

Laurent BRUXELLES^{1,2,3,4},
Gérard SUBSOL^{5,4},
Benjamin MORENO⁶,
Jean-Pierre JESSEL⁷,
José BRAGA^{8,4},
Francis THACKERAY^{4,9}
et Ron J. CLARKE⁴

Numérisation 3D *in situ* du squelette d'Australopith que « Little Foot »   Sterkfontein, Afrique du Sud

RÉSUMÉ : Dans cet article, nous décrivons la méthodologie développée pour numériser un site de fouilles d'un très ancien fossile d'hominin  (StW 573, Little Foot), découvert dans les grottes de Sterkfontein, en Afrique du Sud. Nous détaillons les aspects pratiques d'acquisition de vues 3D avec deux scanners 3D laser et la chaîne de traitement des données brutes nécessaire pour obtenir une représentation 3D précise. Ce travail a permis l'enregistrement détaillé de la stratigraphie dans laquelle le fossile était inclus, avant que celui-ci soit extrait de la cavité. Cette sauvegarde du contexte est très importante si l'on considère les enjeux pour la connaissance de l'évolution humaine que constituent l'étude et la datation de ce squelette unique. Nous concluons en présentant quelques applications, en particulier dans la recherche pal oanthropologique.

MOTS-CLÉS : numérisation 3D, fossile, site de fouilles, *Australopith que*, Sterkfontein, Afrique du Sud.

ABSTRACT: *IN SITU 3D SCANNING OF A SKELETON OF AUSTRALOPITHECUS AT STERKFORTEIN CAVES (SOUTH AFRICA). During more than 10 years of careful excavation, Ron Clarke and his colleagues exposed a virtually complete*

skeleton of Australopithecus (StW 573, nicknamed "Little Foot") at Sterkfontein caves, in South Africa. It is now dated of 3.7 million years old [Granger et al., 2015]. This is somewhat older than was published by U-Pb dates for the skeleton [Walker et al., 2006], which, in fact, date a younger flowstone that filled gaps created by subsidence of the breccias containing the skeleton [Bruxelles et al., 2014]. This specimen is exceptional in its completeness and represents a second species of Australopithecus to A. africanus, for which Sterkfontein is well known. Most of the elements of the skeleton are undistorted and preserve anatomical association. However, a few anatomical parts show crushing, fragmentation, scattering, and disarticulation, caused by collapse of portions of the deposit. It has been important to record the details of the skeleton's position and any displacement within the strata so that the orientation and location of the bony elements are carefully archived prior to removal of the bones from the cave. For this purpose, we scanned the excavation site with two 3D laser scanners. Here we describe the methodology we used to digitize the excavation site including Little Foot. We detail the practical aspects of acquiring

3D views with a laser range scanner and the post-processing computer graphics pipeline required to obtain an accurate 3D representation. We used a Konica-Minolta VIVID 910 scanner which is widely used in industrial metrology and a NextEngine HD scanner which is a low-cost desktop device used to digitize small archaeological objects. Post-processing of the 3D views consists in a pipeline of computer graphics procedures: selection of 3D views, global registration, fusion, and simplification, "beautifying" the resulting 3D reconstruction and rendering. One author used only open-source software whereas another author combined the functionalities of several commercial softwares. We conclude by presenting some applications, in particular in paleoanthropological research. High resolution 3D models provide a memory of the geological context to assist interpretation of the skeleton in relation to the detailed stratigraphy. With the 3D digital models, it will be possible to come back to an interactive and non-interpretative view of the context.

KEYWORDS: 3D scanning, fossil, excavation site, *Australopithecus*, Sterkfontein, South Africa.



- (1) INRAP, 561, rue Etienne Lenoir, Km delta, 30900 Nimes, France
- (2) P le Afrique, TRACES, UMR 5608 du CNRS, Universit  de Toulouse Jean Jaur s, 5, all e Antonio Machado, 31058 Toulouse, France
- (3) School of Geography, Archaeology and Environmental Studies, University of Witwatersrand, 1 Jan Smuts Avenue, Braamfontein 2000, Johannesburg, Afrique du Sud
- (4) Human Origins and Past Environments, French-South African Research Program, University of Witwatersrand, 1 Jan Smuts Avenue, Braamfontein 2000, Johannesburg, Afrique du Sud

- (5) Equipe-projet ICAR, LIRMM, CNRS/Université de Montpellier, 161, rue Ada, 34090 Montpellier, France
- (6) IMA Solutions, 19, rue Jean Mermoz, 31100 Toulouse, France
- (7) IRIT, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9, France
- (8) AMIS, UMR 5288 du CNRS, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9, France
- (9) Evolutionary Studies Institute, University of Witwatersrand, 1 Jan Smuts Avenue, Braamfontein 2000, Johannesburg, Afrique du Sud

Introduction

Les grottes de Sterkfontein, situées   l'ouest de Johannesburg en Afrique du Sud, sont bien connues des pal oanthropologues (figure 1). Depuis 1936, date   laquelle Robert Broom a découvert le premier crâne connu d'un Australopith que adulte, plusieurs cavités creusées dans les dolomies néo-archéennes sont devenues des sites de renommée mondiale. Depuis cette époque, ce sont plus d'un millier de vestiges d'hominin s¹, soit plus d'un tiers de tous les fossiles connus, qui ont été découverts dans

1. Les hominin s sont une sous-famille des hominidés. Ils comprennent les gorilles, les chimpanzés ainsi que le genre Homo et ses ancêtres (australopith ques, paranthropes...).

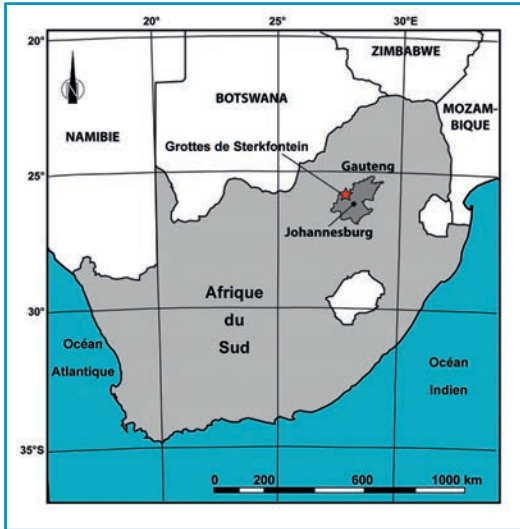


Figure 1 : Carte de localisation des grottes de Sterkfontein. Location of Sterkfontein caves.

ce que l'UNESCO a baptisé en 1999 le « Berceau de l'Humanité ». Ces fossiles sont principalement des dents isolées ou des fragments de mâchoires, de crânes ou de vestiges postcrâniens. Un des exemples les plus connus et les plus complets est le crâne Sts 5 (surnommé « Mrs Ples ») auquel il ne manque que les dents. Sur le site de Sterkfontein, jusqu'à la découverte de Little Foot, seuls deux squelettes très partiels ont été retrouvés mais sans les crânes associés. La fragmentation de ces fossiles peut être provoquée par la prédation qui éparpille les restes, par l'altération de la surface ou par les remaniements divers qu'ont pu connaître ces vestiges et les sédiments qui les emballent [Clarke, 2007 et 2013].

avaient été extraits ces os provenait de décombres de dynamitages effectués par les mineurs dans le remplissage de la cavité afin d'en extraire la calcite utilisée comme fondant pour l'or. D'autres os de pied du même individu furent trouvés par Ron Clarke en 1997 dans les collections de l'Université. Il demanda alors à ses assistants, Stephen Motsumi et Nkwane Molefe, de rechercher sur les affleurements de brèche restés dans la Silberberg Grotto, une section d'os pouvant correspondre au fragment de tibia dont il disposait. En moins de deux jours, ils trouvèrent la localisation du fossile que plusieurs années de fouille ont ensuite progressivement exhumé [Clarke, 1998, 1999, 2002 et 2008]. Il s'agit à ce

jour du squelette d'australopithèque le plus complet connu au monde (plus de 90 %) et en connexion partielle (photo 1).

Le squelette était préservé dans un talus gravitaire développé à la verticale de l'entrée de la cavité et secondairement cimenté par la calcite. Une partie des ossements a connu un effondrement de quelques décimètres, scellé bien plus tard par un plancher stalagmitique [Clarke, 2006 ; Bruxelles et al., 2015]. Sa fouille, complexe et très délicate, a duré plus d'une quinzaine d'années. Le squelette a été extrait de sa gangue de brèche essentiellement à l'aide d'une microfraise pneumatique, comparable à celles utilisées par les dentistes. La surface de fouille est très irrégulière, hérissée de blocs de cherts et perforée de cavités étroites (photo 2).

La découverte de ce squelette quasi complet et unique a permis, pour la première fois, de faire le lien entre un crâne d'australopithèque et son anatomie postcrânienne. La plupart des éléments du squelette ont maintenant été dégagés et de nombreuses connexions anatomiques sont conservées.

L'âge de ce squelette a fait l'objet de plusieurs études depuis sa découverte et a animé de vifs débats. Estimé entre 3 et 3,5 millions d'années par Ron Clarke, toute une série de dates comprises entre -4 et -2,2 millions d'années ont été avancées [Partridge et al., 1999 et 2003 ; Walker et al., 2006 ; Herries et Shaw, 2011 ; Pickering et Kramer, 2010]. Néanmoins, une étude géologique récente [Bruxelles et al., 2014] a permis d'établir une stratigraphie précise et d'écarter les datations réalisées sur les planchers stalagmitiques et qui rajeunissaient considérablement ce fossile. Sur cette base, une nouvelle série de datations cosmogéniques [Granger et al., 2015] vient confirmer ces conclusions et donne à Little Foot un âge de 3,67 millions d'années (+/-160 000 ans).

Cependant, alors que les discussions scientifiques autour de ce fossile exceptionnel étaient encore loin d'être terminées, il devenait nécessaire de l'extraire de la cavité afin de réaliser son étude anatomique détaillée. Conscients qu'une fois déconnecté de son contexte stratigraphique, il deviendrait quasiment impossible de refaire les démonstrations stratigraphiques, nous avons alors proposé de réaliser une numérisation 3D de Little Foot dans son environnement morpho-sédimentaire. Ainsi, l'orientation



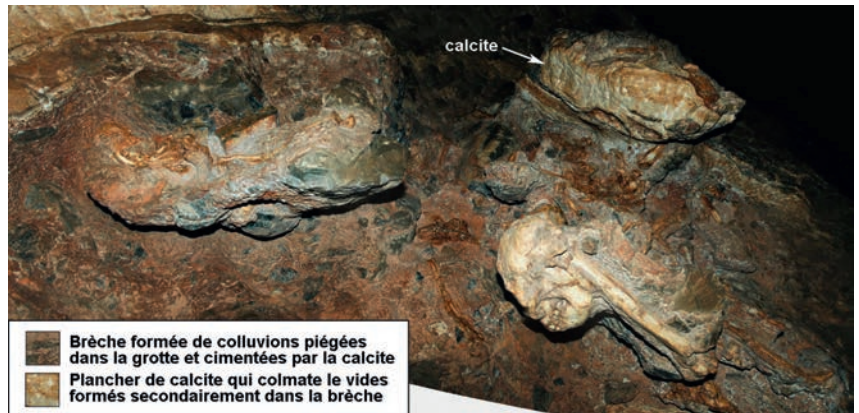
Photo 1 : Etat du site de fouilles de « Little Foot » en janvier 2010. On distingue le crâne de Little Foot tourné vers le bas et son humérus partiellement extrait de la brèche. Cliché L. Bruxelles. In January 2010, numerous bones were partially excavated. We can recognize the complete skull and the humerus on Little Foot.

et l'organisation du squelette, ses liens avec la brèche et la calcite qui l'emballent, mais aussi la géométrie des dépôts sédimentaires, pourraient être enregistrés à haute résolution. Nous avons donc proposé d'utiliser des scanners surfaciques pour avoir une numérisation tridimensionnelle du site aussi exhaustive et précise que possible. La campagne d'acquisition a été menée en janvier 2010, avant que le squelette soit complètement extrait.

I. Procédure de numérisation 3D

La numérisation 3D de grottes ou de sites préhistoriques est maintenant une procédure classique dans les études archéologiques [voir par exemple Hausler et al., 2004, sur la même zone géographique]. Néanmoins, il y a relativement peu de résultats sur la numérisation d'un site en grotte avec les fossiles ou les objets dans leurs positions d'origine. Même si les technologies sont disponibles, il reste beaucoup de problèmes pratiques comme le positionnement des scanners ou des sources de lumières (photos 3), ou encore le traitement des grandes quantités de données obtenues.

Notre objectif était de numériser une surface d'environ 2 m x 3 m, très chaotique du fait de l'extraction des ossements fossiles, avec une résolution de l'ordre du centimètre pour pouvoir utiliser les résultats dans des applications paléanthropologiques. L'acquisition de la géométrie 3D était essentielle ; et l'information de texture (ou de couleur) venait en complément pour aider à l'identification des fossiles ou la caractérisation des matériaux.



Dans les paragraphes suivants, nous décrivons la phase d'acquisition et le traitement des données 3D brutes, très chronophages et plus complexes que prévu.

A. Le matériel

Nous avons utilisé deux scanners surfaciques différents fondés sur la projection de plans laser : un Konica-Minolta VIVID 910², qui est très largement utilisé dans la métrologie industrielle et dans l'étude du patrimoine, et un scanner NextEngine HD³, qui est un équipement peu onéreux, de plus en plus utilisé pour numériser de petits objets archéologiques.

Ces deux équipements sont basés sur la même technique de triangulation : un (VIVID 910) ou plusieurs faisceaux laser (NextEngine HD) sont émis et une caméra numérique, dont la position par rapport à la source laser est connue, capte la réflexion des faisceaux laser qui apparaissent alors comme une ou

Photo 2 : Le squelette est partiellement en connexion à l'exception de la partie centrale qui a subi un léger tassement. On peut reconnaître le bras et la main à gauche, le crâne et l'humérus à droite et les membres inférieurs en haut à droite, au-dessus du plancher de calcite. On perçoit bien ici la surface très accidentée qui devait être scannée et qui a rendu cette numérisation particulièrement complexe. Cliché G. Subsol.

The skeleton is still in connection, except the central part which was affected by a small subsidence. We can recognize the arm and the left hand on the left part of the picture, the skull and the humerus on the right and the legs in the upper right corner, above the flowstone. We can imagine how difficult it was to scan such an irregular surface.



Photos 3 : Quelques exemples de difficultés pratiques rencontrées lors de la phase de numérisation : gestion de la lumière (a), réglage de la profondeur de champ optimale (b et c), positionnement du trépied sur une surface chaotique (d), le tout sans risquer de toucher le fossile... Clichés G. Subsol.

Some practical difficulties: dealing with uncontrolled lighting (a), measuring and tuning the adequate depth of field (b and c) and positioning the scanner tripod on a chaotic surface (d) without touching the fossil...

2. http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/3d/pdf/vivid-910_vi-910_instruction_eng.pdf
3. <http://www.nextengine.com/>

plusieurs lignes déformées. Sur la base de la position des points de ces lignes, la triangulation est possible et l'on peut en déduire leurs coordonnées 3D. Une scène entière peut être numérisée en déplaçant le faisceau verticalement. De plus, une photographie numérique est prise simultanément afin de pouvoir associer les couleurs (on parle aussi de texture) à la reconstruction 3D.

En premier lieu, nous avons testé les deux scanners (avec un objectif TELE pour le VIVID 910) sur un même objet (un fragment d'occipital fossile), ce qui nous a permis d'estimer une résolution équivalente, autour de 0,2 mm. Les principales différences entre les deux systèmes sont reportées dans le tableau 1.

Sur cette base, le NextEngine HD a été essentiellement utilisé pour numériser, avec une texture détaillée, certaines zones précises du squelette comme le crâne ou le bras. Le VIVID 910 a été choisi pour obtenir une numérisation d'ensemble du squelette et de son contexte.

B. Quelques points pratiques

Le processus de numérisation implique de faire l'acquisition de plusieurs scènes depuis différents points de vue, en respectant les contraintes suivantes :

- **limiter au maximum les occultations.** Il faut donc se positionner afin d'éviter que certaines surfaces ne soient pas vues par la caméra ou balayées par le faisceau laser. L'objectif est d'avoir à chaque fois l'acquisition la plus exhaustive possible ;
- **obtenir des données précises** en sélectionnant l'objectif le plus approprié pour avoir une résolution optimale et en adaptant la lumière pour avoir des informations colorimétriques fiables. Il faut obtenir un haut niveau de détails géométriques et photométriques ;
- **acquérir des vues se chevauchant partiellement** afin de pouvoir repositionner et assembler les différentes scènes dans une reconstruction 3D globale ;
- **minimiser le temps de numérisation**, en particulier en déterminant la résolution d'acquisition appropriée (par exemple la densité de points 3D) et en positionnant à chaque fois le scanner de manière optimale.

Dans une grotte, la contrainte de la lumière est à prendre en compte. Si elle est entièrement paramétrable et ne varie pas au cours de la journée, il est nécessaire d'avoir du matériel

	VIVID 910	NextEngine HD
Champ de vue	Jusqu'à 1,5×1,5 m avec l'objectif WIDE	Limité à 0,33×0,25 m en mode Wide
Acquisition couleur	limitée à 640×480 pixels, très sensible à la lumière externe	Capteur 3 Mpixels avec source de lumière blanche intégrée
Temps de scan (1 passe)	~3 s	~3 min
Coût	~45 000 €	~3 000 €

Tableau 1 : Comparaison des deux scanners 3D (les principales différences sont en gras). *Comparison of the 3D digitizers (the main differences are in bold).*

d'éclairage adéquat avec une autonomie et une fiabilité suffisante. De même, le positionnement du tripode du scanner est souvent délicat, et parfois impossible sur des topographies très accidentées (photo 3). Mais la principale difficulté pour ce type d'approche est que la profondeur de champ des scanners est limitée. Les irrégularités et notamment les anfractuosités sont souvent trop étroites et créent de nombreuses occultations.

Lorsque nous avons utilisé le scanner VIVID 910, nous avons recalé automatiquement chaque vue par rapport à la précédente, après avoir défini manuellement au moins trois paires de points de correspondance dans chaque image, grâce au logiciel propriétaire *Polygon Editing Tool*. Notons qu'il est bien plus facile de localiser des points de repère sur la photographie en couleur que sur les sommets des triangles d'un maillage 3D.

C. Le traitement des acquisitions 3D brutes

Le traitement des scènes 3D peut se décomposer en plusieurs étapes :

- 1) **Sélection des acquisitions 3D.** Le but est de retirer les acquisitions sans utilité du fait de leur redondance ou parce qu'elles contiennent des informations inexploitable, en particulier s'il y a trop d'occultations.
- 2) **Recalage global.** Pendant la phase d'acquisition, on effectue un premier alignement qui vise uniquement à réduire la distance moyenne entre les surfaces qui se chevauchent. Ceci doit ensuite être affiné en prenant en compte simultanément toutes les surfaces qui se recouvrent. C'est un point crucial pour obtenir une reconstruction 3D globale. Depuis ces 10 dernières années, plusieurs algorithmes, souvent basés sur la méthode du plus proche voisin (*Iterative Closest Point*), ont été proposés [voir par exemple Rusinkiewicz et Levoy, 2001].

3) **Fusion et simplification.** Une fois les acquisitions recalées, tous les maillages superposés doivent être fusionnés en un seul. Cependant, les points extraits des différentes vues n'ont pas exactement la même position du fait de la quantification, de l'imprécision ou des artefacts du procédé de numérisation. Un choix ou une moyenne doit être fait. La fusion est aussi étroitement associée avec l'étape de simplification. Elle consiste en la réduction, par suppression ou par fusion entre les points les plus proches, d'un certain nombre de points. Ceci est essentiel afin d'éviter une reconstruction trop complexe du modèle 3D qui, à défaut, sera composée de $n \times p$ points, avec n correspondant au nombre d'acquisitions (généralement de 10 à 30) et p le nombre de sommets du maillage 3D obtenu (de 50 000 à 300 000). Un autre problème est de fusionner les couleurs sur un même point qui, selon les vues, peut avoir différents attributs de colorimétrie, dus notamment à des différences d'éclairage.

4) **Amélioration de la reconstruction 3D.** Le but est d'enlever les défauts visuels. Il peut y avoir des pics ou du bruit liés au processus d'acquisition ou à l'étape de simplification. Mais ces défauts peuvent être réduits par les fonctions de lissage. Une des difficultés est d'effacer les trous générés par les occlusions. Certains algorithmes détectent les trous et appliquent des correctifs (patches) sur l'ensemble de leur surface. Ces patches doivent respecter une certaine continuité de courbure afin de ne pas être trop visibles.

5) **Calcul du rendu.** Cette étape consiste à afficher la reconstruction 3D finale en définissant le point de vue, l'éclairage et toutes les informations d'ombrage (qui, afin de créer un effet réaliste, va par exemple modifier la couleur d'un

sommet du maillage en se fondant sur son angle et sa distance par rapport à la source de lumière). De plus, il est possible de plaquer une couleur, une texture artificielle ou une photographie sur la géométrie. Par exemple, dans la photo 4, nous avons colorié les parties osseuses en jaune clair alors que nous avons donné à la brèche, dans laquelle est pris le fossile, une texture proche de celle de la roche (grise, rugueuse et mate).

Pour le traitement des données du NextEngine, l'un de nous (BM) a utilisé le logiciel fourni avec le scanner. Pour celles provenant du VIVID 910, un des auteurs (GS) a utilisé le logiciel open-source et gratuit MeshLab⁴ alors qu'un autre (BM) a combiné les fonctionnalités de plusieurs logiciels commerciaux présentés dans le tableau 2.

II. Résultats

Dans les photos 5, nous présentons la numérisation en 3D de l'avant-bras de Little Foot. Comme on peut le voir sur la photo correspondante (photo 5a), les os sont brisés en plusieurs parties et les os des doigts miment encore le poing fermé, avec le pouce à l'intérieur. Pour aboutir à ce résultat, 18 vues ont été acquises avec le scanner NextEngine (photo 5b). Elles ont été recalées et fusionnées pour aboutir à une reconstruction 3D en couleurs de plus d'un million de triangles pour une surface de 0,2 m².

Pour obtenir la reconstruction 3D de l'ensemble du site, le processus a été quelque peu complexe car il y avait de nombreuses occultations. Elle a impliqué la réalisation de nombreuses vues. Il a fallu également être très précis pendant la phase de recalage global et interpoler de nombreux trous dans le maillage. Trois jours ont été nécessaires à deux personnes entraînées pour acquérir 57 vues frontales, 23 latérales droite et 12 latérales gauche avec l'objectif MIDDLE, ce qui correspond à un champ de vision de 0,6 x 0,6 m. Au final, nous avons sélectionné 37 vues afin de reconstruire le modèle 3D constitué de 1,2 million de triangles. Cela correspond à une précision estimée au sol de 0,5 mm. Cette définition nous permet d'identifier les os qui sont figurés en jaune clair (photo 4), mais aussi de reconnaître les principaux traits sédimentaires : brèche, plancher de calcite, blocs, matrice.

Etapes	MeshLab	Logiciels commerciaux
Recalage global	"Align tool" avec les paramètres par défaut	Plusieurs logiciels en fonction des résultats : "Align tool" dans le logiciel de NextEngine et "Register/Fine" dans RapidForm XOR2
Fusion	"Flatten visible layers"	
Simplification	"Clustering decimation"	"Decimate" dans RapidForm XOR2
Amélioration	"Smoothing, fairing" mais la fonction d'interpolation des trous est trop limitée	"Fill hole/curvature method" dans RapidForm XOR2
Rendu	"Face ambient occlusion" et contrôle de la lumière	Coloriage et rendu avec ZBrush 3.5 (logiciel de sculpture et de peinture numérique)

Tableau 2 : Fonctionnalités des différents logiciels utilisés pour le traitement. *Software functionalities used for post-processing.*

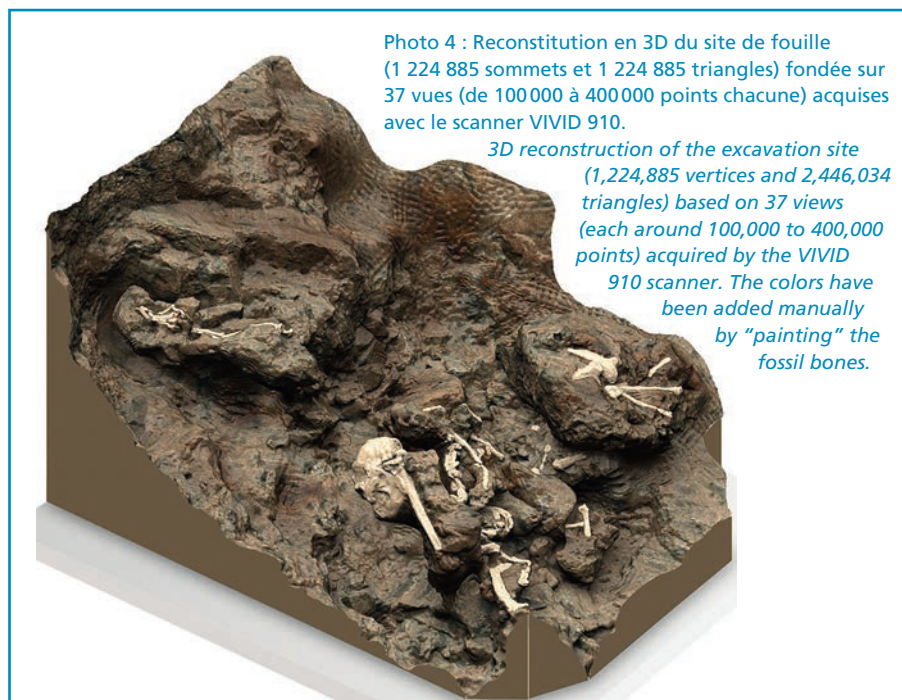


Photo 4 : Reconstitution en 3D du site de fouille (1 224 885 sommets et 1 224 885 triangles) fondée sur 37 vues (de 100 000 à 400 000 points chacune) acquises avec le scanner VIVID 910.

3D reconstruction of the excavation site (1,224,885 vertices and 2,446,034 triangles) based on 37 views (each around 100,000 to 400,000 points) acquired by the VIVID 910 scanner. The colors have been added manually by "painting" the fossil bones.

Photos 5 : Comparaison entre la photographie de l'avant-bras gauche de Little Foot (A) et la reconstruction 3D (535 668 sommets / 1 067 723 triangles) (B). Ce modèle a été réalisé à partir de 18 vues (avec chacune entre 100 000 à 400 000 points) acquises avec le scanner NextEngine.

Comparison between the picture of the left arm of Little Foot (A) and the 3D reconstruction (535,668 vertices / 1,067,723 triangles) (B). This model is based on 18 views (each around 100,000 to 400,000 points) acquired by the NextEngine scanner.



4. freeware disponible à : <http://meshlab.sourceforge.net/>

Pour ces deux reconstitutions, le temps de traitement est estimé à une semaine au minimum pour une personne maîtrisant les outils logiciels.

III. Discussion et conclusions

Sur la base de cette numérisation en 3D, nous arrivons aux mêmes conclusions que celles reportées dans Mc Pherron et al. [2009]. Nous avons pu scanner 1 à 2 m² par jour sur une surface très accidentée. Le traitement des données brutes, afin d'obtenir un maillage 3D exploitable, a pris à peu près 10 fois plus de temps que le scan en lui-même. Le problème technique le plus complexe était avant tout le positionnement du dispositif afin d'optimiser la surface scannée et de réduire au maximum les occultations. En outre, il a été impossible d'acquérir certaines zones plus petites mais plus complexes, à cause de la profondeur de champ limitée. Enfin, le contrôle de l'intensité de la lumière et des couleurs a été un véritable défi, même si la texture n'a pas été acquise sur la totalité de la surface numérisée.

En conclusion, nous considérons qu'il est essentiel de consacrer du temps (au moins une journée) pour tester le matériel *in situ* ou dans un site comparable afin de régler les paramètres, préparer le protocole de numérisation et tester le positionnement des scanners. Deux mois avant cette opération en Afrique du Sud, nous avons testé le Minolta VIVID

910 dans la grotte de Trabuc (Gard) qui présentait des configurations similaires à celle de Sterkfontein. Cette expérience nous a permis de définir précisément la surface de chevauchement nécessaire afin de pouvoir fusionner avec précision les différentes vues. Nous avons également pu tester la chaîne de traitement des données qui serait requise une fois sur le site d'étude.

Au point de vue de l'application, ce modèle 3D constitue la mémoire du contexte géologique de Little Foot. Avec l'acquisition de la texture, il est possible de distinguer les brèches des planchers de calcite et même de les mettre en exergue afin d'illustrer cette stratigraphie complexe. Ceci prend tout son sens lorsque l'on sait que c'est l'identification de ces géométries qui a permis d'aboutir à une datation fiable et cohérente [Bruxelles et al., 2014 ; Granger et al., 2015]. Aujourd'hui, alors que le squelette n'est plus dans la grotte, il est encore possible d'observer et de travailler sur le fossile comme s'il était encore dans son contexte stratigraphique. Avec ce modèle 3D, nous disposons d'une vue interactive et non interprétée de la position du fossile et de son environnement. C'est une véritable mémoire objective sur laquelle les chercheurs pourront revenir au gré des questionnements futurs.

Avec la poursuite de la numérisation complète de la salle où se trouvait Little Foot, il sera possible d'intégrer ces

modèles 3D dans un modèle plus large [Lambers et al., 2007], comme celui de la cavité voire même des alentours de la grotte de Sterkfontein [Bruxelles et al., 2009]. Ceci permettra aux paléanthropologues de replacer leurs objets d'étude dans un champ plus large, intégrant les aspects morphologiques et paléoenvironnementaux de ces hominidés et pouvant illustrer les modalités de taphonomie des vestiges.

Remerciements

Nous remercions Nkwane Molefe et Stephen Motsumi pour leur aide très précieuse lors de la numérisation 3D. Ce travail a été partiellement financé par le programme de recherche franco-sud-africain HOPE (« Human Origins and Past Environments »), par le projet de coopération scientifique internationale INLOO du CNRS (« 3D information and engineering technologies for analysis of the Homo genus in South Africa ») et par le ministère français des Affaires étrangères (mission archéologique du site de fouilles de Kromdraai B).

Les opérations de recherche en Afrique du Sud sont également soutenues par le Department of Science and Technology au travers de l'African National Research Foundation (NRF), par la fondation Ford, par la fondation Andrew W. Mellon et par l'Université du Witwatersrand à Johannesburg.

Bibliographie

BRUXELLES L., BRAGA J., DURANTHON F. and THACKERAY F., 2009 - New researches in a famous karst area: the cradle of humankind (South Africa). *Int. Congr. Speleology*, Kerrville, USA: 64-68.

BRUXELLES L., CLARKE R. J., MAIRE R., ORTEGA R. and STRATFORD D., 2014 - Stratigraphic analysis of the Sterkfontein StW 573 Australopithecus skeleton and implications for its age. *J. Hum. Evol.*, 70: 36-48.

CLARKE R. J., 1998 - First ever discovery of a well-preserved skull and associated skeleton of *Australopithecus*. *S. Afr. J. Sci.*, 94: 460-463.

CLARKE R. J., 1999 - Discovery of complete arm and hand of the 3.3 million-year-old *Australopithecus* skeleton from Sterkfontein. *S. Afr. J. Sci.*, 95: 477-480.

CLARKE R. J., 2002 - Newly revealed information on the Sterkfontein Member 2 *Australopithecus* skeleton. *S. Afr. J. Sci.*, 98: 523-526.

CLARKE R. J., 2006 - A deeper understanding of the stratigraphy of Sterkfontein fossil hominid site. *Trans. R. Soc. S. Afr.*, 61: 111-120.

CLARKE R. J., 2007 - Taphonomy of Sterkfontein Australopithecus skeletons. In: PICKERING T. R., SCHICK K. and TOTH N. (eds), *Breathing Life into Fossils: Taphonomic studies in Honor of C. K. (Bob) Brain*, Bloomington (Indiana), Stone Age Institute Press: 167-173.

CLARKE R. J., 2008 - Latest information on Sterkfontein's *Australopithecus* skeleton and a new look at *Australopithecus*. *S. Afr. J. Sci.*, 104: 443-449.

CLARKE R. J., 2013 - *Australopithecus* from Sterkfontein Caves, South Africa. In: REED K., FLEAGLE J. G., LEAKEY R. E. (Eds.), *The Paleobiology of Australopithecus*. Dordrecht, Springer: 105-123.

CLARKE R. J. and TOBIAS P. V., 1995 - Sterkfontein member 2 foot bones of the oldest South African hominid. *Science*, 269: 521-524.

GRANGER D., GIBBON R., CLARKE R., KUMAN K., BRUXELLES L. and CAFFE M., 2015 - Cosmogenic burial ages for *Australopithecus* StW 573 and the Oldowan Infill at Sterkfontein. *Nature*, 04-2015, DOI: 10.1038/nature14268.

HAUSLER M., ISLER K., SCHMID P. and BERGER L., 2004 - 3-D digital mapping of the early hominid site of Gladysvale cave, South Africa. *Human Evolution*, 19, 1: 45-52.

HERRIES A.I.R. and SHAW J., 2011 - Palaeomagnetic analysis of the Sterkfontein palaeocave deposits: Implications for the age of the hominid fossils and stone tool industries. *Journal of Human Evolution*. 60: 523-539.

LAMBERS K., EISENBEISS H., SAUERBIER M., KUMPFERSCHMIDT D., GAISECKER T., SOTOODEH S. et al., 2007 - Combining photogrammetry and laser

scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*. 2007, 34, 10: 1702-1712

MC PHERRON S. P., GERNAT T. and HUBLIN J.-J., 2009 - Structured light scanning for high-resolution documentation of *in situ* archaeological finds. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1: 19-24.

PARTRIDGE T. C., SHAW J., HESLOP D. and CLARKE R. J., 1999 - The new hominid skeleton from Sterkfontein, South Africa: age and preliminary assessment. *J. Quatern. Sci.*, 14: 293-298.

PARTRIDGE T. C., GRANGER D. E., CAFFE M. W. and CLARKE R. J., 2003 - Lower Pliocene hominid remains from Sterkfontein. *Science*, 300: 607-612.

PICKERING R. and KRAMERS D., 2010 - Re-appraisal of the stratigraphy and determination of new U-Pb dates for the Sterkfontein hominid site, South Africa. *J. Hum. Evol.*, 59: 70-86.

RUSINKIEWICZ S. and LEVOY M., 2001 - Efficient variants of the ICP algorithm. *Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001 Proceedings*: 145-152.

WALKER J., CLIFF R. A. and LATHAM A. G., 2006 - U-Pb isotopic age of the StW 573 hominid from Sterkfontein, South Africa. *Science*, 314: 1592-1594.