



HAL
open science

Évaluation de deux méthodes pour analyser les impacts laissés par un objet contondant au niveau du crâne : scanner surfacique et photogrammétrie

Marine Jézéquel

► **To cite this version:**

Marine Jézéquel. Évaluation de deux méthodes pour analyser les impacts laissés par un objet contondant au niveau du crâne : scanner surfacique et photogrammétrie. Chirurgie. 2015. dumas-01177820

HAL Id: dumas-01177820

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01177820>

Submitted on 17 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Bordeaux
Collège des Sciences de la Santé
U.F.R. des Sciences Odontologiques

Année 2015

N° 57

Thèse pour l'obtention du
DIPLOME d'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

Par Marine JEZEQUEL

Née le 29/04/1989 à MONTPELLIER (34)

Le 10/07/2015

**Evaluation de deux méthodes pour analyser les impacts
laissés par un objet contondant au niveau du crâne :
scanner surfacique et photogrammétrie**

Directeur de thèse :

Dr Christophe BOU

Membres du Jury

Président	Mme. M-J BOILEAU	Professeur des Universités
Directeur	M. C BOU	Maître de Conférences des Universités
Rapporteur	Mme. K LEVET	Assistant Hospitalo-Universitaire
Assesseur	Mme. O LAVIOLE	Maître de Conférences des Universités
Invité	Mme. M CHAUDRUC	Docteur en Chirurgie Dentaire

UNIVERSITE DE BORDEAUX

<i>Président</i>	M.	Manuel TUNON de LARA
<i>Directeur de Collège des Sciences de la Santé</i>	M.	Jean-Luc PELLEGRIN

COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DES SCIENCES ODONTOLOGIQUES

<i>Directrice</i>	Mme	Caroline BERTRAND	58-02
<i>Directrice Adjointe – Chargée de la Formation initiale</i>	Mme	Dominique ORIEZ	58-01
<i>Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche</i>	M.	Jean-Christophe FRICAIN	57-02
<i>Directeur Adjoint – Chargé des Relations Internationales</i>	M.	Jean-François LASSERRE	58-02

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme	Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-02
Mme	Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-02
M.	Jean-Christophe	FRICAIN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme	Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mme	Cécile	BADET	Sciences biologiques	57-03
M.	Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-02
M.	Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	Jean-Pierre	BLANCHARD	Prothèse dentaire	58-02
M.	Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mme	Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M.	Sylvain	CATROS	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M.	Stéphane	CHAPENOIRE	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M.	Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M.	Reynald	DA COSTA NOBLE	Parodontologie	57-01
M.	François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Raphael	DEVILLARD	Odontologie conservatrice- Endodontie	58-01
M.	Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-02
M.	Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M.	Dominique	GILLET	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-02
M.	Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme	Odile	LAVIOLE	Prothèse dentaire	58-02
M.	Jean-Marie	MARTEAU	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme	Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01
Mme	Dominique	ORIEZ	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Jean-François	PELI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

M.	Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M.	Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Johan	SAMOT	Sciences biologiques	57-03
Mme	Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mme	Noélie	THEBAUD	Sciences biologiques	57-03
M.	Eric	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

ASSISTANTS

Mme	Audrey	AUSSEL	Sciences biologiques	57-03
M.	Terence	BARSBY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Aurélie	BARSBY-EL-KHODER	Prothèse dentaire	58-02
M.	Julien	BROTHIER	Prothèse dentaire	58-02
M.	Mathieu	CLINKEMAILLIE	Prothèse dentaire	58-02
M.	Mathieu	CONTREPOIS	Prothèse dentaire	58-02
M.	Guillaume	CRESTE	Prothèse dentaire	58-02
Mme	Clarisse	DE OLIVEIRA	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Hélène	DENOST	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M.	Guillaume	FENOUL	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Nicolas	GLOCK	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme	Sandrine	GROS	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Olivia	KEROUREDAN	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-02
Mme	Alice	LE NIR	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme	Karine	LEVET	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M.	Alexandre	MARILLAS	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Matthieu	MEYER	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme	Darrène	NGUYEN	Sciences biologiques	57-03
Mme	Virginie	PANNEREC	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme	Chloé	PELOURDE	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Candice	PEYRAUD	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Jean-Philippe	PIA	Prothèse dentaire	58-02
M.	Mathieu	PITZ	Parodontologie	57-01
M.	Clément	RIVES	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	François	VIGOUROUX	Parodontologie	57-01

17/02/2015

A notre Présidente de thèse

Madame le Professeur Marie-José BOILEAU

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Orthopédie dento-faciale 56-02

C'est pour moi un honneur de vous avoir comme présidente de ce jury de thèse. Je vous remercie d'avoir accepté sans hésitation de présider cette thèse. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de ma reconnaissance et de mon respect.

A notre Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Christophe BOU

Maître de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale 56-03

Je vous remercie d'avoir accepté de diriger ce travail. Vous m'avez guidé dans le domaine de l'odontologie légale qui m'était jusqu'alors méconnu, et ce fut un travail enrichissant et passionnant. Merci encore pour votre gentillesse, votre investissement et votre disponibilité. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma plus grande gratitude et de mon respect.

A notre Rapporteur

Madame le Docteur Karine Levet

Assistant Hospitalo-Universitaire

Sous-section Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale 56-03

Je vous remercie d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce travail et j'espère que ce sujet vous aura intéressé tout autant que moi. Acceptez mes remerciements les plus sincères et toute ma reconnaissance.

A notre Assesseur

Madame le Docteur Odile LAVIOLE

Maître de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Prothèse dentaire 58-02

Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Merci aussi pour ces trois années de stages passées à Xavier-Arnozan, pendant lesquelles vous m'avez appris à raisonner selon les cas et à juger mon travail. Acceptez mes remerciements les plus sincères et toute ma reconnaissance.

A notre Invitée

Madame le Docteur Magali CHAUDRUC-THILLARD

Je te remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury, j'y tenais sincèrement car c'est en partie grâce à toi que je suis là aujourd'hui. D'abord, tu m'as donnée l'envie de faire ce métier, puis tu m'as suivie pendant toutes mes études. Trouve dans cette thèse toute l'expression de ma gratitude.

Evaluation de deux méthodes pour analyser les impacts laissés par un objet contondant au niveau du crâne : scanner surfacique et photogrammétrie.

Table des matières

Introduction	12
1- L'analyse des « traces ou marques » en Médecine et en Odontologie Légale	13
a. Caractéristiques lésionnelles d'un traumatisme crânien avec un objet contondant.....	13
• <i>Les différents types d'objets vulnérants (fig 1).....</i>	<i>13</i>
• <i>Caractéristiques des plaies contuses.....</i>	<i>14</i>
• <i>Variabilité en fonction de la forme et de la composition de l'objet contondant.....</i>	<i>14</i>
• <i>Variabilité en fonction de la région anatomique intéressée.....</i>	<i>15</i>
• <i>Variabilité en fonction de la dynamique du coup porté.....</i>	<i>15</i>
b. La tracéologie ou étude des traces.....	15
• <i>Chronologie de l'acquisition des données.....</i>	<i>16</i>
• <i>Les acquisitions de données volumétriques.....</i>	<i>17</i>
• <i>Les acquisitions de données surfaciques.....</i>	<i>18</i>
• <i>La mise en concordance.....</i>	<i>25</i>
c. Etat actuel des connaissances.....	26
• <i>Concernant le scanner à laser surfacique.....</i>	<i>26</i>
• <i>Concernant la photogrammétrie.....</i>	<i>27</i>
2- Partie expérimentale	29
a. Présentation de l'étude.....	30
• <i>Préparation des objets d'étude.....</i>	<i>30</i>
• <i>Chronologie des impacts.....</i>	<i>31</i>
• <i>Dissection et ébouillantage des têtes d'agneaux.....</i>	<i>33</i>
• <i>Préparation des crânes et du marteau avant acquisition scanner et photogrammétrie.....</i>	<i>33</i>
b. Acquisition à l'aide du scanner à laser surfacique.....	34
• <i>Description du matériel.....</i>	<i>34</i>
• <i>Acquisition des crânes.....</i>	<i>35</i>
• <i>Etude de la précision d'acquisition du scanner à laser surfacique.....</i>	<i>37</i>
• <i>Acquisition du marteau.....</i>	<i>42</i>
c. Acquisition par méthode photogramétrique.....	45

• Principe.....	45
• Acquisition du crâne 1.....	46
• Acquisition du crâne 2.....	47
• Acquisition du marteau	48
• Acquisition du marteau avec un cube	48
• Acquisition du crâne 1 avec le cube.....	50
• Acquisition du crâne 2 avec des mires.....	51
• Acquisition du marteau avec les mires	53
d. Analyse de la correspondance entre le marteau et les crânes.....	54
• Présentation de Blender	54
• Mise en concordance des modèles 3D issus du scanner surfacique.....	55
• Mise en concordance des modèles 3D issus de la photogrammétrie.....	60
Discussion	61
a. Intérêts de notre étude.....	61
b. Difficultés et limites de notre étude	61
c. Comparaison entre le scanner surfacique et la photogrammétrie.....	62
Conclusion	64
Bibliographie.....	66

Liste des figures :

Figure 1 : Objets de différentes formes : (A) surface plate et large (ex. batte de baseball), (B) surface plate et petite (ex. tête de marteau), (C) pointu (ex. hache), (D) émoussé (ex. poing humain), (E) angulé (ex. pied de table). Source : référence (1) De Bakker BS, Soerdjbalie-Maikoe V, de Bakker HM.....	14
Figure 2 : (a) scanner 3D ATOS II transportable monté sur un trépied, (b) scanner HandyScan 300 portable. Source : (a) référence (14) Thali MJ, Braun M, Dirnhofer R., (b) référence (15) www.creaform3d.com	21
Figure 3 : pages d'accueil de 123Dcatch (a) et de Photoscan (b). Source : Marine Jezequel	24
Figure 4 : (a) modèle d'une tête avec une blessure. Représentation des points de référence (marqueurs) et d'une équerre millimétrée pour la détermination d'une ligne de référence ; (b) à gauche, le modèle de l'arme est placé au premier plan sur l'image de la blessure et cache la blessure, à droite le modèle de l'arme est placé au deuxième plan derrière l'image de la blessure (symétrie) et la blessure est visible depuis l'intérieur de la tête de la victime. Source : référence (17) Brüscheiler W, Braun M, Dirnhofer R, Thali MJ.	28
Figure 5: tête d'agneau n°1. Source : Marine Jezequel.....	30
Figure 6: tête du marteau. Source : Marine Jezequel.....	31
Figure 7: tête 1, coups 1 et 2 (b), coup 3 (c). Source : Marine Jezequel.....	32
Figure 8: tête 2, coups 1 (au centre sur b), 2 (à gauche sur b) et 3 (à droite sur b et c). Source : Marine Jezequel.....	32
Figure 9: tête 2, coups 4 et 5 (a), 6 (b) et 7 (c). Source : Marine Jezequel.....	32
Figure 10: mandibulectomie(a) et ébouillantage (b). Source : Marine Jezequel.....	33
Figure 11: crâne 1 devant et crâne 2 derrière (a). Source : Marine Jezequel	34
Figure 12: crâne 1 (a, b) et crâne 2 (c). Source : Marine Jezequel	34
Figure 13: le 3D scanner HD (a), l'Extra Powder Pen (b). Source : www.nextengine.com (20).....	35
Figure 14: fixation du crâne sur le Multi Drive (a), réglage des paramètres (b) et acquisition (c). Source : Marine Jezequel.....	35
Figure 15: alignement des images (a), mise en place des points de repères (b) et fusion (c). Source : Marine Jezequel.....	36
Figure 16: crâne 1 en texture (a) et en maillage (b) dans MeshLab. Source : Marine Jezequel	36
Figure 17 : crâne 2 en maillage dans MeshLab. Source : Marine Jezequel.....	37

Figure 18: A1 (coup arrière) en maillage (a) et A2 (coup avant) en texture (b). Source : Marine Jezequel	38
Figure 19: D1 (coup arrière) (a), D2 (coup avant) (b) et D3 (coup avant) (c) en maillage. Source : Marine Jezequel.....	38
Figure 20: F1 (coup arrière) (a) et F2 (coup avant) (b). Source : Marine Jezequel.....	39
Figure 21: H1 (coup arrière) (a), H2 (coup avant) (b), H3 (coup avant) (c) et H4 (coup arrière) (d). Source : Marine Jezequel.....	40
Figure 22: 125 points/in2 (a), 500 points/in2 (b), 2000 points/in2 (c) et 17000 points/in2 (d). Source : Marine Jezequel.....	41
Figure 23: marteau 1 en maillage (a) et marteau 2 en texture (b). Source : Marine Jezequel	42
Figure 24: marteau 3 en texture (a) et en maillage (b). Source : Marine Jezequel.....	43
Figure 25: marteau 4 en texture (a et b) et en maillage (c). Source : Marine Jezequel.....	44
Figure 26: tête 1 en photo (a) et en 3D (b), tête 2 en photo (c) et en 3D (d). Source : Marine Jezequel	45
Figure 27: crâne 1 dans 123Dcatch en texture (a) et dans MeshLab en maillage (b). Source : Marine Jezequel.....	46
Figure 28: répartition des photos autour du crâne (a) et finesse du maillage (b). Source : Marine Jezequel	46
Figure 29: textures dans 123D catch (a) et dans PhotoScan (b), maillage et nuage de points dans MeshLab (c) et dans PhotoScan (d). Source : Marine Jezequel	47
Figure 30 : mauvaise texture du marteau dans PhotoScan. Source : Marine Jezequel.....	48
Figure 31: cube en texture et en maillage. Source : Marine Jezequel.....	48
Figure 32: nuage de points et texture du premier modèle (a et b), texture et maillage de second modèle (c et d). Source : Marine Jezequel.....	49
Figure 33: crâne 1, texture (a), maillage (b) et répartition des photos (c). Source : Marine Jezequel	50
Figure 34: mire 1 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel ...	51
Figure 35: mire 2 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel ...	52
Figure 36: mire 3 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel ...	52
Figure 37: mire 2, nuage de points et texture du premier modèle (a et b), texture et maillage de second modèle (c et d). Source : Marine Jezequel.....	53
Figure 38: mire 1, texture (a) et maillage (b). Source : Marine Jezequel.....	54
Figure 39: présentation du logiciel Blender. Source : Marine Jezequel	55

Figure 40: concordance entre le marteau 1 et les coups 1 et 2 portés sur le crâne 1. Source : Marine Jezequel.....	56
Figure 41: concordance entre le marteau 3 et le coup 3 porté sur le crâne 1. Source : Marine Jezequel	57
Figure 42: concordance entre le marteau 3 et le coup 2 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel	58
Figure 43: concordance entre le marteau 3 et le coup 5 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel	58
Figure 44: concordance entre le marteau 3 et le coup 6 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel	59
Figure 45 : modèle 3D du crâne 1 issu de la photogrammétrie, sans texture	60
Figure 46 : modèle 3D du crâne 1 avec le cube issu de la photogrammétrie, limites irrégulières du cube	60

Liste des tableaux :

Tableau 1 : étude de précision du scanner. Source : Marine Jezequel.....	41
Tableau 2 : intérêts et limites du scanner surfacique et de la photogrammétrie.....	63

Introduction

En anthropologie, médecine et odontologie médico-légale nous sommes parfois confrontés à devoir répondre à la question qui consiste à confirmer ou infirmer une correspondance entre une marque à la surface d'un crâne et la forme d'un objet contondant. L'apport de nouvelles technologies d'imagerie 3D surfacique semble être une alternative au CT scanner (Ry X), jusqu'à présent utilisé de manière plus fréquente. Ces technologies d'imagerie permettent l'obtention de modèles 3D virtuels, qui pourront notamment être utilisés comme aide pré-autopsique pour le médecin légiste, mais aussi en post-autopsie dans le rapport de mission d'expertise ou lors d'un procès d'assise, et ainsi faciliter la compréhension pour les personnes non formées aux sciences médico-légales (1). Dans le cadre de notre travail nous utiliserons deux principes différents d'acquisitions surfaciques, le laser surfacique et la photogrammétrie, et comparerons en terme de précision et de fiabilité la concordance de la forme de l'objet vulnérant utilisé et les embarrures présentes à la surface crânienne.

Le but de notre travail est de prouver que le scanner à laser surfacique et la photogrammétrie sont des techniques de reconstruction précises, complémentaires et utilisables dans le domaine de l'odontologie légale. Pour cela, nous nous fixons trois objectifs distincts :

- L'objectif primaire de ce travail est de définir le protocole d'utilisation des deux méthodologies à mettre en œuvre pour obtenir des reconstructions surfaciques de qualité au niveau de surfaces anatomiques.
- L'objectif secondaire est de vérifier la concordance en terme de reconstruction 3D des diverses formes à analyser.
- L'objectif tertiaire est d'établir la meilleure méthodologie à utiliser dans le cadre d'une mission d'expertise pour identifier la concordance d'un objet avec une trace résiduelle du fait d'un objet contondant.

1- L'analyse des « traces ou marques » en Médecine et en Odontologie Légale

Lors de la découverte par les autorités judiciaires d'un cadavre présentant des marques d'objet contondant au niveau de la face ou du crâne, il est demandé au médecin légiste d'apporter des précisions sur la blessure constatée et sur la détermination d'un éventuel objet vulnérant. Les coups portés l'ont-ils été ante, peri ou post-mortem ? Ce ou ces coup(s) unique ou multiples peuvent renseigner sur le « modus operandi » et la violence de l'agression, voire l'acharnement de l'agresseur.

Il est parfois difficile pour le médecin légiste de répondre seul à toutes ces questions, l'aide d'un odontologiste légal mais aussi d'un anthropologue d'identification est souvent requise. Il sera dès lors possible d'identifier le type « d'arme » ou d'objet utilisé, et lorsqu'il est présent sur la scène d'homicide, d'établir sa potentielle probabilité comme agent vulnérant à l'égard des éventuelles correspondances existantes entre les blessures constatées et la forme de l'objet.

a. Caractéristiques lésionnelles d'un traumatisme crânien avec un objet contondant

En fonction des circonstances de l'agression, les blessures crâniennes ne sont pas les mêmes (1,2).

- **Les différents types d'objets vulnérants (fig 1)**

Les objets vulnérants peuvent être de types contondants, piquants ou tranchants. On dit qu'un objet est contondant lorsqu'il blesse sans percer ni couper, mais en faisant des contusions. Parmi l'infinité d'instruments contondants, on peut citer le poing humain, le poing dit américain, le bâton, le marteau, le bord non tranchant d'une hache, les bouteilles vides ou pleines, etc. A l'inverse, les objets tranchants sont caractérisés par l'action « d'estoc et de taille » et sont désignés sous le terme d'armes blanches. Les principales armes blanches sont la hache, le couteau, et le tranchoir du boucher.

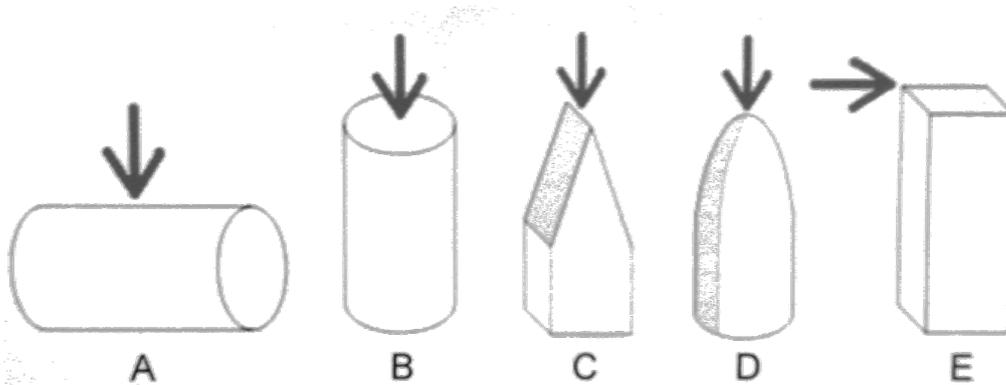


Figure 1 : Objets de différentes formes : (A) surface plate et large (ex. batte de baseball), (B) surface plate et petite (ex. tête de marteau), (C) pointu (ex. hache), (D) émoussé (ex. poing humain), (E) angulé (ex. pied de table). Source : référence (1) De Bakker BS, Soerdjbalie-Maikoe V, de Bakker HM

- **Caractéristiques des plaies contuses**

Un objet contondant produit des plaies contuses. Ces plaies sont en général irrégulières, plus ou moins profondes, avec souvent un décollement tégumentaire et parfois des bords amincis et surtout un aspect anfractueux. Au niveau du crâne, un objet contondant peut produire une embarrure, c'est à dire une fracture de la boîte crânienne, avec un enfoncement de la partie fracturée. Dans certains cas, la plaie contuse peut reproduire la forme de l'instrument ou de l'objet contondant. C'est le cas pour un coup de marteau sur le crâne : notons cependant que la face profonde du cuir chevelu est souvent plus démonstrative que la face externe.

- **Variabilité en fonction de la forme et de la composition de l'objet contondant**

Le caractère de ces plaies dépendra de l'irrégularité de la forme de l'objet contondant, de son diamètre plus ou moins important, et de son degré d'arrondi. Ainsi, un coup réalisé avec une surface fine et tranchante d'un objet produira un dommage plus sévère sur le scalp, le crâne et le cerveau qu'une surface plus large et émoussée.

De même, un instrument en métal sera plus traumatisant qu'un instrument en bois, puisque le bois absorbe l'impact (2).

- **Variabilité en fonction de la région anatomique intéressée**

L'objet contondant entraînera des plaies totalement différentes suivant la partie du corps atteinte. Par exemple, un coup de marteau sur une tête, une épaule ou une cuisse ne donnera pas le même type de plaie contuse. De plus, un plan osseux sous jacent favorisera l'éclatement des téguments, comme par exemple l'éclatement de l'arcade sourcilière du boxeur. Plus précisément au niveau du crâne, l'épaisseur de la voûte crânienne, du cuir chevelu, et des cheveux influence la sévérité d'un trauma. De même les cheveux, lorsqu'ils sont abondants, peuvent constituer un plan de glissement, avec création d'un impact de forme tangentielle. La forme du crâne, et notamment de la base du crâne (l'éthmoïde et le sphénoïde), est aussi à prendre en compte car les zones de fragilité et de rupture ne seront pas les mêmes entre un crâne dolichocéphale (allongé et fin) et un crâne brachycéphale (court et large) (3).

- **Variabilité en fonction de la dynamique du coup porté**

La sévérité d'un trauma dépend également de la force transférée lors du coup et du temps de contact entre l'instrument et le crâne. De plus, le type de fracture crânienne, la localisation de cette fracture, et la direction du coup sont aussi des éléments à prendre en compte dans la sévérité d'une blessure crânienne (1,2).

b. La tracéologie ou étude des traces

La tracéologie ou analyse fonctionnelle est une discipline scientifique initialement liée à l'archéologie, et en particulier à l'archéologie préhistorique, qui a pour but de déterminer la fonction des outils par l'étude des traces produites lors de leur utilisation.

Elle a été développée dans un premier temps pour les outils de pierre taillée. Elle se base sur l'examen des polis et des stigmates d'usure, notamment à l'échelle microscopique. Les actions (découpe, rainurage, grattage, perforation....) ainsi que la durée de l'activité sont également identifiables. Les données obtenues permettent de caractériser les modalités de gestion de l'outillage utilisé et d'établir l'utilité fonctionnelle de chacun. Dans les disciplines médico-légales, la tracéologie concerne l'observation et l'analyse de traces sur divers tissus anatomiques occasionnées par tout agent vulnérant. La première étape quelle que soit la méthode utilisée

concerne l'acquisition des données, et ce de diverses manières comme nous allons le décrire ci après.

- **Chronologie de l'acquisition des données**

En effet dans certains cas particuliers de missions d'expertise d'agressions avec un objet, il est souvent demandé en premier lieu au médecin légiste de pouvoir établir une concordance entre une blessure et un objet ou arme potentielle et ce au cours des divers temps opératoires après la découverte d'un cadavre.

De manière classique, lorsque le médecin légiste est sollicité par réquisition ou commission rogatoire par les autorités judiciaires, sa mission essentielle consiste à déterminer les causes médicales mais aussi médico-légales du décès, afin de savoir si la procédure judiciaire doit être poursuivie et ainsi continuer le cours de l'enquête.

La constatation des premiers éléments sur la scène de découverte par le médecin légiste constitue la levée de corps. Durant cette étape, l'ensemble des indices est préservé et des photographies sont prises. A l'issue de la levée des corps, le médecin légiste peut solliciter des investigations complémentaires au cours d'une autopsie au sein de l'Institut Médico-Légal. L'autopsie se déroule en deux étapes : l'examen externe du corps, puis l'examen interne. A l'issue de ces opérations autopsiques, une première description de la forme de la ou des plaie(s), et donc une première idée de l'objet supposé du crime peut être faite.

L'autopsie représente aujourd'hui le mode d'étude le plus fiable dans la détermination de la morphologie d'une blessure et permet ainsi d'apporter une aide précieuse au dénouement d'une enquête judiciaire. Cependant, la qualité du recueil des informations lors de l'autopsie présente certaines limites. En effet, cette dernière est dépendante des effets de la décomposition du cadavre, notamment pour une blessure des tissus mous. L'autopsie doit donc alors être réalisée dans un délai le plus court possible suivant la découverte de la victime (1).

Se pose aussi le problème de l'invasivité de l'acte autopsique, et par conséquent de l'altération des données. Parfois dans le cas de contre-expertise ou de missions complémentaires ordonnées quelques années après, suite à la découverte d'éléments nouveaux dans le cadre de l'enquête, les informations traumatiques initiales sont perdues ou incomplètes.

De ce fait, en complément de l'acte autopsique, des outils complémentaires de recueil d'informations sont utilisés. Citons par exemple la prise de photographies couleur et/ou noir-

blanc, la réalisation de moulages des zones traumatiques, mais également l'acquisition tomодensitométrique pré-autopsique ou CT-scan.

- **Les acquisitions de données volumétriques**

- 1. Le scanner**

Le scanner, ou tomодensitométrie, est une méthode radiologique permettant d'obtenir des coupes transversales, reconstruites à partir de mesures de coefficients d'atténuation d'un faisceau de rayon X dans un volume considéré. Il présente l'avantage de pouvoir étudier la totalité du corps et est non invasif. Aujourd'hui les scanners multi-barrettes réalisent des acquisitions par chevauchement avec une précision de moins de 400 microns.

La tomographie crânienne assistée par ordinateur (CCT pour cranial computed tomography en anglais) est aujourd'hui considérée comme la seule source fiable de reconstitution de la morphologie des blessures crâniennes dans les cas de survie de la victime ou de mort tardive de la victime avec modifications secondaires de la morphologie des blessures (4).

En effet, la tomographie assistée par ordinateur permet une localisation exacte des modifications pathologiques telles que les fractures crâniennes, et les outils 3D donnent la possibilité d'une reconstruction tridimensionnelle des structures anatomiques (4,5). Ainsi, la reconstruction 3D d'images issues de la tomographie assistée par ordinateur permet de donner des informations sur les circonstances de l'agression, plus précisément sur le nombre d'impacts, leur direction, leur forme générale, et facilite donc la recherche de l'arme utilisée (6).

Bien entendu, des informations complémentaires sur la scène de crime et les circonstances de l'agression sont nécessaires pour confirmer ces dires qui ne sont que des hypothèses (1,4,7,8). Notons cependant qu'il est difficile de distinguer dans une même région du crâne plusieurs coups portés avec un petit objet de seulement un ou deux coups portés avec un plus gros objet (1).

De plus, la visualisation 3D offre la même vue du crâne qu'au cours d'une autopsie, avec la possibilité d'une manipulation en 3D. Elle permet également la réalisation de mesures de la lésion en tout angle, mais également une reconstruction différentielle des tissus anatomiques en effectuant une segmentation manuelle ou semi-automatique à partir des coupes axiales tomодensitométriques.

2. La « virtopsie »

En complément de l'autopsie classique, l'Institut Médico Légal de Bern, dirigé par le Pr Thali, développa en 2007 un nouveau concept nommé « virtopsy » ou autopsie virtuelle.

L'objectif de cette autopsie virtuelle est de permettre la collecte de l'ensemble des informations recueillies lors d'une autopsie conventionnelle, et ce de manière non invasive. En effet, ce nouveau concept combine à la fois une acquisition tomodensitométrique volumique pour identifier les structures anatomiques internes, une acquisition laser surfacique pour avoir un texturage au niveau cutané, et des prélèvements tissulaires et organiques guidés par scanner pour des analyses complémentaires.

Ainsi dans certains cas de religions ou de croyances où l'autopsie est proscrite, ce principe est intéressant. Cependant le plateau technique nécessaire pour valider ce concept est très onéreux et incompatible avec l'ensemble des instituts médicaux légaux actuels.

De plus, l'ensemble des données acquises numériques et leur archivage permet le re-examen virtuel du corps autant de fois que nécessaire, même au bout de plusieurs années, si l'enquête nécessite d'être ré-ouverte (9,10).

La non invasivité de la virtopsie dans la détermination des causes médicales et médico-légales de décès nécessite en retour une connaissance parfaite de l'anatomie radiologique et de l'interprétation de la sémiologie post-mortem.

Aussi, une coopération entre le radiologue et le médecin légiste chargé de l'enquête est primordiale (1,4,6,11).

- **Les acquisitions de données surfaciques**

Nous aborderons maintenant la description et l'utilisation de deux outils permettant l'acquisition surfacique qui nous semblent complémentaires : le scanner à laser de surface et la photogrammétrie.

1. Le scanner à laser surfacique

- Domaines d'application

Les premières applications du scanner à laser surfacique concernaient initialement le domaine industriel et la restauration virtuelle de monuments historiques. Depuis quelques années, l'acquisition laser est utilisée dans le domaine médical pour la mesure et la reconstruction prothétique de membres du corps et pour l'analyse des modifications d'une blessure chronique cicatrisante (12).

Son utilisation dans les sciences légales est beaucoup plus récente et concerne par exemple la comparaison de morsures avec des moulages virtuels 3D de suspects lorsqu'un agresseur mord sa victime.

L'acquisition par scanner surfacique constitue aujourd'hui un outil fiable pour la capture de la forme d'une lésion au niveau des tissus mous. Cependant, on observe un manque de publications concernant les lésions sur des structures anatomiques plus profondes, en particulier au niveau des tissus durs osseux (12,13).

- Principe

Le principe du scanner à laser surfacique est de digitaliser un objet grâce à un faisceau laser qui parcourt cet objet, et de reconstruire un modèle 3D virtuel de cet objet (12). Pour se faire, plusieurs étapes sont nécessaires. Dans un premier temps, un ou plusieurs faisceau(s) laser, focalisé(s) par une lentille cylindrique, projette(nt) une bande laser sur la surface de l'objet. Cette bande laser est alors déformée par la forme de la surface, pour ensuite être capturée selon un certain angle par une caméra vidéo. La bande lumineuse acquise suit le principe de triangulation optique qui attribut à chaque point de l'objet illuminé par la bande laser des coordonnées 3D. De même, l'environnement de l'objet est scanné afin d'acquérir les mesures de l'objet dans sa globalité.

Les données résultantes permettent la réalisation, à l'aide du logiciel correspondant au laser, d'un nuage de points qui représente la forme tridimensionnelle de l'objet. De plus, certains systèmes sont aujourd'hui équipés d'un appareil photo qui permet d'acquérir, en deux dimensions, la texture et la couleur de la surface de l'objet.

A partir du nuage de points, le logiciel va générer un maillage adapté à l'objet afin d'établir une description typologique de la surface d'origine et ainsi fournir, par exemple, une description objective de lésions originelles.

Une fois le modèle 3D de l'objet élaboré, il est possible d'extraire des informations du logiciel, comme par exemple des mesures de distances inter-points, de sections, ou de surfaces. De plus, l'exportation du fichier objet sous forme de maillage permet d'élaborer un modèle physique 3D à partir de machines de prototypage rapide, comme la stéréolithographie.

- Les différents types de scanner surfaciques

Il existe trois grandes classes de scanner à laser surfacique, selon la portée de la mesure.

- Les instruments de longues portées répondent au principe du temps de vol et sont utilisés en cas de nécessité de scanner de très larges scènes (qui s'étendent d'une dizaine de mètres à plusieurs kilomètres).

- Les instruments de courte portée répondent au principe de triangulation optique (connu pour la photogrammétrie) et sont utilisés pour scanner des zones de quelques centimètres à un mètre maximum. Cette classe présente une grande variété de systèmes.

- Les instruments de moyenne portée répondent soit au principe du temps de vol, soit à celui de triangulation optique, et sont utilisés pour scanner des scènes de dix mètres de long maximum.

Une autre classification des scanners à laser surfacique est basée sur leur mobilité (14-15). En effet, différents types de scanners à laser surfacique sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Les plus anciens sont fixes et nécessitent que les objets à scanner soient transportés jusqu'à eux (à l'IML ou Institut Médico-Légal). D'autres sont mobiles donc transportables, mais nécessitent d'être posés sur un trépied (fig 2a). Mais de plus en plus de scanners sont maintenant portables et à préhension manuelle (fig 2b), et peuvent donc par exemple être utilisés sur une scène de crime, pour scanner le corps d'une victime en se déplaçant autour.



Figure 2 : (a) scanner 3D ATOS II transportable monté sur un trépied, (b) scanner HandyScan 300 portable. Source : (a) référence (14) Thali MJ, Braun M, Dirnhofer R., (b) référence (15) www.creaform3d.com

- Intérêts

Le scanner à laser surfacique présente de nombreux avantages (13,14). En effet, il permet une analyse et une reconstruction rapides de l'objet à scanner, et est facile d'utilisation.

De plus, l'acquisition de l'état de surface avec toutes ses irrégularités, et par conséquent du volume d'une structure anatomique traumatisée se réalise sans contact, donc sans altération ni modification de la surface initiale.

L'acquisition par laser surfacique présente de très bonnes performances, en terme de fiabilité de reproduction 3D et de précision dans les mesures macroscopiques. Il représente un outil d'aide à la détermination de la direction, de la force et de la vitesse du trauma, ainsi que de l'objet qui a causé la lésion.

En effet, les modèles 3D de la structure anatomique et de l'objet scannés sont exportés à l'échelle 1 permettant ainsi à l'opérateur, à l'aide de logiciels de CAO, de pouvoir déplacer les différents modèles 3D l'un par rapport à l'autre et ainsi de proposer un éventuel engrainement des pièces.

En raison du caractère virtuel et archivable des données, il est aussi possible de les analyser à tout moment. En médecine légale, si de nouvelles questions se posent sur une enquête, comme par exemple l'apparition d'un nouveau suspect ou d'une arme différente, les données archivées permettront de répondre à une éventuelle demande de concordance, même si les objets sont détériorés ou n'existent plus (processus de décomposition ou de squelettisation, corps incinéré...).

Enfin, le scanner à laser surfacique permet l'obtention de modèles 3D virtuels qui pourront notamment être utilisés comme aide pré-autopsique pour le médecin légiste, mais aussi en post-autopsie dans le rapport de mission d'expertise ou lors d'un procès d'assise, et ainsi faciliter la compréhension pour les personnes non formées aux sciences médico-légales.

- Limites

Le scanner à laser surfacique présente cependant certains inconvénients (12,13).

Le coût du matériel est très variable, selon le degré de précision du scanner et l'association du texturage (jusqu'à 48 000 euros).

Bien que le scanner à laser surfacique puisse être calibré à une portée de mesure spécifique, la diminution du risque d'erreur dans l'acquisition est contrebalancée par une augmentation de l'imprécision dans la modélisation et la fusion des images 3D (12).

De plus, peu d'articles dans la littérature confirment son utilisation en sciences légales, surtout dans les fractures et embarrures osseuses (12,14).

2. Photogrammétrie

Il y a quelques années, la technique de photogrammétrie avait l'habitude d'être utilisée lors d'accidents d'avions, de trains ou de voitures ou pour réaliser la documentation des scènes de crime (reproduction à échelle réelle d'une scène de crime) (16).

En 1995, Brueschweiler et al. furent les premiers à décrire cette méthode pour la documentation légale et l'évaluation des blessures (17).

- Principe (18)

La photogrammétrie regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions, et la position dans l'espace d'un objet à partir de photographies. Elle permet donc de modéliser un espace 3D en utilisant des images 2D.

Ce principe est basé sur la propriété de la vision humaine : grâce à nos yeux, nous voyons en trois dimensions. La stéréoscopie consiste à retrouver cette perspective à partir de deux

photographies, prises de deux points de vue différents, en reproduisant les conditions humaines de la vue.

Dans cette technique, les points communs sont identifiés sur chaque image. Une ligne de vue (ou rayon) peut être construite depuis la position de l'appareil photographique au point de l'objet. C'est l'intersection de ces rayons (triangulation) qui détermine la position tridimensionnelle du point.

- Méthodes

Les travaux récents du Dr Cheminade sur la photogrammétrie, et plus particulièrement sur les principes et méthodes de réalisation pour permettre une acquisition de qualité, repose sur le respect de principes essentiels (18) :

- Les photographies de l'objet doivent se chevaucher
- L'objet à modéliser doit prendre un maximum de superficie sur la photo
- L'objet doit contraster avec le fond
- La prise de photographies doit se faire dans un contexte lumineux naturel plutôt qu'avec une lumière artificielle
- Le flash est à proscrire ainsi que tout contre-jour
- Les images doivent être prises avec un maximum de résolution
- L'ajout de points de repères sur ou à côté de l'objet permet d'augmenter la qualité de reconstruction des modèles
- Le nombre de clichés réalisés doit être suffisamment important (environ 70 pour un objet de forme complexe) pour obtenir un modèle de qualité.

- Avantages

La photogrammétrie présente de nombreux intérêts (16,17,19). En effet, elle relève avant tout d'une technologie simple de mise en œuvre et d'une technique d'enregistrement rapide, car elle nécessite uniquement l'utilisation d'un appareil photo et d'un logiciel.

Ces logiciels permettent d'analyser les modèles 3D sous différentes structures, comme par exemple en nuages de points ou en maillage. Parmi ces logiciels, nous pouvons citer Autodesk 123D Catch, qui est un logiciel gratuit et téléchargeable sur internet par le lien

<http://www.123dapp.com/catch>, et Agisoft PhotoScan, qui est un logiciel professionnel (fig 3).

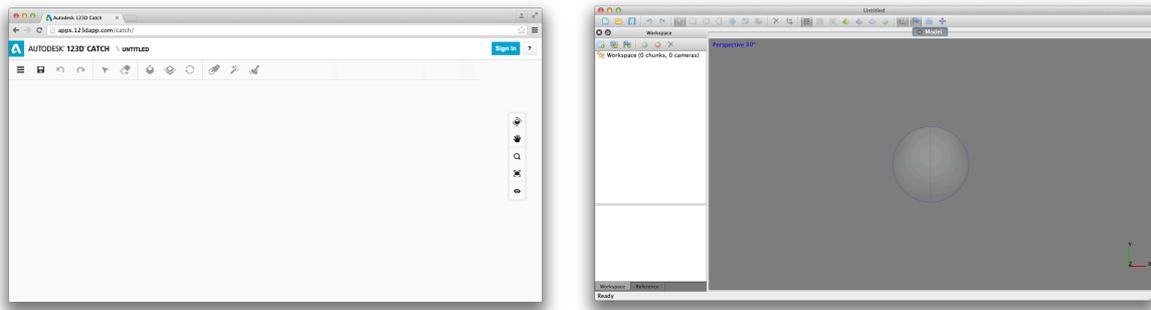


Figure 3 : pages d'accueil de 123Dcatch (a) et de Photoscan (b). Source : Marine Jezequel

De même que pour le scanner à laser surfacique, la photogrammétrie permet l'obtention de données virtuelles et archivables, et donc analysables à tout moment. Les modèles 3D qui en sont issus peuvent également être utilisés comme aide pré- ou post-autopsique.

L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire d'être un professionnel de la photo pour faire des acquisitions de qualité, et ce à un coût moindre.

- Limites

La photogrammétrie dépend avant tout de la qualité des photos qui sont utilisées par la réalisation du modèle (18). Cette qualité dépend de l'appareil photo, mais surtout du respect élémentaire des conditions lors de la prise des photos.

Un inconvénient majeur de la technique par photogrammétrie repose sur l'absence de proportionnalité de l'objet, et donc de mesures potentielles concernant les dimensions de ce dernier. Aussi, il sera nécessaire de positionner dans la proximité immédiate de l'objet soit une mire papier soit un objet calibré ayant des mensurations pré-définies.

De plus, la photogrammétrie n'est pas utilisable sur tous les types de matériaux (18). Un objet métallique va refléter la lumière, de même que certains objets vernis ou pailletés, et ainsi perturber la qualité des reconstructions. Certains objets fins peuvent également être difficiles à reconstruire.

- **La mise en concordance**

- Principe

Les acquisitions volumiques ou surfaciques reconstituées permettent d'obtenir, après exportation du fichier objet sous forme de maillage (ou mesh), une reconstitution virtuelle 3D des objets.

Dès lors, à l'aide de logiciels de CAD (Concept Aided Design), il est possible de manipuler ces objets dans les 3 sens de l'espace, et d'y appliquer des outils de transformations géométriques (taille, symétrie...)

De même, l'insertion de plusieurs objets sous forme de maillage dans une même scène permet d'organiser l'agencement spatial de chacun d'eux. Ainsi, dans le cadre de notre travail, il sera intéressant après importation de la structure crânienne présentant des lésions d'embarrures, mais aussi de l'objet vulnérant, de pouvoir mettre en situation les deux objets et ainsi de visualiser une éventuelle concordance ou discordance entre les deux.

Il faut néanmoins rester très prudent pour affirmer une concordance certaine entre deux objets par simple assemblage visuel et conclure de manière certaine que l'objet vulnérant est l'objet à l'origine de l'impact pour les autorités judiciaires. Il est plus prudent de parler de compatibilité, permettant ainsi de proposer l'objet comme étant un objet potentiel pour l'action vulnérante.

- Méthodologie

Dans notre travail nous avons utilisé deux logiciels de CAD, disponibles gratuitement par téléchargement sur internet, utilisant indifféremment le système d'exploitation Windows ou Mac.

Le premier logiciel se nomme Meshlab, logiciel de traitement de maillages 3D. Ce programme est développé depuis 2005 par l'ISTI (Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Informazione) et le CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), dans le but de fournir un outil généraliste pour la manipulation et l'édition de modèles 3D conséquents, provenant notamment de scans 3D.

Il propose différents filtres de nettoyage du maillage (suppression des vertex non référencés par exemple), des outils de re-maillage (simplification, subdivision, reconstruction de surfaces...) et des fonctions de suppression de bruit (adoucissement, etc...).

Meshlab est utilisé comme viewer principal car il permet de manipuler l'objet dans les 3 sens de l'espace avec sa texture, ce qui est essentiel pour appréhender les modifications cutanées de surface, mais aussi pour visualiser les embarrures osseuses ou fractures sur la voûte du crâne.

Le 2° logiciel nommé Blender est un logiciel libre de modélisation, d'animation et de rendu en 3D. Il dispose de fonctions avancées de modélisation, de sculpture 3D, de dépliage UV, de texturage, de rigging ou squelettage, d'animation 3D, et de rendu.

Il gère aussi le montage vidéo non linéaire, la composition, la création nodale de matériaux, la création d'applications 3D interactives, ainsi que diverses simulations physiques telles que les particules, les corps rigides, les corps souples et les fluides. De plus, c'est un programme extensible (ajout de scripts) à l'aide du langage Python.

Dans l'analyse d'une concordance, la difficulté réside sur la méthodologie à utiliser pour confirmer une congruence parfaite entre un impact et un objet vulnérant lors de la mise en situation. Des observations visuelles dans les 3 sens de l'espace permettent de confirmer ou d'infirmer l'engrènement entre les deux objets, mais cela demeure une méthode subjective dans son principe.

Dans le cas particulier de notre travail, le logiciel Blender sera utilisé pour manipuler les modèles 3D virtuels et permettre une mise en situation de chacun d'eux, et ainsi évaluer une potentielle compatibilité.

c. Etat actuel des connaissances

- **Concernant le scanner à laser surfacique**

Les données de la littérature nous apprennent que le scanner à laser surfacique représente aujourd'hui un outil simple d'utilisation, et rapide dans la reconstruction d'un objet 3D.

De plus en plus de scanners surfaciques sont maintenant portables, rendant plus facile l'acquisition de l'objet à scanner puisque l'opérateur peut tourner autour. L'association du texturage sur certains scanners et l'augmentation de leur précision permettent d'obtenir des modèles 3D très précis en termes de reconstruction de l'objet réel.

Cependant, très peu d'articles référencés dans la littérature portent sur le rôle des analyses par scanner surfacique des tissus osseux en médecine légale. L'article « Feasibility of contactless 3D Optical measurement for the analysis of bone and soft tissue lésions », paru en 2009 dans la

revue Journal Forensic Science (12), nous donne des informations sur l'application du scanner à laser surfacique dans l'analyse des lésions des tissus mous et des os. Selon cet article, le scanner surfacique présente de bonnes performances dans les mesures de lésions macroscopiques des tissus mous, mais est limité dans les mesures de lésions des tissus osseux sous-jacents, masqués par la peau.

De plus, nous n'avons trouvé aucun article récent portant sur la mise en concordance entre une lésion du crâne et une arme supposée du crime.

- **Concernant la photogrammétrie**

Les études réalisées sur la photogrammétrie et les données de la littérature présentent aujourd'hui cette méthode comme étant simple de mise en œuvre, et peu coûteuse. En effet, seuls un appareil photo et un logiciel sont nécessaires à la modélisations d'objets.

Cependant, très peu d'articles portant sur le rôle de la photogrammétrie dans l'acquisition de structures osseuses en sciences légales sont référencés dans la littérature. L'article « Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process », paru en 2003 dans la revue Forensic Science International (17), traite d'une ancienne technique se rapprochant de la photogrammétrie utilisée actuellement.

Dans cette technique, les points de références sont représentés par une projection de points de lumière, et une ligne de référence est mesurée à l'aide d'une équerre millimétrée (fig 4a). De plus, pour des objets de forme complexe ou de surface irrégulière, plusieurs séries de photos sont prises en ajoutant des éléments autour de l'objet. Puis la ou les série(s) de photos sont exportées dans un logiciel spécialisé afin de reconstruire le modèle 3D de l'objet.

Cet article traite également de la mise en concordance entre une lésion et un objet, l'objet étant représenté en 3D mais la lésion en 2D. Il utilise le principe de représentation symétrique selon lequel une image réfléchi (symétrique) de l'image 2D de la blessure est placée au premier plan dans un espace virtuel, et le modèle 3D de l'arme, placée au deuxième plan, pénètre dans la blessure (fig 4b). Ainsi, il est possible d'observer la blessure depuis l'intérieur du crâne de la victime, et donc subir l'attaque depuis la perspective de la victime.

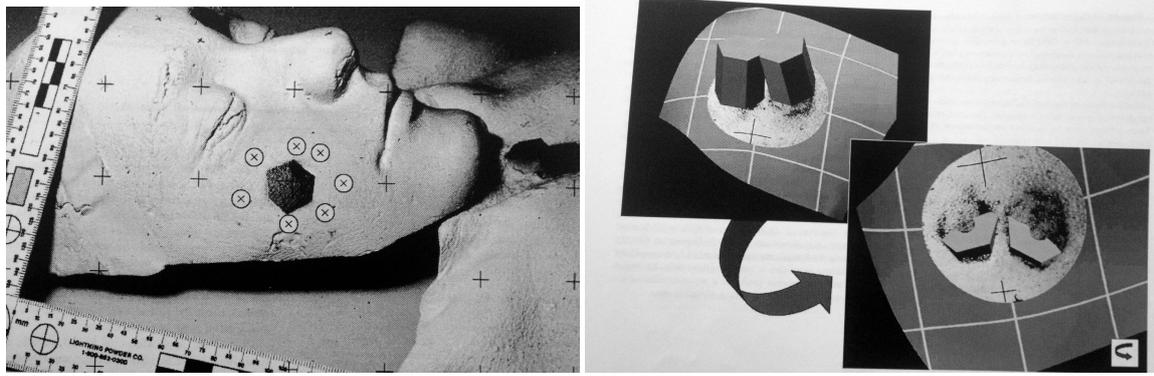


Figure 4 : (a) modèle d'une tête avec une blessure. Représentation des points de référence (marqueurs) et d'une équerre millimétrée pour la détermination d'une ligne de référence ; (b) à gauche, le modèle de l'arme est placé au premier plan sur l'image de la blessure et cache la blessure, à droite le modèle de l'arme est placé au deuxième plan derrière l'image de la blessure (symétrie) et la blessure est visible depuis l'intérieur de la tête de la victime. Source : référence (17) Brüscheiler W, Braun M, Dirnhofer R, Thali MJ.

Cette technique n'est cependant aujourd'hui plus utilisée. On remarque un manque de publications concernant l'utilisation de la photogrammétrie en médecine légale, et plus précisément dans l'étude des impacts sur le crâne (16). De même, très peu d'articles récents traitent de l'utilisation de scanner à laser surfacique dans ce même domaine.

C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier, dans notre travail, la précision du scanner surfacique et de la photogrammétrie dans l'étude des impacts présents sur un crâne, ainsi que dans la mise en concordance de ces impacts avec un objet contondant.

2- Partie expérimentale

L'objectif de nos expériences est de confirmer la fiabilité des méthodes surfaciques dans l'établissement d'une concordance/ compatibilité entre des traces présentes sur une surface anatomique et un objet vulnérant. Nous souhaitons également évaluer l'utilité et facilité de mise en œuvre de ces deux méthodes afin de pouvoir la mettre en application en situation réelle en salle d'autopsie.

Nous faisons l'hypothèse que les techniques d'acquisition surfacique (laser ou photogrammétrie) représentent une alternative précise et valide dans l'établissement d'une compatibilité entre des traces présentes au niveau d'un crâne et la forme de l'objet utilisé, pouvant ainsi être considérées comme un élément de preuve au cours d'un procès.

Une question complémentaire que nous allons vérifier concerne la pertinence de la chronologie du temps de l'acquisition. En effet, est-il préférable d'enregistrer le traumatisme directement au niveau cutané, ou au contraire faut-il privilégier après une phase de squelettisation l'enregistrement des données directement sur les tables osseuses crâniennes et ainsi permettre une meilleure visualisation du traumatisme lésionnel ?

Pour répondre à nos interrogations antérieures, nous simulons une agression avec un objet contondant (marteau) sur la voûte crânienne de têtes d'agneaux. Une première série de photos est prise juste après afin d'effectuer la reconstruction 3D par photogrammétrie dans une phase ultérieure.

L'étape suivante de squelettisation du crâne permet d'effectuer les acquisitions par le scanner à laser surfacique, mais également les diverses prises de photographies pour l'acquisition photogrammétrie. La même méthodologie est effectuée pour faire l'acquisition de l'objet vulnérant selon les deux techniques.

A l'issue de l'acquisition de l'ensemble des divers modèles 3D, ces derniers sont exportés dans un format compatible pour les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), en l'occurrence obj, dxf ou ply.

Pour notre étude, nous avons utilisé deux logiciels gratuits de visualisation 3D et de manipulation, Meshlab et Blender. Ainsi la mise en situation à l'aide de Blender nous permet de vérifier la compatibilité et évaluer visuellement, dans les divers sens de l'espace, la concordance de la congruence entre les deux objets 3D.

a. Présentation de l'étude

- **Préparation des objets d'étude**

Pour nos expériences, nous avons choisi d'utiliser deux têtes d'agneaux dont la peau a été retirée, mais dont les parties musculaires et tégumentaires profondes sont toujours présentes. Le choix des crânes d'agneaux s'explique pour des raisons anatomiques. En effet, la forme arrondie de sa voûte crânienne et l'épaisseur de sa corticale nous permet de porter des coups de manière similaire à ceux portés sur un crâne humain.

L'objet vulnérant choisi pour porter les coups sur le crâne est un marteau de menuisier de taille moyenne (tête de 10cm de longueur, 2,2cm de hauteur, et 2,2cm d'épaisseur). La table du marteau (partie « carrée » de la tête) mesure 2,2x2,2 cm, et la panne du marteau (partie « fine » de la tête) mesure 2,2x 0,6 cm. Nous avons pris tout d'abord des photos des crânes et du marteau associés à une mire photographique (fig 5 et 6).



Figure 5: tête d'agneau n°1. Source : Marine Jezequel



Figure 6: tête du marteau. Source : Marine Jezequel

- **Chronologie des impacts**

Nous avons réalisé plusieurs séries de coups, sur différentes zones des crânes avec les deux parties de la tête du marteau, la table ou face « carrée », et la panne ou face « fine ». Pour chaque coup, les têtes étaient posées au sol, et nous nous plaçons à genoux au dessus, afin d'être dans une position stable avec la tête immobile et de contrôler au mieux l'endroit où porter les coups.

Sur la 1^{ère} tête, trois coups sont portés par le premier opérateur. Les deux premiers coups sont donnés à l'arrière du crâne, avec la table de la tête du marteau, le 2^{ème} coup étant plus puissant que le 1^{er}. Nous remarquons que le 1^{er} coup n'a pratiquement pas laissé de marque et que le 2^{ème} coup, porté au même endroit, a permis de laisser une trace plus objectivable. Le 3^{ème} coup est porté sur le sommet du crâne, avec la panne du marteau (fig 7a).

Des photos des embarrures créées sur le crâne sont alors prises, avec une équerre millimétrée posée contre les traces (fig 7b et 7c). Dans le cadre de l'acquisition pour la photogrammétrie, 67 photos de la tête sont réalisées.

Afin de permettre au logiciel de disposer de points de repères suffisants, une feuille de papier journal est posée sous la tête et les clichés sont pris en tournant plusieurs fois autour de la tête et en zoomant à chaque tour.

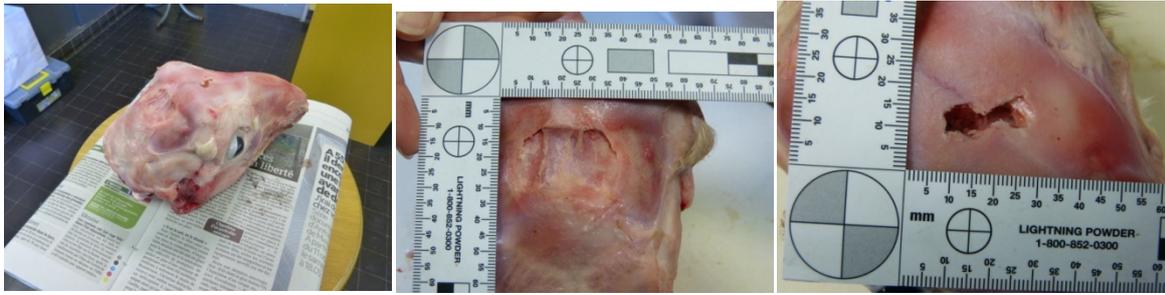


Figure 7: tête 1, coups 1 et 2 (b), coup 3 (c). Source : Marine Jezequel

Sur la 2^{ème} tête, cinq coups sont d'abord portés par le deuxième opérateur, puis deux autres par le premier. Pour les sept coups, la panne du marteau est utilisée. Les trois premiers coups sont portés à l'arrière du crâne, par le deuxième opérateur: le 1^{er} au milieu, le 2^{ème} à gauche et le 3^{ème} à droite. Puis deux coups sont portés sur le sommet du crâne, toujours par le deuxième opérateur, le premier coup ayant légèrement dérapé. Le premier opérateur porte le 6^{ème} coup sur le sommet du crâne, puis le 7^{ème} sur le museau (fig 8a). Comme pour la première tête, des photos des embarrures laissées sur le crâne sont ensuite prises, avec une équerre millimétrée posée contre les traces (fig 8b,c et 9), et une acquisition de 84 photos est réalisée pour la future réalisation du modèle 3D par photogrammétrie.



Figure 8: tête 2, coups 1 (au centre sur b), 2 (à gauche sur b) et 3 (à droite sur b et c). Source : Marine Jezequel



Figure 9: tête 2, coups 4 et 5 (a), 6 (b) et 7 (c). Source : Marine Jezequel

- **Dissection et ébouillantage des têtes d'agneaux**

Afin de poursuivre les acquisitions surfaciques, non plus au niveau cutané mais sur le plan osseux, nous réalisons une dépose de la mandibule (fig 10a) et un « ébouillantage des têtes d'agneaux » (fig 10b).

La finalité de cette action, comme nous l'avons dit précédemment, est d'évaluer la pertinence ou non de l'observation des traces au niveau cutané et/ou au niveau osseux pour une meilleure exploitation des données, et ainsi d'observer une éventuelle perte d'information suite à la squelettisation.

Une première analyse visuelle des crânes après traitement nous permet de constater une élimination des lésions cutanées de surface, et par conséquent une première perte d'information.



Figure 10: dépose de la mandibule (a) et ébouillantage (b). Source : Marine Jezequel

- **Préparation des crânes et du marteau avant acquisition scanner et photogrammétrique**

Lors de l'étape suivante, afin de réaliser des acquisitions surfaciques laser et photogrammétrique de qualité, il est nécessaire de placer des points de repères sur les objets d'études, permettant ainsi aux logiciels de modélisation de pouvoir favoriser l'alignement des photos et ainsi reproduire de façon fiable les objets réels en 3D.

Ces repères sont représentés par des points et des croix réalisés au crayon à papier à pointe très fine (fig 11a). Nous avons, de la même façon, réalisé des repères sur le marteau, représentés par des points au Blanco sur la tête et par des points et des croix au crayon à papier sur le manche (fig 11b).



Figure 11: crâne 1 devant et crâne 2 derrière (a), marteau (b). Source : Marine Jezequel

Une analyse visuelle des traces présentes au niveau des surfaces osseuses met en évidence une perte d'informations. En effet, les embarrures réalisées suite aux coups ne sont pas toutes objectivables. En effet, sur le crâne 1 (fig 12a,b), seuls les coups 2 et 3 sont visibles au niveau osseux, comme nous avons pu le constater au moment des frappes (le coup 1 n'était pas assez puissant). Cependant, sur le crâne 2 (fig 12c), la 7^{ème} frappe réalisée au niveau du museau n'a laissé aucune trace. Ceci s'explique par le caractère cartilagineux du museau, qui s'est éliminé lors de l'ébouillantage. De plus, on peut voir que certains coups ont laissé des embarrures plus prononcées que d'autres. En effet, la 1^{ère} et la 3^{ème} frappe ont peu marqué, et les coups 2, 4, 5 et 6 ont plus marqué. Cela peut s'expliquer par le fait que les frappes 1 et 3 ont été portées avec un degré de force limité, et par une personne non entraînée (le deuxième opérateur).



Figure 12: crâne 1 (a, b) et crâne 2 (c). Source : Marine Jezequel

b. Acquisition à l'aide du scanner à laser surfacique

- Description du matériel

Le scanner que nous avons utilisé est le 3D scanner HD de chez NextEngine ®. Ce scanner est équipé d'un appareil à laser surfacique (le scanner 3D HD) (fig 13a), d'une table tournante de

positionnement de l'objet (Multi Drive) (fig 13a), d'une plateforme invisible de positionnement de l'objet (Black Bases), d'un logiciel de scan et de modelage de l'objet (ScanStudio HD), avec possibilité d'utiliser un « pinceau poudreux » pour les objets brillants (Extra Powder Pen) (fig 13b) (20).



Figure 13: le 3D scanner HD (a), l'Extra Powder Pen (b). Source : www.nextengine.com (20)

- **Acquisition des crânes**

Pour procéder à l'acquisition laser des crânes, nous avons choisi d'utiliser la table tournante (Multi Drive). Le crâne est donc tout d'abord placé et fixé sur la table à l'aide de Pâte à Fix (fig 14a). Puis, à l'aide du logiciel Scan Studio HD, une face du crâne à scanner est sélectionnée en réglant la résolution, la zone de scan, la portée, l'angulation et la luminosité (résolution de 17000 points/in², portée moyenne et lumière neutre) (fig 14b).



Figure 14: fixation du crâne sur le Multi Drive (a), réglage des paramètres (b). Source : Marine Jezequel

Lorsque la 1^{ère} face est scannée, l'angulation du scan est modifiée en faisant pivoter la table tournante et l'acquisition d'une 2^{ème} face du crâne est lancée. Lorsque deux faces sont scannées, à l'aide du logiciel, une procédure d'alignement est effectuée en s'aidant des points de repères

précédemment marqués au crayon à la surface de l'os (croix et points) (fig 15). Pour obtenir un alignement précis, il est nécessaire de positionner 6 à 8 points de repères (billes de couleur). Une fois l'alignement effectué, une fusion des deux images est réalisée afin d'obtenir une reconstruction partielle du crâne en 3D. Cette procédure est réalisée jusqu'à l'obtention d'un modèle surfacique 3D complet du crâne. Au final, sept acquisitions d'angulations différentes ont été nécessaires. Les parties inutiles pour l'analyse sont alors gommées (ici la table de positionnement) grâce à l'outil gomme du logiciel Scan Studio HD.

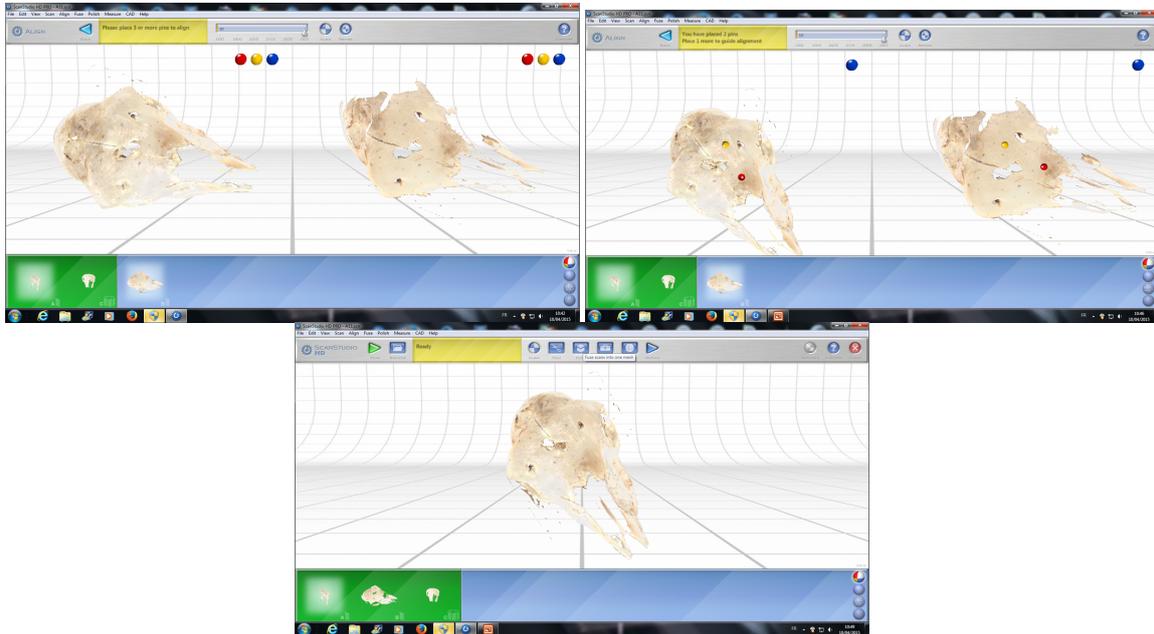


Figure 15: alignement des images (a), mise en place des points de repères (b) et fusion (c). Source : Marine Jezequel

Le modèle 3D obtenu est enregistré en formats obj et ply, offrant ainsi la possibilité d'importer le modèle dans MeshLab, un logiciel de traitement de maillages 3D. A l'aide de ce logiciel, il est possible de visualiser la reconstruction 3D du crâne en nuage de points, en texture (fig 16a) et/ou en maillage (fig 16b et 17).

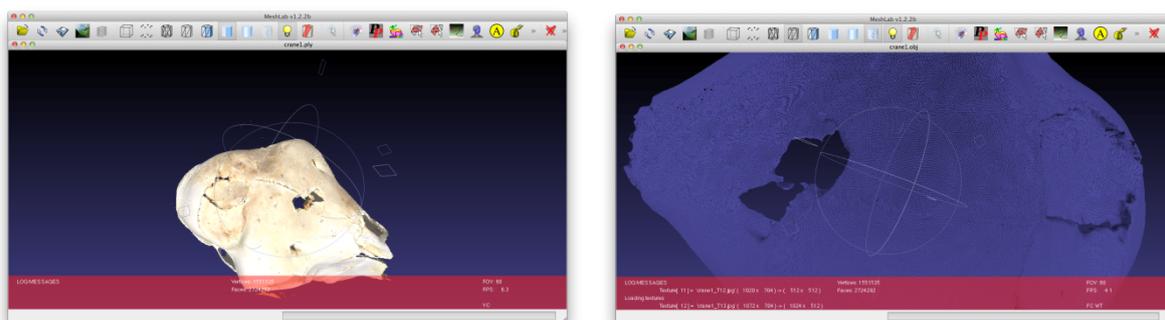


Figure 16: crâne 1 en texture (a) et en maillage (b) dans MeshLab. Source : Marine Jezequel

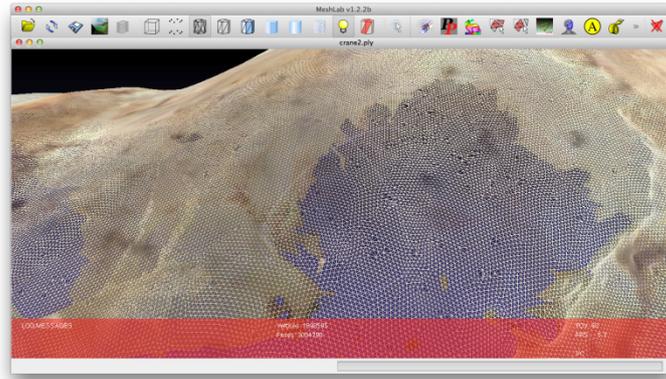


Figure 17 : crâne 2 en maillage dans MeshLab. Source : Marine Jezequel

- **Etude de la précision d'acquisition du scanner à laser surfacique**

Afin d'obtenir des modèles 3D représentant le plus précisément possible les deux crânes, et en particulier les embarrures, nous avons étudié les différents réglages du scanner, en modifiant la précision, la portée, ou la lumière.

La précision se mesure en « inch carré » (in²) qu'on traduit en français par le « pouce carré », sachant qu'un pouce est égal à 2,54 centimètres. La portée représente la distance entre le scanner surfacique et l'objet à scanner. Nous avons donc fait varier la précision (de 125 à 17000 points/in²), la portée (moyenne ou macroscopique), et la lumière (neutre ou light). Pour cette étude de précision, nous avons choisi de scanner le premier crâne, et nous avons analysé successivement le coup porté à l'arrière puis celui porté à l'avant du crâne.

Avec une précision de 125 points/in², une portée moyenne et une lumière neutre, l'image obtenue présente une bonne texture globale. Cette texture sera identique pour tous les modèles puisque l'appareil photo, inclus au sein du scanner, réalise l'acquisition de la texture. Cependant, le maillage du modèle est très grossier (fig 18). Cette précision est suffisante pour un objet de forme simple, mais insuffisante pour enregistrer les limites des structures osseuses lésées.

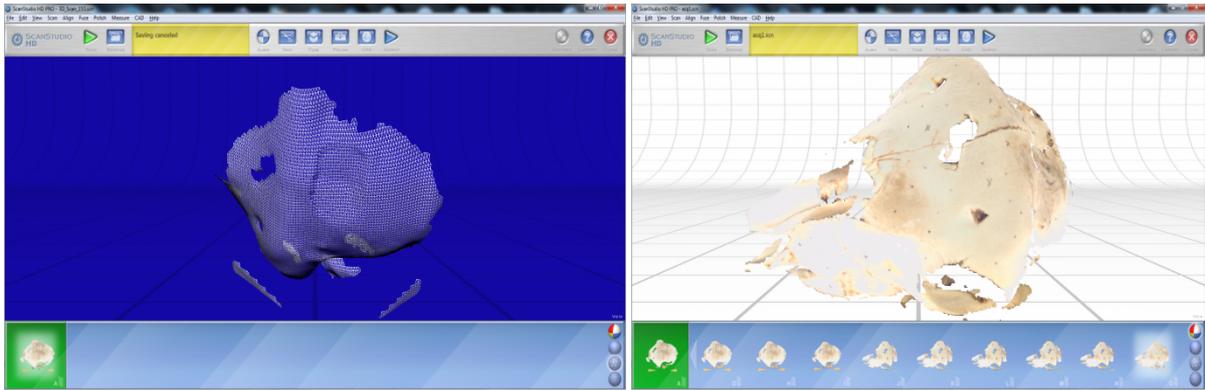


Figure 18: A1 (coup arrière) en maillage (a) et A2 (coup avant) en texture (b). Source : Marine Jezequel

En augmentant la précision à 500 points/in², avec une portée moyenne et une lumière neutre, l'image obtenue présente un maillage plus fin et un meilleur détail des surfaces, notamment une meilleure vue des « vides » de l'embarrure. En effet, au niveau du coup porté à l'arrière du crâne (D1), on observe des espaces sur le bord avant de la plaie (fig 19a). En choisissant une portée macroscopique, nous ne remarquons aucune différence sur l'image obtenue comparé à celle de la portée moyenne (fig 19b,c). Cette précision est cependant toujours insuffisante pour scanner précisément les limites osseuses lésées.

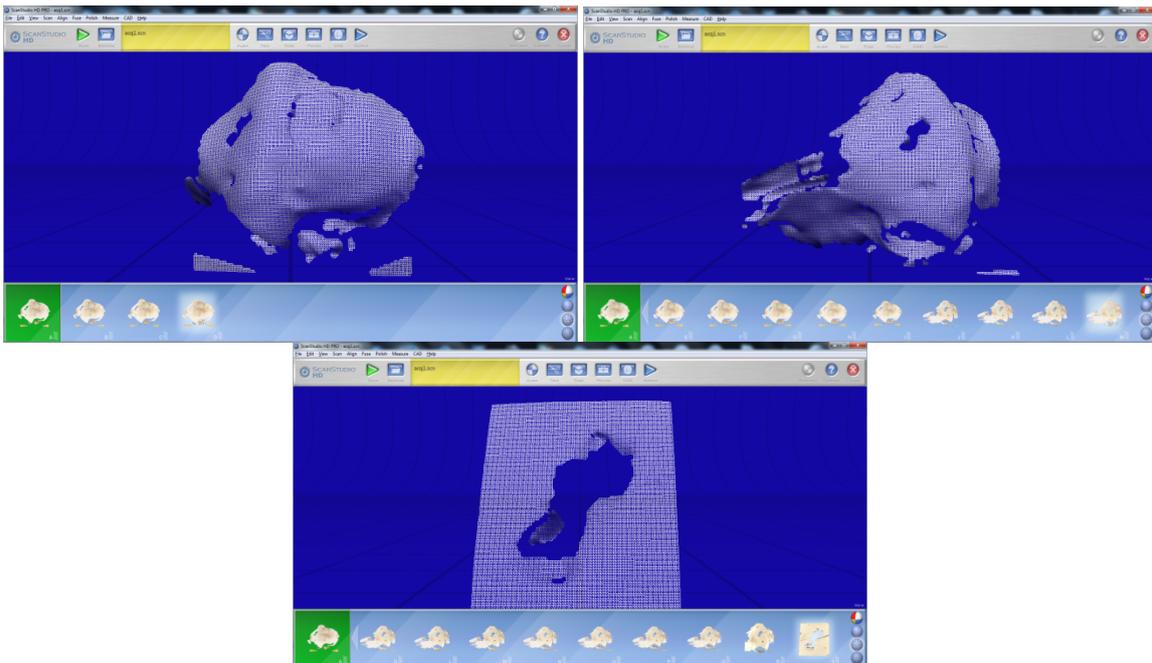


Figure 19: D1 (coup arrière) (a), D2 (coup avant) (b) et D3 (coup avant) (c) en maillage. Source : Marine Jezequel

En augmentant la précision à 2000 points/in², avec une portée moyenne et une lumière neutre, on obtient un maillage fin donnant à l'image une couleur blanchâtre, les limites des embarrures sont bien dessinées et les détails sont précis (fig 20). En effet, au niveau du coup porté à l'arrière du crâne (F1), on observe la totalité des contours de l'embarrure et même l'affaissement au milieu (fig 20a). Cette précision paraît suffisamment importante pour enregistrer les limites osseuses lésées.

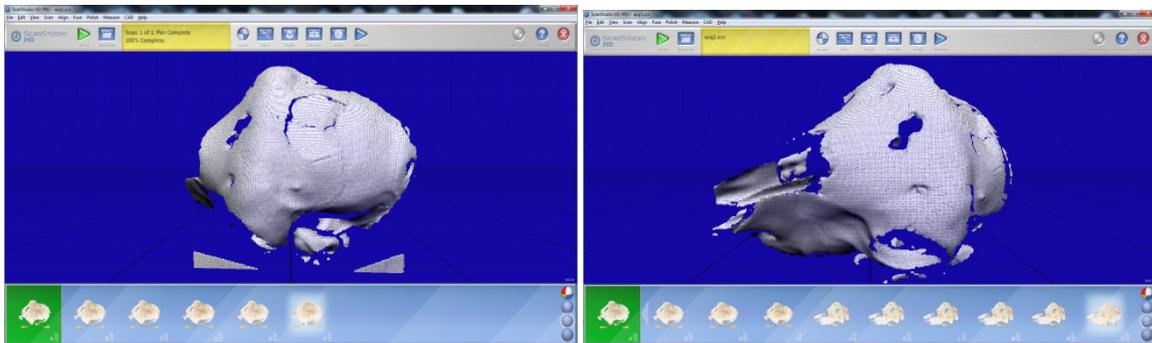


Figure 20: F1 (coup arrière) (a) et F2 (coup avant) (b). Source : Marine Jezequel

En augmentant la précision à 17000 points/in², avec une portée moyenne et une lumière neutre, on obtient un maillage très fin rendant l'image totalement blanche, les bords des embarrures sont parfaitement dessinés, et on peut même voir l'apparition des sutures crâniennes (fig 21a,b). De plus, au niveau du coup arrière (H1), les deux « blocs » de l'embarrure sont très distincts (fig 21a). Cette précision est très acceptable pour scanner le crâne de façon fiable. En choisissant une portée macroscopique, on remarque une meilleure précision des détails des bords de l'embarrure (fig 21c). En choisissant une lumière light, on observe un état de surface moins ponctué, plus lisse, mais l'aspect des bords de l'embarrure est équivalent à celui obtenu avec la lumière neutre (fig 21d). La lumière light est plutôt utile pour scanner un objet dont la surface est brillante, comme par exemple le marteau.

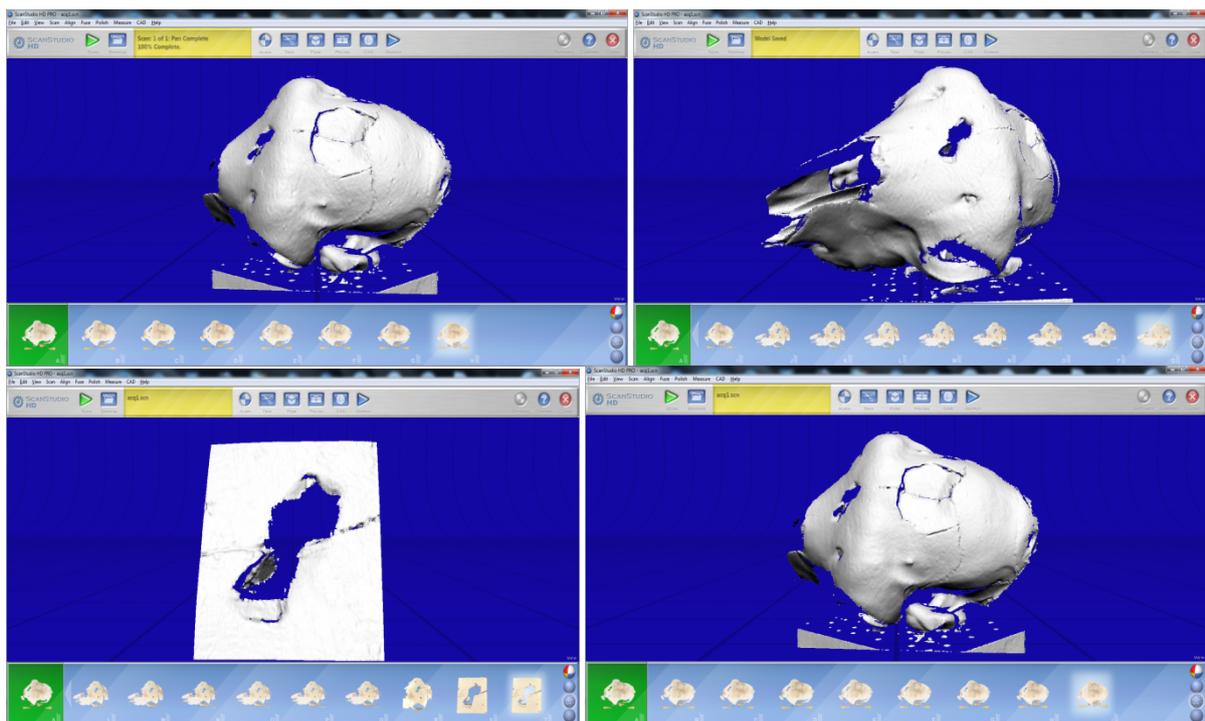


Figure 21: H1 (coup arrière) (a), H2 (coup avant) (b), H3 (coup avant) (c) et H4 (coup arrière) (d). Source : Marine Jezequel

Le tableau 1 présente un récapitulatif de cette étude de précision du scanner.

Tableau 1 : étude de précision du scanner. Source : Marine Jezequel

	<i>PRECISION</i>	<i>COUPS</i>		<i>PORTEE</i>		<i>LUMIERE</i>		<i>RESULTATS</i>	
	<i>(points/in2)</i>	arrière	avant	moyenne	macro	neutre	light		
QUICK	125	A1	A2	x		x		insuffisant	
	220	B1	B2	x		x		insuffisant	
SD	280	C1	C2	x		x		insuffisant	
	500	D1	D2	x		x		insuffisant	
			D3		x	x		insuffisant	
HD	1100	E1	E2	x		x		insuffisant	
	2000	F1	F2	x		x		acceptable	
	4400	G1	G2	x		x		Très précis	
	17000	H1	H2	x			x		Très précis
				H3		x	x		Très précis
		H4		x			x	Très précis	

Les photos ci-dessous (fig 22) illustrent les résultats du tableau.

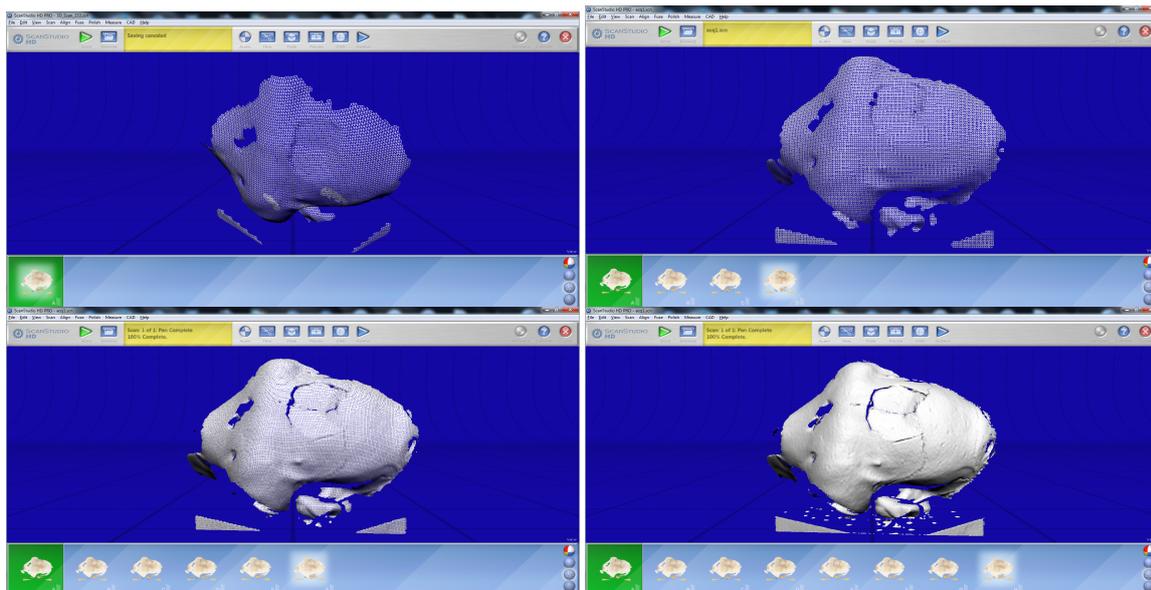


Figure 22: 125 points/in2 (a), 500 points/in2 (b), 2000 points/in2 (c) et 17000 points/in2 (d). Source : Marine Jezequel

Les résultats nous montrent que les réglages à privilégier pour une acquisition fiable et précise sont :

- une précision maximale (17000 points/in2)

- une portée macroscopique pour cibler des zones précises
- une portée moyenne pour une morphologie générale
- une lumière neutre pour une surface mate
- une lumière light pour une surface brillante

- **Acquisition du marteau**

De la même manière que pour les crânes, le marteau (l'objet vulnérant) est scanné après avoir positionné des points de repères, au crayon sur le manche, et au blanco sur la tête.

Cependant, aux égards de la texture de ce dernier, nous rencontrons des difficultés à faire l'acquisition de la tête. En effet, la tête du marteau étant de couleur uniforme noire, sans irrégularité, et d'aspect brillant, le faisceau laser présente en surface une distorsion, perturbant ainsi la qualité de la reconstruction.

Afin d'obtenir une acquisition, la tête du marteau doit alors être poudrée, à l'aide de l'Extra Powder Pen, restituant ainsi un aspect mat de surface, reconnaissable par le rayon laser. Le marteau est alors fixé sur un tuteur et l'acquisition lancée.

Les réglages suivants ont été choisis : résolution de 1100 points/in², lumière light, plus adaptée à la texture brillante de la tête du marteau, et portée moyenne.

Plusieurs séries d'acquisitions sont alors réalisées avec un nombre plus ou moins important de faces scannées, et donc plusieurs modèles 3D du marteau. Les modèles sont alors enregistrés sous les formats ply et obj, afin d'être importés dans MeshLab.

Les deux premiers modèles 3D obtenus (marteau 1 et marteau 2) permettent d'objectiver la table du marteau (fig 23).

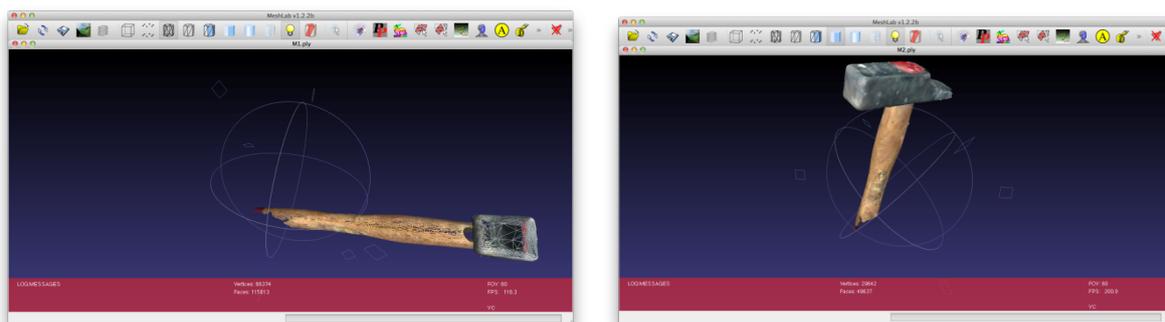


Figure 23: marteau 1 en maillage (a) et marteau 2 en texture (b). Source : Marine Jezequel

Sur la figure 23a, nous remarquons que le maillage est assez grossier et irrégulier. La figure 23b présente une texture médiocre et nous pouvons voir que seule la table du marteau est analysable.

Le 3^{ème} modèle 3D (marteau 3) permet d'objectiver la panne du marteau (fig 24).

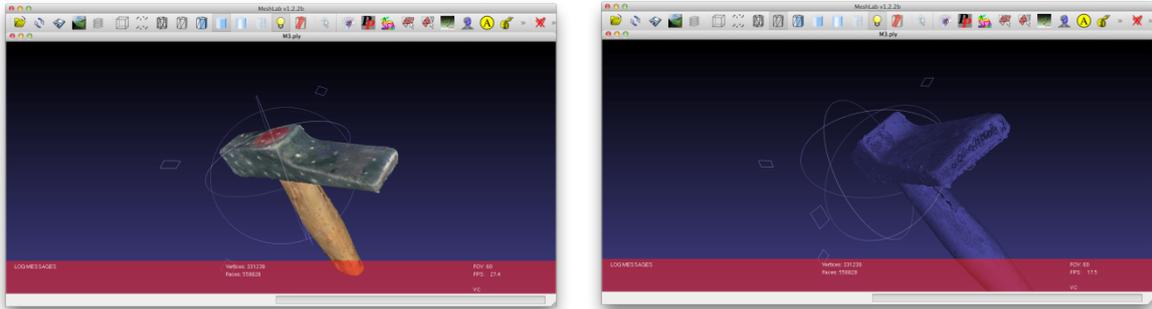


Figure 24: marteau 3 en texture (a) et en maillage (b). Source : Marine Jezequel

Nous remarquons que sur ce 3^{ème} modèle, la texture est plus précise et le maillage plus fin que sur les deux premiers modèles. Cependant, la texture présente certains flous et quelques manques, et le maillage reste irrégulier.

Pour le 4^{ème} modèle 3D (marteau 4), nous avons réalisé un grand nombre d'acquisitions de différentes faces (fig 25).

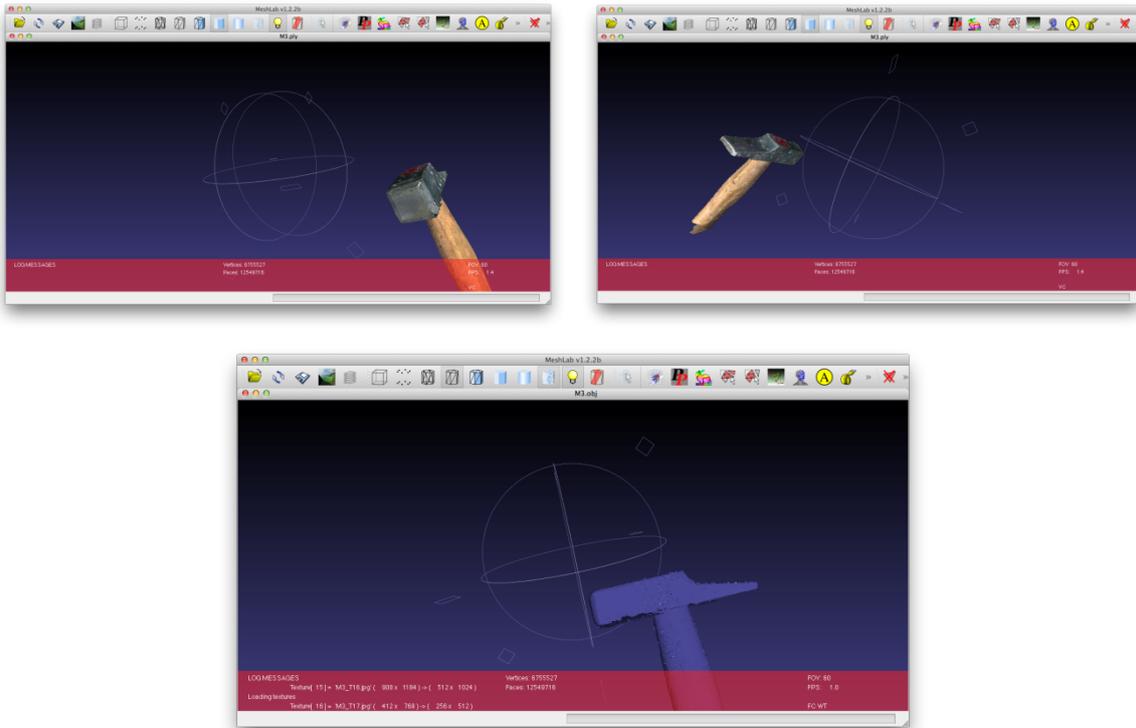


Figure 25: marteau 4 en texture (a et b) et en maillage (c). Source : Marine Jezequel

Nous pouvons analyser sur ce modèle la table et la panne du marteau. La texture est assez précise, et le maillage général est très fin. Cependant, étant donné le grand nombre d'acquisitions, la taille des fichiers est importante (1,03 Go en obj, et 264,5 Mo en ply) et il est nécessaire d'avoir un ordinateur puissant pour pouvoir manipuler le modèle de manière fiable (8 Go de RAM minimum, carte graphique dédiée de 2 Go).

c. Acquisition par méthode photogrammétrique

- Principe

Le principe de la photogrammétrie est de reconstruire un modèle 3D d'un objet à partir d'une série de photos (60 minimum) de cet objet (fig 26). Pour se faire, nous avons utilisé un appareil photo de type Bridge de référence DMC-FZ100 de chez Lumix Panasonic®, de 14 méga pixels, et nous avons réalisé des acquisitions sans flash et sans zoom. De plus, pour éviter les erreurs d'acquisition, nous avons veillé à éliminer toute source lumineuse autre que la lumière de la pièce (écran d'ordinateur, fenêtre) et seul le photographe est resté dans la salle. L'acquisition photo se réalise en tournant plusieurs fois autour du modèle, de façon régulière, en se rapprochant à chaque tour. De plus, il est nécessaire d'utiliser des points de repère pour que le logiciel puisse aligner les photos et reconstruire le modèle 3D. Ces points de repère sont présents sur l'objet (les points et les croix sur les crânes, les points au blanco sur la tête du marteau) et autour de l'objet (la feuille de papier journal, les mire, et le cube comme nous le verrons plus tard).

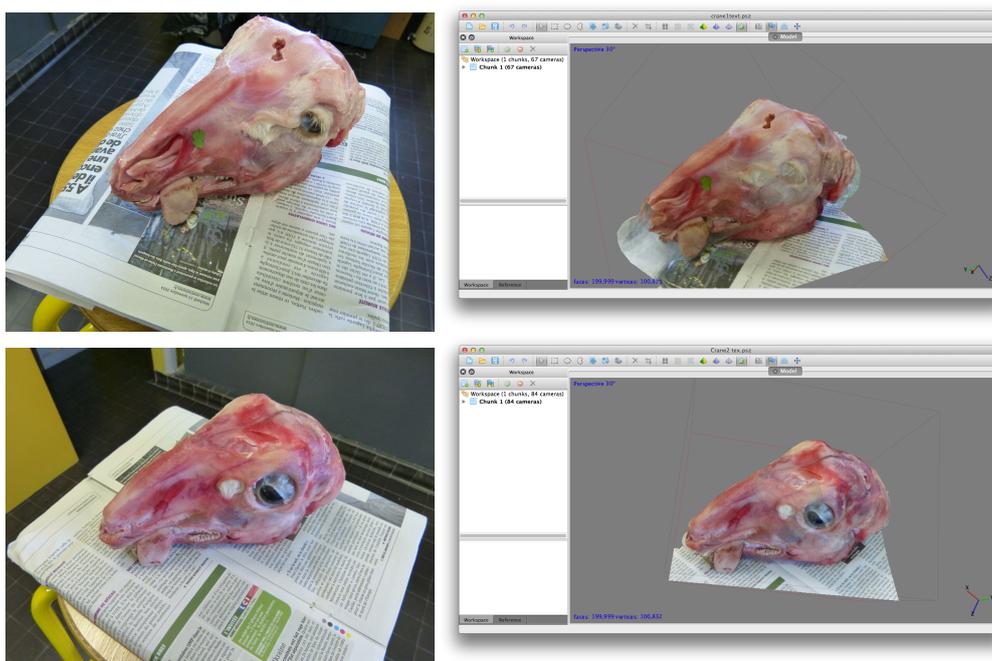


Figure 26: tête 1 en photo (a) et en 3D (b), tête 2 en photo (c) et en 3D (d). Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du crâne 1**

Pour l'acquisition photogrammétrique du premier crâne, 73 photos du crâne posé sur une feuille de papier journal sont prises. Puis un modèle 3D du crâne est réalisé à l'aide de deux logiciels différents.

D'une part, le modèle 3D est reconstruit dans le logiciel 123D catch, utilisable directement en ligne sur internet. Ce logiciel permet de visualiser le modèle 3D en texture (fig 27a). De plus, ce modèle issu de 123D catch est exportable dans le logiciel MeshLab, afin d'être analysé en texture et en maillage (fig 27b). Nous remarquons que le modèle obtenu présente un maillage assez fin.

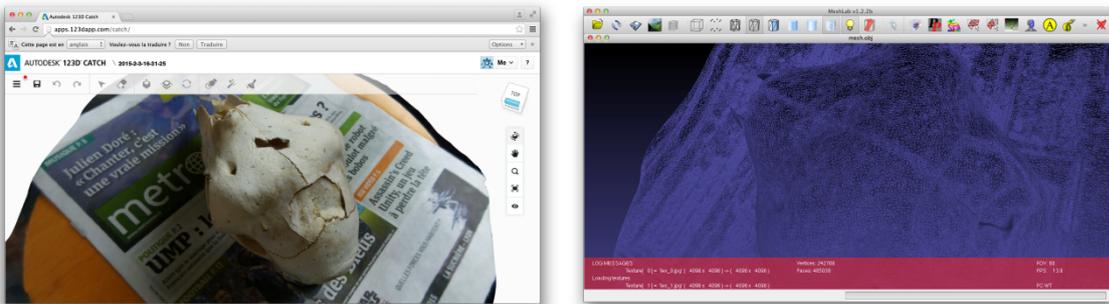


Figure 27: crâne 1 dans 123Dcatch en texture (a) et dans MeshLab en maillage (b). Source : Marine Jezequel

D'autre part, le modèle 3D du crâne est reconstruit dans le logiciel Photoscan Pro (fig 28). Ce logiciel permet d'analyser le modèle en nuage en points, en maillage, ou en texture. Ce deuxième logiciel permet d'obtenir un modèle de maillage très fin.

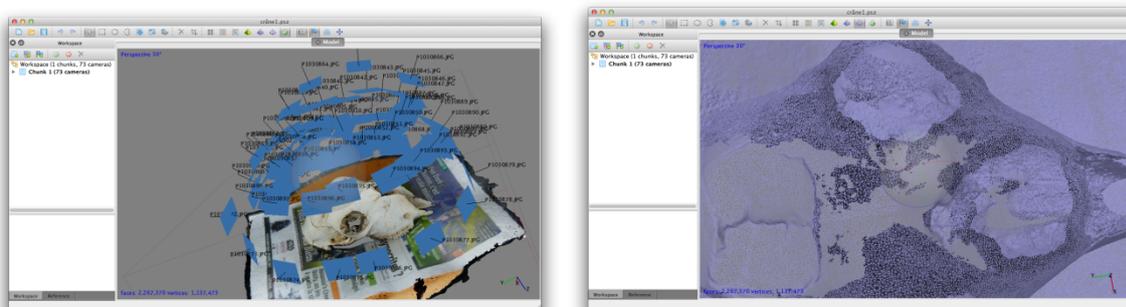


Figure 28: répartition des photos autour du crâne (a) et finesse du maillage (b). Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du crâne 2**

Pour l'acquisition photogrammétrique du deuxième crâne, 90 photos du crâne posé sur une feuille de papier journal sont prises. De même que pour le premier crâne, des modèles 3D sont élaborés à partir de 123D catch et de PhotoScan. Nous observons un manque de précision à l'arrière du crâne dans 123D catch, alors que la texture est parfaite dans PhotoScan (fig 29a,b). Le maillage apparaît assez fin sur le modèle issu de 123D catch visionné dans MeshLab (fig 29c), alors que le nuage de points du modèle issu de PhotoScan est très dense (fig 29d). Nous en tirons la même conclusion que lors de l'étude du premier crâne : PhotoScan est plus précis que 123D catch.

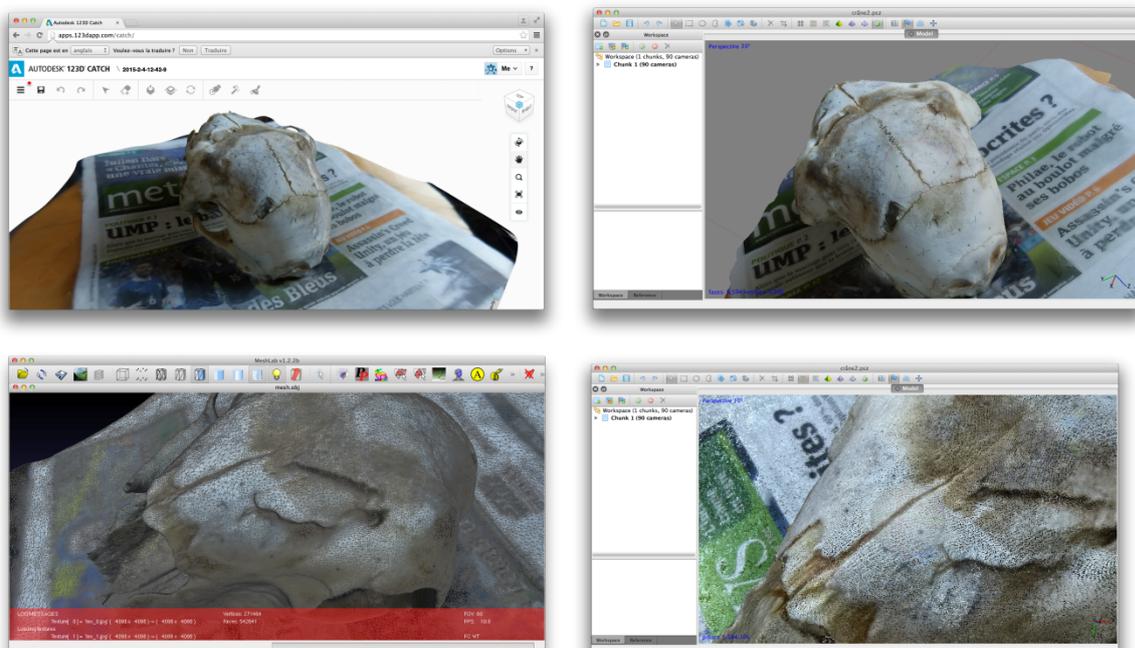


Figure 29: textures dans 123D catch (a) et dans PhotoScan (b), maillage et nuage de points dans MeshLab (c) et dans PhotoScan (d). Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du marteau**

Pour la première acquisition photogrammétrique du marteau, 75 photos sont prises, le marteau étant maintenu par un tuteur, une feuille de papier journal placée en dessous. Cependant, du fait de distorsions, aucun modèle n'a pu être élaboré dans 123D catch et le modèle issu de PhotoScan n'est pas analysable (fig 30). Cela est probablement dû à l'état de surface de la tête du marteau. En effet, cet aspect brillant ne permet pas la reconnaissance de points de repère par le logiciel. Nous devons donc trouver un moyen pour palier à ce problème.

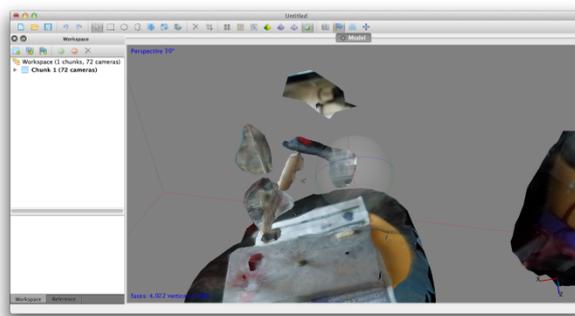


Figure 30 : mauvaise texture du marteau dans PhotoScan. Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du marteau avec un cube**

Afin que le logiciel puisse mieux aligner les repères sur la tête du marteau, un élément complémentaire est adjoint dans la scène. Un cube perforé de dimensions connues est usiné par prototypage et servira ainsi de référentiel en terme d'unité de mesure pour établir des mensurations sur le marteau (fig 31).

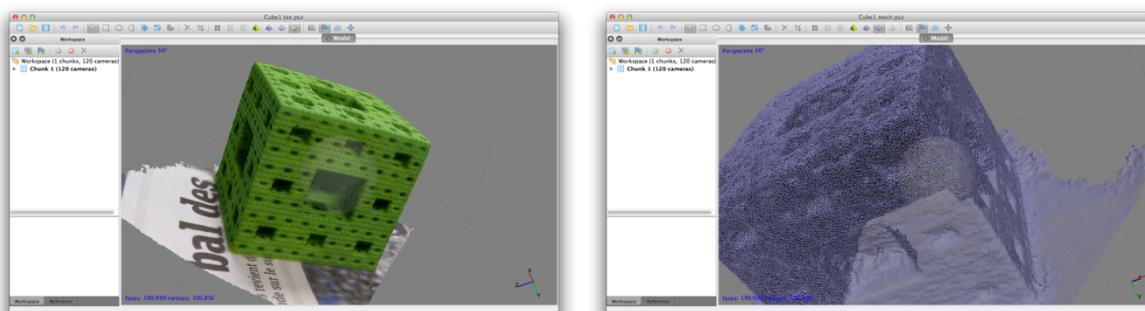


Figure 31: cube en texture et en maillage. Source : Marine Jezequel

Le modèle 3D du marteau reconstruit à partir de 77 photos est uniquement élaboré dans PhotoScan, car les modèles issus de 123D catch n'étaient pas suffisamment précis.

Afin d'obtenir une reconstruction précise, il est nécessaire de recadrer par « cropping » la zone à reconstruire en la centrant sur le marteau afin d'éliminer les interférences occasionnées par l'environnement proche (fig 32a,b).

Ainsi, le modèle obtenu présente une meilleure texture et un nuage de points plus dense, mais le maillage reste insuffisant (fig 32c,d).

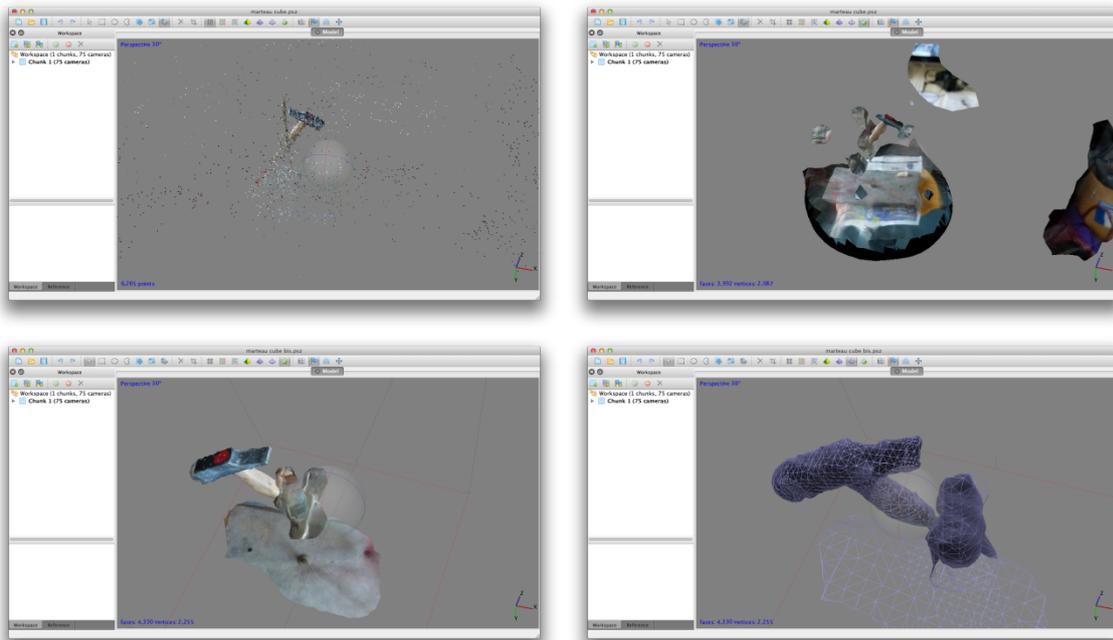


Figure 32: nuage de points et texture du modèle non recadré (a et b), texture et maillage du modèle recadré(c et d). Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du crâne 1 avec le cube**

Afin de comparer différentes méthodes d'acquisitions photogrammétriques, un nouveau modèle 3D du premier crâne est réalisé en rajoutant le cube. Dans cette finalité, 82 photos du crâne posé sur une feuille de papier journal avec le cube sont effectuées. Le modèle obtenu présente un maillage très fin et une belle texture, mais la face avant droite du crâne est incomplètement reconstituée (fig 33a,b). Cela est probablement dû à un manque de photos dans cette zone (fig 33c). Cependant, l'addition du cube permet une reconstitution fiable du crâne en 3D.

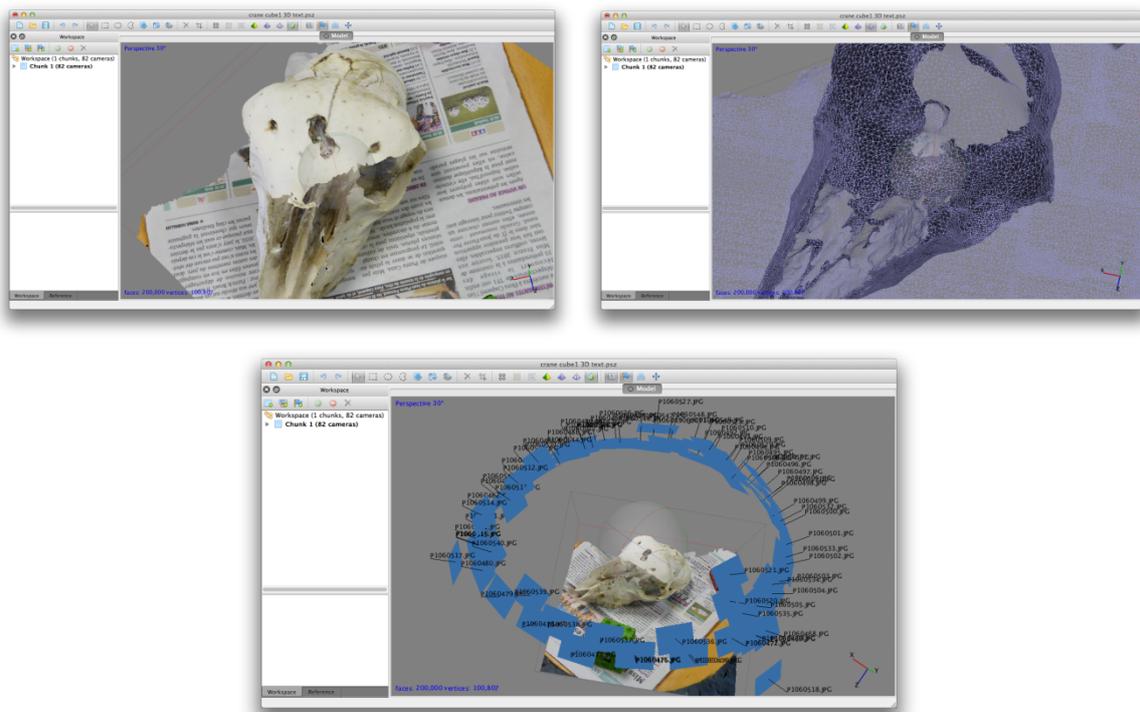


Figure 33: crâne 1, texture (a), maillage (b) et répartition des photos (c). Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du crâne 2 avec des mires**

Toujours dans un souci de comparaison, une autre méthode d'acquisition photogrammétrique est testée en plaçant, sous le deuxième crâne, une feuille sur laquelle sont représentées différentes mires.

La première mire est représentée par un ensemble d'équerres graduées, de cercles et de damiers (fig 34a). Lors de l'acquisition photogrammétrique, 118 photos du crâne posé sur la mire 1 sont prises. Le modèle 3D élaboré présente une belle texture, un maillage fin et la mire est bien visible (fig 34b,c). Cependant, nous observons un manque de reconstruction de la partie avant droite du crâne, certainement dû à une insuffisance de clichés dans cette zone. Cette première mire représente un outil utile à la reconstitution fiable du crâne en 3D.

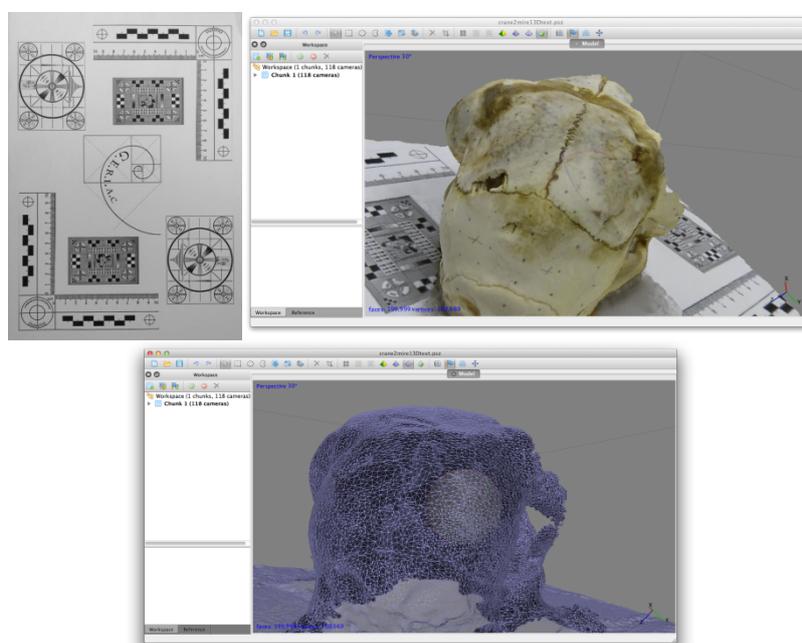


Figure 34: mire 1 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel

La deuxième mire est représentée par un ensemble d'équerres graduées (fig 35a). Lors de l'acquisition photogrammétrique, 121 photos du crâne posé sur la mire 2 sont prises. Le modèle obtenu présente une belle texture et un maillage fin, comme avec la mire 1 (fig 35b,c). Cependant, nous observons un manque de texture au niveau de la partie supérieure du crâne, dû à un manque de photos à ce niveau. Malgré tout, cette deuxième mire représente un outil efficace dans la reconstitution fiable du crâne en 3D.

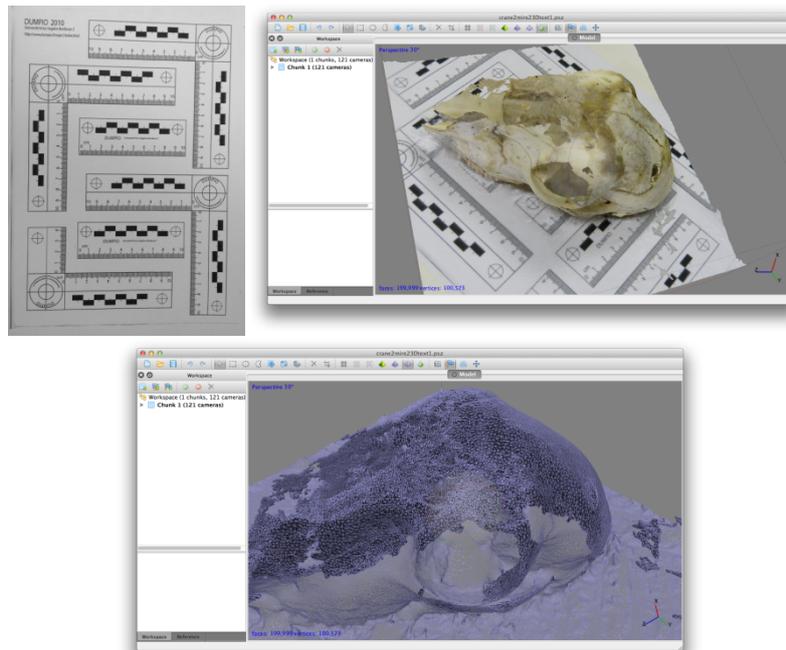


Figure 35: mire 2 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel

La troisième mire est représentée par une feuille à petits carreaux (fig 36a). Lors de l'acquisition photogrammétrique, 152 photos du crâne posé sur la mire 3 sont prises. Le modèle obtenu présente une texture moyenne et un maillage assez grossier (fig 36b,c). De plus, nous visualisons un « flou » dans la texture, au niveau de la partie supérieure du crâne. Cette troisième mire est donc inefficace et insuffisante dans la reconstitution du modèle 3D du crâne.

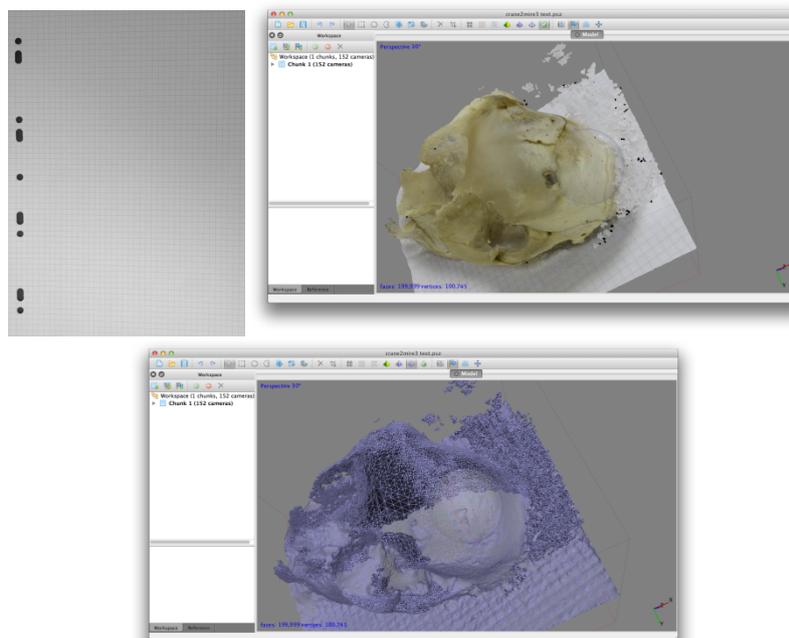


Figure 36: mire 3 (a), texture (b) et maillage (c) du crâne 2. Source : Marine Jezequel

- **Acquisition du marteau avec les mires**

Une première acquisition photogrammétrique du marteau est réalisée. 89 photos du marteau maintenu par le tuteur sont prises, la mire 2 posée en dessous. Le modèle 3D obtenu présente un nuage de points dense, mais la texture et le maillage sont inexploitable car parasités par la pièce environnante (fig 37a,b). Il est donc nécessaire de recadrer la zone à reconstruire en la focalisant sur le marteau, ce qui permet l'élaboration d'un nouveau modèle 3D de texture et de maillage médiocres mais cependant exploitables (fig 37c,d).

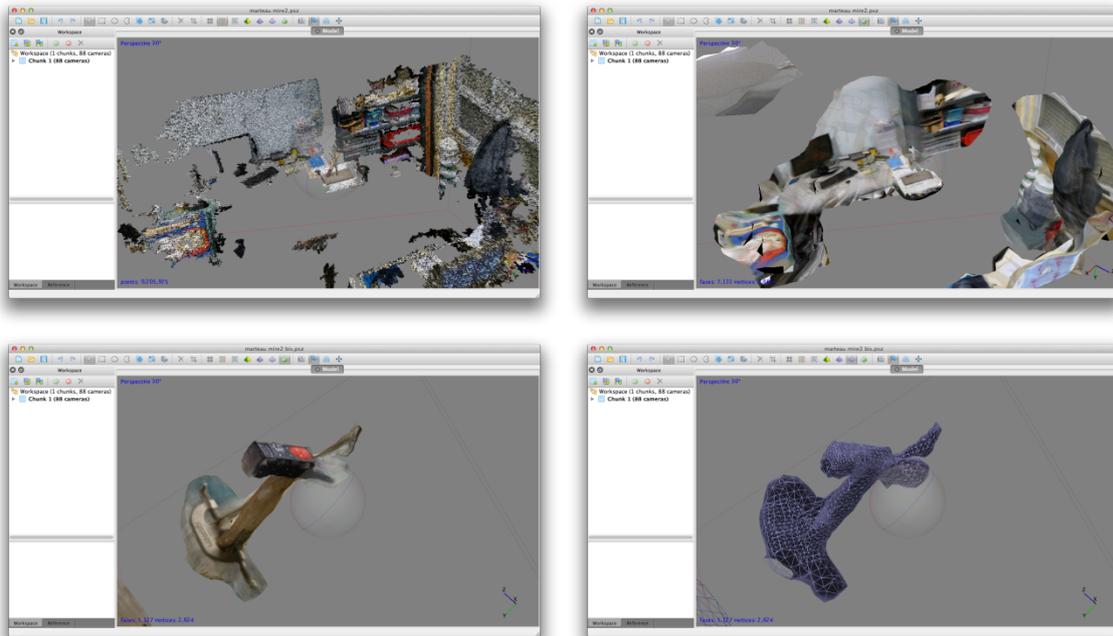


Figure 37: mire 2, nuage de points et texture du premier modèle (a et b), texture et maillage de second modèle (c et d). Source : Marine Jezequel

Lors de la deuxième acquisition photogrammétrique, 80 photos du marteau maintenu par l'Extra Part Gripper sont prises, la mire 1 posée en dessous. La zone de reconstitution est directement modifiée en la recadrant sur le marteau, afin d'avoir le moins possible d'interférences. Cependant, le modèle 3D obtenu présente une texture et un maillage médiocres (fig 38).

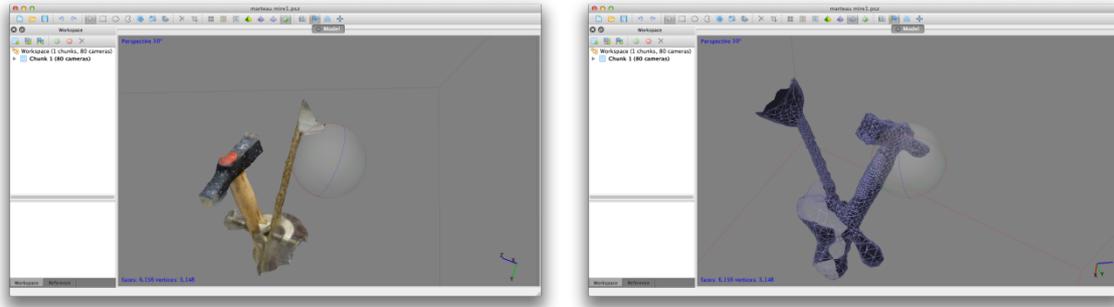


Figure 38: mire 1, texture (a) et maillage (b). Source : Marine Jezequel

Aucune acquisition photogrammétrique n'a été réalisée avec la troisième mire car comme nous l'avons remarqué précédemment, elle est inefficace.

Ainsi, notre étude concernant les acquisitions photogrammétriques nous montre que le logiciel PhotoScan est plus précis que le logiciel 123D catch, en terme de reconstruction 3D des crânes et du marteau. De plus, l'ajout de mires permet d'augmenter la précision de la modélisation 3D des objets. Cependant, l'acquisition photogrammétrique du marteau nécessite un recadrage de la zone de reconstruction, et les modèles 3D obtenus ne sont pas suffisamment précis en terme de texture et de maillage.

d. Analyse de la correspondance entre le marteau et les crânes

Après avoir réalisé les modèles 3D des crânes et du marteau par les techniques de scanner surfacique et de photogrammétrie, nous allons maintenant analyser ces modèles les uns par rapport aux autres, afin d'établir les correspondances recherchées. Pour se faire, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Blender plutôt que MeshLab, car ce dernier ne permet pas l'importation de plusieurs modèles 3D simultanément et rend donc impossible la mise en concordance.

- **Présentation de Blender**

Blender est un logiciel de modélisation, d'animation et de rendu en 3D. Il permet de mettre en relation plusieurs objets et de les animer les uns par rapport aux autres. Ce logiciel présente un grand nombre d'outils. Dans le cas de notre étude, nous avons juste besoin d'établir une

concordance entre deux objets, et nous avons principalement utilisé les outils lampe, caméra et cube (fig 39a), les vues en texture, maillage et solide (fig 39b), et les déplacements rectilignes et courbes (fig 39c).

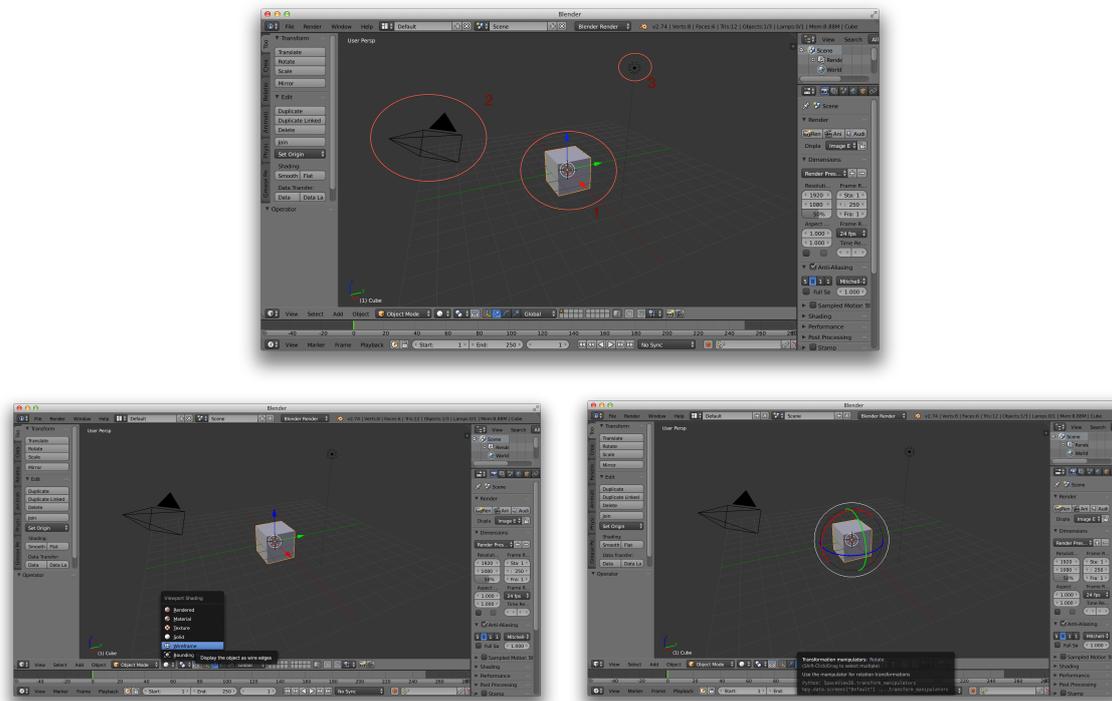


Figure 39: présentation du logiciel Blender. Source : Marine Jezequel

La figure 39a présente les outils cube (1), caméra (2) et lampe (3). Le cube représente l'objet 3D à moduler, la caméra permet d'analyser l'objet 3D sous différents angles de vue, et la lampe permet d'éclairer l'objet 3D au niveau des zones qui nous intéressent. La figure 39b présente les différentes vues de l'objet 3D. On peut ainsi choisir une vue en texture, en solide ou en maillage. Enfin, la figure 39c présente les différents déplacements possibles de l'objet 3D qui peuvent être rectilignes ou courbes.

- **Mise en concordance des modèles 3D issus du scanner surfacique**

1. Crâne 1

Les modèles 3D sont importés sous le format ply, car le format obj ne reproduit pas la texture. Lors de l'acquisition du marteau par le scanner, 4 modèles 3D ont été obtenus. Les deux premiers permettent d'objectiver la table du marteau, le troisième la panne du marteau, et le

quatrième les deux parties à la fois. Ce 4^{ème} modèle est de taille importante (2,54Mo) et est difficile à manipuler sur le logiciel Blender. C'est la raison pour laquelle certaines concordances vont être établies avec le marteau 1 (qui est équivalent au marteau 2), et d'autres avec le marteau 3, en fonction des traces à analyser.

Tout d'abord, les modèles 3D du crâne 1 et du marteau 1 sont importés. Il faut alors les sélectionner tous les deux afin de les réduire simultanément, pour qu'il n'y ait pas de différence d'échelle entre eux. Il est ainsi possible de les bouger l'un par rapport à l'autre grâce à l'outil « déplacements », jusqu'à trouver l'engrènement le plus précis possible. L'outil « lampe » permet d'observer les impacts avec une meilleure visibilité. Lors de la simulation de l'agression, deux coups ont été portés pratiquement au même endroit, ce qui rend difficile le repositionnement du marteau à l'endroit exact de l'impact (fig 40).

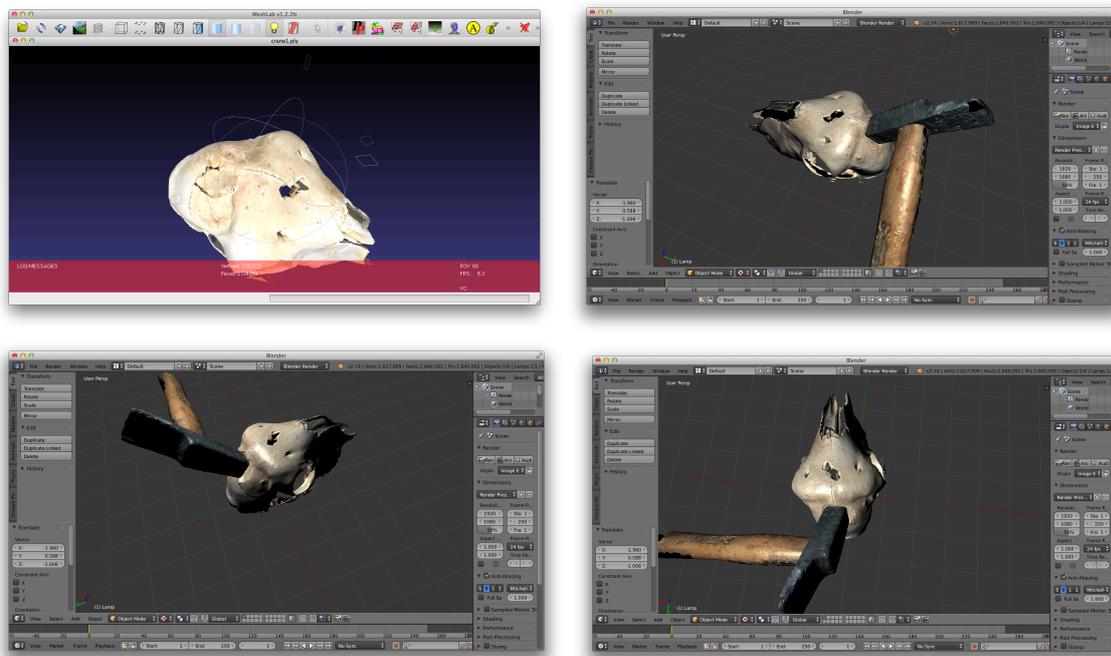


Figure 40: concordance entre le marteau 1 et les coups 1 et 2 portés sur le crâne 1. Source : Marine Jezequel

Puis le même procédé est réalisé avec les modèles 3D du crâne 1 et du marteau 3, sur l'impact du 3^{ème} coup porté. L'enregistrement obtenu est dans ce cas précis et reproductible (fig 41).

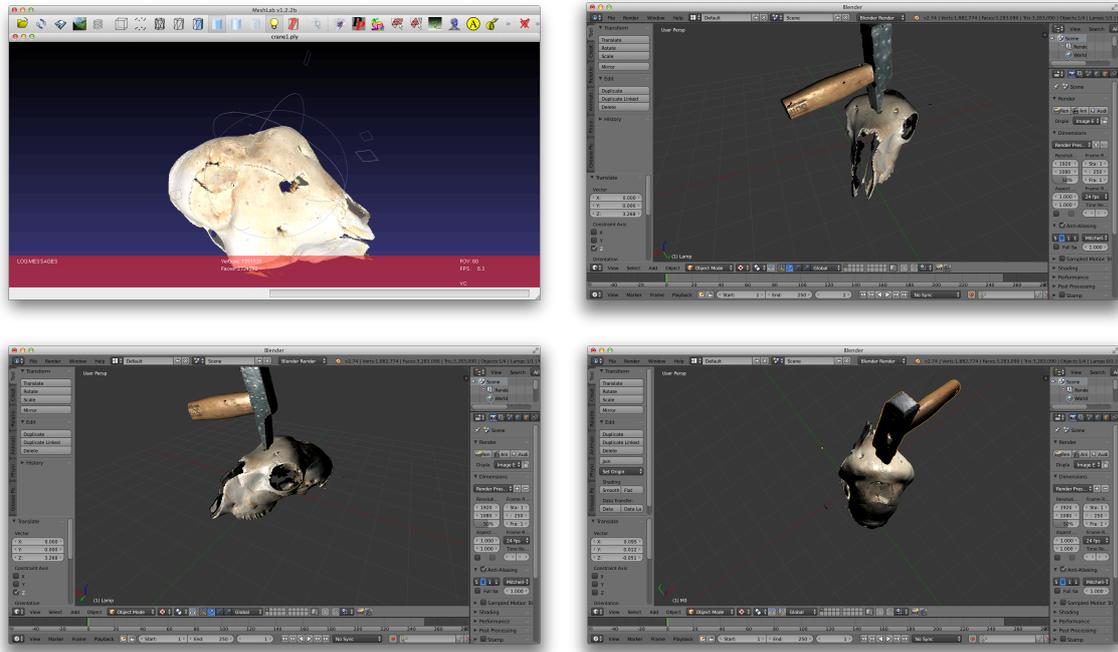


Figure 41: concordance entre le marteau 3 et le coup 3 porté sur le crâne 1. Source : Marine Jezequel

2. Crâne 2

Sur le deuxième crâne, les coups ont été portés uniquement avec la panne du marteau. Le modèle 3D du marteau 3 est donc importé pour établir les correspondances. Les modèles 3D du crâne 2 et du marteau 3 sont d'abord importés, puis ils sont réduits simultanément, et déplacés l'un par rapport à l'autre jusqu'à trouver un enregistrement précis. Lors de la simulation de l'agression, trois premiers coups ont été portés à l'arrière du crâne. Sur le logiciel, nous remarquons que sur ces trois premiers coups, seul le deuxième est réellement exploitable (fig 42).

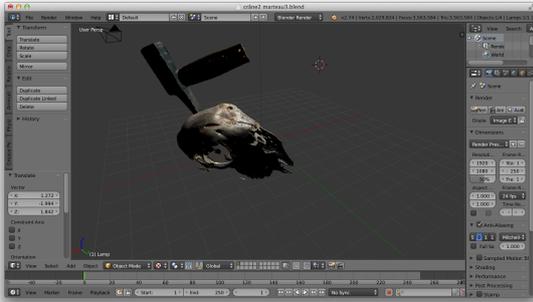
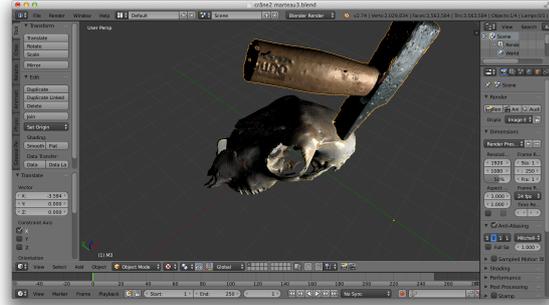
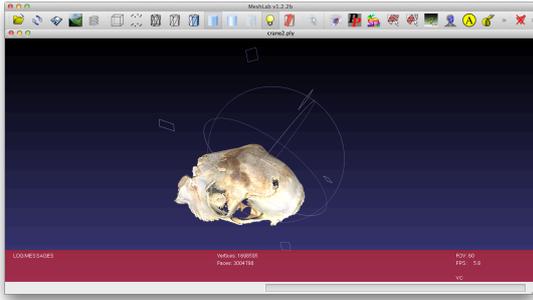


Figure 42: concordance entre le marteau 3 et le coup 2 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel

Le 4^{ème} et le 5^{ème} coups ont été portés pratiquement au même endroit, le 4^{ème} coup ayant dérapé sur le crâne. Ce 4^{ème} coup est donc difficilement exploitable sur le logiciel, mais l'engrainement trouvé sur l'impact du 5^{ème} coup est précis (fig 43).

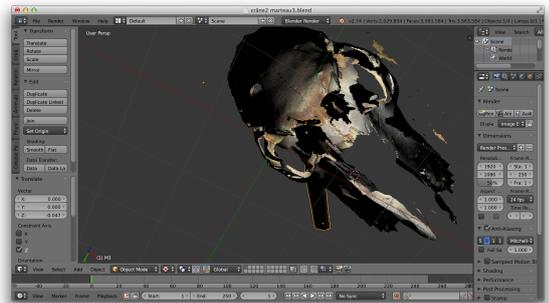
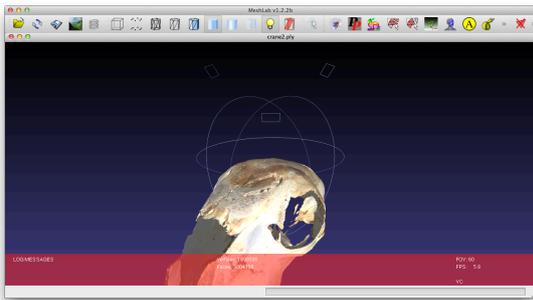


Figure 43: concordance entre le marteau 3 et le coup 5 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel

Enfin, concernant l'impact du 6^{ème} coup, l'engrainement obtenu est précis et reproductible (fig 44).

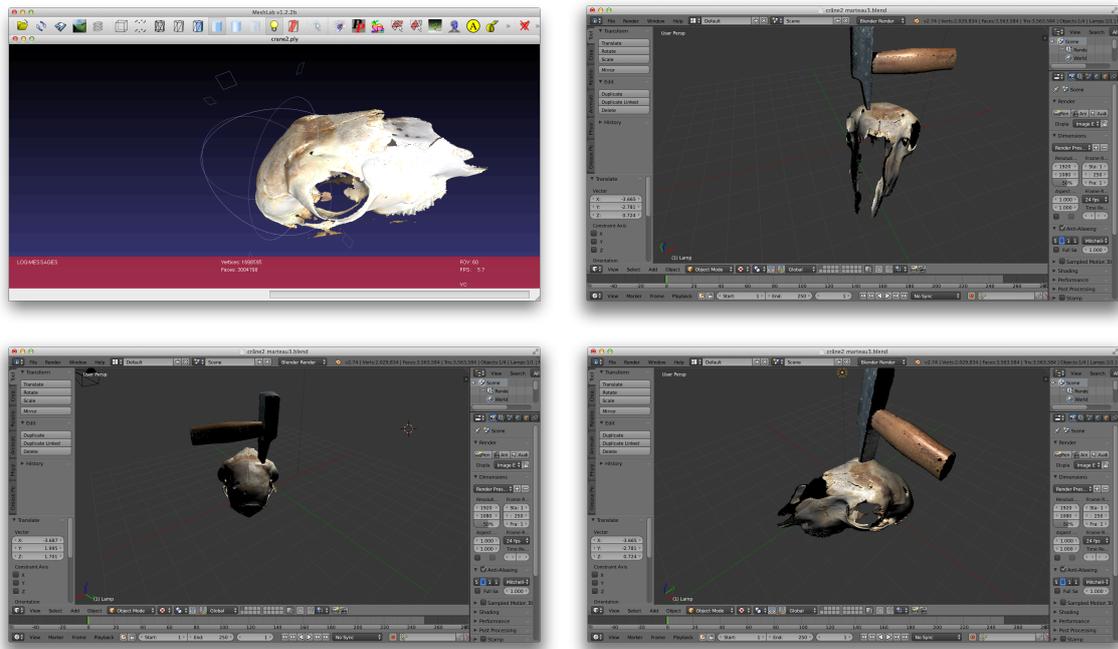


Figure 44: concordance entre le marteau 3 et le coup 6 porté sur le crâne 2. Source : Marine Jezequel

La mise en concordance des modèles 3D des crânes et du marteau issus du scanner surfacique offre donc d'assez bon résultats, en terme de précision d'engrainement et de reproductibilité. De plus, elle permet de donner des informations sur la et les direction(s) des coups portés. Cependant, l'analyse de certains impacts reste difficile dans les cas de dérapages lors des coups, ou de multiples coups portés au même endroit, ou encore lors d'un coup de puissance limitée.

- **Mise en concordance des modèles 3D issus de la photogrammétrie**

La mise en concordance des modèles 3D des crânes et du marteau issus de la photogrammétrie n'a pas pu être réalisée dans notre travail. En effet, plusieurs problèmes se sont posés. Lors de l'importation des modèles 3D sur Blender, la texture n'était pas reproduite (fig 45). Même si la texture n'est pas indispensable à l'enregistrement des modèles, elle donne des informations supplémentaires sur les éventuelles colorations traumatiques et les délimitations des impacts.

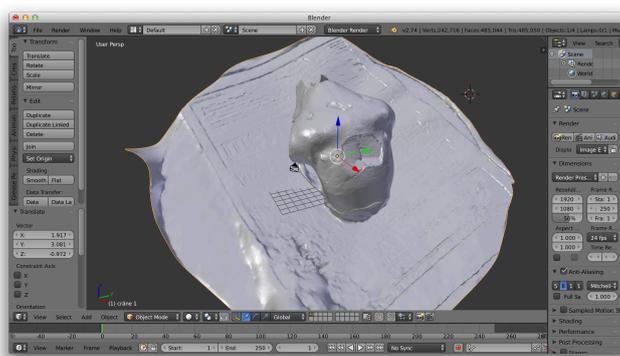


Figure 45 : modèle 3D du crâne 1 issu de la photogrammétrie, sans texture. Source : Marine Jezequel

La véritable difficulté qui s'est présentée a été le problème d'échelle. En effet, afin d'avoir des repères dimensionnels, un cube a été ajouté lors de la prise de photographies des crânes et du marteau. Ce cube ayant des dimensions connues, il aurait permis, lors de l'importation des modèles 3D sur Blender, de les réduire à la même échelle. Or, lors de l'importation du cube dans Blender, nous remarquons que les limites du cube sont floues (fig 46). Il est donc impossible de se baser dessus et de réduire les modèles 3D du crâne et marteau à la même échelle. Par conséquent, les résultats trouvés ne sont ni précis, ni fiables, ni reproductibles.

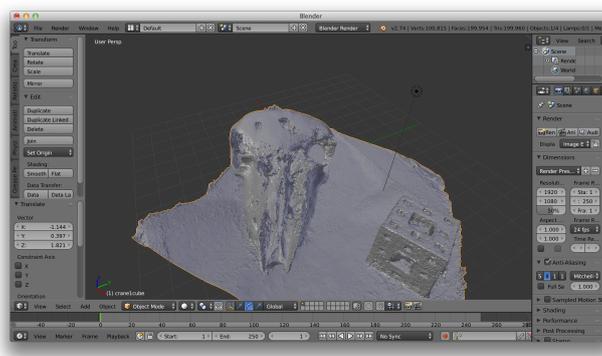


Figure 46 : modèle 3D du crâne 1 avec le cube issu de la photogrammétrie, limites irrégulières du cube. Source : Marine Jezequel

Discussion

a. Intérêts de notre étude

Notre étude permet de montrer qu'avec un matériel simple et facile d'utilisation (un scanner laser de bureau et un ordinateur, ou un appareil photo et un ordinateur) nous pouvons obtenir des modélisations des structures osseuses de bonne qualité, à condition de respecter des méthodes d'acquisition rigoureuses. En effet, les modèles 3D que nous avons obtenus à partir des acquisitions scanner et photogrammétriques sont fiables et précis en terme de structure et de texture. Nous pouvons également réaliser des mises en correspondances précises entre les reconstructions 3D des modèles à analyser. Dans le cas d'une agression par instrument contondant sur le crâne, cela permet à l'expert missionné d'établir des possibilités de compatibilité entre les impacts présents sur le crâne et les différentes armes du crime suspectées.

Le scanner à laser surfacique et la photogrammétrie sont des méthodes d'analyses surfaciques. Elles sont donc non invasives et n'entraînent pas de destruction de la matière. Les données peuvent être stockées, transférées et conservées pour être étudiées a posteriori.

Ces deux méthodes permettent d'obtenir des modèles 3D des objets sur un écran d'ordinateur. Ce caractère virtuel de la 3D permet de donner une information ludique et simple de compréhension pour un public qui ne serait pas spécialisé dans le domaine des sciences légales. Ainsi, ils représentent lors d'un procès d'assise des outils très intéressants que l'expert légiste peut exploiter pour informer les hommes de lois tels que les juges ou les avocats.

b. Difficultés et limites de notre étude

Une des difficultés de notre étude s'est portée sur la durée de modélisation du scanner, et surtout des logiciels de photogrammétrie. En effet, lors des acquisitions scanner, le nombre important d'acquisitions entraîne une augmentation de la taille des fichiers et donc du temps de traitement et de modélisation. Les logiciels de photogrammétrie 123Dcatch et PhotoScan ont mis parfois plus de 20h pour modéliser les objets, sachant que nous prenions en moyenne 70 à 80 photographies de ces objets.

Nous avons également rencontré une difficulté concernant la modélisation du marteau, que ce soit par les méthodes du scanner surfacique ou de photogrammétrie. En effet, l'aspect brillant de

la surface de la tête du marteau le rendait inconnu par les logiciels. L'ajout du poudrage et des points de blanco nous a permis d'obtenir des modèles acceptables en termes de structure et de texture, mais cependant imparfaits. Afin de remédier à ce problème, il serait intéressant de réaliser une empreinte du marteau, et de la couler en plâtre ou en résine. Ainsi, les modèles du marteau seraient d'aspect mat, rendant les acquisitions surfaciques laser et photogrammétrique de meilleure qualité.

Une autre difficulté s'est portée sur la mise en concordance des modèles 3D issus de la photogrammétrie. Les formats des fichiers ne permettaient pas de visualiser la texture, mais le véritable problème résidait dans le fait que nous n'avons pas pu analyser les modèles à la même échelle. En effet, le cube qui devait nous permettre d'avoir les bonnes dimensions n'a pas été reproduit de façon suffisamment précise pour être exploitable. Les engrainements obtenus étaient donc obsolètes et sans intérêt scientifique.

La principale limite de cette étude concerne la mise en concordance des modèles 3D. Même si l'engrainement entre l'arme supposée du crime et l'impact est objectivable et paraît précis, comment prouver lors d'un procès d'assise qu'une autre arme de contours similaires ne pourrait pas être l'arme du crime ? En effet, cette méthode permet de prodiguer une aide précieuse au déroulement de l'enquête judiciaire, mais ne représente pas une preuve en elle-même. Elle permet de confirmer la nature de l'arme du crime si par exemple, un échantillon d'ADN du coupable est retrouvé dessus.

c. Comparaison entre le scanner surfacique et la photogrammétrie

Notre étude nous a montré que le scanner à laser surfacique et la photogrammétrie ne répondent pas exactement aux mêmes indications, mais sont plutôt complémentaires. Le tableau récapitulatif n°2 présente les intérêts et les limites de chacune des deux méthodes.

Tableau 2 : intérêts et limites du scanner surfacique et de la photogrammétrie

	Scanner surfacique	Photogrammétrie
Intérêts	Précision de reproduction de l'objet	Coût réduit
	Echelle identique à la réalité	Transport aisé
	Méthode non invasive	Méthode non invasive
	Utilisation simple	Utilisation simple
Limites		Respect de la texture de l'objet
	Durée du traitement	Durée du traitement
	Nature de l'état de surface de l'objet	Nature de l'état de surface de l'objet
	Texture médiocre	Précision de reproduction de l'objet limitée
	Coût variable	Echelle aléatoire
	Transport pas toujours possible	

En analysant ce tableau, nous remarquons que le scanner à laser surfacique et la photogrammétrie sont tous les deux non invasifs et simples d'utilisation. Le scanner surfacique présente une précision de reproduction supérieure à la photogrammétrie et lui sera donc préféré pour l'analyse d'objets complexes. Cependant, la photogrammétrie a l'avantage d'avoir un coût réduit, une reproduction fiable de la texture des objets, et un matériel portable (appareil photo et ordinateur), alors que certains scanners ne sont pas portables, et s'ils le sont, leur coût est plus élevé. On la préférera donc pour l'acquisition d'objets présents sur une scène de crime, à condition qu'ils présentent une forme simple.

De plus, les modèles 3D des objets issus du scanner à laser surfacique sont modélisés à la même échelle, ce qui n'est pas le cas pour les modèles 3D des objets issus de la photogrammétrie, où l'échelle est aléatoire. Par conséquent, la mise en concordance des objets ne peut pas être réalisée avec les modèles 3D issus de la photogrammétrie. Lors d'une recherche d'une arme de crime, l'expert légiste devra donc utiliser de préférence le scanner à laser surfacique.

Conclusion

Réaliser un travail sur la validité d'une nouvelle méthodologie est un véritable défi dans l'obtention de résultats pertinents. Cette pertinence passe obligatoirement par le stade des expérimentations ou essais.

Le 1^{er} objectif de notre travail était de définir le protocole d'utilisation du scanner à laser surfacique et de la photogrammétrie pour obtenir des reconstructions surfaciques de qualité au niveau de surfaces anatomiques. Ainsi, l'utilisation de la méthode du scanner surfacique repose sur certains principes à respecter, à savoir un choix de résolution suffisante, l'ajout de points de repères sur ou à côté de l'objet, et le poudrage préalable de certains objets d'aspect lisse ou brillant. De même, la photogrammétrie nécessite de respecter ces mêmes principes, ainsi que des prises de photographies sans flash, dans un contexte lumineux naturel plutôt qu'avec une lumière artificielle.

Le 2nd objectif de notre travail était de vérifier la concordance, en terme de reconstruction 3D, des diverses formes à analyser. Concernant cet objectif, nos expériences nous ont permis de conclure que la modélisation par scanner à laser surfacique était préférable à la modélisation par photogrammétrie. En effet, les modèles 3D issus de l'acquisition photogrammétrique ne sont pas représentés à la même échelle, et malgré l'ajout de repères dimensionnels supplémentaires, la reproduction de la structure en 3D n'est pas suffisamment précise pour obtenir un engrainement fiable des modèles.

Le 3^{ème} objectif de notre travail était d'identifier la meilleure des deux méthodes à utiliser dans des conditions usuelles d'identification. Nos expériences nous ont montré que ces deux méthodes doivent être utilisées à des fins différentes et de manière complémentaire. Le scanner surfacique produit des modèles 3D précis en terme de structure et de texture, de même échelle que l'objet d'étude, et peut donc être utilisé pour une mise en concordance de modèles 3D d'un crâne et d'une ou plusieurs arme(s) supposée(s) d'un crime. La photogrammétrie permet, grâce à un matériel simple de mise en œuvre et peu onéreux, l'obtention de modèles 3D de bonne texture, et peut donc être utilisée pour la modélisation d'objets présents sur une scène de crime.

Afin d'apporter d'autres éléments à l'étude, il serait intéressant d'associer l'analyse surfacique à l'analyse volumétrique (21,22) . En effet, la fusion entre la texture issue des analyses surfaciques et le volume issu du CT scan permettrait l'obtention d'un modèle 3D représentatif de la totalité du crâne, ce qui augmenterait la précision des analyses.

Enfin, le prototypage rapide permet aujourd'hui, par l'intermédiaire d'une imprimante 3D, la fabrication de modèles physiques de la pièce anatomique ou de l'objet photographié en résine ou polymère type ABS.

Bibliographie

1. De Bakker BS, Soerdjbalie-Maikoe V, de Bakker HM. The use of 3D-CT in weapon caused impression fractures of the skull, from a forensic radiological point of view. *J Forensic Radiol Imaging*. 2013 Oct;1(4):176–9.
2. Sulaiman NA, Osman KK, Hamzah NN, Amir HS. Blunt force trauma to skull with various instruments. *Malays J Pathol*. 2014;36(1):33–9.
3. Mishchenko ZD. Relationship between skull injuries from blunt objects and its shape. *Sud Med Ekspert*. 1977 Dec;20(4):18–24.
4. Bauer M, Polzin S, Patzelt D. The use of clinical CCT images in the forensic examination of closed head injuries. *J Clin Forensic Med*. 2004 Apr;11(2):65–70.
5. Myers JC, Okoye MI, Kiple D, Kimmerle EH, Reinhard KJ. Three-dimensional (3-D) imaging in post-mortem examinations: elucidation and identification of cranial and facial fractures in victims of homicide utilizing 3-D computerized imaging reconstruction techniques. *Int J Legal Med*. 1999;113(1):33–7.
6. Grassberger M, Gehl A, Püschel K, Turk EE. 3D reconstruction of emergency cranial computed tomography scans as a tool in clinical forensic radiology after survived blunt head trauma—Report of two cases. *Forensic Sci Int*. 2011 Apr;207(1-3):e19–23.
7. Kremer C, Sauvageau A. Discrimination of falls and blows in blunt head trauma: assessment of predictability through combined criteria. *J Forensic Sci*. 2009 Jul;54(4):923–6.
8. Kremer C, Racette S, Dionne C-A, Sauvageau A. Discrimination of falls and blows in blunt head trauma: systematic study of the hat brim line rule in relation to skull fractures. *J Forensic Sci*. 2008 May;53(3):716–9.
9. Pomara C, Fineschi V, Scalzo G, Guglielmi G. Virtopsy versus digital autopsy: virtual autopsy. *Radiol Med (Torino)*. 2009 Dec;114(8):1367–82.
10. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Boesch C, Ozdoba C, et al. Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)--a feasibility study. *J Forensic Sci*. 2003 Mar;48(2):386–403.
11. Filograna L, Tartaglione T, Filograna E, Cittadini F, Oliva A, Pascali VL. Computed tomography (CT) virtual autopsy and classical autopsy discrepancies: Radiologist's error or a demonstration of post-mortem multi-detector computed tomography (MDCT) limitation? *Forensic Sci Int*. 2010 Feb;195(1-3):e13–7.

12. Sansoni G, Cattaneo C, Trebeschi M, Gibelli D, Porta D, Picozzi M. Feasibility of Contactless 3D Optical Measurement for the Analysis of Bone and Soft Tissue Lesions: New Technologies and Perspectives in Forensic Sciences. *J Forensic Sci.* 2009 May;54(3):540–5.
13. Fourie Z, Damstra J, Gerrits PO, Ren Y. Evaluation of anthropometric accuracy and reliability using different three-dimensional scanning systems. *Forensic Sci Int.* 2011 Apr;207(1-3):127–34.
14. Thali MJ, Braun M, Dirnhofer R. Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries. *Forensic Sci Int.* 2003 Nov;137(2-3):203–8.
15. www.creaform3d.com
16. Thali MJ, Braun M, Brueschweiler W, Dirnhofer R. “Morphological imprint”: determination of the injury-causing weapon from the wound morphology using forensic 3D/CAD-supported photogrammetry. *Forensic Sci Int.* 2003 Apr;132(3):177–81.
17. Brüscheweiler W, Braun M, Dirnhofer R, Thali MJ. Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process. *Forensic Sci Int.* 2003 Mar;132(2):130–8.
18. CHEMINADE Julia. La photogrammétrie en odontologie légale: conditions d'acquisition des données et exemples d'application.-69. thèse de doctorat: Chirurgie Dentaire: Bordeaux: 2015; 38.
19. Slot L, Larsen PK, Lynnerup N. Photogrammetric Documentation of Regions of Interest at Autopsy-A Pilot Study. *J Forensic Sci.* 2014 Jan;59(1):226–30.
20. www.nextengine.com.
21. Thali MJ, Braun M, Buck U, Aghayev E, Jackowski C, Vock P, et al. VIRTOPSY-- scientific documentation, reconstruction and animation in forensic: individual and real 3D data based geo-metric approach including optical body/object surface and radiological CT/MRI scanning. *J Forensic Sci.* 2005 Mar;50(2):428–42.
22. Zugibe FT, Costello JT. Identification of the murder weapon by intricate patterned injury measurements. *J Forensic Sci.* 1986 Apr;31(2):773–7.

Autorisation de Publication :

- Autorisation pour l'illustration figure 1 située à la page 177 de l'article suivant : « The use of 3D-CT in weapon caused impression fractures of the skull, from a forensic radiological point of view » de la revue Journal of Forensic Radiology and Imaging n°1 de l'année 2013 :

Rightslink Printable License

19/05/2015 10:59

ELSEVIER LICENSE TERMS AND CONDITIONS

May 19, 2015

This is a License Agreement between Marine Jezequel ("You") and Elsevier ("Elsevier") provided by Copyright Clearance Center ("CCC"). The license consists of your order details, the terms and conditions provided by Elsevier, and the payment terms and conditions.

All payments must be made in full to CCC. For payment instructions, please see information listed at the bottom of this form.

Supplier	Elsevier Limited The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK
Registered Company Number	1982084
Customer name	Marine Jezequel
Customer address	24 rue du Hâ Bordeaux, 33000
License number	3632400662656
License date	May 19, 2015
Licensed content publisher	Elsevier
Licensed content publication	Journal of Forensic Radiology and Imaging
Licensed content title	The use of 3D-CT in weapon caused impression fractures of the skull, from a forensic radiological point of view
Licensed content author	None
Licensed content date	October 2013
Licensed content volume number	1
Licensed content issue number	4
Number of pages	4
Start Page	176
End Page	179
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Format	both print and electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No

<https://s100.copyright.com/App/PrintableLicenseFrame.jsp?publishe...88-ba25-4234-8604-cbc04ddb1213%20&targetPage=printablelicense>

Page 1 sur 8

- Autorisation pour les illustrations (figure 1 située à la page 131 et figure 9 située à la page 137) de l'article suivant : « Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process » de la revue Forensic Science International n°132 de l'année 2003 :

**ELSEVIER LICENSE
TERMS AND CONDITIONS**

May 19, 2015

This is a License Agreement between Marine Jezequel ("You") and Elsevier ("Elsevier") provided by Copyright Clearance Center ("CCC"). The license consists of your order details, the terms and conditions provided by Elsevier, and the payment terms and conditions.

All payments must be made in full to CCC. For payment instructions, please see information listed at the bottom of this form.

Supplier	Elsevier Limited The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK
Registered Company Number	1982084
Customer name	Marine Jezequel
Customer address	24 rue du Hâ Bordeaux, 33000
License number	3632400880416
License date	May 19, 2015
Licensed content publisher	Elsevier
Licensed content publication	Forensic Science International
Licensed content title	Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process
Licensed content author	W. Brüscheiler, M. Braun, R. Dirnhofer and M. J. Thali
Licensed content date	27 March 2003
Licensed content volume number	132
Licensed content issue number	2
Number of pages	9
Start Page	130
End Page	138
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Intended publisher of new work	other
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	2

- Autorisation pour l'illustration figure 5 située à la page 204 de l'article suivant : « Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries » de la revue Forensic Science International n°137 de l'année 2003 :

**ELSEVIER LICENSE
TERMS AND CONDITIONS**

May 19, 2015

This is a License Agreement between Marine Jezequel ("You") and Elsevier ("Elsevier") provided by Copyright Clearance Center ("CCC"). The license consists of your order details, the terms and conditions provided by Elsevier, and the payment terms and conditions.

All payments must be made in full to CCC. For payment instructions, please see information listed at the bottom of this form.

Supplier	Elsevier Limited The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK
Registered Company Number	1982084
Customer name	Marine Jezequel
Customer address	24 rue du Hâ Bordeaux, 33000
License number	3632401036686
License date	May 19, 2015
Licensed content publisher	Elsevier
Licensed content publication	Forensic Science International
Licensed content title	Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries
Licensed content author	Michael J. Thali, Marcel Braun and Richard Dirnhofer
Licensed content date	26 November 2003
Licensed content volume number	137
Licensed content issue number	2-3
Number of pages	6
Start Page	203
End Page	208
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Intended publisher of new work	other
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	2
Format	both print and electronic

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, la Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

Marine JEZEQUEL

Le 10/07/2015

Thèse pour l'obtention du DIPLOME d'ETAT de DOCTEUR en CHIRURGIE DENTAIRE

2015 – n° 57

Discipline : Odontologie médico-légale

Evaluation de deux méthodes pour analyser les impacts laissés par un objet contondant au niveau du crâne : scanner surfacique et photogrammétrie.

Résumé

En odontologie médico-légale, nous sommes parfois confrontés à devoir répondre à la question de confirmer ou d'infirmer une correspondance entre une marque à la surface d'un crâne et la forme d'un objet contondant. Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé deux principes différents d'acquisitions, le laser surfacique et la photogrammétrie, et nous les avons comparés en terme de précision et de fiabilité sur la concordance de la forme de l'objet vulnérant utilisé et des embarrures présentes à la surface crânienne. A partir de têtes d'agneaux, nous avons simulé une agression avec un objet contondant (marteau) sur la voûte crânienne. Nous avons d'abord pris des photos et décharné les crânes. Puis nous avons réalisé l'acquisition par laser surfacique puis photogrammétrique de chacun des crânes et de l'objet vulnérant. Enfin, nous avons exporté les fichiers obj / dxf des différents modèles obtenus sur les logiciels MeshLab et Blender, et nous les avons analysés et comparés. Nos expériences nous ont confirmé la simplicité de mise en œuvre et la fiabilité des deux méthodes dans la modélisation d'un objet, et nous ont permis de conclure que le scanner surfacique est la méthode à privilégier dans l'établissement d'une concordance entre un impact présent sur une surface anatomique et un objet.

Mots-clés

Odontologie légale, photogrammétrie, laser surfacique, objet contondant, similitude

Evaluation of two methods to analyze impacts let by a blunt object on the skull: surface scan and photogrammetry.

Summary

In forensic odontology, sometimes we have to answer the question to confirm or invalidate a match between a mark on a skull area and the shape of a blunt object. In our study, we used two different acquisition methods, the surface laser scan and photogrammetry, and we compared each other in terms of accuracy and reliability on the match of the shape of the blunt object used and the present wounds on the skull area. From lamb heads, we simulated an aggression with a blunt object (hammer) on the skull vault. First we took photos and removed the skulls flesh. We then captured the skull and blunt object using (for both) the surface laser scan and photogrammetry. Finally, we exported obj/dxf data of the different models to MeshLab and Blender software, and we analyzed and compared one to another. Our experimentations confirmed the simplicity and the reliability of the two methods in modeling an object, and permitted to conclude that surface scan is the preferential method in establishment of a concordance between an impact on the anatomic surface and an object.

Key-words

Forensic odontology, photogrammetry, surface laser, blunt object, reliability

Université de Bordeaux – Collège des Sciences de la Santé
UFR des Sciences Odontologiques
16-20 Cours de la Marne
33082 BORDEAUX CEDEX