemistry, 5*, 26-32. https://doi.org/10.1016/j.forc.2017.05.003

Bokobza, L., Zidon, Y., & Tordjman, D. (2014). Class Characteristic Markings on Cartridges Fired From Homemade Submachine Guns. *AFTE Journal, 46*(3), 238-242.

Bonfanti, M. (1999). Exploitation et interprétation des traces présentes sur les projectiles et les douilles. *Canadian Society of Forensic Science Journal, 32*(1), 25-37.

Buzzini, P., & Suzuki, E. (2016). Forensic applications of Raman spectroscopy for the in situ analyses of pigments and dyes in ink and paint evidence. *Journal of Raman Spectroscopy, 47*(1), 16-27.

Carew, R. M., & Errickson, D. (2020). An Overview of 3D Printing in Forensic Science: The Tangible Third ‐ Dimension. *Journal of forensic sciences, 65*(5), 1752-1760.

Carrier, J.-M., & Riva, F. (2014). Examen d'armes et d'éléments de munitions. Dans A. Gallusser (dir.), *Traces d'armes à feu: Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle* (2e éd., p. 253-254, 266-283). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Causin, V. (2015). *Polymers on the crime scene* (p. 68, 121-122, 149). Springer.

Causin, V., Marega, C., Carresi, P., Schiavone, S., & Marigo, A. (2006). A quantitative differentiation method for plastic bags by infrared spectroscopy, thickness measurement and differential scanning calorimetry for tracing the source of illegal drugs. *Forensic Science International, 164*(2-3), 148-154.

Cizdziel, J., & Black, O. (2019). *The Advent of 3d-Printed Firearms and its Implications for Forensic Analysis* (p. 55-74). Nova Science Pub Inc.

Code criminel. (1985). L.R.C., ch. C-46.

colorFabb. (2022). Co-Polyester Filaments. Repéré le 2022-06-27 à https://colorfabb.com/filaments/materials/co-polyester-filaments

Courrier international. (2021). Un atelier d'impression d'armes en 3D démantelé en Espagne. Repéré le 2021-11-12 à https://www.courrierinternational.com/article/calibres-un-atelier-dimpression-darmes-en-3d-demantele-en-espagne

Crow Polymer Database. (2022). Thermal-oxidative degradation of polymers. Repéré le 2022-04-18 à https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Thermal%20Degradation.html

Crowe, C., & Rugh, A. (2017). *The Analysis of Gunshot Residue and Plastic Deposits From 3D Printed Polymer Firearms*. Communication présentée à American Academy of Forensic Sciences Annual Conference, New Orleans, United States of America.

Day, P. J., & Speers, S. J. (2020). The assessment of 3D printer technology for forensic comparative analysis. *Australian Journal of Forensic Sciences, 52*(5), 579-589. https://doi.org/10.1080/00450618.2019.1609088

Dearden, L. (2019). Use of 3D printed guns in German synagogue shooting must act as warning to security services, experts say. *The Independent.* Repéré le 2021-11-12 à https://www.independent.co.uk/news/world/europe/3d-gun-print-germany-synagogue-shooting-stephan-balliet-neo-nazi-a9152746.html

DEFCAD. (2021). DEFCAD - The World's Largest 3D Gun Repository. Repéré le 2021-06-26 à https://defcad.com/

Defense Distributed. (2021). Defense Distributed - Private defense tech development in the public interest. Repéré le 2021-06-26 à https://defdist.org/

Deland, M. (2021). Cinq armes à feu trouvées chez le complotiste fabriquant d'armes. *TVA Nouvelles.* Repéré le 2021-11-26 à https://www.tvanouvelles.ca/2021/11/24/un-homme-suspecte-de-fabriquer-des-armes-arrete-a-gatineau

Di Maio, V. J. (1999). *Gunshot wounds: Practical Aspects of Firearms, Ballistics, and Forensic Techniques* (2e éd., p. 282-289). CRC Press.

Dormer, D. (2020). Alberta man accused of 3D-printing firearm parts facing weapons charges. *CTV News.* Repéré le 2021-11-14 à https://calgary.ctvnews.ca/alberta-man-accused-of-3d-printing-firearm-parts-facing-weapons-charges-1.5091007

Edmondstone, G., Hellman, J., Legate, K., Vardy, G., & Lindsay, E. (2004). An assessment of the evidential value of automotive paint comparisons. *Canadian Society of Forensic Science Journal, 37*(3), 147-153.

Esbensen, K. H., Swarbrick, B., Westad, F., Whitcombe, P., & Anderson, M. J. (2018). *Multivariate Data Analysis: An Introduction to Multivariate Analysis, Process Analytical Technology and Quality by Design* (6e éd., p. 150). CAMO.

Falardeau, M., Moran, V., & Muehlethaler, C. (2019). A random object-oriented population study of household paints measured by infrared spectroscopy. *Forensic Science International, 297*, 72-80.

Ferro. (2020). Benzimidazolone orange (PO64). Repéré le 2022-03-16 à https://www.ferro.com/products/product-category/pigments-and-dispersions/organic-color-pigments/benzimidazolone-organic-pigments/benzimidazolone-orange-po64

Filament2Print. (2021). Filaments. Repéré le 2021-08-04 à https://filament2print.com/fr/179-filaments

Filaments.ca. (2022a). 3D Filaments. Repéré le 2022-01-09 à https://filaments.ca/collections/3d-filaments

Filaments.ca. (2022b). Easy PC CPE Filament - BLUE - 1.75mm - 1 KG. Repéré le 2022-06-27 à https://filaments.ca/products/easy-pc-polycarbonate-filament-blue-1-75mm

Filaments.ca. (2022c). EcoTough™ Low Gloss PETG - Black - 1.75mm - 1 KG. Repéréà https://filaments.ca/collections/all/products/ecotough-low-gloss-petg-black-1-75mm

Filaments.ca. (2022d). EcoTough™ PLA 2.0 - Orange - 1.75mm - 1 KG. Repéré le 2022-03-06 à https://filaments.ca/collections/all/products/ecotough-pla-2-0-orange-1-75mm

Filaments.ca. (2022e). Engineering Pro PLA / APLA+ - Natural - 1.75mm - 1 KG. Repéré le 2022-03-06 à https://filaments.ca/products/engineering-apla-natural-1-75mm

Filaments.ca. (2022f). Polyalchemy Elixir PLA - Aquamarine - 1.75mm. Repéré le 2022-03-26 à https://filaments.ca/products/polyalchemy-elixir-pla-aquamarine-1-75mm

Filimprimante3D. (2021a). L'infill, c'est quoi ? Comment choisir le taux de remplissage ? Repéré le 2021-12-30 à https://www.filimprimante3d.fr/content/70-l-infill-c-est-quoi-comment-choisir-le-taux-de-remplissage

Filimprimante3D. (2021b). PLA - C'est quoi du PLA ? Comment choisir son filament PLA ? Repéréà https://www.filimprimante3d.fr/content/80-le-pla-c-est-quoi-comment-choisir-son-filament-pla#:~:text=Le%20PLA%2C%20ou%20acide%20polylactique,le%20filament%20le%20plus%20utilis%C3%A9

Filimprimante3D. (2021c). Réussir les impressions de filaments flexibles. Repéré le 2021-12-12 à https://www.filimprimante3d.fr/content/64-reussir-les-impressions-de-filaments-flexibles

Formfutura. (2021). ApolloX. Repéré le 2022-03-20 à https://www.formfutura.com/shop/product/apollox-2779#:~:text=ApolloX%20by%20FormFutura%20is%20a,five%20other%20polymers%20and%20modifiers

Formlabs. (2021). Comment choisir le matériau d'impression 3D qui convient ? Repéré le 2021-08-04 à https://formlabs.com/fr/blog/comment-choisir-le-materiau-impression-3D/

Fraser, J. (2010). *Forensic science: A very short introduction* (1ère éd., p. 17-25, 48-50). Oxford University Press.

Gallusser, A. (2014). Armes à feu. Dans A. Gallusser (dir.), *Traces d'armes à feu: Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle* (2e éd., p. 48-52). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Gatalog, T. (2022). The Gatalog's Printable Frames and Receivers. Repéré le 2022-01-14 à https://odysee.com/@TheGatalog-PrintableFramesReceivers:9

Greenberg, A. (2013). Meet The 'Liberator': Test-Firing The World's First Fully 3D-Printed Gun. *Forbes.* Repéré le 2021-11-23 à https://www.forbes.com/sites/andygreenberg/2013/05/05/meet-the-liberator-test-firing-the-worlds-first-fully-3d-printed-gun/?sh=22a7e08d52d7

Gunther, J. D., & Gunther, C. O. (1935). *The Identification of Firearms* (p. 1-16, 29-39, 61-73). John Wiley & Sons.

Haag, M. G., & Haag, L. C. (2011). *Shooting incident reconstruction* (2e éd., p. 13-34). Academic press.

Hays, G., Ivan, T., & Jenzen-Jones, N. R. (2020). *Desktop firearms: Emergent Small Arms Craft Production Technologies*. (Research Report No. 8). Armament Research Services (ARES) Repéré à https://armamentresearch.com/ares-releases-research-report-8-desktop-firearms/.

Hazon, A., Bokobza, L., & Giverts, P. (2021). Forensic Value of Sidewall Marks on Cartridge Cases fired by homemade gun Discharged from Homemade Weapons. *AFTE Journal, 53*(1), 36-42.

Herdener, I., Gallusser, A., Bonfanti, M., & Margot, P. (1997). Nouvelles munitions avec amorce sans métaux lourds: composition et tests chromophoriques pour la révélation des résidus de tir. *Revue Internationale de Criminologie et de Police Technique, 50*, 355-370.

Honsberger, H. (2017). *A preliminary study of the 3D-printed handgun Liberator: ballistics and marks* [Mémoire de maîtrise, École des Sciences Criminelles, Université de Lausanne].

Honsberger, H., Rhumorbarbe, D., Werner, D., Riva, F., Glardon, M., Gallusser, A., & Delémont, O. (2018). How to recognize the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator?: Part 1. Discharge, exterior ballistic and wounding potential. *Forensic Science International, 286*, 245-251. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.026

Honsberger, H., Werner, D., Rhumorbarbe, D., Riva, F., Glardon, M., Gallusser, A., & Delémont, O. (2019). How to recognise the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator? Part 2. Elements of ammunition, marks on the weapons and polymer fragments. *Forensic Science International, 295*, 137-144. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.12.010

Houck, M. M., Crispino, F., & McAdam, T. (2017). *The Science of Crime Scenes* (2e éd., p. 11-18, 217-218). Academic Press.

ISO/ASTM. (2015). *Standard Terminology for Additive manufacturing - General principles - Terminology*. Repéré à https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en

Jenkins, A., & Larsen, R. (2004). Raman and Infrared Spectroscopy for the Examination of Polymer Laminates. *Polymer News, 29*(3), 71-76.

Jenzen-Jones, N. R. (2015). Small arms and additive manufacturing: An assessment of 3D-printed firearms, components, and accessories. Dans King & McDonald (dir.), *Behind the Curve: New Technologies, New Control Challenges* (p. 43-74). Small Arms Survey.

Kapitan, C. (2021). Gang member accused of having 3D-printed semi-automatic weapon. *New Zealand Herald.* Repéré le 2021-11-07 à https://www.nzherald.co.nz/nz/gang-member-accused-of-having-3d-printed-semi-automatic-weapon/D7NOQGYCD2LSVFDYPVFLNELYIA/

Kennedy, E. A., Ng, T. P., McNally, C., Stitzel, J. D., & Duma, S. M. (2006). Risk functions for human and porcine eye rupture based on projectile characteristics of blunt objects. *Stapp car crash journal, 50*, 651.

Kholodovych, V., & Welsh, W. J. (2007). Thermal-Oxidative Stability and Degradation of Polymers. Dans J. E. Mark (dir.), *Physical Properties of Polymers Handbook* (2e éd., p. 927-938). Springer.

Kneubuehl, B. P. (2011). *Wound ballistics: basics and applications* (p. 187-189). Springer Science & Business Media.

Kneubuehl, B. P., & Glardon, M. J. (2014). Balistique forensique. Dans A. Gallusser (dir.), *Traces d'armes à feu: Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle* (2e éd., p. 196-198). Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).

Koltzenburg, S., Maskos, M., & Nuyken, O. (2017). *Polymer chemistry* (p. 418-424). Springer.

Król-Morkisz, K., & Pielichowska, K. (2019). Thermal Decomposition of Polymer Nanocomposites With Functionalized Nanoparticles. Dans K. Pielichowski & T. M. Majka (dir.), *Polymer Composites with Functionalized Nanoparticles: Synthesis, Properties, and Applications* (p. 405-435). Elsevier.

LaRocco, J. (2013). Simulated Testing of a 3D Printed Revolver Cylinder. *University of Canterbury, New Zealand*. https://www.researchgate.net/profile/John-Larocco/publication/275037394_Simulated_Testing_of_a_3D_Printed_Revolver_Cylinder/links/59e740690f7e9b13acaca6f1/Simulated-Testing-of-a-3D-Printed-Revolver-Cylinder.pdf

Les impressions 3D. (2021). Test de l'imprimante 3D Prusa i3. Repéré le 2021-08-04 à https://www.lesimpressions3d.com/test-imprimante-3d-prusa-i3/

Li, S. Y., Turner, J., Golightly, S., Zelbst, P., & Yu, J. (2021). Potential impacts of 3D modeling and 3D printing in firearm toolmark examinations. *Journal of forensic sciences, 66*(6), 2201-2207. https://doi.org/10.1111/1556-4029.14790

Li, Z., Rathore, A. S., Song, C., Wei, S., Wang, Y., & Xu, W. (2018). PrinTracker: Fingerprinting 3D Printers Using Commodity Scanners. *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 1306-1323. https://doi.org/10.1145/3243734.3243735

Loi sur les armes à feu. (1995). L.C., ch. 39.

Markforged. (2021). Nylon. Repéré le 2021-08-04 à https://markforged.com/materials/plastics/nylon

Martel, A. (2014). Un homme arrété pour possession illégale d'armes… imprimées en 3D. *3Dnatives.* Repéré le 2021-11-13 à https://www.3dnatives.com/arrestation-armes-imprimees-3d/#!

Mezger, O., Hess, W., & Hasslacher, F. (1931). *Die Bestimmung des Pistolensystems aus verfeuerten Hülsen und Geschossen, Kaliber 6,35, 7,65 und 9 mm kurz*. Verlag Vogel.

Milkert, H. (2014). A New 3D Printable Gun, The 'Imura Revolver' is Being Designed. *3DPrint.* Repéré le 2021-11-13 à https://3dprint.com/15556/3d-printable-gun-revolver/

Miller, J. N., & Miller, J. C. (2010). *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry* (6e éd., p. 221-228). Pearson Education Limited.

Millipore Sigma. (2022). IR Spectrum Table & Chart. Repéré le 2022-03-6 à https://www.sigmaaldrich.com/CA/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table

Moreau, G. (2021). Statistiques sur les crimes déclarés par la police au Canada, 2020. *Statistique Canada.* Repéré le 2021-11-11 à https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/85-002-x/2021001/article/00013-fra.htm

Muehlethaler, C., Massonnet, G., & Esseiva, P. (2011). The application of chemometrics on Infrared and Raman spectra as a tool for the forensic analysis of paints. *Forensic Science International, 209*(1-3), 173-182.

NinjaTek. (2022). Armadillo 3D Printer filament (75D). Repéré le 2022-03-26 à https://ninjatek.com/shop/armadillo/#tech-specs

Noor, P. (2019). London student convicted for making gun using 3D printer. *The Guardian.* Repéré le 2021-11-12 à https://www.theguardian.com/world/2019/jun/19/london-student-convicted-for-making-gun-using-3d-printer-tendai-muswere

Petraco, N., & Kubic, T. (2003). *Color atlas and manual of microscopy for criminalists, chemists, and conservators* (p. 21-25). CRC press.

Renard, M. (2019). Un étudiant londonien est condamné pour avoir imprimé en 3D des armes à feu. *3Dnatives.* Repéré le 2021-11-12 à https://www.3dnatives.com/arme-impression-3d-240620193/#!

Rinker, R. A. (2003). *Understanding firearm ballistics* (4e éd., p. 53-55). Mulberry House Publishing.

Roux, C., Bull, S., Goulding, J., & Lennard, C. (2000). Tracing the source of illicit drugs through plastic packaging - a database. *Journal of Forensic Science, 45*(1), 99-114.

Sauzier, G., van Bronswijk, W., & Lewis, S. W. (2021). Chemometrics in forensic science: approaches and applications. *Analyst, 146*(8), 2415-2448.

Scherrer, N. C., Stefan, Z., Francoise, D., Annette, F., & Renate, K. (2009). Synthetic organic pigments of the 20th and 21st century relevant to artist's paints: Raman spectra reference collection. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 73*(3), 505-524. https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.11.029

Simplify3D. (2021). Filament Properties Table. Repéré le 2021-08-04 à https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?

Smalldon, K., & Moffat, A. (1973). The calculation of discriminating power for a series of correlated attributes. *Journal of the Forensic Science Society, 13*(4), 291-295.

Society of Dyers and Colourists. (2022). Definitions of a dye and a pigment. Repéré le 2022-04-12 à https://colour-index.com/definitions-of-a-dye-and-a-pigment

Spool3D. (2021). Filament - 1.75mm 3D Printer Filament Material. Repéré le 2021-08-04 à https://spool3d.ca/filament/

Spool3D. (2022). PLA - Glow in the Dark - 1.75mm 3D Printer Filament. Repéré le 2022-03-26 à https://spool3d.ca/pla-glow-in-the-dark-1-75mm-3d-printer-filament/

Stuart, B. (2021). Infrared Spectroscopy. Dans R. Wolstenholme, S. Jickells & S. Forbes (dir.), *Analytical Techniques in Forensic Science* (p. 145-159). John Wiley & Sons.

Stuart, B. H. (2002). *Polymer Analysis* (1ère éd., p. 7-23, 37-45, 191-199). John Wiley & Sons.

Stuart, B. H. (2012). *Forensic Analytical Techniques* (p. 73-85, 91-94). John Wiley & Sons.

Thibault, E. (2019). Une fabrique d'armes à la maison. *Journal de Montréal.* Repéré le 2021-11-14 à https://www.journaldemontreal.com/2019/06/01/une-fabrique-darmes-a-la-maison

Trincat, T., Saner, M., Schaufelbühl, S., Gorka, M., Rhumorbarbe, D., Gallusser, A., . . . Werner, D. (2022). Influence of the printing process on the traces produced by the discharge of 3D-printed Liberators. *Forensic Science International, 331*, 111144. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.111144

Valeur, B. (2019). Pigments et colorants : une distinction plus subtile qu'il n'y paraît. Repéré le 2022-04-13 à https://scilogs.fr/questions-de-couleurs/pigments-et-colorants-une-distinction-plus-subtile-quil-ny-parait/

Varmuza, K., & Filzmoser, P. (2009). *Introduction to Multivariate Statistical Analysis in Chemometrics* (p. 73-78). CRC Press.

Vlasveld, M. (2021). Ottawa 21-year-old among those charged in 3D weapon printing operation near Calabogie. *City News.* Repéré le 2021-11-14 à https://ottawa.citynews.ca/valley-news/ottawa-21-year-old-among-those-charged-in-3d-weapon-printing-operation-near-calabogie-3575263

Walker, R. E. (2012). *Cartridges and firearm identification* (p. 19-25). CRC Press.

Walther, G. (2015). Printing Insecurity? The Security Implications of 3D-Printing of Weapons. *Science and Engineering Ethics, 21*(6), 1435-1445. https://doi.org/10.1007/s11948-014-9617-x

Wiesinger, R., Pagnin, L., Anghelone, M., Moretto, L. M., Orsega, E. F., & Schreiner, M. (2018). Pigment and binder concentrations in modern paint samples determined by IR and Raman spectroscopy. *Angewandte Chemie International Edition, 57*(25), 7401-7407. https://doi.org/10.1002/anie.201713413

Wolstenholme, R. (2021). Raman Spectroscopy. Dans R. Wolstenholme, S. Jickells & S. Forbes (dir.), *Analytical Techniques in Forensic Science* (p. 161-181). John Wiley & Sons.

Wooten, S. (2015). Skull. *Autodesk - Tinkercad.* Repéré le 2021-08-01 à https://www.tinkercad.com/things/j5cxxzxV32O